



**TAŞITLARDA KULLANILAN POLİMER  
MATRİSLİ KOMPOZİT YAN DARBE  
KİRİŞLERİNİN TASARIMI VE ANALİZLERİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ercan ŞİMŞİR**

**Danışman**

**Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN**

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Haziran 2020**

Bu tez çalışması 17. FEN. BİL. 65 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**TAŞITLARDA KULLANILAN POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT  
YAN DARBE KİRİŞLERİNİN TASARIMI VE ANALİZLERİ**

**Ercan ŞİMŞİR**

**Danışman**

**Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN**

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Haziran 2020**

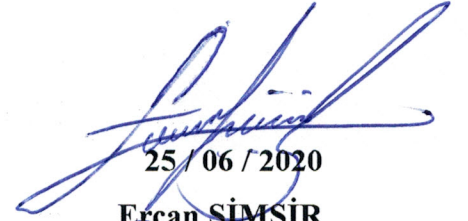
## **BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**

**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

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

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

**beyan ederim.**

  
25 / 06 / 2020  
**Ercan ŞİMŞİR**

## ÖZET

Doktora Tezi

### TAŞITLARDA KULLANILAN POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT YAN DARBE KİRİŞLERİNİN TASARIMI VE ANALİZLERİ

Ercan ŞİMŞİR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

Dünya’ da son zamanlarda otomotiv sektöründeki gelişmeler, taşıt sayısındaki artış ile çevresel problemlerin yanı sıra güvenlik de ön plana çıkmıştır. Günümüzde otomotiv endüstrisi yüksek güvenlik seviyelerine sahip, az yakıt tüketen otomobillerin geliştirilmesine ve düşük maliyetli üretim yöntemleri üzerine odaklanmaktadır. Bunun gerçekleştirilmesi için uygun tasarımların, daha hafif ve yüksek darbeleri sönümleme imkânı verecek malzemelerin kullanımı ile sağlanabilecektir. Taşıtta ağırlık azalımı her bölgede olduğu gibi şasi ve kaporta alanında da olmaktadır.

Yapılan çalışma ile otomobillerde yan darbe kirişlerde bir taraftan ağırlık azalımı ve yakıt tüketiminde düşme sağlanmış diğer taraftan da özellikle yan darbelere dayanıklı güvenli yapı oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle metal kirişler daha ekonomik olduğu için tercih edilip kullanılmaktadır. Kompozitler çelik malzemeye göre çok daha hafif ve dayanıklı yapıya sahip olmasından dolayı son yıllarda kompozit malzeme kullanımı daha çok ön plana çıkmaktadır. Böylelikle kompozit malzemeler teknolojinin gelişmesi ile birlikte otomotiv sanayinde daha etkin kullanılmaya başlamıştır.

Çalışmada, bal petek sandviç yapıli kompozit kullanarak, uygun kiriş malzeme seçimi, numune malzemeler üretilmesi ve prototip yan darbe kiriş profil üretilmesi yapılmıştır. Bal petek sandviç yapıların üst yüzeyin de karbon fiber takviyeli epoksi malzeme, çekirdek malzeme olarak da Alüminyum ve Nomex bal peteği kullanılmıştır. Üretilen test numunelerine üç nokta eğme, çekme ve darbe testi uygulanmıştır. Farklı malzeme oryantasyonları kullanarak kirişin dayanım, darbe, ağırlık vb. parametreleri deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda  $C_4^8$  dizilimine sahip karbon fiber fiziksel ve oryantasyon özellikleri nedeniyle seçilmiştir. C ve O olmak üzere iki farklı profil üzerinde çalışma yapılarak karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemeden yan darbe kirişi üretilmesi yapılmıştır. Üretimi yapılan C profil Alimünyum ve Nomex bal petek çekirdek yapıli ve O profil karbon fiber yan darbe kirişlere 2500 mm, 2750 mm ve 3000 mm yüksekliklerden serbest ağırlık düşürme metodu ile testler yapılmıştır. Böylelikle otomobillerde yan kirişlere gelen darbeleri engellemek için kullanılan kirişlerin optimal tasarımı gerçekleştirilebilecektir. Bir taraftan alternatif kompozit malzemeler (karbon-elyaf takviyeli epoksi, polietilen) kullanarak otomobillerde ağırlık azalımı ve yakıt tüketiminde düşme sağlanarak diğer taraftan ise özellikle yan kirişlerin darbelere karşı dayanıklılığı artırarak güvenli yapı oluşturulacaktır.

**2020, xvii + 164 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Yan Darbe Kirişi, Kompozit, Taşıt, Darbe Dayanımı

## **ABSTRACT**

Ph.D. Thesis

### **DESIGN AND ANALYSIS OF POLYMER MATRIX COMPOSITE SIDE IMPACT BEAM OF VEHICLES**

Ercan ŞİMŞİR

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

**Supervisor:** Prof. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

In recent years, with the development in the automotive sector and the increase in the number of vehicles in the world, security problems have come to the forefront as well as environmental problems. Today, the automotive industry focuses on the development of low-fuel-consuming automobiles with high safety levels and low-cost production methods. Appropriate designs for achieving this can be achieved through the use of materials that allow lighter and higher pulsation damping. In the vehicle, weight reduction occurs in the chassis and bodywork area as in every region.

With the work done, a decrease in weight and fuel consumption will be achieved on the side impact beams in cars, and on the other hand, a safe structure that is resistant to side impacts has been created. When studies done up to now are examined, metal beams are generally preferred because they are more economical. In recent years composite materials have become more prominent. This is due to the fact that composites are much lighter and stronger than steel materials. Thus, with the development of composite materials technology, it has started to be used more effectively in the automotive industry.

In this study, using the honeycomb sandwich structure composite, appropriate beam material selection, sample materials and prototype side impact beam profiles were produced. Carbon fiber reinforced epoxy material on the top surface of honeycomb

sandwich structures, Aluminum and Nomex honeycomb was used as core material. Three point bending, tensile and impact tests were applied to the produced test samples. By using different material orientations, the strength, impact, weight etc. parameters of the beam are experimentally examined. As a result of the experiments, carbon fiber material with C<sub>4</sub><sup>8</sup> sequence was chosen. By working on two different profiles, C and O side impact beam was produced from carbon fiber reinforced polymer composite material. The produced C profile Aluminum and Nomex honey honeycomb core structure and O profile carbon fiber side impact beams were tested with free weight reduction method from 2500 mm, 2750 mm and 3000 mm heights. Thus, the optimal design of the beams used in cars to prevent impacts to the side beams can be realized. By using alternative composite materials (carbon-fiber reinforced epoxy, polyethylene) on one side, a decrease in fuel consumption and a reduction in fuel consumption will be provided, while on the other hand, a safety structure will be created by increasing the resistance of the side beams against impacts.

**2020, xvii + 164 pages**

**Keywords:** Side impact beam, Composite, Vehicle, Impact Resistance

## TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim boyunca her aşamada, her türlü sorunun çözümünde bilgi birikimi ve anlayışıyla desteğini esirgemeyen bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN ve Sayın Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi İbrahim YAVUZ, Dr. Öğr. Üyesi Yelda AKÇİN ERGÜN ve Arş. Gör. Dr. İ. Sinan ATLI'ya her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm öğretim elemanlarına ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmamı 17.FEN.BİL.65 numaralı proje ile maddi olarak desteklediği ve çalışmalarımın yürütülmesinde kolaylık sağladığı için Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP)' ne teşekkür ederim.

İlgi ve destekleriyle her zaman yanımda olan, sevgili aileme tez yazım aşamasında ve tüm aksiliklerde sürekli yanımda olan eşime desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Ercan ŞİMŞİR  
Afyonkarahisar 2020

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

|                                                                      | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                           | i     |
| ABSTRACT .....                                                       | iii   |
| TEŞEKKÜR .....                                                       | v     |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....                                             | vi    |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....                                 | x     |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                | xi    |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                              | xiv   |
| RESİMLER DİZİNİ.....                                                 | xv    |
| 1. GİRİŞ .....                                                       | 1     |
| 1.1 Kompozit Malzemeler .....                                        | 2     |
| 1.2 Kompozit Malzemenin Sınıflandırılması.....                       | 3     |
| 1.3 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları.....                     | 8     |
| 1.4 Polimer Matrisli Kompozit Malzemenin Üretim Yöntemleri .....     | 11    |
| 1.5 Tabakalı Kompozit Yapıda Oluşan Hasar Modları .....              | 17    |
| 1.6 Bal Peteği Sandviç Yapılı Kompozit Malzemeler.....               | 18    |
| 1.7 Bal Peteği Yapıların Üretim Yöntemleri .....                     | 23    |
| 1.8 Bal Peteği Sandviç Yapıların Uygulama Alanları.....              | 25    |
| 1.9 Sandviç Yapılı Kompozitlerde Yapıda Oluşan Hasar Modları .....   | 28    |
| 1.10 Darbe Test Metotları ve Hasar Değerlendirmeleri .....           | 29    |
| 1.10.1 Düşük Hızlı Darbe Test Metotları .....                        | 30    |
| 1.10.2 Yüksek Hızlı Darbe Test Metotları.....                        | 33    |
| 1.11 Kompozit Malzemelerinin Darbe Davranışlarının Belirlenmesi..... | 34    |
| 1.11.1 Kuvvet-Zaman (F-t) Eğrisi.....                                | 34    |
| 1.11.2 Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrisi .....                               | 35    |
| 1.11.3 Hız-Zaman (V-t) Eğrisi.....                                   | 36    |
| 1.11.4 Çökme-Zaman (d-t) Eğrisi .....                                | 36    |
| 1.11.5 Absorbe Edilen Enerji-Zaman ( $E_a$ -t) Eğrisi .....          | 37    |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                                       | 38    |
| 2.1 Tabakalı Kompozit Malzemeler ile İlgili Yapılan Çalışmalar ..... | 38    |
| 2.2 Bal Petek Sandviç Yapılı ile İlgili Yapılan Çalışmalar .....     | 43    |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3 Otomobillerde Kullanılan Yan Darbe Kiriş Profiller ile İlgili Yapılan Çalışmalar ..... | 53 |
| 3. MATERYAL VE METOT.....                                                                  | 64 |
| 3.1 Deneysel Üretim Süreci Akış Diyagram.....                                              | 64 |
| 3.2 Vakum Torbalama Yöntemi.....                                                           | 66 |
| 3.3 Vakum Torbalama Yöntemi Ana Elemanları.....                                            | 66 |
| 3.4 Deneysel Yöntem ve Malzeme Üretim Aşamaları .....                                      | 69 |
| 3.5 Karbon Fiber Malzemeden Numune Plaka Hazırlanması .....                                | 70 |
| 3.6 Farklı Oryantasyonlu Karbon Fiber Malzeme Üretim Aşamaları.....                        | 72 |
| 3.6.1 C <sub>1</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Karbon Fiber Plaka Üretimi.....        | 72 |
| 3.6.2 C <sub>2</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Karbon Fiber Plaka Üretimi .....       | 73 |
| 3.6.3 C <sub>3</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Karbon Fiber Plaka Üretimi.....        | 75 |
| 3.6.4 C <sub>4</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Karbon Fiber Plaka Üretimi.....        | 76 |
| 3.7 Üç Nokta Eğme Testi.....                                                               | 78 |
| 3.8 Çekme Testi.....                                                                       | 80 |
| 3.8.1 Çekme Test Numunesinin Çene Kısmı İçin Silikon Kalıp Hazırlanması ....               | 80 |
| 3.8.2 Üniversal Çekme Test Makinası .....                                                  | 82 |
| 3.9 Alüminyum Bal Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzeme Üretim Yöntemleri.....        | 84 |
| 3.9.1 Darbe Testi İçin Numune Hazırlanması .....                                           | 85 |
| 3.9.1.1 C <sub>1</sub> <sup>8</sup> Oryantasyonlu Darbe Test Numune Üretimi .....          | 86 |
| 3.9.1.2 C <sub>2</sub> <sup>8</sup> Oryantasyonlu Darbe Test Numune Üretimi .....          | 86 |
| 3.9.1.3 C <sub>3</sub> <sup>8</sup> Oryantasyonlu Darbe Test Numune Üretimi .....          | 87 |
| 3.9.1.4 C <sub>4</sub> <sup>8</sup> Oryantasyonlu Darbe Test Numune Üretimi .....          | 88 |
| 3.9.2 Darbe Test Cihazı .....                                                              | 89 |
| 3.10 Yan Darbe Kiriş Üretimi.....                                                          | 90 |
| 3.10.1 Bal Petek Sandviç Yapılı Alüminyum Karbon Fiber C Profil Kiriş Üretimi .....        | 92 |
| 3.10.2 Bal Petek Sandviç Yapılı Nomex Karbon Fiber C Profil Kiriş Üretimi....              | 93 |
| 3.10.3 Karbon fiber O Profil Kiriş Üretimi .....                                           | 95 |
| 3.11 Serbest Ağırlık Düşürme.....                                                          | 97 |
| 3.11.1 Test Meteryal'in Solidworks Katı Model Çizimi.....                                  | 97 |

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.11.2 Serbest Ağırlık Düşürme Cihazı.....                                                                           | 100 |
| 4. BULGULAR.....                                                                                                     | 102 |
| 4.1 Üç Nokta Eğme Testi.....                                                                                         | 102 |
| 4.1.1 C <sub>1</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Üç Nokta Eğme Testi.....                                         | 102 |
| 4.1.2 C <sub>2</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Üç Nokta Eğme Testi .....                                        | 103 |
| 4.1.3 C <sub>3</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Üç Nokta Eğme Testi.....                                         | 104 |
| 4.1.4 C <sub>4</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Üç Nokta Eğme Testi.....                                         | 105 |
| 4.2 Çekme Testi.....                                                                                                 | 107 |
| 4.2.1 C <sub>1</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Kuvvet / Uzama Değişimi .....                                    | 107 |
| 4.2.2 C <sub>2</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Kuvvet / Uzama Değişimi.....                                     | 108 |
| 4.2.3 C <sub>3</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Kuvvet / Uzama Değişimi.....                                     | 109 |
| 4.2.4 C <sub>4</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Kuvvet / Uzama Değişimi.....                                     | 110 |
| 4.3 Alüminyum Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzemelere Darbe Testi                                             |     |
| Uygulaması.....                                                                                                      | 112 |
| 4.3.1 C <sub>1</sub> <sup>8</sup> Oryantasyonlu Numunenin Darbe Testi .....                                          | 112 |
| 4.3.2 C <sub>2</sub> <sup>8</sup> Oryantasyonlu Numunenin Darbe Testi .....                                          | 113 |
| 4.3.3 C <sub>3</sub> <sup>8</sup> Oryantasyonlu Numunenin Darbe Testi .....                                          | 114 |
| 4.3.4 C <sub>4</sub> <sup>8</sup> Oryantasyonlu Numunenin Darbe Testi .....                                          | 115 |
| 4.3.5 Alüminyum Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzemeye ait Kuvvet-<br>Çökme (F-d) Eğrileri.....                | 116 |
| 4.3.5.1 C <sub>1</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Numunenin Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrisi.....                             | 116 |
| 4.3.5.2 C <sub>2</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Numunenin Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrisi .....                            | 117 |
| 4.3.5.3 C <sub>3</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Numunenin Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrisi .....                            | 118 |
| 4.3.5.4 C <sub>4</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Numunenin Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrisi .....                            | 119 |
| 4.3.5.5 Numunelere Ait Ortalama Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrileri.....                                                     | 120 |
| 4.3.6 Alüminyum Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzemeye ait Absorbe<br>Edilen Enerji-Zaman (Ea-t) Eğrileri..... | 121 |
| 4.3.6.1 C <sub>1</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Numunenin Absorbe Edilen Enerji-Zaman (Ea-t)<br>Eğrisi.....    | 122 |
| 4.3.6.2 C <sub>2</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Numunenin Absorbe Edilen Enerji-Zaman (Ea-t)<br>Eğrisi.....          | 123 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.6.3 C <sub>3</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Numuneninin Absorbe Edilen Enerji-Zaman (Ea-t) |     |
| Eğrisi.....                                                                                    | 124 |
| 4.3.6.4 C <sub>4</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Numuneninin Absorbe Edilen Enerji-Zaman (Ea-t) |     |
| Eğrisi.....                                                                                    | 125 |
| 4.3.6.5 Malzemelere Ait Ortalama Absorbe Edilen Enerji-Zaman (Ea-t) Eğrisi                     |     |
| .....                                                                                          | 126 |
| 4.3.7 Alüminyum Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzemeye ait Hız-Zaman                     |     |
| (V-t) Eğrileri .....                                                                           | 128 |
| 4.3.7.1 C <sub>1</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Numuneninin Hız-Zaman (V-t) Eğrisi ..... | 128 |
| 4.3.7.2 C <sub>2</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Numuneninin Hız-Zaman (V-t) Eğrisi ..... | 129 |
| 4.3.7.3 C <sub>3</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Numuneninin Hız-Zaman (V-t) Eğrisi ..... | 130 |
| 4.3.7.4 C <sub>4</sub> <sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Numuneninin Hız-Zaman (V-t) Eğrisi ..... | 131 |
| 4.3.7.5 Numunelere Ait Ortalama Hız-Zaman (V-t) Eğrisi.....                                    | 132 |
| 4.3.8 Al Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzemeye ait Çökme-Zaman (d-t)                    |     |
| Eğrileri.....                                                                                  | 133 |
| 4.4 Serbest Ağırlık Düşürme Testi.....                                                         | 134 |
| 4.4.1 C Profil Alüminyum Petek Yapılı Karbon Fiber Kirişe Serbest Ağırlık                      |     |
| Düşürme Testi.....                                                                             | 134 |
| 4.4.2 C Profil Nomex Petek yapılı Karbon Fiber kirişe Serbest Düşme Testi ...                  | 138 |
| 4.4.3 O Profil Karbon Fiber Kirişe Serbest Düşme Testi.....                                    | 141 |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....                                                                      | 146 |
| 6. KAYNAKLAR .....                                                                             | 151 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                                  | 163 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

|                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Alüminyum Oksit                |
| Al                             | Alüminyum                      |
| E                              | Elastisite modülü (GPa)        |
| J                              | Joule                          |
| CO <sub>2</sub>                | Karbondioksit                  |
| A                              | Kesit alanı (mm <sup>2</sup> ) |
| [ ] <sub>s</sub>               | Kompozit malzemenin simetrisi  |
| L <sub>v</sub>                 | Mesnetler arası mesafe (mm)    |
| SiC                            | Silisyum Karbür                |

### Kısaltmalar

|                             |                                                                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ASTM                        | American Society for Testing and Materials                                           |
| C <sub>1</sub> <sup>8</sup> | 8 tabakalı [0°/0°/0°/0°/0°/0°/0°/0°] yönlendirmeli kompozit malzeme.                 |
| C <sub>2</sub> <sup>8</sup> | 8 tabakalı [0°/90°/0°/90°/0°/90°/0°/90°] yönlendirmeli kompozit malzeme.             |
| C <sub>3</sub> <sup>8</sup> | 8 tabakalı [+45°/-45°/+45°/-45°/+45°/-45°/+45°/-45°] yönlendirmeli kompozit malzeme. |
| C <sub>4</sub> <sup>8</sup> | 8 tabakalı [0°/90°/+45°/-45°/-45°/+45°/90°/0°] yönlendirmeli kompozit malzeme.       |
| CFRP                        | Karbon fiber takviyeli polimer                                                       |
| RTM                         | Reçine Transfer kalıplama                                                            |
| VARIM                       | Vakum destekli reçineli infüzyon metodu                                              |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                           | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1 Kompozit malzeme .....                                                                                          | 2     |
| Şekil 1.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması .....                                                                   | 3     |
| Şekil 1.3 Fiber takviyeli kompozit ve bileşenleri .....                                                                   | 5     |
| Şekil 1.4 Fiber (Elyaf) takviyeli kompozitler.....                                                                        | 5     |
| Şekil 1.5 Tabakalı kompozit üretimin şematik gösterimi. ....                                                              | 6     |
| Şekil 1.6 Araçlarda kullanılan bazı kompozit parçalar.....                                                                | 9     |
| Şekil 1.7 Vakum torbalama yöntemi şematik gösterimi .....                                                                 | 13    |
| Şekil 1.8 El yatırma işleminin şematik gösterimi .....                                                                    | 13    |
| Şekil 1.9 Püskürtme yönteminin şematik gösterimi .....                                                                    | 14    |
| Şekil 1.10 Elyaf sarma yöntemi .....                                                                                      | 15    |
| Şekil 1.11 Reçine kalıplama yöntemi gösterimi.....                                                                        | 16    |
| Şekil 1.12 Pultrüzyon yöntemi gösterimi.....                                                                              | 16    |
| Şekil 1.13 Bal peteği yapının kısımları .....                                                                             | 19    |
| Şekil 1.14 Çekirdek malzeme tipleri .....                                                                                 | 21    |
| Şekil 1.15 Farklı çekirdek yapıları .....                                                                                 | 22    |
| Şekil 1.16 Çekirdek yapı görünüşü.....                                                                                    | 22    |
| Şekil 1.17 Çekirdek malzemenin üretim yöntemleri .....                                                                    | 23    |
| Şekil 1.18 Bal peteği üretim yöntemleri .....                                                                             | 24    |
| Şekil 1.19 Kuvvet - zaman eğrisi .....                                                                                    | 34    |
| Şekil 1.20 Darbe enerjisiyle oluşan kuvvet - çökme eğrisi.....                                                            | 35    |
| Şekil 1.21 Hız - zaman eğrisi .....                                                                                       | 36    |
| Şekil 1.22 Çökme - zaman eğrisi.....                                                                                      | 36    |
| Şekil 1.23 Absorbe edilen enerji-zaman eğrisi.....                                                                        | 37    |
| Şekil 2.1 Geliştirilmiş kirişin üretim yönteminin şematik gösterimi.....                                                  | 54    |
| Şekil 2.2 Hareketli bariyer yan darbe testi şematik gösterimi .....                                                       | 55    |
| Şekil 2.3 Yan darbe kirişin sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmesi .....                                              | 56    |
| Şekil 2.4 CFRP koruma bandı görünüşü.....                                                                                 | 56    |
| Şekil 2.5 Polimer esalı malzeme ile desteklenmiş yan darbe kiriş.....                                                     | 57    |
| Şekil 2.6 Üretilen yan darbe kiriş .....                                                                                  | 58    |
| Şekil 2.7 Üretilen yan dabe kiriş profillerin katı model olarak boru ve model panel tipi kapı saçına monte edilmesi ..... | 58    |
| Şekil 2.8 Beş farklı yan darbe kiriş profili ve üç nokta eğme testi şematik gösterimi ...                                 | 59    |

|            |                                                                                        |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 2.9  | Tasarımı yapılan yan darbe kirişin sonlu elemanlar metodu ile gösterimi.....           | 60  |
| Şekil 2.10 | Sekiz farklı yan darbe kiriş geometri gösterimi.....                                   | 60  |
| Şekil 2.11 | Güçlendirilmiş çelik kiriş ve FMVSS 214'e standartlarına göre test .....               | 62  |
| Şekil 3.1  | Deneysel üretim sürecinin akış diyagramı .....                                         | 65  |
| Şekil 3.2  | Vakum torbalama yöntemi .....                                                          | 66  |
| Şekil 3.3  | Karbon fiber oryantasyon açıları .....                                                 | 70  |
| Şekil 3.4  | Üç nokta eğme test düzeneği.....                                                       | 78  |
| Şekil 3.5  | UBF serisi 0°/90° iki eksenli BFCA 2-3 gerinim pulu. ....                              | 83  |
| Şekil 3.6  | Darbe test cihazı sistem blok diyagramı .....                                          | 90  |
| Şekil 3.7  | Otomobillerde kullanılan bazı yan darbe kiriş profilleri .....                         | 91  |
| Şekil 3.8  | Petek yapılı Alüminyum karbon fiber malzemenin C profil Solidworks modeli. ....        | 98  |
| Şekil 3.9  | Petek yapılı Nomex karbon fiber malzemenin C profil Solidworks modeli. ..              | 99  |
| Şekil 3.10 | Karbon fiber malzemenin O profil Solidworks katı modeli. ....                          | 99  |
| Şekil 3.11 | Yan darbe kiriş'in kapı üzerindeki.....                                                | 100 |
| Şekil 4.1  | $C_1^8$ oryantasyon açılı numunenin üç nokta eğme test grafiği. ....                   | 103 |
| Şekil 4.2  | $C_2^8$ oryantasyon açılı numunenin üç nokta eğme test grafiği. ....                   | 104 |
| Şekil 4.3  | $C_3^8$ oryantasyon açılı numunenin üç nokta eğme test grafiği. ....                   | 105 |
| Şekil 4.4  | $C_4^8$ oryantasyon açılı numunenin üç nokta eğme test grafiği. ....                   | 106 |
| Şekil 4.5  | $C_1^8$ , $C_2^8$ , $C_3^8$ ve $C_4^8$ ortalama numunelerin üç nokta eğme grafiği..... | 107 |
| Şekil 4.6  | $C_1^8$ oryantasyon açılı test numunelerin kuvvet/uzama grafikleri.....                | 108 |
| Şekil 4.7  | $C_2^8$ yönlenmeli test numunelerin kuvvet/uzama grafiği.....                          | 109 |
| Şekil 4.8  | $C_3^8$ yönlenmeli test numunelerin kuvvet/uzama grafiği.....                          | 110 |
| Şekil 4.9  | $C_4^8$ yönlenmeli test numunelerin kuvvet/uzama grafiği. ....                         | 111 |
| Şekil 4.10 | $C_1^8$ oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin F-d eğrisi. ....                  | 117 |
| Şekil 4.11 | $C_2^8$ oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin F-d eğrisi. ....                  | 118 |
| Şekil 4.12 | $C_3^8$ oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin F-d eğrisi. ....                  | 119 |
| Şekil 4.13 | $C_4^8$ oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin F-d eğrisi. ....                  | 120 |
| Şekil 4.14 | $C_1^8$ , $C_2^8$ , $C_3^8$ ve $C_4^8$ ortalama F-d eğrisi.....                        | 121 |
| Şekil 4.15 | Enerji-zaman grafiği.....                                                              | 122 |
| Şekil 4.16 | $C_1^8$ oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin Ea-t eğrisi. ....                 | 123 |
| Şekil 4.17 | $C_2^8$ oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin Ea-t eğrisi. ....                 | 124 |
| Şekil 4.18 | $C_3^8$ oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin Ea-t eğrisi. ....                 | 125 |
| Şekil 4.19 | $C_4^8$ oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin Ea-t eğrisi. ....                 | 126 |

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.20</b> $C_1^8$ , $C_2^8$ , $C_3^8$ ve $C_4^8$ ortalama Ea-t eğrisi.....                 | 127 |
| <b>Şekil 4.21</b> $C_1^8$ oryantasyon açılı tabakalı karbon fiber malzemenin V-t eğrisi. ....      | 129 |
| <b>Şekil 4.22</b> $C_2^8$ oryantasyon açılı tabakalı karbon fiber malzemenin V-t eğrisi. ....      | 130 |
| <b>Şekil 4.23</b> $C_3^8$ oryantasyon açılı tabakalı karbon fiber malzemenin V-t eğrisi. ....      | 131 |
| <b>Şekil 4.24</b> $C_4^8$ oryantasyon açılı tabakalı karbon fiber malzemenin V-t eğrisi. ....      | 132 |
| <b>Şekil 4.25</b> $C_1^8$ , $C_2^8$ , $C_3^8$ ve $C_4^8$ ortalama V-t eğrisi. ....                 | 133 |
| <b>Şekil 4.26</b> $C_1^8$ , $C_2^8$ , $C_3^8$ ve $C_4^8$ ortalama (d-t) eğrileri.....              | 133 |
| <b>Şekil 4.27</b> $C_4^8$ oryantasyon açılı Al petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (2.5 m). .  | 135 |
| <b>Şekil 4.28</b> $C_4^8$ oryantasyon açılı Al petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (2.75 m).   | 136 |
| <b>Şekil 4.29</b> $C_4^8$ oryantasyon açılı Al petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (3 m). .... | 137 |
| <b>Şekil 4.30</b> $C_4^8$ oryantasyon açılı Nomex yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (2.5 m). ...   | 139 |
| <b>Şekil 4.31</b> $C_4^8$ oryantasyon açılı Nomex yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (2.75 m). .    | 140 |
| <b>Şekil 4.32</b> $C_4^8$ oryantasyon açılı Nomex yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (3 m). ....    | 141 |
| <b>Şekil 4.33</b> $C_4^8$ oryantasyon açılı O profil kirişin ivme-zaman grafiği (2.5 m). ....      | 142 |
| <b>Şekil 4.34</b> $C_4^8$ oryantasyon açılı O profil kirişin ivme-zaman grafiği (2.75 m). ....     | 143 |
| <b>Şekil 4.35</b> $C_4^8$ oryantasyon açılı O profil kirişin ivme-zaman grafiği (3 m). ....        | 144 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                  | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 1.1 Tabakalı kompozitlerin gösterimi .....                                               | 7     |
| Çizelge 1.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması .....                                        | 8     |
| Çizelge 1.3 Bal peteğin avantajları.....                                                         | 23    |
| Çizelge 3.1 Karbon fiber kompozit plakaların özellikleri.....                                    | 72    |
| Çizelge 4.1 $C_1^8$ oryantasyon açılı numunenin eğme test değerleri.....                         | 103   |
| Çizelge 4.2 $C_2^8$ oryantasyon açılı numunenin eğme test değerleri.....                         | 104   |
| Çizelge 4.3 $C_3^8$ oryantasyon açılı numunenin eğme test değerleri.....                         | 105   |
| Çizelge 4.4 $C_4^8$ oryantasyon açılı numunenin eğme test değerleri.....                         | 106   |
| Çizelge 4.5 $C_1^8$ oryantasyon açılı numunenin çekme testi sayısal değerleri.....               | 108   |
| Çizelge 4.6 $C_2^8$ oryantasyon açılı numunenin çekme testi sayısal değerleri.....               | 109   |
| Çizelge 4.7 $C_3^8$ oryantasyon açılı numunenin çekme testi sayısal değerleri.....               | 110   |
| Çizelge 4.8 $C_4^8$ oryantasyon açılı numunenin çekme testi sayısal değerleri.....               | 111   |
| Çizelge 4.9 Farklı oryantasyon açılılarına sahip numunelerin poisson değerleri.....              | 112   |
| Çizelge 4.10 $C_1^8$ , $C_2^8$ , $C_3^8$ ve $C_4^8$ numunelerine ait ortalama değerler.....      | 121   |
| Çizelge 4.11 $C_1^8$ , $C_2^8$ , $C_3^8$ ve $C_4^8$ numunelerine ait ortalama değerler.....      | 128   |
| Çizelge 4.12 C profil Alüminyum petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiğinden alınan değerler..... | 138   |
| Çizelge 4.13 C profil Nomex petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiğinden alınan değerler.....     | 141   |
| Çizelge 4.14 O profil karbon fiber yapılı kirişin ivme-zaman grafiğinden alınan değerler.....    | 145   |

## RESİMLER DİZİNİ

|                                                                                                                      | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Resim 1.1</b> BMW 7 serisinde kullanılan karbon fiber örnekleri .....                                             | 10    |
| <b>Resim 1.2</b> Kompozit malzeme kullanılan bazı örnek araçlar. ....                                                | 10    |
| <b>Resim 1.3</b> Otoklav üretim yöntemi .....                                                                        | 14    |
| <b>Resim 1.4</b> Kalıba dökme yöntemiyle çekirdek yapı üretimi.....                                                  | 24    |
| <b>Resim 1.5</b> Helikopter ve uydu sistemi kısımlarında kullanılan petekli yapılar .....                            | 26    |
| <b>Resim 1.6</b> Çarpışma kutusu görüntüsü .....                                                                     | 27    |
| <b>Resim 1.7</b> Hızlı feribotta sandviç yapının kullanıldığı kısımlar .....                                         | 27    |
| <b>Resim 1.8</b> Tren yapımında kullanılan sandviç paneller ve tren vagonunda sandviç yapı<br>kullanılan bölge ..... | 28    |
| <b>Resim 1.9</b> Ağırlık düşürme test cihazın şematik gösterimi .....                                                | 32    |
| <b>Resim 2.1</b> Deney düzeneği .....                                                                                | 46    |
| <b>Resim 2.2</b> Üç nokta eğme test düzeneği ve test sonrası çelik kirişlerin gösterimi .....                        | 61    |
| <b>Resim 2.3</b> Geliştirilmiş ideal serbest ağırlık düşürme test cihazı. ....                                       | 62    |
| <b>Resim 2.4</b> Serbest düşme testi ve ANSYS modellenme gösterimi. ....                                             | 63    |
| <b>Resim 3.1</b> Ayrıcı film görünüşü. ....                                                                          | 67    |
| <b>Resim 3.2</b> Karbon fiber kumaş görünüşü. ....                                                                   | 67    |
| <b>Resim 3.3</b> Soyma kumaşı görünüşü. ....                                                                         | 67    |
| <b>Resim 3.4</b> Vakum battaniyesi görünüşü. ....                                                                    | 68    |
| <b>Resim 3.5</b> Vakum naylon görünüşü. ....                                                                         | 68    |
| <b>Resim 3.6</b> Epoksi ve sertleştirici. ....                                                                       | 68    |
| <b>Resim 3.7</b> Çift yönlü sızdırmazlık bant görünüşü. ....                                                         | 69    |
| <b>Resim 3.8</b> Vakum pompası görünüşü. ....                                                                        | 69    |
| <b>Resim 3.9</b> Numune üretiminde kullanılan .....                                                                  | 70    |
| <b>Resim 3.10</b> Numune parça üretimi.....                                                                          | 71    |
| <b>Resim 3.11</b> CNC Su Jet Siemens a3216 R-HP görünüşü. ....                                                       | 71    |
| <b>Resim 3.12</b> $C_1^8$ oryantasyon açılı karbon fiber malzeme plakası. ....                                       | 72    |
| <b>Resim 3.13</b> $C_1^8$ oryantasyon açılı karbon fiber malzeme .....                                               | 73    |
| <b>Resim 3.14</b> $C_1^8$ oryantasyon açılı karbon fiber malzeme .....                                               | 73    |
| <b>Resim 3.15</b> $C_2^8$ oryantasyon açılı karbon fiber malzeme plakası. ....                                       | 74    |
| <b>Resim 3.16</b> $C_2^8$ oryantasyon karbon fiber malzeme.....                                                      | 74    |
| <b>Resim 3.17</b> $C_2^8$ oryantasyon karbon fiber malzeme.....                                                      | 75    |
| <b>Resim 3.18</b> $C_3^8$ oryantasyon açılı karbon fiber malzeme plakası. ....                                       | 75    |

|                   |                                                                                                                                 |     |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Resim 3.19</b> | $C_3^8$ oryantasyon açılı karbon fiber malzeme .....                                                                            | 76  |
| <b>Resim 3.20</b> | $C_3^8$ oryantasyon açılı karbon fiber malzeme .....                                                                            | 76  |
| <b>Resim 3.21</b> | $C_4^8$ oryantasyon açılı karbon fiber malzeme plaka. ....                                                                      | 77  |
| <b>Resim 3.22</b> | $C_4^8$ oryantasyon açılı karbon fiber malzeme .....                                                                            | 77  |
| <b>Resim 3.23</b> | $C_4^8$ oryantasyon açılı karbon fiber malzeme .....                                                                            | 78  |
| <b>Resim 3.24</b> | Hazırlanan numunelerin üç nokta eğme testi ve AUTOGRAPH cihazı. ....                                                            | 79  |
| <b>Resim 3.25</b> | Numunenin çene kısmı için yapılan silikon kalıp üretim aşamaları. ....                                                          | 81  |
| <b>Resim 3.26</b> | Çekme test numunesinin çene kısımlarının epoksi ile kaplanma aşaması. .                                                         | 81  |
| <b>Resim 3.27</b> | Testlerde kullanılan Shimadzu AG – X çekme cihazı ve test numunesinin bağlantısının gösterimi. ....                             | 82  |
| <b>Resim 3.28</b> | Çekme test numunesine gerinim pulların yapıştırılması. ....                                                                     | 82  |
| <b>Resim 3.29</b> | Çekme testinde kullanılan Data logger ve bilgisayar ara yüz yazılımı. ....                                                      | 83  |
| <b>Resim 3.30</b> | Çekme test sonucu numunelerde oluşan hasar görüntüleri. ....                                                                    | 84  |
| <b>Resim 3.31</b> | Darbe testi için Al bal petek yapılı tabakalı kompozit üretim işlem basamakları. ....                                           | 85  |
| <b>Resim 3.32</b> | $C_1^8$ oryantasyonlu darbe test numunesi. ....                                                                                 | 86  |
| <b>Resim 3.33</b> | $C_1^8$ oryantasyonlu numunenin standart ölçülere göre kesilmesi. ....                                                          | 86  |
| <b>Resim 3.34</b> | $C_2^8$ oryantasyonlu darbe test numunesi. ....                                                                                 | 86  |
| <b>Resim 3.35</b> | $C_2^8$ Oryantasyonlu numunenin standart ölçülere göre kesilmesi. ....                                                          | 87  |
| <b>Resim 3.36</b> | $C_3^8$ oryantasyonlu darbe test numunesi. ....                                                                                 | 87  |
| <b>Resim 3.37</b> | $C_3^8$ oryantasyonlu numunenin standart ölçülere göre kesilmesi. ....                                                          | 87  |
| <b>Resim 3.38</b> | $C_4^8$ oryantasyonlu darbe test numunesi. ....                                                                                 | 88  |
| <b>Resim 3.39</b> | $C_4^8$ oryantasyonlu numunenin standart ölçülere göre kesilmesi. ....                                                          | 88  |
| <b>Resim 3.40</b> | $C_1^8$ , $C_2^8$ , $C_3^8$ ve $C_4^8$ oryantasyon açılı numunelerin darbe test standart ölçülerine göre hazırlanmış hali. .... | 88  |
| <b>Resim 3.41</b> | Testlerde kullanılan Fractovis Plus darbe test cihazı. ....                                                                     | 89  |
| <b>Resim 3.42</b> | Alüminyum bal petek yapısının istenilen ebatlarda kesim işlemi (800 x 45 x 1.8 mm). ....                                        | 92  |
| <b>Resim 3.43</b> | C profil petek yapılı Alüminyum karbon fiber kiriş üretim aşamaları. ....                                                       | 93  |
| <b>Resim 3.44</b> | Nomex bal petek yapısı .....                                                                                                    | 94  |
| <b>Resim 3.45</b> | C profil petek yapılı Nomex karbon fiber kiriş üretim aşamaları. ....                                                           | 95  |
| <b>Resim 3.46</b> | O profil karbon fiber kiriş üretim aşamaları. ....                                                                              | 96  |
| <b>Resim 3.47</b> | Testlerde kullanılan otomobil kapısı. ....                                                                                      | 97  |
| <b>Resim 3.48</b> | Yan darbe kirişini sabitlemede kullanılan kelepçeler .....                                                                      | 98  |
| <b>Resim 3.49</b> | Serbest ağırlık düşürme test cihazı. ....                                                                                       | 101 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Resim 4.1</b> Al petek yapılı $C_1^8$ oryantasyonlu tabakalı karbon fiber malzemede darbe sonucu üst yüzey ve alt yüzeyde oluşan deformasyon. .... | 113 |
| <b>Resim 4.2</b> Al petek yapılı $C_2^8$ oryantasyonlu karbon fiber malzemede darbe sonucu üst yüzey ve alt yüzeyde oluşan deformasyon. ....          | 114 |
| <b>Resim 4.3</b> Al petek yapılı $C_3^8$ oryantasyonlu tabakalı karbon fiber malzemede darbe sonucu üst yüzey ve alt yüzeyde oluşan deformasyon. .... | 115 |
| <b>Resim 4.4</b> Al petek yapılı $C_4^8$ oryantasyonlu tabakalı karbon fiber malzemede darbe sonucu üst yüzey ve alt yüzeyde oluşan deformasyon. .... | 116 |
| <b>Resim 4.5</b> Alüminyum petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (2.5 m). ....                                                      | 135 |
| <b>Resim 4.6</b> Alüminyum petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (2,75 m). ....                                                     | 136 |
| <b>Resim 4.7</b> Alüminyum petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (3 m). ....                                                        | 137 |
| <b>Resim 4.8</b> Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (2.5 m). ....                                                          | 138 |
| <b>Resim 4.9</b> Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (2.75 m)... ..                                                         | 139 |
| <b>Resim 4.10</b> Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (3 m). ....                                                           | 140 |
| <b>Resim 4.11</b> O profil tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (2.5 m). ....                                                                   | 142 |
| <b>Resim 4.12</b> O profil tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (2.75 m). ....                                                                  | 143 |
| <b>Resim 4.13</b> O profil tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (3 m). ....                                                                     | 144 |

## 1. GİRİŞ

Dünya’ da son zamanlarda otomobillerin kullanımı artması ile çevresel problemlerin ve taşıt güvenlik sistemlerinin sağlanması nedeniyle yaşanan kaygılar taşıtların her bölgesi gibi otomobillerde yan darbe kirişlerin tasarımına ve analizlere yönelimi gerekli kılmıştır. Günümüzde otomotiv endüstrisi yüksek güvenlik seviyelerine sahip, az yakıt tüketen otomobillerin geliştirilmesine ve düşük maliyetli üretim yöntemleri üzerine odaklanmaktadır. Bunun gerçekleştirilmesi sürekli olarak daha uygun tasarımların, daha hafif ve yüksek darbeleri sönmüleme imkânı verecek malzemelerin kullanımı ile sağlanacaktır. Günümüzde son zamanlarda sanayinin gelişmesi ve artan nüfusla birlikte motorlu taşıtların kullanım oranı hızla artmaktadır. Bu oran Dünya’da 2010 yılında 939 milyon adet iken 2020 yılında 316 milyon artarak 1 milyar 255 milyon adede yükselmiştir. Türkiye de motorlu taşıt kullanımı (TÜİK 2010) verilerine göre 15 milyon 95 bin 603 adet iken bu sayı 6 milyon 116 bin 98 adet artış ile günümüzde 21 milyon 211 bin 701 adedine ulaşmıştır. Böylelikle kullanılan taşıt sayılarının artması ile birlikte taşıt güvenliği ve taşıt ağırlığından dolayı yakıt tüketiminin azaltılması daha çok ön plana çıkmaktadır. Taşıtlarda yakıt tüketiminin dünya politikasında en önemli konulardan birisi olması, yakıta duyulan ihtiyacın artması, petrol ve doğal gaz gibi yakıtların fiyatlarının artması, yakıt tüketiminde çevreye verdiği zararların artmasıyla birlikte insanoğlu taşıt ağırlığının azaltılmasına yönelmektedir.

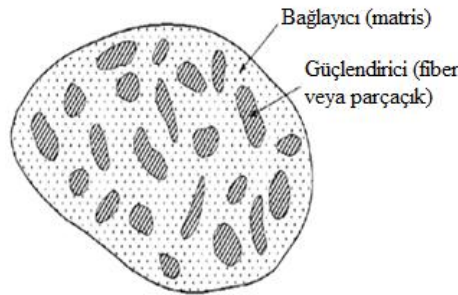
Otomobillerde yandan çarpmalara karşı geliştirilen yöntemler, son dönemlerde otomotiv sektöründe güvenliğe verilen önemin artmasıyla, hızla gelişmiştir. Pasif emniyet tedbirlerinden biri olan kapı yan kirişleri araçlarda sıkça uygulanmaktadır. Genelde ısıl işlemli (sertleştirilmiş) çelik kirişler kullanılırken, kompozit malzemelerden karbon-elyaf takviyeli epoksi ve polietilen den oluşan yan darbe kirişler de kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışma ile kompozit esaslı malzemeler kullanarak portotip kiriş modeli üretimi sağlanmıştır. Böylelikle taşıtların gerek ağırlığını azaltmak gerekse de mukavemeti arttırmak için kapı kiriş malzemesinin değiştirilmesi, tasarım ve analizler yapılması için çalışmalar yapılmıştır. Mevcut metal yan darbe kirişlerinin modellenmesi ve tasarımda iyileştirmeye gidilmesi otomobilin ağırlık azaltımı ve buna bağlı olarak yakıt tüketimini azaltacaktır. Dolayısıyla ekonomiye katkı ve çevreye atılan emisyon gazlarının da azatılması sağlanacaktır. Ayrıca çelik kirişler yerine polimer matrisli

kompozit malzemeler olan karbon-elyaf takviyeli epoksi kullanarak kompozit yan darbe kırışı geliştirmek böylece daha güvenilir ve daha hafif yapı oluşturmaktır.

### 1.1 Kompozit Malzemeler

İki farklı malzemelerin birbiri içerisinde çözülmeyecek şekilde (makro seviyede) birleştirmesiyle oluşturulan malzemeye kompozit malzeme denir. Günümüzde gemiden bina yapımına, ev aletlerinden uzay teknolojisine kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerin üretimi ilk örnekleri çok eskilere dayanmaktadır. Kompozit malzeme kavramının ortaya çıkması ve mühendislik konusu olarak değerlendirmesi 1940'lı yılların başlarında gerçekleşmiştir.

İnsanoğlu ilk çağlarda kırılğan malzemelerin içine hayvansal veya bitkisel lifler koyarak kırılğanlığı gidermeye çalışmıştır. En iyi örnek kerpitir. Kerpiç retiminde killi çamura katılan sap, saman ve lifler hem kullanım hemde üretim sırasındaki dayanımını artırmaktadır. Lif yönleri ve özellikleri farklı ağaç levhalar üst üste yerleştirerek yapılan ok yaylarıda başka bir örnek olarak verilebilir. Kemik ve ahşap gibi malzemeler tabii kompozit malzeme içerisindedir. Kompozit malzeme bileşenleri şekil 1.1'de gösterilmiştir.



şekil 1.1 Kompozit malzeme (Ercan 2006).

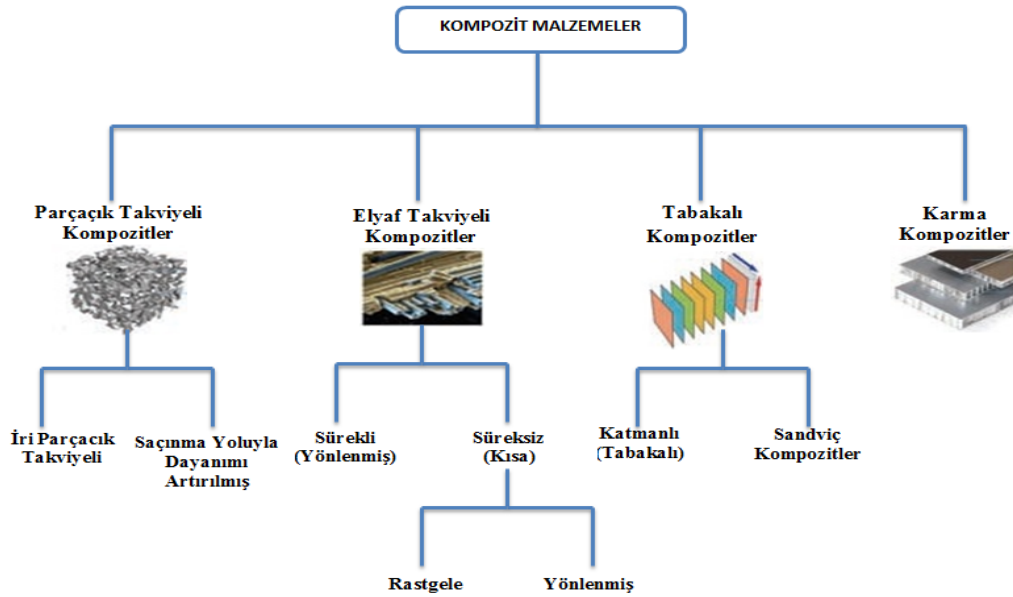
Taşıdığı ayırıcı özellikleri ile diğer malzemelere nazaran birçok avantajı bulunan kompozit malzemeler hafiflikleri, uzun ömürleri, yüksek mekanik ve kimyasal dayanımları gibi özellikleri olmasından dolayı tercih edilirler. Kompozit malzemenin retimiyile aşağıda bulunan özelliklerin biri veya birden fazlası geliştirilmeye amaçlanmıştır.

- Hafiflik, rijitlik ve estetiklik

- Isı, elektrik ve akustik iletkenlik
- Isı ve elektriksel direnç
- Kırılma tokluğu
- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık
- Korozyon dayanımı
- Yorulma dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Mukavemet
- Mekanik dayanım, eğme, çekme ve çarpma dayanımı

## 1.2 Kompozit Malzemenin Sınıflandırılması

Farklı özellikleri bir arada toplayan kompozit malzemeler, iki farklı malzemenin birleşmesiyle oluştuğundan sınırsız kabul edilebilecek malzeme kombinasyonuna sahiptir. Kombinasyona bir de üretim yöntemleri çeşitliliği eklendiğinde kompozit malzemeyi sınıflandırmak oldukça güç duruma gelmektedir. Literatür araştırmaları incelendiğinde kompozit malzemelerin standartlaşmış bir sınıflandırması yoktur. Ancak kompozitler matris-takviye elemanı malzemesine, matris malzemesine, takviye elemanlarının yerleştirilmelerine ve şekillerine göre ayrı birer sınıflandırma mümkündür. Sınıflandırma Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (İnt. Kyn. 1).

## **Parçacık Takviyeli Kompozitler**

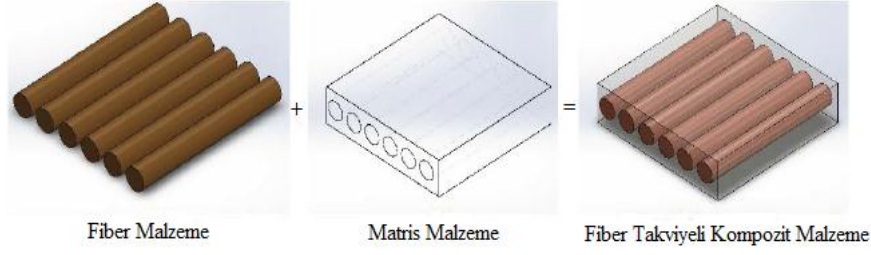
Bir matris malzeme içerisinde başka bir malzemenin parçacık halinde bulunmasıyla elde edilir. Mukavemeti parçacıkların sertliği ile doğru orantılıdır. Aynı zamanda izotrop yapıdadır. En yaygın çeşiti plastik matris içerisinde bulunan metal parçacıklardır. Bu metal parçacıkları elektriksel ve ısı iletkenlik sağlar. Metal matris içerisinde seramik parçacıklar içerenlerin, yüksek sıcak dayanımları ve sertlikleri yüksektir. Etkili bir takviyenin oluşabilmesi için parçacıklar küçük boyutlu olmalı ve matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmalıdır. Ayrıca parçacıkların ve matrisin hacim oranları da kompozit malzemenin davranışını etkilemektedir.

## **Fiber (Elyaf) Takviyeli Kompozitler**

İnce elyafların matris yapıda bulunmasıyla meydana gelmiştir. Matris içindeki elyafların yerleşimi kompozit yapının mukavemetini önemli bir derecede etkilemektedir. Uzun elyafların matris içinde birbirine paralel elyaflara dik yönde oldukça düşük mukavemet elde edilir. İki yönlü yerleştirilmiş elyaf takviyelerle iki yönde eşit mukavemet sağlanırken, kısa elyaflarla homojen dağılmış matris yapısında ise izotrop yapı oluşturmak mümkündür.

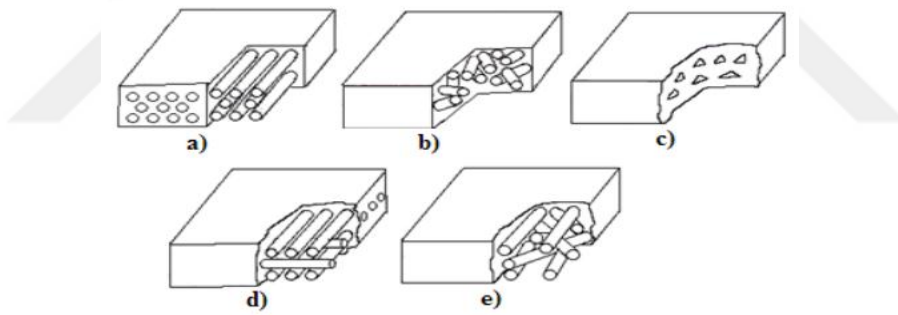
Kompozit yapının mukavemeti elyafların mukavemeti açısından çok önemlidir. Elyafların uzunluk ve çap oranları artıkça matris den elyaflara iletilen yük miktarı da artacaktır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet bakımından çok önemlidir. Kompozit yapının mukavemetinde bir diğer unsur ise matris ile elyaf arasındaki bağın yapısıdır. Matrisli yapıda boşluklar var ise elyaflarla temas azalacaktır. Elyaf ile matris arasında bağ bozan nem absorpsiyonu da olumsuz bir özelliktir (Yırtımcı 2011).

Fiberlerin (Elyaf) kompozit yapı içerisinde bulunma biçimleri kompozit özelliklerini etkilediği gibi kompozit yapının da işlenebilirliğini de etkilemektedir. Kompozit yapıların özellikleri; fiberlerin yerleştirme açılarına, yoğunluklarına, sürekliliğine ve boyutları gibi faktörlere bağlıdır. Fiber takviyeli kompozit ve bileşenleri Şekil 1.3’de görülmektedir (Alçı 2016).



**Şekil 1.3** Fiber takviyeli kompozit ve bileşenleri (Alçı 2016).

**Sürekli Fiber (Elyaf) Takviyeli Kompozit Malzemeler:** Sürekli elyafları çok yönde takviyelendirmek için dokunmuş örgü halinde veya çoklu filamentler halinde kalıp içerisine yerleştirilir. İlk ısıtmadan sonra metal, infiltrasyon metodu veya alaşımlı sıvı metal emdirme metodu ile emdirilerek üretilmektedir. Bu işlemler genelde metal matrisli kompozitlere uygulanmaktadır. Genellikle elyaf yönlendirildiği için mekanik özellikleri de anizotropiktir. Yönlendirme özelliğinden dolayı sürekli elyaflar diğer takviye elemanlarına göre üstün özelliklere sahiptir. Fiberli (Elyaf) kompozitler Şekil 1.4’de görüldüğü üzere beş farklı sınıfta incelenmektedir (Şahin 2000).



**Şekil 1.4** Fiber (Elyaf) takviyeli kompozitler **a)** tek yönlü ve sürekli elyaflar, **b)** kesikli elyaflar, **c)** ortogonal elyaflar, **d)** parçacık şekilli elyaflar, **e)** rastgele düzlemsel yönlendirilmiş elyaflar (Şahin 2000).

**Kısa Fiber (Elyaf) Takviyeli Kompozit Malzemeler:** Kısa elyaflar yaklaşık 0,5-6 mm uzunluğunda ve 3-5  $\mu\text{m}$  çapında üretilirler. Elyaf ile takviyelendirilen kompozit, takviye elemanı eriyik içinde malzemeyle birleştirmesi için sıkıştırılmış döküm yöntemiyle basınçlı olarak eriyik emdirilir. Kısa elyaflı kompozit malzemeleri üretmek için uygun olan metot sıkıştırma döküm yöntemidir (Danacıoğlu 2013).

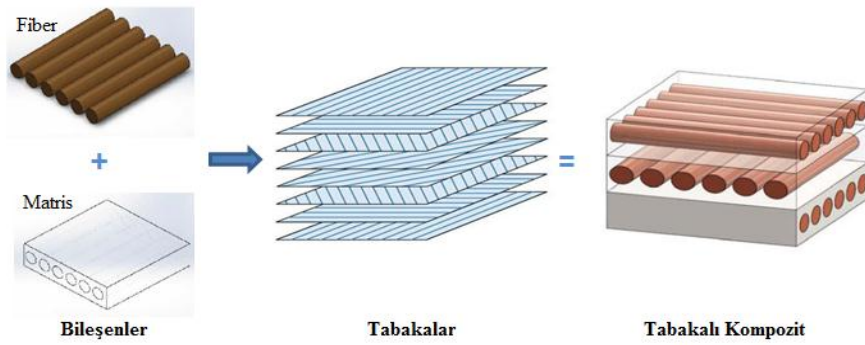
**Rastgele Düzlemsel Yönlendirilmiş Kompozitler:** Rastgele kompozitler kısa elyaflardan oluşmakta fakat matris içerisinde elyaflar rastgele iki boyutlu olarak yönlendirilmektedir. Yönlendirilmiş kompozitler sodyum silisten oluşan orta bir

sululukta bağlayıcıyla tutularak katı form haline getirilir. Daha sonra presle sıkıştırılıp fırınlanır. Elyafların kompozit yapı içerisine rastgele yerleştirmeleri düzenli olursa elyaf hacim oranı da buna bağlı olarak artar. Kompozit malzemenin tüm yönlerindeki mekanik özellikleri elyafların dizilişlerine bağlı olarak değişir (Danacıoğlu 2013).

### **Tabakalı kompozitler**

Tabakalı kompozitler bilinen eski kompozit şeklidir. En az iki farklı levha malzemenin tabakalar halinde sıralanarak oluşturduğu malzemelere denir. Tabakalar halinde olması her bir tabakanın farklı kompozit olmasına izin vermektedir. Tabakalı kompozitlerin üretim, tasarım, kontrolü ve standartlaşma diğer kompozitlerden kolay olmaktadır. Özel gereksinimleri karşılamak maksadıyla birden çok tabaka beraber kullanılabilir. Tabakalı kompozitlere sandviç malzeme de denir. Kompozit malzemenin aşınma, katılığı, direnci, ısı yalıtım ve mukavemet özellikleri iyileşirken çekiciliği artar.

Kompozit malzemeler minimum iki tabakadan oluşurlar. Ancak mekanik ve dayanım özelliklerin önem taşıdığı hallerde, malzemenin bu özelliklere sahip olabilmesi için minimum üç veya daha fazla katman kullanılmaktadır. Şekil 1.5’de tabakalı kompozit üretimin şematik gösterimi verilmiştir.



**Şekil 1.5** Tabakalı kompozit üretimin şematik gösterimi.

Tabakalı kompozit yapıların katmanlarındaki fiberin açılı durumuna göre simetrik açılı, çapraz açılı ve tek yönlü şekilde sınıflandırılabilir. Çapraz tabakalı yapıda fiber açıları sadece 0° ve 90° olmaktadır. Tek yönlü yapıda her tabakadaki fiberlerin yönü aynı olacak şekilde dizilme yapılmaktadır. Açılı kompozit yapıda ise katmanların fiberlerin farklı açıda olması gerekirken simetrik kompozit yapıda ise merkezi tabakanın üstünde ve

altında açı ve kalınlık bakımından aynı kompozit yapıların olması gerekmektedir. Tabakalı kompozitlerin gösterimi standart hale gelmiş olup bir kaç örnek Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.1** Tabakalı kompozitlerin gösterimi (Alcı 2016).

| Tabaka Numaraları (K) ve Açıları |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | Gösteriş Şekli                         |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------------------|
| K1                               | K2  | K3  | K4  | K5  | K6  | K7  | K8  | K9  | K10 | K11 | K12 | K13 | K14 |                                        |
| 0                                | -45 | 90  | 60  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | [0/-45/90/60]                          |
| 0                                | +45 | 90  | 90  | +45 | 0   |     |     |     |     |     |     |     |     | [0/45/90] <sub>s</sub>                 |
| 0                                | +45 | 90  | +45 | 0   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | [0/45/90] <sub>s</sub>                 |
| 0                                | +45 | -45 | 90  | -45 | +45 | 0   |     |     |     |     |     |     |     | [0/±45/90] <sub>s</sub>                |
| 0                                | 90  | 0   | 0   | 0   | 0   | +45 | +45 | 0   | 0   | 0   | 0   | 90  | 0   | [0/90/0 <sub>4</sub> /45] <sub>s</sub> |
| 0                                | +45 | -45 | +45 | -45 | -45 | +45 | -45 | +45 | 0   |     |     |     |     | [0/(±45) <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>   |
| 0                                | 90  | 0   | 90  | 0   | 90  | 0   | 90  | 0   |     |     |     |     |     | [(0/90) <sub>2</sub> /0] <sub>s</sub>  |

Tabakalı kompozit malzemeler metallere göre daha hafif ve mukavemetli olmalarından dolayı tercih edilen malzemelerdir. Tabakalı malzemeler uçak ve otomotiv yapılarında yüzey kaplaması olarak yaygın kullanıma sahiptirler. Ayrıca, otomotiv ve uçak yapılarında yaygın kullanım alanı olan sandviç yapılar tabakalı kompozit malzeme örneğidir. Sandviç yapılar düşük yoğunluklu çekirdek malzemenin üst ve alt yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılmasıyla elde edilirler.

**Polimer Esaslı Tabakalı Kompozit Malzemeler:** Birçok polimer malzeme katmanları’nın birlikte kullanılmasıyla birçok kompozit malzeme üretilmektedir. Asbest lifi veya cam lifi dokumalara silikon emdirilmesi ile yüksek sıcaklığa dayanıklı tabakalı kompozitler elde edilmektedir. Ayrıca naylon ve cam elyaf dokumalar birçok reçinelerle tabakalar birleştirilerek herhangi bir nesnenin batmasına, çarpmasına veya benzer etkilere dirençli hafif kompozitler üretilmektedir. Malzemeler çeşitli zırh kalkan ve benzeri eleman yapımında kullanılmaktadır.

### Karma Kompozitler

Kompozit yapıları aynı olan iki veya daha fazla elyaf türünün bulunması olasıdır. Bu kompozitlere karma kompozitler denir. Yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun

alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok elyafır fakat basma mukavemeti düşüktür. Grafit de pahalı, düşük tokluğa sahip ancak basma mukavemeti iyi olan bir elyafır.

### 1.3 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

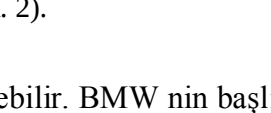
Kompozit malzemeler günümüzde geniş kullanım alanına sahiptir. Yüksek mukavemet ve düşük ağırlıklara sahip olmasından dolayı istenen yerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bundan dolayı da geniş kullanım alanı ulaşım sektöründe görülmektedir (Özer 2015). Kompozit malzemelerin önemli özelliği hafif olmalarıdır. Otomotiv sanayisinde ağırlığın azaltılmasıyla yakıt tüketiminde de tasarruf sağlanmaktadır. Bir otomobilde 45 kg ağırlık azaltımında yaklaşık olarak % 2-3 yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Kompozit yapı malzemelerin ağırlığı Alüminyum'dan 1,5 kat, çelikten ise 4 kat daha hafiftir (Štrumberger 2005). Çizelge 1.2'de kompozit malzemelerin uygulandığı endüstri, uygulama alanları ve malzemeler gösterilmiştir.

**Çizelge 1.2** Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Türkmen 2010).

| Kullanılan Endüstri  | Uygulama Alanları                                                                                                     | Kullanılan Malzemeler                                                                                                         |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Uçak</b>          | Uçak kanatları ve gövdesi, helikopter pervaneleri, iniş ve çıkış kapıları, çerçeveleri vantilatör ve türbin kanatları | B/Al, SiC <sub>w</sub> /Al, Gr/Al, B/Al, cam/epoksi, C/epoksi, B/epoksi, K/epoksi, süper alaşımlar                            |
| <b>Helikopter</b>    | Transmisyon kutusu, kiriş destek yapıtlar, itici çubuklar, iniş takımları, rotor kanatları arkası                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Mg, Gr/Al, Gr/Mg, B/Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al, SiC <sub>w</sub> /Al, B/A, SiC/Al |
| <b>Uzay</b>          | Antenleri, robot kolları, uzay yapıtları                                                                              | B/Al, B/Mg, Gr/Mg                                                                                                             |
| <b>Otomotiv</b>      | Gövde parçaları, tampon ve çamurluklar, ön ve arka paneller, aks mili, yaylar, itme çubukları ve piston kolları       | Kevlar/epoksi, SiC <sub>p</sub> /Al, SiC <sub>w</sub> /Al, B/Al                                                               |
| <b>Gemi</b>          | Gemi teknesi, gemi güvertesi                                                                                          | Kevlar/epoksi, Karbon/epoksi                                                                                                  |
| <b>Kimya</b>         | Borular, basınçlı kaplar ve tanklar                                                                                   | Cam/epoksi, Karbon/epoksi                                                                                                     |
| <b>Spor</b>          | Oltalar, golf kulüpleri, yüzme havuzları, tenis raketleri bisiklet ve motosiklet gövdesi                              | Gr/Al, B/Al, C/epoksi, B/epoksi, SiC <sub>w</sub> /Al, Gr/Al, SiC/Al                                                          |
| <b>Elektrik</b>      | Motor fırçaları, kablo ve akü plakaları                                                                               | Gr/Cu, Gr/Pb, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Pb                                                                              |
| <b>Tekstil</b>       | Mekikler                                                                                                              | B/Al, C/Al, SiC/Al                                                                                                            |
| <b>Tıp</b>           | Röntgen masaları, protezler ve tekerlekli sandalyeler                                                                 | B/Al, SiC/Al                                                                                                                  |
| <b>Uçak-Uzay</b>     | Uçak frenleri, roket memeleri, türbin pervaneleri, roket çıkış sistemleri                                             | Karbon/karbon kompozit                                                                                                        |
| <b>Diğer Alanlar</b> | Makine yatakları                                                                                                      | C/Pbi Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Pb                                                                                      |

Otomotiv sanayisi için günümüzün en büyük sorunu araçlarda emisyon oranının azaltma zorunluluğudur. Uluslararası yasalar ve çevre sorunları otomotiv tedarikçilerini bu konuda yatırım ve araştırma yapmaya yöneltmişlerdir. Çevre faktörü, enerji tasarrufu, daha hafif otomobil üretimi gibi hususlar göze alındığında sürdürülebilir gelişim için ilk metottur (Wang 2018). Otomotiv sektöründe ağırlığın azaltılması çevre kirliliği bakımından oldukça önemli sonuçları göstermektedir. Avrupa’ da ve ABD’ de emisyonu düşük otomobil üretimi ile ilgili devlet desteğiyle ayarlamalar yapılmıştır. Gelecek senelerde AB ülkeleri otomobilde CO<sub>2</sub> emisyonu 120 gr/km, ABD ise 200 gr/km olarak sınırlandırmayı amaçlanmaktadır. Amaçlar doğrultusunda otomotiv sanayisi, emisyon oranını düşürmek için çelik malzemelerin yerine alternatif olarak hafif tasarım ürünü olan kompozitler kullanarak hafifleyecektir ( Koniuszewska 2016).

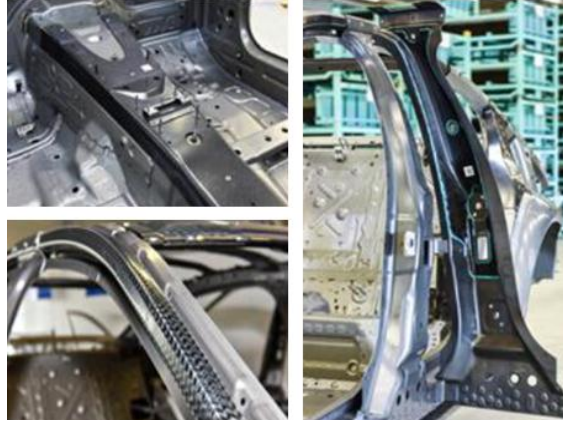
Otomotiv sektöründe termoset kompozit malzemeler yoğun bir şekilde kullanılsa da yüksek özgül mukavemet, kolay şekil alma ve geri dönüşüm avantajı gibi değerler sebebiyle termoplastik malzemelerde sık kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe bazı araçlarda kompozit kullanıma dair örnek Şekil 1.6’da verilmiştir.

|                              |                            |                                                                                      |
|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Kabin içi parçalar</b>    | Panel (dashboard)          |  |
| <b>Fonksiyonel parçalar</b>  | Yakıt ve su deposu         |  |
| <b>Dış gövde parçaları</b>   | Kapı panelleri, tamponlar  |  |
| <b>Yarı-yapısal parçalar</b> | Tabanlar, koltuk çerçevesi |  |
| <b>Yapısal parçalar</b>      | Şaşı, kokpit               |  |

**Şekil 1.6** Araçlarda kullanılan bazı kompozit parçalar (İnt. Kyn. 2).

Günümüzdeki güncel örnek olarak BMW 7 serisi gösterilebilir. BMW nin başlıca rakibi Mercedes S serisine nazaran 130 kg daha hafif tasarım elde edilmiştir. Kullandıkları parçaların % 3’lük bir kısımda karbon fiber takviyeli kompozit kullanılmıştır. Toplamda

% 3'lük 40 kg ağırlık kazancı sağlanmıştır. BMW 7 serisinde kullanılan karbon fiber örnekleri Resim 1.1'de gösterilmiştir (İnt. Kyn. 3).



**Resim 1.1** BMW 7 serisinde kullanılan karbon fiber örnekleri (İnt. Kyn. 3).

Günümüzdeki araçların genelde araç içi parçaları plastik tabanlı ve gövdeleri ise metal tabanlı malzemeden oluşur. Ağırlıkların düşmesi ile gövdenin enerji ihtiyacı da düşürmektedir. Ancak metal gövde parçalarının et kalınlığı düştükçe dolaylı yoldan güvenlik faktörü de azalır. Bu durumda alternatif olabilecek karbon elyaf takviyeli sandviç kompozit malzemeler şuan yüksek maliyetleri sebebiyle spor araçların şasi ve gövde parçalarında kullanılmaktadır (Gül 2018). Resim 1.2'de kompozit malzeme kullanılan bazı örnek araçlar gösterilmiştir.



**Resim 1.2** Kompozit malzeme kullanılan bazı örnek araçlar.

Havacılık sektöründe kompozitler, genellikle epoksi matris içerisinde sürekli elyaf takviyeli malzemelerle kullanılmaktadır. Uçaklar uzun hizmet ömrü, seyir sürati irtifa, gövde ağırlık kontrolü gibi performans gereksinimleri karşılayacak biçimde tasarım yapılırlar. Diğer koşulların eşit olduğu durumlarda ağırlık en az tutulan tasarım kriteri en uygun olacaktır. Böylelikle uygun özelliklere sahip hafif metaller iyi verim sağlayacaktır. Kompozit malzeme bu amaç ile kullanılabilecek uygun malzeme grubunu oluşturmaktadır (Gül 2018)

Kompozitlerin üstün korozyon direnç sağlamasından dolayı denizcilik alanında ön plana çıkmıştır. Suyla temas eden yüzeylerde kullanımı nispeten yaygındır. Hafif olma özelliği sayesinde deniz araçların yakıt tasarrufu ve rahat hareket edebilmesi gibi avantajları vardır.

İnşaat sektöründe kompozit malzemeler özellikle yalıtım için bina kaplama malzemesi olarak kullanıma sahip olsa da küvet, kapı, lavabo gibi parçaların üretiminde sıklıkla kullanılır. Sektördeki kullanım alanlarına örnek; yürüme yolları, bina balkon korkuluğu, köprü tabanı, taşıyıcı konstrüksiyon, lavabo, küvet, bina kaplama panelleri, taşıyıcı konstrüksiyon yer karoları yüzme havuzu verilebilir (Arıcasoy 2006).

Kompozit malzemeler sağlık sektöründe ise örnek olarak tekerlek sandalye; karbon elyaf veya cam takviyeli, dış muhafazaları, tıbbi tetkik cihazlar; CTP gibi kompozit malzemeden üretir. Dış kaplamasında da kompozitlerden yararlanılır (Gül 2018).

#### **1.4 Polimer Matrisli Kompozit Malzemenin Üretim Yöntemleri**

Polimer esaslı kompozit malzemeler son yıllar içerisinde önemli gelişmeler göstererek endüstrinin ve günlük yaşamımızda hemen hemen her dalda kullanılan malzeme haline gelmiştir. Kompozit malzemelerin tasarımını amaçları ve genel prensipleri çerçevesinde polimerlerin özelliklerini geliştirmek için başka yapı bileşenleriyle birleştirilerek kullanımı günümüz teknolojisinin hedefi olmuştur. Kompozit yapıların üretiminde kapalı ve açık kalıplama yöntemi olmak üzere iki ana kısma ayrılır.

##### **Kapalı Kalıplama Yöntemleri:**

- Savurma Kalıplama Yöntemi
- Hazır Kalıplama Yöntemleri
- Ekstrüzyonla Kalıplama Yöntemi
- Enjeksiyonla Kalıplama Yöntemi
- Reçine Transfer Yöntemi
- Pultrüzyon Yöntemi

##### **Açık Kalıplama Yöntemleri:**

- Vakum Torbalama Yöntemi
- El Yatırma Yöntemi
- Püskürtme Yöntemi
- Otoklav Yöntemi
- Elyaf Sarma Yöntemi

## **Açık Kalıplama Üretim Yöntemler**

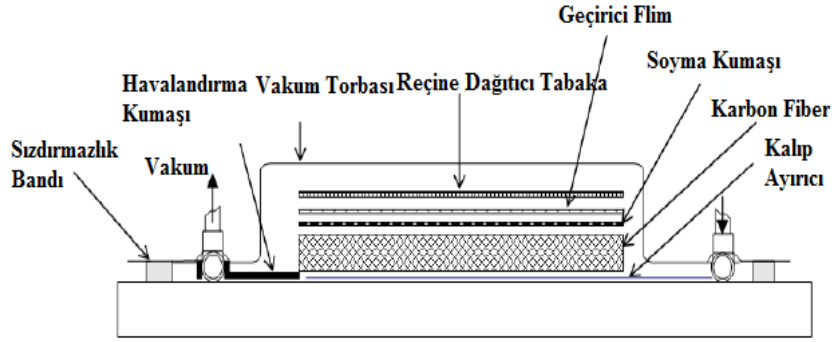
Vakum torbalama yöntemi, kompozit malzemeler genellikle geniş sandviç yapılar önce kalıba yerleştirilip ve vakum torbası en üst katman olacak biçimde yerleştirilir. Kalıp ayırıcı sıvının sürülmesiyle üretim başlar. Kompozit malzeme yüzeyinin kalıba yapışmaması için kalıp ayırıcı kullanabilir. Fiber malzemeler kalıp üzerine dizilir. Vakum poşetinin kompozit yüzeyinde kalmaması için fiber tabakalarının üzerine soyma kumaşı serilir. Soyma kumaşının üzerine dağıtıcı filenin yapışmasına engel olmak için ayırıcı film serilir. Son işlem olarak da reçine dağıtıcı file bunların üzerine konulur. Kompozit kumaşların dizilimi bittikten sonra havalandırıcı kumaş ve elyaflar ile vakum yoluna bağlı spiral boru arasına konulur. Sızdırmazlık olmaması için etrafına macun çekilerek ve vakum poşeti yerleştirilir. Belli bir süre vakum altında tutularak içerde bulunan tüm havanın emilmesi sağlanır ve reçine verilerek kompozit malzeme pişmeye bırakılır. Yapılan çalışmada vakum torbalama yöntemi kullanılarak numunelerin üretimleri yapılmıştır. Vakum öğeleri Şekil 1.7’de gösterilmiştir. Vakum torbalama yönteminin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar (Akgün 2010);

### **Avantajları:**

- Çekirdek yapıda olan malzemeler tek seferde üretilebilir.
- Büyük parçaları bu yöntem ile üretilebilir.
- Sadece tek taraflı kalıba ihtiyaç vardır.
- Yüksek mukavemet içeren kalıba ihtiyaç yoktur.
- El yatırma yöntemindeki kalıplar vakum torbalama yöntemi için dizayn edilerek kullanılabilir.

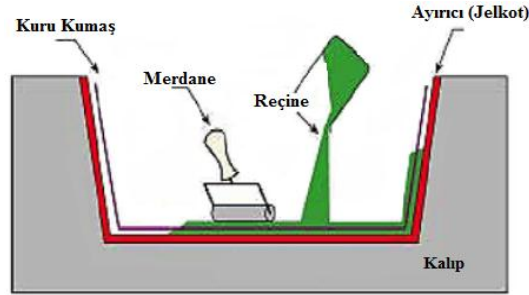
### **Dezavantajları:**

- Reçine ile ıslanmamış kısımlar kalabilir.
- İşlem basamakları komplekstir.
- Düşük viskoziteye düşük reçine kullanmasında mekanik özellikleri olumsuz tesir edebilmektedir.



**Şekil 1.7** Vakum torbalama yöntemi şematik gösterimi (Akgün 2010).

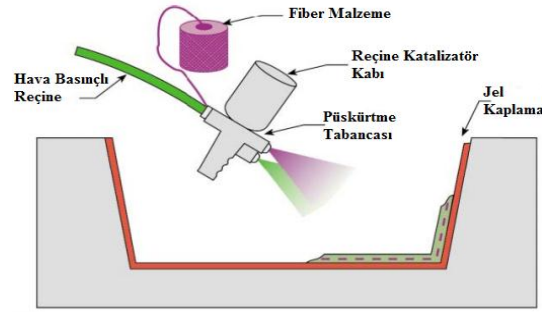
El yatırma yöntemi, kullanılan yöntemlerin içinde en kolay olanıdır. Genelde kumaş halinde bulunan karbon fiberler önceden hazırlanan kalıp içerisine yerleştirilerek fırça yardımıyla reçine fiberler üzerinde boşluk kalmayacak bir biçimde sürülür. El yatırma yönteminde en uygun reçineler epoksi ve polyesterdir. Bunların yanısıra fenolik ve vinilester reçinelerde tercih edilmektedir. Reçinelerin kalıba yapışmaması için fiber ve kalıp arasına jelkot (ayırıcı) sürme işlemi uygulanır. Yapılan işlemde reçinenin fiber kumaşına iyi emmesi çok önemlidir. Düşük sayıda üretimler için pratik bir yöntemdir. Yöntemin dezavantajları, hava kabarcıkları oluşumu mekanik özelliklerini etkilemektedir. Yapılan çalışmada el yatırma yöntemi ile üretimler yapılmıştır. Şekil 1.8’de el yatırma yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 1.8** El yatırma işleminin şematik gösterimi (Durgun 2014).

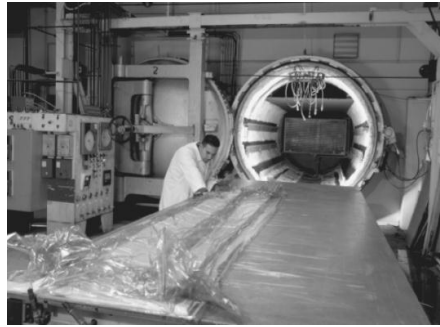
Püskürtme yöntemi, el yatırma yöntemine benzemektedir. Arasındaki fark püskürtme yönteminde el ile değil alet ile ve kırılmış fiberler kullanılarak üretim yapılmaktadır. Kırılmış fiberler kalıp yüzeyine sertleştirici katılmış reçineyle birlikte özel tabanca ile püskürtülür. Fiberlerin kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan bağımsız çalışan kırıcı sayesinde yapılır. Püskürtme işleminden sonra yüzey hava kabarcıklarını gidermek amacıyla merdane ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur. Bu yöntem

kompleks ve büyük parçaların üretimi için uygun yöntemdir. Şekil 1.9’da püskürtme yöntemi gösterilmiştir.



**Şekil 1.9** Püskürtme yönteminin şematik gösterimi (İnt. Kyn. 7).

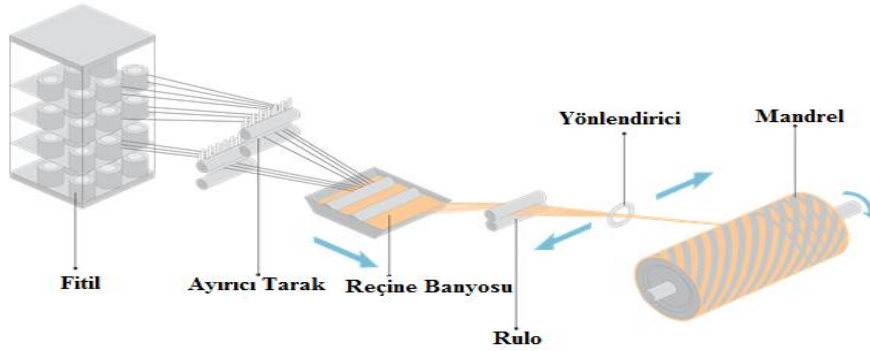
Otoklav yönteminde, önce üretimi yapılacak olan parça için laminasyon şemasına uygun tabakalama ve vakum torbalaması yapılır. Hazırlanan malzeme otoklav fırının içersine yerleştirilerek basınç ve sıcaklık altında katılaşma ve pişirme gerçekleşir. Otoklav fırınları sıcaklığı ve iç basıncı kontrol edilebilir basınçlı kaplar biçimde dizayn edilir. Kullanılan reçine ve sertleştirici tipi üretimi yapılacak olan malzemenin geometrisini ve kalınlığını belirlemektedir. Otoklav içinde basınç, vakum torbalamadaki gibi iç vakum ve otoklav içine dış basınç uygulamak üzere iki biçimde oluşturulabilir böylelikle hem dış basınç hemde iç basınç oluşturularak istenen basınç değerleri oluşturulabilir. Resim 1.3’de otoklav yöntemi gösterilmiştir.



**Resim 1.3** Otoklav üretim yöntemi (İnt. Kyn. 4).

Elyaf sarma yöntemi, özel şekillerdeki parçaların seri üretimi için uygun bir yöntemdir. Sürekli fiber lifleri reçine havuzundan geçerek dönen kalıp üzerine sarılır. Fiberlerin farklı açılarda sarılması ile farklı mekanik özellikleri elde edilebilir. Ürünler kalıp üzerinde sertleştikten hemen sonra döner kalıp ayrılır. Elyaf sarma yöntemi ile

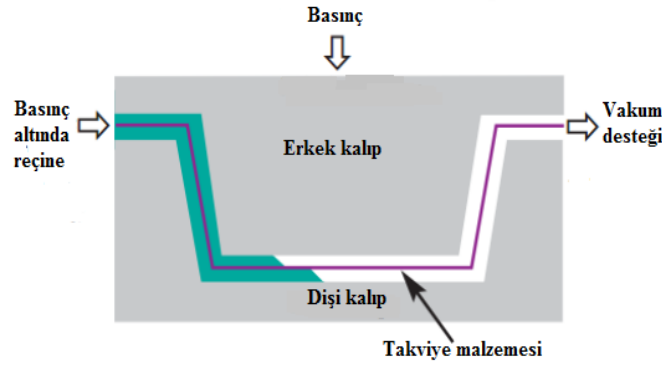
genellikle silindirik biçimde, su tankları, yat direkleri araç şaftları gibi ürünler üretilir. Şekil 1.10’da elyaf sarma yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 1.10 Elyaf sarma yöntemi (İnt. Kyn. 5).

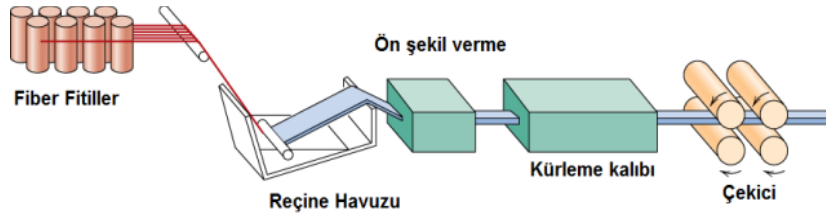
### Kapalı Kalıplama Üretim Yöntemleri

Reçine transfer kalıplama yönteminde (RTM) elle yatırma sistemlerine göre uzun ömürlü ve daha hızlı olmak ile birlikte iki ayrı parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Oluşturulan kalıbın kompozit malzeme ile yapılması çelik kalıp maliyetine nazaran daha düşüktür. RTM yönteminde iki yüzeyinde düzgün olması istenen malzemelerde yoğunlukla jelkotsuz veya jelkotlu yöntem kullanılır. Kullanılan takviye malzemesi kuru kumaş, keçe veya ikisinin kombinasyonudur. Kalıp boşluğunu dolduracak şekilde takviye malzemesi önceden kalıba yerleştirilerek kalıp kapatılır. Reçine basınç altında oluşturulan kalıba pompalanır. Matris enjeksiyonu en fazla 80 °C kadar ısıtılmış, ılık veya soğuk kaplarda uygulanabilir. Reçinenin elyaf içerisine işlemesi ve havanın dışarıya çıkarılması için vakum kullanılabilir. Bu yöntem ile karmaşık parçalar üretilir. Şekil 1.11’de reçine kalıplama yöntemi görülmektedir. Otomotiv sektöründe RTM tekniği kullanımı McLaren Automotive aracılığıyla Mercedes SLR için karbon elyaf bileşenlerin üretimiyle gerçekleşmiştir. RTM kullanarak yüksek üretim oranı elde etmiştir. Benzer biçimde dokunmamış kumaş preformları ve RTM yöntemi kullanarak BMW tarafından M6 v M3 modeli için karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) çatı ve tampon desteği üretilmiştir (Jacob 2010). Böylelikle RTM yöntemi otomotiv sanayisinde termoset tabanlı sürekli fiber takviyeli kompozit üretilmesinde tercih edilen yöntem haline gelmiştir. Toray endüstrisinde bu yöntemi kullanarak yılda 20.000 ile 40.000 arasında parçaların seri üretim rakamlarını hedeflemişlerdir (Europe 2011, Stewart 2009).



**Şekil 1.11** Reçine kalıplama yöntemi gösterimi (Europe 2011, Stewart 2009).

Pultrüzyon yöntemi yüksek hacimde, düşük maliyetli üretime imkan veren otomatik ve sürekli bir prosesdir. Genelde reçine emdirilmiş fiberler kalıp boyunca çekilir ve çeşitli geometrilere sahip profil çubuklar üretilir. Yöntem ile sürekli uzunluğa sahip ve sabit kesitli parçalar üretmek mümkündür. Isıtılan kalıp içerisinde sabit hız ile çekilen fiberler kompozit parçalar kalıptan kısmen pişmiş veya pişmiş bir şekilde çıkarlar. Çıkan parçalara tekrar ilave yüzey işlemi yapılmaz. Pultrüzyon yönteminde matris olarak genelde vinilester, epoksi ve polyester reçineler kullanılır. Takviye malzemesi olarak da herhangi fiber türü kullanılabilir. Şekil 1.12’de Pultrüzyon yöntemi gösterilmiştir. (Gülmez 2018).



**Şekil 1.12** Pultrüzyon yöntemi gösterimi (İnt. Kyn. 6).

Ekstrüzyon yöntemi, plastik maddenin ısı ile sıvı hale getirilerek belirli bir şekilli kalıptan basınçla geçirilmesi ve şekillendirmesi yöntemidir. Şekillendirmede boru, levha, çubuk ve herhangi başka malzeme üzerine kaplama biçiminde olabilir. Sürekli ve uzun döküm yöntemidir. Bu yöntemde genellikle yüksek molekül ağırlıklı termoplastik malzeme kullanılır (Gülmez 2018).

Hazır kalıplama yönteminde reçine, cam elyaf, dolgu ve katkı malzemeleri içeren kompozit malzemenin sıcak pres kalıplarda ürüne dönüştürmesi işlemidir. Karmaşık

biçimde olan parçalar için uygun olması, metal parçanın yapının içerisine gömülmesi, farklı cidar kalınlıklar gibi avantajlara sahiptir. Ürünlerin her iki yüzü kalıp ile şekillendirilir. Diğer yöntemlerle edilmesi zor şekillerin bu yöntemle yapılması oldukça basittir. Hazır kalıplama yönteminin dezavantajı olarak da, büyük parçanın üretiminin işletme maliyetinin ve yüksek kalıp maliyetinin yüksek olmasıdır (Gül 2018).

Enjeksiyonla kalıplama yönteminde, polimer malzeme ısıtılarak plastik şekle getirilerek ve yüksek basınç uygulayarak kalıp boşluğuna dolması sağlanır. İstenilen boyutlara hassas parçalar üretmek mümkündür. Parça için üretim zamanı 10 ile 30 saniyedir. Fakat bazı durumlarda bu süre 1 dk veya daha fazlaya çıkabilir. Kalıplarda fazla boşluk bulunabilir ve her dafasında birden fazla parça üretilebilir. Bu yöntem termoplastik malzeme için yaygın olarak kullanılan imalat yöntemidir. Otomobil tamponları enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilebilmektedir (Gülmez 2018).

Savurma yöntemi ile kalıplamada, savurma makinası kırılmış fitilleri derece içerisine yüksek bir hızla savrulmasıyla sıkıştırma işlemi sağlanır. İlk başta savurma hızı düşük tutulup, kırılmış fitiller model üzerine biriktikçe hız artırılarak yükseltilir. Bu yöntem ile kalıplamada kalıbın boyutuna bağlı olmadan sıkıştırma işlemi yapılabilir dolayısıyla büyük ebatlı döküm parçaları bu yöntem ile kalıplanabilir. Bu yöntemde diğer yöntemlere nazaran daha sert ve daha iyi bir sıkıştırma sağlanabilir (Gülmez 2018).

### **1.5 Tabakalı Kompozit Yapıda Oluşan Hasar Modları**

Karbon fiber takviyeli kompozitlerde, matris modu, delaminasyon modu, fiber modu ve nüfuziyet ve delinme olmak üzere toplam dört hasar modu vardır.

#### **Matris Modu**

Matris modu, tabakalı kompozit yapının yüzeyine düşük hızlı darbenin oluşturduğu ilk hasar tipidir. Birçok durumda matris kırılması şeklinde oluşmaktadır. Ayrıca matris ile fiber arasındaki bağın kopması ve delaminasyonun başlaması şeklinde de oluşmaktadır. Matris çatlamları gözle zor görülebilen 1-5 joule aralığında düşük hızlı darbe altında gerçekleşir. Matris modundaki çatlamlar çoğunlukla lif doğrultusuna paralel meydana

gelmektedir. Tabakalı kompozit yapılarda matris hasar olarak genellikle, kayma ve çekme çatlaklar olmak üzere iki çeşit hasar gözlemlenir.

### **Delaminasyon Modu**

Delaminasyon, aynı katman gruptaki plakalar arasında olmayıp, farklı fiber oryantasyon açılarına sahip plakalar arasında zengin bölgede meydana gelen kırılmadır. Tabaklı kompozit yapılarda plakalar arasındaki farklı fiber oryantasyonlardan dolayı bu plakaların eğilme rijitlikleri farklılık göstermektedir. Plakalar arasındaki eğilme rijitliği arttıkça meydana gelen delaminasyon alanı da artmaktadır. Üst üste iki plaka arasındaki açı  $0^{\circ}/90^{\circ}$  olduğunda delaminasyon alanında büyük olur.

### **Fiber Modu**

Fiber kopması genellikle delaminasyon ve matris kırılmasından sonra meydana gelmektedir. Fiber kopması vurucunun hemen altındaki bölgede ve bölgesel gerilmelerin yüksek olduğu bölgede meydana gelir. Aynı zaman da darbeye maruz kalmamış arka yüzeylerde yani eğilme gerilmelerin yüksek olduğu bölgelerde de meydana gelmektedir.

### **Nüfuziyet Modu**

Nüfuziyet hasarları malzemeye tamamen nüfuz etmesi ve gözle kolayca görülebilen büyük ölçekli hasar modudur. Kompozit kalınlığının artmasıyla darbe enerjisinin nüfuziyet eşik şiddetinde paralel olarak artar. Delaminasyon, kesme ve elastik eğilme tabakalı kompozit malzemeye nüfuziyet sırasında oluşan temel enerjiyi absorbe etme şekilleridir.

## **1.6 Bal Peteği Sandviç Yapılı Kompozit Malzemeler**

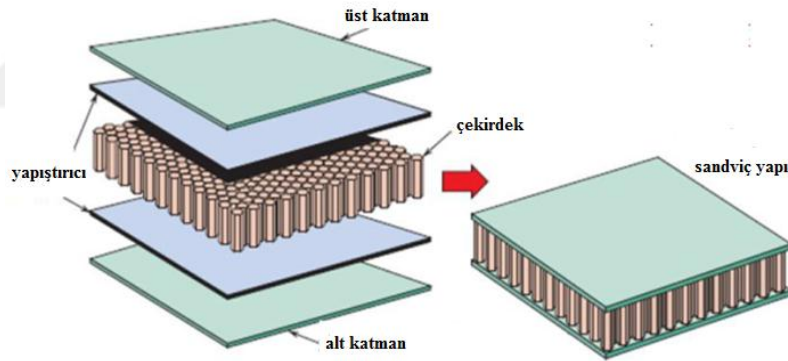
Sandviç yapılar, hafif ve kalın olan bir çekirdek malzemenin iki plaka arasına yerleştirilmesiyle elde edilen yapılardır. Sandviç malzemeler klasik malzemelere göre sahip oldukları dayanıklılık, yüksek eğilme rijitliği – ağırlık, hafiflik gibi özelliklerinden

dolayı denizcilik, yapı endüstrisinde otomotiv, havacılık ve uzay sanayisine kadar pek çok alanda geniş kullanım alanına sahiptir.

Sandviç yapıların iki yüzeyi düşük yoğunluklu çekirdek tarafından ayrılması atalet momenti artar ve bundan dolayı sandviç yapının eğme dayanımı iyileşmiş olur. Sandviç panellerin tasarımcı açısından ekstra bir avantajı ise panelin geometrik parametrelerini (plakaların kalınlığını ve çekirdek) kullanılan malzemeden bağımsız ayarlayabilmesidir (Tarakçılar 1995).

### Bal peteği yapıları

Bal peteği yapılar üst alt katman arasına çekirdek yapının yapıştırıcı yardımı ile birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bal petek yapısını alt-üst katman, yapıştırıcı ve çekirdek malzemelerden meydana gelmektedir. Şekil 1.13’de bal petek yapısını oluşturan kısımlar görülmektedir.



**Şekil 1.13** Bal peteği yapının kısımları (İnt. Kyn. 7).

Malzemenin kullanımın gerçekleştirileceği ortam ve şartlar kullanılacak malzemenin özelliklerini belirleyen ölçütlerdir. Ölçütler arasında; sürtünme, yorulma, sıcaklık, korozyon, rijitlik, çevre, hafiflik, mukavemet, maliyet ve insan faktörü sayılabilir. Lakin hava araçlarında önemli husus ağırlık olduğundan bal peteği gibi yapılara ihtiyaç vardır (Pehlivanoglu 2005).

Bal petek yapıların ağırlık ve mukavemet oranının önemli olduğu, otomotiv, hava araçları ve demiryolu gibi yerlerde kullanılır. Aynı zamanda çarpışma durumlarında enerjiyi

absorbe etmede kullanılır. Örneğin, otomobil şaselerinde ve hızlı trenlerin ön kısımlarında kullanılan petek yapılar kaza esnasındaki darbeleri absorbe ederek yaşam bölgesi oluşturur sürücünün ve yolcuların hayatını korumada pasif güvenlik sistemi olarak oluşacak kazanın olumsuz yönlerini ortadan kaldırmada kullanılır.

Açıklıkları ve eksenleri her zaman yatay konsepttedir. Çekirdek yapıların altıgen şeklinde olması küçük yüzey alanında geniş kaplamayı elde etmemizi sağlar. Yüzey malzemeler ile birleştiği noktada plakalara temas yüzeylerinin az olmasına rağmen kapladığı alan geniştir. Böylelikle altıgen yapıyla az malzeme kullanımı gerçekleşmesiyle istenilen kafes yapı elde edilir (Yiğit 2010).

### **Alt üst katman**

Üst ve alt katmanlarının esas görevi kayma ve eğme direncini sağlamaktır. Üst alt katman paslanmaz çelik, Alüminyum çelik, karbon/epoksi, aramid/epoksi, cam elyaf/epoksi, kâğıt kontrplak gibi yapılardan oluşmaktadır. Genellikle yapılan çalışmalarda üst ve alt tabakalar aynı kullanılmaktadır. Değişik yüzeyler değişik genleşme katsayılarına sahip olacaklarından dolayı yapıda yüzey bozulmalarına sebep olmaktadır.

### **Yapıştırma**

Bal petek yapılarının birleştirilmesinde genellikle epoksi, poliimid, polyamid, vinil fenolik ve nitril fenolik yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Bal peteklerinin yapıştırılmasında genelde epoksi esaslı yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Epoksilerin dezavantajları ve avantajları şu şekilde özetlenebilir;

### **Avantajları**

- Aşınma direnci yüksektir.
- Islanma ve yüksek nem gibi kötü çevre koşullarına karşı yüksek direnç sağlarlar.
- Elyaf yapısıyla yüksek bağ mukavemeti sağlar.
- Uçucu olmadığından çalışma alanlarında kimyasal yapısı bozulmaz.

- Kopma mukavemeti fazladır.
- Yüksek ve düşük çalışma sıcaklıklarında sertleşme özelliğine sahiptir.
- Sertleşme esnasında kendini çekme gibi bir sorunu yoktur.

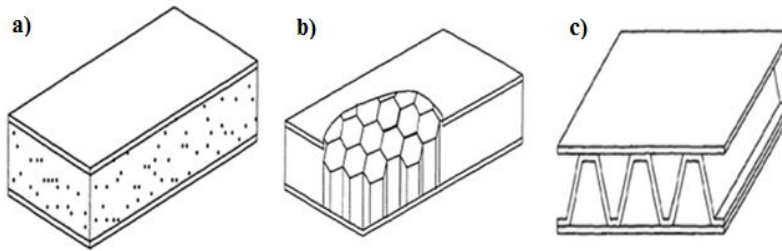
#### Dezavantajları

- Polyestere göre daha yüksek viskoziteye sahiptirler.
- Polyester ile karşılaştırıldığında daha pahalıdır.

Bal peteği yapılarda çekirdek, alt üst tabaklar arası kullanılan yapıştırıcı, iki elemanı kuvvetli şekilde bağlayarak bütün olarak hareket etmesini sağlamaktadır. Bal petek yapıların birleştirilmesinde yapıştırıcılar tercih edilirken, viskozite, renk, sertleşme hızı, hedeflenen dayanıklılık ve sıcaklık aralık değerleri tercih edilir (Taşyürek 2014).

#### Çekirdek

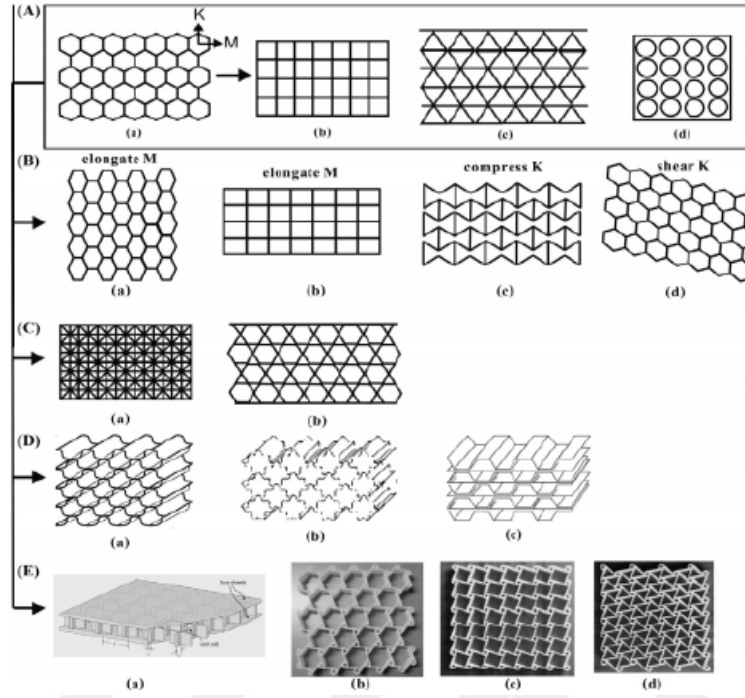
Alt ve üst yüzey levhaların arasına yerleştirilen çekirdek yapının mukavemeti düşük ve hafiftir. Çekirdek yapının esas görevi alt ve üst yüzey plakalar arasındaki mesafeyi korumaktır. Bu nedenle mesafe sandviç yapının kesit alanının bükülme dayanımı ve atalet momentinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Çekirdek malzemesi Şekil 1.14’de gösterildiği gibi genellikle hücresel, bal peteği ve oluklu olmak üzere üç gruba ayrılırlar (Akkuş 2016).



**Şekil 1.14** Çekirdek malzeme tipleri **a)** Sürekli **b)** Bal peteği **c)** Oluklu (Akkuş 2016).

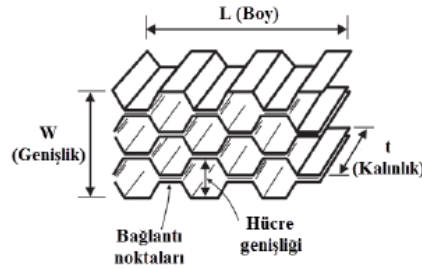
Bal peteği esas mekanik davranışı karşılayan yapılardır. Bal peteği yapısında bulunan çekirdekler farklı yapılarda altıgen, kare, zigzag, dikdörtgen, yumurta kolisi, elipsoit vb. içi dolu, içi boşluklu, farklı malzemelerden Alüminyum, köpük, bakır, kâğıt, balsa

ağacı, epoksi vb. farklı birleştirme metodlarıyla oluşturulmaktadır. Şekil 1.15’de kullanılan farklı çekirdek yapısı görülmektedir (Akkuş 2016).



Şekil 1.15 Farklı çekirdek yapıları (Zhang vd. 2014).

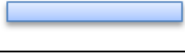
Bal petek yapılarında çekirdek genelde altıgen olarak üretilir. Şekil 1.16’da altıgen çekirdeğin kısımları gösterilmiştir. Yapıştırıcı vasıtası ile bağlantı noktalarından çekirdeği yapıyı oluşturan parçalar birbirine bağlanmaktadır. Çekirdek malzemenin üst ve alt yüzeye yapıştırma işleminin gerçekleşmesiyle bal peteği sandviç yapısının kullanımı yaygın bir hale gelmiştir (Akkuş 2016).



Şekil 1.16 Çekirdek yapısı (Akkuş 2016).

Bal peteği sandviç yapıların dayanımı, ağırlık değişimleri ve eğme rijitliği Çizelge 1.3’de görülmektedir. Üst alt tabaka sabit tutulup çekirdek yapının yüksekliği artıkça dayanımı ve eğilme rijitliği artmaktadır. Ağırlık artışının çok az bir değişimi tasarımda hafiflik avantajı sağlanacağı göz ardı edilmemelidir.

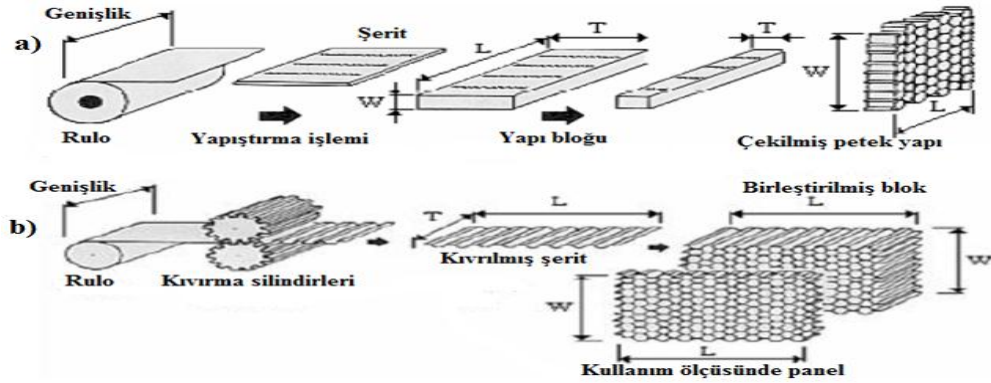
**Çizelge 1.3** Bal peteğin avantajları (Campbell 2010).

|                         | Katı malzeme                                                                      | Çekirdek kalınlığı ' $t$ '                                                        | Çekirdek kalınlığı ' $3t$ '                                                         |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                         |  |  |  |
| <b>Eğme Rijitliği</b>   | 1                                                                                 | 7 (kat rijit)                                                                     | 37 (kat rijit)                                                                      |
| <b>Basma Mukavemeti</b> | 1                                                                                 | 3,5 (kat dayanıklı)                                                               | 9,2 (kat dayanıklı)                                                                 |
| <b>Ağırlık</b>          | 1                                                                                 | 1,03 (% ağırlık artışı)                                                           | 1,06 (% ağırlık artışı)                                                             |

Çekirdek yapıda birim alanındaki hücre sayısı, bağlantının kalınlığı arttıkça çekirdek yapıların basma, eğme, soyma, darbe ve kesme kuvvetlerine karşı mukavemetleri artmaktadır. Çekirdek malzemelerin kesme gerilmelerine karşı davranışları zayıftır. Kesme gerilmesine üst alt katmanlar ve dayanım hücre sayısı değiştirilerek arttırılmaktadır.

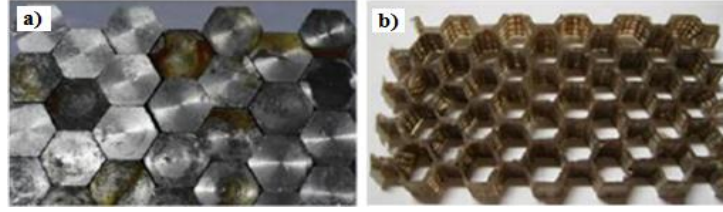
### 1.7 Bal Peteği Yapıların Üretim Yöntemleri

Metalik petek yapılar genellikle uzatma veya kıvrırma yöntemi ile üretilirler. Uzatma yönteminde rulo halinde bulunan çekirdek malzemesine yapıştırıcı sürülmesi, çekirdek malzemesinin üst üste dizilmesi ve istenilen kalınlıklarda kesilip çekilmesiyle oluşturulmaktadır. Kıvrırma yönteminde ise şerit levhalar belirlenen ölçüde kıvrılarak düğüm yerlerine yapıştırıcı sürülmesiyle üst üste yığılarak oluşturulur. Çekirdek malzeme üretimi tamamlandıktan sonra yapıda kalan çapak ve yapıştırıcı gibi malzemeler kullanılmadan temizlenmelidir. Şekil 1.17'de çekirdek malzeme üretim yöntemleri görülmektedir. Çalışmada uzatma yöntemiyle şekil verilmiş petek yapı kullanılmıştır.



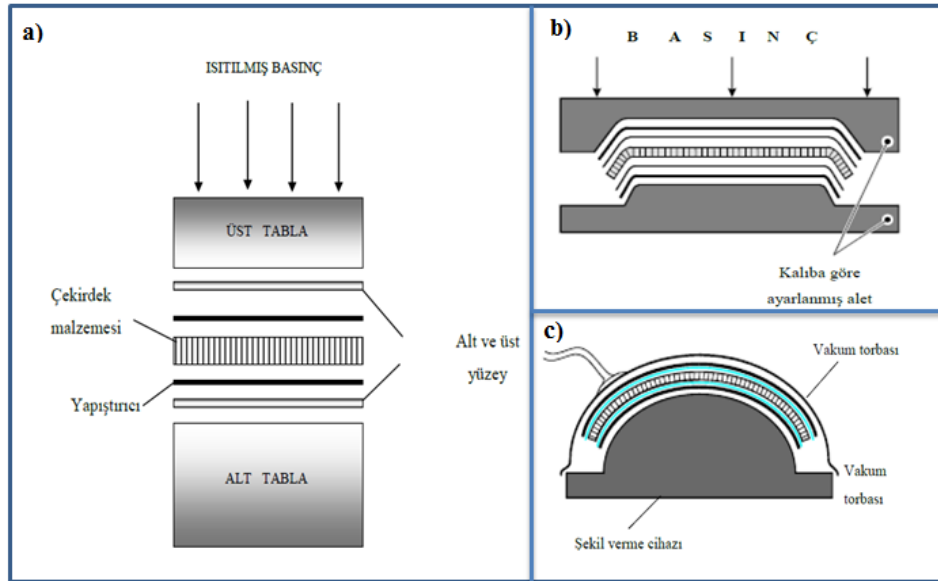
**Şekil 1.17** Çekirdek malzemenin üretim yöntemleri a) uzatma yöntemi b) kıvrırma yöntemi (Hexcel 1999).

Epoksi esaslı çekirdek malzemesinin kalıp içine dökme yöntemiyle üretimi Resim 1.4’de görülmektedir.



**Resim 1.4** Kalıba dökme yöntemiyle çekirdek yapı üretimi **a)** Kalıp **b)** Kalıptan çıkan ürün (Stocchi vd. 2014).

Bal peteği kompozit malzeme üretiminde; sıcak pres metodu, vakum metodu ve kalıp metodu olmak üzere üç üretim yöntemi kullanılmaktadır. Sıcak pres metodunda genellikle önceden şekillendirilmiş paneller ve levhalar üretilir. Sıcak presleme metodu pregreg ve metal yüzeylerde yaygın olarak kullanılır. Sıcak pres ile yapılan üretimde diğer bir seçenek de pregreg yani önceden reçine emdirilmiş malzemenin yüzey tabakaları basınçta önceden ısıtılarak yapıştırıcıyla birleştirilmesidir. Vakum metodu kullanarak üretimde, genellikle karışık şekilli ve genelde kıvrımlı parçalar için uygulanan bir methodur. Genellikle örülmüş parçaların birleştirilmesiyle meydana gelen panellerin üretimi kalıpta gerçekleştirilir. Kalıp metodunda ise, imal edilecek olan parçanın hassas boyutta üretmek aynı zamanda yüzey iyileştirilmesi yapılarak tek bir seferde sonuç alınmasıdır. Üretim yönteminde gerekli basınç ve sıcaklık ayarlamaları yapmak mümkündür. Şekil 1.18’de bal petek üretim yöntemleri görülmektedir.



**Şekil 1.18** Bal peteği üretim yöntemleri **a)** Sıcak pres metodu **b)** Kalıp metodu **c)** Vakum metodu.

## 1.8 Bal Peteği Sandviç Yapıların Uygulama Alanları

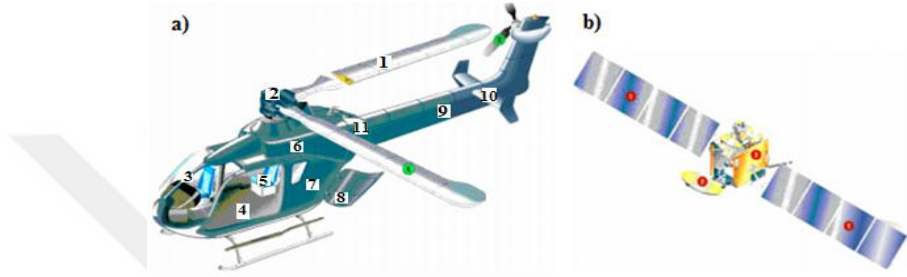
Sandviç malzemeler, yüksek rijitlik, yüksek dayanım/ağırlık oranı, hafiflik gibi özellikleri sayesinde şuan günümüzde endüstride kullanılan malzemelerin yerini almaktadır. Çekirdekli bal peteği sandviç yapılar otomotiv sektörü, savunma sanayi, havacılık, uzay sanayi, inşaat, denizcilik, sağlık malzemeleri, spor malzemeleri vb. sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çekirdek yapı ve yüzey plakaları farklı malzeme çeşitlerinden geometrilerden seçilerek uygun özelliklere sahip sandviç yapı malzeme tasarımları elde edilebilmektedir. Böylelikle ihtiyaçları karşılayabilecek malzemeler üretilmektedir. Polimer esaslı sandviç yapılar otomobillerde gövde, direk ve tavan kısımlarında, rüzgâr türbini ve yarış bisikletlerin gövde bölümlerinde birçok farklı alanlarda petekli yapılar kullanılmaktadır (Yiğit 2010).

Havacılık, savunma ve uzay sanayi sektöründe, son yıllarda metal malzeme yerine kompozit malzeme kullanımında çok artış görölmektedir. Artış içerisinde daha çok öneme sahip malzeme uçağın yapısında kullanılan elyaf takviyeli kompozitlerdir. Uçak tasarımda ilk kullanılan kompozit cam elyafıdır. 1940'li yıllarda ağaç çekirdeklerinin yüzey kısımlarına cam elyaf reçineli kompozit levhalar yapıştırılarak sandviç yapı olarak kullanıldığı yapılan araştırmalarda görölmüştür. Uçak tasarımlarında kompozit malzemelerin kullanımı 1960 yıllarda yoğun olarak başlamıştır. Uçak yapılarında kullanılan kompozit yapılar Alüminyum'a göre yüksek mukavemete ve düşük ağırlık özelliklerine sahiptir. Özellik değerleri kıyaslandığında bor/epoksi ve karbon/epoksi gibi geleneksel malzemelerden üstün oldukları görölmektedir (Aydıncak 2007).

Sivil yolcu uçaklarında kullanılan grafit/epoksi kompozitler ilk olarak Boeing 727'nin gövde kaplamasında kullanılmış olup %14 oranında ağırlık kazancı sağlamıştır. Boeing 737'de aerodinamik frenleri grafit/epoksi kompozit malzemeden üretilmiş olup %15 oranında ağırlık kazancı sağlanmıştır. Boeing uçaklarındaki burun iniş takımları hibrid kompozitlerden, ana iniş takım kapakları ise karbon fiber kompozitten imal edilmiştir. Uçak yapılarında spoiler kısımların iç malzemesi olarak Nomex petek yapıdan üretilmiştir. Üst kısmında ise kevlar epoksi malzemesi kullanılmıştır. İstikamet dümeni karbon/epoksi malzemeden meydana getirilmiştir. Dikey dengeleyici cam fiber

kompozitlerden ve hibrid kompozitlerden üretilmiştir. Falplarda, hava frenlerinde ve kanatçıklarda ise genellikle Nomex petek yapısı kullanılmıştır (Tiganis 1996).

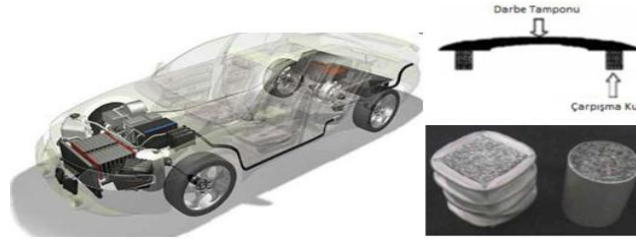
Resim 1.5a’da görüldüğü üzere bir helikopterin kanat, gövde, kapıları ve kuyruk kısımları epoksi/karbon ve cam elyaf petekli yapıdan üretilmiştir. Uzay sanayisinde kullanılan uydu sistemlerinin Resim 1.5b’de görüldüğü üzere güneş panelleri, yansıtıcı antenler ve gövde kısımları Alüminyum petekli yapı ve epoksi/karbon kompozit malzemeden üretilmiştir.



**Resim 1.5** Helikopter ve uydu sistemi kısımlarında kullanılan petekli yapılar **a)** 1. Kanat, 7. Gövde, 8. Kargo kapıları, 9. Kuyruk **b)** 1. Güneş panelleri, 2. Yansıtıcı antenler, 3. Gövde (Gül 2018).

Otomotiv sanayi sektöründe, günümüzde otomobillerin, iş makinelerin ve spor araçlarının meydana gelebilecek çarpmalara karşı dayanım kazandırma, iş gücünü artırma ve kapasitesini artırmak amacıyla birden fazla noktada bal peteği çekirdekli sandviç yapı kullanılmaktadır. Bilhassa yarış araçlarının gövde ve burun kısımlarını güçlendirmek için vincin yük taşıyıcı gövdesinin kapasitesini artırmak maksadıyla bal petekli çekirdek sandviç yapılar kullanılmaktadır.

Alüminyum petek yapıların otomotiv sektöründeki kullanıma başka bir örnek de çarpışma emicileridir. Çoğu şirket yolcuları korumak amacıyla ve arabada meydana gelebilecek hasarı düşürmek, meydana gelecek tamir masraflarını minimuma indirmek için çeşitli çalışmalar yapmaktadır. Çalışmaların sonucunda Resim 1.6’da görülen çarpışma kutuları icat edilmiştir. Bu kutuları ön korkuluk ile darbe tamponuyla arasında yer alan bölümde bulunmaktadır.



**Resim 1.6** Çarpışma kutusu görüntüsü (Akbulut 2008).

Kutular 15 km/s hızda bir çarpışmada meydana gelen bütün enerjiyi absorbe ederler ve bu sayede otomobilin dış kısmında meydana gelecek maddi hasar önlenmiş olur. Bunların yanında ses yalıtımı ve emilimi de otomotiv sanayisi için önemli bir husustur. Ses yalıtım özelliklerinden dolayı Alüminyum petek yapıları otomotiv endüstrisinde tercih edilmektedir

Denizcilik sanayi sektöründe kullanılan hafif ağırlıklı yapılar önemli yere sahiptir. Günümüzdeki yolcu gemilerin tamamıyla Alüminyum bal peteği ve Alüminyum levha çekirdekli sandviç yapılardan oluşmaktadır. Özellikle Alüminyum sandviç panel gemi inşa sanayisinde istenilen özelliklere uygun şekilde cevap verebilecek malzemelerdir.

Gemi tasarımlarında Alüminyum sandviç paneller kullanılmak üzere imal edilirken yapıştırıcı malzeme olarak poliüretan kullanılmaktadır. Dolayısıyla sönümleme kabiliyetinin ve mekanik dayanımının yüksek aynı zamanda hafif malzeme olmasını sağlar. Sandviç yapılar gemi bölmeleri, anten platformları, ambar platformları gibi alanlarda kullanılmaktadır (Cabrera 2008).

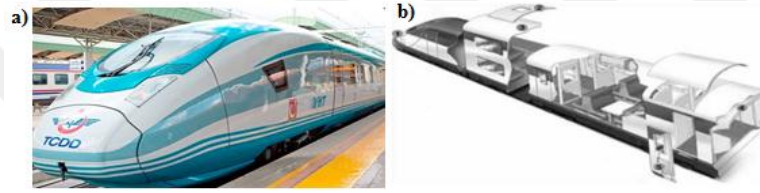
Hızlı bir feribotta sandviç yapıların Resim 1.7’de görüldüğü üzere 2. ve 6. gövde dış kısımları, 4. asma tavanlar, 7. kamara bölümleri 9. hava kalkanı gibi yerlerde petek yapılı kompozit malzeme kullanılmaktadır (Yiğit 2010).



**Resim 1.7** Hızlı feribotta sandviç yapının kullanıldığı kısımlar (Yiğit 2010).

Diğer sanayi dallarında ise, sandviç yapının hafiflik özelliği sebebiyle günümüzdeki spor malzemeleri yapımında sıklıkla kullanılan bir yapıdır. Bu sektör için spor malzemeleri yüksek maliyete sahip olmasına karşın önemli bir ölçüde uygulama alanı bulmuştur. Futbolcuların ayak sağlığını korumak maksadıyla tekmelik (kaval kemiği koruyucu) yapımında enerjiyi absorbesi iyi olmasından dolayı Alüminyum köpük kullanılmaktadır. Günümüzde yürüme bantlarında, bisiklet gövdelerinde, tenis racketlerinde de sandviç yapıların kullanıldığı görülmektedir.

Hafif olmalarının yanı sıra mukavemet özelliklerinin iyi olması sebebiyle sandviç yapılar tren yapımında karşımıza çıkmaktadır. Özellikle Resim 1.8’de trenin yan gövde ve trenlerin burun kısmında sandviç yapılar kullanılmaktadır (Aydıncak 2007).



**Resim 1.8 a) Tren yapımında kullanılan sandviç paneller b) tren vagonunda sandviç yapı kullanılan bölge (Aydıncak 2007).**

### **1.9 Sandviç Yapılı Kompozitlerde Yapıda Oluşan Hasar Modları**

Düşük hızda darbe sandviç kompozitlerde çekirdeklerde, yüzey levhalarında ve çekirdek yüzey levha arasında hasar oluşumuna neden olur. Hasarın büyümesi ve başlaması çekirdek malzemeler ile yüzey malzemelerine bunlar arasındaki ilişkiye sahiptir. Düşük hızlı darbeye sandviç yapılarda darbeye maruz kalan çekirdek, üst levha ve bunlar arasında bulunan ara yüzeyde hasar meydana gelirken genellikle alt levhada darbe oluşmaz. Yaygın bir şekilde görülen hasar türleri ise, çekirdek burkulması, çekirdek kırılması, darbenin uygulandığı üst levhada delaminasyon, levhada fiber kırılması ve matris kırılması şeklindedir. Sandviç yapılarda oluşacak hasar, darbe altında çekirdek ve levhaların malzeme özelliklerine ve geometrisine, sandviç yapının sınır şartlarına, vurucu ucun özelliklerine ve geometrisine bağlıdır (Abrate 2011).

Sandviç kompozitde düşük hızda darbenin neden olduğu hasar oluşum mekanizması şu şekildedir (Abrate 2011);

- Darbeye uğrayan üst yüzey levhalar darbeye maruz kalır. Şayet levha vurucu ucun batmasına direnç gösterirse, levhayla sınırlı olan alanda yoğun hasar meydana gelir. Üst levha ile çekirdek arasında şekil değiştirmelerin farklı olmasından dolayı ayrılmalar oluşur. Yüksek darbe enerjisinde vurucu üst levhaya geçerek çekirdeğe doğru ilerler.
- Hücre ezilmesi, çekirdek hasarı, yüzey tabakası ve kesme hasarı ile çekirdek arasında ayrılmanın olması biçiminde meydana gelir.
- Darbeye maruz kalmayan alt levha da eğilmeden kaynaklanan çekme gerilmelerine uğrar. Üst levhada görüldüğü gibi alt levha ile çekirdek arasında ayrılmalar oluşur. Vurucu uç sandviç yapının tamamına geçmeden arka yüzeyinde önemli delaminasyonlar meydana gelir.

#### **1.10 Darbe Test Metotları ve Hasar Değerlendirmeleri**

Darbe, yüksek orta veya düşük hızda kısa bir süre içinde bir yapı veya malzeme üzerine uygulanan anlık dış kuvvet olarak tanımlanabilmektedir. Yapı veya malzeme üzerine gelen darbeleri başlıca yüksek hızlı veya düşük hızlı olarak iki kısma ayırmak mümkündür. Düşük hızlı darbede darbe hızı 1 ile 10 m/s arasında değişmektedir (Mili ve Necip 2001). Bazen düşük hızda darbeler düşük enerjili darbe olarak da isimlendirebilmektedir. Kompozit malzemelerde darbe sonucunda oluşan, çarpmanın çeşidine göre darbeye maruz kalmayan yüzeylerde meydana gelebilir. İçyapıda meydana gelen tabakalar arasında ayrışma yani delaminasyonlar şeklinde başlayabilir.

Yüksek hızlı darbelerde ise balistik limitte olan darbedir. Deneysel olarak yüksek darbe hızı ortalama 74,1 m/s'ye kadar hız olarak belirlenmiştir (Jenq ve Mo 1996). Bir uçağın havaalanına inmesi veya havalanması sırasında, uçak gövdesine taş parçasının çarpmasını yüksek hızlı darbeye örnek verebiliriz. Böyle durumlarda küçük ağırlığa sahip parçaların yüksek hızla çarpması söz konusudur. Yüksek hızlı darbe meydana geldiğinde şayet çarpan parça yüksek hızla sahipse kompozit malzemeye delip geçebilir veya saplanır. Yapılar veya malzemeler üzerine gelebilecek iki tip hızla sahip darbelerin yapı veya malzemedeki oluşabilecek hasarı öncesinden tahmin etmek, simülasyon yapmak ve dinamik özelliklerin (kırılma tokluğu, mukavemet düşüşü, enerji absorbe

etme kabiliyeti, çentik hassasiyeti ve hasar mekanizmaları) belirlenmesi amacı ile yapılan birtakım darbe testleri vardır (Sayer 2009).

#### **1.10.1 Düşük Hızlı Darbe Test Metotları**

Malzemelerin darbe direncini belirlemek için yapılan düşük hızda darbe test metotları şunlardır;

- Ağırlık düşürme darbe test metodu
- Izod ve Charpy darbe test metodu
- Ankastre edilmiş kiriş darbe test metodu
- Pendulum darbe test metodudur.

#### **Izod Ve Charpy Darbe Test Metodu**

Charpy ve Izod darbe test metodu, basit sarkaç testi olup metal malzemenin darbe performansını özellikle de sünek/gevrek geçiş sıcaklığının ve çentik duyarlılığının değerlendirmesinde uygulanan bir test metotlarıdır. İki test metodunun birbirleri arasında bazı farklılıklar vardır. Örneğin malzemelerin açılan çentik, sarkaç tipleri ve malzemelerin desteklenme şekline göre darbe uygulanan yüzeyler farklıdır. Malzemelerin ortasına açılan çentik V veya U şeklindedir. Charpy testi kompozit test için kullanırken, Izod testi de daha çok polimer malzeme testi için kullanılmıştır. Fakat kompozit malzemelerin tabaka yönündeki çentik hassasiyetinden dolayı Charpy testi kompozit için uygun test metodu değildir. Kompozitler ve plastikler için darbe enerjisinin tabir edidiği formül aşağıdaki gibidir.

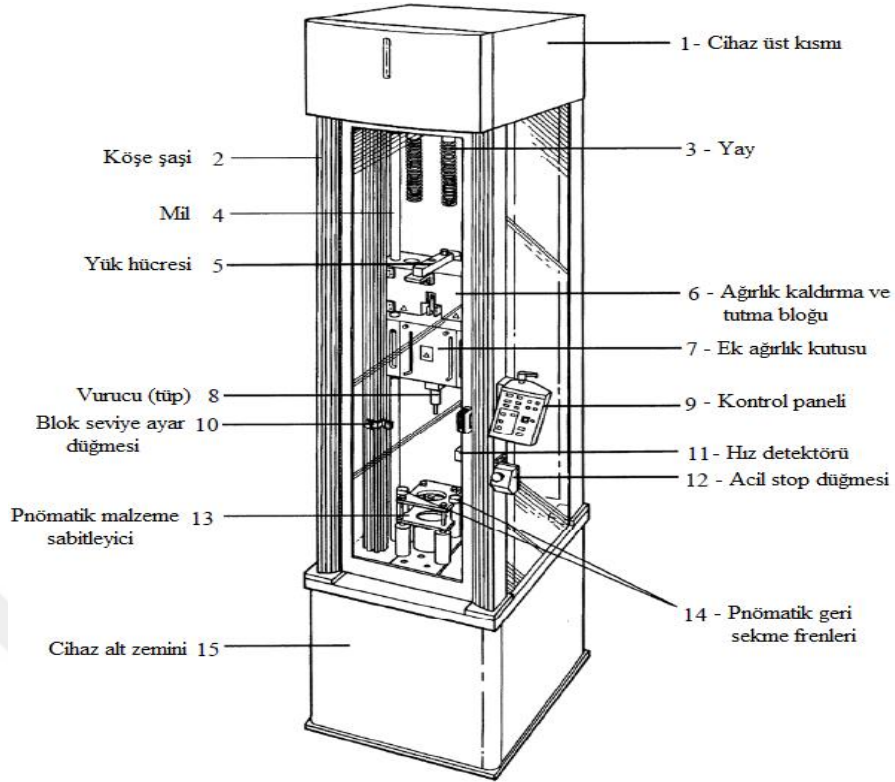
$$U = E/b(d - c) \quad (1.1)$$

E darbe test sonucu elde edilen enerjiyi, U darbe enerjisi, c çentik derinliği, d malzemenin derinliği ve b malzemenin genişliğini ifade etmektedir (Reid ve Zhou 2000).

## Ağırlık Düşürme Darbe Test Metodu

Ağırlık düşürme test metodu Charpy ve Izod test metotları yerine malzemenin dinamik özelliklerini belirlenmesinde genel olarak kullanılan metottur. Charpy ve Izod test metotlarında darbenin sınırı belli iken, ağırlık düşürme darbe test metodunda malzemenin darbe enerjisi ve çarpma hızı istenilen biçimde ayarlanabilir. İstenilen ağırlığın istenilen yükseklikten malzeme üzerine düşürülmesi sağlanabilir. Bu metot ile malzemeye tekrarlı darbe, delinme ve saplanma darbe testleri yapılabilir. Yapılan çalışmada, ağırlık düşürme darbe test metodu kullanılmış olup çıkan sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır. Resim 1.9’da ağırlık düşürme darbe test cihazının şematik resmi görülmektedir. Test cihazı, veri yazılım sistemine, pnömatik bir sabitleyiciye, pnömatik geri sekme frene ve ağırlıklarıyla birlikte çapraz kafaya sahiptir. Ağırlık tutma ve kaldırma bloğu altında yer alan vurucuya ve çapraz kafayı istenilen yüksekliğe çıkartarak yay desteği ile birlikte ağırlıkların malzeme üzerine düşürülmesini sağlar. Böylelikle istenilen hızda, istenilen yükseklikten ve istenilen darbe enerjisinde malzemeye darbe uygulanmış olur. Vurucu ucun yarıçapı olarak genellikle 12,7 mm çapında yarı küresel rijit uç kullanılır, istenilirse farklı geometri ve yarıçapta uçta vurucu olarak kullanılabilir (Sayer 2009).

Malzemeye darbe uygulanmasından sonra vurucu uç yük sinyaller üretilmesini sağlar ve yük sinyalleri yük verilerini bilgisayara bağlı olan veri toplama kartına aktarılır. Veri toplama kartı da bu verileri, yazılıma aktararak test sonuçlarına ilişkin veriler elde edilmesini sağlar. Pnömatik geri sekme freni ise devrede olursa malzeme üzerine tekrarlı darbenin önlenmesini sağlar eğer kapatılırsa malzeme tarafından sönmelenene dek devam eder. Hız detektörü de vurucu uç tarafından malzemeye darbenin gerçekleşmesinden önceki darbe hızını ölçer sinyal şartlandırma birimiyle darbe hızının veri kartına aktarılması sağlanır (Sayer 2009).



**Resim 1.9** Ağırlık düşürme test cihazın şematik gösterimi (Sayer 2009).

### Ankastre Edilmiş Kiriş Darbe Test Metodu

Ankastre edilmiş darbe test metodu yaygın olarak kullanılmayan düşük hızlı darbe test sistemidir. Ankastre edilmiş kiriş darbe testinde 1 inch çapındaki çelik top esnek girişin ucuna monte edilmiştir. Top çekilip bırakıldığında malzeme üzerine çarpar ve darbenin oluşmasını sağlar (Aktaş 2007).

### Pendulum (Sarkaç) Darbe Test Metodu

Pendulum darbe test sistemi, ağırlık düşürme darbe test sistemine göre birtakım avantajları olan test metodudur. Sarkaç sistemi aynı ağırlık için küçük darbe enerjilerin verilerinin alınmasında güvenilir olduğu kadar geri sekme hızı ve darbe hızının ölçülmesinde de avantaja sahiptir. Böylelikle, hareket denklemin entegrasyonu için kontrol sağlanıp ve absorbe edilen enerji doğru şekilde ölçülebilir. Böylece, hız ölçümleri tüpün ivmesi aşağı yukarı sıfır olduğunda pendulum sarkacın alt kısmından

alınır. Bu davranış ağırlık düşürme darbe metotlarından elde edilen hız ölçümlerinden tutarlı olmasını sağlar (Aktaş 2007).

### **1.10.2 Yüksek Hızlı Darbe Test Metotları**

Yüksek hızlı darbe sistemlerinde ise küçük ağırlığa sahip fakat yüksek hızlı parçaların yapı veya malzemeler üzerine olan darbeyi simüle edilir. Yüksek hızlı darbe test metodları Split-Hopkinson basınçlı çubuk ve basınçlı hava darbe test metodudur.

Split-Hopkinson basınçlı çubuk test metodu, malzemelerde yüksek şekil değişimini ve hız etkisini araştırmak aynı zamanda malzemelerin çeşitli modlarda dinamik davranışlarını incelemesi için yaygın bir şekilde kullanılan bir metottur. Genellikle kullanılan vurucu uç 12,7 mm yarıçapındadır. Gaz tankından bırakılan sıkıştırılmış havayla tüp tarafından itilen vurucu uç ile aksel bir darbe meydana getirilir. Giriş çubuğunun üzerine yapıştırılan strain gaugelerden alınan veriler veri kaydedicisine kaydedilir. Malzemeye etkiyen yük, malzeme yer değiştirmesi ve darbe hızı, strain gauge aracılığıyla depolanan verilerin veri kaydedicisi tarafından kullanılmasıyla hesap edilir (Shu vd 2007).

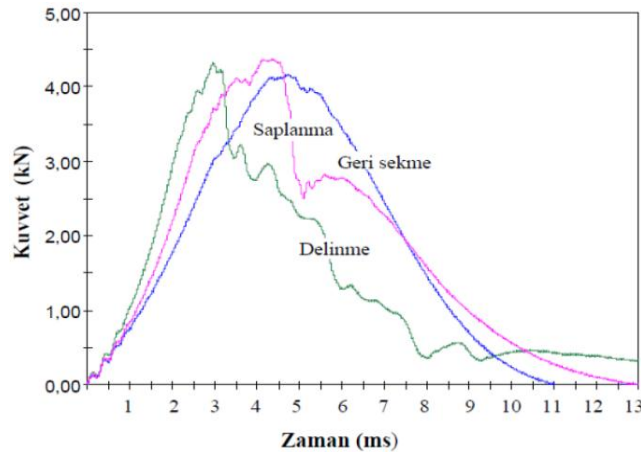
Basınçlı hava darbe test sistemi, hızı 100 m/s' den büyük ve kütlesi 250 gramdan küçük vurucular için uygun metottur. Filtre tarafından temizlenen hava basınç regülatörü tarafından çekilir. Regülatör sıkıştırılan yüksek basınçlı havayı, basınç kontrollü verilmek üzere hava tankının içine gönderir. Bir selenoid valf tarafından basınçlı hava salıverilir. Daha sonra vurucu mermi namlunun içinde ilerler ve hız sensöründen geçer. Bir hız sensörü, ışık yayan bir diyot ve fotodedektörden meydana gelmektedir. Uzunluğu öncesinden bilinen mermi, ışık kirisini keser bu kesitinden dolayı sensör tarafından bu sırada sinyal üretilir. Üretilen sinyal de merminin malzemeye çarpmadan önceki hızın hesaplanmasında kullanılır. Pek çok test düzeneğinde bu iki ışık yayan fotodedektör ve diyot sensör kullanılır. Merminin bu iki sensör arasında ilerleme süreci dijital sayıcı tarafından tespit edilerek ve hızın hesaplanmasında kullanılır (Mili ve Necib 2001).

## 1.11 Kompozit Malzemelerinin Darbe Davranışlarının Belirlenmesi

Darbe testinin numuneler üzerine darbe enerjisi uygulanmasıyla, darbe cihazından kompozit malzemelerin darbe davranışlarını gösteren birçok sonuç ve grafik elde edilebilmektedir. Elde edilen grafikler, kompozit malzemelerin darbe davranışına ait vurucunun malzemenin yüzeyinden geri sekmesiyle (rebounding), vurucu ucunun malzemeye saplanması (penetration), vurucunun malzemeyi delip geçmesi (perforation) gibi üç durumun anlaşılması sağlanmaktadır. Bunlar, kuvvet-zaman (F-t), kuvvet-çökme (F-d), hız-zaman (V-t), çökme-zaman (d-t) ve absorbe edilen enerji-zaman ( $E_a-t$ ) eğrileri gibi kompozit malzemelerin darbe davranışlarını belirlemede kullanılan eğriler elde edilebilir (Sayer 2009).

### 1.11.1 Kuvvet-Zaman (F-t) Eğrisi

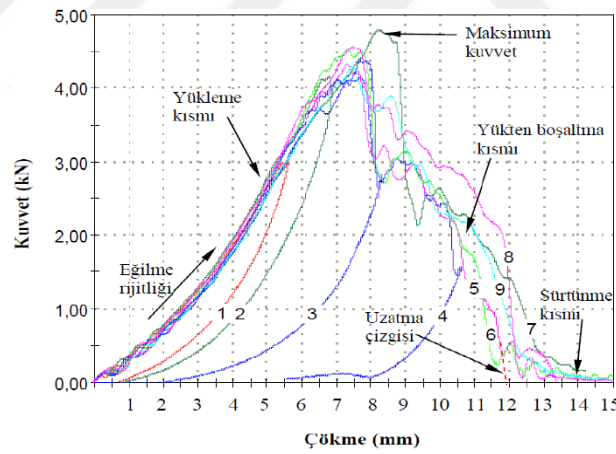
Şekil 1.19’da malzeme yüzeyinden geri sekme (rebounding), vurucunun malzemeye saplanması (penetration) ve vurucunun malzemeyi delip geçmesi (perforation) gibi üç duruma ait kuvvet zaman (F-t) eğrisi görülmektedir. Görüldüğü üzere düşük enerjili darbeye eğri parabolik bir eğridir. Darbe enerjisinin artmasıyla kuvvet de artmakta ve saplanma-delinme eğrisinde görüldüğü gibi maksimum kuvvet değeri de aşağı yukarı sabit değer olmaktadır. Malzemede delinme meydana geldiğinde kuvvet sıfır olması gerekir fakat şekilden de görüldüğü gibi vurucu ve malzeme arasında sürtünme olduğundan eğrinin uç kısmı yatay ekseninde paralel ilerlemiştir (Sayer 2009).



Şekil 1.19 Kuvvet - zaman eğrisi (Sayer 2009).

### 1.11.2 Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrisi

Kuvve-çökme (F-d) eğrisi darbe esnasındaki kompozit malzemelere ait darbe davranışlarını belirlemede kullanılan eğrilerden biridir. Şekil 1.20’de artan darbe enerjisiyle birlikte kuvvetin çökmeye karşı varyasyonunu gösteren bir F-d eğrisi görülmektedir. Eğrilerden her biri yüklemede artma kısmına, ulaşılan maksimum kuvvete ve yükten boşaltmada da azalma kısmına sahiptir. Darbe yüküne karşı malzemenin göstermiş olduğu dirençten dolayı kuvvet-çökme eğrisindeki bu artma kısmı eğilme rijitliği olarak adlandırılır. Artan darbe enerjisinin altında oluşan bu eğriler açık tip ve kapalı tip eğri olarak ikiye ayrılır. Kapalı tip eğri vurucunun malzemeye temas etmesinden sonra vurucunun malzeme yüzeyinden geri sekmesiyle oluşur. Yani darbe enerjisinin büyük kısmı malzeme tarafından absorbe edilmiş ve geri kalan enerji de vurucu ucunun geri sekmesi için kullanılmıştır. Uygulan darbe enerjisi arttırıldığı zaman, geri sekme azalırken çökme artar ve kapalı tip eğri genişler. Şayet açık tip bir eğri ise vurucu malzemeyi ya delmiştir ya da malzemeye saplanmıştır. Dolayısıyla malzeme yüzeyinden geri sekme oluşmaz.

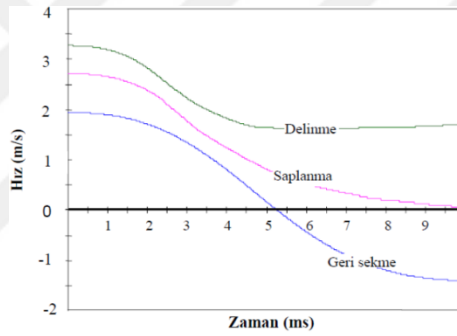


Şekil 1.20 Darbe enerjisiyle oluşan kuvvet - çökme eğrisi (Sayer 2009).

Uygulanan darbe enerjisi daha fazla arttırıldığında vurucu malzemeye saplanır, malzeme kalınlığı boyunca hareket eder ve malzemeyi delerek alttan çıkar yani delinme olayı gerçekleşir. Şekil 1.20’de verilen kuvvet-çökme (F-d) eğrisinin uç kısımlarında yatay ekseninin sonuna doğru kapanan kısım malzeme ve vurucu arasında sadece sürtünme oluşmasından dolayı bu sürtünme kısmını ifade etmektedir. Ulaşılan darbe enerjisinden sonra enerji ne kadar atılır ise arttırılsın kompozit malzemenin daha fazla darbe enerjisini sönmlemeyeceği anlaşılmaktadır.

### 1.11.3 Hız-Zaman (V-t) Eğrisi

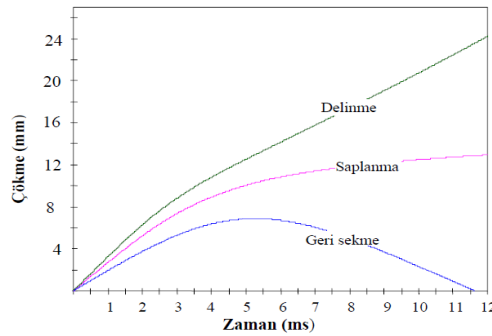
Şekil 1.21’de malzeme yüzeyinden geri sekme (rebounding), vurucunun malzemeye saplanması (penetration) ve vurucu ucun malzemeyi delip geçmesi (perforation) gibi üç duruma ait hız-zaman eğrisi görülmektedir. Darbe testlerini artırılarak yapılan darbe testlerinde, başta belli hıza sahip vurucunun malzeme ile ilk temasından sonra hızı azalır. Vurucunun malzeme üzerinden geri sekmesi halinde, yukarıya hareket eden vurucu negatif hıza sahip olur. Vurucunun malzemeye saplanması halinde ise belli hız ile malzemeye çarpan vurucunun malzemeye saplanması nedeniyle vurucunun tekrar yukarıya geri sekmesi oluşmadığından hız sıfırlanacaktır. Vurucunun malzemeyi delip geçmesi halinde ise belli hız ile malzemeye saplanıp kalınlık boyunca ilerleyen vurucu ucun hızını yavaşlatan durum, vurucu ve malzeme arasındaki sürtünmedir. Dolayısıyla geri sekme oluşmadığından vurucu pozitif hıza sahip olacaktır (Sayer 2009).



Şekil 1.21 Hız - zaman eğrisi (Sayer 2009).

### 1.11.4 Çökme-Zaman (d-t) Eğrisi

Şekil 1.22’de malzeme yüzeyinden geri sekme (rebounding), vurucunun malzemeye saplanması (penetration) ve vurucu ucun malzemeyi delip geçmesi (perforation) gibi üç duruma ait çökme-zaman eğrisi görülmektedir.

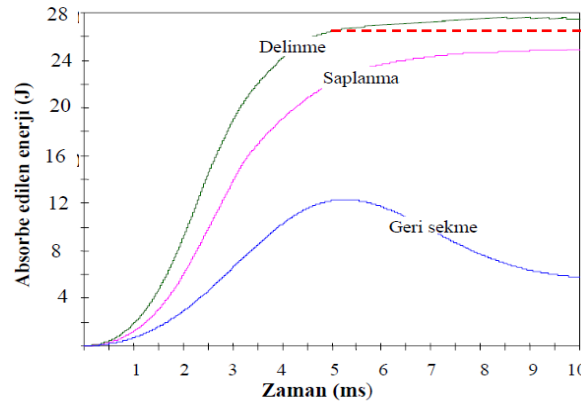


Şekil 1.22 Çökme - zaman eğrisi (Sayer 2009).

Darbe enerjisinin arttırılarak yapılan darbe testlerinde kuvvet maksimuma ulaştığında malzemedeki çökme maksimuma ulaşır. Uygulanan darbe enerjisi artıkça malzemedeki çökme artar. Malzemeye saplanma halinde vurucu hızı sıfıra ulaştığından malzemedeki çökme sabit değerde kalır. Malzemenin delinmesi halinde ise vurucu malzemeyi delip geçtikten sonra vurucu ve malzeme arasındaki sürtünme vurucu ucun ilerlemesini engeller fakat çökme bu durumda artarak devam eder.

#### 1.11.5 Absorbe Edilen Enerji-Zaman ( $E_a-t$ ) Eğrisi

Şekil 1.23’de malzeme yüzeyinden geri sekme (rebounding), vurucunun malzemeye saplanması (penetration) ve vurucu ucun malzemeyi delip geçmesi (perforation) gibi üç duruma ait absorbe edilen enerji-zaman eğrisi görülmektedir. Absorbe edilen enerji, kuvvet-çökme eğrisi altında kalan alandan hesaplanmaktadır. Vurucunun malzeme yüzeyinden geri sekmesi halinde vurucudaki enerjisinin hepsi malzeme tarafından absorbe edilemez ve edilemeyen darbe enerjisi vurucunun malzeme yüzeyinden geri sekmesi için harcanır. Vurucunun malzemeye saplanması halinde ise vurucudaki darbe enerjisinin hepsi malzeme tarafından absorbe edilir ve şekilden görüldüğü üzere eğrinin son kısmı hemen hemen yatay ekseninde yatay olarak devam eder.



Şekil 1.23 Absorbe edilen enerji-zaman eğrisi (Sayer 2009).

Vurucunun malzemeyi delip geçmesi halinde ise, vurucu ile malzeme arasındaki sürtünmenin altında kalan alanda darbe test cihazı programı tarafından hesaplanan sönümlenen enerji miktarına katılmasından dolayı eğrinin yukarıya yönlendiği görülür. Sürtünmenin altında kalan alanın toplam sönümlenen enerji miktarından çıkarılması gerekir. Dolayısıyla, malzeme tarafından absorbe edilen enerjinin değeri Şekil 1.23’de görüldüğü üzere kesikli çizginin yaklaşık denk geldiği enerji değeridir (Sayer 2009).

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür taramasında bal peteği sandviç yapılı kompozitler, tabakalı kompozitler ve otomobillerin yan darbe kirişler ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bal peteği sandviç yapılarda genellikle çekirdek malzemesi olarak Alüminyum, Alüminyum köpük ve Nomex yapılar kullanılmaktadır. Yüzey malzemesi olarak da elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı kompozitler ve karma kompozitler olmak üzere yüzey takviye malzemeleri kullanılmıştır. Tabakalı kompozitler de, herhangi bir çekirdek malzemesi kullanmayarak yüzey malzemesi olarak bir çok kompozit türleri kullanıldığı literatürde görülmektedir. Genellikle bal petek sandviç yapılar da ve tabakalı kompozitlerde üç nokta eğme, çekme ve darbe testleri uygulanmıştır. Genelde farklı kalınlıkta ve farklı darbe enerjilerde testler yapılmıştır. Otomobillerin yan kapıların içerisinde bulunan yan darbe kirişlerde ise çoğunlukla karbon fiber takviyeli Alüminyum alaşımlı, çelik alaşımlı ve kompozit kaplama vb. olmak üzere çalışmalar bulunmaktadır. Yan darbe kirişlerin kalınlıkları malzeme özellikleri, üretim yöntemleri bakımından incelenmeler yapılmıştır. Üç nokta eğme, çekme ve FMVSS 214 standartlarına göre darbe testleri uygulanmıştır. Petek yapılı sandviç yapılar, tabakalı kompozitler ve yan darbe kirişler ile ilgili hem deneysel hemde sayısal analizler literatür araştırmaları görülmektedir. Bu konudaki çalışmalar güncelliğini korumakta olup halen devam etmektedir. Bal petek sandviç yapılar, tabakalı kompozit malzemeler ve taşıt yan darbe kirişlerle ilgili yapılan literatür araştırması aşağıda listelenmiştir.

### 2.1 Tabakalı Kompozit Malzemeler ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Tabakalı kompozit malzemeler birbirinden farklı fiber yönlendirmelerine sahip tabakaların birleştirilmesi ile oluşmaktadır. Kullanılan matris malzemelerinin, fiber malzemelerinin, tabaka sayısının çeşidine ve fiber açılara göre tabakalı kompozitlerin özellikleri geniş aralıkta değişebilmektedir. Tabakalı kompozitler genel olarak mukavemetli ve hafif yapılardır. Bundan dolayıda birçok alanda kullanılmaktadır. Fakat bu yapılar düşük hız darbelerden etkilenecek bazen gözle görülemeycek bir biçimde hasara uğramaktadır. Dolayısıyla bu hasarın oluşumunun ilerlemesinin ve nasıl sonlanacağını bilmesi gerekmektedir. Literatür araştırılması yapıldığında tabakalı

kompozitlerin düşük hızda darbeye karşı cevabı ile analitik, sayısal ve deneysel birden fazla çalışmaların yapıldığı ve yapılmaya devam ettiği görülmüştür. Tabakalı kompozit malzemelerle ilgili çalışmaların bazı bir takımı şu şekilde özetlenebilir:

(Hashin 1981)'e göre, tek yönlü fiberlere sahip olan tabakalı kompozitler üç boyutlu gerilmelere maruz bırakılarak fiberde ve matris de meydana gelen birbirinden müstakil olarak tespit edebilen hasar model geliştirmiştir. Bu modeli matris hasarlarının, fiber kırılmalarının ve delaminasyonların simülasyonu yapılabilmektedir.

(Mili ve Necip 2001)'e göre, cam/epoksi kompozit malzemeden  $[0_2/90_6/0_2]$ ,  $[0_3/90_6/0_3]$ ,  $[0_4/90_2/0_4]$  dizilimine sahip üç farklı tabakalı kompozit plakalar üretilmiştir. Üretilen plakalara düşük hızda darbe davranışını Alimünyum vurucu uç ile darbe uygulanarak incelenmiştir. Deneyler sırasında vurucunun yer değiştirmesi, darbe merkezindeki çökme değerleri ve vurucunun ivmesi ölçülerek darbe hızının tabakalı kompozit plakaların dizilimin üzerinde etkisini araştırılmıştır. Yapılan deneysel sonuçların doğrulanmasında Hertizian kanunu kullanılmıştır. Oluşturulan veriler ile teorik model arasında ahenkli sonuçlar elde edilmiştir. Fakat darbe hızının artması ile teorik model ile deneysel sonuçlar arasında bir azalma olduğu görülmüştür. Bu azalmaların nedeni sürtünme kayıplarından olduğu çalışmada açıklanmıştır.

(Belingardi ve Vadori 2003)'e göre, karbon fiber takviyeli kompozit malzemeden üç farklı kalınlığa ve iki farklı istiflenme şekline sahip tabakalı kompozit plakalar ile farklı düşük hızlarda deneyler yapmışlardır. Yapılan deneylerden kuvvet-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Oluşturan bu eğrilerden faydalanarak plakaların enerjiyi absorbe etme kapasitelerini araştırmışlardır.

(Aslan vd. 2003)'ne göre, tabakalı kompozit yapının düşük hızda darbe altında vurucunun kütlelerinin boyutlarına etkisini 3D-IMPACT sonlu elemanlar programı ve deneysel yöntem kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında kuvvet-zaman grafiğinin kütle değişmesiyle birlikte paralel değiştiğini ve tabakalı kompozit malzeme yapının da mekanik davranışlarının boyutlarının değişmesi ile birlikte değiştiğini göstermişlerdir.

(Mitrevski vd. 2005)'ne göre, Karbon/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin vurucu ucun geometrisinin etkisi ve darbe hasar direncinin etkisini araştırmışlardır. Vurucu uç geometrisi olarak konik uç, yarı küresel ve sivri uç kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda; en fazla vurucu nüfuziyetinin ve enerji emiliminin konik vurucu uç da olduğu görülmüştür. Hasar başlama yükünde en fazla yarı küresel uç sonra sivri uç daha sonra da konik vurucu uç da olduğunu göstermişlerdir.

(Hosseinzadeh vd. 2006)'ne göre, Dört farklı kalınlıkta olan tabakalı kompozit malzeme yapıların düşük hızda darbe davranışı ve ultrasonik tahribatsız muayene yöntemi ile oluşan hasarları incelemişlerdir. Dört farklı kompozit yapı, iki farklı kalınlıkta karbon/epoksi, cam/karbon/epoksi ve cam örgü/epoksi kompozitlerdir. Çalışmada düşük hızlı darbeye karşı iyi direnci karbon/epoksi kompozit yapısı göstermiştir. Yüksek hızlı darbeye karşı en iyi direnci cam/karbon/epoksi kompozit göstermiştir. Deneysel çalışmalar ANSYS-LS DYNA programında modellenmiş olup deneysel çalışmalarla uyumlu sonuç elde edilmiştir.

(Lopes vd. 2009)'ne göre, rastgele bir şekilde istiflenmiş tabakalı kompozitlerin düşük hızda darbe altında davranışlarını sayısal ve deneysel model oluşturarak incelemişlerdir. Fiber hasarını, matris çatlamasını, darbe dinamiğini, delaminasyon boyutlarını, delaminasyon boyunca enerji dağılımını ve tabak içinde oluşan hasarı doğru bir şekilde tahmin etmişlerdir.

(Heimbs vd. 2009)'ne göre, Karbon/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin bası ön yüklemesiz ve ön yüklemeli olarak düşük hızda darbede incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, darbe düzlem dışı yapılırken ön yükleme dülem içi uygulanmıştır. Çalışmalar sonucunda ön yüklemeye maruz kalmış kompozit malzemelerde emilen enerjinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. LS-DYNA programında deneysel çalışma sayısal olarak modellenmiştir. Tabakalar arası ve tabaka içi hasar oluşumunun sayısal ve deneysel çalışma arasında oldukça benzerlik olduğu belirtilmiştir.

(Naik ve Mishra 2010)'a göre, tabakalı kompozit yapının dört kenarı mesnet ile desteklenmiş dikdörtgen şeklinde, simetrik ve ortotropik olarak istiflenmiş yapıya düşük

hızda darbe altında cevabı analitik olarak incelenmiştir. Çalışmalarında düzlem içi gerilmeler ve kalınlık boyunca normal gerilme etkisini dikkate almışlardır. Darbe bölgesindeki yanal yer değiştirme, plaka içerisindeki gerilme, temas kuvveti ve plaka ile vurucunun hız durumunu modal çözüm yöntemi kullanarak belirlemişlerdir. Ortotropik katmanların elastik şekil değişimi yanıtlarına uygulanan yönetici denklemler, atalet momenti, Hertzian temas kuvvetlerinin ve kayma şekil değiştirmelerin birleştirilmiş etkilerini içermektedir. Örgü kumaş kompozitlerin çapraz sıralanmış tabakalı kompozit malzeme plakalara göre fazla darbe dayanımına sahip olduğunu göstermişlerdir.

(Karakuzu vd. 2010)'ne göre,  $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/90^\circ]_s$  dizilimine sahip cam/epoksi tabakalı kompozit yapı üzerine düşük hız darbe uygulayarak vurucu kütlelerinin, vurucu hızının ve vurucu enerjisinin; temas süresi, maksimum şekil değişimi, hasara uğrayan nokta üzerine etkilerini ve absorbe edilen enerjiyi deneysel olarak incelemişlerdir. 3D-IMPACT sonlu elemanlar metodu kullanarak darbe deneyi sayısal olarak modellenmiş olup uyumlu sonuçlar elde etmişler.

(Gama vd. 2011)'ne göre, kalın tabakalı kompozit malzemeler üzerinde 50 m/s-1000 m/s aralığında vurucu hızları ile darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyin MAT162 malzeme modelini kullanarak 3D sonlu elemanlar modelini LS-DYNA oluşturmuşlardır. Analizlerden nüfuziyetin ve darbe süresinin uzun olduğu nüfuziyet bölümünden ve sürenin kısa olduğu şok bölümünden oluştuğunu belirtmişler ve deneysel olarak da doğrulamışlardır.

(Ghelli ve Minak 2011)'a göre, karbon-epoksi tabakalar üzerine düşük hızda darbe ile CAI (compression after impact) darbe sonrasında basma testleri yapmışlardır. Testlerde dikdörtgen ve kare olmak üzere iki farklı geometride kalınlıkları aynı olan iki farklı tabaka dizilim kullanmışlardır. Ayrıca küçük kalınlıkta kompozit plakalar kullanarak tek yönde basma altında burkulma hareketini incelemişlerdir. Elde edilen verileri karşılaştırmak için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Yapılan darbe testleri sonucunda farklı geometriler arasında malzeme hasarı, dinamik davranış ve enerji absorpsiyonu açısından farklılıklar gözlemlenmiştir. Tabakaların diziliminin dairesel numunelerde darbe davranışında etkisi olmamasına karşın dikdörtgen numunelerde etkisi olduğunu

belirtmişlerdir. Hem darbesiz hem de darbeli kalınlıkları küçük numunelerin basma altında küresel burkulma davranışı gösterdiğini ifade etmişlerdir.

(Maio vd. 2013)'ne göre, düşük hızda darbelerin sebep olduğu delaminasyonu MAT162 model kullanarak LS-DYNA sonlu elemanlar programında deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Sonlu elemanlar modelinde plakalar arasında fiziksel arayüz tanımlamadan yalnız katı eleman kullanılmıştır. Çapraz tabakalı kompozitlerde yer fıstığı biçiminde oluşan hasarı LS-DYNA programında gözlemleyebilmişlerdir.

(Long vd. 2015)'ne göre, tabakalı kompozit yapılarda düşük hızda darbe uygulanarak meydana gelecek delaminasyon oluşumunu tahminde bulunmak için sayısal ve deneysel olarak çalışmışlardır. Yapılan çalışmada iki farklı istiflenme şeklindeki kompozit yapı üzerine düşük hızda darbe uygulanmıştır ve meydana gelen hasarlar ultrasonik C-tarama metoduyla incelenmiştir. Delaminasyon darbenin olduğu nokta çevresinde simetrik olarak oluşurken şekli ise tabakanın dizilme açısı ile değişmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma arasında uyumlu sonuç elde edilmiştir.

(Wagih vd. 2016)'ne göre, Karbon/epoksi tabakalı kompozit malzemelerde quasi statik basma deneyleri altında oluşan hasar şekillerin sırasını incelemişlerdir. Testlerde SEM (Scanning Electron Microscopy) yöntemi ve C-scan yöntemi ile mikro yapı incelenmiştir. Yük taşıma kapasitesinin azalması matris kırılmasından kaynaklandığı ve matris kırılmasının delaminasyonu tetiklediği açıklanmıştır.

(Yang vd. 2016)'ne göre, tabakalı kompozit malzemelerin düşük hızda düşük hızda darbe davranışını incelemede tümleşik çok ölçekli simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda simülasyon modeliyle matris çatlamasının alt tabakada meydana geldiğini göstermişlerdir. Matris çatlamasının yüzeye ulaşmasının delaminasyonu tetiklediğini aynı zamanda delaminasyonda fiber kopması olayı meydana geldiğini göstermişlerdir.

(Berk vd. 2016)'ne göre, aramid/epoksi ve S-2 cam/epoksi kompozit plakaların düşük hızda darbe davranışlarını sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. yapılan darbe testleri

20J ve 30J iki farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma yapmak için kompozit plaka üretiminde aynı kalınlık ve epoksi kullanılmıştır. Darbe testleri özel tasarlanan 1800J darbe enerjisi ve 24 m/s hıza sahip CEAST – Fractovis Plus darbe ölçüm cihazında yapılmıştır. Çalışma sonucunda bulunan sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

(Karakuzu vd. 2017)'ne göre, cam lifi/epoksi esaslı kompozit plakanın darbe davranışında deniz suyunun etkisi araştırılmıştır. Kompozit malzemeler laboratuvar koşullarında %3,5 tuz oranına sahip 1, 3, 6 ve 9 ay süreli ile Ege Denizi suyunda bekletildikten sonra darbe testine maruz bırakılmıştır. Yapılan darbe testleri, oda sıcaklığı altında üç farklı darbe vurucu ucu (5, 10 ve 15 kg) kütlelerinde ve üç farklı darbe (10J, 20J ve 30J) enerjilerinde gerçekleştirilmiştir. En çok çökme 30J darbe enerjisinde iken darbe ucu 15 kg kütlelerinde meydana gelmiştir. Genellikle çökme miktarı tüm kütleler için kuru ortam ve 9 ay deniz suyu altında bekletilen malzemelerde aşağı yukarı aynı değerde olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda deniz suyunda bulunan tuzun darbe ucu kütlelerinin ve darbe enerjisinin kompozit plakaların darbe davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

## **2.2 Bal Petek Sandviç Yapılı ile İlgili Yapılan Çalışmalar**

Kompozitler sınıfında bulunan sandviç yapılar, dış kısmında üst ve alt yüzey plakaları ile orta bölümde çekirdek olarak isimlendirilen malzemelerin birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Sandviç yapılar genellikle mukavemet/ağırlık, rijitlik/ağırlık, yüksek eğilme dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Sandviç yapıların ortada kullanılan çekirdek ve üst/alt yüzey plaka malzemeleri farklı malzemelerden seçilebilmektedir. Böylelikle farklı sandviç yapılar elde etmek mümkündür. Sandviç yapılı kompozitler de tabakalı kompozitlerde olduğu gibi geniş alanda kullanılmakta ve düşük hızlı darbelerden hasar görebilmektedir. Darbeye kullanılan çekirdek malzemesine, üst ve alt yüzey plakalarına, petek hücrenin duvar kalınlığına, petek hücre yapısına, yapıştırıcı malzemesine ve yüksekliğine bağlı olan sandviç kompozitlerin de düşük hızda darbeye karşı cevabı araştırılmaktadır. Bu konu hakkında literatür araştırmaların bir kısmı şu şekildedir:

(Wu ve Jiang 1997)'a göre bal petekli yapıların statik ve dinamik yükleme altında darbe olaylarını incelemişlerdir. Hücre sayılarını, malzeme mukavemetlerini ve hücre boyutlarını dikkate alarak inceleme yapmışlardır. Yapılan çalışmada 3,2 mm'den 4,7 mm'ye arasında değişen hücre boyutlarının ve çekirdek yüksekliğinin statik ve darbe yükleri altında enerji emilimi iyi oldukları göstermişlerdir.

(Mines 1998)'e göre, farklı malzeme kombinasyonlarından ve farklı geometrilerden oluşan sandviç yapılı kompozit malzemelerin darbe altında düşük hızda delinmesini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmaların sonucunda delinmenin ilerlemesinde çekirdek yoğunluğunun etkili olduğunu ve hızın artması ile panellerin emdiği enerji artmaktadır. Bunun nedeni de yüksek hızlarda şekil değişiminde plaka ve çekirdek de oluşan basma gerilmenin artmasından kaynaklandığını açıklamışlardır.

(Petras ve Sutcliffe 1999)'a göre, fiber takviyeli plastik levhalar ve Nomex bal peteğinden oluşan sandviç yapılar üzerinde üç nokta eğme deneyleri yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda çekirdek ve plaka için kırılma modları tanımlamışlardır. Kırılma modlarının plaka boyu-plaka kalınlığı oranına, petek yoğunluğuna bağlı olduğunu açıklamışlardır.

(Kenny ve Torre 2000)'e göre, özel olarak sandviç kompozit yapı tasarımı yapmışlardır. Plaka olarak fenolik matrisli ve cam fiber takviyeli kompozit kullanmışlar. Çekirdek malzemeyi de dış kısımlarda kullandıkları plakayı dalgalı bir şekilde katlayarak, polimer köpük içerisine yerleştirerek elde etmişlerdir. Aynı malzemeyi kendilerinin ürettikleri kompozit darbe deneylerinde çekirdek olarak da köpüğünde kullanıldığını klasik yapıdaki sandviç kompozit yapılarında deneye tabi tutmuşlardır. Çalışmalarının sonunda kendilerinin ürettikleri kompozitin klasik yapıda bulunan kompozite göre darbe enerjisinin emilmesinde iyi performans sergilediklerini göstermişlerdir.

(Aminanda 2005)' göre, Alüminyum alaşımlı, Nomex ve kâğıt bal peteği yapısı kullanarak CCD (Charge Coupled Device) kameralar ile bal peteği yapıların statik yükleme altında basma mekanizmalarını araştırmışlardır. Basma deneyi sırasında hücre duvarının çabuk burkulduğunu ve meydana gelen en büyük kuvvet değeri üç bal petek

hücrelerinin birleştiği yer olan hücre kenarlarında oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Alüminyum alaşımı, kâğıt bal peteği ve Nomex sandviç yapılar için benzer kuvvet yer değiştirme eğrisi elde edilirken başka kuvvet değerleride elde edilmiştir. Farklı kuvvet değerleri elde edilmesi farklı malzeme kullanılmasından kaynaklandığı biçimde yorumlanmıştır. Deney sırasında kuvvetin büyük bölümünü hücre kenarları aldığı için, hücre kenarları lineer olmayan yay sistemleri biçiminde bir analitik model geliştirmişlerdir.

(Meo vd. 2005)'ne göre, bal peteği sandviç plakalar üzerine, 5-20 Joule arasında beş farklı enerji değerlerinde düşük hızda darbe deneyi gerçekleştirerek çatlağın başlaması, ilerlemesi ve kırılması durumlarını araştırmışlardır. Bu enerji değerleri sandviç yapılı kompozit malzeme üzerinde zor görülen darbe hasarı oluşturmuştur. Sayısal simülasyonu LS-DYNA 3D programı kullanarak delaminasyon başlangıcı ve hasar oluşumunu incelemişlerdir. Deneysel çalışma ile sayısal model arasında iyi bir uyum elde edilmiştir. Bilhassa, sayısal model %10.5 hata payı ile delaminasyon alanını ve % 2.6 hata payı ile de darbe sırasında oluşan çentik derinliğini tahmin edebilmiştir.

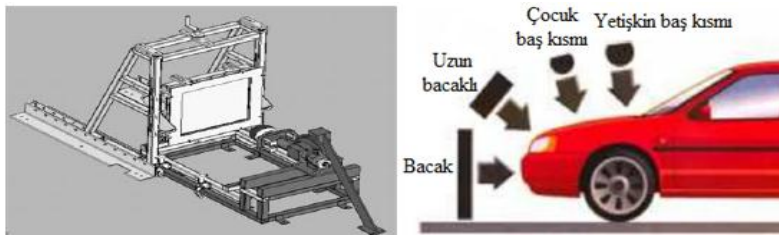
(Yamatisha ve Gotoh 2005)'a göre Alüminyum bal petek yapıların statik yükleme altında davranışlarını hücre kalınlığının ve hücre şeklinin etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada vurucu ucun hareketi ile hücre içinde sıkışan havadan ötürü basma gerilmesinin arttığını ve statik yüklemde vurucu ucun hızı 10 m/s olmak koşuyla darbe deneyleri ile eşdeğer olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca çalışmalarında bal peteği küçük hücre şekline sahip olması ile Alüminyum kalınlığının artması ile mukavemetinde artacağını açıklamışlardır.

(Hong 2006)'a göre, Alüminyum bal peteği yapıları üzerinde basma gerilmenin aktif olduğu bileşik yük altında ezilmeye kayma gerilmenin etkisini araştırmışlardır. Basma gerilmesinin aktif olduğu bileşik yük altında ezilme dayanımı sadece basma gerilmesinin aktif olduğu yüklere nazaran daha zayıf olduğunu açıklamışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmalarında enerji emilimi kayma gerilmesi basma gerilmesi oranına sınırlı olduğunu açıklamışlardır.

(Foo vd. 2006)'ne göre, Alüminyum bal petek yapıların düşük hızda darbe ve statik yükleme altında deneysel ve sayısal olarak hücre duvar kalınlığının, hücre boyutundan oluşan hasara etkisini görmek için incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda darbe sırasında emilen enerjinin çekirdek yoğunluğundan özerk olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca yoğun çekirdekli kompozitlerde pik yüklerin büyük ve meydana gelen hasar alanında küçük olduğu bal petekli yapılar tarafından emilen enerji darbe enerjisi ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

(Foo vd. 2007)'ne göre, düzlemsel Nomex kâğıdının ve bal peteği şeklinde olan Nomex'in mekanik özelliklerini belirlemek için birçok deneysel çalışmalar yapmışlardır. Belirlenmiş oldukları özellikleri Nomex malzemenin çekme ve basma deneyini sayısal modellemek için kullanmışlardır. Nomex'in Young modülünü belirlemek için, Nomex bal peteğin kalınlık tarafındaki basmada hücre sayısının artması ile elastik modülünün azaldığını ve bu modülün bal petek yapılı malzemenin boyutlarına bağlı olduğunu göstermek için başarılı olduğunu açıklamışlardır.

(Asadi vd. 2007)'ne göre, arabanın çarptığı çocuğun ön kaputa başını vurmasını Cellbond Alüminyum bal petek sandviç panele çocuğun kafası şeklinde vurucu uç ile darbe oluşturmayı simüle etmiştir. Darbenin tesirini SEA yöntem ve deneysel olarak incelemişlerdir. Aynı zaman da petek yapının açısı olarak ezilmesini incelemişlerdir. EuroNcap testin düşük hızlarda çocuktan yetişkine çarpma sonucu bacakların ve başın nereye geleceğini ön görerek deney düzeneği oluşturmuştur bu deney düzeneği de Resim 2.1'de verilmiştir.



**Resim 2.1** Deney düzeneği (Asadi vd. 2007).

(Othman ve Barton 2008)'a göre, bal petekli sandviç yapılar ile kesik koni şeklindeki vurucunun düşük hızda darbe altında statik yüklemde davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında sandviç yapıda oluşan hasarın önce üst plakada sonra çekirdekte ve daha

sonra da alt tabakada olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışmalar sırasında statik yüklemelerde enerjinin büyük bölümünün (%56-77) deformasyon ve üst plaka hasarı sırasında emilmiştir. Fakat dinamik yüklemelerde deformasyon ve üst plakanın az enerji (%51-60) emdiği görülmüştür. Böylelikle emilen toplam enerjinin dinamik yükleme altında çok fazla olduğu ve bal peteği çekirdek yapının enerjinin emilmesinde bir etkisinin olmadığını göstermişlerdir.

(Park 2008)'a göre, Karbon/epoksi-cam/epoksi iki farklı tabakalı kompozit ve 10-20 mm iki farklı kanlınlığa sahip Nomex çekirdek malzemesine sahip sandviç yapı kombinasyonları üzerine serbest ağırlık düşürme yöntemiyle düşük hız darbe dayanımı üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Deney sonuçları taramalı ses mikroskop (SAM-scanning acoustic microscope) ile inceleme yapmışlardır. Enerji – zaman, kuvvet – zaman grafiklerinden hasar başlangıcındaki enerji emilimi ve yük, çarpma sırasında emilen toplam enerji, maksimum kuvvet, darbeye uğramış alan ve hasarda meydana gelen plastik enerji emilimi gibi parametreleri tanımlamışlardır. Çalışmalarında sandviç yapının darbe dayanımı çekirdek kalınlığından ve plaka tipinden etkilendiğini göstermişlerdir. Aynı zaman da darbe sonrası meydana gelen hasarın sandviç yapının plakalarında tabakalar arasında ayrılmalar şeklinde meydana geldiğini göstermişlerdir.

(Foo vd. 2008, 2011)'ne göre, sandviç yapıların düşük hızda darbeye hasar oluşması başladıktan sonra cevaplarını araştırmışlardır. Öncelikle statik yükleme durumunda sandviç yapının yük-yer değiştirme grafiğini sayısal ve deneysel olarak elde etmişlerdir. Grafikten hasar başlangıcındaki kritik yük, hasar sonrası rijitlik ve elastik rijitlik gibi üç parametre değerini elde etmişlerdir. Elde ettikleri parametreleri, denge modeli-değiştirilmiş enerji ve momentumun korunum kanunu ile birleştirerek yaptıkları modelde kullanmışlardır. Böylelikle sandviç yapının cevabını hasar başladıktan sonra tahmin edebilecekleri model geliştirmişlerdir.

(Kang vd. 2008)'ne göre, tabakalı karbon fiber kompozit ile tabakalı cam epoksi kompozit yüzey plakalardan ve Nomex bal peteği çekirdek den üretilmiş sandviç yapıların düşük hızda darbe davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonunda cam-epoksi sandviç yapılarda hasar oluşumu karbon-epoksi sandviç

yapıya göre daha kolay olduğunu ve darbe hasarın ise sandviç yapının çekirdek ile yüzey plaka kalınlığına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Rastgele artık mukavemet değerleri ile rastgele değişken değerlerini kullanarak yaptıkları deneysel çalışmada da mukavemet değeri hem sandviç yapının yüzey plakalarından hem de çekirdek kalınlığından etkilendiğini göstermişlerdir.

(Shin vd. 2008)'ne göre, farklı plaka kombinasyonlardan ve çekirdeklerden oluşan sandviç yapılar kullanarak düşük hızda darbede hasar modlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışmada sandviç yapının plaka malzemesi olarak Alüminyum ve dokuma kumaş/epoksi; çekirdek malzemesi olarak da Alüminyum bal peteği, Alüminyum köpük ve balsa kullanılmıştır. Deneyler sırasında temas süresi, emilen enerji, maksimum temas süresi ve maksimum kuvvet altında yer değiştirme gibi parametreler ölçülmüştür. Kalıcı darbe derinliği ve hasarın boyutu da üç boyutlu tarayıcı yardımıyla ölçülmüştür. Yapılan darbe deneyi sonrası hasar modlarının değerlendirilmesi sandviç yapıların hasara uğrama şeklinin plakalara ve kullanılan çekirdek malzemesine bağlı olduğu gösterilmiştir. Yapılan deneylerden cam/epoksi sandviç kompozit plakalar metal yüzeye sahip sandviç kompozitlere göre iyi darbe performansı göstermiştir. Ayrıca sandviç yapı kombinasyonları arasında cam-epoksi plakalar ve Alüminyum bal peteği çekirdek den oluşan sandviç yapıların en iyi darbe performans gösterdiklerini gözlemlenmiştir.

(Hou 2010)'a göre, çekirdek malzemesi Alüminyum köpük ve alt-üst yüzeyleri Alüminyum plakadan oluşan sandviç yapılar üzerine, konik, düz ve küresel vurucu şekilleri kullanarak darbe deneyi yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalarında vurucu şekli, vurucu hızı, çekirdek yoğunluğu, çekirdek kalınlığı ve plaka kalınlığı gibi parametrelerin enerji emilimi ve balistik limit üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sandviç yapısının delinmesi vurucu ucun hızı ile doğru orantılı olan delme enerjisinin arttığını, kalın ve yoğun çekirdek ve kalın plakanın balistik limitinin artırdığını ve kalın plakanın çekirdek ve arka plaka arasında fazla ayrılmalara neden olduğunu göstermişlerdir.

(Zinno vd. 2011)'ne göre, fenol emprenyeli bal petekli sandviç yapıların, radyasyona tabi tutarak, ortamın nemini değiştirerek, ortamın sıcaklığını değiştirerek ve bazik ve

asitik dış kimyasal ortama tabi tutarak deneysel olarak incelemişlerdir. Kompozit yapının yaşlandırma testi sonucunda maksimum gerilme ve maksimum şekil değiştirme değeri azalmaktadır. Ayrıca maksimum kesme mukavemetinin %20 oranında ve elastik modülün ise %15 oranında azaldığını açıklamışlardır. Bununla birlikte yaptıkları darbe deneyinde enerji emilimin sandviç yapı plakalarının çekirdeğe göre nispeten etkili olduğunu belirtmişlerdir.

(Giglio vd. 2011)'ne göre, Alüminyum levhaların ve Nomex bal peteği çekirdeklerin mekanik özelliklerini belirlemek için deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Nomex bal peteğin, basma testinden elde ettikleri değerden ve yük/yer değiştirme grafiğinden yararlanarak sayısal olarak modelleme yapmışlardır. Bu sayısal model üzerinde akma mukavemetinin, elastik modülünün levhalar ile Nomex çekirdek arasında bulunan yapıştırıcının ve hücre duvar kalınlığı etkisi araştırmışlardır. Nomex ve Alüminyum levhalar için ayrı ayrı belirlenmiş olan mekanik özellikleri petek yapısında da kullanılmıştır. Üç nokta eğme deneyinde deneysel ve sayısal sonuçlar arasında uyumluluk elde edilmiştir.

(Manes vd. 2013)'ne göre, önceki yaptığı çalışmalardan elde ettikleri verileri kullanarak düşük hızda darbe deneyi yapmışlar. Deneylerde küresel çelik vurucu ve serbest düşme aparatı kullanmışlardır. Sonlu elemanlar metodu ve simülasyonlarını başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir.

(Menna vd. 2013)'ne göre, Nomex çekirdekli bal petekli sandviç yapının ve farklı kalınlıktaki fiber takviyeli plastik levhanın farklı vurucu uç çapları ile farklı hızlardaki darbe davranışlar üzerine sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sayısal çalışmalarında LS-DYNA programını kullanmışlardır. Fiber takviyeli plastik plakayı kabuk eleman olarak ve Nomex'i solid eleman olarak modellemişlerdir. Yaptıkları darbe deneylerini modelleyebilmek için gerekli olan mekanik özelliklerini yaptıkları deneylerden elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmaların sonunda darbe deneyleri ile uyumlu sayısal model geliştirmişlerdir. Fakat bu sayısal modelin plakaların kalın olduğu durumlarda ve yüksek hızlar deney sonuçlarında sapmalar göstermiştir. Bunun sebebi ise kompozit malzeme bileşenlerinin şekil değiştirme hızının farklı olmasından, hücre

yapılarının mikro atalet etkisinden ve hücreler içine sıkışan havadan kaynaklanabileceği açıklanmıştır.

(Bezazi vd. 2014)'ne göre, yüzey kısımları karbon plakalara sahip ve çekirdek kısmı ise Nomex bal peteğinden oluşan sandviç yapılara üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Çalışmada yorulma yüküne bağlı tutularak sandviç yapıların yorulma davranışları incelenmiştir. Yorulma testleri, sertlik derecesi ve yükleme seviyesi olmak üzere üç faz kullanılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda deri ile üst yüzey arasında deliminasyon gözlemlenmiştir. Üretilen sandviç yapıdaki hasarların çekirdek bünyesinden kaynakladığı yüzeyde de sertlik bozulmasının olduğu görülmüştür.

(Gilioli vd. 2014)'ne göre, plastik deformasyona uğramış Nomex çekirdek ve Alüminyum levhadan oluşan sandviç yapının darbe sonrasında darbe enerjisi-basma mukavemetini, kenar basma mukavemetini ve levha kalınlığının mukavemete etki ilişkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında darbeye uğramış sandviç yapının kenar basma mukavemeti azaldığı ve levha kalınlığının artmasıyla birlikte darbe sonrası basma mukavemeti artmaktadır. Fakat bu artmanın darbe öncesi artmaya göre daha az olduğu, darbe hasarının burkulma mukavemetinin azalttığı, darbe enerjisinin artmasıyla da darbe sonrası dayanımın azaldığı sonucuna varılmıştır.

(Justo vd. 2015)'ne göre, Nomex ve karbon/epoksiden oluşan tabakalı kompozit malzemeler üzerinde yüksek enerji emiliminin devam etmesi durumunda darbe sonrası parçalanmayı araştırmışlardır. Yaptıkları bu çalışmalarında darbe testi, çekme deneyi, darbe sonrası basma testi ve tabakalar arasındaki kırılma tokluk enerjisi testi gibi deneyler yapmışlardır. Nomex tabakanın tabakalı yapıya eklenmesiyle çekme dayanımının etkilenmediği, buna karşın tabakalar arası kırılma tokluğu, eğilme rijitliği ile birlikte darbe sonrası basma mukavemetinin arttığı ve parçalanma oranının azaldığı sonucuna varmışlardır.

(Liu vd. 2015)'ne göre, Nomex bal petekli yapının, yüzeye dik yüklemedeki basma ve çekme altında farklı hücre yüksekliği ve farklı reçine miktarı gibi değişkenleri dikkate alarak kırılma mekanizmasını göstermek için mekanik özelliklerini araştırmışlardır.

Yaptıkları çalışmalarının sonunda; yüzeye dik yüklemede meydana gelen öncelikle hasarın, bal peteği ve Nomex kâğıdı üretiminde kullanılan reçineden kaynaklandığını açıklamışlardır. Bal peteğinin yoğunlaşma olmadan yük kaldırdığında ilk haline dönmektedir. Ezilme durumunda ezilme mukavemetin artmasında yalnız sıkışan havanın değil hücre duvarlar arasındaki sürtünmede etkili olmaktadır. Üretimde kullandıkları reçine miktarın çökme mukavemetini artırdığını fakat çökme şekil değişiminin değişmediğini açıklamışlardır. 14-20 mm farklı yüksekliklerdeki Nomex bal peteğinin hem çökme şekil değişimi hem de çökme mukavemeti aynı değere sahiptir. Bal peteğinin basma rijitliğinin çekme rijitliğine göre daha küçük olduğunu bunun nedeni ise deneylerde kullandıkları hücre duvarlarının ince olması ve bunda küçük basma kuvveti altında burkulmaya uğramasından dolayı olabileceğini açıklamışlardır. Çalışmalarında ABAQUS programı ile buldukları sonuçları karşılaştırma yaparak doğrulamışlardır.

(Bora vd. 2015)'ne göre, tekrarlanan darbe yük altında Alüminyum bal peteği çekirdek ve cam fiber-epoksi plakalardan oluşan sandviç yapı ile düşük hızda darbe yorulma ilişkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında 3 ile 110 Joule arasında farklı darbe enerji seviyelerini kullanmışlardır. Sandviç yapı malzemede delinmenin olması için 3 J'lük enerji seviyesinde en fazla 81 tekrarlanma sayısının olması ve 110 J'lük enerji seviyesinde ise en az tekrarlanma sayısının tek darbe ile olduğunu gözlemlemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarının sonucunda delinmenin gerçekleşmesi için darbe enerjisinin artması ile tekrarlanma sayısının azalacağını belirtmişlerdir.

(Güneş ve Arslan 2016)'a göre, Alüminyum bal petek sandviç yapıların düşük hızlarda darbeye cevabını gerçekçi bir sayısal model geliştirerek araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada ürettikleri Alüminyum bal petek sandviç yapıya düşük hızlarda darbe uygulamışlar ve emilen enerji ile temas kuvvetini ölçmüşlerdir. Öltükleri değerleri geliştirmiş oldukları sayısal model üzerinde doğrulamışlardır. Sayısal kısmında ise sayısal model ile hücre genişliğinin ve hücre yüksekliğinin düşük hızda darbe etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları sayısal çalışmalarının sonunda, vurucu ucun enerjisinin artması ile merkezi yer değiştirmenin ve temas kuvvetinin artacağını göstermişlerdir. Aynı zaman da hücre genişliğinin artması ile birlikte plastik deformasyonunun

artacağına, merkezden kenarlara doğru burkulma artacağını, temas süresinin artacağını, merkezi yer değiştirmenin artacağını, temas kuvvetinin azalacağını ve rijitliğinde azalacağını göstermişlerdir.

(Akkuş vd. 2016)'ne göre, Alüminyum bal petekli yapıların darbe davranışlarını incelemişlerdir. Saf epoksi ve epoksinin içerisinde %1 duvarlı karbon nanotüp takviye edilerek yapıştırıcı elde edilmiştir. Bal peteği kompozitler farklı yükseklikte ve farklı hücre genişliklerde yapıştırılarak düşük hızda darbe altında deneyler ASTM D7766 standardına göre gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deney sonucunda malzemenin absorbe ettiği kuvvet değeri ölçülmüştür. Bal peteği kompozit yapılarda hücre yüksekliği artıkça, hücre genişliği azaldıkça ve nanotüp takviye ilavesi kuvvet değerinin arttığı gözlemlenmiştir. MINITAB14 programından faydalanarak logaritmik regresyon ve 1. dereceden regresyon modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan regresyon modeli ile en aktif parametrelerin hücre genişliği olduğu neticesine varılmıştır.

(Kıyak ve Kaman 2018)'a göre, hem yüzey levhaları hem de çekirdek yapısı olarak karbon fiber kompozit malzemeden oluşturarak sandviç levhaların imalatı gerçekleştirmişlerdir. Çekirdek yapının geometrisi kare kesitli olup herhangi yapıştırıcı bir malzeme kullanılmamıştır. Çekirdek yüksekliği 10 mm ve 16 hücreli ile çekirdek yüksekliği 20 mm ve 64 hücreliğe sahip sandviç yapılar üretilmiştir. Üretimi yapılan sandviç yapıların yanal yüzeyine, universal çekme/basma test cihazı ile basma testi uygulanarak kuvvet-yer değiştirme verileri kaydedilmiştir. Farklı yoğunluğa ve çekirdek yüksekliğine sahip olan sandviç yapıların yanal basma dayanımı hesaplanmış ve hasar davranışı incelenmiştir. Çalışmada yanal burkulma yükleri ANSYS programında hesaplanmış ve sonuçlar deneysel olarak elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

(Aslan vd. 2018)'ne göre, otomotiv taşıyıcı elamanlarından olan şasi malzemenisini daha mukavemetli ve ağırlığını düşürmek için sandviç panellerin kullanılabilirliğini araştırmak amaçlamışlardır. Çekirdek malzemeleri olarak polietilen terafitalat (PET) sert köpük, polipropilen (PP) bal peteği ve Alüminyum bal peteği kullanılırken, yüzey malzemeleri olarak da Alüminyum cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli polyester kompozit plaka kullanılmıştır. Yüzey malzemeleri karbon ve cam elyaf kompozit

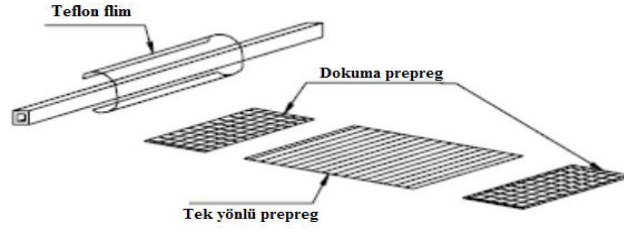
kumaşların tabakalı olacak bir biçimde polyester reçine sürüleyerek basınçlı kalıplama ve el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Sandviç plakalar 50 bar basınç altında 720 dakika pres uygulanmıştır. Sandviç yapılar çekirdek ve yüzey malzemeleri epoksi ile birleştirilerek 90°C pres altında 30 dakika, 120°C pres altında 60 dakika 3 bar basınç da bekletilerek üretimi yapılmıştır. Üretimi yapılan sandviç yapılara eğme ve basma testleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmanın sonucunda sandviç yapılarda çekirdek malzemelerin yüzey malzemelerine göre mekanik özelliklerinde belirgin değişimler oluşturduğu belirlenmiştir. Çekirdek malzemesi olarak yüzey basma mukavemeti ve eğilmede elastikiyet açısından Alüminyum bal peteği, kenara basma dayanımı ve eğilme dayanımı açısından PET çekirdek malzemesi en iyi sonuçları göstermiştir.

Literatür incelendiğinde farklı takviye kompozit yüzey elamanlarına ve bal peteği çekirdeğe sahip sandviç yapılardan oluşan pekçok çalışma yapılmış ve günümüzde de halen yapılmaktadır. Yapılan çalışmayla, literatürdeki benzerlerine göre daha mukavemetli ve daha hafif olacağı düşünülen [0,90,+45,-45]s dizilim biçimine sahip karbon-epoksi fiber takviyeli kompozit plakalar ile Nomex ve Alüminyum bal peteği çekirdek yapının birleştirilmesiyle oluşan sandviç yapıların düşük hızda darbe altında davranışlarını deneysel olarak incelenmektedir.

### **2.3 Otomobillerde Kullanılan Yan Darbe Kiriş Profiller ile İlgili Yapılan**

#### **Çalışmalar**

(Lim ve Lee 2002)'nin yaptıkları çalışmada, yan darbe kiriş malzemesi olarak Alüminyum ve çelik malzemelere nazaran daha çok mukavemetli ve hafif olan cam elyaf takviyeli fiber kompozit malzemeler kullanmışlardır. Kiriş profili ise eğmeye karşı göstermiş olduğu direnç yüksek olmasından dolayı kare kiriş tipi seçilmiştir. Üretimi yapılan kirişe üç nokta eğme ve çekme testlerini uygulamışlardır. Kare profil kirişin dış boyutları 31,8 mm ve et kalınlığı ise 5,4 mm olarak belirlenmiştir. Kompozit kiriş malzemesi üzerine Şekil 2.1'de gösterilen bir teflon filmi, iki adet saten dokuma prepreg ve tek yönlü prepreg malzeme serilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda üretilen kompozit kirişin yüksek mukavemetli çelik kirişten % 70 daha hafif olduğu ve yeterli darbe dayanıma sahip olduğunu vurgulamışlardır.



**Şekil 2.1** Geliştirilmiş kirişin üretim yönteminin şematik gösterimi (Lim ve Lee 2002).

(Huh vd. 2003)' nin yaptığı çalışmada, yan darbe kiriş malzemesi olarak 60TRIP çelik alaşımlı malzeme kullanılmıştır. Deney düzeneği olarak FMVSS 214 test standartına göre uygulanmıştır. Üretimi yapılan prototip kirişin taşıt üzerinde dinamik analizleri sonlu elemanlar yöntemi ve Johnson-Cook modeli ile analizler yapılmıştır. Yapılan test sonucunda düşük karbonlu çeliklere nazaran 60 TRIP çeliklerin darbelere daha dayanıklılığı ve yan darbeleri iyi bir şekilde nüfus etmesi sonucuna varılmıştır. Otomobillerin tasarımda ve ağırlığının azaltılmasında yönünde bu çelik malzemesinin kullanılabilir olduğu vurgulanmıştır.

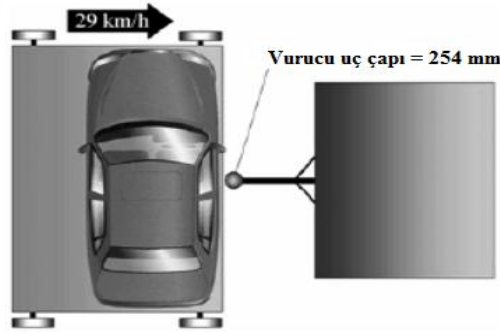
(Tsuchida vd. 2003)'nin yaptıkları çalışmada, çalışmalarında kiriş malzemesi olarak Alüminyum alaşımlı malzeme kullanmışlardır. Hidrolik bir silindir ile taşıt yan kapısına darbe uygulanmıştır. Aynı zamanda kiriş malzemeye 3 nokta eğme testi de uygulanmış olup bu iki durum MAT81\_ORTO programı ile hasar analizi test yapmışlardır.

(Basavaraju 2005)'nün yaptığı çalışmasında, yan darbe kirişi karbon/epoksi AS4/3051-6 kompozit malzeme kullanarak üretim yapmıştır. Kiriş profil FMVSS 214 (Federal Motorlu Araç Güvenliği Standardı) ve IIHS (Otoyol Güvenliği Sigorta Enstitüsü) yan darbe emniyet standartlarına göre deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneylerde Ford Taurus arabası model olarak kullanılmış olup Sonlu elemanlar metodu ve Ulusal çarpışma analiz merkezi (NCAC) tarafından geliştirilen hareketli bariyer kullanarak testler yapmıştır. Yapılan deneyler sonucunda üretilen yan darbe kompozit kirişin yüksek mukavemetli, çelik kirişten % 65 daha hafif olduğu ve çeliğe göre daha yüksek darbe enerji sönmülemeye sahip olduğunu vurgulamıştır.

(Dutton vd. 2005)'nin yaptıkları çalışmalarında, yan darbe kiriş üretiminde profil olarak panel tipi ve malzeme olarak da yüksek mukavemetli çelik alaşım kullanılmıştır.

Çalışmada kiriş profilin eğim ölçüleri değiştirilerek analizler yapılmıştır. Prototip panel kiriş üzerinden alınan ölçümler ile ETA/DYNAFORM simülasyon programı ile şekillendirilen kiriş panel ölçümler karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda simülasyonda kullanılan analiz parametreleri ve fiziksel özellikleri değiştirme hassasiyeti gözden geçirilmiştir. Panel tipi kirişlerin uygulanan darbe den sonra geri esneme telafi yöntemleri iyileştirilmiş olup sonuçlar araç tasarımında kullanılan yan darbe kirişler ile karşılaştırılmıştır.

(Dazhi vd. 2006)'nin yaptığı çalışmada, otomobil yan darbe kirişlerin yandan darbe alması durumunu Avrupa yeni otomobil değerlendirme programı (EuroNCAP) ve hareketli bariyer (MDB) yan darbe test standartlarına göre değerlendirerek sonlu elemanlar metodu ile analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada Şekil 2.2'de görüldüğü üzere hareketli bir bariyer üzerine yan konulan otomobil sabit bir 254 mm çapındaki küreye 24 km/h hız ile çarpmasıyla birlikte yan kapıda oluşan hasarları incelemektedirler. Bu çalışmalarında ki amaç otomobillerin yan kapıların tasarımı yapılırken EuroNCAP ve MDB standartlarına göre kapıların kazalara dayanıklılığını dikkate alınarak tasarım yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

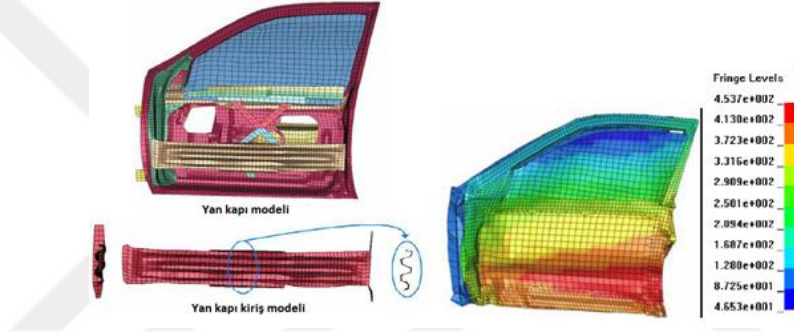


**Şekil 2.2** Hareketli bariyer yan darbe testi şematik gösterimi (Dazhi vd. 2006).

(Guang vd. 2007)'nin yaptıkları çalışmasında, otomobillerin yan kapıdan darbe alması sonucunda kirişlerin kazalara dayanıklılığını araştırmışlardır. Yandan alınan darbe ve yan kapı mukavemet sertliği arasındaki ilişkisini EuroNCAP ve FMVSS214 yan darbe standartlarına göre analiz etmişlerdir. Farklı otomobil yan kapı bileşenlerini darbeye maruz kalmayan kapıyı ölçüt alınarak darbeye maruz kalan kapı arasındaki farklılıkları sonlu elemanlar metodu kullanarak karşılaştırma yapmışlardır. Çalışmaların sonucunda otomobilin yan kapının B direğinin hemen alt kısmında bulunan parçalar önemli

parçalar olup otomobillerin yan kapı darbe kirişin dayanımını ve mukavemetini belirlemesinde yardımcı olacağını vurgulamışlardır.

(Teng vd. 2008)'nin yaptığı çalışmasında, otomobil yan darbe kiriş modeli geliştirilerek kirişlere gelen darbeleri emme enerjisi üzerine araştırma yapmışlardır. Prototip yan darbe kiriş modeli Şekil 2.3'de gösterildiği gibi taşıt üzerine montaj edilerek FMVSS 214'e göre darbe testi uygulanmış olup sonlu elemanlar metodu ile analizler yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, yan darbe kirişlerin tasarımı ve mukavemetlerin yüksek olması kazalarda yaralanma ve ölümlerin azalacağı vurgulamışlardır. Aynı zamanda bu çalışmadaki işlem parametreleri yan darbe kiriş tasarımı için bir referans olarak kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir.



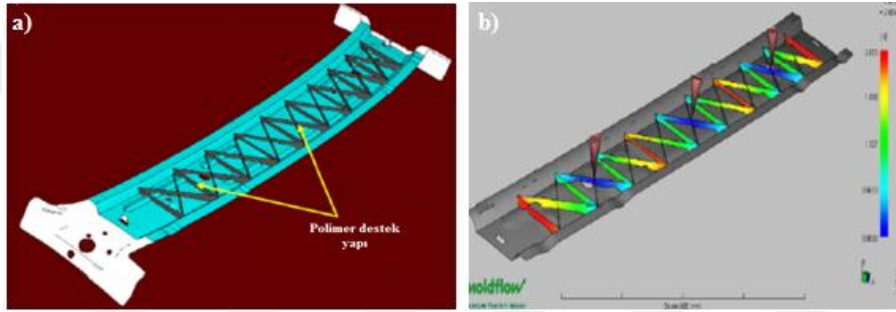
**Şekil 2.3** Yan darbe kirişin sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmesi (Teng vd. 2008).

(Aoki vd. 2009)'nin yaptıkları çalışmalarında, yan darbe kiriş yerine karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) malzemeden yapılmış koruma bandı kullanmışlardır. Şekil 2.4'de gösterildiği üzere koruma bandı 800 mm boyunda ve 40 mm çapında üretilmiş olup üzerine darbe testi uygulanmışlardır. Sonlu elemanlar metodu ve deneysel yöntem kullanarak analiz yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, CFRP koruma bandı ile sağlanan darbe enerji sönümlemesinin yeterli seviyede olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bu band önemli bir ölçüde ağırlık kazanımı sağlandığını vurgulamışlardır.



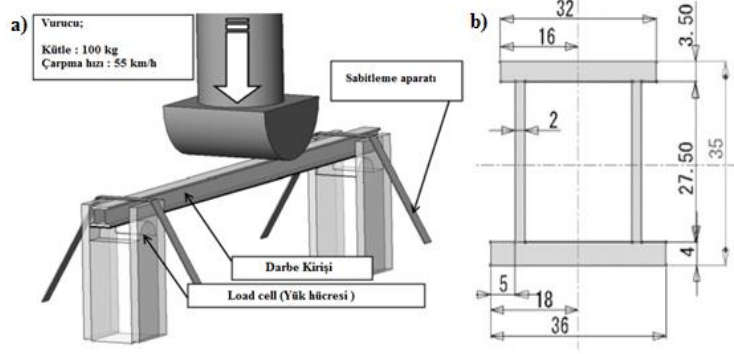
**Şekil 2.4** CFRP koruma band'ın; a) ölçüleri b) darbe testi c) darbe sonrası oluşan hasar gösterimi (Aoki vd. 2009).

(Grujicic vd. 2009)'nin yaptıkları çalışmada, yüksek mukavemetli çelik malzeme özelliklerine sahip yan darbe kiriş kullanmışlardır. Kiriş mukavemetini artırmak için destek parçalar uygulamışlardır. Bu destek parçalar polimer - metal esaslı alaşımlı malzemeden (PMH) yapılmıştır. Yapılan testlerde panel profil tipi kullanılmıştır. Şekil 2.5'de görüldüğü üzere kiriş profile alt ve üst saç arasına PMH malzemeden yapılan destek parçası konulmuş olup bu model sonlu elemanlar metodu ile üç noktadan eğme testi simülasyon ortamda uygulamışlardır. Testler sonucunda kiriş içerisine yerleştirilmiş olan polimer – metal esaslı alaşımlı destek malzemeler sayesinde düşük süneklige ve yüksek mukavemet değerleri elde etmişlerdir. Ayrıca PMH malzemesi kullanarak %2.0-2.5 aralığında ağırlık tasarrufu sağlanabildiği sonucuna varmışlardır



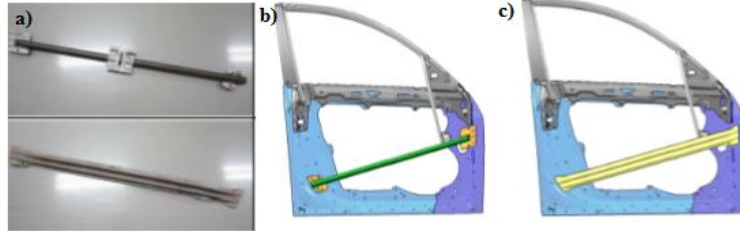
**Şekil 2.5** Polimer esalı malzeme ile desteklenmiş yan darbe kiriş **a)** polimer destekli yapı **b)** sonlu elemanlar metodu ile analizi (Grujicic vd. 2009).

(Goichi vd. 2010)'nin çalışmalarında, yan darbe kiriş malzemesi karbon fiber takviyeli Alüminyum alaşımlı malzeme ve kare kiriş profil kullanmışlardır. Yapılan çalışmada Şekil 2.6'da gösterildiği üzere 100 kg yüke ve 55 km/h hızına sahip vurucu ile üç nokta eğme testi yapmışlardır. Test sonuçları sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda farklı kalınlığa ve genişliğe sahip karbon fiber takviyeli kirişin ağırlığının azalması ve mukavemetinin artırması yönünde sonuçlar elde etmişlerdir. Aynı zamanda yan darbe kirişin darbe enerji sönmülmesini arttırmak için hibrit kirişler de tasarlanmış aynı parametreler kullanılarak hesaplamalar yapılmış çıkan sonuçlarda kare kesit profille yapılan deneyler ile aynı doğrulta olduğu ortaya çıkmıştır. Yaptıkları bu çalışma ile geliştirilen sayısal metot ile karbon fiber takviyeli Alüminyum alaşımlı kirişlerin darbe davranışlarını tahmin etmek için kullanabileceğini öne sürmüşlerdir.



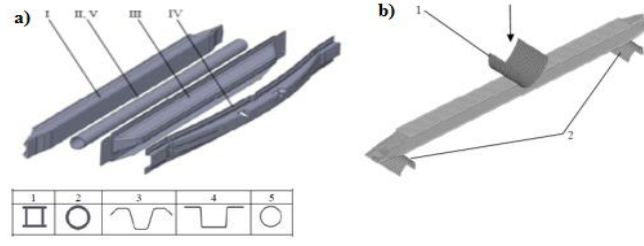
**Şekil 2.6** Üretilen yan darbe kirişin **a)** darbe test düzeneği **b)** kiriş profil ölçüleri (Goichi vd. 2010).

(Lee vd. 2010)'nin yaptıkları çalışmalarında, çelik ince saçtan imal edilmiş bir taşıt kapısına hem daire tipi ve hemde sıcak haddelene yöntemi ile üretilmiş panel tipi kiriş profili montaj edilerek deneyler yapmışlardır. Şekil 2.7'de Solidworks programında çizilmiş halleri gösterilmiştir. Yaptıkları çalışma da dairesel ve panel tipi darbe kirişlerin ağırlıkları ve mukavemet değerleri arasındaki farkı karşılaştırmışlardır. Deney sonucunda optimum tasarım elde etmek için sıcak haddelenmiş panel tipi darbe kirişinin mukavemeti geleneksel boru şeklindeki kapı darbe kirişinden %102 daha yüksek bir değere sahip olduğu ve ağırlığında da ise % 34 oranında bir azalma sağlandığı sonucuna varmışlardır.



**Şekil 2.7** **a)** Üretilen yan darbe kiriş profilleri kapı saçına monte edilen **b)** katı model boru tipi yan darbe kiriş **c)** katı model panel tipi yan darbe kiriş (Lee vd. 2010).

(Cerniauskas vd. 2010)'nin yaptıkları çalışmada, otomobillerin yan darbe kirişin dayanımı test edilmiştir. Testleri gerçekleştirmek için Şekil 2.8'de verilen beş farklı profil çelik malzeme ile üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Profillerin mekanik özellikleri sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiş ve grafikleri çıkarılmıştır. Bu analizler neticesinde kiriş modellenmesi yapılırken sonlu elemanlar metodu ile kirişin mekanik özellikleri dikkate alınıp modellenmenin yapılacağı fikrini öne sürmüşlerdir.



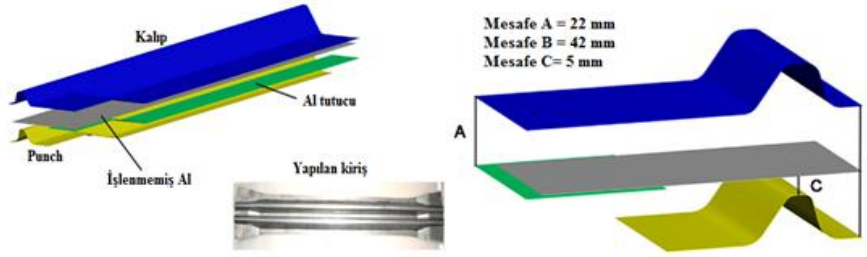
**Şekil 2.8 a)** Beş farklı yan darbe kiriş profili **b)** üç nokta eğme testi şematik gösterimi (Cerniauskas vd. 2010).

(Strano vd. 2013)'nin çalışmalarında, yan darbe kiriş profili olarak daire ve kare tipi profil den yararlanmışlardır. Kullanılan malzeme olarak düşük karbonlu çelik, östenitik paslanmaz çelik, yüksek mukavemetli çelik olmak üzere üç farklı malzeme kullanmışlardır. TiH<sub>2</sub> Alüminyum dolgulu köpük, içi boş dairesel kesit ve kare kirişleri karşılaştırmak amacıyla üç nokta eğme testi uygulamışlardır. Farklı üretim koşullarında hem kiriş geometrisi hemde malzemesini incelemişlerdir. Yan darbe kiriş sayısal ve deneysel olarak incelenerek sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kare profil kirişlerin dairesel kirişlere göre daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Aynı zamanda paslanmaz çelik' in diğer malzemelere göre mukavemetli olduğunu vurgulamışlardır.

(Jiang vd. 2013)'nin yaptıkları çalışmada, yan darbe kiriş malzemesi olarak yüksek mukavemetli çelik malzeme kullanmışlardır. Panel ve boru profil kiriş tiplerini karşılaştırılmıştır. Panel tipi kiriş sıcak şekillendirme yöntemi ile üretilerek farklı soğutma sistemleri kullanarak sıcak pres kalıpları ile şekillendirmesi sağlanmıştır. Deney düzeneği olarak üç nokta eğme testi uygulanmış olup test parametresi ve deney düzeneğinden alınan test sonuçları sonlu elemanlar metodu ile analiz yapılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda panel tipi profil kirişlerin boru profil kirişlerine göre ağırlığın da % 9.32 oranında bir azalma görülmüştür. Bu azalma ile otomobildeki emisyon oranında ve yakıt tasarrufunda önemli bir kazanç sağladığını vurgulamışlardır.

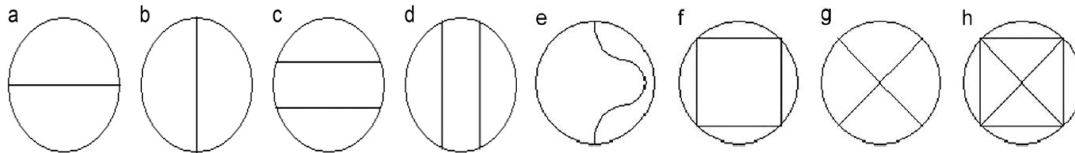
(Zhou vd. 2013)'nin çalışmalarında, kiriş profili olarak panel tipi ve malzeme olarak da Alüminyum kullanılmıştır. Şekil 2.9'da panel tipi kirişin tabakaları arasındaki mesafe ve sonlu elemanlar modeli verilmiştir. Yaptıkları çalışmada serbest ağırlık düşürme yöntemi kullanarak testleri gerçekleştirmişlerdir. Sayısal ve deneysel olarak incelenerek

sonlu elemanlar metodu ile analiz edilerek ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar neticesinde yapılan kiriş tasarımının uygulanabilirliğini öne sürmüşlerdir.



**Şekil 2.9** Tasarımı yapılan yan darbe kirişin sonlu elemanlar metodu ile gösterimi (Zhou vd. 2013).

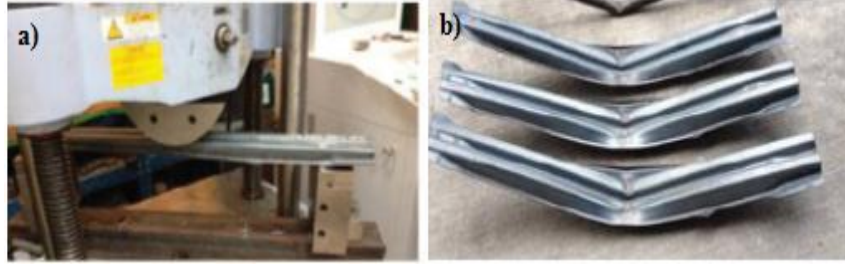
(Ghadianlou vd. 2013)'nin yaptıkları çalışmada, otomobillerde kullanılan yan darbe kirişlerin malzemesi ve uygun kiriş geometrileri araştırmışlardır. Yan darbe kiriş geometrisi olarak Şekil 2.10'da görüldüğü üzere sekiz farklı profil belirlemişlerdir. Malzeme olarak da Alüminyum, magnezyum ve çelik kullanılmıştır. Farklı profil ve malzemeler kullanılarak üretilen kirişlerin sayısal ve deneysel olarak incelenerek sonlu elemanlar metodu ile analiz etmişlerdir. Deney düzeneği olarak da Federal Motorlu Araçlar Emniyet Standardı (FMVSS 214) ve Euro NCAP test düzeneğini uygulamışlardır. Yapılan deneyler sonucunda gerçekleştirilen optimizasyon ile "h" kiriş profili diğerlerine göre daha dayanıklı olduğu anlaşılmış olup ve deformasyonun ise diğerlerine göre % 80 oranında azaldığını vurgulamışlardır



**Şekil 2.10** Sekiz farklı yan darbe kiriş geometri gösterimi (Ghadianlou vd. 2013).

(Li vd. 2014)'nin yaptıkları çalışmada, yan darbe kiriş malzemesi olarak yüksek mukavemetli çelikler kullanılmıştır. 900'C' ye kadar ısıtılan çelik malzeme sıcak haddeleme yöntemi uygulanarak panel tipi kiriş üretmişlerdir. Üretilen kiriş profilin mekanik özelliklerini belirlemek için 11,2 kN kuvvet ile üç noktadan eğme testi uygulamışlardır. Resim 2.2'de çelik kirişler ve test cihazı gösterilmiştir. Sonlu elemanlar metodu kullanarak analizler yapmışlardır. Yapılan çalışmaların sonucunda kirişin et kalınlığı 1.08 mm olduğunda kiriş yüzeyinde yırtılmalar görülmüş olup en

uygun malzemenin 15B22 bor çeliğinden ve en uygun et kalınlığının ise 1,4 mm olduğu sonucuna varmışlardır.



**Resim 2.2 a)** Üç nokta eğme test düzeneği **b)** Test sonrası çelik kirişlerin gösterimi (Li vd. 2014).

(Zhou vd. 2014)'nin yaptıkları çalışmalarında, otomobil yan darbe kiriş malzemesi olarak Alüminyum alaşımlı malzeme kullanmışlardır. Kiriş modelini 350 °C ile 500 °C sıcaklık arasında sıcak presleme yöntemi ile üretmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analizler yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada serbest ağırlık düşürme yöntemi kullanarak kirişi test etmişlerdir. Kiriş en fazla 15 kN'luk kuvvete kadar dayanıklı olduğunu ve uygulanan yükün 15 kN' dan fazla olması halinde kirişte deforme olacağı öne sürmüşlerdir. Yapılan testler sonucunda kiriş modeline serbest ağırlık düşürme yöntemi ile ideal kuvvetin 3-5 kN aralığında kuvvet uygulanması ve ideal presleme hızının ise 50-200 mm/s olacağını vurgulamışlardır.

(Kim ve Kang 2014)'nin yaptığı çalışmada, otomobillerin yan darbe kiriş mukavemetini test etmek için çarpışma deney düzeneği maliyetli ve zaman aldığını öne sürmüşlerdir. Dolayısıyla modellenmesi yapılan çelik kirişlerin daha az maliyetle deneysel yapılması için darbe test cihazının geliştirilmesi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Deney cihazı konfigürasyonu geliştirilmiş ve kirişe darbe uygulamak için serbest ağırlık düşürme yöntemi uygulanmış olup sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda Resim 2.3'de gösterilen ideal deney cihazı yapılandırılması belirlenmiştir. Bu belirlenen cihaz ile kiriş darbe deneylerinde harcanan maliyeti düşürmek ve zamandan tasarrufu sağladığı sonucunu vurgulamışlardır.



**Resim 2.3** Geliştirilmiş ideal serbest ağırlık düşürme test cihazı (Kim ve Kang 2014).

(Lee vd. 2015)'nin yaptıkları çalışmada, yan kapı darbe kiriş malzemesi olarak bor çelik alaşımlı malzeme ve panel profil tipi kullanmışlardır. Çalışmada taşıt ön ve arka yan kapılarındaki darbe panel kirişlerin belli bir noktalarında Şekil 2.11'de güçlendirme yapılarak iyileştirmesi istenmiştir. Prototipi üretilen yan darbe kirişi taşıt üzerine montaj edilerek FMVSS 214'e standartlara göre darbe testi uygulanmış olup sonlu elemanlar metodu ile analizler yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına dayanarak yan darbe kiriş malzemesinin geometrisini değiştirerek ve ön-arka yan darbe kirişlerin belli bir yerlerinde güçlendirme yapılarak daha mukavemetli hale geldiğini vurgulamışlardır.



**Şekil 2.11** a) Güçlendirilmiş çelik kiriş b) FMVSS 214'e standartlarına göre test c) sonlu elemanlar yöntemi ile analizin gösterimi (Lee vd. 2015).

(Yoon vd. 2016)'nin yaptıkları çalışmada, yan darbe kiriş malzemesi olarak SPFC1180 yüksek mukavemetli çelik malzeme kullanılmış olup boru ve panel tipi kiriş profilleri karşılaştırmışlardır. Farklı yan darbe kiriş kesit profilleri tasarlanarak prototipi üretilen malzemenin ANSYS yazılım programı kullanarak statik ve dinamik eğilme analizler yapmışlardır. Resim 2.4'de darbe test düzeneği ve ANSYS modeli gösterilmiştir. Darbe test düzeneği kurularak yan darbe kiriş malzemeye 2.43 m/sn hızında 296.2 kgf kuvvet

ile serbest düşme uygulanmıştır Yapılan analizler ve deney sonucunda panel tipi SPFC1180 çelik kirişin boru tipi kapı kirişlerine göre daha hafif ve daha yüksek mukavemete sahip olduğu sonucuna varmışlardır.



**Resim 2.4 a) Serbest düşme testi b) ANSYS modellenme gösterimi (Yoon vd. 2016).**

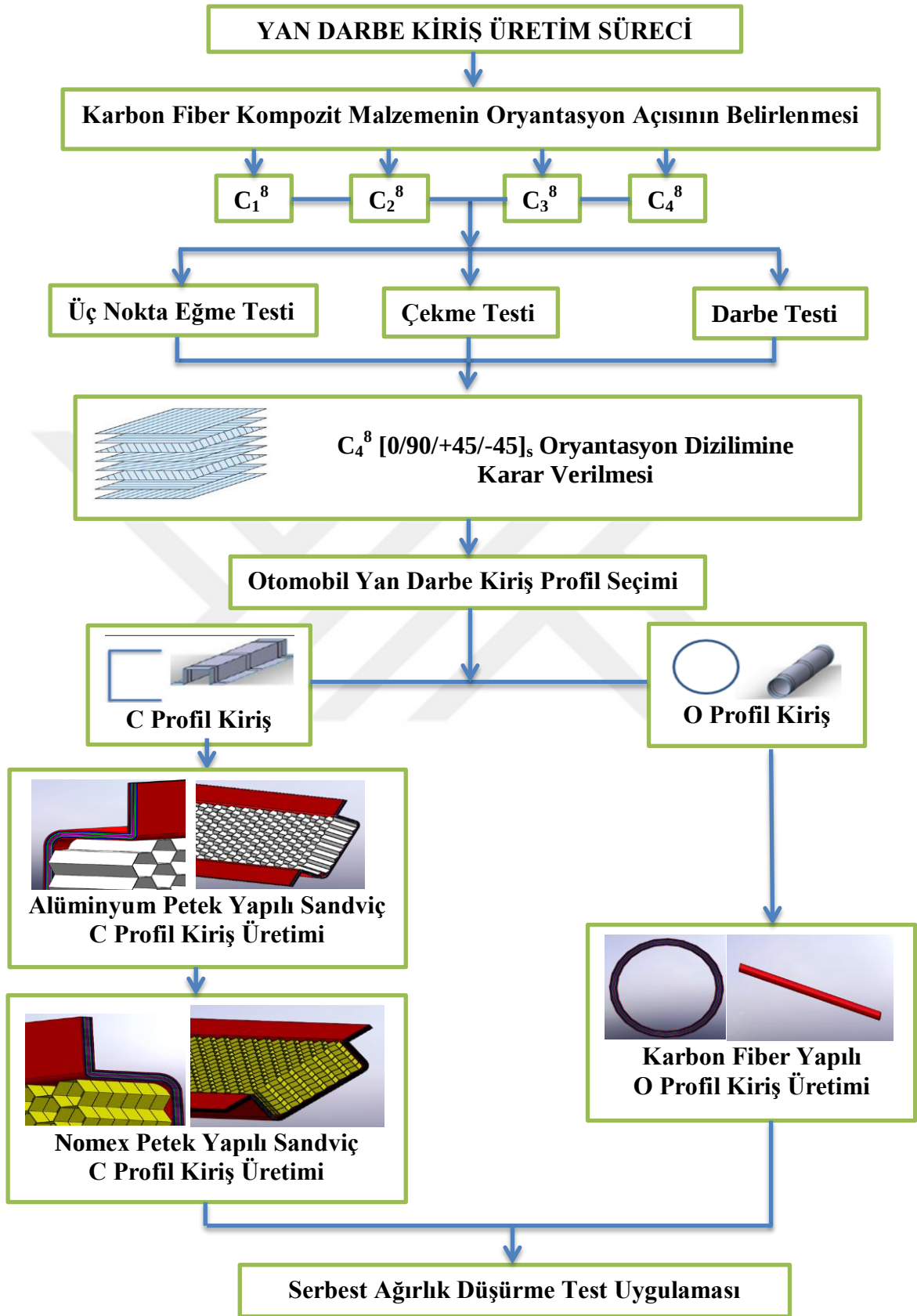
Kompozit kirişlerle ilgili çalışmalar metallere göre daha az ve nispeten yenidir. Ancak kompozit malzemelerin avantajlarından dolayı otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Yapılan yan darbe kirişin çekirdek malzemesi alüminyum ve Nomex kullanılmış, yüzey malzemesi olarak da  $[0,90+45,-45]_s$  yönlenmeli tabakalı kompozit malzemesi kullanılmıştır. Kiriş profili olarak hem C hemde O profil olmak üzere iki tip üretim yapılmıştır. Literatür de yapılan çalışmalar incelendiği zaman sandviç yapılarındaki çekirdek malzemesi Alüminyum ve Nomex bal petek yapılar kullanarak yan darbe kiriş tasarımı ve testine rastlanmamıştır. Çalışmada bal petek sandviç yapılı malzemeler kullanarak kompozit yan darbe kiriş üretimi yapılmıştır. Üretilen kiriş modelleri ile üç nokta eğme, çekme, darbe ve serbest ağırlık düşürme yöntemi kullanarak testler yapılmıştır.

### 3. MATERYAL ve METOT

Yapılan çalışmada sabit kalınlıkta ve farklı oryantasyon açlarına sahip sandviç kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin elde edilip karşılaştırılması amaçlanmıştır. Takviye yüzey malzemesi olarak karbon fiber, çekirdek malzemesi olarak da Nomex ve Alüminyum bal peteği kullanılmıştır. Üretim metodu olarak vakum torbalama yöntemi kullanarak üretimler yapılmıştır. Üretilen kompozit plakalardan ASTM standartlarında üç nokta eğme ve çekme numuneler hazırlanmıştır. Üretilen bal petekli sandviç yapılardan ASTM D3763 standartlarında darbe test numunesi hazırlanmıştır. Aynı zamanda 800 x 45 mm boyutlarında C profil Alüminyum ve Nomex bal peteği sandviç yapı, çapı 5 mm uzunluğu 850 mm ölçülerinde O profil karbon fiber kompozit malzemeden serbest ağırlık düşürme test metodunda uygun yan darbe kiriş profil hazırlanmıştır.

#### 3.1 Deneysel Üretim Süreci Akış Diyagramı

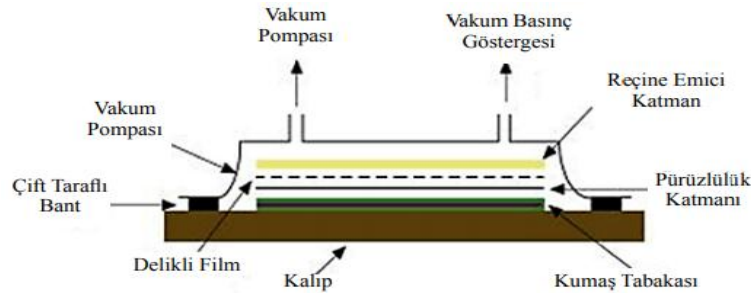
Taşıt yan darbe giriş üretim sürecinde öncelikle üretimi yapılacak oryantasyon açısına karar verebilmek için kompozit malzemenin dört farklı  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyon açıları test edilmiştir. Kompozit malzemelere üç nokta eğme testi, çekme testi ve darbe testi uygulanmıştır. Uygulanan testlerin sonuçları değerlendirilerek yan darbe kiriş üretiminde kullanılan  $C_4^8$  [0/90/+45/-45/-45/+45/90/0] oryantasyon dizilimine karar verilmiştir. Literatürde yapılan araştırmalar doğrultusunda atölye ortamında üretime elverişli olan C ve O profil yan darbe kiriş tipleri seçilmiştir. C profil kirişin çekirdek malzemesi hem Alüminyum petek yapılı hemde Nomex petek yapılı sandviç kompozit malzeme olarak üretim yapılmıştır. O profil kiriş ise sarma yöntemi uygulanarak çekirdek malzemesi kullanılmadan karbon fiber kompozit malzemeden üretimi yapılmıştır. Üretimi yapılan C-O profillere serbest ağırlık düşürme testi uygulanmıştır. Deneysel üretim sürecinin akış diyagramı Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Deneysel üretim sürecinin akış diyagramı

### 3.2 Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum torbalama üretim tekniği esas itibarıyla kompozit kumaş malzemenin bir kalıp içerisine el ile yatırılması ve reçinenin el ile kalıp içine dağıtılması sürecinden sonra devre alınan bir uygulamadır. Şekil 3.2’de vakum torbalama yöntemi şematik olarak gösterilmiştir. Vakum torbalama üretim metodu, elle yatırma yöntemi ile kompozit yapı üretim metodunun dezavantajlarını ortadan kaldırarak daha sağlam ve hafif kompozit yapılarının üretilmelerini etkin kılmaktadır. Vakum torbalama yöntemindeki negatif basınç uygulaması, reçine ve kompozit kumaş arasındaki havanın dışarıya çekilmesini sağlamakta ve böylelikle hava kabarcıklarından arınmış katmanlı yapı imalatı mümkün olmaktadır. Aynı zamanda vakum sayesinde reçinenin bütün katmanlar içine tam nüfuz etmesi sağlanabilmektedir. Kompozit yapı içinde hava kabarcıklarını en aza indirmekte ve bu sayede çatlak oluşma kaynakları yol edilerek, yapının mukavemeti artmaktadır. Vakum uygulaması neticesinde yapı içinde kalan fazla reçine emilerek, yapının lif-reçine oranının artması sağlanmaktadır. Vakum uygulaması sayesinde reçinenin tüm katmanlar arasında iyi yayılması sağlanmakta ve bu sayede homojen reçine dağılımı elde edilmektedir. Vakum uygulaması sırasında katmanlar birbirleri üzerine basacaklarından, katmanların birbiri ile olan birleşim mukavemeti daha güçlü olacaktır (Turgut vd.2007).



Şekil 3.2 Vakum torbalama yöntemi (İnt. Kyn. 8).

### 3.3 Vakum Torbalama Yöntemi Ana Elemanları

**Ayırıcı Film:** Kalıp ile üretilecek tabakalı kompozitlerin arasına konulur. Ayırıcı filmler kompozit malzemenin kalıpa yapışmasını önlemektedir. Aynı zamanda üretim sonrasında kalıbın da temiz kalmasını sağlarlar. Üretilen tabakalı kompozit malzemedde 25 mikron kalınlığına sahip 120 °C çalışma sıcaklığına kadar dayanan ayırıcı film kullanılmıştır. Üretim sırasında kullanılan ayırıcı film Resim 3.1’de görülmektedir.



**Resim 3.1** Ayrıcı film görünüşü.

**Karbon Fiber Kumaş:** Karbon fiber kumaş tabakalı kompozit malzemeyi oluşturan ana unsurdur. Reçine karbon fiber kumaş katmanlar arasından akar. Tabakalı kompozit kürleşme sonucunda tek yapı olarak üretilmiş olur. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde [0/0], [0/90] ve [ $\pm 45$ ] iki yönlü, düzlem örgü 300 g/m<sup>3</sup> yoğunluğuna sahip karbon fiber kumaşlar kullanılmıştır. Resim 3.2’de üretim sırasında kullanılan karbon fiber kumaş görülmektedir.



**Resim 3.2** Karbon fiber kumaş görünüşü.

**Soyma Kumaşı:** Üretim sırasında kompozit malzemenin içinde bulunan havanın çıkmasını sağlayan, yüzey kalitesini iyileştiren ve reçinenin vakum altında düzgün bir şekilde dağılmasını sağlayan bir kumaştır. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde 80 gr/m<sup>2</sup> birim alan kütlesinde ve 120 °C çalışma sıcaklığına kadar dayanan soyma kumaşı kullanılmıştır. Resim 3.3’de üretim sırasında kullanılan soyma kumaşı görülmektedir.



**Resim 3.3** Soyma kumaşı görünüşü.

**Vakum Battaniyesi:** Tabakalı kompozit üretimi esnasında ortamda bulunan fazla reçineyi emer. Vakum altında Homojen bir basınç dağılımı sağlamaktadır. Üretim esnasında 3 mm kalınlığına sahip vakum battaniyesi kullanılmıştır. Resim 3.4’de üretim kullanılan vakum battaniyesi görülmektedir.



**Resim 3.4** Vakum battaniyesi görünüşü.

**Vakum Naylonu/Vakum Film:** Dış kısmında bulunan vakumun oluşmasını sağlayan naylondur. Üretim sırasında 50 mikron kalınlıktaki vakum naylonu kullanılmış olup çalışma sıcaklığı ise 120 °C dir. Resim 3.5’de üretim sırasında kullanılan vakum naylonu görülmektedir.



**Resim 3.5** Vakum naylon görünüşü.

**Epoksi ve Sertleştirici:** Küreleşmesi için reçine karışımını oluşturan bir kimyasallardır. Tabakalı kompozit malzeme üretimi sırasında MGS L285 epoksi ve MGS H285 sertleştirici kullanılmıştır. Resim 3.6’da üretim sırasında kullanılan epoksi ve sertleştirici görülmektedir.



**Resim 3.6** Epoksi ve sertleştirici.

**Sızdırmazlık bandı:** Üretim sırasında ayrıcı film, vakum naylonunun ve kalıp'ın yapışmasını sağlayarak hava kaçağını önler. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde 150°C çalışma sıcaklığına kadar dayanabilen bir sızdırmazlık bandı kullanılmıştır. Resim 3.7’de üretim sırasında kullanılan çift yönlü sızdırmazlık bandı görülmektedir.



**Resim 3.7** Çift yönlü sızdırmazlık bant görünüşü.

**Vakum Pompası:** Vakum torbası sızdırmazlık band ile yapıştırıldıktan sonra vakum pompası çalıştırılarak kompozit malzemelerin üzerindeki boş havayı vakum işlemi yapmaktadır. Vakum pompası tek kademeli, toplam basıncı 150 micron, kısmi basıncı ise 2 Pa ve motor gücü 1/4 HP olan Value VE 115N serisi kullanılmıştır. Resim 3.8’de üretim esnasında kullanılan vakum pompası görülmektedir.

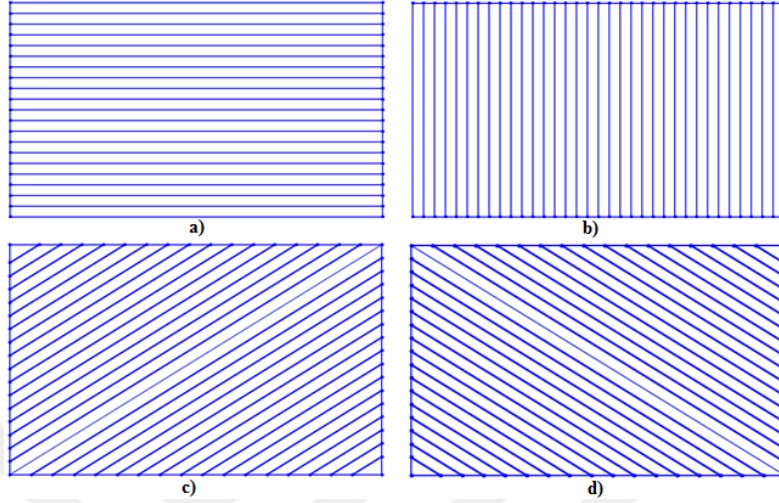


**Resim 3.8** Vakum pompası görünüşü.

### 3.4 Deneysel Yöntem ve Malzeme Üretim Aşamaları

Yapılan çalışmada  $[0^\circ]$ ,  $[90^\circ]$ ,  $[+45^\circ]$  ve  $[-45^\circ]$  olmak üzere 4 farklı tip oryantasyon karbon fiber malzeme kullanılmıştır. Oryantasyon açıları Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Sabit enerji değeri için bal peteği yapılı dört farklı yönlenme açıları ile üretilen karbon fiber/epoksi takviyeli kompozit malzemenin üretimi ve sabit darbe altındaki durumu deneysel olarak incelenmiştir. Darbe testi için sadece sandviç yapının çekirdek malzemesi olarak bal peteği Alüminyum malzeme kullanılmıştır. Serbest düşme testlerinde sandviçli yapının çekirdek malzemesi olarak hem Alüminyum hem de

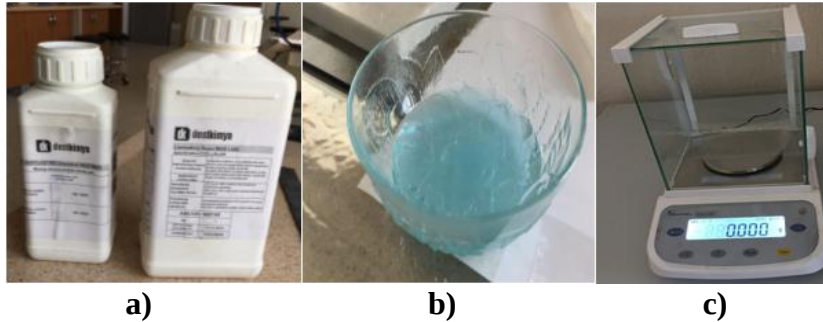
Nomex bal peteği kullanılmıştır. Darbe sonrasında malzemede oluşan fiber kırılması, matris çatlağı, delaminasyon ve delinme şeklinde hasar tipleri görülmüştür. Hasarlara bağlı olarak darbe davranışı kuvvet çökme eğrileri, kuvvet zaman eğrileri, absorbe edilen enerji-zaman eğrileri, hız zaman eğrileri oluşturulmuştur.



**Şekil 3.3** Karbon fiber oryantasyon açıları **a)** [0°] oryantasyon **b)** [90°] oryantasyon **c)** [+45°] oryantasyon **d)** [-45°] oryantasyon gösterimi.

### 3.5 Karbon Fiber Malzemedan Numune Plaka Hazırlanması

Prototip kiriş malzeme üretimine geçmeden önce karbon fiber' in malzeme özelliklerine ve yönlendirilmesine karar verebilmek amacıyla 8 adet deneme numune plakası üretilmiştir. Numune üretiminde reçine ve sertleştirici malzemesi olarak Resim 3.9'da gösterilen MGS L285 ve MGS H285 kullanılmıştır. Üretilen 8 adet plakanın üretiminin her birine reçine malzemedan hassas terazi yardımıyla 70 gram ve sertleştiriciden ise 28 gram konularak ikisi 5 dakika mikser yardımıyla bir kap içerisinde karıştırılmıştır. Fiber kumaşların üzerlerine 8 katman olacak şekilde hazırlanan epoksi malzemesini fırça yardımıyla sürülerek numune parçası hazırlanmıştır.



**Resim 3.9** Numune üretiminde kullanılan **a)** MGS L 285 reçine **b)** MGS H285 sertleştirici **c)** hassas terazi.

Hazırlanan numune parçaların her biri Resim 3.10a’da gösterilen 80 derece ısıtılmış pres cihazında 5 ton sıkıştırma basıncı altında 30 dakika bekletilmiştir. Daha sonra aynı basınç altında pres sıcaklığını 120 dereceye çıkartarak 60 dakika daha bekletildikten sonra cihazı kapatıp kademeli soğuması için yaklaşık 45 dakikadan sonra Resim 3.10b’de gösterilen numune parçası pres den çıkartılmıştır.



**Resim 3.10** Numune parça üretimi a) Ayarlanabilir sıcak pres makinesi b) Hazırlanan numune plaka.

Hazırlanan farklı oryantasyon açılarına sahip karbon fiber malzeme plakaların her biri hem çekme hemde üç nokta eğme numuneleri için istenilen ölçülerde Resim 3.11’de gösterilen CNC su jeti yardımıyla kesilmiştir. CNC su jeti Siemens a3216 R-HP serisi teknolojisini kullanarak 0,1mm den 200 mm kalınlığa kadar neredeyse tüm yapay ve doğal malzemeleri kesimi mümkündür. Max Pozisyonlama hızı 30 000 mm / dak, max hatasız kesme hızı ise 10 000 mm / dak, pompa debisi 5,5 lt/min 90 kW (125 HP) ve basıncı ise 6000 bar dır.



**Resim 3.11** CNC Su Jet Siemens a3216 R-HP görünüşü.

### 3.6 Farklı Oryantasyonlu Karbon Fiber Malzeme Üretim Aşamaları

Üretimi yapılan kompozit plaka malzemeleri 4 ayrı gruba ayrılmıştır. 4 grup da 8 tabakalı olarak tasarlanan kompozit numunelerin ortalama tabaka sayısı, tabaka kalınlıkları ve oryantasyon açıları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Tabaka oryantasyon açılarını karşılaştırmak için  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  gruplar oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılacak olan karbon fiber kompozit plakaların özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Karbon fiber kompozit plakaların özellikleri.

| Adlandırma | Tabaka Sayısı | Oryantasyon Açısı                                                                   | Ortalama Tabaka kalınlığı (mm) |
|------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| $C_1^8$    | 8             | $[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]$                 | 2                              |
| $C_2^8$    | 8             | $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$             | 2                              |
| $C_3^8$    | 8             | $[+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$ | 2                              |
| $C_4^8$    | 8             | $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ/0^\circ]$       | 2                              |

$C_x^y$ : C: karbon fiber y: tabaka sayısını x: grup numarası

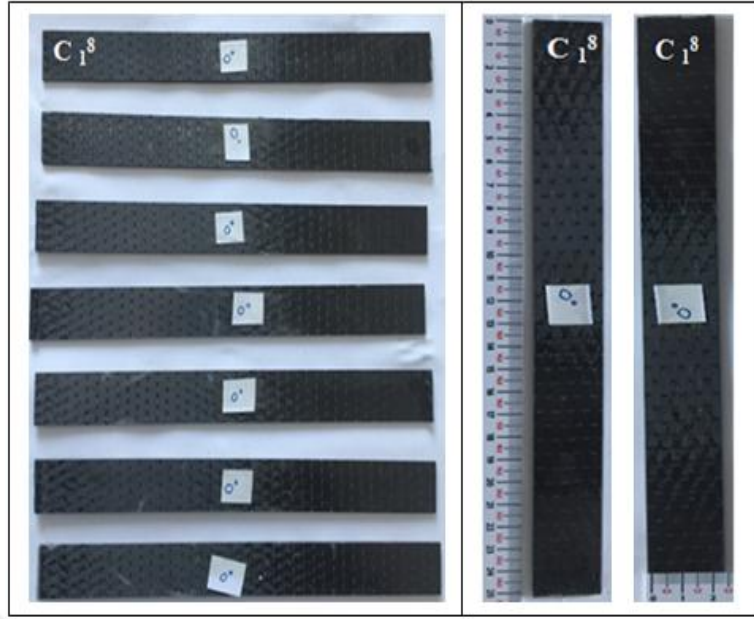
#### 3.6.1 $C_1^8$ Oryantasyon Açılı Karbon Fiber Plaka Üretimi

Üretim aşamasında ilk olarak  $C_1^8$  oryantasyon açılı 300 gram/m<sup>2</sup>’lik karbon fiber kumaş kullanarak Resim 3.12’de gösterilen 250 x 180 mm boyutlarında 8 tabakalı 2 adet dikdörtgen plaka üretimi yapılmıştır. Reçine ve sertleştirme miktarını değiştirmeden plakalara uygulanmıştır.



**Resim 3.12**  $C_1^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme plakası.

Üretilen  $C_1^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzemenin ilk plakasından CNC Su Jeti makine yardımıyla Resim 3.13’de gösterilen 7 adet 25 x 250 mm ölçülerinde çekme numunesi kesilerek elde edilmiştir.

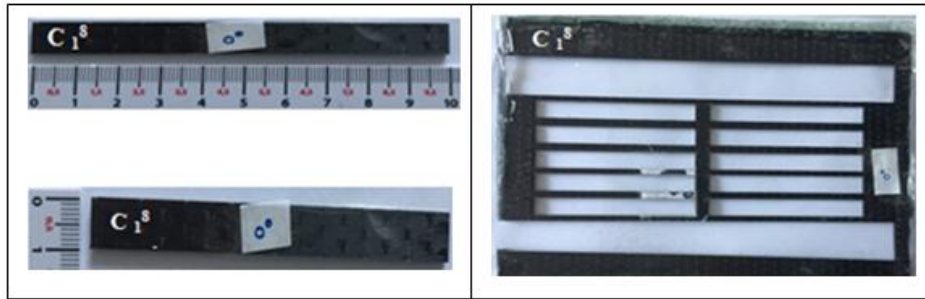


a)

b)

**Resim 3.13**  $C_1^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme **a)** 7 adet çekme numunesi **b)** çekme numunesi (25 x 250 mm).

$C_1^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzemenin ikinci plakasından ise CNC Su Jeti makine yardımıyla Resim 3.14’de gösterilen 10 adet 10 x 100 mm ölçülerinde üç nokta eğme numunesi kesilerek elde edilmiştir.



a)

b)

**Resim 3.14**  $C_1^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme **a)** Üç nokta eğme numunesi (10 x 100 mm ) **b)** CNC su jeti ile kesilen plaka.

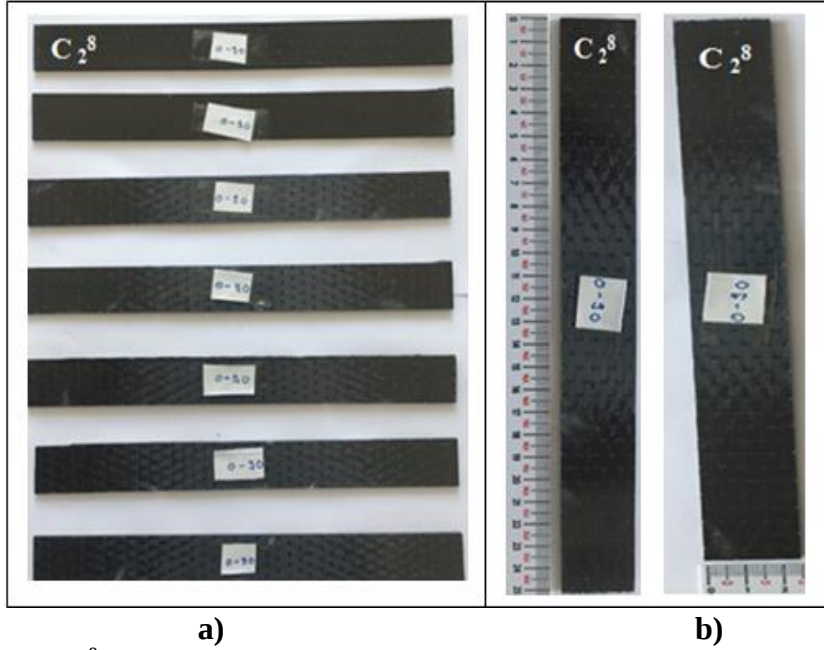
### 3.6.2 $C_2^8$ Oryantasyon Açılı Karbon Fiber Plaka Üretimi

ikinci olarak  $C_2^8$  oryantasyon 300 gram/m<sup>2</sup>’lik karbon fiber kumaş kullanarak Resim 3.15’de gösterilen 250 x 180 mm boyutlarında 8 tabakalı 2 adet dikdörtgen plaka üretimi yapılmıştır.



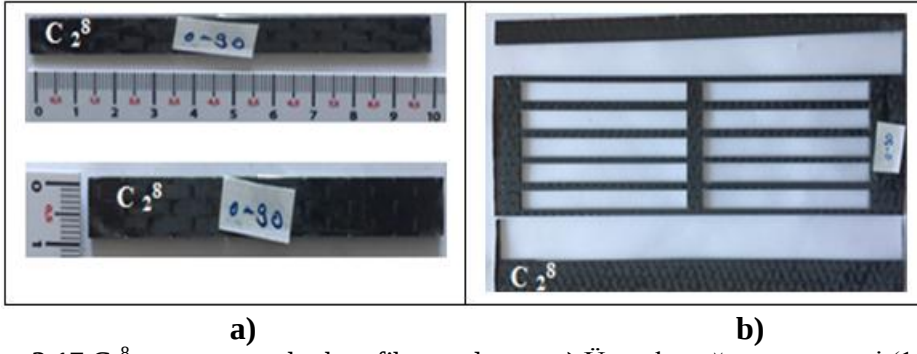
**Resim 3.15**  $C_2^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme plakası.

Üretilen  $C_2^8$  oryantasyon karbon fiber malzeme çekme testinde kullanılmak üzere ilk plakası CNC Su Jeti makine yardımıyla Resim 3.16’da gösterilen 7 adet 25 x 250 mm ölçülerinde çekme numunesi kesilerek elde edilmiştir.



**Resim 3.16**  $C_2^8$  oryantasyon karbon fiber malzeme a) 7 adet çekme numunesi b) çekme numunesi (25 x 250 mm).

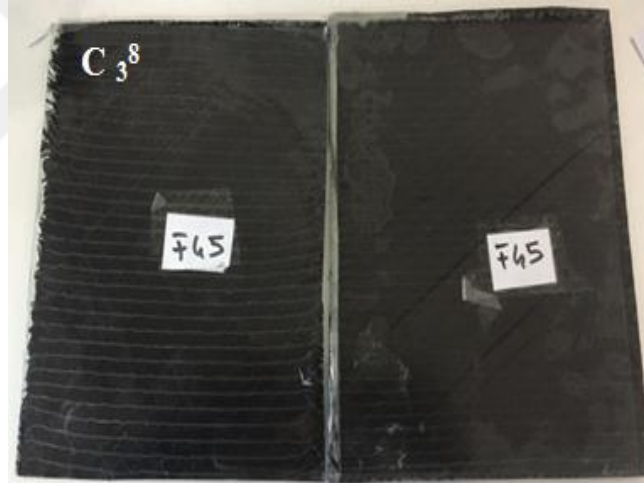
$C_2^8$  oryantasyon karbon fiber malzemenin ikinci plakasından ise üç nokta eğme testinde kullanılmak üzere CNC Su Jeti makine yardımıyla Resim 3.17’de gösterilen 10 adet 10 x 100 mm ölçülerinde üç nokta eğme numunesi kesilerek elde edilmiştir.



**Resim 3.17**  $C_2^8$  oryantasyon karbon fiber malzeme a) Üç nokta eğme numunesi (10 x 100 mm )  
b) CNC su jeti ile kesilen plaka.

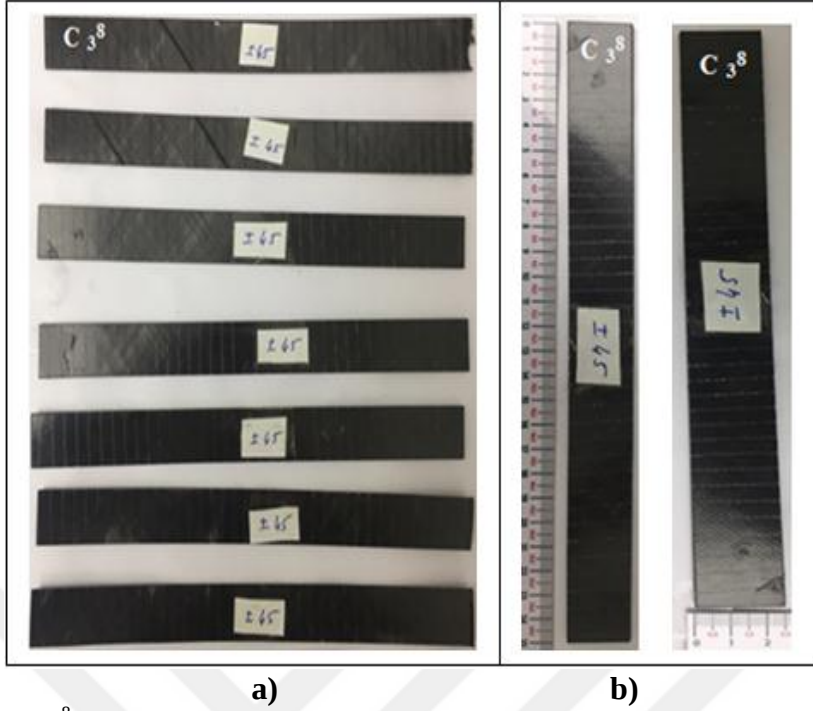
### 3.6.3 $C_3^8$ Oryantasyon Açılı Karbon Fiber Plaka Üretimi

Üçüncü olarak  $C_3^8$  oryantasyon açılı 300 gram/m<sup>2</sup>'lik karbon fiber kumaş kullanarak Resim 3.18'de gösterilen 250 x 180 mm boyutlarında 8 tabakalı 2 adet dikdörtgen plaka üretimi yapıldı. Reçine ve sertleştirme miktarını değiştirmeden plakalara uygulanmıştır.



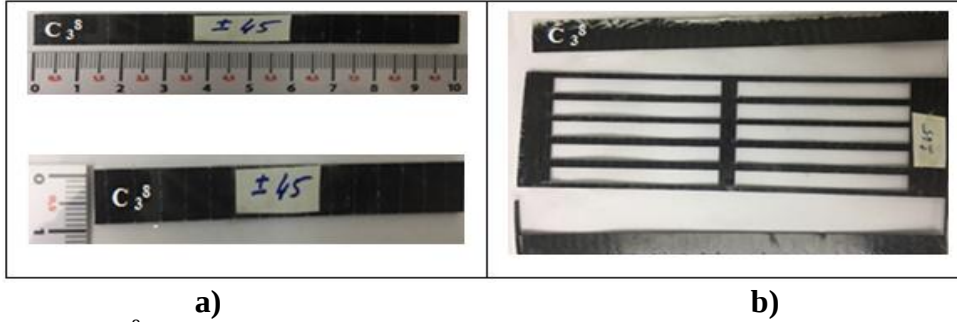
**Resim 3.18**  $C_3^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme plakası.

Üretilen  $C_3^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzemenin ilk plakasından CNC Su Jeti makine yardımıyla Resim 3.19'da gösterilen 7 adet 25 x 250 mm ölçülerinde çekme numunesi kesilerek elde edilmiştir.



**Resim 3.19**  $C_3^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme a) 7 adet çekme numunesi b) çekme numunesi (25 x 250 mm).

$C_3^8$  oryantasyon açılı kompozit malzemenin ikinci plakasından ise CNC Su Jeti makine yardımıyla Resim 3.20’de gösterilen 10 adet 10 x 100 mm ölçülerinde üç nokta eğme numunesi kesilerek elde edilmiştir.



**Resim 3.20**  $C_3^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme a) Üç nokta eğme numunesi (10 x 100 mm ) b) CNC su jeti ile kesilen plaka.

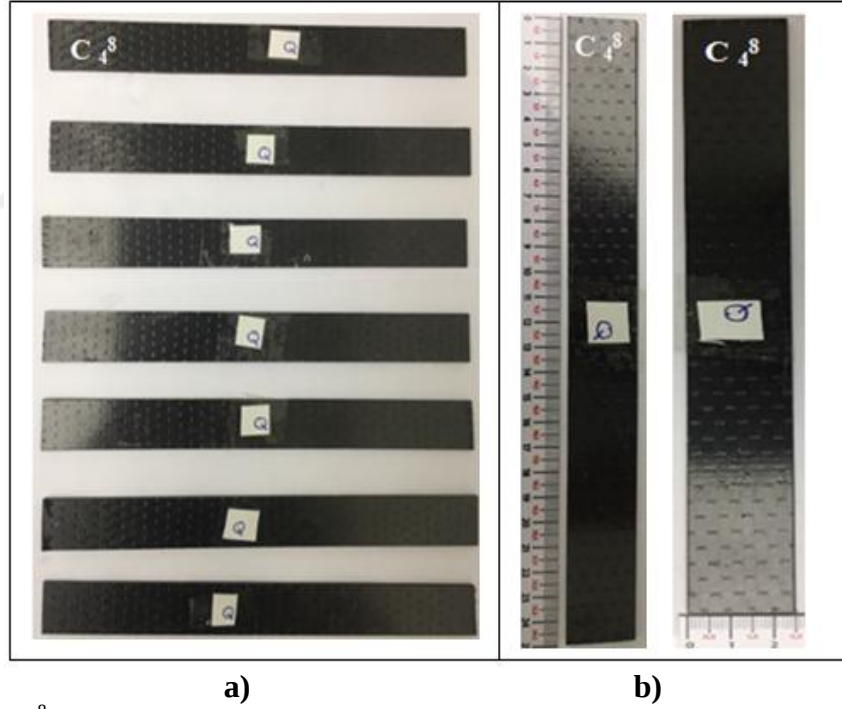
### 3.6.4 $C_4^8$ Oryantasyon Açılı Karbon Fiber Plaka Üretimi

Dördüncü olarak  $C_4^8$  oryantasyon açılı 300 gram/m<sup>2</sup>’lik karbon fiber kumaş kullanarak Resim 3.21’de gösterilen 250 x 180 mm boyutlarında 8 tabakalı 2 adet dikdörtgen plaka üretimi yapıldı. Reçine ve sertleştirme miktarını değiştirmeden plakalara uygulanmıştır.



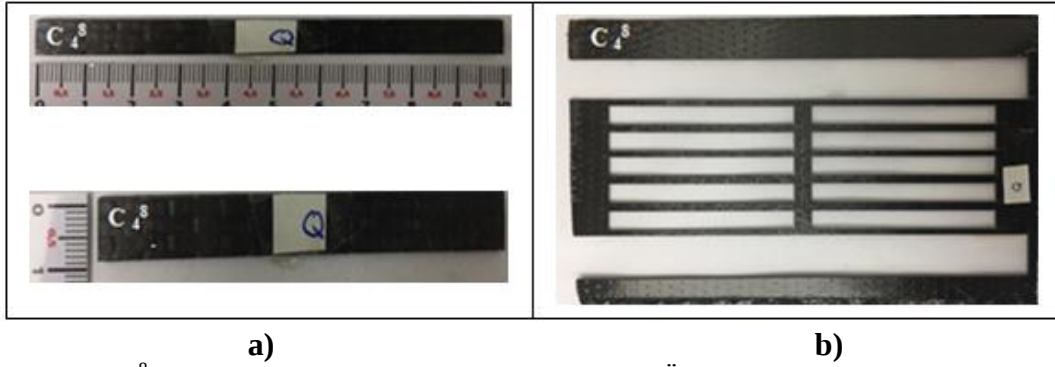
**Resim 3.21**  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme plaka.

Üretilen  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzemenin ilk plakasından CNC Su Jeti makine yardımıyla Resim 3.22’de gösterilen 7 adet 25 x 250 mm ölçülerinde çekme numunesi kesilerek elde edilmiştir.



**Resim 3.22**  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme **a)** 7 adet çekme numunesi **b)** çekme numunesi (25 x 250 mm).

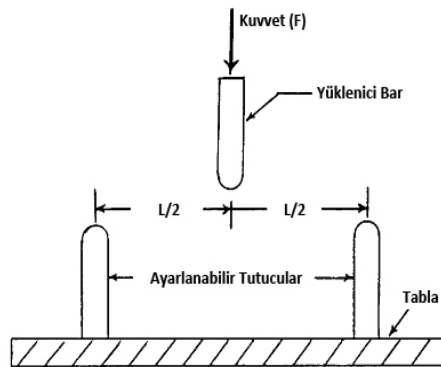
$C_4^8$  oryantasyon açılı kompozit malzemenin ikinci plakasından ise CNC Su Jeti makine yardımıyla Resim 3.23’de gösterilen 10 adet 10 x 100 mm ölçülerinde eğme numunesi kesilerek elde edilmiştir



**Resim 3.23**  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme **a)** Üç nokta eğme numunesi (10 x 100 mm) **b)** CNC su jeti ile kesilen plaka.

### 3.7 Üç Nokta Eğme Testi

Kompozit malzeme için üç tip eğilme testi açıklanabilir. Bunlar ankastre, dört nokta eğme ve üç nokta eğme testleridir. Bunların içerisinde en yaygın kullanılanı üç nokta eğme testidir. Test’ de karbon fiber malzemenin her bir ucu iki tutucu üzerine yerleştirilir ve karbon fiber malzemenin orta kısmından düşey de kuvvet uygulanmaktadır (Şekil 3.4). Kuvvet ve tutucular yatay eksene dik doğrultuda yerleştirilir. Kuvvet karbon fiber malzeme kırılana kadar artırılır.



**Şekil 3.4** Üç nokta eğme test düzeneği (ANSI / ASAE 1998).

Çalışmada yapılan üç nokta eğilme testi için  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyon açılarına göre her bir tip den 10 adet olmak üzere toplamda 40 adet numune hazırlanmıştır. Her bir oryantasyon açısından 4 adet olmak üzere toplamda 16 adet üç nokta eğme numunesi test yapılmıştır. Hazırlanan test numunelerin uzunluğu 100 mm genişliği 10 mm ve et kalınlığı ise 2 mm’dir. Üç nokta eğme testi Afyon Kocatepe Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Kompozit Laboratuvarında bulunan 10 kN kapasiteye sahip Shimadzu Autograph çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Üç nokta

eğme testleri ASTM D7264 standardına göre yapılmıştır. Resim 3.24’de testte kullanılan karbon fiber malzemenin üç nokta eğme testi ve yapılan test cihaz görülmektedir. Karbon fiber malzemenin alt kısmındaki mesafe mesnetler arası 60 mm olarak alınmıştır. Mesnetler arası oran 10’dan büyük alınmış ve üst çenenin ilerleme hızı 10 mm/dak olarak bilgisayar programına girilmiştir (ANSI/ASAE 1998).



**Resim 3.24** Hazırlanan test numunelerinin **a)** Üç nokta eğme testi **b)** AUTOGRAPH cihazı.

Çalışmada, elastisite modülü (E) ve eğilme dayanımı ( $\sigma_{max}$ ) gibi karbon fiber malzemenin bütünlüğünün karakterizasyon için kullanılan parametreler hesaplanmaya çalışılmıştır. Test cihazının bilgisayar yazılımı ile her bir numuneye ait deplasman ve yük grafiği elde edilmiştir. Karbon fiber malzemenin statik eğilme dayanımı denklem 3.1’den yararlanarak hesaplanmıştır. Üç nokta eğilme testi ile maksimum eğilme dayanım değerleri aşağıdaki denklem ile belirlenmektedir (ASTM D7264/D7264M – 07 2015).

$$\sigma_f = 3FL / 2bh^2 \quad (3.1)$$

Denklem’ de, b numunenin genişliğini,  $\sigma$  eğilme gerilmesi, h numunenin kalınlığını, F uygulanan maksimum kuvvet ve L destekler arası mesafe olarak ifade etmektedir.

### 3.8 Çekme Testi

Çekme testi, bir numunenin kopana dek tek ekseninde çekme kuvvetine maruz bırakıldığı ve numunenin davranışını belirlemek için kullanılan bir testdir. Çekme testi ile malzemenin gerilme özellikleri belirlenmektedir. Hazırlanan numunelerinin çekme testleri ASTM D 3039 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Tüm numunelerin çekme testleri 5 mm/dakika çekme hızıyla ve  $23 \pm 1$  °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çekme testinde, numune makineye konulur ve kopana dek çekme kuvveti uygulanır. Kuvvetin uygulanma süresinde standart kesitteki uzama miktarı uygulanan kuvvete karşılıklı bir şekilde kaydedilir. Uzama miktarındaki veriler aşağıdaki denklem 3.2 kullanarak hesaplanabilir.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (3.2)$$

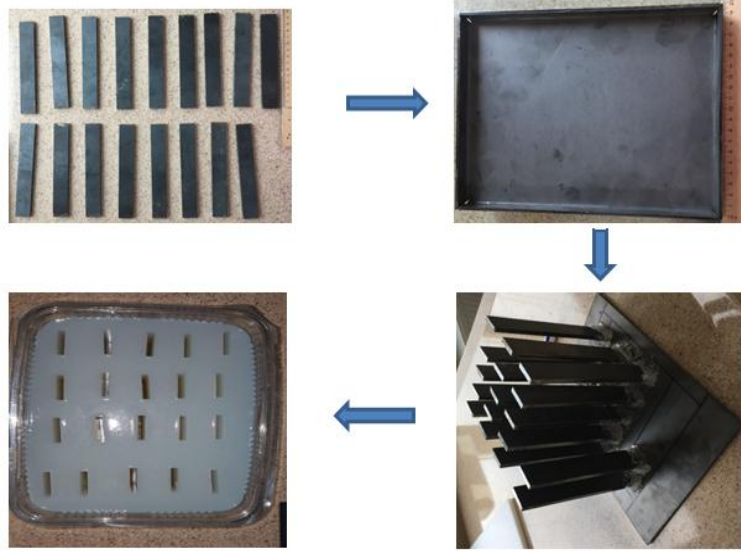
$\Delta L$  boydaki uzama,  $L_0$  başlangıç uzunluğu ve L de son uzunluktur. Denklem 3.3’de ise kuvvet verileri kullanarak gerilme hesaplanabilir.

$$\sigma = \frac{F_n}{A} \quad (3.3)$$

$\sigma$  gerilme, F kuvveti, A ise standart kesit alanını göstermektedir.

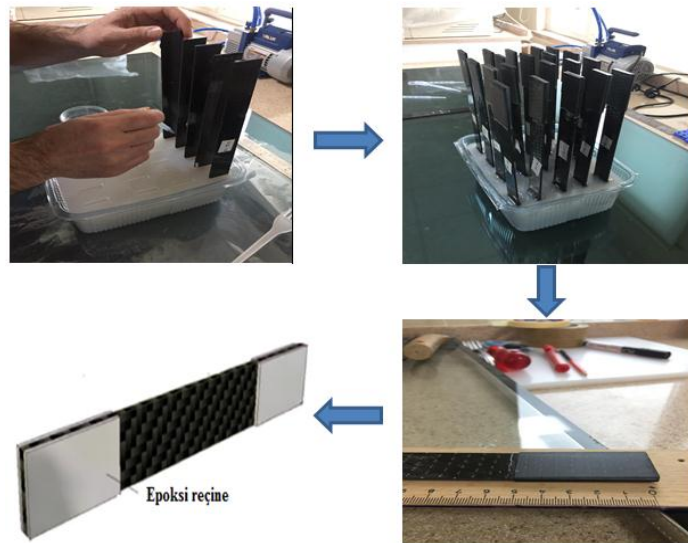
#### 3.8.1 Çekme Test Numunesinin Çene Kısmı İçin Silikon Kalıp Hazırlanması

Çekme testini gerçekleştirirken doğru sonuç alabilmek için cihaz çeneleri karbon fiber malzemenin uç kısmına zarar vermemesini önlemek için test numunelerin uçlarına Resim 3.25’de gösterildiği gibi çekme numuneleri için bir silikon kalıp hazırlanmıştır. Demir kalıp parçaları CNC lazer makinesi ile kesilerek hazırlanmıştır.



**Resim 3.25** Numunenin çene kısmı için yapılan silikon kalıp üretim aşamaları.

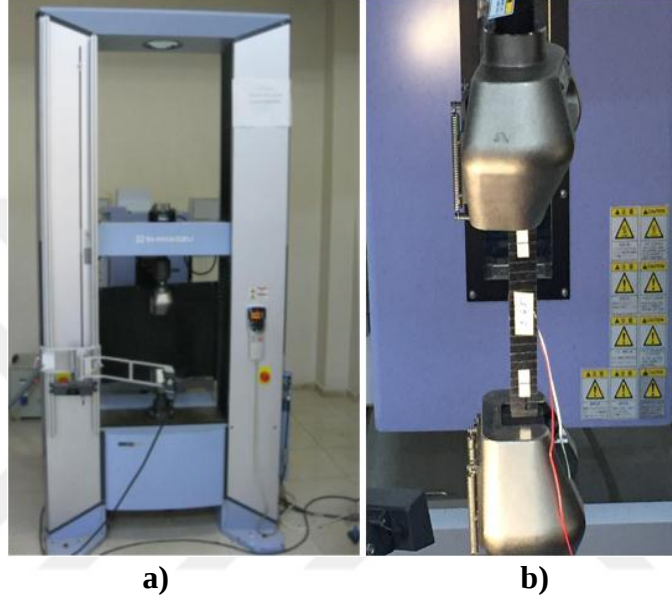
Hazırlanan silikon kalıptan sonra çekme numunlerinin Resim 3.26’da görüldüğü gibi çene kısımlarını kalıp içerisine yerleştirerek ara boşluklara hazırlanan epoksi karışımı dökülmüştür. Böylelikle kalıp sayesinde tek sefer de 20 tane çekme numunesinin çene kısımların epoksi malzeme ile kürlenmesi sağlanmıştır. Kürlenme süresi yaklaşık 24 saat içerisinde gerçekleşmiştir. Daha sonra numuneler çevrilerek diğer uç çene kısımları kalıp içerisine yerleştirilerek epoksi ile kürlenmesi sağlanmıştır. Böylelikle bu işlem basamaklarından sonra karbon fiber test numune çekme deneyi için hazır hale getirilmiştir.



**Resim 3.26** Çekme test numunesinin çene kısımlarının epoksi ile kaplanma aşaması.

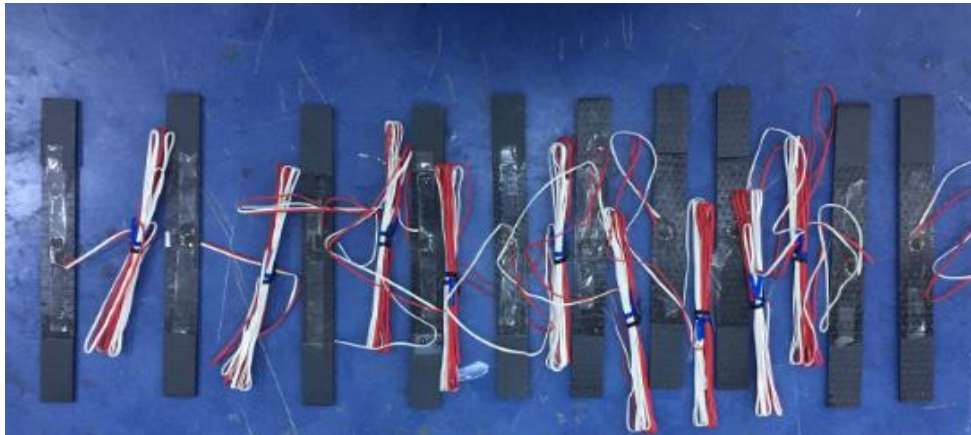
### 3.8.2 Üniversal Çekme Test Makinası

Farklı oryantasyon açlarına sahip karbon fiber malzemelerin çekme testleri, İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Kompozit Araştırma Laboratuvarındaki Shimadzu AG – X üniversal çekme test cihazında yapılmıştır. Resim 3.27’de çekme cihazının görüntüsü ve numunenin test cihazına bağlantısı görülmektedir.



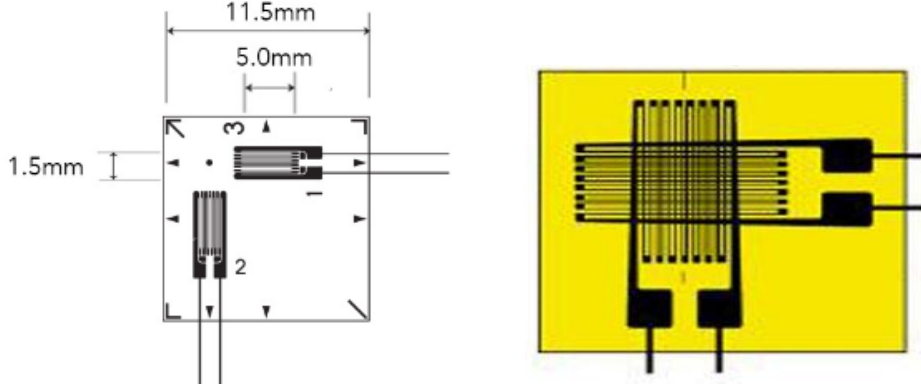
**Resim 3.27** Testlerde kullanılan **a)** Shimadzu AG – X çekme cihazı **b)** test numunesinin bağlantısının gösterimi.

Hazırlanan test numunelerinden 2 adet  $C_1^8$ , 3 adet  $C_4^8$ , 2 adet  $C_2^8$  ve 3 adet  $C_3^8$  oryantasyon açılı olmak üzere toplam 10 adet çekme deney numunesi Resim 3.28’de gibi hazırlanmıştır.



**Resim 3.28** Çekme test numunesine gerinim pulların yapıştırılması.

Çekme test numunelerin her biri için elastik modülü ve poisson oranı gibi değerleri ölçmek için kompozit malzemelerde kullanılan Şekil 3.5’de gösterilen UBF serisi  $0^\circ/90^\circ$  iki eksenli BFCA 2-3 gerinim pulları (strain gauge ) kullanılmıştır.



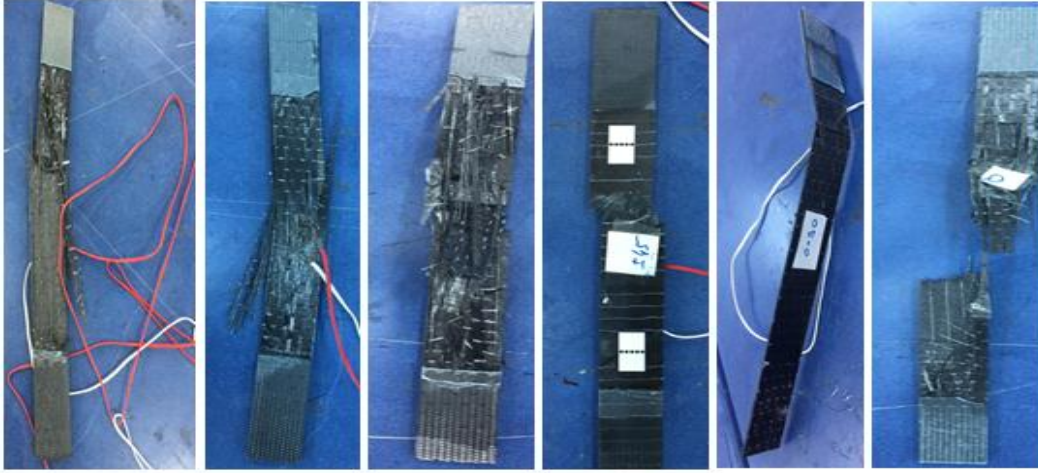
**Şekil 3.5** UBF serisi  $0^\circ/90^\circ$  iki eksenli BFCA 2-3 gerinim pulu.

Numuneye bağlanan gerinim pullarındaki verileri okumak için Şekil 3.30’ daki Data Logger TDS-530 çok kanallı bir tarama veri kaydedici kullanılmıştır. Data Logger den alınan verileri bilgisayar ortamında kullanılan Resim 3.29’da gösterilen Scimadzu / Trapezium program ara yüzü yazılımına aktarılarak çekme numunesine ait veriler kaydedilmiştir.



**Resim 3.29** Çekme testinde kullanılan a) Data logger b) bilgisayar ara yüz yazılımı.

Yapılan çekme testi sonucunda üretilen farklı oryantasyon açlarına sahip test numunelerinde oluşan belli başlı hasar tipleri Resim 3.30’da gösterilmiştir.



**Resim 3.30** Çekme test sonucu numunelerde oluşan hasar görüntüleri.

Her bir çekme test numunelerinden elde edilen veriler doğrultusunda maksimum gerilme, elastik modülü, maksimum deplasman ve maksimum kuvvetler hesaplanmıştır. En iyi sonuç değerlerine sahip  $C_2^8$  oryantasyonlu karbon fiber malzeme çıkmış olup buna en yakın sonuç  $C_4^8$  oryantasyonlu karbon fiber malzeme çıkmıştır. Yan darbe kiriş üretirken bu oryantasyon açıları dikkate alınarak üretim yapılmıştır.

### **3.9 Alüminyum Bal Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzeme Üretim Yöntemleri**

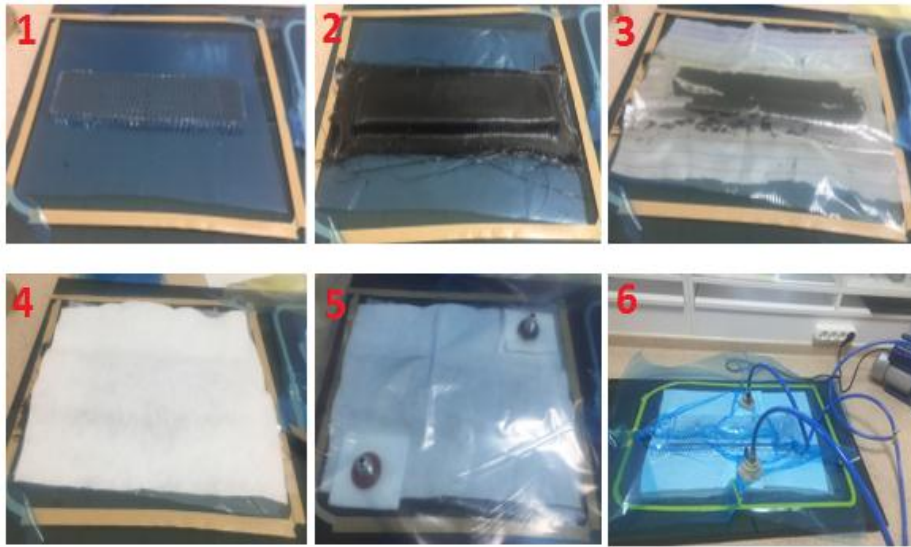
Üretimi planlanan (C-O) profillerin  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  karbon fiber malzemeye uygulanacak darbeye karşı dayanımına karar verebilmek için her bir oryantasyondan oluşan darbe test numune parçası üretilmiştir. Üretilen sandviç numunelerin üst yüzeyine 8 tabakalı karbon fiber malzeme ve çekirdek malzemesi olarak da Alüminyum bal peteği yerleştirilmiştir. Numuneler el yatırma tekniyle ve vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir.  $C_2^8$  oryantasyon karbon fiber malzemedan 3 adet,  $C_3$  oryantasyon karbon fiber malzemedan 3 adet,  $C_1^8$  oryantasyon karbon fiber malzemedan 3 adet,  $C_4^8$  oryantasyon karbon fiber malzemedan 3 adet olmak üzere toplam 12 adet darbe test numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan test numuneleri Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Araştırma Laboratuvarından destek alınarak darbe testi yapılmıştır. Darbe test cihazının numune ölçüleri 10 cm x 10 cm x 5 cm standartta olup üretilecek test numunelerinde bu ölçüler dikkate alınarak hazırlanmıştır. 12 numunenin her biri için deney uygulanıp darbe test

sonuçları karşılaştırılmıştır. Deformasyona ve darbeye en dayanıklı kompozit malzeme  $C_4^8$  oryantasyon karbon fiber malzeme olduğu tespiti yapılmıştır.

### 3.9.1 Darbe Testi İçin Numune Hazırlanması

Numune üretiminde reçine malzemesi olarak MGS L285 ve sertleştirici malzemesi olarak da MGS H285 malzeme kullanılmıştır. Üretilen 12 adet darbe test numunesinin üretiminin her birine reçine malzemeden 100 gram sertleştiriciden 40 gram konularak ikisi 5 dakika mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Fiber kumaşların üzerlerine 8 katman olacak şekilde reçine malzemeyi fırça yardımıyla sürülerek numune parçası hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 170 dakika basınç altında vakumlu ortamda bekletilmiştir.

Kupon malzemelere çekme testi ve üç nokta eğme testi uygulanmış olup daha iyi sonuç alabilmek için standartlara göre test numuneleri hazırlanarak darbe testi uygulanmıştır. Üretimi yapılacak (C-O) profillerin  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyon Al bal petek sandviç yapılı karbon fiber malzemeye uygulanacak darbeye karşı dayanımına karar verebilmek için her bir oryantasyondan oluşan darbe test numune parçası üretilmiştir. Üretilen numuneler 8 tabakalı karbon fiber malzeme ve iç kısmına da Al bal peteği yerleştirilmiştir. Numuneler Resim 3.31'deki gibi işlem basamaklarını takip ederek vakum torbalama yöntemiyle üretilmiştir.



**Resim 3.31** Darbe testi için Al bal petek yapılı tabakalı kompozit üretim işlem basamakları.

### 3.9.1.1 $C_1^8$ Oryantasyonlu Darbe Test Numune Üretimi

Üretim aşamasında ilk olarak  $C_1^8$  oryantasyon açılı 300 gram/m<sup>2</sup>'lik karbon fiber kumaş kullanarak Resim 3.32'de gösterilen 300 mm x 10 mm boyutlarında 8 tabakalı bir adet dikdörtgen Alüminyum bal petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzeme üretimi yapılmıştır.



**Resim 3.32**  $C_1^8$  oryantasyonlu darbe test numunesi.

Üretimi yapılan  $C_1^8$  oryantasyon tabakalı karbon fiber dikdörtgen malzemeye darbe testini uygulamak için darbe cihazın standart ölçülerine göre numune malzemeleri 10 cm x 10 cm x 5 cm ölçülerinde Resim 3.33'de gibi kesilerek hazırlanmıştır.



**Resim 3.33**  $C_1^8$  oryantasyonlu numunenin standart ölçülere göre kesilmesi.

### 3.9.1.2 $C_2^8$ Oryantasyonlu Darbe Test Numune Üretimi

İkinci olarak  $C_2^8$  oryantasyon açılı 300 gram/m<sup>2</sup>'lik karbon fiber kumaş kullanarak Resim 3.34'de gösterilen 300 mm x 10 mm boyutlarında 8 tabakalı bir adet dikdörtgen Al bal petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzeme üretimi yapılmıştır.



**Resim 3.34**  $C_2^8$  oryantasyonlu darbe test numunesi.

Üretimi yapılan  $C_2^8$  oryantasyon tabakalı karbon fiber dikdörtgen malzemeye darbe testini uygulamak için darbe cihazın standart ölçülerine göre numune malzemeleri 10 cm x 10 cm x 5 cm ölçülerinde Resim 3.35’de gibi kesilerek hazırlanmıştır.



**Resim 3.35**  $C_2^8$  Oryantasyonlu numunenin standart ölçülere göre kesilmesi.

### 3.9.1.3 $C_3^8$ Oryantasyonlu Darbe Test Numune Üretimi

İkinci olarak  $C_3^8$  oryantasyon açılı 300 gram/m<sup>2</sup>’lik karbon fiber kumaş kullanarak Resim 3.36’da gösterilen 300 mm x 10 mm boyutlarında 8 tabakalı bir adet dikdörtgen Al bal petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzeme üretimi yapılmıştır.



**Resim 3.36**  $C_3^8$  oryantasyonlu darbe test numunesi.

Üretimi yapılan  $C_3^8$  oryantasyon tabakalı karbon fiber dikdörtgen malzemeye darbe testini uygulamak için darbe cihazın standart ölçülerine göre numune malzemeleri 10 cm x 10 cm x 5 cm ölçülerinde Resim 3.37’de gibi kesilerek hazırlanmıştır.



**Resim 3.37**  $C_3^8$  oryantasyonlu numunenin standart ölçülere göre kesilmesi.

#### 3.9.1.4 $C_4^8$ Oryantasyonlu Darbe Test Numune Üretimi

Dördüncü olarak  $C_4^8$  oryantasyon açılı 300 gram/m<sup>2</sup>'lik karbon fiber kumaş kullanarak Resim 3.38'de gösterilen 300 mm x 10 mm boyutlarında 8 tabakalı bir adet dikdörtgen Al bal petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzeme üretimi yapılmıştır.



**Resim 3.38**  $C_4^8$  oryantasyonlu darbe test numunesi.

Üretimi yapılan  $C_4^8$  oryantasyon tabakalı karbon fiber dikdörtgen malzemeye darbe testini uygulamak için cihazın standart ölçülerine göre numune malzemeleri 10 cm x 10 cm x 5 cm ölçülerinde Resim 3.39'da gibi kesilerek hazırlanmıştır.



**Resim 3.39**  $C_4^8$  oryantasyonlu numunenin standart ölçülere göre kesilmesi.

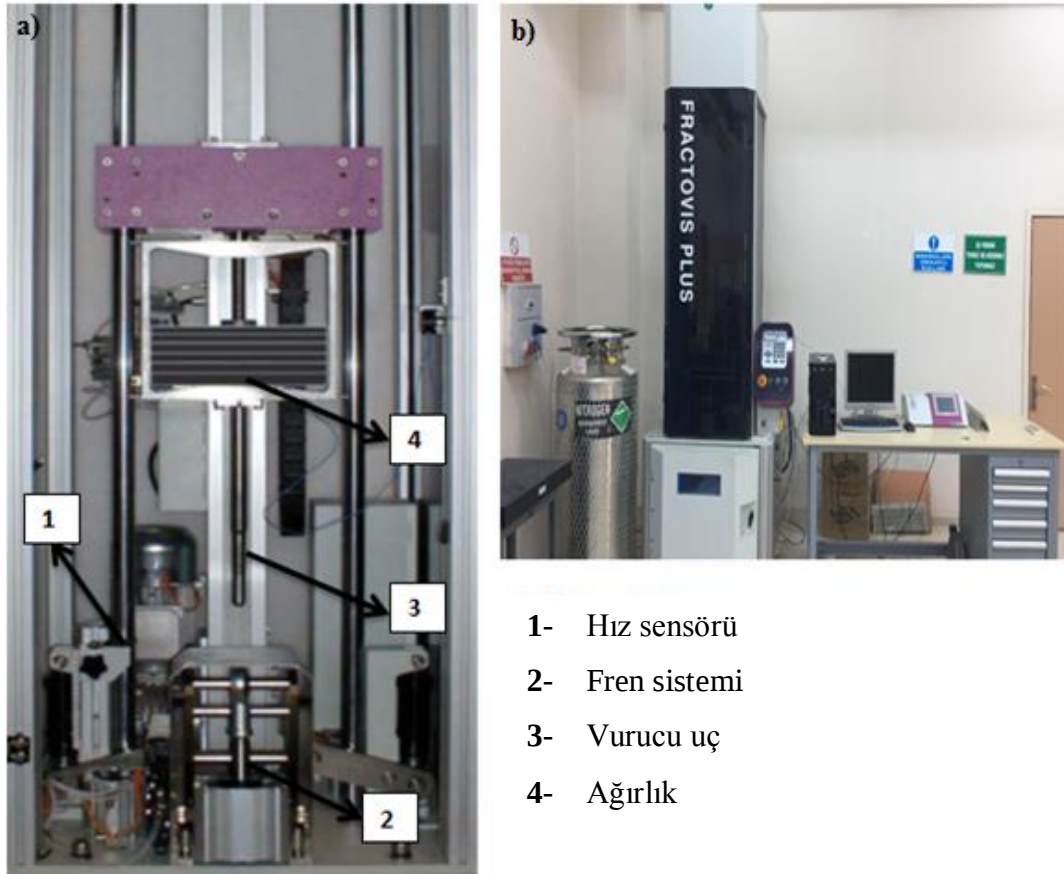
Üretimi yapılan  $C_2^8$  yönlenmeli karbon fiber kumaştan 3 adet,  $C_3^8$  yönlenmeli karbon fiber kumaştan 3 adet,  $C_1^8$  yönlenmeli karbon fiber kumaştan 3 adet,  $C_4^8$  yönlenmeli karbon fiber kumaştan 3 adet olmak üzere Resim 3.40'da görüldüğü gibi toplam 12 adet standarta uygun darbe test numuneleri hazırlanmıştır.



**Resim 3.40**  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyon açılı numunelerin darbe test standart ölçülerine göre hazırlanmış hali.

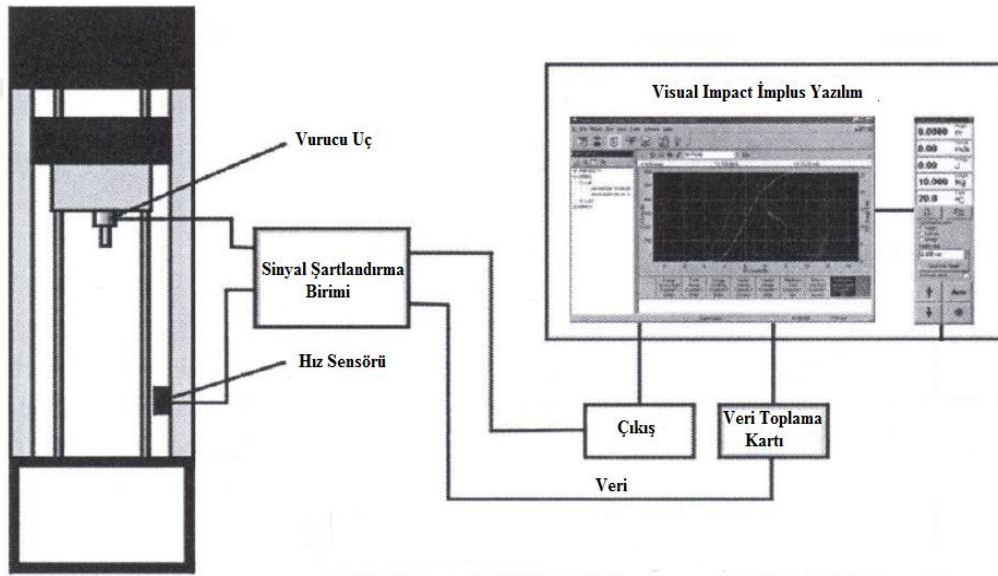
### 3.9.2 Darbe Test Cihazı

Hazırlanan numunelerin darbe testleri Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Kompozit Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada serbest ağırlık düşürme ilkesine göre çalışan darbe test cihazı Resim 3.41’de gösterilen CEAST 9350-Fractovis Plus kullanılmıştır. Test cihazın vurucu ucu çelik yarım küre şeklinde olup 12,7 mm çapına sahiptir. Testlerde kullanılan vurucu ucun ağırlığı 4,926 kilogramdır. Testler oda sıcaklığında 20°C gerçekleştirilmiştir. Serbest bırakılan yükseklik 1,657 metre ve darbe hızı 5,65 m/s (20,5 km/h) olarak testler gerçekleştirilmiştir. Darbe cihaz ile büyük enerjilerden (1800J) küçük enerji (2-3J) değerlerine kadar test yapılabilir. Testler ASTM D3763 standartına göre yapılmıştır. Darbe sonrasında vurucu ucun sıçrama sonrası tekrar numuneye düşmesini engellemek için fren sistemi özelliğine sahiptir. Cihaz içerisinde pnömomatik bir düzenek ile numunelerin ankastre sınır şartlarında darbe testlerinin yapılması sağlanmıştır.



**Resim 3.41** Testlerde kullanılan a) Test cihazın iç gösterimi b) Fractovis Plus Darbe Test Cihazı.

Test cihazı, serbest ağırlık düşürme prensibine göre çalışan yer tipi, yüksek hızlı ve sistem kontrollü bir darbe cihazıdır. İmpuls sinyal şartlandırma birimine, impuls veri toplama kartına Visual Impact bir yazılım ile sistem kontrollü özelliği sağlamaktadır. Darbe sonrası vurucu tarafından üretilen yük sinyalleri, sinyal şartlandırma ile yük verilerini veri toplama kartına aktarılır. Bu verileri yazılıma aktararak darbe test sonuçlarını düzenleyerek toplu veya ayrı ayrı tablo ve grafik olarak elde edilmesini ve hesap yapılabilmesini sağlar. Sistem blok diyagramı Şekil 3.6’da görüldüğü gibidir. Ayrıca test cihazı; numune üzerine düşürülen ağırlığın, yükseklik, hız ve enerji gibi parametrelerin kontrollü olarak değiştirilebilmesine imkân vermektedir.



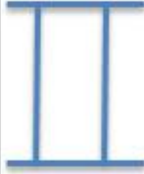
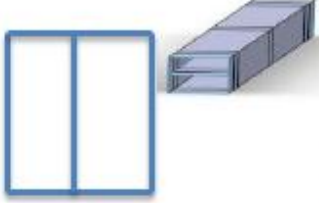
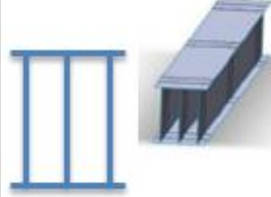
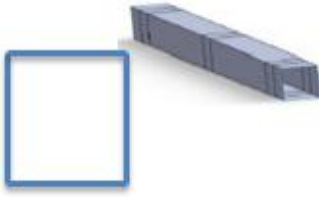
Şekil 3.6 Darbe test cihazı sistem blok diyagramı (Sayer 2009).

Hazırlanan farklı oryantasyon açılarına sahip numunelerin her biri 80 joule enerji seviyesinde sabit darbe yüküne maruz bırakılmıştır. Her bir test numunesinin kenarları tutturulmuş ve yarım küre darbe ucu hesaplanan yükseklikten numunenin ortasına düşürülmüştür. Daha sonra farklı oryantasyon açılarına sahip numunelerin her biri için kuvvet-çökme, kuvvet-zaman, absorbe edilen enerji-zaman, hız-zaman ve çökme-zaman eğrileri elde edilmiştir.

### 3.10 Yan Darbe Kiriş Üretimi

Yapılan çalışmada, literatür araştırmaları dikkate alınarak Şekil 3.7’de verilen mevcut kullanılan otomobil yan darbe kiriş profilleri arasında çalışma şartlarına en uygun olan

vakum torbalama yöntemi ile üretim yapılabilecek profillerinden 1. ve 3. madde olan C ve O profiller kullanılmak üzere seçilmiştir.

|                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |    |
| 1- Dairesel 'O' Profil kiriş                                                        | 2- I Profil Kiriş                                                                   | 3- C Profil Kiriş                                                                    |
|    |    |    |
| 4- II Profil Kiriş                                                                  | 5- Tek Tip Profil Kiriş                                                             | 6- M Tip Profil Kiriş                                                                |
|  |  |  |
| 7- III Profil Kiriş                                                                 | 8- Kare Profil Kiriş                                                                | 9- X Profil Kiriş                                                                    |

**Şekil 3.7** Otomobillerde kullanılan bazı yan darbe kiriş profilleri (Ponnadai 2018).

Yapılan çekme, üç nokta eğme ve darbe test sonuçları optimizasyon edilerek karbon fiber kompozit malzemenin  $C_4^8$  (0/90/+45/-45/-45/+45/90/0) oryantasyon açılı malzeme istenilen özelliklere uygun olduğu görülmüştür. Oryantasyon açılı Al ve Nomex bal petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemedan C profil ve karbon fiber kompozit malzemedan de O profil yan darbe kiriş üretimi gerçekleştirilmiştir.

Kiriş malzeme üretiminde daha önce hazırladığımız ve testini yaptığımız numunelerin katman sayısına eş değer olması nedeniyle 8 tabakalı karbon fiber malzeme hazırlanmıştır. Kiriş profil üretiminde reçine malzemesi olarak MGS L285 ve sertleştirici malzemesi olarak da MGS H285 malzeme kullanılmıştır. Reçine

malzemeden 180 gram sertleştiriciden 72 gram konularak ikisi 5 dakika mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Karbon fiber kumaşların üzerlerine 8 katman olacak şekilde epoksi malzemeyi fırça yardımıyla sürülerek C-O profiller hazırlanmıştır. Hazırlanan C-O profiller kiriş vakum altında 150 dakika bekletilmiştir. Daha sonra vakum pompası kapatılarak 60 dakika daha bekletildikten sonra C-O profil kirişler vakum altından çıkartılmıştır. Vakum altından çıkartılan profillerin kenarlarını spray yardımıyla kesilerek düzeltilmiştir.

### 3.10.1 Bal Petek Sandviç Yapılı Alüminyum Karbon Fiber C Profil Kiriş Üretimi

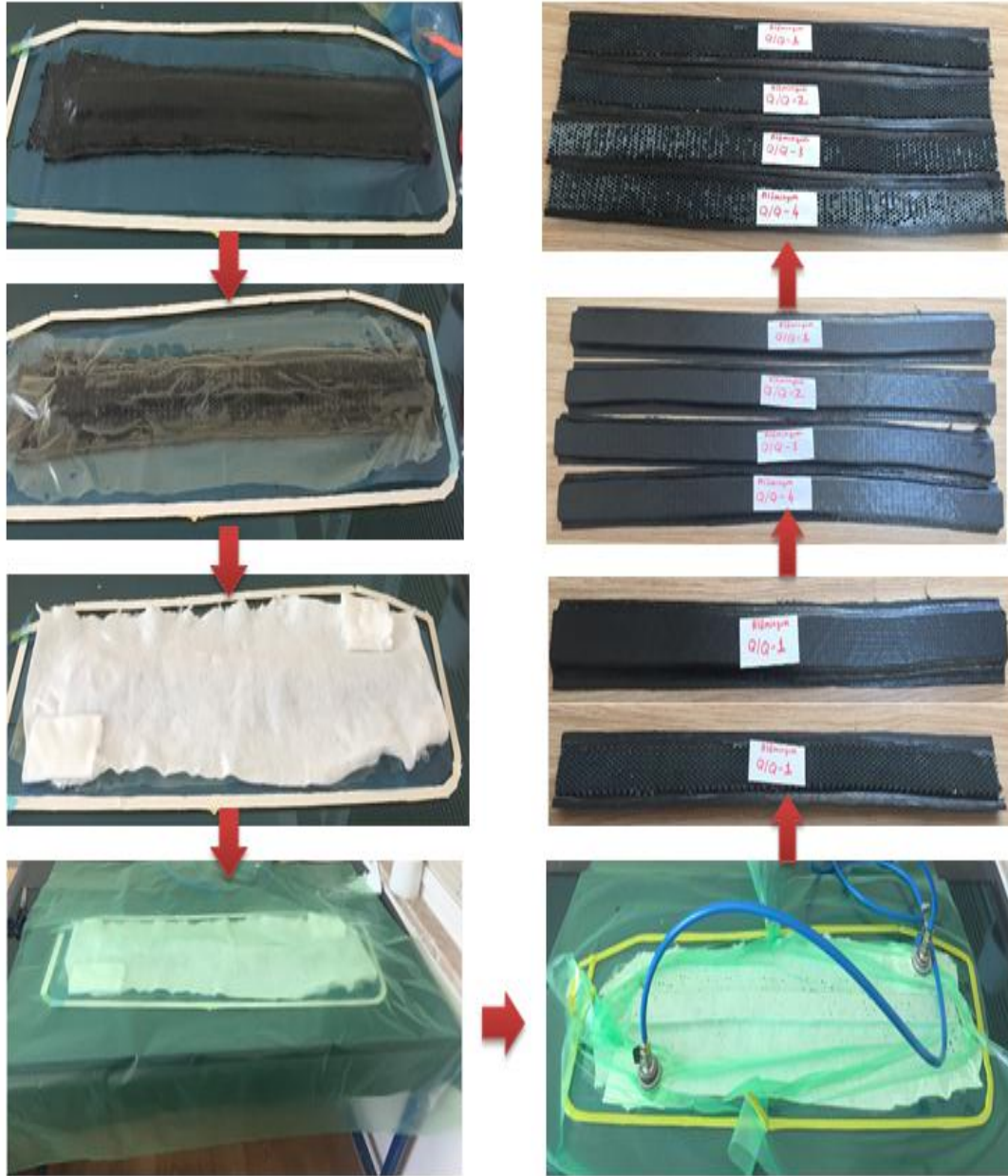
Üretim aşamasında ilk olarak  $C_4^8$  oryantasyon 300 gram/m<sup>2</sup>'lik karbon fiber kumaştan 1000 mm x 90 mm ebatlarında kesilmiştir. Daha sonra C profil yan darbe kiriş malzeme üretiminde kullanılacak Alüminyum bal petek yapılı tabakalı malzemeden Resim 3.42'de gösterildiği gibi 800 mm x 45 mm x 1.8 mm ebatlarında 4 adet spray yardımıyla kesilmiştir.



**Resim 3.42** Alüminyum bal petek yapısının **a)** Al tabaka **b)** İstenilen ebatlarda kesim işlemi (800 x 45 x 1.8 mm).

Kesilen petek yapılı Al malzemelerin üzerine epoksi sürülmüş karbon fiber malzemeleri yerleştirerek vakum altına alınmıştır. Vakum altına alınan C profil kiriş 150 dakika bekletilmiştir. Daha sonra vakum pompası kapatılarak 60 dakika daha bekletildikten sonra C profil yan darbe kiriş vakum altından alınmıştır. Alınan profillerin kenarları

spray yardımıyla kesilerek düzeltilmiştir. Hazırlanan C profil kirişin üretim aşamaları Resim 3.43’de adım adım gösterilmiştir.



**Resim 3.43** C profil petek yapılı Alüminyum karbon fiber kiriş üretim aşamaları.

### 3.10.2 Bal Petek Sandviç Yapılı Nomex Karbon Fiber C Profil Kiriş Üretimi

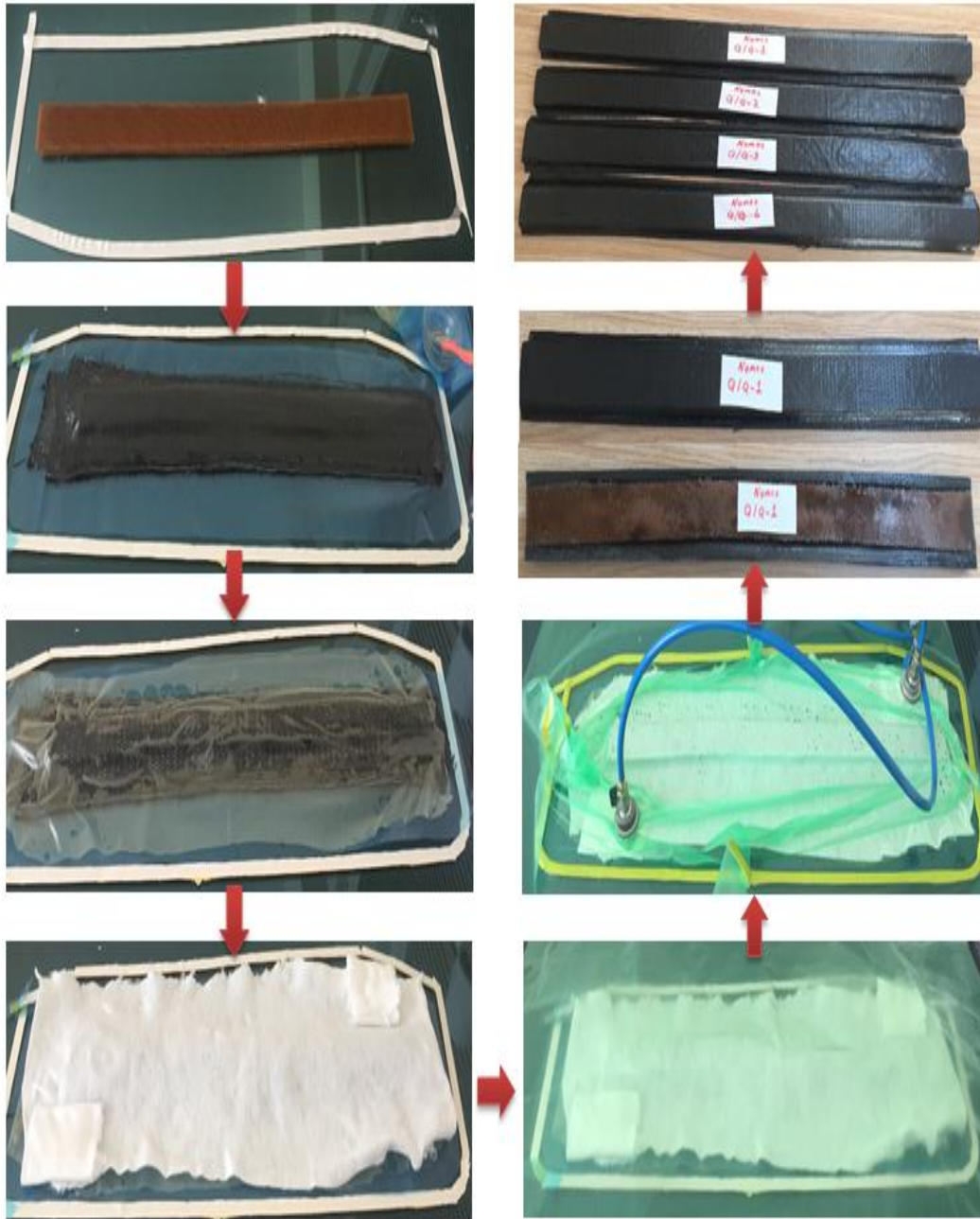
C profil yan darbe kiriş üretiminde kullanacağımız diğer malzeme türü ise bal petek yapılı Nomex malzemedir. Malzemeden 800 x 45 x 0.3 mm ebatlarından 24 adet makas yardımıyla kesilmiştir (Resim 3.44). Bal petek Nomex malzemeden 24 adet kesilmesinin nedeni, Alüminyum malzemenin kalınlığı 1.8 mm Nomex malzemenin

kalınlığı 0.3 mm olduğundan kalınlıkları eşitlemek amacıyla fazla kesilmiştir. Nomex bal peteği dolgu malzemeden bir C profil kiriş üretmek için 6 adet kullanılmış olup ve Nomex malzemeler birbiriyle epoksi ile yapıştırılarak 180 dakika bekletildikten sonra 1.8 mm kalınlık elde edilmiştir.



**Resim 3.44** Nomex bal petek yapısının **a)** Nomex tabaka **b)** istenilen ebatlarda kesim işlemi (800 x 45 x 0.3 mm).

Kesilen Nomex bal petek malzemelerin üzerine epoksi sürölmüş karbon fiber malzemeleri yerleştirerek vakum altına alınmıştır. Vakum altında C profil kiriş 150 dakika bekletilmiştir. Daha sonra vakum pompası kapatılarak 60 dakika daha bekletildikten sonra C profil kiriş vakum altından alınmıştır. Alınan profillerin kenarları spray yardımıyla kesilerek düzeltilmiştir. Hazırlanan C profil kirişin üretim aşamaları Resim 3.45’de adım adım gösterilmiştir.



**Resim 3.45** C profil petek yapılı Nomex karbon fiber kiriş üretim aşamaları.

### 3.10.3 Karbon fiber O Profil Kiriş Üretimi

Üretimin ikinci aşamasında  $C_4^8$  oryantasyon 300 gram/m<sup>2</sup>'lik karbon fiber kumaştan 850 x 45 mm ebatlarında 32 adet kesilmiştir. O profil yan darbe kirişi üretiminde Ø 5 mm çapında plastik boru kullanılmıştır. Plastik borunun çevresine vakum naylonundan sarılarak üzerine hazırladığımız epoksili karbon fiber malzememizi dizilime dikkat edilerek 8 katman olacak şekilde sarılmıştır. Sarılan O profilimizi vakum altına almadan

iki tarafından bilya yardımıyla yataklanarak sabitlenmiştir. Sabitlenen O profil kiriş vakum altında 150 dakika bekletilmiştir. Daha sonra vakum pompası kapatılarak 60 dakika daha bekletildikten sonra O profil kiriş vakum altından çıkartılmıştır. Çıkartılan profillerin kenarları spray yardımıyla kesilerek düzeltilmiştir. Hazırlanan O profil kirişin üretim aşamaları Resim 3.46’da adım adım gösterilmiştir.



**Resim 3.46** O profil karbon fiber kiriş üretim aşamaları.

### 3.11 Serbest Ağırlık Düşürme

Serbest ağırlık düşürme testleri, standart koşullarda veya üzerine belli bir ağırlık belli bir yükseklikten düşürüldüğü zaman bir malzemenin dayanma gücünün belirlendiği testlerdir. Üretimi yapılan C-O taşıt yan darbe kirişlerin test edilmesinde serbest ağırlık düşürme testi uygulanmıştır. Testler oda sıcaklığında ve ASTM standartlarında gerçekleştirilmiştir. Kirişlere sırasıyla 2.5 m, 2.75 m ve 3 m yüksekliklerden serbest ağırlık düşürme testi uygulanmıştır. Serbest bırakılan darbe küresinin çapı 165 mm ve ağırlığı ise 6,5 kg dır.

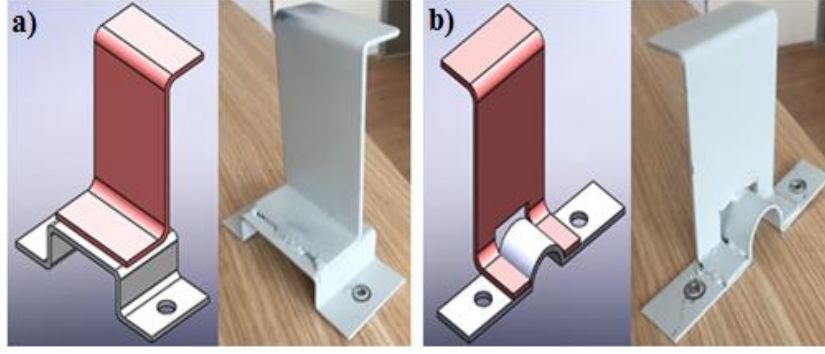
#### 3.11.1 Test Meteryal'in Solidworks Katı Model Çizimi

Yan kapı darbe kiriş deneyinde dinamik tokluğunu ivmesini ve çarpma hızını ölçmek için kullanılacak darbe deneylerinden ağırlık düşürme test deneyi kullanılmıştır. Test yüksekten düşürülen bir ağırlığın malzemede meydana getirdiği hasarın ölçüldüğü bir deneydir. Test aşamasının hazırlanmasında bir otomobil kapısı zımpara ve macun işlemlerinden geçirilerek Solidworks de katı modeli çizilerek Resim 3.47'de görüldüğü gibi test yapmaya uygun hale getirilmiştir.



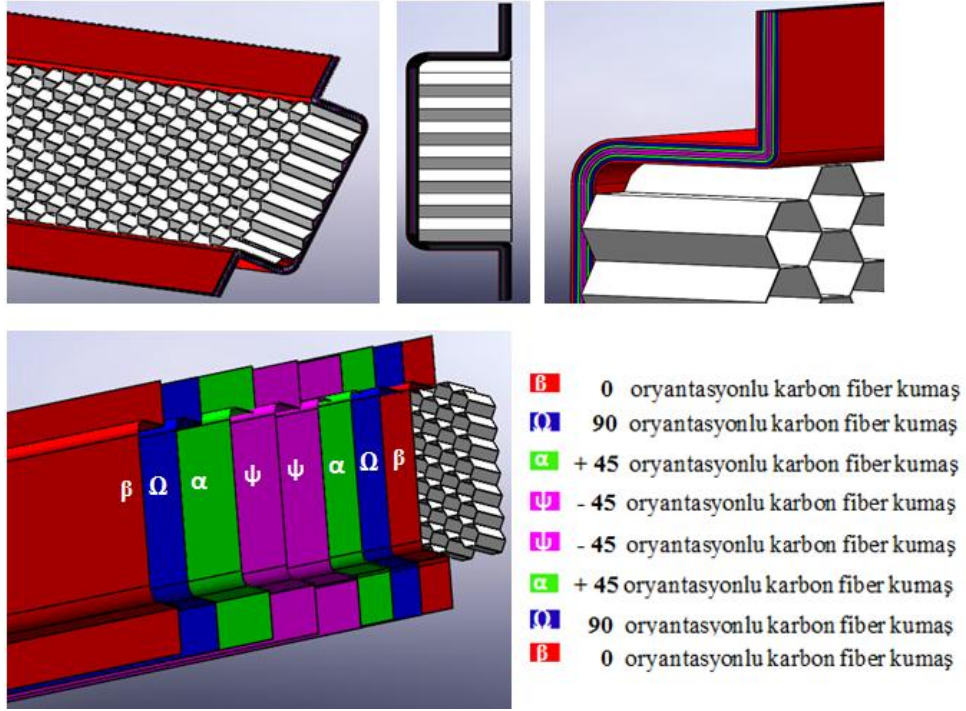
**Resim 3.47** Testlerde kullanılacak otomobil kapısının a) ilk hali b) Solidworks çizimi c) işlemden geçirilmiş hali.

C ve O profil yan darbe kiriş malzemeyi kapı üzerine sabitlemek ve zeminden destek sağlamak için çelik malzemeden iki adet kelepçe imal edilmiştir. Resim 3.48'de Solidworks katı model çizimi ve üretim hali gösterilmiştir.



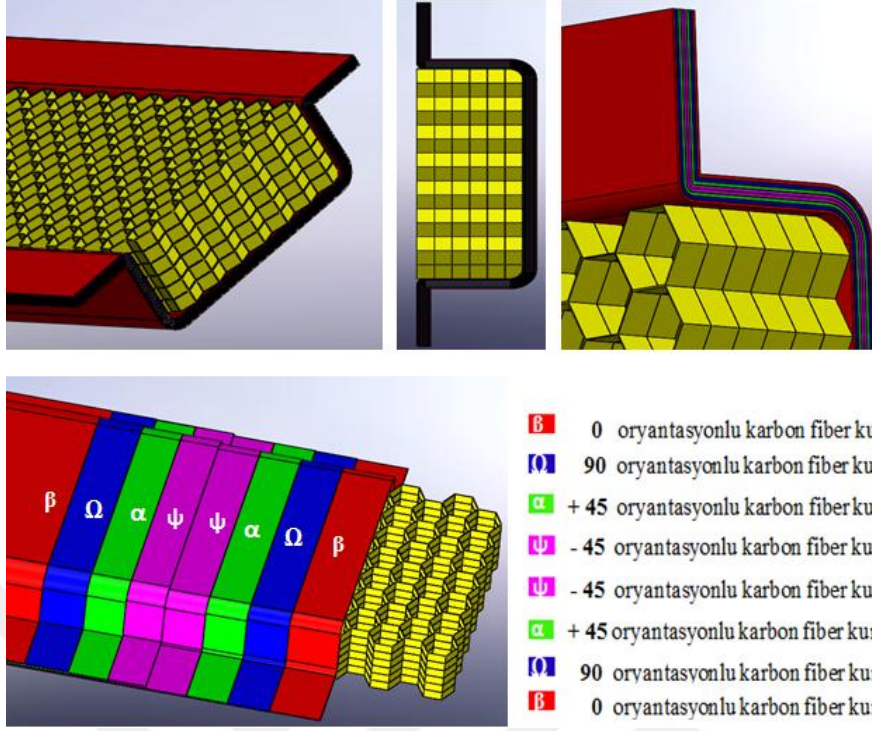
**Resim 3.48** Yan darbe kirişini sabitlemede kullanılan **a)** C profil kelepçesi **b)** O profil kelepçesi.

Serbest düşme cihazında test edilecek 8 kat  $C_4^8$  oryantasyonlu karbon fiber malzeme kaplı bal petek yapılı Al malzemenin C profili ve katmanları Solidworks katı modeli olarak Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



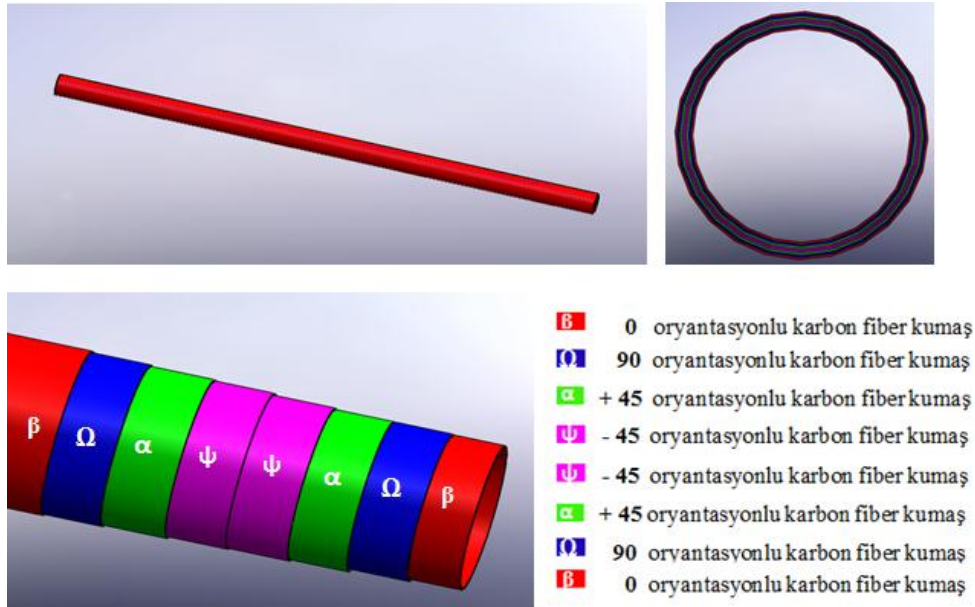
**Şekil 3.8** Petek yapılı Alüminyum karbon fiber malzemenin C profil Solidworks modeli.

Serbest düşme cihazında test edilecek 8 kat  $C_4^8$  oryantasyonlu karbon fiber malzeme bal petek yapılı Nomex malzemenin C profili ve katmanları Solidworks katı modeli olarak Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



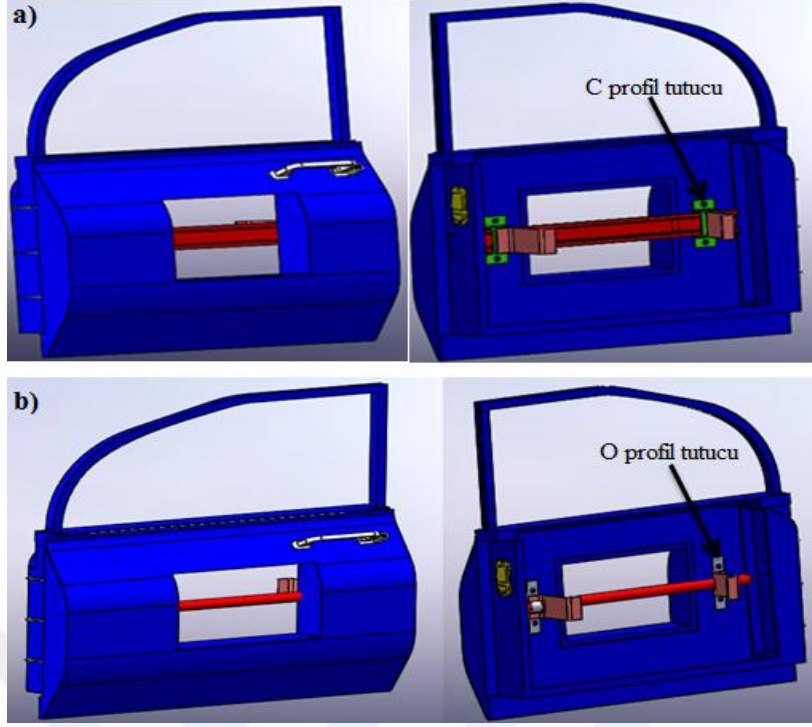
Şekil 3.9 Petek yapılı Nomex karbon fiber malzemenin C profil Solidworks modeli.

Serbest düşme cihazında test edilecek 8 kat  $C_4^8$  oryantasyonlu karbon fiber malzemenin O profili ve katmanları Solidworks katı modeli olarak Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Karbon fiber malzemenin O profil Solidworks katı modeli.

Serbest düşme cihazında test edilecek C-O profil yan darbe kiriş’in kapı üzerine montajı Solidworks katı modeli olarak Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.11** Yan darbe kiriş'in kapı üzerindeki **a)** C profil montajı **b)** O profil montajının Solidworks katı modeli.

### 3.11.2 Serbest Ağırlık Düşürme Cihazı

Üretilen C-O yan darbe kirişlerin test edilmesinde serbest ağırlık düşürme testi uygulanmıştır. Test'te 3 adet C profil bal petek yapılı Al karbon fiber, 3 adet C profil bal petek yapılı Nomex karbon fiber ve 3 adet O profil karbon fiber olmak üzere toplam 9 adet otomobil yan darbe kiriş porfili kullanılmıştır. Yapılan testler de her bir yan darbe kiriş için 2500 mm, 2750 mm ve 3000 mm olmak üzere üç farklı yüksekliklerden serbest düşme testi uygulanmıştır. Serbest bırakılan darbe küresinin çapı 165 mm ve ağırlığı ise 6500 gramdır. Testler akreditasyon olmuş AKDÜLGER A.Ş firması labovatuvar şartları altında gerçekleşmiştir. Çalışmalarda kullanılan serbest düşme test cihazı Resim 3.49'da gösterilmiştir.



**Resim 3.49** Serbest ağırlık düşürme test cihazı.

Test verilerin bilgisayar arayüzü ortamında verilerin kaydedilmesi, hız ve ivme grafiklerin elde edilmesinde TARGE endüstriyel sistemler yazılım programı kullanılmıştır.

## 4. BULGULAR

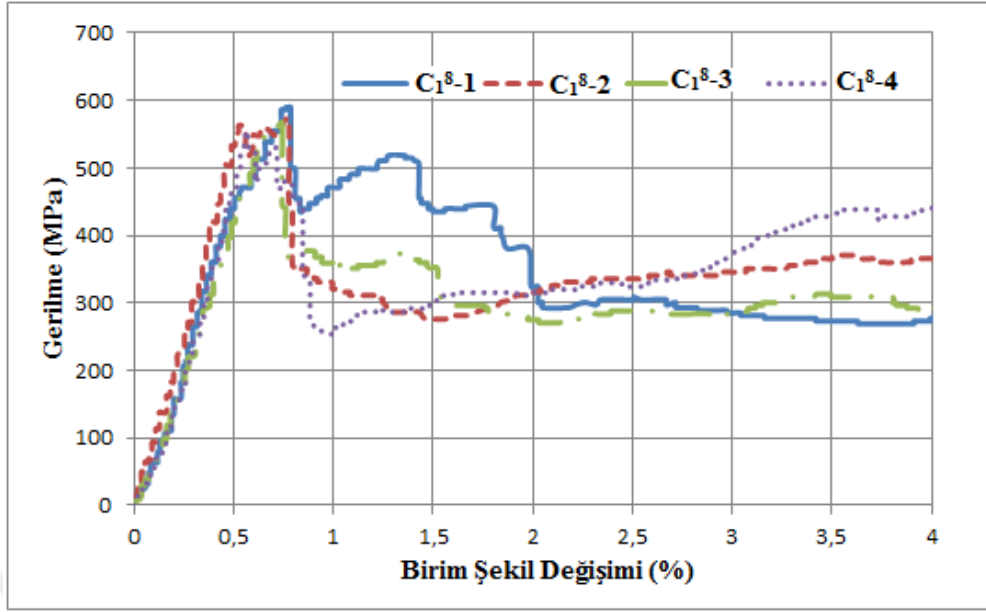
Yapılan çalışmada, farklı oryantasyon açlarına sahip Alüminyum bal petek sandviç yapılı karbon fiber kompozit malzemelerin üç nokta eğme, çekme ve darbe testleri deneysel olarak incelenmiştir. Numunelerin darbe testleri 80J'lük sabit enerji seviyesinde yapılmıştır. Testler oda sıcaklığında 20 °C gerçekleştirilmiştir. Alüminyum ve Nomex bal peteği çekirdek malzemesi kullanarak üretilen taşıt yan darbe kırı ş profilleri serbest ağırlık düşürme testi uygularak deneysel olarak incelenmiştir. Testler sırasında değerler anlık olarak ölçülmüş ve grafik haline getirilmiştir. Yapılan testlerde elde edilen verilerle kuvvet-uzama, kuvvet-çökme, absorbe edilen enerji-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Deneyler sonrası malzemelerin deformasyon bölgeleri ve deformasyon şekilleri incelenmiştir.

### 4.1 Üç Nokta Eğme Testi

Yapılan çalışmada üç nokta eğilme testi için  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  her bir oryantasyon açısına sahip malzemelerin üç nokta eğme testleri deneysel olarak incelenmiştir. Üç nokta eğme testi uygulanan numunelerin maksimum ve ortalama kuvvet değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda gerilme – birim şekil değişim grafikleri oluşturulmuştur.

#### 4.1.1 $C_1^8$ Oryantasyon Açılı Üç Nokta Eğme Testi

Üretilen  $C_1^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme üç nokta eğme testi için 4 adet deney test numunesi kullanılmıştır. Yapılan dört ayrı üç nokta eğme testi arasından Şekil 4.1'de gösterildiği gibi mukavemeti en iyi olan 1 nolu test numunesi çıkmıştır. Test numunesinin eğme dayanımı 597,7 MPa değerindedir. Yapılan testlerin ortalama mukavemet değeri 581,1 MPa dir. Dolayısıyla bu ortalama değere en yakın sonuç 2 nolu test numunesin de çıkmış olup değerlendirmelerde bu esas dikkate alınmıştır.



Şekil 4.1  $C_1^8$  oryantasyon açılı numunenin üç nokta eğme test grafiği.

Üretilen  $C_1^8$  oryantasyon açılı karbon karbon fiber malzeme üç nokta eğme testi için 4 adet deney test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 4.1’de satır kısmında  $C_1^8$  numunenin sırasıyla kalınlığı, genişliği, numunenin kesit alanı, mesnetler arası mesafe, maksimum gerilme, maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme ve maksimum uzama verilmiştir.

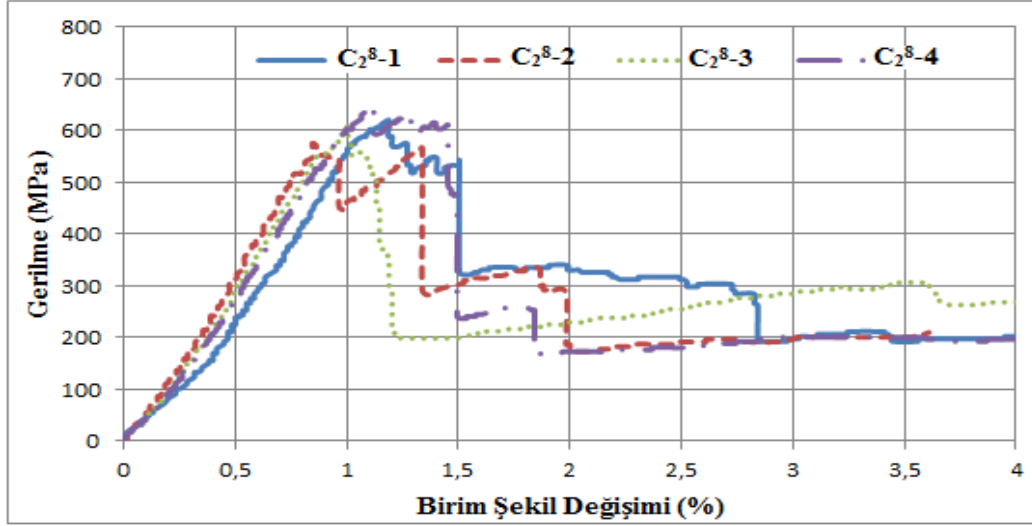
Çizelge 4.1  $C_1^8$  oryantasyon açılı numunenin eğme test değerleri.

| Numune No | Oryantasyon Açısı | a0 (mm) | b0 (mm) | A (mm <sup>2</sup> ) | Lv (mm) | Mak. Gerilme (MPa) | Mak. Kuvvet (N) | Mak. Yer değiştirme (mm) | Mak. Uzama (%) |
|-----------|-------------------|---------|---------|----------------------|---------|--------------------|-----------------|--------------------------|----------------|
| 1 Nolu    | $C_1^8$           | 2       | 10      | 20                   | 60      | 597,7              | 265,6           | 2,36                     | 0,787          |
| 2 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 585,9              | 260,4           | 2,20                     | 0,734          |
| 3 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 574,6              | 255,3           | 1,97                     | 0,658          |
| 4 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 566,4              | 251,7           | 1,76                     | 0,5883         |
| Ort.      |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 581,1              | 258,25          | 2,07                     | 0,6917         |

#### 4.1.2 $C_2^8$ Oryantasyon Açılı Üç Nokta Eğme Testi

Üretilen  $C_2^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme üç nokta eğme testi için 4 adet deney test numunesi kullanılmıştır. Yapılan dört ayrı üç nokta eğme testi arasından Şekil 4.2’de gösterildiği gibi mukavemeti en iyi olan 4 nolu test numunesi çıkmıştır.

Test numunesinin eğme dayanımı 654,8 MPa değerindedir. Yapılan testlerin ortalama mukavemet değeri 612,7 MPa dır. Dolayısıyla bu ortalama değere en yakın sonuç 3 nolu test numunesin de çıkmış olup değerlendirmelerde bu esas dikkate alınacaktır.



Şekil 4.2  $C_2^8$  oryantasyon açılı numunenin üç nokta eğme test grafiği.

Üretilen  $C_2^8$  oryantasyon açılı tabakalı karbon fiber malzeme üç nokta eğme testi için 4 adet deney test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 4.2’de satır kısmında  $C_2^8$  numunenin sırasıyla kalınlığı, genişliği, numunenin kesit alanı, mesnetler arası mesafe, maksimum gerilme, maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme ve maksimum uzama verilmiştir.

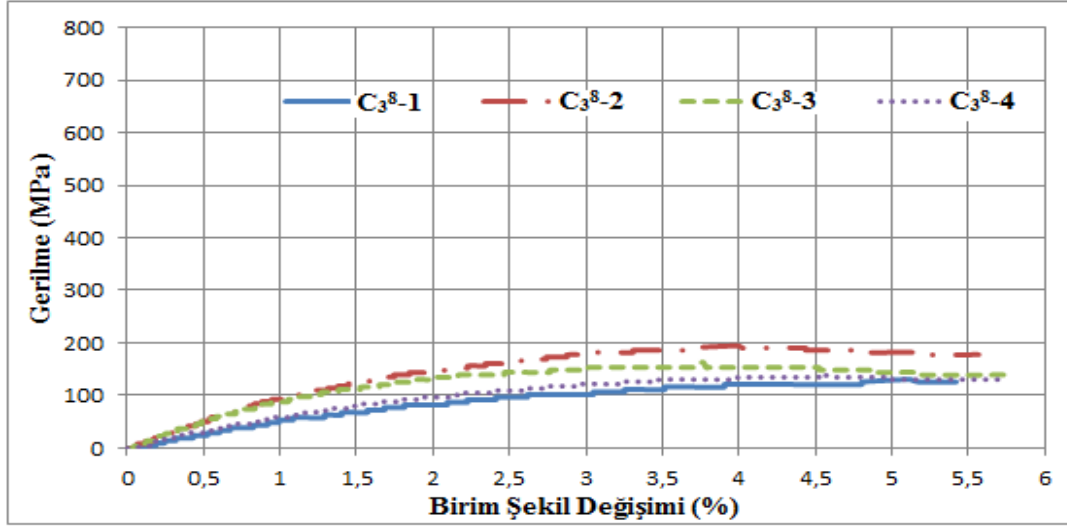
Çizelge 4.2  $C_2^8$  oryantasyon açılı numunenin eğme test değerleri.

| Numune No | Oryantasyon Açısı | a0 (mm) | b0 (mm) | A (mm <sup>2</sup> ) | Lv (mm) | Mak. Gerilme (MPa) | Mak. Kuvvet (N) | Mak. Yer değiştirme (mm) | Mak. Uzama (%) |
|-----------|-------------------|---------|---------|----------------------|---------|--------------------|-----------------|--------------------------|----------------|
| 1 Nolu    | $C_2^8$           | 2       | 10      | 20                   | 60      | 618,7              | 275,0           | 3,12                     | 1,042          |
| 2 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 574,5              | 255,3           | 2,67                     | 0,891          |
| 3 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 602,8              | 267,9           | 3,08                     | 1,027          |
| 4 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 654,8              | 291,0           | 3,30                     | 1,103          |
| Ort.      |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 612,7              | 272,3           | 3,04                     | 1,015          |

#### 4.1.3 $C_3^8$ Oryantasyon Açılı Üç Nokta Eğme Testi

Üretilen  $C_3^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme üç nokta eğme testi için 4 adet deney test numunesi kullanılmıştır. Yapılan dört ayrı üç nokta eğme testi arasından Şekil 4.3’de gösterildiği gibi mukavemeti en iyi olan 2 nolu test numunesi çıkmıştır.

Test numunesinin eğme dayanımı 194,5 MPa değerindedir. Yapılan testlerin ortalama mukavemet değeri 157,6 MPa dır. Dolayısıyla bu ortalama değere en yakın sonuç 3 nolu test numunesin de çıkmış olup değerlendirmelerde bu esas dikkate alınacaktır.



Şekil 4.3  $C_3^8$  oryantasyon açılı numunenin üç nokta eğme test grafiği.

Üretilen  $C_3^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme üç nokta eğme testi için 4 adet deney test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 4.3’de satır kısmında  $C_3^8$  numunenin sırasıyla kalınlığı, genişliği, numunenin kesit alanı, mesnetler arası mesafe, maksimum gerilme, maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme ve maksimum uzama verilmiştir.

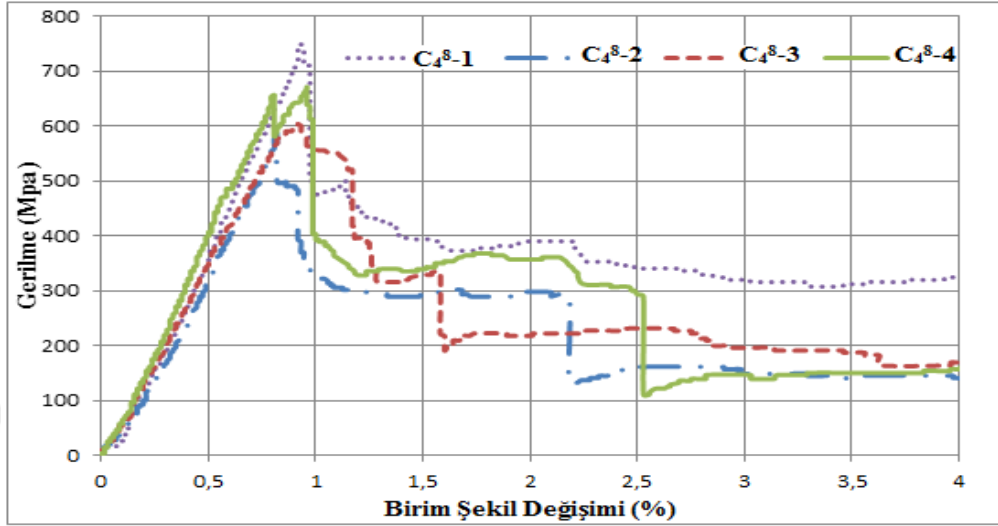
Çizelge 4.3  $C_3^8$  oryantasyon açılı numunenin eğme test değerleri.

| Numune No | Oryantasyon Açısı | a0 (mm) | b0 (mm) | A (mm <sup>2</sup> ) | Lv (mm) | Mak. Gerilme (MPa) | Mak. Kuvvet (N) | Mak. Yerdeğiştirme (mm) | Mak. Uzama (%) |
|-----------|-------------------|---------|---------|----------------------|---------|--------------------|-----------------|-------------------------|----------------|
| 1 Nolu    | $C_3^8$           | 2       | 10      | 20                   | 60      | 136,6              | 60,7            | 15,37                   | 5,12           |
| 2 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 194,5              | 86,4            | 12,14                   | 4,04           |
| 3 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 159,3              | 70,8            | 11,32                   | 3,77           |
| 4 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 140,0              | 62,2            | 13,68                   | 4,56           |
| Ort.      |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 157,6              | 70,02           | 13,12                   | 4,37           |

#### 4.1.4 $C_4^8$ Oryantasyon Açılı Üç Nokta Eğme Testi

Üretilen  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme üç nokta eğme testi için 4 adet deney test numunesi kullanılmıştır. Yapılan dört ayrı üç nokta eğme testi arasından Şekil 4.4’de gösterildiği gibi mukavemeti en iyi olan 4 nolu test numunesi çıkmıştır.

Test numunesinin eğme dayanımı 739 MPa değerindedir. Yapılan testlerin ortalama mukavemet değeri 641,8 MPa dır. Dolayısıyla bu ortalama değere en yakın sonuç 4 nolu test numunesin de çıkmış olup değerlendirmelerde bu esas dikkate alınacaktır.



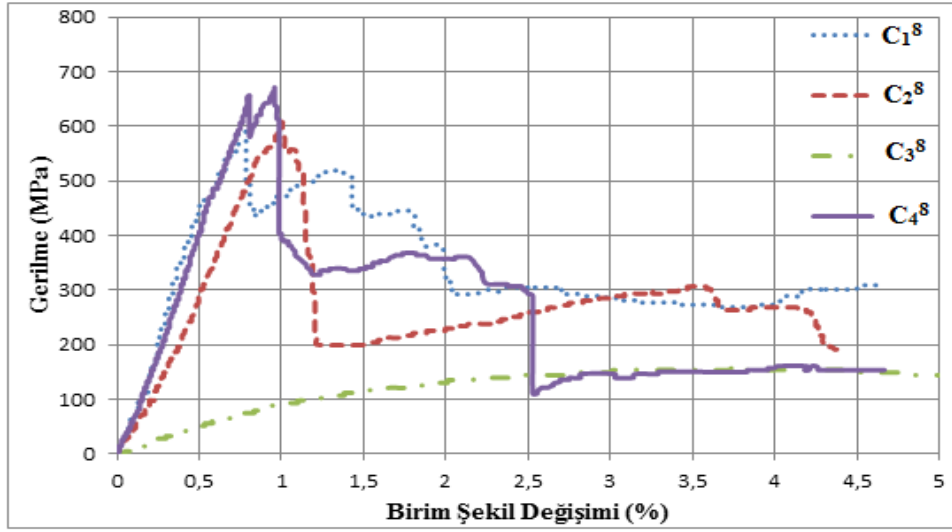
Şekil 4.4  $C_4^8$  oryantasyon açılı numunenin üç nokta eğme test grafiği.

Üretilen  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme üç nokta eğme testi için 4 adet deney test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 4.4’de satır kısmında  $C_2^8$  numunenin sırasıyla kalınlığı, genişliği, numunenin kesit alanı, mesnetler arası mesafe, maksimum gerilme, maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme ve maksimum uzama verilmiştir.

Çizelge 4.4  $C_4^8$  oryantasyon açılı numunenin eğme test değerleri.

| Numune No | Oryantasyon Açısı | a0 (mm) | b0 (mm) | A (mm <sup>2</sup> ) | Lv (mm) | Mak. Gerilme (MPa) | Mak. Kuvvet (N) | Mak. Yer değiştirme (mm) | Mak. Uzama (%) |
|-----------|-------------------|---------|---------|----------------------|---------|--------------------|-----------------|--------------------------|----------------|
| 1 Nolu    | $C_4^8$           | 2       | 10      | 20                   | 60      | 563,2              | 250,3           | 2,46                     | 0,82           |
| 2 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 605,8              | 269,2           | 2,32                     | 0,77           |
| 3 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 659,2              | 293,0           | 2,89                     | 0,96           |
| 4 Nolu    |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 739,0              | 328,4           | 2,83                     | 0,94           |
| Ort.      |                   | 2       | 10      | 20                   | 60      | 641,8              | 285,2           | 2,62                     | 0,87           |

Üç nokta eğme testleri yapılan  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber numunelerin ortalama değerleri Şekil 4.5’de grafik de gösterilmiştir. Üç nokta eğme numuneler arasında en iyi sonuç  $C_4^8$  oryantasyon açısına sahip numune çıkmıştır. Yan darbe giriş üretiminde bu kiriter dikkate alınmıştır.



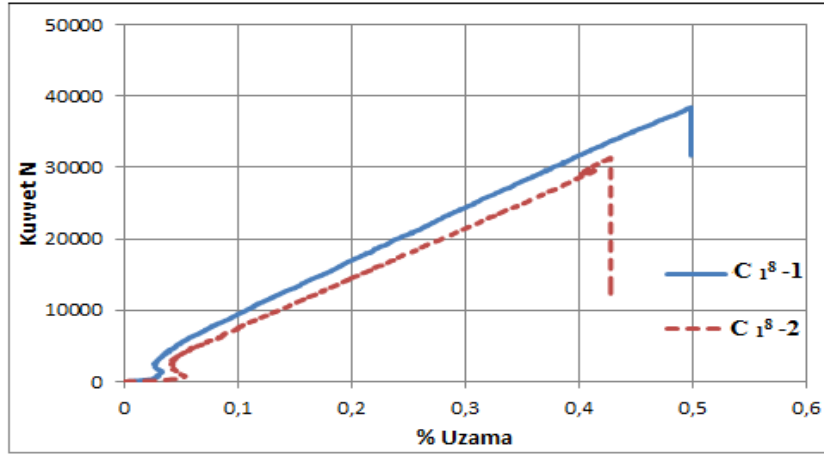
Şekil 4.5 C<sub>1</sub><sup>8</sup>, C<sub>2</sub><sup>8</sup>, C<sub>3</sub><sup>8</sup> ve C<sub>4</sub><sup>8</sup> ortalama numunelerin üç nokta eğme grafiği.

## 4.2 Çekme Testi

Hazırlanan test numunelerinden 2 adet C<sub>1</sub><sup>8</sup>, 3 adet C<sub>4</sub><sup>8</sup>, 2 adet C<sub>2</sub><sup>8</sup> ve 3 adet C<sub>3</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı olmak üzere toplam 10 adet çekme deney numunesi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çekme testinde farklı oryantasyon açılına sahip malzemelerin her biri değerlendirilmiştir. Numunelerin elastite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet, ortalama kuvvet, yüzde uzama ve poisson oranları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda kuvvet – uzama değişim grafikleri oluşturulmuştur.

### 4.2.1 C<sub>1</sub><sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Kuvvet / Uzama Değişimi

Hazırlanan 2 adet C<sub>1</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı karbon fiber malzemelerin çekme testi sonucu oluşan kuvvet/uzama grafiği Şekil 4.6'da gösterilmiştir. 1 nolu test numunesin de maksimum kuvvet 38459 Newton değerindedir. 2 nolu test numunesin de maksimum kuvvet 31359 Newton değerindedir. Yapılan test numunelerinde en yüksek mukavemet değeri 1 numaralı test numunesi çıkmış olup değerlendirmelerde bu esas dikkate alınacaktır.



Şekil 4.6  $C_1^8$  oryantasyon açılı test numunelerin kuvvet/uzama grafikleri

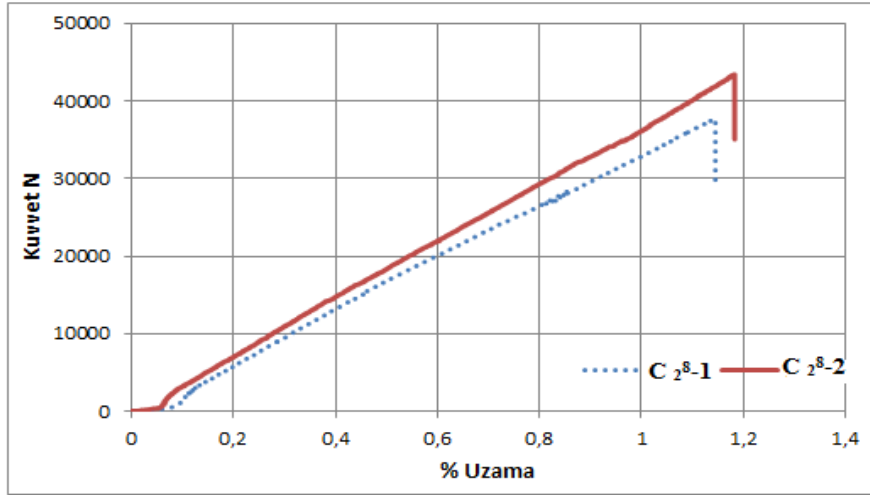
Grafik den elde edilen veriler Çizelge 4.5’de özetlenmiştir. Buna göre ortalama maksimum çekme mukavemeti 34909 N çıkarken ortalama elastisite modülü 157831 MPa ve ortalama yüzde uzamada 0,44 olduğu görülmüştür. Çizelgenin satır kısmında sırasıyla kalınlığı, genişliği, kesit alanı, eksansometre mesafesi, elastite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet ve yüzde uzama verilmiştir. Sütun kısmında ise numune numaralandırılması verilmiştir.

Çizelge 4.5  $C_1^8$  oryantasyon açılı numunenin çekme testi sayısal değerleri.

| No              | a0<br>mm   | b0<br>mm  | S0<br>mm <sup>2</sup> | L0<br>mm      | E-<br>Modülü<br>MPa | Max.<br>Gerilme<br>(MPa) | Max.<br>Kuvvet<br>(N) | Uzama<br>%  |
|-----------------|------------|-----------|-----------------------|---------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|-------------|
| $C_1^8-1$       | 1,9        | 25        | 47,5                  | 100           | 161061              | 809,6                    | 38459                 | 0,48        |
| $C_1^8-2$       | 1,9        | 25        | 47,5                  | 104,78        | 154602              | 660,1                    | 31358                 | 0,41        |
| <b>Ortalama</b> | <b>1,9</b> | <b>25</b> | <b>47,5</b>           | <b>102,39</b> | <b>157831</b>       | <b>734,8</b>             | <b>34909</b>          | <b>0,44</b> |

#### 4.2.2 $C_2^8$ Oryantasyon Açılı Kuvvet / Uzama Değişimi

Hazırlanan 2 adet  $C_2^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzemelerin çekme testi sonucu oluşan kuvvet/uzama değerleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir. 1 nolu test numunesinin maksimum kuvvet 37701.9 Newton değerindedir. 2 nolu test numunesinin maksimum kuvvet 43392 Newton değerindedir. Yapılan test numunelerinde en yüksek mukavemet değeri 2 numaralı test numunesi çıkmış olup değerlendirmelerde bu esas dikkate alınacaktır.



Şekil 4.7  $C_2^8$  yönlenmeli test numunelerin kuvvet/uzama grafiği.

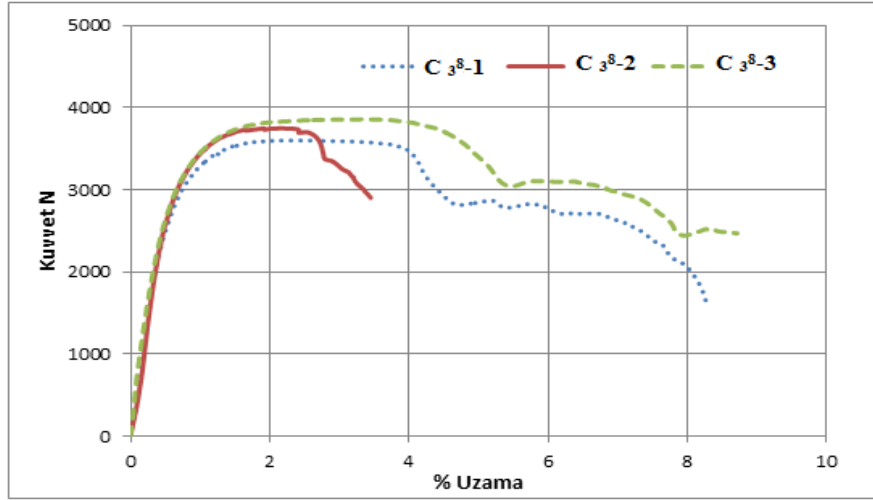
Grafik den elde edilen veriler Çizelge 4.6’da özetlenmiştir. Buna göre ortalama maksimum çekme mukavemeti 40546,9 N çıkarken ortalama elastisite modülü 75613,2 MPa ve ortalama yüzde uzamada 1,16 olduğu görülmüştür. Çizelgenin satır kısmında sırasıyla kalınlığı, genişliği, kesit alanı, eksansometre mesafesi, elastite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet ve yüzde uzama verilmiştir. Sütun kısmında ise numune numaralandırılması verilmiştir.

Çizelge 4.6  $C_2^8$  oryantasyon açılı numunenin çekme testi sayısal değerleri.

| No              | a0         | b0        | S0              | L0            | E-<br>Modülü   | Max.<br>Gerilme | Max.<br>Kuvvet | Uzama       |
|-----------------|------------|-----------|-----------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|-------------|
|                 | mm         | mm        | mm <sup>2</sup> | mm            | MPa            | (MPa)           | (N)            | %           |
| $C_2^8-1$       | 1,9        | 25        | 47,5            | 106,1         | 77636,8        | 793,7           | 37701,9        | 1,07        |
| $C_2^8-2$       | 1,9        | 25        | 47,5            | 94,2          | 73589,6        | 913,5           | 43392,0        | 1,25        |
| <b>Ortalama</b> | <b>1,9</b> | <b>25</b> | <b>47,5</b>     | <b>100,15</b> | <b>75613,2</b> | <b>853,6</b>    | <b>40546,9</b> | <b>1,16</b> |

#### 4.2.3 $C_3^8$ Oryantasyon Açılı Kuvvet / Uzama Değişimi

Hazırlanan 3 adet  $C_3^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzemelerin çekme testi sonucu oluşan kuvvet/uzama değerleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir. 1 nolu test numunesinin maksimum kuvvet 3600 Newton değerindedir. 2 nolu test numunesinin maksimum kuvvet 3747 Newton olup 3 nolu test numunesinin ise maksimum kuvvet 3856 Newton değerindedir. Yapılan test numunelerinde en yüksek mukavemet değeri 3 numaralı test numunesi çıkmış olup değerlendirmelerde bu esas dikkate alınacaktır.



Şekil 4.8  $C_3^8$  yönlenmeli test numunelerin kuvvet/uzama grafiği.

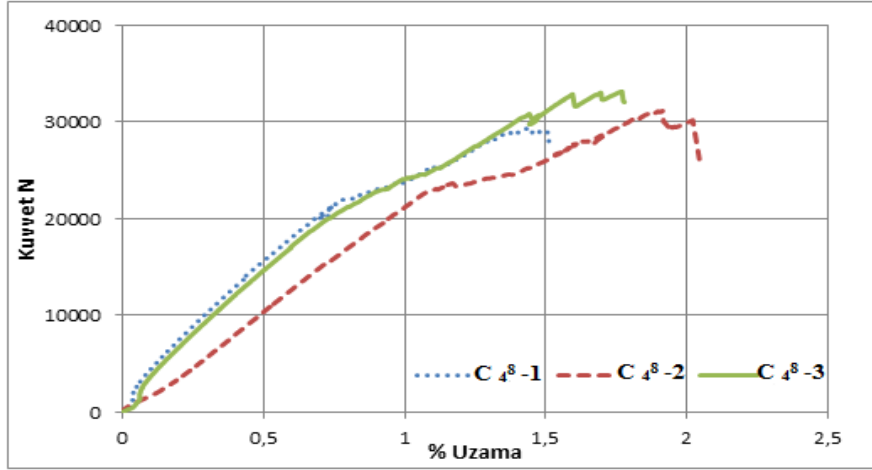
Grafik den elde edilen veriler Çizelge 4.7’de özetlenmiştir. Buna göre ortalama maksimum çekme mukavemeti 3734,8 N çıkarken ortalama elastisite modülü 10009,9 MPa ve ortalama yüzde uzamada 6,53 olduğu görülmüştür. Çizelgenin satır kısmında sırasıyla kalınlığı, genişliği, kesit alanı, eksansometre mesafesi, elastite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet ve yüzde uzama verilmiştir. Sütun kısmında ise numune numaralandırılması verilmiştir.

Çizelge 4.7  $C_3^8$  oryantasyon açılı numunenin çekme testi sayısal değerleri.

| No              | a0         | b0        | S0              | L0            | E-<br>Modülü   | Max.<br>Gerilme | Max.<br>Kuvvet | Uzama       |
|-----------------|------------|-----------|-----------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|-------------|
|                 | mm         | mm        | mm <sup>2</sup> | mm            | MPa            | (MPa)           | (N)            | %           |
| $C_3^8-1$       | 1,9        | 25        | 47,5            | 101,6         | 9484,4         | 75,8            | 3600,5         | 8,1         |
| $C_3^8-2$       | 1,9        | 25        | 47,5            | 104,3         | 10553,9        | 78,8            | 3747,5         | 3,3         |
| $C_3^8-3$       | 1,9        | 25        | 47,5            | 105,1         | 9991,4         | 81,1            | 3856,6         | 8,2         |
| <b>Ortalama</b> | <b>1,9</b> | <b>25</b> | <b>47,5</b>     | <b>103,66</b> | <b>10009,9</b> | <b>78,5</b>     | <b>3734,8</b>  | <b>6,53</b> |

#### 4.2.4 $C_4^8$ Oryantasyon Açılı Kuvvet / Uzama Değişimi

Hazırlanan 3 adet  $C_1^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzemelerin çekme testi sonucu oluşan kuvvet/zaman değerleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. 1 nolu test numunesinin maksimum kuvvet 29410 Newton değerindedir. 2 nolu test numunesinin maksimum kuvvet 31149,7 Newton olup 3 nolu test numunesinin ise maksimum kuvvet 33175,9 Newton değerindedir. Yapılan test numunelerinde en yüksek mukavemet değeri 3 numaralı test numunesi çıkmış olup değerlendirmelerde bu esas dikkate alınacaktır.



Şekil 4.9  $C_4^8$  yönlü test numunelerin kuvvet/uzama grafiği.

Grafik den elde edilen veriler Çizelge 4.8’de özetlenmiştir. Buna göre ortalama maksimum çekme mukavemeti 31245,2 N çıkarken ortalama elastisite modülü 52354,1 MPa ve ortalama yüzde uzamada 1,7 olduğu görülmüştür. Çizelgenin satır kısmında sırasıyla kalınlığı, genişliği, kesit alanı, eksansometre mesafesi, elastite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet ve yüzde uzama verilmiştir. Sütun kısmında ise numune numaralandırılması verilmiştir.

Çizelge 4.8  $C_4^8$  oryantasyon açılı numunenin çekme testi sayısal değerleri.

| No              | a0         | b0        | S0              | L0           | E-Modülü       | Max. Gerilme | Max. Kuvvet    | Uzama      |
|-----------------|------------|-----------|-----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|------------|
|                 | mm         | mm        | mm <sup>2</sup> | mm           | MPa            | (MPa)        | (N)            | %          |
| $C_4^8-1$       | 1,9        | 25        | 47,5            | 100,1        | 59204,8        | 619,2        | 29410          | 1,5        |
| $C_4^8-2$       | 1,9        | 25        | 47,5            | 104,5        | 50582,2        | 655,7        | 31149,7        | 1,9        |
| $C_4^8-3$       | 1,9        | 25        | 47,5            | 106,0        | 47275,5        | 698,4        | 33175,9        | 1,7        |
| <b>Ortalama</b> | <b>1,9</b> | <b>25</b> | <b>47,5</b>     | <b>103,5</b> | <b>52354,1</b> | <b>657,7</b> | <b>31245,2</b> | <b>1,7</b> |

Çekme testleri yapılan  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber numunelerin her birinin ortalama değerleri hesaplanmıştır. Numuneler arasında en iyi sonuç  $C_2^8$  oryantasyon açılı karbon fiber çıkmış olup bu yönlendirmeye en yakın sonuç ise  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber numune çıkmıştır. Yan darbe kiriş üretiminde bu kiriter dikkate alınmıştır. Çekme testlerinde poisson oranları da hesaplanmıştır. Farklı oryantasyon açılı karbon fiber numunelerin poisson oranları ve ortalama değerleri Çizelge 4.9’ da verilmiştir.

**Çizelge 4.9** Farklı oryantasyon açılara sahip numunelerin poisson değerleri.

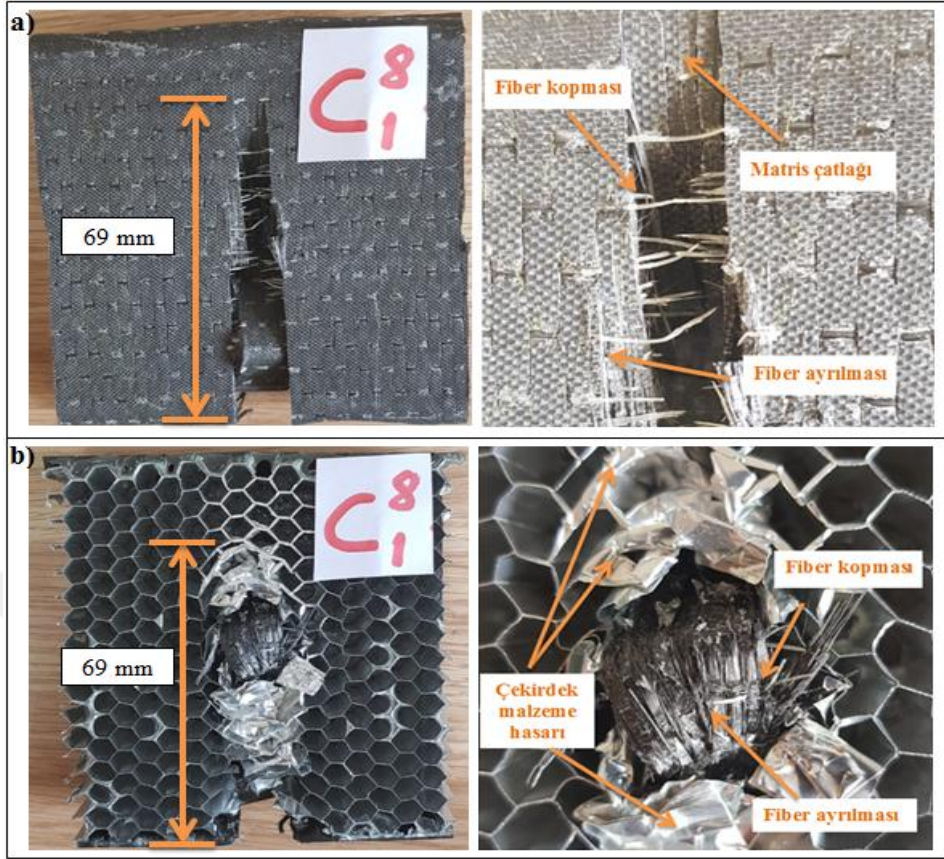
|                 | $C_1^8-1$     | $C_1^8-2$ | $C_2^8-1$     | $C_2^8-2$ | $C_3^8-1$     | $C_3^8-2$ | $C_4^8-1$     | $C_4^8-2$ |
|-----------------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|
| <b>Poisson</b>  | 0,3029        | 0,3581    | 0,4156        | 0,4605    | 0,5432        | 0,6190    | 0,2510        | 0,3367    |
| <b>Oranı</b>    |               |           |               |           |               |           |               |           |
| <b>Ortalama</b> | <b>0,3305</b> |           | <b>0,4380</b> |           | <b>0,5811</b> |           | <b>0,2938</b> |           |

### **4.3 Alüminyum Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzemelere Darbe Testi Uygulaması**

Darbe deneyleri için Al petek yapılı 8 tabakalı karbon fiber/epoksi kompozit numuneler 4 farklı oryantasyon açılara ayrılmıştır. Her oryantasyon açısı için 80 J darbe enerjisi değeri altında darbe testi uygulanarak fiber takviye açılarının darbe davranışı üzerinde etkileri incelenmiştir. Darbe testleri Fractovis Plus darbe test cihazında yapılmış olup numune ölçüleri 10 cm x 10 cm x 5 cm standardını dikkate alınarak hazırlanmıştır. Hazırlanan 12 adet test numuneleri için Fractovis Plus cihazında her biri için darbe test uygulanmıştır.

#### **4.3.1 $C_1^8$ Oryantasyonlu Numunenin Darbe Testi**

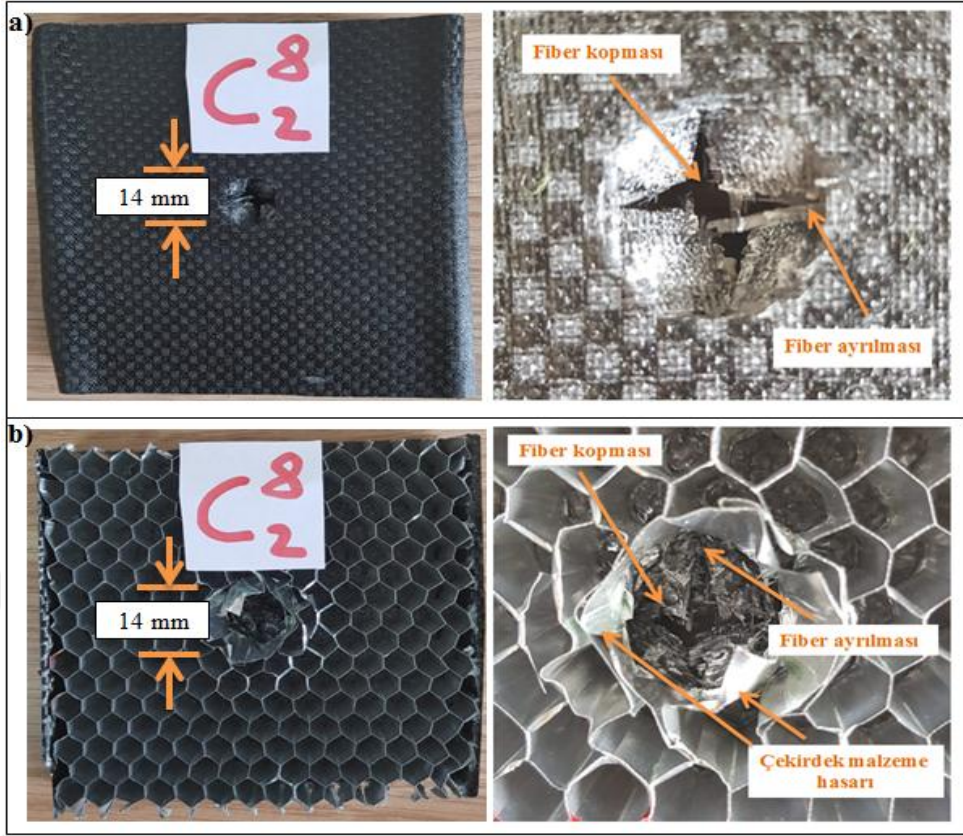
İlk olarak üretimi yapılan  $C_1^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemenin darbe testi yapılmıştır. Grup için üç ayrı test denenmiştir. Yapılan testler sonucunda  $C_1^8$  numunenin ortalama absorbe ettiği enerji 46,6 Joule olarak hesaplanmıştır. 80 Joule enerji altında üst yüzeyde fiber ayrılması, fiber kopması ve matris çatlağı görülürken, alt yüzeyde ise fiber ayrılması, fiber kopması ve Al çekirdek malzemenin hasarı görülmektedir. Sabit enerji seviyesinde oluşan üst ve alt yüzeylerdeki hasar bölgesinin genişliği 69 mm dir. Darbe test sonucu numunenin üst ve alt yüzeylerde oluşan deformasyon Resim 4.1’de gösterilmiştir.



**Resim 4.1** Al petek yapılı  $C_1^8$  oryantasyonlu tabakalı karbon fiber malzemede darbe sonucu a) Üst yüzey b) Alt yüzeyde oluşan deformasyon.

#### 4.3.2 $C_2^8$ Oryantasyonlu Numunenin Darbe Testi

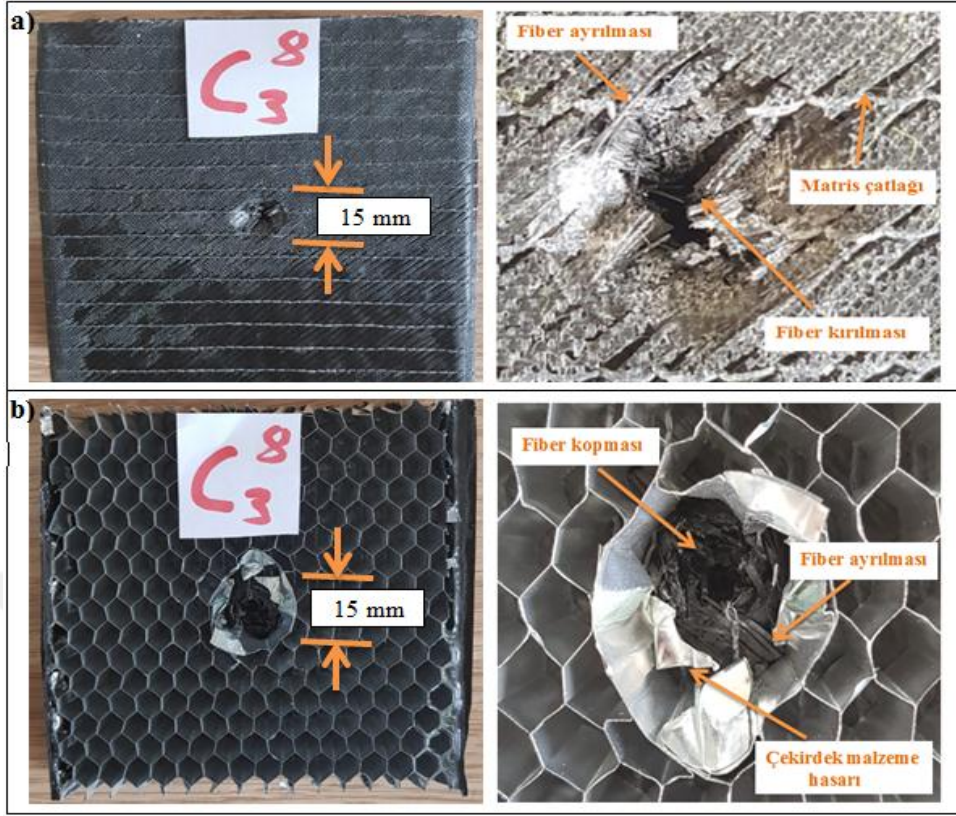
İkinci olarak üretimi yapılan  $C_2^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemenin darbe testi yapılmıştır. Grup için üç ayrı test denenmiştir. Yapılan testler sonucunda  $C_2^8$  numunenin ortalama absorbe ettiği enerji 26,1 joule olarak hesaplanmıştır. 80 Joule enerji altında üst yüzeyde ayrılması ve fiber kopması görülürken, alt yüzeyde ise fiber ayrılması, fiber kopması ve Al çekirdek malzemenin hasarı görülmektedir. Sabit enerji seviyesinde oluşan üst ve alt yüzeylerdeki hasar bölgesinin genişliği 14 mm dir. Darbe test sonucu numunenin üst ve alt yüzeylerde oluşan deformasyon Resim 4.2’de gösterilmiştir.



**Resim 4.2** Al petek yapılı  $C_2^8$  oryantasyonlu karbon fiber malzemede darbe sonucu **a)** Üst yüzey **b)** Alt yüzeyde oluşan deformasyon.

#### 4.3.3 $C_3^8$ Oryantasyonlu Numunenin Darbe Testi

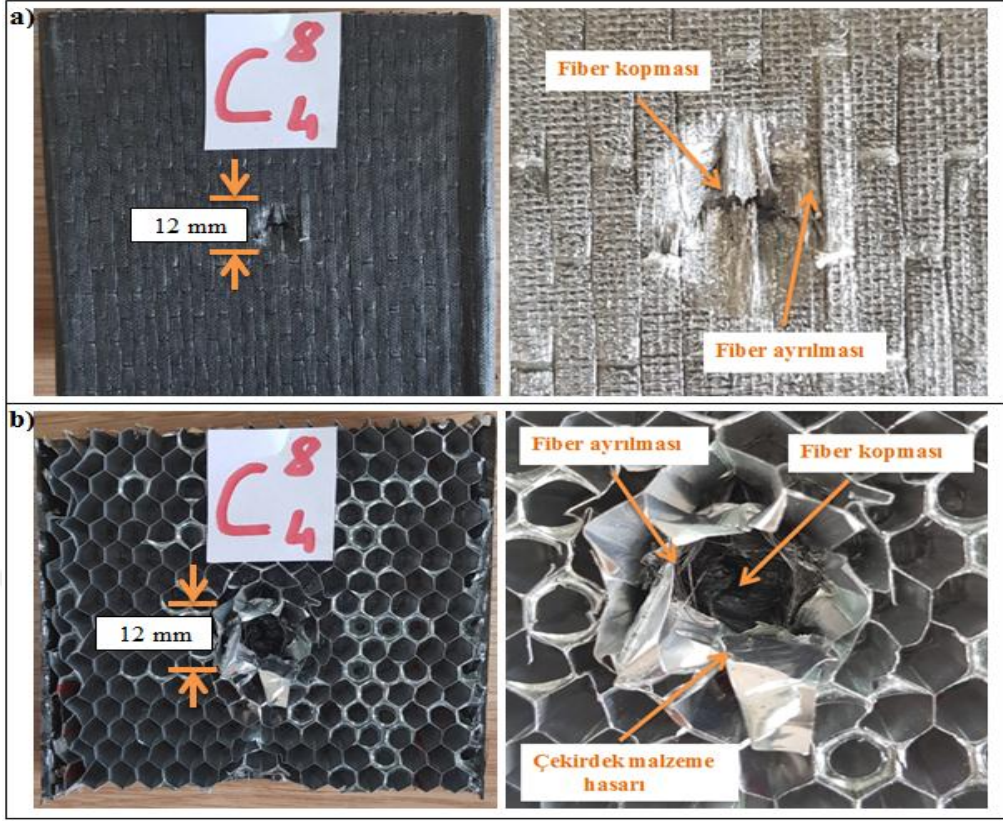
Üçüncü olarak üretimi yapılan  $C_3^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemenin darbe testi yapılmıştır. Grup için üç ayrı test denenmiştir. Yapılan testler sonucunda  $C_3^8$  numunenin ortalama absorbe ettiği enerji 24 Joule olarak hesaplanmıştır. 80 Joule enerji altında üst yüzeyde fiber ayrılması, fiber kopması ve matris çatlağı görülürken, alt yüzeyde ise fiber ayrılması, fiber kopması ve Al çekirdek malzemenin hasarı görülmektedir. Sabit enerji seviyesinde oluşan üst ve alt yüzeylerdeki hasar bölgesinin genişliği 15 mm dir. Darbe test sonucu numunenin üst ve alt yüzeylerde oluşan deformasyon Resim 4.3’de gösterilmiştir.



**Resim 4.3** Al petek yapılı  $C_3^8$  oryantasyonlu tabakalı karbon fiber malzemede darbe sonucu a) Üst yüzey b) Alt yüzeyde oluşan deformasyon.

#### 4.3.4 $C_4^8$ Oryantasyonlu Numunenin Darbe Testi

Üretimi yapılan  $C_4^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemenin darbe testi yapılmıştır. Grup için üç ayrı test denenmiştir. Yapılan testler sonucunda  $C_4^8$  numunenin ortalama absorbe ettiği enerji 40 Joule olarak hesaplanmıştır. 80 Joule enerji altında üst yüzeyde ayrılması ve fiber kopması görülürken, alt yüzeyde ise fiber ayrılması, fiber kopması ve Al çekirdek malzemenin hasarı görülmektedir. Sabit enerji seviyesinde oluşan üst ve alt yüzeylerdeki hasar bölgesinin genişliği 12 mm dir. Darbe test sonucu numunenin üst ve alt yüzeylerde oluşan deformasyon Resim 4.4’de gösterilmiştir.



**Resim 4.4** Al petek yapılı  $C_4^8$  oryantasyonlu tabakalı karbon fiber malzemede darbe sonucu a) Üst yüzey b) Alt yüzeyde oluşan deformasyon.

Üretilen numuların darbe testlerinden alınan veriler ile kuvvet-çökme (Şekil 4.14), absorbe edilen enerji-zaman (Şekil 4.20), hız-zaman (Şekil 4.25) ve çökme-zaman (Şekil 4.26)' da ortalama eğrileri oluşturularak grafikleri çizilmiştir.

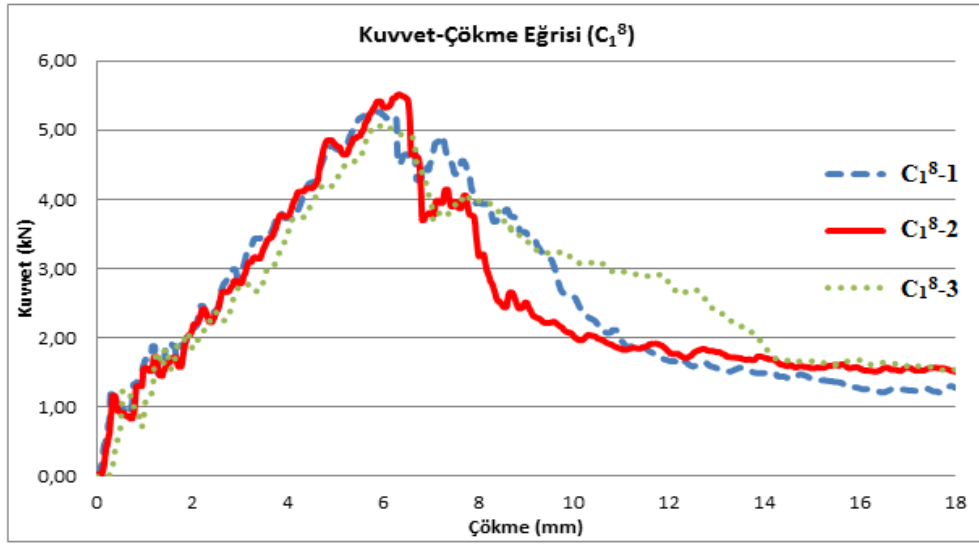
#### 4.3.5 Alüminyum Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzemeye ait Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrileri

Kuvvet-çökme (yer değiştirme) (F-d) eğrileri darbe olayı esnasında kompozit malzemeye ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir tanesidir. Bu eğri grafiği darbe enerjisi altında kuvvetin çökmeye karşı değişimini göstermektedir.

##### 4.3.5.1 $C_1^8$ Oryantasyon Numunenin Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrisi

$C_1^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemeye ait sabit darbe enerjisi altında, kuvvetin çökmeye karşı değişimini gösteren F-d grafiği

Şekil 4.10'da görülmektedir. Darbe enerjisi altında numunelerde delinme meydana gelmesinden dolayı açık eğri oluşmuştur. Eğrinin açık olması numunelerin hasara uğradığının göstergesidir. Numunenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, delaminasyonlar ve delinme meydana gelirken, alt yüzeyinde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları ve delinme meydana gelmiştir. Kuvvet çökme eğrinin uç kısmında yatay ekseninin sonuna doğru giden kısım ise vurucu uç ile numune arasında sürtünme oluşmasından dolayı meydana gelen sürtünme kısmını ifade etmektedir.



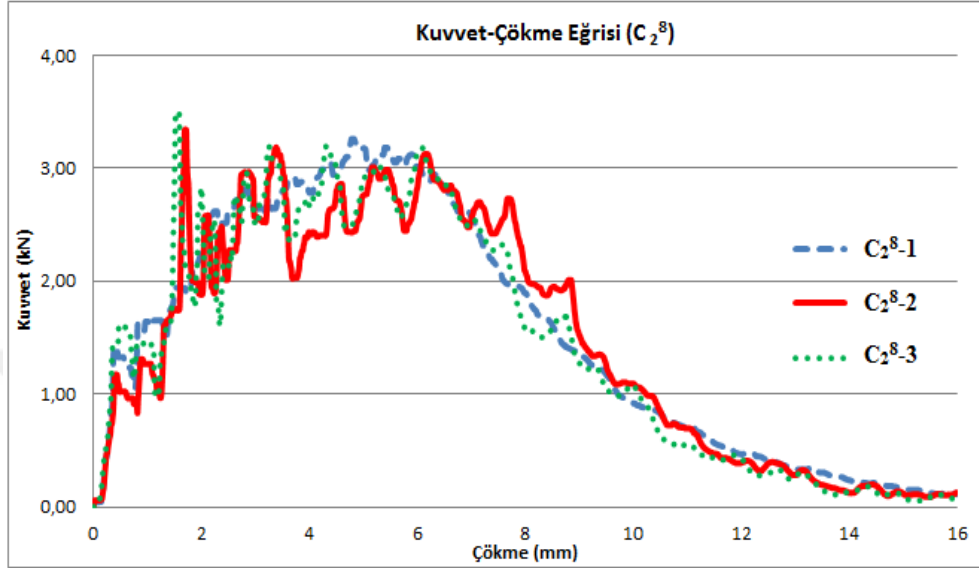
Şekil 4.10  $C_1^8$  oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin F-d eğrisi.

$C_1^8$ -1 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 5264 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 5,89 mm dir.  $C_1^8$ -2 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 5513 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 6,32 mm dir.  $C_1^8$ -3 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 5068 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 5,85 mm dir. Üç numunenin ortalama maksimum kırılma kuvveti 5582 Newton, ortalama maksimum deformasyon ise 6,02 mm olarak belirlenmiştir.

#### 4.3.5.2 $C_2^8$ Oryantasyon Numunenin Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrisi

$C_2^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemeye ait sabit darbe enerjisi altında, kuvvetin çökmeye karşı değişimini gösteren F-d grafiği Şekil 4.11'de görülmektedir. Darbe enerjisi altında numunelerde delinme meydana gelmesinden dolayı açık eğri oluşmuştur. Eğrinin açık olması numunelerin hasara uğradığının göstergesidir. Numunenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, delaminasyonlar

ve delinme meydana gelirken, alt yüzeyinde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları ve delinme meydana gelmiştir. Kuvvet çökme eğrinin uç kısmında yatay ekseninin sonuna doğru giden kısım ise vurucu ile numune arasında sürtünme oluşmasından dolayı meydana gelen sürtünme kısmını ifade etmektedir.



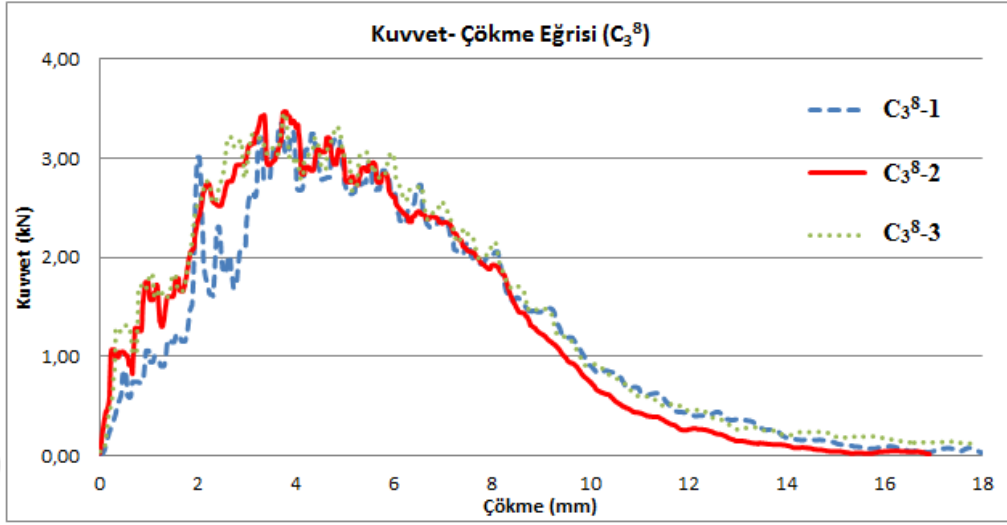
Şekil 4.11 C<sub>2</sub><sup>8</sup> oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin F-d eğrisi.

C<sub>2</sub><sup>8</sup>-1 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 3260 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 4,76 mm dir. C<sub>2</sub><sup>8</sup>-2 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 3342 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 1,67 mm dir. C<sub>2</sub><sup>8</sup>-3 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 3500 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 1,52 mm dir. Üç numunenin ortalama maksimum kırılma kuvveti 3367 Newton, ortalama maksimum deformasyon ise 2,65 mm olarak belirlenmiştir.

#### 4.3.5.3 C<sub>3</sub><sup>8</sup> Oryantasyon Numunenin Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrisi

C<sub>3</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı karbon Al petek yapılı tabakalı fiber kompozit malzemeye ait sabit darbe enerjisi altında, kuvvetin çökmeye karşı değişimini gösteren F-d grafiği Şekil 4.12'de görülmektedir. Darbe enerjisi altında numunelerde delinme meydana gelmesinden dolayı açık eğri oluşmuştur. Eğrinin açık olması numunelerin hasara uğradığının göstergesidir. Numunenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, delaminasyonlar ve delinme meydana gelirken, alt yüzeyinde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları ve delinme meydana gelmiştir. Kuvvet çökme eğrinin uç kısmında yatay ekseninin sonuna

doğru giden kısım ise vurucu ile numune arasında sürtünme oluşmasından dolayı meydana gelen sürtünme kısmını ifade etmektedir.

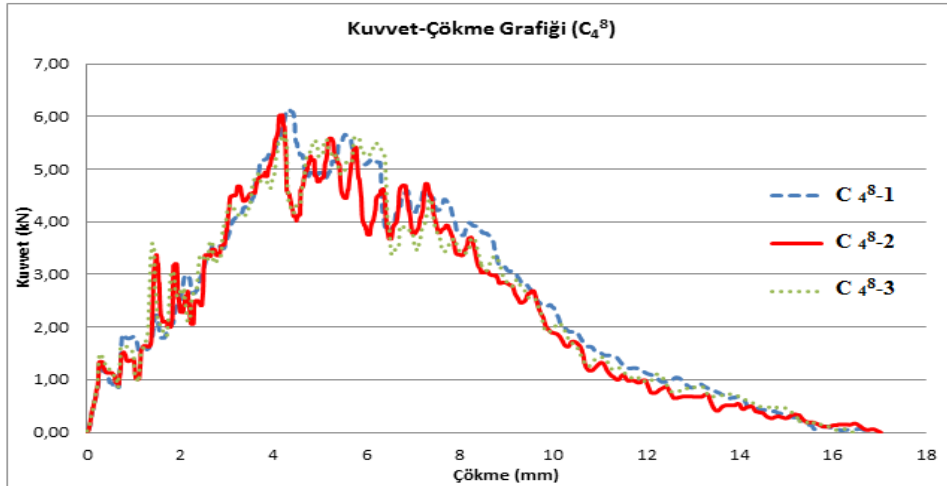


Şekil 4.12 C<sub>3</sub><sup>8</sup> oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin F-d eğrisi.

C<sub>3</sub><sup>8</sup>-1 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 3353 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 3,65 mm dir. C<sub>3</sub><sup>8</sup>-2 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 3472 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 3,86 mm dir. C<sub>3</sub><sup>8</sup>-3 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 3452 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 3,73 mm dir. Üç numunenin ortalama maksimum kırılma kuvveti 3425 Newton, ortalama maksimum deformasyon ise 3,74 mm olarak belirlenmiştir.

#### 4.3.5.4 C<sub>4</sub><sup>8</sup> Oryantasyon Numunenin Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrisi

C<sub>4</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemeye ait sabit darbe enerjisi altında, kuvvetin çökmeye karşı değişimini gösteren F-d grafiği Şekil 4.13'de görülmektedir. Darbe enerjisi altında numunelerde delinme meydana gelmesinden dolayı açık eğri oluşmuştur. Eğrinin açık olması numunelerin hasara uğradığının göstergesidir. Numunenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, delaminasyonlar ve delinme meydana gelirken, alt yüzeyinde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları ve delinme meydana gelmiştir. Kuvvet çökme eğrinin uç kısmında yatay ekseninin sonuna doğru giden kısım ise vurucu ile numune arasında sürtünme oluşmasından dolayı meydana gelen sürtünme kısmını ifade etmektedir.



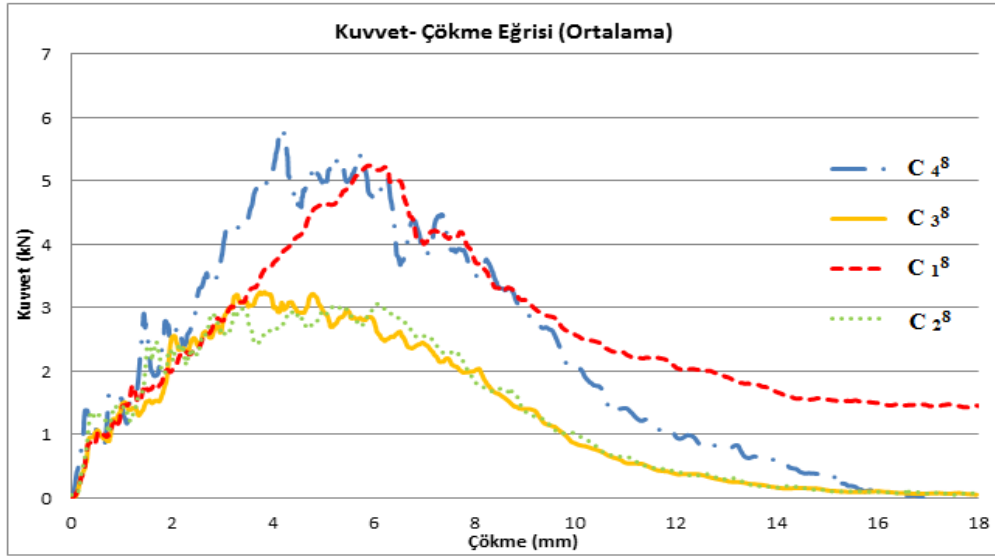
**Şekil 4.13**  $C_4^8$  oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin F-d eğrisi.

$C_4^8$ -1 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 6131 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 4,29 mm dir.  $C_4^8$ -2 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 6029 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 4,17 mm dir.  $C_4^8$ -3 numesine uygulanan maksimum kırılma kuvveti 5690 Newton, oluşan maksimum deformasyon ise 4,23 mm dir. Üç numunenin ortalama maksimum kırılma kuvveti 5950 Newton, ortalama maksimum deformasyon ise 4,23 mm olarak belirlenmiştir.

#### 4.3.5.5 Numunelere Ait Ortalama Kuvvet-Çökme (F-d) Eğrileri

$C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyonlu karbon fiber kompozit malzemeye uygulanacak darbeye karşı dayanımına karar verebilmek için yapılan darbe testinde dört farklı yönlendirme açısının testi yapılmıştır. Testlerden elde edilen sonuçların ortalama değerleri Şekil 4.14’de gösterildiği gibi bir F-d eğri grafiği oluşturulmuştur. Darbe enerjisi altında dört farklı oryantasyon açısına sahip Al petek yapıları tabakalı karbon fiber malzemelerin her birinde delinme meydana gelmiştir. Aynı darbe davranışı sergilemelerinden dolayı her bir numunede açık eğri oluşmuş ve yatay ekseninin sonuna doğru giden kısımdan dolayı da sürtünme meydana gelmiştir. Oluşturulan tabaka kalınlığı azaldıkça çökme değerinin artacağı ve tabaka kalınlığı artıkça da çökme değerinin azalacağı görülmektedir. Bu sonuçlar da literatürle uyum içindedir. Naik ve arkadaşları düşük darbe hızlarında maruz kalan polimer kompozitlerin darbe davranışı tabaka kalınlığının etkisini incelemişlerdir ( Naik vd. 2000). Darbe sırasında vurucunun numuneye temasıyla numunede yer değiştirme (çökme) başlamış ve kuvvet en büyük

değerine ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Kuvvet en büyük değerine ulaştığında yer değiştirme miktarı da en büyük değerine ulaşmaktadır.



Şekil 4.14  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  ortalama F-d eğrisi.

Oluşturulan F-d eğrisi incelendiği zaman tüm tabaka dizilimleri arasından 80 joule darbe enerji değeri için  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$  tabaka dizilimine sahip  $C_4^8$  grubu numunesinin diğer gruplara kıyasla daha fazla maksimum kuvvet taşıdığı görülmektedir. Çizelge 4.10'da ortalama kuvvet-çökme grafiğinden alınan veriler sırasıyla darbe enerjisi, maksimum çökme, çarpma hızı, maksimum kuvvet ve temas süresi özetlenmiştir.

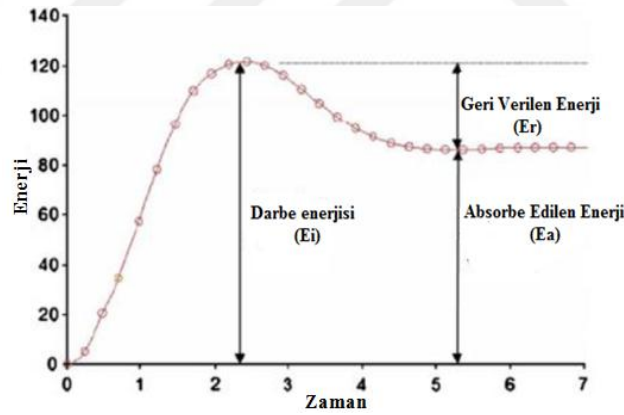
Çizelge 4.10  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  numunelerine ait ortalama değerler.

| Malzeme Tipi | Darbe Enerjisi (J) | Maksimum çökme (mm) | Başlangıç Hızı (m/s) | Maksimum Temas Kuvvet (N) | Temas Süresi (ms) |
|--------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------------|-------------------|
| $C_1^8$      | 80                 | 6,02                | 5,65                 | 5281,8                    | 1,11              |
| $C_2^8$      |                    | 2,65                | 5,65                 | 3367,5                    | 0,48              |
| $C_3^8$      |                    | 3,74                | 5,65                 | 3426,1                    | 0,67              |
| $C_4^8$      |                    | 4,23                | 5,65                 | 5949,9                    | 0,77              |

#### 4.3.6 Alüminyum Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzemeye ait Absorbe Edilen Enerji-Zaman (Ea-t Eğrileri)

Absorbe edilen enerji-zaman (Ea-t) eğrileri darbe olayı esnasında kompozit malzemeye ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir tanesidir. Düşük hızlı darbe

deneylerinde vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda vurucunun sahip olduğu enerjinin hepsi numune tarafından absorbe edilemez ve darbe enerjisi de vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi için harcanır. Vurucunun numuneye saplanması halinde ise vurucunun darbe enerjisinin tamamı numune tarafından emilir. Delip geçmesi halinde ise numune ile vurucu arasındaki sürtünme kısmının altında kalan alanında darbe test cihazının programı tarafından hesaplanan emilen enerji miktarına katılmasından dolayı eğrinin yukarıya doğru yönlendiği görülür. Darbe olayının sonunda vurucudan kompozit numuneye geçen enerji miktarı, kompozit numuneye en fazla hasarı veren enerjiye kadar artar. Şekil 4.15’de görüldüğü üzere her bir eğri önce artmakta daha sonra ulaştığı maksimum değerden düşüyor ve ardından sabit bir değerde yatay bir yol izliyor. Ulaşılan maksimum nokta darbe enerjisini ( $E_i$ ) vermektedir. Yatayda ulaştığı sabit nokta ise absorbe edilen enerjiyi ( $E_a$ ) göstermektedir. İkisi arasındaki fark ise geri verilen enerji ( $E_r$ ) göstermektedir. (Akgün 2010). Her bir numune üzerine 1,65 mm yükseklikten 5,65 m/s hızla ve 80 joule yük uygulanmış olup absorbe edilen enerjileri ve temas zamanları hesaplanmış değerler grafiklerde gösterilmiştir.

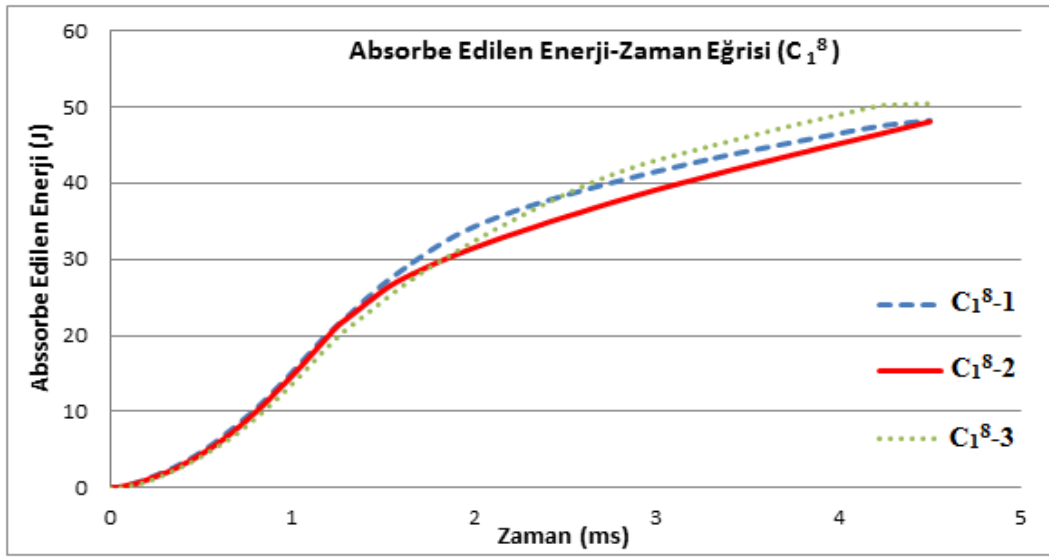


Şekil 4.15 Enerji-zaman grafiği (Tan ve Akil, 2012).

#### 4.3.6.1 $C_1^8$ Oryantasyon Açılı Numunenin Absorbe Edilen Enerji-Zaman ( $E_a-t$ ) Eğrisi

$C_1^8$  oryantasyon açılı Al petek yapıları tabakalı karbon fiber kompozit malzemeye ait darbe enerjisi altında, ortalama enerji-zaman değişimini gösteren  $E_a-t$  grafiği Şekil 4.16’da görülmektedir. Numune üzerine 80 joule yük uygulanmış olup absorbe edilen enerji hesaplanmış ve değerler grafikte gösterilmiştir. Enerji seviyesinde delip geçme

olarak isimlendirilen davranış meydana gelmiş ve Resim 4.1’de darbe sonrası alt ve üst mikro fotoğraflarında görüldüğü gibi üst levha ve Alüminyum çekirdek malzemesi tamamen hasar görmüştür. Delip geçme durumunda vurucu uç numuneye çarptıktan sonra sahip olunan enerjinin tamamını absorbe edemediği için yani darbe enerjisi sönmölenen enerjiden fazla olmasından dolayı numuneyi delerek hareketine devam etmiştir. Bu hareketinde numune ile vurucu arasındaki sürtünme kısmın altında kalan alanında darbe test cihazının programı tarafından hesaplanan emilen enerji miktarına katılmasından dolayı eğrinin yukarıya doğru yönlendiği de görölmektedir.



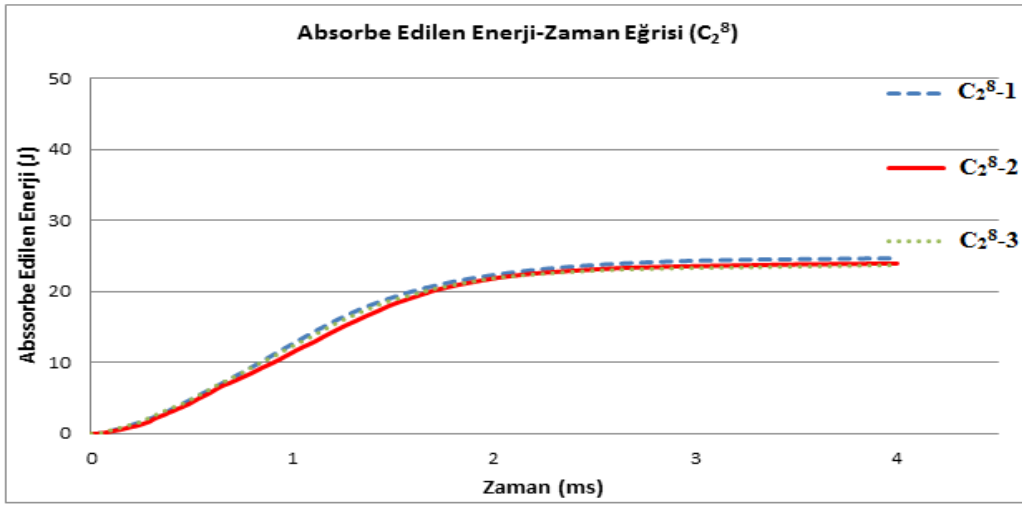
Şekil 4.16 C<sub>1</sub><sup>8</sup> oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin Ea-t eğrisi.

C<sub>1</sub><sup>8</sup>-1 numunesinin toplam absorbe edilen enerji 47J dır. Numunenin 5264 N’luk maksimum kuvveti 1,09 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. C<sub>1</sub><sup>8</sup>-2 numunesine ait absorbe edilen enerji 42J’dür. Numunenin 5513 N’luk maksimum kuvveti 1,17 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. C<sub>1</sub><sup>8</sup>-3 numunesine ait absorbe edilen enerji 51J’dür. Numunenin 5068 N’luk maksimum kuvveti 1,07 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. Üç numunenin ortalama absorbe edilen enerjisi 46,6 Joule ve ortalama 5282 N’luk kuvvet değeriinde ortalama temas zamanı ise 1,11 ms olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.6.2 C<sub>2</sub><sup>8</sup> Oryantasyon Numunenin Absorbe Edilen Enerji-Zaman (Ea-t) Eğrisi

C<sub>2</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemeye ait darbe enerjisi altında, ortalama enerji-zaman değişimini gösteren Ea-t grafiği Şekil

4.17’de görülmektedir. Numune üzerine 80 joule yük uygulanmış olup absorbe edilen enerji hesaplanmış ve değerler grafikde gösterilmiştir. Enerji seviyesinde delip geçme olarak isimlendirilen davranış meydana gelmiş ve Resim 4.2’de darbe sonrası alt ve üst mikro fotoğraflarında görüldüğü gibi üst levha ve Alüminyum çekirdek malzemesi tamamen hasar görmüştür. Delip geçme durumunda vurucu uç numuneye çarptıktan sonra sahip olunan enerjinin tamamını absorbe edemediği için yani darbe enerjisi sönmölenen enerjiden fazla olmasından dolayı numuneyi delerek hareketine devam etmiştir. Bu nedenle enerji-zaman grafiğinde eğri yutulan maksimum enerjiyi gösterip ve sonrada sabit kalmıştır.



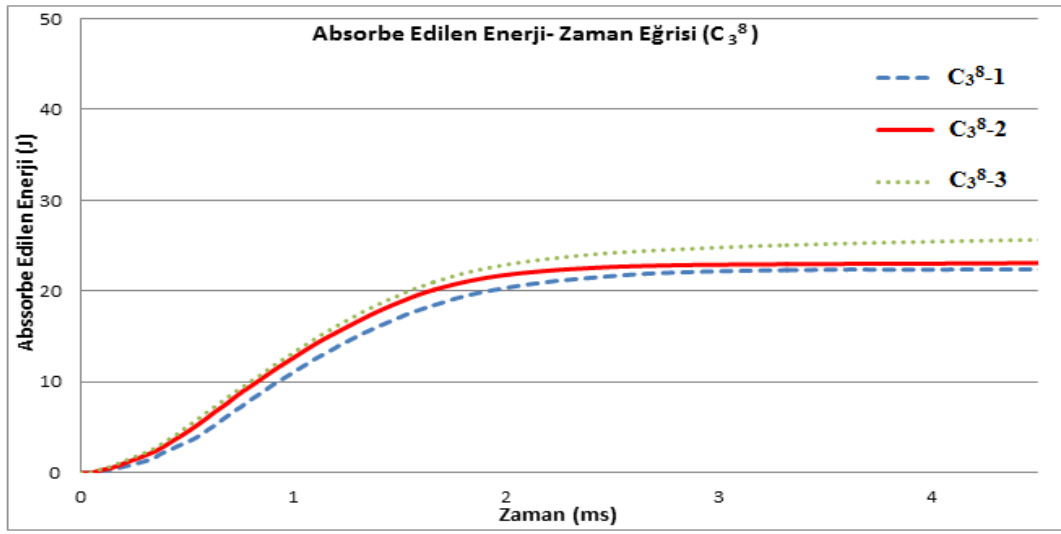
Şekil 4.17 C<sub>2</sub><sup>8</sup> oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin Ea-t eğrisi.

C<sub>2</sub><sup>8</sup>-1 numunesinin toplam absorbe edilen enerji 26,5J’dür. Numunenin 3260 N’luk maksimum kuvveti 0,87 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. C<sub>2</sub><sup>8</sup>-2 numunesine ait absorbe edilen enerji 26J’dür. Numunenin 3342 N’luk maksimum kuvveti 0,30 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. C<sub>3</sub><sup>8</sup>-3 numunesine ait absorbe edilen enerji 25,8J’dür. Numunenin 3500 N’luk maksimum kuvveti 0,27 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. Üç numunenin ortalama absorbe edilen enerjisi 26,1 Joule ve ortalama 3367 N’luk kuvvet değerinde ortalama temas zamanı ise 0,48 ms olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.6.3 C<sub>3</sub><sup>8</sup> Oryantasyon Numunenin Absorbe Edilen Enerji-Zaman (Ea-t) Eğrisi

C<sub>3</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemeye ait darbe enerjisi altında, ortalama enerji-zaman değişimini gösteren Ea-t grafiği Şekil

4.18' de görülmektedir. Numune üzerine 80 joule yük uygulanmış olup absorbe edilen enerji hesaplanmış ve değerler grafikde gösterilmiştir. Enerji seviyesinde delip geçme olarak isimlendirilen davranış meydana gelmiş ve Resim 4.3'de darbe sonrası alt ve üst mikro fotoğraflarında görüldüğü gibi üst levha ve Alüminyum çekirdek malzemesi tamamen hasar görmüştür. Delip geçme durumunda vurucu uç numuneye çarptıktan sonra sahip olunan enerjinin tamamını absorbe edemediği için yani darbe enerjisi sönmölenen enerjiden fazla olmasından dolayı numuneyi delerek hareketine devam etmiştir. Bu nedenle enerji-zaman grafiğinde eğri yutulan maksimum enerjiyi gösterip ve sonrada sabit kalmıştır.



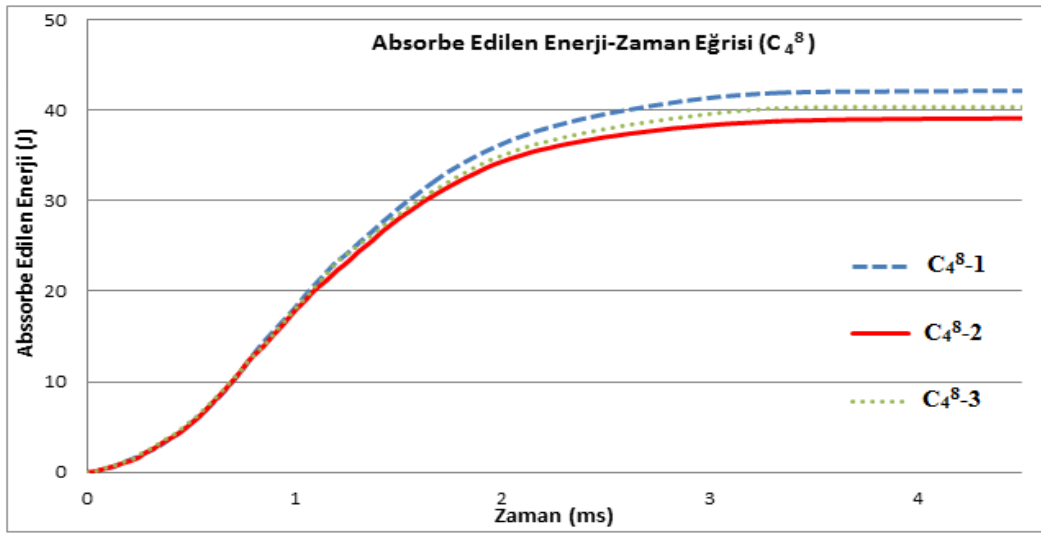
Şekil 4.18 C<sub>3</sub><sup>8</sup> oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin Ea-t eğrisi.

C<sub>3</sub><sup>8</sup>-1 numunesinin toplam absorbe edilen enerji 22J'dür. Numunenin 3353 N'luk maksimum kuvveti 0,65 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. C<sub>3</sub><sup>8</sup>-2 numunesine ait absorbe edilen enerji 22J'dür. Numunenin 3472 N'luk maksimum kuvveti 0,69 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. C<sub>3</sub><sup>8</sup>-3 numunesine ait absorbe edilen enerji 27J'dür. Numunenin 3452 N'luk maksimum kuvveti 0,67 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. Üç numunenin ortalama absorbe edilen enerjisi 24 Joule ve ortalama 3425 N'luk kuvvet değerinde ortalama temas zamanı ise 0,67 ms olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.6.4 C<sub>4</sub><sup>8</sup> Oryantasyon Numunenin Absorbe Edilen Enerji-Zaman (Ea-t) Eğrisi

C<sub>4</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemeye ait darbe enerjisi altında, ortalama enerji-zaman değişimini gösteren Ea-t grafiği Şekil

4.19’da görülmektedir. Numune üzerine 80 joule yük uygulanmış olup absorbe edilen enerji hesaplanmış ve değerler grafikde gösterilmiştir. Enerji seviyesinde delip geçme olarak isimlendirilen davranış meydana gelmiş ve Resim 4.4’de darbe sonrası alt ve üst mikro fotoğraflarında görüldüğü gibi üst levha ve Alüminyum çekirdek malzemesi tamamen hasar görmüştür. Delip geçme durumunda vurucu uç numuneye çarptıktan sonra sahip olunan enerjinin tamamını absorbe edemediği için yani darbe enerjisi sönmölenen enerjiden fazla olmasından dolayı numuneyi delerek hareketine devam etmiştir. Bu nedenle enerji-zaman grafiğinde eğri yutulan maksimum enerjiyi gösterip ve sonrada sabit kalmıştır.



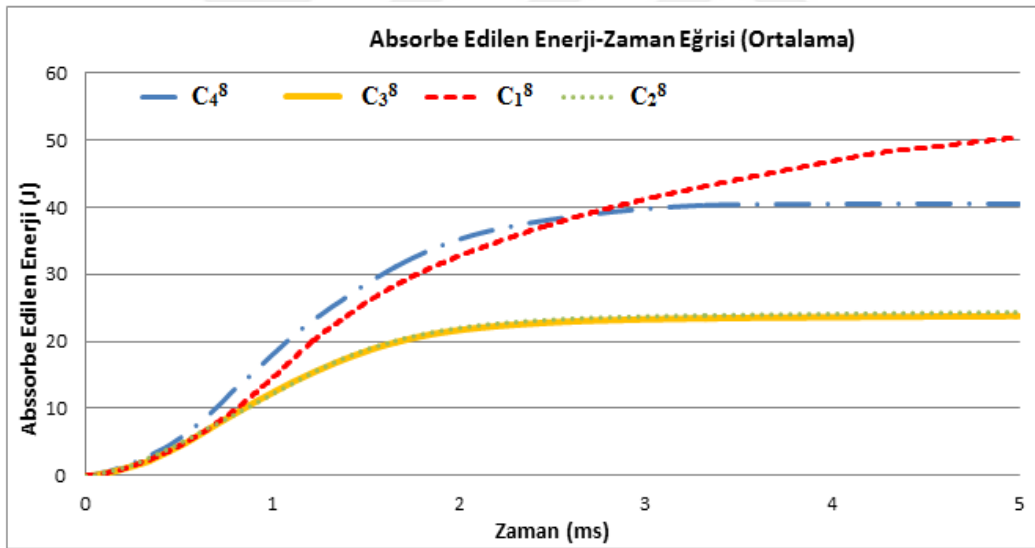
Şekil 4.19 C<sub>4</sub><sup>8</sup> oryantasyon tabakalı karbon fiber malzemenin Ea-t eğrisi.

C<sub>4</sub><sup>8</sup>-1 numunesinin toplam absorbe edilen enerji 42J’dür. Numunenin 6131 N’luk maksimum kuvveti 0,78 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. C<sub>3</sub><sup>8</sup>-2 numunesine ait absorbe edilen enerji 38J’dür. Numunenin 6029 N’luk maksimum kuvveti 0,76 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. C<sub>3</sub><sup>8</sup>-3 numunesine ait absorbe edilen enerji 40J’dür. Numunenin 5690 N’luk maksimum kuvveti 0,77 ms temas zamanında gerçekleşmiştir. Üç numunenin ortalama absorbe edilen enerjisi 40 Joule ve ortalama 5950 N’luk kuvvet değerinde ortalama temas zamanı ise 0,77 ms olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.6.5 Malzemelere Ait Ortalama Absorbe Edilen Enerji-Zaman (Ea-t) Eğrisi

C<sub>1</sub><sup>8</sup>, C<sub>2</sub><sup>8</sup>, C<sub>3</sub><sup>8</sup> ve C<sub>4</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemeye uygulanacak darbeye karşı dayanımına karar verebilmek için yapılan darbe

testinde dört farklı yönlendirme açısının testi yapılmıştır. Testlerden elde edilen sonuçların ortalama değerleri Şekil 4.20’de gösterildiği gibi bir Ea-t eğri grafiği oluşturulmuştur. Darbe enerjisi altında dört farklı oryantasyon açısına sahip Alüminyum petek yapılı tabakalı karbon fiber  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  numuneleri için 80 joule yük uygulanmış olup absorbe edilen enerji hesaplanmış ve delip geçme olarak isimlendirilen aynı davranış sergilemişlerdir. Farklı dizilime sahip numunelerin her birinin üst levha ve çekirdek malzemesi tamamen hasar görmüştür. Numunelerin tamamında delinme durumu söz konusu olduğundan dolayı sahip olunan enerjinin tamamını absorbe edemediği için yani darbe enerjisi sönmülenen enerjiden fazla olmasından dolayı numuneyi delerek hareketine devam etmiştir.  $C_1^8$  numunesi tek yönlü fiber dizilime sahip olduğundan delinme hemen gerçekleşmemiş fakat numune üzerinde diğer numunelere göre Resim 4.1’de görüldüğü gibi ciddi hasarlar meydana gelmesi nedeniyle tercih edilmemiştir. Dolayısıyla  $C_4^8$  numunesi diğer gruplara kıyasla daha fazla enerji absorbe elde etmiştir.



Şekil 4.20  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  ortalama Ea-t eğrisi.

Her bir malzeme tipi için çarpma hızı, absorbe edilen enerji, yüzey hasarı ve temas süresi Çizelge 4.11’de verilmiştir.  $C_1^8$  numunesi diğer numunelere göre fazla enerjiyi absorbe ettiği görülmekte fakat yüzey hasarı Resim 4.1’de gösterildiği gibi üst ve alt yüzeylerde delinme, ayrılma ve yırtılma diğer numunelere göre oldukça fazla deformasyona uğramıştır. Dolayısıyla otomotivde kullanılacak kompozit malzemelerde ayrılma ve yırtılma gibi hasarlar istenmeyen bir durumdur. Böylelikle  $C_4^8$  numunesi

absorbe ettiği enerji ve üst-alt yüzey hasarı bakımından en iyi sonuç olduğu görülmüştür. Otomotiv yan darbe kiriş üretiminde bu kriter esas alınacaktır.

**Çizelge 4.11**  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  numunelerine ait ortalama değerler.

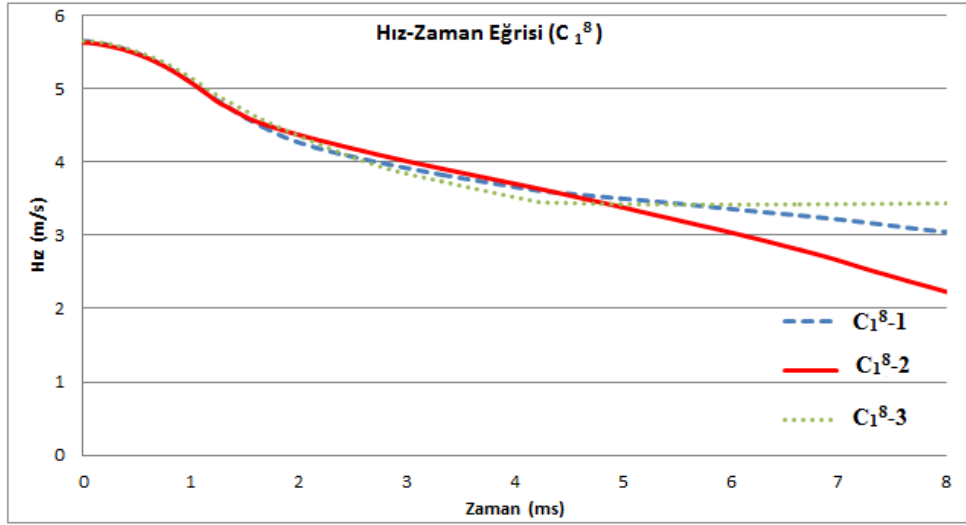
| Malzeme Tipi | Uygulanan Darbe Enerjisi (J) | Başlangıç Hızı (m/s) | Absorbe edilen Enerji (J) | Yüzey Hasar Genişliği (mm) | Maksimum Temas Kuvvet (N) | Temas Süresi (ms) |
|--------------|------------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|
| $C_1^8$      | 80                           | 5,65                 | 50,9                      | 69                         | 5281,8                    | 1,1               |
| $C_2^8$      |                              | 5,65                 | 26,1                      | 14                         | 3367,5                    | 0,48              |
| $C_3^8$      |                              | 5,65                 | 24,1                      | 15                         | 3426,1                    | 0,67              |
| $C_4^8$      |                              | 5,65                 | 40,5                      | 12                         | 5949,9                    | 0,77              |

#### 4.3.7 Alüminyum Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzemeye ait Hız-Zaman (V-t) Eğrileri

Hız- zaman grafiği numunelerde vurucu ucun numuneyi delip geçmesi, saplanması ve yüzeyde geri sekme gibi üç özel durumları göstermektedir. Aynı zamanda kompozit malzemeye ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir tanesidir. Darbe enerjisi altında dört farklı  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyon açısına sahip numuneleri için 5,65 m/s darbe hızında 80 joule yük uygulanmış olup hız-zaman grafikleri oluşturulmuştur.

##### 4.3.7.1 $C_1^8$ Oryantasyon Açılı Numunenin Hız-Zaman (V-t) Eğrisi

Sabit enerji seviyesinde düşük hız darbeye maruz kalmış  $C_1^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı kompozit üç test numunesinden elde edilen hız-zaman (V-t) değişim grafiği Şekil 4.21’de verilmiştir. 80J darbe enerjisi altında yapılan darbe testlerinde, ilk başta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra hızı azalmaktadır. Numunelerde delinme meydana gelmiştir. Delinme olayında vurucu uç, belli bir hız ile numuneye saplanmıştır. Sürtünmeden dolayı numunenin kalınlığı boyunca hız yavaşlamıştır. Bunun sonucunda da geri sekme meydana gelmediği için Şekil 4.21’de görüldüğü gibi eğriler pozitif bölgededir.

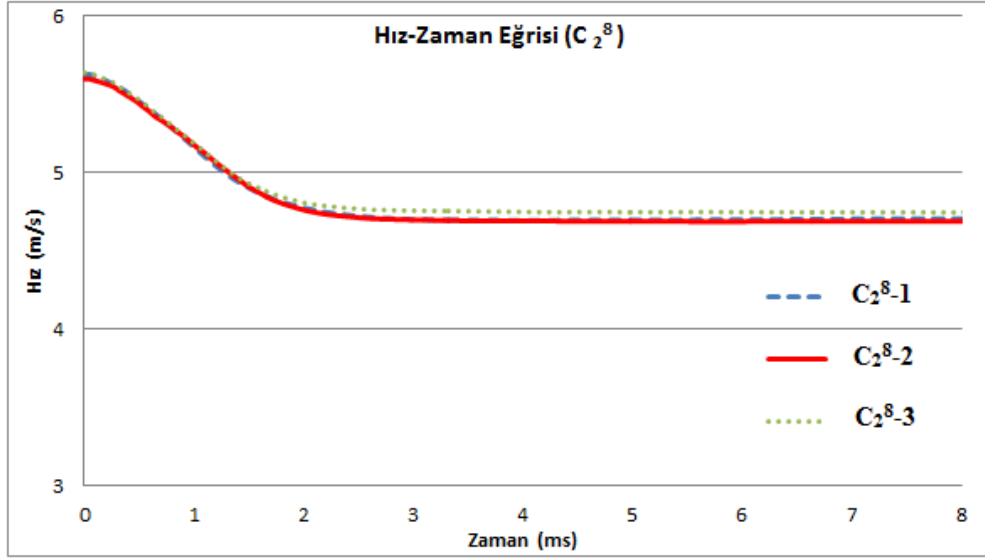


**Şekil 4.21** C<sub>1</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı tabakalı karbon fiber malzemenin V-t eğrisi.

C<sub>1</sub><sup>8</sup>-1 numesine çarpma anındaki hızı 4,99 m/s, darbe ucunun numuneye temasına kadar geçen zaman ise 1,09 ms dir. C<sub>1</sub><sup>8</sup>-2 numunesine çarpma anındaki hızı 4,89 m/s, numuneye temasına kadar geçen zaman ise 1,17 ms dir. C<sub>1</sub><sup>8</sup>-3 numunesine çarpma anındaki hızı 5,07 m/s, numuneye temasına kadar geçen zaman ise 1,07 ms dir. Üç numunenin çarpma anındaki ortalama hızı 4,98 m/s numuneye temasına kadar geçen ortalama zaman ise 1,11 ms olarak belirlenmiştir.

#### 4.3.7.2 C<sub>2</sub><sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Numunenin Hız-Zaman (V-t) Eğrisi

Sabit enerji seviyesinde düşük hız darbeye maruz kalmış C<sub>2</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı Al petek yapılı sandviç kompozit üç test numunesinden elde edilen hız-zaman (V-t) değişim grafiği Şekil 4.22’de verilmiştir. 80J darbe enerjisi altında yapılan darbe testlerinde, ilk başta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra hızı azalmaktadır. Numunelerde delinme meydana gelmiştir. Delinme olayında vurucu uç, belli bir hız ile numuneye saplanmıştır. Sürtünmeden dolayı numunenin kalınlığı boyunca hız yavaşlamıştır. Bunun sonucunda da geri sekme meydana gelmediği için Şekil 4.22’de görüldüğü gibi eğriler pozitif bölgededir.

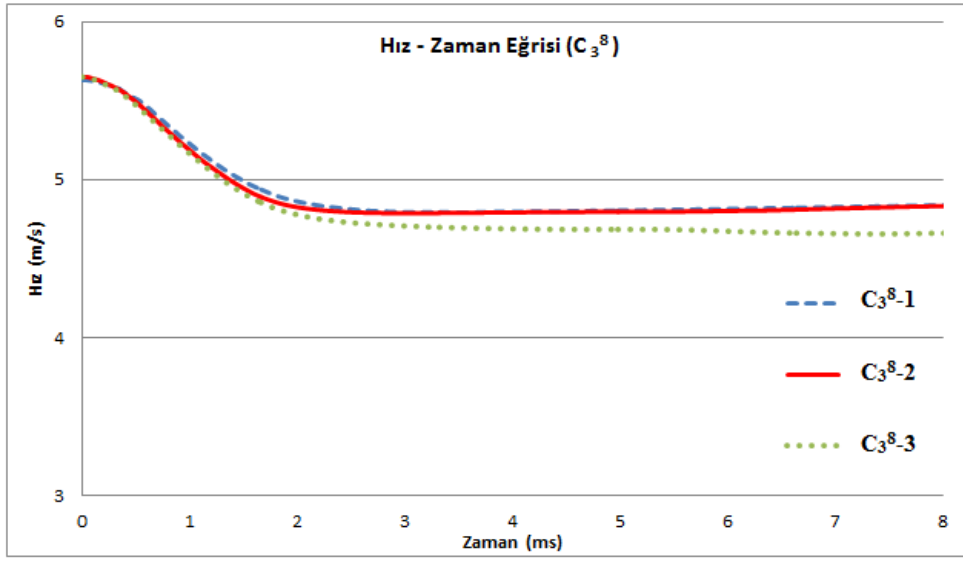


**Şekil 4.22** C<sub>2</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı tabakalı karbon fiber malzemenin V-t eğrisi.

C<sub>2</sub><sup>8</sup>-1 numunesine çarpma anındaki hızı 5,24 m/s, darbe ucunun numuneye temasına kadar geçen zaman ise 0,87 ms dir. C<sub>2</sub><sup>8</sup>-2 numunesine çarpma anındaki hızı 5,53 m/s, numuneye temasına kadar geçen zaman ise 0,30 ms dir. C<sub>2</sub><sup>8</sup>-3 numunesine çarpma anındaki hızı 5,57 m/s, numuneye temasına kadar geçen zaman ise 0,27 ms dir. Üç numunenin çarpma anındaki ortalama hızı 5,44 m/s numuneye temasına kadar geçen ortalama zaman ise 0,48 ms olarak belirlenmiştir.

#### 4.3.7.3 C<sub>3</sub><sup>8</sup> Oryantasyon Açılı Numunenin Hız-Zaman (V-t) Eğrisi

Sabit enerji seviyesinde düşük hız darbeye maruz kalmış C<sub>3</sub><sup>8</sup> oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı kompozit üç test numunesinden elde edilen hız-zaman (V-t) değişim grafiği Şekil 4.23’de verilmiştir. 80 J darbe enerjisi altında yapılan darbe testlerinde, ilk başta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra hızı azalmaktadır. Numunelerde delinme meydana gelmiştir. Delinme olayında vurucu uç, belli bir hız ile numuneye saplanmıştır. Sürtünmeden dolayı numunenin kalınlığı boyunca hız yavaşlamıştır. Bunun sonucunda da geri sekme meydana gelmediği için Şekil 4.23’de görüldüğü gibi eğriler pozitif bölgededir.

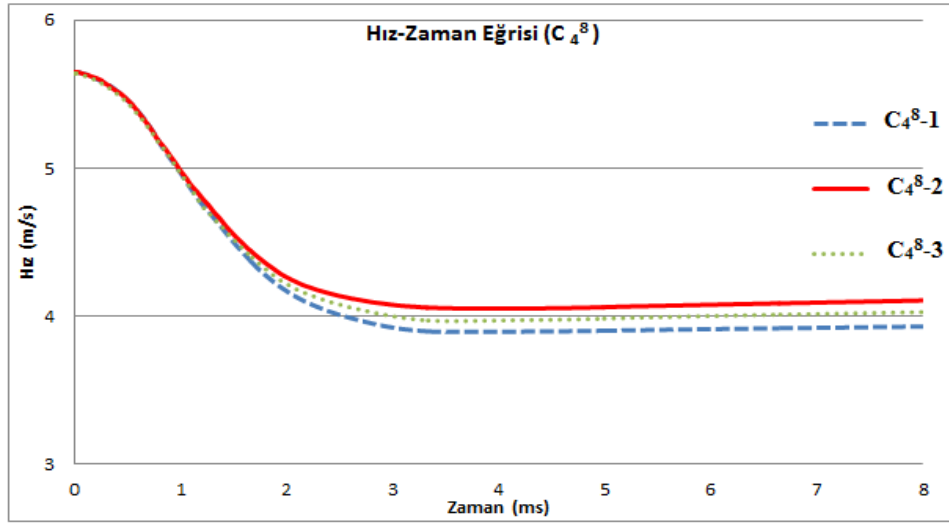


**Şekil 4.23**  $C_3^8$  oryantasyon açılı tabakalı karbon fiber malzemenin V-t eğrisi.

$C_3^8$ -1 numunesine çarpma anındaki hızı 5,42 m/s, darbe ucunun numuneye temasına kadar geçen zaman ise 0,65 ms dir.  $C_3^8$ -2 numunesine çarpma anındaki hızı 5,36 m/s, numuneye temasına kadar geçen zaman ise 0,69 ms dir.  $C_3^8$ -3 numunesine çarpma anındaki hızı 5,35 m/s, numuneye temasına kadar geçen zaman ise 0,67 ms dir. Üç numunenin çarpma anındaki ortalama hızı 5,37 m/s numuneye temasına kadar geçen ortalama zaman ise 0,67 ms olarak belirlenmiştir.

#### 4.3.7.4 $C_4^8$ Oryantasyon Açılı Numunenin Hız-Zaman (V-t) Eğrisi

Sabit enerji seviyesinde düşük hız darbeye maruz kalmış  $C_4^8$  oryantasyon açılı Al petek yapıları tabakalı kompozit uç test numunesinden elde edilen hız-zaman (V-t) değişim grafiği Şekil 4.24'de verilmiştir. 80J darbe enerjisi altında yapılan darbe testlerinde, ilk başta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra hızı azalmaktadır. Numunelerde delinme meydana gelmiştir. Delinme olayında vurucu uç, belli bir hız ile numuneye saplanmıştır. Sürtünmeden dolayı numunenin kalınlığı boyunca hız yavaşlamıştır. Bunun sonucunda da geri sekme meydana gelmediği için Şekil 4.24'de görüldüğü gibi eğriler pozitif bölgededir.

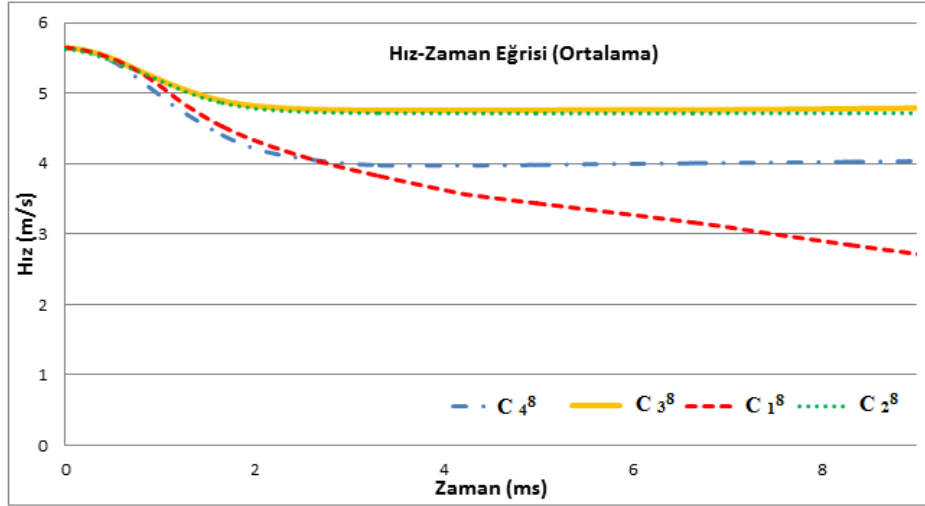


**Şekil 4.24**  $C_4^8$  oryantasyon açılı tabakalı karbon fiber malzemenin V-t eğrisi.

$C_4^8$ -1 numesine çarpma anındaki hızı 5,19 m/s, darbe ucunun numuneye temasına kadar geçen zaman ise 0,78 ms dir.  $C_4^8$ -2 numesine çarpma anındaki hızı 5,21 m/s, numuneye temasına kadar geçen zaman ise 0,76 ms dir.  $C_4^8$ -3 numesine çarpma anındaki hızı 5,19 m/s, numuneye temasına kadar geçen zaman ise 0,77 ms dir. Üç numunenin çarpma anındaki ortalama hızı 5,20 m/s numuneye temasına kadar geçen ortalama zaman ise 0,77 ms olarak belirlenmiştir

#### 4.3.7.5 Numunelere Ait Ortalama Hız-Zaman (V-t) Eğrisi

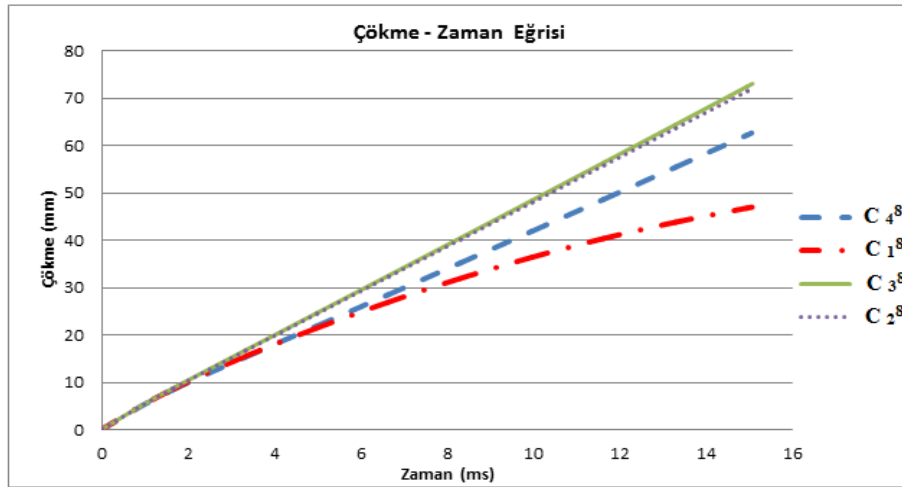
$C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kompozit malzemeye uygulanacak darbeye karşı dayanımına karar verebilmek için yapılan darbe testinde dört farklı yönlendirme açısının testi yapılmıştır. Testlerden elde edilen sonuçların ortalama değerleri Şekil 4.25’de gösterildiği gibi bir V-t eğri grafiği oluşturulmuştur. Darbe enerjisi altında dört farklı oryantasyon açısına sahip numuneler için 5,65 m/s hızında 80 joule yük uygulanmış ve tüm grupta delip geçme olarak isimlendirilen aynı davranış sergilemişlerdir. Sergilenen bu davranışta vurucu uç, belli bir hız ile numuneye saplanmıştır. Sürtünmeden dolayı numunenin kalınlığı boyunca hız yavaşlamıştır. Bunun sonucunda da geri sekme meydana gelmediği için Şekil 4.24’de görüldüğü gibi tüm grup eğriler pozitif bölgededir. Ayrıca farklı dizilime sahip numunelerin her birinin üst levha ve çekirdek malzemesi tamamen hasar görmüştür.



Şekil 4.25  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  ortalama V-t eğrisi.

#### 4.3.8 Al Petek Yapılı Tabakalı Karbon Fiber Malzemeye ait Çökme-Zaman (d-t) Eğrileri

Şekil 4.26’da farklı dizilim açlarına sahip  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  numunelerine ait çökme-zaman eğrileri verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  numunelerin hepsinde 80 joule darbe enerjisi altında delinme meydana gelmiştir. 80 joule enerji seviyesinde  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$  dizilimine sahip  $C_4^8$  numunesinde meydana gelen çökmenin,  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$  dizilimi  $C_2^8$  numunesi ve  $[+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$  dizilimi  $C_3^8$  numunesinden az,  $[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$  dizilimi  $C_1^8$  numunesinden ise fazla olduğu görülmektedir. Dolayısıyla en büyük çökmenin  $C_3^8$  numunesinde meydana gelmiştir.



Şekil 4.26  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  ortalama (d-t) eğrileri.

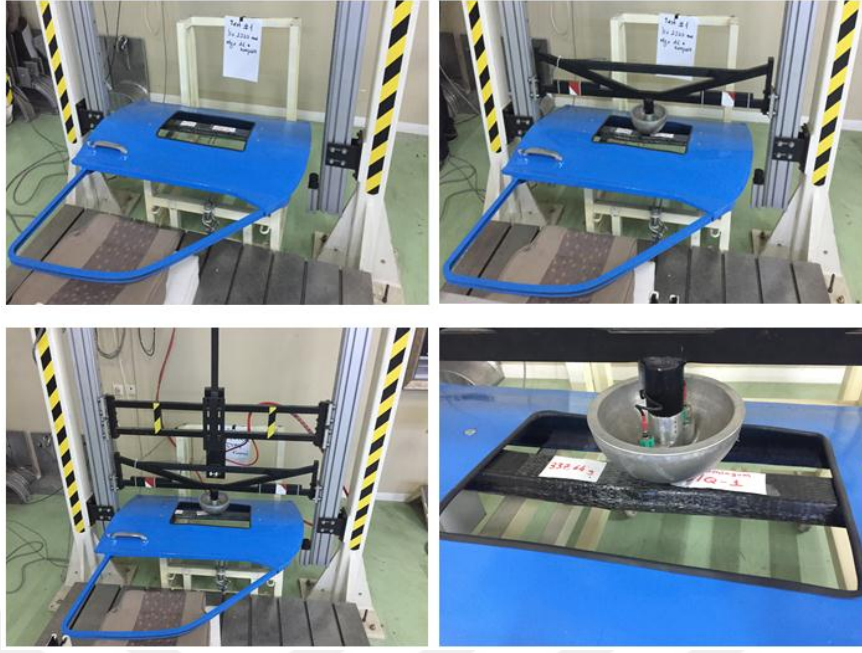
Darbe testleri yapılan  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber numune parçaları ve testler sonucunda alınan verilerden kuvvet-çökme (F-d), absorbe edilen enerji-zaman (Ea-t), hız-zaman (V-t), çökme-zaman (d-t) eğrileri çizilmiş olup bunlar arasında en iyi sonuç  $C_1^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı tabakalı karbon fiber malzemeler çıkmıştır. Fakat yapılan testler sonucunda numuneler incelendiğinde  $C_1^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzemenin yüzeyinde fiber yönünde ayrılmalar, kopmalar ve matris çatlakları Resim 4.1’de görülmektedir. Dolayısıyla herhangi bir noktasal yük sonucu darbe kirişinde böyle bir durum istenmediğinden dolayı  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme kullanılmaya karar verilmiştir. Böylelikle yan darbe kiriş üretiminde yönlendirme tipi olarak olan  $C_4^8$  oryantasyon açılı malzeme tercih edilecektir.

#### **4.4 Serbest Ağırlık Düşürme Testi**

Üretilen C-O profil yan darbe kirişlerin test edilmesinde serbest ağırlık düşürme testi uygulanmıştır. Test de 3 adet C profil Al petek yapılı tabakalı karbon fiber, 3 adet C profil Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber ve 3 adet O profil tabakalı karbon fiber kiriş olmak üzere toplam 9 adet profil kiriş testi yapılmıştır. Her bir yan darbe C-O profil kirişler için 2.5 m, 2.75 m ve 3 m olmak üzere üç farklı yüksekliklerden serbest ağırlık düşürme testi uygulanmıştır. Serbest bırakılan darbe küresinin çapı 165 mm ve ağırlığı ise 6,5 kg’dır. Serbest bırakılan kürenin kirişe çarpma anındaki hız ve ivme değerleri hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak her bir kiriş profili için ivme-zaman grafikleri oluşturulmuştur.

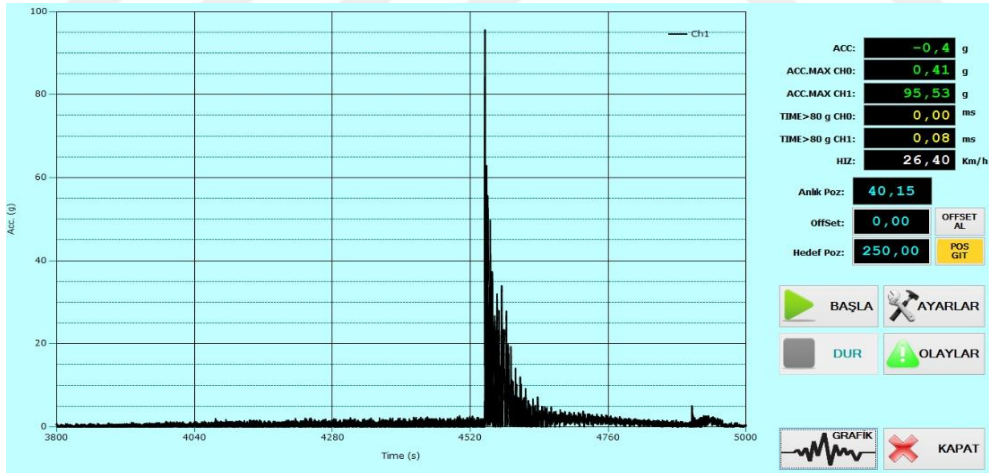
##### **4.4.1 C Profil Alüminyum Petek Yapılı Karbon Fiber Kirişe Serbest Ağırlık Düşürme Testi**

C profil yan darbe Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe öncelikle 2.5 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme testi yapılmıştır. Serbest bırakılan yükseklikte yan darbe kiriş malzemesinde Resim 4.5’de gösterildiği gibi gözle görülür bir deformasyon oluşmamıştır. Fakat kiriş malzemenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları ve matris çatlağı gibi hasarlar meydana gelmiştir.



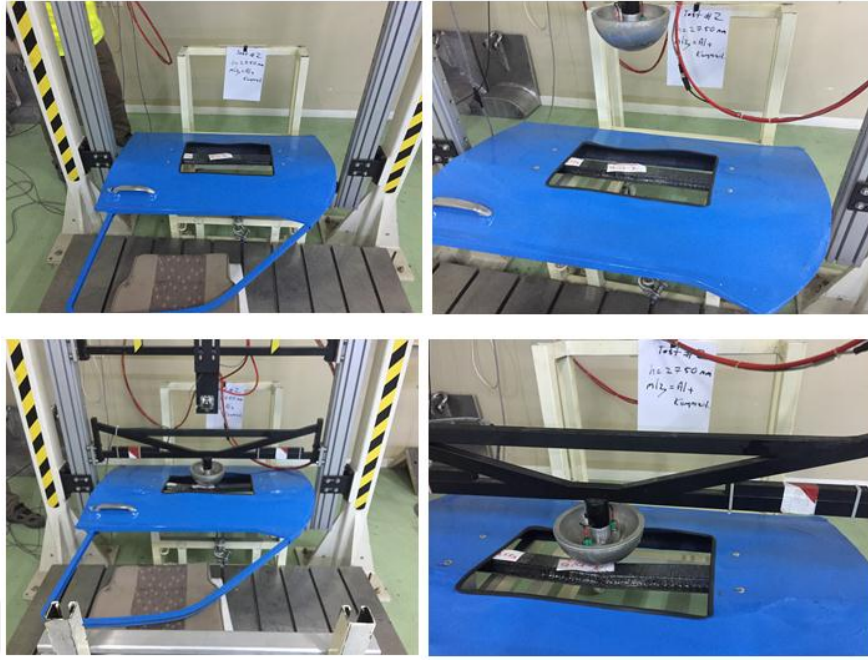
**Resim 4.5** Alüminyum petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (2.5 m).

2.5 m yükseklikten Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kiriş malzemeye 6,5 kg ağırlığındaki küre serbest bırakılmıştır. Kürenin malzemeye çarpma anındaki hızı 26,40 km/h ve ivmesi ise 95,53 g dir. Zamana bağlı ivme grafiği Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



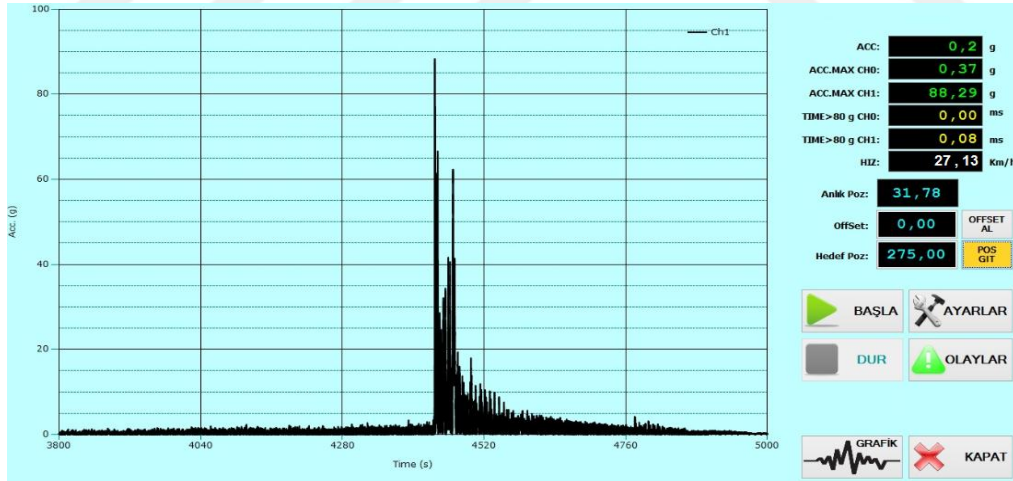
**Şekil 4.27**  $C_4^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (2.5 m).

C profil yan darbe Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe 2.75 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme testi yapılmıştır. Serbest bırakılan yükseklikte yan darbe kiriş malzemesinde Resim 4.6’da gösterildiği gibi gözle görülür bir deformasyon oluşmamıştır. Fakat kiriş malzemenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, matris çatlağı ve çekirdek malzemesinde hasar meydana gelmiştir.



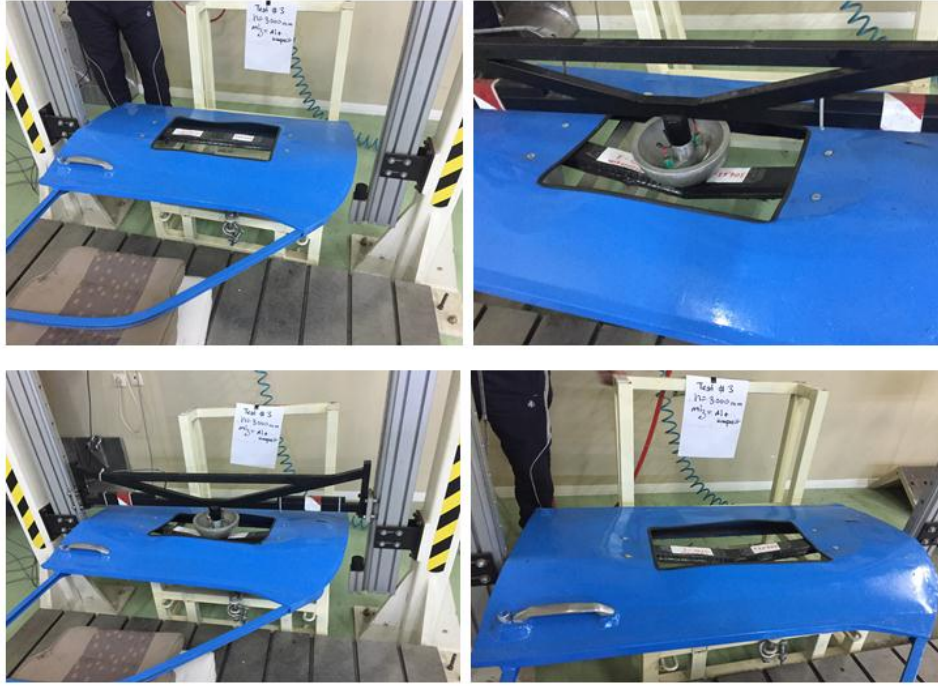
**Resim 4.6** Alüminyum petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (2,75 m).

2.75 m yükseklikten Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kiriş malzemeye 6,5 kg ağırlığındaki küre serbest bırakılmıştır. Kürenin malzemeye çarpma anındaki hızı 27,13 km/h ve ivmesi ise 88,29 g dir. Zamana bağlı ivme grafiği Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



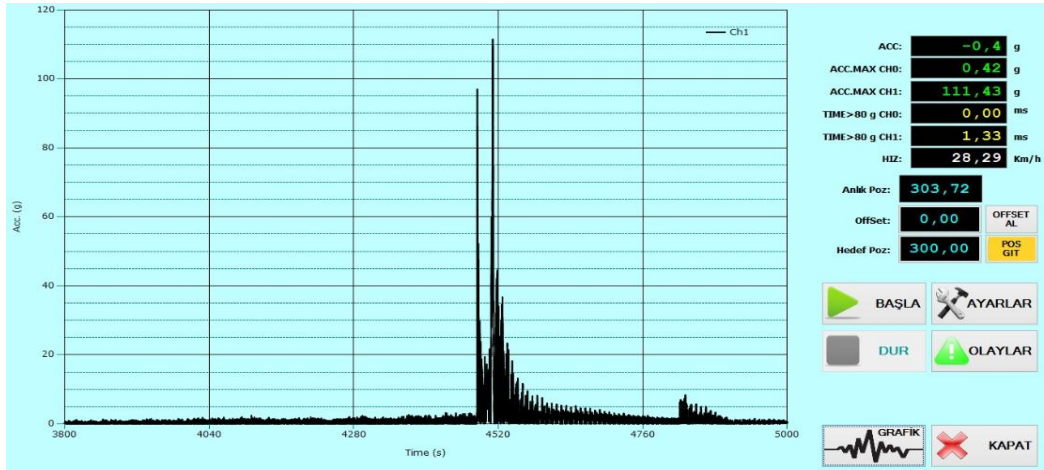
**Şekil 4.28**  $C_4^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (2.75 m).

C profil yan darbe Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe 3 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme testi yapılmıştır. Serbest bırakılan yükseklikte yan darbe kiriş malzemesinde Resim 4.7’de gösterildiği gibi gözle görülür bir deformasyon oluşmuştur. Kiriş malzemenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları, matris çatlağı ve çekirdek malzemesinde hasar meydana gelmiştir.



**Resim 4.7** Alüminyum petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (3 m).

3 m yükseklikten Al petek yapılı tabakalı karbon fiber kiriş malzemeye 6,5 kg ağırlığındaki küre serbest bırakılmıştır. Kürenin malzemeye çarpma anındaki hızı 28,29 km/h ve ivmesi ise 111,43 g dir. Zamana bağlı ivme grafiği Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



**Şekil 4.29**  $C_4^8$  oryantasyon açılı Al petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (3 m).

Çizelge 4.12’de  $C_4^8$  oryantasyon açılı Alüminyum petek yapılı kirişe 2.5, 2.75 ve 3 metrelerden bırakılan ağırlığın ivme-zaman değişim grafiğinden alınan veriler sırasıyla serbest bırakılan yükseklik, çarpma hızı, çarpma anındaki ivme değeri, temas süresi ve maksimum temas kuvvet değerleri özetlenmiştir.

**Çizelge 4.12** C profil Al petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiğinden alınan değerler.

| Kiriş tipi                                                  | Serbest bırakılan yükseklik (m) | Çarpma anındaki hız (km/h) | Çarpma anındaki ivme (g) | Temas süresi (s) | Mak.Temas Kuvveti (N) |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|
| <b>C Profil</b>                                             | 2.5                             | 26,40                      | 95,53                    | 0,0767           | 1552,2                |
| <b>Alüminyum Bal Petek Yapılı C<sub>4</sub><sup>8</sup></b> | 2.75                            | 27,13                      | 88,29                    | 0,0852           | 1577,9                |
|                                                             | 3                               | 28,29                      | 111,43                   | 0,0705           | 2172,6                |

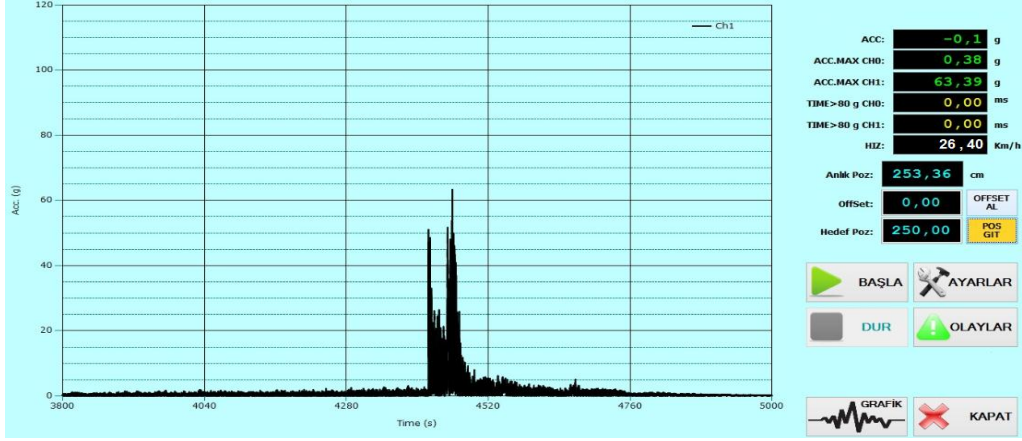
#### 4.4.2 C Profil Nomex Petek yapılı Karbon Fiber kirişe Serbest Düşme Testi

C profil yan darbe Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe öncelikle 2.5 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme testi yapılmıştır. Serbest bırakılan yükseklikte yan darbe kiriş malzemesinde Resim 4.8’de gösterildiği gibi gözle görülür bir deformasyon oluşmuştur. Kiriş malzemenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, fiber ayrılımları, matris çatlağı ve çekirdek malzemesinde hasar meydana gelmiştir.



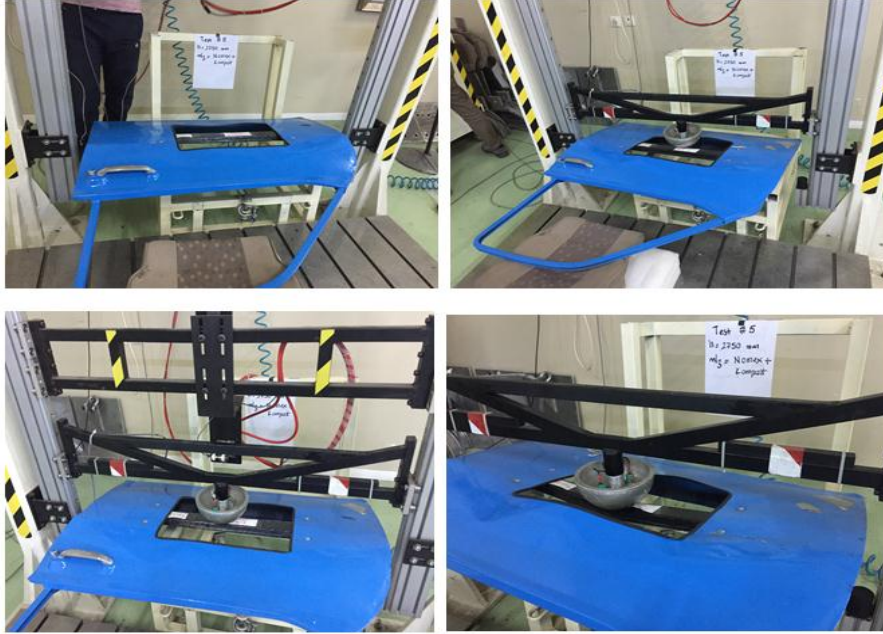
**Resim 4.8** Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (2.5 m).

2.5 m yükseklikten Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kiriş malzemeye 6,5 kg ağırlığındaki küre serbest bırakılmıştır. Kürenin malzemeye çarpma anındaki hızı 26,40 km/h ve ivmesi ise 63,29 g dir. Zamana bağlı ivme grafiği Şekil 4.30’da gösterilmiştir.



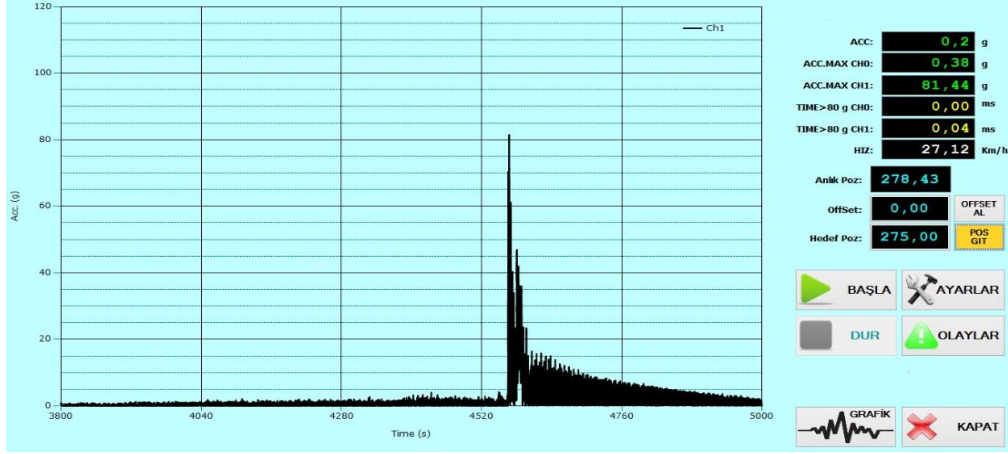
Şekil 4.30  $C_4^8$  oryantasyon açılı Nomex petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (2.5 m).

C profil yan darbe Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe 2.75 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme testi yapılmıştır. Serbest bırakılan yükseklikte yan darbe kiriş malzemesinde Resim 4.9’da gösterildiği gibi gözle görülür bir deformasyon oluşmuştur. Kiriş malzemenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları, matris çatlağı ve çekirdek malzemesinde hasar meydana gelmiştir.



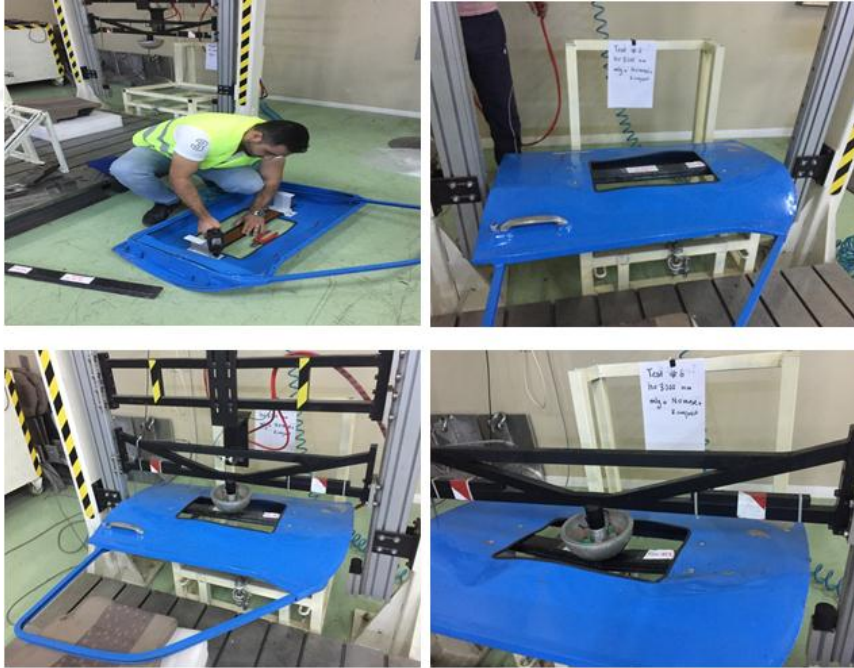
Resim 4.9 Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (2.75 m).

2.75 m yükseklikten Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kiriş malzemeye 6,5 kg ağırlığındaki küre serbest bırakılmıştır. Kürenin malzemeye çarpma anındaki hızı 27,12 km/h ve ivmesi ise 81,44 g dir. Zamana bağlı ivme grafiği Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



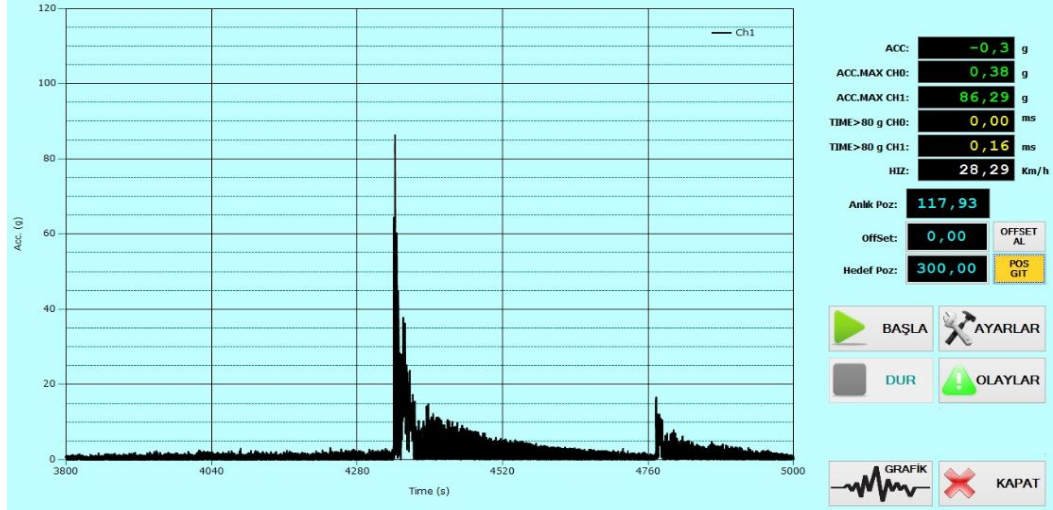
**Şekil 4.31**  $C_4^8$  oryantasyon açılı Nomex petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (2.75 m).

C profil yan darbe Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe 3 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme testi yapılmıştır. Serbest bırakılan yükseklikte yan darbe kiriş malzemesinde Resim 4.10'da gösterildiği gibi gözle görülür bir deformasyon oluşmuştur. Kiriş malzemenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları, matris çatlağı ve çekirdek malzemesinde hasar meydana gelmiştir.



**Resim 4.10** Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (3 m).

3 m yükseklikten Nomex petek yapılı tabakalı karbon fiber kiriş malzemeye 6,5 kg ağırlığındaki küre serbest bırakılmıştır. Kürenin malzemeye çarpma anındaki hızı 28,29 km/h ve ivmesi ise 86,29 g dir. Zamana bağlı ivme grafiği Şekil 4.32'de gösterilmiştir.



Şekil 4.32  $C_4^8$  oryantasyon açılı Nomex petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiği (3 m).

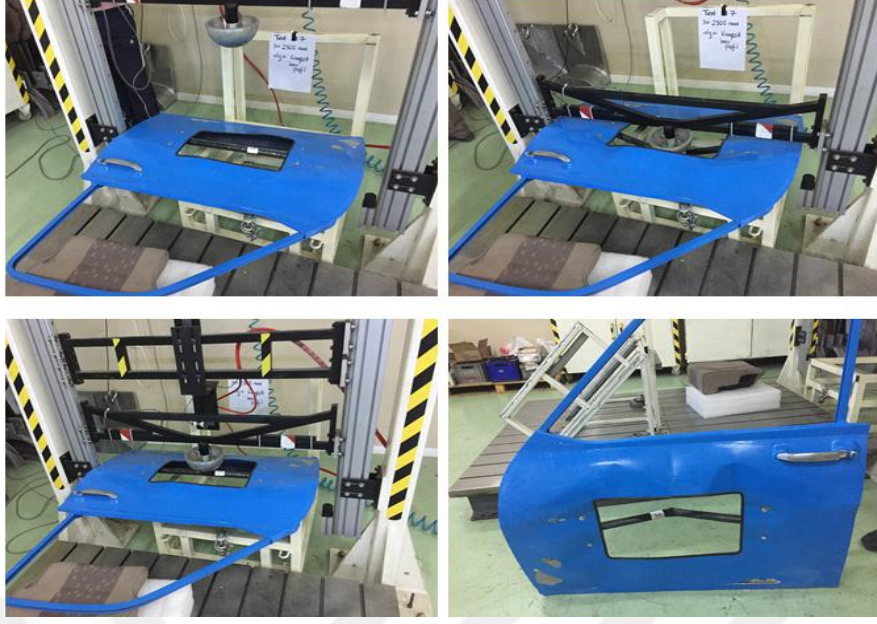
Çizelge 4.13’de  $C_4^8$  oryantasyon açılı nomex petek yapılı kirişe 2.5, 2.75 ve 3 metrelerden bırakılan ağırlığın ivme-zaman değişim grafiğinden alınan veriler sırasıyla serbest bırakılan yükseklik, çarpma hızı, çarpma anındaki ivme değeri, temas süresi ve maksimum temas kuvvet değerleri özetlenmiştir.

Çizelge 4.13 C profil Nomex petek yapılı kirişin ivme-zaman grafiğinden alınan değerler.

| Kiriş tipi               | Serbest bırakılan yükseklik (m) | Çarpma anındaki hız (km/h) | Çarpma anındaki ivme (g) | Temas süresi (s) | Mak.Temas Kuvveti (N) |
|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|
| C Profil                 | 2.5                             | 26,40                      | 63,29                    | 0,1158           | 1028,2                |
| Nomex                    | 2.75                            | 27,12                      | 81,44                    | 0,0924           | 1455,5                |
| Bal Petek Yapılı $C_4^8$ | 3                               | 28,29                      | 86,29                    | 0,0909           | 1682,4                |

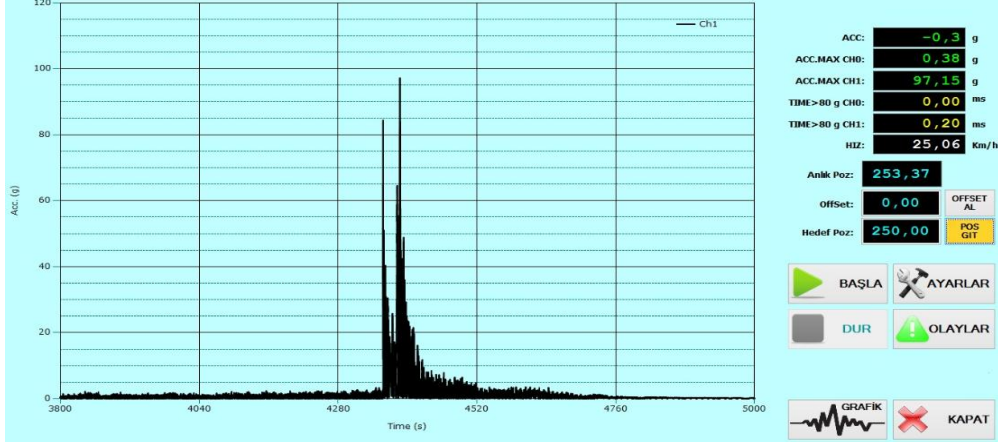
#### 4.4.3 O Profil Karbon Fiber Kirişe Serbest Düşme Testi

O profil yan darbe tabakalı karbon fiber kirişe öncelikle 2.5 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme testi yapılmıştır. Serbest bırakılan yükseklikte yan darbe kiriş malzemesinde Resim 4.11’de gösterildiği gibi gözle görülür bir deformasyon oluşmuştur. Kiriş malzemesinde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları, matris çatlağı ve kiriş kırılması meydana gelmiştir.



**Resim 4.11** O profil tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (2.5 m).

2.5 m yükseklikten tabakalı karbon fiber kiriş malzemeye 6,5 kg ağırlığındaki küre serbest bırakılmıştır. Kürenin malzemeye çarpma anındaki hızı 25,06 km/h ve ivmesi ise 97,15 g dir. Zamana bağlı ivme grafiği Şekil 4.33’de gösterilmiştir.



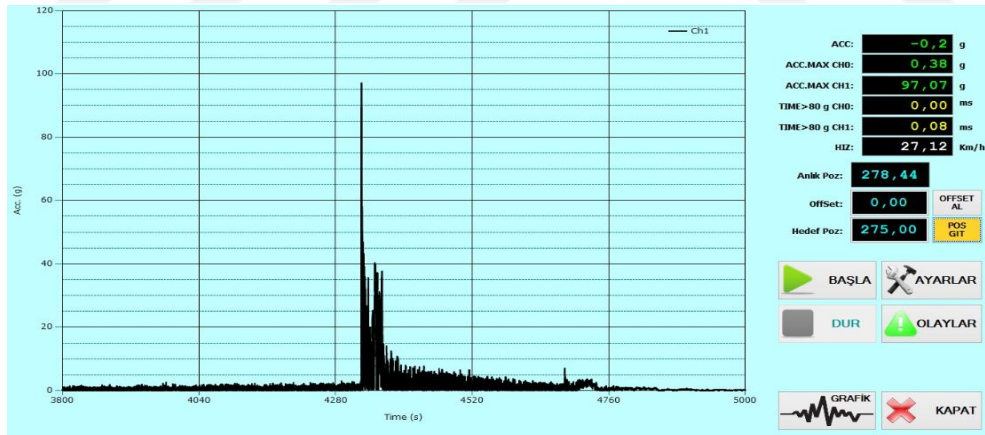
**Şekil 4.33**  $C_4^8$  oryantasyon açılı O profil kirişin ivme-zaman grafiği (2.5 m).

O profil yan darbe tabakalı karbon fiber kirişe 2.75 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme testi yapılmıştır. Serbest bırakılan yükseklikte yan darbe kiriş malzemesinde Resim 4.12’de gösterildiği gibi gözle görülür bir deformasyon oluşmuştur. Kiriş malzemesinde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları, matris çatlağı ve kiriş kırılması meydana gelmiştir.



**Resim 4.12** O profil tabakalı karbon fiber kiriş serbest düşme (2.75 m).

2.75 m yükseklikten tabakalı karbon fiber kiriş malzemeye 6,5 kg ağırlığındaki küre serbest bırakılmıştır. Kürenin malzemeye çarpma anındaki hızı 27,12 km/h ve ivmesi ise 97,07 g dir. Zamana bağlı ivme grafiği Şekil 4.34’de gösterilmiştir.



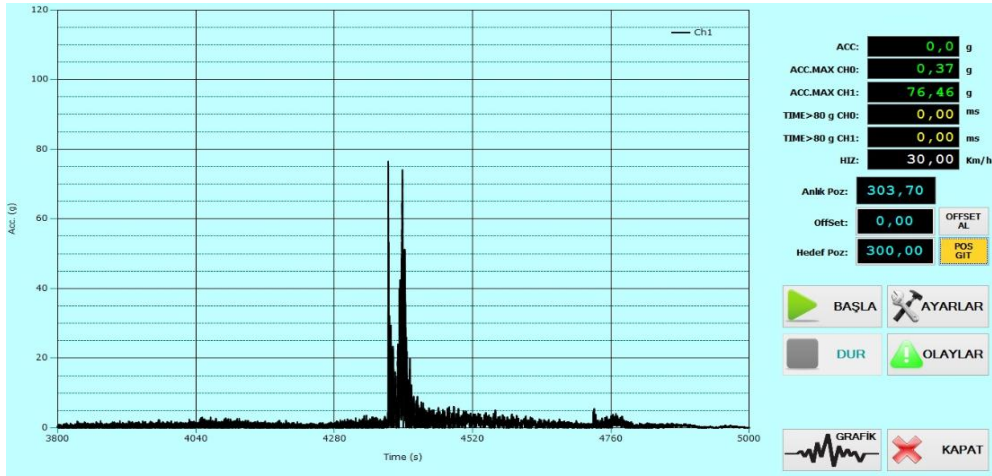
**Şekil 4.34**  $C_4^8$  oryantasyon açılı O profil kirişin ivme-zaman grafiği (2.75 m).

O profil yan darbe tabakalı karbon fiber kiriş 3 m yükseklikten serbest ağırlık düşürme testi yapılmıştır. Serbest bırakılan yükseklikte yan darbe kiriş malzemesinde Resim 4.13’de gösterildiği gibi gözle görülür bir deformasyon oluşmuştur. Kiriş malzemesinde fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları, matris çatlağı ve kiriş kırılması meydana gelmiştir.



**Resim 4.13** O profil tabakalı karbon fiber kirişe serbest düşme (3 m).

3 m yükseklikten tabakalı karbon fiber kiriş malzemeye 6,5 kg ağırlığındaki küre serbest bırakılmıştır. Kürenin malzemeye çarpma anındaki hızı 30,00 km/h ve ivmesi ise 76,46 g dir. Zamana bağlı ivme grafiği Şekil 4.35’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.35**  $C_4^8$  oryantasyon açılı O profil kirişin ivme-zaman grafiği (3 m).

Çizelge 4.14’de  $C_4^8$  oryantasyon açılı tabakalı karbon fiber yapıli kirişe 2.5, 2.75 ve 3 metrelerden bırakılan ağırlığın ivme-zaman değişim grafiğinden alınan veriler sırasıyla serbest bırakılan yükseklik, çarpma hızı, çarpma anındaki ivme değeri, temas süresi ve maksimum temas kuvvet değerleri özetlenmiştir.

**Çizelge 4.14** O profil karbon fiber yapıli kirişin ivme-zaman grafiğinden alınan değler.

| Kiriş tipi                                                    | Serbest bırakılan yükseklik (m) | Çarpma anındaki hız (km/h) | Çarpma anındaki ivme (g) | Temas süresi (s) | Mak.Temas Kuvveti (N) |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|
| <b>O Profil Karbon Fiber Yapılı C<sub>4</sub><sup>8</sup></b> | 2.5                             | 25,06                      | 97,15                    | 0,0716           | 1578,5                |
|                                                               | 2.75                            | 27,12                      | 97,07                    | 0,0775           | 1734,9                |
|                                                               | 3                               | 30,00                      | 76,46                    | 0,1089           | 1490,7                |

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Alüminyum ve Nomex çekirdek sandviç yapılar hem yük taşıma kabiliyetleri hemde hafiflikten dolayı birçok uygulama alanlarında kullanılabilmektedir. Yapılan çalışmada, dört farklı oryantasyon açılara sahip  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  karbon fiber kompozit malzemelerin üç nokta eğme, çekme, darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada, sabit enerji altındaki Alüminyum petek yapılı karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerin darbe davranışı üzerine farklı fiber oryantasyon açılarının etkileri araştırılmıştır.  $C_4^8$  oryantasyon açılı kompozit malzemedan C profil Alüminyum ve Nomex petek yapılı sandviç karbon fiber ve O profil karbon fiber yan darbe kiriş üretimi yapılmıştır. Üretimi yapılan kirişe serbest ağırlık düşürme testi uygulayarak davranışları incelenmiştir. Aynı zamanda yapılan çalışmada, Alüminyum ve Nomex bal peteği çekirdekli yapılardan oluşan otomobil yan darbe kiriş üretiminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalarla ilgili aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Farklı oryantasyon açılara sahip 8 tabakalı  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  malzemeler sabit darbe enerji altında ve sabit kalınlıkta benzer davranışlar göstermişlerdir. 80 joule enerji değeri altında hepsinde delinme meydana gelerek açık tip eğri oluşmuştur. Tabaka kalınlığı azaldıkça çökme değerinin artacağı ve tabaka kalınlığı artıkça da çökme değerinin azalacağı görülmektedir. Bu sonuçlar da literatürle uyum içindedir. Naik vd. 2000, düşük darbe hızlarında maruz kalan polimer kompozitlerin darbe davranışı tabaka kalınlığının etkisini incelemişlerdir.

Yee ve Pellegrino 2005, düz dokumalı karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlere çekme gerilmesi uygulandığı taktirde ortalama %1 uzama sonrasında hasara uğradıklarını belirtmiş, bu çalışmada kullanılan epoksi matrisli kompozit malzemelerde hasara kadar oluşan uzamanın,  $C_1^8$  grubunda %0,44,  $C_2^8$  grubunda %1,16,  $C_3^8$  grubunda %6,53 ve  $C_4^8$  grubunda ise %1,7 aralarında değişen değerlerde olduğu gözlenmiştir. Her ne kadar çekme yönünde fiberler baskın özellik gösterse de aradaki bu farkın fiberlerin epoksi matris içinde hareket edebilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Alçı 2016, vurucu hızın 3,5,7 m/s olduğu deneylerde çekirdek malzemenin alt yüzeylerinde delaminasyon oluşumunun gerçekleşmediği belirtmiştir. Darbe enerjisinin

artması ile Nomex bal peteği sandviç yapının temas kuvvetlerinde ve sandviç yapının üst plakalarında delaminasyon alanlarında artış olduğunu belirtmiş, bu çalışmada 5,65 m/s hız ile testler yapılmış üst yüzey ve çekirdek malzemesinde delaminasyon oluşarak hasar meydana geldiği görülmüştür.

Gül 2018, karbon fiber takviyeli petek yapılı sandviç kompozitlerin oda sıcaklığında hasar tipi, yüz plakalarının penetrasyon kırığı, çekirdek liflerinin yırtılması, çekilmesi ve matrisin çatlaması şeklinde gerçekleşmiştir. Yapılan bu çalışmada da oda sıcaklığında aynı sonuçlar görülmüştür.

Sayer 2009, oda sıcaklığında, (0/90/±45)s takviye açısına sahip kompozitlerin delinme sınır değeri (0/0/90/90)s takviye açısındaki kompozitlere göre daha yüksek olduğunu belirtmiş, bu çalışmada  $C_4^8$  oryantasyon açılı kompozit malzemenin diğer oryantasyon açılı kompozitlere göre yüksek çıktığı görülmüştür.

80J darbe enerjisi altında  $C_4^8$  kompozit malzemenin maksimum temas kuvvet değeri diğer oryantasyon açılı kompozit malzemelere göre fazladır. Darbe sonrası  $C_1^8$  malzemesine göre %12,64,  $C_2^8$  malzemesine göre %76,68, ve  $C_3^8$  malzemesine göre ise %73,66 oranında artışı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda  $C_4^8$  malzemenin maksimum çökme miktarı ise  $C_1^8$  malzemesine göre %29,73 oranında az olduğu ve  $C_2^8$  malzemesine göre %59,62,  $C_3^8$  malzemesine göre ise %13,10 oranında fazla olduğu gözlenmiştir.

8 tabakalı numunelerde maksimum kuvvet açısından sıralama  $C_4^8 > C_1^8 > C_3^8 > C_2^8$  ve çökme miktarı açısından sıralama ise  $C_1^8 > C_4^8 > C_3^8 > C_2^8$  şeklinde olduğu görülmüştür. Böylelikle 80 joule darbe enerjisi altında en yüksek temas kuvvetin  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ/0^\circ]$  dizilimine sahip  $C_4^8$  malzemesinde en düşük temas kuvvetin ise  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$  dizilimine sahip  $C_2^8$  kompozit malzemedede olduğu görülmüştür. Aynı zamanda en fazla çökmenin  $[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]$  dizilimine sahip  $C_1^8$  malzemesinde, en az çökmenin  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$  dizilimine sahip  $C_2^8$  kompozit malzemedede olduğu görülmüştür.

Her bir oryantasyon açılı malzemeler üzerine 1.65 m yükseklikten 5,65 m/s hızla 4,92 kg kütle ile ve 80J enerji altında darbe uygulanmıştır. Darbe sonrası  $C_4^8$  kompozit malzemenin absorbe ettiği enerji değeri,  $C_1^8$  malzemesine göre %20,43 oranında azaldığı ve  $C_2^8$  malzemesine göre %55,17 ve  $C_3^8$  malzemesine göre ise %68,04 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar doğrultusunda  $C_1^8$  kompozit malzemede darbe sonucu fiber yırtılmaları, fiber kopmaları, matris çatlakları ve çekirdek malzemesinde ciddi hasarlar Resim 4.1’de görülmüştür. Sonuçlar doğrultusunda yan darbe kiriş üretiminde  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ/0^\circ]$  dizilimine sahip  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme tercih edileceği gözlenmiştir.

$C_4^8$  kompozit malzemenin üç nokta eğme testinde göstermiş olduğu gerilme değeri diğer oryantasyon açılı kompozit malzemelere göre fazladır. Üç nokta eğme testi sonrası  $C_1^8$  malzemesine göre %10,44,  $C_2^8$  malzemesine göre %4,74 ve  $C_3^8$  malzemesine göre ise %307,23 oranında arttığı gözlenmiştir.

$C_4^8$  oryantasyon açılı kompozit malzemenin çekme testinde göstermiş olduğu % uzama miktarı,  $C_1^8$  malzemesine göre %286,36,  $C_2^8$  malzemesine göre %46,55 oranında arttığı ve  $C_3^8$  malzemesine göre ise %73,96 oranında azaldığı gözlenmiştir.

80J darbe enerjisi altında Alüminyum bal petek sandviç yapılı  $C_4^8$  kompozit malzemenin darbe testi sonrası üst ve alt yüzeylerdeki hasar bölgesinin genişliği diğer oryantasyon açılı kompozit malzemelere göre düşüktür. Darbe sonrası  $C_4^8$  kompozit malzemenin hasar bölgesi genişliği,  $C_1^8$  malzemesine göre %82,60 oranında azaldığı ve  $C_2^8$  malzemesine göre %14,28 ve  $C_3^8$  malzemesine göre ise %20 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Hasar bölgesi genişliği açısından sıralama ise  $C_1^8 > C_3^8 > C_2^8 > C_4^8$  şeklinde olduğu görülmüştür.

Yapılan darbe test sonuçlarında darbe davranışları incelenen dört farklı oryantasyon açılı karbon fiber kompozit malzemelerin arasında en iyi sonuç  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/90^\circ/0^\circ]$  dizilimine sahip  $C_4^8$  oryantasyon açılı karbon fiber malzeme çıkmıştır.

Düşük hızlı darbe testinde 80 Jolue enerji altında  $C_1^8$ ,  $C_2^8$ ,  $C_3^8$  ve  $C_4^8$  oryantasyon açılarına sahip malzemelerin hepsinde üst yüzey ve çekirdek malzemesinde gözle görülür hasar oluşmuştur. Kompozit numunenin darbe uygulanmayan yüzeyinde eğilmeden dolayı çekme gerilmesinin fazla olduğu ve yüzeydeki liflerin fazla çekme uzamasına uğramasından dolayı matris ve fiber malzemesinde kırılmaların artmasıyla delinme hasarı oluşmuştur. Tüm yönlenme grubunda fiber kırılması ve delip geçme davranışı görülmüştür.

Karbon elyaf/epoksi kompozit numunelerde sabit 80 joule enerjisinde matris çatlakların ilerleyerek kırılması ve hasar bölgesinin genişlediği görülmüştür. Darbe enerjisinin alt yüzeyde meydana gelen fiber uzamasının ve hasar bölgesinin daha fazla genişlediği, dış katmanlardaki fiberlerin ve matrisin birlikte kırılmasıyla delinmenin gerçekleştiği belirlenmiştir.

Yan darbe kiriş üretiminde C-O profil olmak üzere iki kiriş kesiti ele alınmıştır. C profil yan darbe kiriş modelinde hem Alüminyum petek yapılı hem de Nomex petek yapılı malzeme kullanarak serbest ağırlık düşürme testi uygulanmıştır. Test sonucunda Alüminyum yapılı karbon fiber malzemenin Nomex yapıya göre daha sağlam ve darbeyi sönümlediği ortaya çıkmıştır. Alüminyum bal petekli yapının kiriş üst yüzeyinde fiber ayrılmaları ve matris çatlakları oluşmuştur. Fakat Nomex bal petekli yapıda, fiber kopması, fiber ayrılması, matris çatlakları ve çekirdek malzemesinde hasarlar meydana geldiği görülmüştür.

C profil petek yapılı Alüminyum malzeme ile O profil malzemeyi karşılaştırmak için O profil yapıda yan darbe kiriş üretimi yapılmıştır. Serbest ağırlık düşürme testinde O profilde gözle görülür kırılma ve kopma meydana gelmiştir. Sandviç yapıların uygulama alanına göre ikisi arasında yapılan testler sonucunda C profil yan darbe kiriş malzemenin diğerlerine göre geometrik ve kullanılan çekirdek malzeme yönünden darbe karşı daha dirençli, darbeyi absorbe ettiği ve emniyetli olduğu sonucu çıkartılmıştır.

Aşağıdaki belirtilen sebeplerden dolayı üretilen test numunelerini aynı özellikte üretmekte sorunlar oluşabilmektedir. Oluşan sorunlarda gerek eğme, çekme gerekse de darbe testlerinde oluşan sonuçları etkileyebilmektedir.

1. Alüminyum petek sandviç yapılı karbon fiber darbe test numune tabakaların deney numunesinin 100 mm x 100 mm ölçülerinde hazırlanması sırasında el sprial'i kullanılmıştır. Sprial gözle görülmeyen mikro çatlaklar, fiber kırılmaları oluşturup test numunelerinin darbe sırasında daha az mukavemet değerine neden olabilmektedir. Kesim işlemlerinde CNC su jeti gibi hassas kesim teknikleri kullanılabilir.
2. Sandviç yapılı plakaların oluşturulmasında Alüminyum petek yapıyla karbon fiber yüzeyler arasındaki epoksi/reçine ile yapıştırma işlemi el yatırma yöntemi kullanarak vakum ortamda bekletilerek yapılmıştır. El ile reçine karışımın sürülmesi sırasında üretilen numuneler arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Homojen bir şekilde reçinenin sürme işlemi yapılabilecek bir yöntem kullanılabilir. Reçine kalınlığını her bölgede eşit olacak biçimde homojen yayılım sağlayacak biçimde farklı yöntemler kullanılabilir.
3. Darbe deneylerinde farklı enerjiler, farklı yükseklik değerleri, farklı vurucu uç geometrileri, farklı hızlarda ve farklı kütleler kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Abrate S, 2011, Impact Engineering of Composite Structures, Abrate S, (Ed.), Springer Science & Business Media, 526, 403 s, USA.
- Akatay A, Bora M Ö, Çoban O, Fidan S, Tuna V, 2015, The Influence of Low Velocity Repeated Impacts on Residual Compressive Properties of Honeycomb Sandwich Structures, Composite Structures, 125, 425-433.
- Akgün Y 2010, Onarılmış Kompozit Plakların Darbe Davranışları, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 113s, İzmir.
- Akkuş H, 2016, Bal Peteği Yapıların Mekanik Davranışlarının Nano Parçacık Takviyeli Yapıştırıcı Kullanılarak Deneysel ve Teorik Olarak Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 127s, Konya.
- Akkuş H, Düzcükoğlu H, Şahin Ö Ş, 2016, Alüminyum Bal Peteği Yapılarında Darbe Mukavemeti Tahmini için Regresyon Modeli Oluşturulması, Erzincan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9-3, 102-111.
- Aktaş M, 2007, Temperature Effect on Impact Behavior of Laminated Composite Plates, Dokuz Eylül University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, PhD Thesis, 136s, İzmir.
- Aminanda Y, Castanié B, Barrau J J, Thevenet P, 2005, Experimental Analysis and Modeling of The Crushing of Honeycomb Cores, Applied Composite Materials, 12: 3-4, 213-227.
- ANSI / ASAE, 1998, Shear and Three-Point Bending Test of Animal Bone, American National Standards Institute.
- Arıcasoy O, 2006, Kompozit Sektör Raporu, İstanbul Ticaret Odası, Aralık 2006, 34s, İstanbul.
- Asadi M, Vollaie A C, Ashmead M, Shirvani H, 2007, Experimental Test and Finite Element Modelling of Pedestrian Headform Impact on Honeycomb Sandwich

- Panel, 18th Engineering Mechanics Division Conference (EMD2007), Blacksburg, Virginia, June 2007.
- Aslan M, Güler O, Alver Ü, 2018, Farklı Yüzey ve Çekirdek Malzemelerine Sahip Sandviç Panel Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24-6, 1062-1068.
- Aslan Z, Karakuzu R., Okutan B, 2003, The Response of Laminated Composite Plates Under Low-Velocity Impact Loading, Composite Structures, 59: 1, 119- 127.
- ASTM D7264 / D7264M – 07, 2015, Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International.
- Aydıncak I, 2007, Investigation of Design and Analysis Principles of Honeycomb Structures, Middle East Technical University, A Thesis Submitted to The Graduate School of Natural and Applied Sciences, MSc Thesis, 196s, Ankara.
- Aydıncak İ, 2007, Investigation of Design And Analyses Principles Of Honeycomb Structures. MSc Thesis. Middle East Technical University The Graduate School of Natural and Applied Sciences, MSc Thesis, 196s, Ankara.
- Basavaraju D H, 2005, Design And Analysis of A Composite Beam for Side Impact Protection of A Sedan, Bachelor of Engineering, Mysore University, Submitted to the Department of Mechanical Engineering And The Faculty of The Graduate School Of Wichita State University In Partial Fulfillment of The Requirements for The Degree of Master of Science, 70s, India.
- Belingardi G, Vadori R, 2003, Influence of The Laminate Thickness In Low Velocity Impact Behavior of Composite Material Plate, Composite Structures, 61: 1, 27-38.
- Berk B, Karakuzu R, İçten B M, Arıkan V, Arman Y, Ataş C, vd., 2016, An Experimental and Numerical Investigation on Low Velocity Impact Behaviour of Composite Plates, Journal of Composite Materials, 50-25, 3551-3559.
- Bezazi A, Boukharouba W, Scarpa F, 2014, Identification and Prediction of Cyclic Fatigue Behaviour in Sandwich Panels, Measurement, 53, 161–170.

- Cabrera N O, Alcock B, Peijs T, 2008, Design and Manufacture of All-PP Sandwich Panels Based on Co-Extruded Polypropylene Tapes, *Composites*, 39, 1183-1195.
- Campbell F C, 2010, *Structural Composite Materials*, ASM International, 630 s, USA.
- Cerniauskas E, Kersys A, Lukosevicius V, Sapragonas J, 2010, Investigation of Anti-Intrusion Beams in Vehicle Side Doors, *Mechanika*, 6, 1392-1207.
- Danacioğlu K, 2013, Özgün Petek Yapılı Sandviç Kompozit Panelin Üretimi ve Düşük Hızlı Darbe Davranışının İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 81s, Kayseri.
- Dazhi W, Guang D, Jinhuan Z, Shilin H, 2006, Car Side Structure Crashworthiness in Pole and Moving Deformable Barrier Side Impacts, *State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy*, Tsinghua University, 11, 725-730.
- Durgun İ, 2014, El Yatırma Yöntemi ile Kompozit Parça Üretimi, 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, 15-16 Mayıs 2014, Çankaya Üniversitesi, Ankara, 283-287.
- Dutton T, Edwards R, Blowey A, 2005, Springback Prediction and Compensation for a High Strength Steel Side Impact Beam, *American Institute of Physics*, 778, 340-344.
- Europe C, 2011, *Composites Europe Highlights Solutions for Mass Production of Automotive Composites*, *Reinforced Plastics*, 55, 45-46.
- Foo C C, Chai G B, Seah L K, 2007, Mechanical Properties of Nomex Material and Nomex Honeycomb Structure, *Composite Structures*, 80: 4, 588-594.
- Foo C, Chai G, Seah L, 2006, Quasi-Static And Low-Velocity Impact Failure of Aluminium Honeycomb Sandwich Panels, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 220: 2, 53-66.

- Foo C, Chai G, Seah L, 2008, A Model to Predict Low-Velocity Impact Response and Damage in Sandwich Composites, *Composites Science and Technology*, 68: 6, 1348-1356.
- Foo C, Seah L, Chai G, 2011, A Modified Energy-Balance Model to Predict Lowvelocity Impact Response for Sandwich Composites, *Composite Structures*, 93: 5, 1385-1393.
- Gama B A, Gillespie J W, 2011, Finite Element Modeling of Impact, Damage Evolution And Penetration of Thick-Section Composites, *International Journal of Impact Engineering*, 38: (4), 181-197.
- Ghadianlou A, Abdullah S B, 2013, Crashworthiness Design of Vehicle Side Door Beams Under Low-Speed Pole Side Impacts, *Thin-Walled Structures*, 67, 25-33.
- Ghelli D, Minak G, 2011, Low Velocity Impact and Compression After Impact Tests on Thin Carbon/Epoxy Laminates, *Composites Part B*, 42, 2067–2079.
- Giglio M, Gilioli A, Manes A, 2011, A Numerical Investigation on Significant Parameters Influencing The Flatwise Compressive Behaviour of A Nomextm Honeycomb, *Procedia Engineering*, 10, 3441-3446.
- Gilioli A, Sbarufatti C, Manes A, Giglio M, 2014, Compression After Impact Test (CAI) On NOMEX™ Honeycomb Sandwich Panels with Thin Aluminum Skins. *Composites Part B: Engineering*, 67, 313-325.
- Goichi B, Nao S, Yoshio A, 2010, Development of Simulation Technology for Impact Behavior of CFRP/Al Alloy Hybrid Beams in Side Collision of Automobiles, *Advanced Composite Materials*, 19, 363-379.
- Grujicic M, Sellappan V, Kotrika S, Arakere G, Obieglo A, Erdmann M, vd., 2009, Suitability Analysis of A Polymer–Metal Hybrid Technology Based On High-Strength Steels And Direct Polymer-To-Metal Adhesion For Use In Load-Bearing Automotive Body-In-White Applications, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1877-1890.
- Guang D, Dazhi W, Jinhuan Z, Shilin H, 2007, Side Structure Sensitivity to Passenger Car Crashworthiness During Pole Side Impact, *State Key Laboratory of*

- Automotive Safety and Energy, Department of Automotive Engineering, Tsinghua University, 12, 290-295.
- Gunes R, Arslan K, 2016, Development of Numerical Realistic Model for Predicting Low-Velocity Impact Response of Aluminium Honeycomb Sandwich Structures, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 18: 1, 95-112.
- Gül B, 2018, Karbon Elyaf Takviyeli Petek Yapılı Sandviç Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Çekirdek Malzemenin Türü ve Kalınlığının Etkisi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 161s, Bursa.
- Gülmez S, 2018, Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, 83s, Denizli.
- Hashin Z, 1981, Fatigue Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, *Journal of Applied Mechanics*, 48: 4, 846-852.
- Heimbs S, Heller S, Middendorf P, Hähnel F, Weiße J, 2009, Low Velocity Impact on CFRP Plates with Compressive Preload: Test And Modelling. *International Journal of Impact Engineering*, 36: 10, 1182-1193.
- Heimbs S, Kilchert S, Fischer S, Klaus M, Baranger E, 2009, Sandwich Structures With Folded Core: Mechanical Modeling and Impact Simulations, SAMPE Europe International Conference, 23-25 March 2009 Paris, 58, 324-331.
- Hong S T, Pan J, Tyan T, Prasad P, 2006, Quasi-Static Crush Behavior of Aluminum Honeycomb Specimens Under Compression Dominant Combined Loads, *International Journal of Plasticity*, 22: 1, 73-109.
- Hosseinzadeh R, Shokrieh M M, Lessard L, 2006, Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts, *Composites Science and Technology*, 66: 1, 61-68.
- Hou W, Zhu F, Lu G, Fang D N, 2010, Ballistic Impact Experiments of Metallic Sandwich Panels with Aluminium Foam Core, *International Journal of Impact Engineering*, 37: 10, 1045-1055.

- Huh H, Lim J H, Song J H, Lee K S, Lee Y W, Han S S, 2003, Side Impact Analysis of an Auto-body with 60TRIP Steel for Side Members, Proceedings of the 12th International Pacific Conference on Automotive Engineering, 12, 681-791.
- Jacob A, 2010, BMW Counts on Carbon Fibre for It's Megacity Vehicle, Reinforced Plastics, 54, 38-41.
- Jenq S T, Mo J J, 1996, Ballistic Impact Response for Two-Step Braided Three-Dimensional Textile Composites, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 34-2, 375-384.
- Jiang C, Shan Z, Zhuang B, Zhang M, Xu Y, 2013, Hot Stamping Die Design for Vehicle Door Beams Using Ultra-High Strength Steel, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13, 1101-1106.
- Justo J, Osuna S, Paris F, 2015, Design of Composite Materials With Improved Impact Properties, Composites Part B: Engineering, 76, 229-234.
- Kang K W, Kim H S, Kim M S, Kim J K, 2008 Strength Reduction Behavior of Honeycomb Sandwich Structure Subjected to Low-Velocity Impact, Materials
- Karakuzu R, Çalık İ C, Deniz M E, 2017, Tabakalı Kompozit Plakaların Darbe Davranışı Üzerine Deniz Suyu Etkisinin Araştırılması, Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 7-2/2, 1-12.
- Karakuzu R, Erbil E, Aktas M, 2010, Impact Characterization of Glass/Epoxy Composite Plates: An Experimental and Numerical Study, Composites Part B: Engineering, 41: 5, 388-395.
- Kıyak B, Kaman M O, 2018, Karbon Fiber Kompozit Sandviç Levhaların Yanal Mukavemet Davranışlarının Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18, 684-691.
- Kim I T, Kang H S, 2014, Development of an Impact Test Device For Light-Weight Automotive Reinforcements, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 15, 5963-5967.
- Kim K J, Won S T, 2008, Effect of Structural Variables on Automotive Body Bumper Impact Beam, International Journal of Automotive Technology, 9, 713-717.

- Koniuszewska A G, Kaczmar J W, 2016, Application of Polymer Based Composite Materials In Transportation. Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology, 32-1, 1.
- Lee H W, Hwang J B, Kim S U, Kim W H, Yoo S J, Lim H W, vd., 2010, Construction of Vehicle Door Impact Beam Using Hot Stamping Technology, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, 6, 797-803.
- Lee I C, Lee T K, Jang D H, 2015, Development Process of Side Impact Beam for Automotive Light-Weighting Door using Sheet Type, Transactions of Materials Processing, 24, 130-137.
- Li M F, Chiang T S, Tseng J H, Tsai C N, 2014, Hot Stamping of Door Impact Beam, 11th International Conference on Technology of Plasticity, Procedia Engineering, 81, 1786-1791.
- Lim T S, Lee D G, 2002, Mechanically Fastened Composite Side-Door Impact Beams For Passenger Cars Designed For Shear-Out Failure Modes, Mechanical Design Laboratory with Advanced Materials, Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, South Korea, Composite Structures, 56, 211–221.
- Liu L, Wang H, Guan Z, 2015, Experimental and Numerical Study on The Mechanical Response of Nomex Honeycomb Core Under Transverse Loading, Composite Structures, 121, 304-314.
- Long S, Yao X, Zhang X, 2015, Delamination Prediction In Composite Laminates Under Low-Velocity Impact, Composite Structures, 132, 290-298.
- Lopes C, Seresta O, Coquet Y, Gürdal Z, Camanho P, Thuis B, 2009, Lowvelocity Impact Damage on Dispersed Stacking Sequence Laminates, Part I: Experiments, Composites Science and Technology, 69: 7, 926-936.
- Mackert G A, Hirche C, Harhaus H, Kotsougiani D, Hoener B, Kneser U, vd., 2014, A Novel Device for Resistance-Free Biomechanical Testing of The Metaphysis of Long Bones, BMC Musculoskeletal Disorders, 15: 245.

- Maio L, Monaco E, Ricci F, Lecce L, 2013, Simulation of Low Velocity Impact on Composite Laminates with Progressive Failure Analysis, *Composite Structures*, 103, 75-85.
- Manes A, Gilioli A, Sbarufatti C, Giglio M, 2013, Experimental and Numerical Investigations of Low Velocity Impact on Sandwich Panels, *Composite Structures*, 99, 8-18.
- Menna C, Zinno A, Asprone D, Prota A, 2013, Numerical Assessment of The Impact Behavior of Honeycomb Sandwich Structures, *Composite Structures*, 106, 326-339.
- Meo M, Vignjevic R, Marengo G, 2005, The Response of Honeycomb Sandwich Panels Under Low-Velocity Impact Loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47: 9, 1301-1325.
- Mili F, Necib B, 2001, Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates Under Low Velocities, *Composite Structures*, 51: 3, 237-244.
- Mili F, Necib B, 2001, Impact Behaviour of Cross-Ply Laminated Composite Plates Under Low Velocities, *Composite Structures*, 51, 273-244.
- Mines R., Worrall C, Gibson A, 1998, Low Velocity Perforation Behaviour of Polymer Composite Sandwich Panels, *International Journal of Impact Engineering*, 21: 10, 855-879.
- Mishra A, Naik N, 2010, Failure Initiation In Composite Structures Under Lowvelocity Impact, *Analytical Studies. Composite Structures*, 92: 2, 436-444.
- Mitrevski T, Marshall I, Thomson R, Jones R, Whittingham B, 2005, The Effect of Impactor Shape on The Impact Response of Composite Laminates, *Composite Structures*, 67: 2, 139-148.
- Naik N K, Meduri S, Sekher Y C, 2000, Polymer Matrix Woven Fabric Composites Subjected to Low Velocity Impact, Part II-Effect of Plate Thickness, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 19-13, 1031-1055.
- Othman A, Barton D, 2008, Failure Initiation and Propagation Characteristics of Honeycomb Sandwich Composites, *Composite Structures*, 85: 2, 126-138.

- Özer H, 2015, Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 124s, Bursa.
- Park J, Ha S, Kang K, Kim C, Kim H, 2008, Impact Damage Resistance of Sandwich Structure Subjected to Low Velocity Impact. *Journal of Materials Processing Technology*, 201: 1, 425-430.
- Pehlivanoglu Y V, 2005, Havacılıkta Kullanılan Petek Yapılar, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 2-2, 37-41.
- Petras A, Sutcliffe M, 1999, Failure Mode Maps for Honeycomb Sandwich Panels, *Composite Structures*, 44: 4, 237-252.
- Ponnadai S, 2018, Analysis of Side Impact Beams in Car Side Door, Kaunas University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Master's Final Degree Project, 73s, Kaunas.
- Reid S R, Zhou G, 2000, Impact Behaviour of Fibre-Reinforced Composite Materials And Structures, CRC Press, Woodhead Pub, 303s, United States of America.
- Sayer M, 2009, Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 134s, Denizli.
- Science and Engineering: A*, 483, 333-335.
- Shu D W, Zhou W, Ma G W, 2007, Tensile Mechanical Properties of AM50A Alloy by Hopkinson Bar, *Key Engineering Materials*, 340, 247-254.
- Stewart R, 2009, Carbon Fibre Composites Poised for Dramatic Growth, *Reinforced Plastics*, 53, 16-21.
- Stocchi A, Colabella L, Cisilino A, Alvarez V, 2014, Manufacturing and Testing of A Sandwich Panel Honeycomb Core Reinforced with Natural-Fiber Fabrics, *Materials and Design*, 55, 394-403.
- Strano M, Villa A, Mussi V, 2013, Design and Manufacturing of Anti-Intrusion Bars Made Of Aluminium Foam Filled Tubes, 6, 153-164.
- Štrumberger N, Gospočić A, Bartulić Č, 2005, Polymeric Materials In Automobiles. *PROMET-Traffic and Transportation*, 17-3, 149-160.

- Şahin Y, 2000, Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler, Şahin Y (Ed.), Kompozit Malzemelere Giriş, (33-35), Gazi Kitabevi, 424s, Ankara.
- Tan C Y, Akil H M, 2012, Impact Response Of Fiber Metal Laminate Sandwich Composite Structure With Polypropylene Honeycomb Core, Composites Part B, Engineering, 43, 3, 1433-1438.
- Tarakçılar A R, Topçu M, Taşgetiren S, 1995, Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri, Mühendis ve Makine, 36, 422.
- Taşyürek M, 2014, Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız  $\pm 55^\circ$  Filaman Sarım CNT Takviyeli CTP Kompozit Boruların Mekanik Özelliklerinin ve İç Basınç Etkisi Altındaki Yorulma Davranışının Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 147s, Konya.
- Teng T L, Chang K C, Nguyen T H, 2008, Crashworthiness Evaluation of Side- Door Beam of Vehicle, Technische Mechanika, 15, 268-278.
- Tiganis B E, Shanks R A, Long Y, 1996, Effects of Processing on The Microstructure Melting Behaviour and Melting Temperature of Polypropylene, J Appl Polym Sci, 59, 663-671.
- Torre L, Kenny J, 2000, Impact Testing and Simulation of Composite Sandwich Structures for Civil Transportation, Composite Structures, 50: 3, 257-267.
- Tsuchida T, Yamamoto S, Isomura K, 2003, The Application Of The Damage & Fracture Material Model To Crashworthiness Evaluations For Aluminum Cars, 4th European LS-DYNA Users Conference 27 October 2003, Japan
- Turgut T, Kayran A, Alemdaroğlu N, Ceylan M, 2007, Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Malzemeden Yapı Üretimi Örnek Bir Havacılık Uygulaması, Mühendis ve Makina, 566, 1-8.
- Türkmen İ, 2012, Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 140s, Manisa.
- Wagih A, Maimí P, Blanco N, Costa J, 2016, A Quasi-Static Indentation Test To Elucidate The Sequence of Damage Events In Low Velocity Impacts on

- Composite Laminates, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 82, 180- 189.
- Wang J, Shia C, Yanga N, Suna H, Liub Y, Song B, 2018, Strength, Stiffness, and Panel Peeling Strength of Carbon Fiber-Reinforced Composite Sandwich Structures With Aluminum Honeycomb Cores for Vehicle Body. Composite Structures, 2018,184, 1189–1196.
- Wu E, Jiang W S, 1997, Axial Crush of Metallic Honeycombs, International Journal of Impact Engineering, 19: 5, 439-456.
- Yahaya M A, Ruan D, Lu G, Dargusch M S, 2015, Response of Aluminium Honeycomb Sandwich Panels Subjected to Foam Projectile Impact, An Experimental Study, International Journal of Impact Engineering, 75, 100-109.
- Yalçın E, 2012, Farklı Kumaş ve Farklı Yöntmelerle Üretilmiş CTP Kompozitlerin Balistik Davranışlarının İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Üretim Programı, Doktora Tezi, 162s, İstanbul.
- Yamashita M, Gotoh M, 2005, Impact Behavior of Honeycomb Structures with Various Cell Specifications-Numerical Simulation and Experiment, International Journal of Impact Engineering, 32: 1, 618-630.
- Yang L, Wu Z, Gao D, Liu X, 2016, Microscopic Damage Mechanisms of Fibre Reinforced Composite Laminates Subjected to Low Velocity Impact. Computational Materials Science, 111, 148-156.
- Yiğit A, 2010, Petek Yapılı Sandviç Yapıların Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 93s, Erzurum.
- Yoon T H, Kim H, Heo C, Kwon J, 2016, An Experiment and FE Simulation for The Development of a SPFC1180 AHSS One-Body Door Impact Beam about a Car Side Collision, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 17, 81-89.

- Zhang X, Zhang H, Wen Z, 2014, Experimental and Numerical Studies on The Crush Resistance of Aluminum Honeycombs with Various Cell Configurations, International Journal of Impact Engineering, 66, 48-59.
- Zhou G, Hill M D, 2009, Impact Damage and Energy Absorbing Characteristics and Residual In-Plane Compressive Strength of Honeycomb Sandwich Panels, Journal of Sandwich Structures and Materials, 11, 329-356.
- Zhou J, Wang B, Lin J, Fu L, 2013, Optimization of Aluminum Alloy Anti-Collision Side Beam Hot Stamping Process Using A Multi-Objective Genetic Algorithm, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 13, 401-411.
- Zhou J, Wang B, Lin J, Fu L, Ma W, 2014, Forming Defects in Aluminum Alloy Hot Stamping of Side-Door Impact Beam, Trans. Nonferrous Met. Soc., China, 24, 3611-3620.
- Zinno A, Prota A, Di Maio E, Bakis C, 2011, Experimental Characterization of Phenolic-Impregnated Honeycomb Sandwich Structures For Transportation Vehicles, Composite Structures, 93: 11, 2910-2924.

### **İnternet Kaynakları**

- 1-<http://www.turkchem.net/kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri.html> 03.02.2020
- 2-<http://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2017/03/Composites-Turkey-08.pdf>, 01.04.2020
- 3-<http://www.compositesworld.com/articles/is-the-bmw-7-series-the-future-of-autocomposites>, 09.02.2020
- 4-<https://docplayer.biz.tr/11873459-4-kompozit-uretim-yontemleri.html>, 11.12.2019
- 5-<https://www.kompozitshop.com/karbon-fiber-elyaf-pultruzyon-borular-nasil-uretilir>, 05.01.2020
- 6- <https://www.poliya.com/tr/fital-sarma>, 14.02.2020
- 7-<https://insapedia.com/bal-petegi-honeycomb-kompozit-paneller-ve-ozellikleri/>, 01.02.2020
- 8-[https://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/665a464f796b668\\_ek.pdf?dergi=1415](https://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/665a464f796b668_ek.pdf?dergi=1415), 14.04.2020

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ercan ŞİMŞİR  
Doğum Yeri ve Tarihi : KARAMAN 01.05.1989  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon / e-posta) : 0 546 970 2261

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Temizel-Ünlü Bilgisayar Anadolu Meslek Lisesi (2003–2008)  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Resim ve  
Konstrüksiyon Öğretmenliği (2008 – 2012)  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü,  
(2014 – 2015).  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Makine  
Mühendisliği ABD, (2013 – 2015)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., İş Güvenliği  
ABD, (2013 – 2015)  
Doktora : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Otomotiv  
Mühendisliği ABD, (2015– 2020)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Afyon Kocatepe Üniversitesi/Sultandagı MeslekYüksekokulu /  
Ulaştırma Hizmetleri Bölümü (2016 – Devam Ediyor)

Yayınları (SCI ve diğer) :

### Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

BAYRAKÇEKEN Hüseyin, SIMSIR Ercan, BASPINAR M. Serhat, ATLI İ. Sınan  
(2019). Experimental Investigation on the Pulse Behavior of Polymeric Matrix  
Composites Used in Vehicles. International Journal of Science and Research  
(IJSR), 8(6), 1400-1406.

**Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:**

BAYRAKÇEKEN Hüseyin, ÇENGELCI Emin, SIMSIR Ercan, KUNT Mehmet (2018). Farklı Motor Türlerinin Tasıt İç Gürültüsüne Etkisi. Karabük Sempozyum.

ÇENGELCI Emin, BAYRAKÇEKEN Hüseyin, SIMSIR Ercan (2019). Türkiye’de İş Makineleri Operatörlüğü ve Eğitim Sisteminin İncelenmesi. UBEK-ICSE 2019 III. International Congress on Science and Education, 1(1), 1098-1103.

GÖKÇE Barış, SIMSIR Ercan, GÜRBÜZ Rıza (2016). Design and Improvement of Route Plans with Multiple Automated Guided Vehicles for Mechatronics Education. International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS).

MUTLU İbrahim, ERÇEK Emrah, ÇENGELCI Emin, SIMSIR Ercan, KUNT Mehmet, YAVUZ İbrahim (2018). Türkiye’de Doğalgazın Otomotiv Yakıtı Olarak Kullanımı ve Çin Örneği. 14th International Combustion Symposium.

MUTLU İbrahim, SIMSIR Ercan, AKBULUT Furkan (2018). Mühendislik Eğitiminde Yeni Yaklaşımlar. International Congress on Science and Education 2018.

MUTLU İbrahim, SIMSIR Ercan, AKBULUT Furkan (2018). Üç Boyutlu Yazıcıların Mühendislik Eğitiminin Gelişmesindeki Yeri. International Congress on Science and Education, 531-534.

SIMSIR Ercan, BAYRAKÇEKEN Hüseyin (2018). Hafif Alasımlı Kompozit Malzemelerin Otomotiv Sektöründeki Önemi. 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC’18), 1(1), 69-70.

SIMSIR Ercan, BAYRAKÇEKEN Hüseyin, ÇENGELCI Emin (2019). Türkiye’de Otobüs Kaptanlığı ve Eğitim Sisteminin İncelenmesi. UBEK-ICSE 2019 III. International Congress on Science and Education, 1(1), 1092-1097.

**Projelerde Yaptığı Görevler:**

Tasıtlarda Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Yan Darbe Kırışlarının Tasarımı ve Analizleri, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı, (ULUSAL).