



**T.C.**  
**BATMAN ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**GRAFEN KATKILI HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERDEN**  
**ÜRETİLMİŞ SİLİNDİRİK KUTULARIN EZİLME**  
**DAVRANIŞLARI, HASAR ANALİZLERİ VE YAŞLANMA**  
**ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Baran ERKEK**

**Ağustos-2024**  
**BATMAN**

**T.C.**  
**BATMAN ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**GRAFEN KATKILI HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERDEN**  
**ÜRETİLMİŞ SİLİNDİRİK KUTULARIN EZİLME**  
**DAVRANIŞLARI, HASAR ANALİZLERİ VE YAŞLANMA**  
**ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Baran ERKEK**

**Danışman**  
**Prof. Dr. Hamit ADİN**

**Ağustos-2024**

**BATMAN**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Baran ERKEK tarafından hazırlanan “Grafen Katkılı Hibrit Kompozit Malzemelerden Üretilmiş Silindirik Kutuların Ezilme Davranışları, Hasar Analizleri ve Yaşlanma Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 27/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

#### Danışman

Prof. Dr. Hamit ADİN

#### 2.Danışman

Doç. Dr. Ertan KÖSEDAĞ

#### Üye

Prof. Dr. M. Emin DENİZ

#### Üye

Doç. Dr. Şehmus BADAY

#### Üye

Doç. Dr. Tolga TOPKAYA

#### Üye

Doç. Dr. İsmail Yasin SÜLÜ

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

Bu tez çalışması Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 10489 nolu proje ile desteklenmiştir.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Baran ERKEK

27/08/2024

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### GRAFEN KATKILI HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERDEN ÜRETİLMİŞ SİLİNDİRİK KUTULARIN EZİLME DAVRANIŞLARI, HASAR ANALİZLERİ VE YAŞLANMA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Baran ERKEK

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamit ADİN

2024, 140 Sayfa

Jüri

Danışman Prof. Dr. Hamit ADİN  
2. Danışman Doç. Dr. Ertan KÖSEDAĞ  
Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ  
Prof. Dr. M. Emin DENİZ  
Doç. Dr. Tolga TOPKAYA  
Doç. Dr. Şehmus BADAY  
Doç. Dr. İsmail Yasin SÜLÜ

Otomotiv sektöründe yolcu güvenliğini sağlamak ve araç bütünlüğünü korumak için birçok çalışma yapılmaktadır. Oluşan kazalar sırasında yolcuların güvenliğini sağlayarak olası yaralanmaları önlemek veya ölümlerle sonuçlanmasını engellemek için çalışmalar süre gelmektedir. Bunun için kaza anında ortaya çıkan enerjiyi soğuracak malzemeler önem kazanmaktadır. Burada enerji soğurma özelliği kadar önemli olan kullanılacak olan malzemenin hafifliği de önemlidir. Hafiflikleri kompozit malzemelerin araçlarda çarpışma kutuları olarak kullanılmasında önem kazandırmaktadır.

Bu çalışmada, 6 farklı tip kompozit silindirik kutu ve bu kutulara 2 farklı oranda (%0,25 ve %0,50) grafen takviyesi ile üretilen aynı zamanda 2 farklı oranda yaşlandırmaya tabi tutulan (60 °C saf su içerisinde 500 saat ve 1000 saat) kompozitler yani toplamda 54 farklı numune yarı statik basma testine tabi tutulmuşlardır. Numuneler vakum infüzyon yöntemi ile epoksi reçine matrisli cam fiber, aramid fiber, karbon fiber ve bu fiberlerin hibridizasyonu olan içten dışa doğru aramid-karbon-cam, karbon-cam-aramid, cam-aramid-karbon olarak üretilmiştir. Basma testleri 2mm/dk hızla yapılmıştır. Testler sonrasında takviyeli, takviyesiz ve yaşlandırılmış numunelerin maksimum tepe kuvvetleri enerji soğurma özellikleri ve spesifik enerji soğurma özellikleri incelenmiş, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. En yüksek maksimum tepe kuvveti, enerji soğurma özelliği ve spesifik enerji soğurma özelliği epoksi reçine matrisli karbon fiber kompozit silindirik kutuda tespit edilmiştir. Grafen takviyesinin epoksi reçine matrisli aramid fiberde maksimum tepe kuvveti, enerji soğurma ve spesifik enerji soğurma üzerinde kayda değer derecede etkili olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit, Grafen Takviyesi, Silindirik Kutu, Yaşlandırma

## **ABSTRACT**

### **Ph.D THESIS**

## **INVESTIGATION OF THE CRUSHING BEHAVIOR, DAMAGE ANALYSES AND AGING EFFECT OF CYLINDRICAL BOXES MANUFACTURED FROM GRAPHENE ADDED HYBRID COMPOSITE MATERIALS**

**Baran ERKEK**

**Batman University Graduate Education Institute**

**Mechanical Engineering Department of Science**

**Advisor: Prof. Dr. Hamit ADİN**

**2024, 140 Pages**

**Jury**

**Advisor: Prof. Dr. Hamit ADİN**

**2. Advisor Assoc. Prof. Dr. Ertan KÖSEDAĞ**

**Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ**

**Prof. Dr. M. Emin DENİZ**

**Assoc. Prof. Dr. Tolga TOPKAYA**

**Assoc. Prof. Dr. Şehmus BADAY**

**Assoc. Prof. Dr. İsmail Yasin SÜLÜ**

In the automotive sector, many studies are being carried out to ensure passenger safety and preserve vehicle integrity. Studies are ongoing to ensure passenger safety during accidents and to prevent possible injuries or deaths. For this reason, materials that will absorb the energy generated during an accident are gaining importance. Here, the lightness of the material to be used is as important as the energy absorption feature. Their lightness makes composite materials important for use as crash boxes in vehicles.,

In this study, 6 different types of composite cylindrical boxes and composites produced with 2 different rates (0.25% and 0.50%) of graphene reinforcement in these boxes and also subjected to 2 different rates of aging (500 hours and 1000 hours in 60 °C pure water), i.e. a total of 54 different samples, were subjected to semi-static compression tests. The specimens were produced by vacuum infusion method with epoxy resin matrix as glass fibre, aramid fibre, carbon fibre and hybridisation of these fibres from inside to outside as aramid-carbon-glass, carbon-glass-aramid, glass-aramid-carbon. Compression tests were carried out at a speed of 2mm/min. After the tests, peak forces, energy absorption properties and specific energy absorption properties of reinforced, unreinforced and aged samples were analysed and the results obtained were interpreted. The highest maximum peak force, energy absorption property and specific energy absorption property were determined in the carbon fiber composite cylindrical box with epoxy resin matrix. Graphene reinforcement was found to be significantly effective on peak force, energy absorption and specific energy absorption in epoxy resin matrix aramid fibre.

**Keywords:** Composite, Cylindrical Box, Graphene Reinforcement, Aging

## ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmalarımın her aşamasında katkılarını esirgemeyen, her türlü imkanı sunan ve engin bilgileriyle rehberlik eden danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hamit ADİN'e ve ikinci danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ertan KÖSEDAĞ'a, değerli zamanlarını ayırıp çalışmamı değerlendirip, bilgileriyle yönlendirip son haline getirmemde emeği geçen tez jürisinde bulunan Sayın Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ, Sayın Prof. Dr. M. Emin DENİZ, Sayın Doç. Dr. İsmail Yasin SÜLÜ, Sayın Doç. Dr. Tolga TOPKAYA ve Sayın Doç. Dr. Şehmus BADAY'a, çalışmalarına sağladığı bütçe ile destek olan Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinatörlüğü'ne, bu zorlu süreçte çalışmalarımı sabır ve inançla destekleyen eşim Öğr. Gör. A. Didem EROL ERKEK ve çalışmalarım sırasında zamanından çaldığım oğlum Erkam Sina ERKEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Baran ERKEK  
BATMAN-2024

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                                        |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ÖZET .....</b>                                                                                                                      | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                                                                                   | <b>v</b>   |
| <b>ÖNSÖZ .....</b>                                                                                                                     | <b>vi</b>  |
| <b>İÇİNDEKİLER .....</b>                                                                                                               | <b>vii</b> |
| <b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>                                                                                                          | <b>ix</b>  |
| <b>ÇİZELGELER LİSTESİ .....</b>                                                                                                        | <b>xiv</b> |
| <b>SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....</b>                                                                                                   | <b>xv</b>  |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                                                                  | <b>1</b>   |
| 1.1. Kompozit Malzemeler .....                                                                                                         | 1          |
| 1.2. Çarpışma Kutuları .....                                                                                                           | 2          |
| 1.3. Grafen.....                                                                                                                       | 3          |
| <b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>                                                                                                   | <b>5</b>   |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>                                                                                                      | <b>18</b>  |
| 3.1. Kompozit Malzemelerin Hazırlanması.....                                                                                           | 18         |
| 3.2. Yarı Statik Basma Testi .....                                                                                                     | 27         |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....</b>                                                                                         | <b>28</b>  |
| 4.1. Basma Test Sonuçları .....                                                                                                        | 28         |
| 4.1.1. Grafen takviyesiz ve hidrotermal olarak yaşlandırılmamış (S1 – S6) tekil numunelerin test sonuçları.....                        | 28         |
| 4.1.2. % 0,25 grafen takviyeli ve hidrotermal olarak yaşlandırılmamış (S7 -S12) numunelerin test sonuçları.....                        | 33         |
| 4.1.3. %0,50 grafen takviyeli ve hidrotermal olarak yaşlandırılmamış (S13 - S18) numunelerin test sonuçları.....                       | 40         |
| 4.1.4. Grafen takviyesiz ve hidrotermal olarak 500 saat yaşlandırılmış (S19 – S24) numunelerin test sonuçları.....                     | 44         |
| 4.1.5. %0,25 Grafen ile takviye edilmiş ve 500 saat süre ile hidrotermal yaşlandırılmamış (S25 – S30) numunelerin test sonuçları ..... | 50         |
| 4.1.6. %0,50 Grafen ile takviye edilmiş ve 500 saat süre ile hidrotermal yaşlandırılmış (S31 – S36) numunelerin test sonuçları .....   | 56         |
| 4.1.7. Grafen takviyesiz ve hidrotermal olarak 1000 saat yaşlandırılmış (S37 – S42) numunelerin test sonuçları.....                    | 62         |
| 4.1.8. % 0,25 Grafen ile takviye edilmiş ve 1000 saat süre ile hidrotermal yaşlandırılmış (S43 – S48) numunelerin test sonuçları ..... | 68         |
| 4.1.9. %0,50 Grafen ile takviye edilmiş ve 1000 saat süre ile hidrotermal yaşlandırılmış (S49 – S54) numunelerin test sonuçları .....  | 73         |
| 4.2. Numune Test Sonuçlarının Birbirleriyle Karşılaştırılması.....                                                                     | 79         |

|                                                                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.1. % 0,25 grafen ilavesinin etkileri.....                                                                             | 79         |
| 4.2.2. % 0,50 grafen ilavesinin etkileri.....                                                                             | 82         |
| 4.2.3. 500 saat hidrotermal yaşlanmanın grafensiz numuneler üzerindeki etkileri .                                         | 86         |
| 4.2.4. 1000 saat hidrotermal yaşlanmanın grafensiz numuneler üzerindeki etkileri                                          | 88         |
| 4.2.5. 500 saat hidrotermal yaşlanmanın %0,25 grafen takviyeli numuneler üzerindeki etkileri.....                         | 92         |
| 4.2.7. 500 saat hidrotermal yaşlanmanın %0,50 grafen takviyeli numuneler üzerindeki etkileri.....                         | 97         |
| 4.2.8. 1000 saat hidrotermal yaşlanmanın %0,50 grafen takviyeli numuneler üzerindeki etkileri.....                        | 100        |
| 4.2.9. Cam fiberin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları.....                                    | 103        |
| 4.2.10. Aramid fiberin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları.....                                | 106        |
| 4.2.11. Karbon fiberin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları.....                                | 109        |
| 4.2.12. Hibrit S4 (aramid – karbon – cam) numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları..... | 112        |
| 4.2.13. Hibrit S5 (karbon – cam - aramid) numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları..... | 115        |
| 4.2.14. Hibrit S6 (cam – aramid - karbon) numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları..... | 117        |
| 4.2.15. Maksimum tepe kuvvetine kadar numunelerin enerji absorpsiyonlarının ve spesifik enerji absorpsiyonları.....       | 120        |
| <b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                                                                                       | <b>133</b> |
| 5.1. Sonuçlar.....                                                                                                        | 133        |
| 5.1.1. Yarı statik basma sonuçları .....                                                                                  | 133        |
| 5.2. Öneriler .....                                                                                                       | 134        |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                                                     | <b>135</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                                                     | <b>140</b> |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Çarpışma kutusunun araçtaki konumu.....                                                                                                                                                                  | 3  |
| Şekil 1.2. Hidrotermal yaşlandırma işlemi.....                                                                                                                                                                      | 4  |
| Şekil 3.1. Cam elyaf kumaş.....                                                                                                                                                                                     | 18 |
| Şekil 3.2. Aramid elyaf kumaş.....                                                                                                                                                                                  | 19 |
| Şekil 3.3. Karbon elyaf kumaş.....                                                                                                                                                                                  | 19 |
| Şekil 3.4. Grafen nano platelet.....                                                                                                                                                                                | 19 |
| Şekil 3.5. Ultrasonik karıştırma işlemi.....                                                                                                                                                                        | 20 |
| Şekil 3.6. Grafen takviye işlemi.....                                                                                                                                                                               | 21 |
| Şekil 3.7. Karton masuraya sarma işlemi.....                                                                                                                                                                        | 21 |
| Şekil 3.8. Epoksi reçine verilen numune.....                                                                                                                                                                        | 22 |
| Şekil 3.9. Epoksi reçine verilen numune.....                                                                                                                                                                        | 22 |
| Şekil 3.10. a) Kesme işlemlerinin yapıldığı Metkon Metacut 250 cihazı b) Numunenin kesme işlemi.....                                                                                                                | 23 |
| Şekil 3.11. Kesimi tamamlanmış numuneler a) Takviyesiz numuneler b) Grafen Takviyeli numuneler .....                                                                                                                | 27 |
| Şekil 3.12. Basma test cihazı .....                                                                                                                                                                                 | 27 |
| Şekil 4.1. S1-S6 numunelerinin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....                                                                                                                                                | 29 |
| Şekil 4.2. S1- S6 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği .....                                                                                                                                                       | 31 |
| Şekil 4.3. S1-S6 numunelerinin deney sırasında ki değişimi ve nihai ezilmiş şekilleri: a) GFRP b) AFRP c) CFRP d) ACGFRP e) CGAFRP e) GACFRP .....                                                                  | 32 |
| Şekil 4.4. S1-S6 numunelerin nihai ezilmiş şekilleri: a) GFRP b) AFRP c) CFRP d) ACGFRP e) CGAFRP e) GACFRP .....                                                                                                   | 33 |
| Şekil 4.5. % 0,25 grafen takviyeli hidrotermal yaşlandırılmamış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....                                                                                                   | 34 |
| Şekil 4.6. S7 – 12 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği.....                                                                                                                                                       | 37 |
| Şekil 4.7. S7 – 12 numunelerinin deney sırasındaki boy değişimleri ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25GNP b) AFRP %0,25GNP c) CFRP %0,25GNP d) ACGFRP %0,25GNP e) CGAFRP %0,25GNP e) GACFRP %0,25GNP..... | 38 |
| Şekil 4.8. S7 – 12 numunelerinin nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25GNP b) AFRP %0,25GNP c) CFRP %0,25GNP d) ACGFRP %0,25GNP e) CGAFRP %0,25GNP e) GACFRP %0,25GNP .....                                     | 39 |
| Şekil 4.9. % 0,50 grafen takviyeli hidrotermal yaşlandırılmamış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....                                                                                                   | 40 |
| Şekil 4.10. S13 - S18 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği .....                                                                                                                                                   | 42 |
| Şekil 4.11. S13 – 18 numunelerinin deney sırasında boy değişimleri ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50GNP b) AFRP %0,50GNP c) CFRP %0,50GNP d) ACGFRP %0,50GNP e) CGAFRP %0,50GNP e) GACFRP %0,50GNP..... | 43 |
| Şekil 4.12. S13 – 18 nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50GNP b) AFRP %0,50GNP c) CFRP %0,50GNP d) ACGFRP %0,50GNP e) CGAFRP %0,50GNP e) GACFRP %0,50GNP .....                                                 | 44 |
| Şekil 4.13. 500 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....                                                                                                    | 45 |
| Şekil 4.14. S19 - S24 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği .....                                                                                                                                                   | 47 |
| Şekil 4.15. S19 – 24 numunelerinin deney sırasında boy değişimleri ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP H500 b) AFRP H500 c) CFRP H500 d) ACGFRP H500 e) CGAFRP H500 e) GACFRP H500 .....                        | 48 |

|                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.16.</b> S19 – 24 numunelerinin nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP H500 b) AFRP H500 c) CFRP H500 d) ACGFRP H500 e) CGAFRP H500 e) GACFRP H500.....                                                                                               | 49 |
| <b>Şekil 4.17.</b> %0,25 grafen ile takviye edilmiş 500 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri .....                                                                                                     | 50 |
| <b>Şekil 4.18.</b> S25 - S30 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği .....                                                                                                                                                                                      | 53 |
| <b>Şekil 4.19.</b> S25 – S30 numunelerinin deney sırasında boy değişimi ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25GNP H500 b) AFRP %0,25GNP H500 c) CFRP %0,25GNP H500 d) ACGFRP %0,25GNP H500 e) CGAFRP %0,25GNP H500 e) GACFRP %0,25GNP H500. ....       | 54 |
| <b>Şekil 4.20.</b> S25 – S30 numunelerinin ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25 GNP H500 b) AFRP %0,25GNP H500 c) CFRP %0,25GNP H500 d) ACGFRP %0,25GNP H500 e) CGAFRP %0,25GNP H500 e) GACFRP %0,25GNP H500. ....                                   | 55 |
| <b>Şekil 4.21.</b> %0,50 grafen ile takviye edilmiş 500 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri .....                                                                                                     | 56 |
| <b>Şekil 4.22.</b> S31 - S36 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği .....                                                                                                                                                                                      | 59 |
| <b>Şekil 4.23.</b> S31 – S36 numunelerinin deney sırasında boy değişimi ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50GNP H500 b) AFRP %0,50GNP H500 c) CFRP %0,50GNP H500 d) ACGFRP %0,50GNP H500 e) CGAFRP %0,50GNP H500 e) GACFRP %0,50GNP H500. ....       | 60 |
| <b>Şekil 4.24.</b> S31 – S36 numunelerinin nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50GNP H500 b) AFRP %0,50GNP H500 c) CFRP %0,50GNP H500 d) ACGFRP %0,50GNP H500 e) CGAFRP %0,50GNP H500 e) GACFRP %0,50GNP H500. ....                                       | 61 |
| <b>Şekil 4.25.</b> 1000 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....                                                                                                                                      | 62 |
| <b>Şekil 4.26.</b> S37 -S42 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği .....                                                                                                                                                                                       | 65 |
| <b>Şekil 4.27.</b> S37 – S42 numunelerinin deney sırasında boy değişimi nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP H1000 b) AFRP H1000 c) CFRP H1000 d) ACGFRP H1000 e) CGAFRP H1000 e) GACFRP H1000.....                                                           | 66 |
| <b>Şekil 4.28.</b> S37 – S42 numunelerinin nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP H1000 b) AFRP H1000 c) CFRP H1000 d) ACGFRP H1000 e) CGAFRP H1000 e) GACFRP H1000.....                                                                                        | 67 |
| <b>Şekil 4.29.</b> %0,25 grafen ile takviye edilmiş 1000 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri .....                                                                                                    | 68 |
| <b>Şekil 4.30.</b> S43 – S48 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği.....                                                                                                                                                                                       | 70 |
| <b>Şekil 4.31.</b> S43 – S48 numunelerinin deney sırasında boy değişimleri nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25GNP H1000 b) AFRP %0,25GNP H1000 c) CFRP %0,25GNP H1000 d) ACGFRP %0,25GNP H1000 e) CGAFRP %0,25GNP H1000 e) GACFRP %0,25GNP H1000. .... | 71 |
| <b>Şekil 4.32.</b> S43 – S48 numunelerinin nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25GNP H1000 b) AFRP %0,25GNP H1000 c) CFRP %0,25GNP H1000 d) ACGFRP %0,25GNP H1000 e) CGAFRP %0,25GNP H1000 e) GACFRP %0,25GNP H1000. ..                                   | 72 |
| <b>Şekil 4.33.</b> %0,50 grafen ile takviye edilmiş 1000 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri .....                                                                                                    | 73 |
| <b>Şekil 4.34.</b> S49 – S54 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği.....                                                                                                                                                                                       | 76 |
| <b>Şekil 4.35.</b> S49 – S54 numunelerinin deney sırasında boy değişimi ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50 GNP H1000 b) AFRP %0,50GNP H1000 c) CFRP %0,50GNP H1000 d) ACGFRP %0,50GNP H1000 e) CGAFRP %0,50GNP H1000 e) GACFRP %0,50GNP H1000..... | 77 |
| <b>Şekil 4.36.</b> S49 – S54 numunelerinin deney sırasında boy değişimi ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50 GNP H1000 b) AFRP %0,50GNP H1000 c) CFRP                                                                                                |    |

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| %0,50GNP H1000 d) ACGFRP %0,50GNP H1000 e) CGAFRP %0,50GNP H1000 e) GACFRP %0,50GNP H1000.....                                               | 78  |
| <b>Şekil 4.37.</b> %0,25 grafen ilavesinin maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki.....                                                  | 80  |
| <b>Şekil 4.38.</b> %0,25 grafen ilavesi ile elde enerji absorbsiyonların karşılaştırılması.....                                              | 81  |
| <b>Şekil 4.39.</b> %0,25 grafen ilavesi ile elde edilen spesifik enerji absorbsiyonlarının karşılaştırılması.....                            | 82  |
| <b>Şekil 4.40.</b> %0,50 grafen ilavesinin maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki.....                                                  | 83  |
| <b>Şekil 4.41.</b> %0,50 grafen ilavesi ile elde enerji absorbsiyonların karşılaştırılması.....                                              | 84  |
| <b>Şekil 4.42.</b> %0,50 grafen ilavesi ile elde edilen spesifik enerji absorbsiyonlarının karşılaştırılması.....                            | 85  |
| <b>Şekil 4.43.</b> 500 saat hidrotermal yaşlanmanın maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki. ....                                        | 86  |
| <b>Şekil 4.44.</b> 500 saat hidrotermal yaşlandırılmış numunelerin enerji absorbsiyonlarının karşılaştırılması.....                          | 87  |
| <b>Şekil 4.45.</b> 500 saat yaşlandırma ile elde edilen spesifik enerji absorbsiyonların karşılaştırılması.....                              | 88  |
| <b>Şekil 4.46.</b> 1000 saat hidrotermal yaşlanmanın maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki .....                                       | 89  |
| <b>Şekil 4.47.</b> 1000 saat yaşlandırılmış numunelerin enerji absorbsiyonların karşılaştırılması.....                                       | 90  |
| <b>Şekil 4.48.</b> 100 saat yaşlandırılmış numunelerin spesifik enerji absorbsiyonlarının karşılaştırılması.....                             | 91  |
| <b>Şekil 4.49.</b> %0,25 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmanın maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki .....       | 92  |
| <b>Şekil 4.50.</b> %0,25 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmanın enerji absorbsiyonları karşılaştırılması .....          | 93  |
| <b>Şekil 4.51.</b> %0,25 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmanın spesifik enerji absorbsiyonları karşılaştırılması ..... | 94  |
| <b>Şekil 4.52.</b> 1000 saat hidrotermal yaşlanmanın %0,25 grafen ilaveli numunelerde maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki .....      | 95  |
| <b>Şekil 4.53.</b> 1000 saat yaşlandırılmış %0,25 grafen ilaveli numunelerin enerji absorbsiyonları karşılaştırılması .....                  | 96  |
| <b>Şekil 4.54.</b> 1000 saat yaşlandırılmış %0,25 grafen ilaveli numunelerin spesifik enerji absorbsiyonlarının karşılaştırılması .....      | 97  |
| <b>Şekil 4.55.</b> %0,50 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmanın maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki. ....       | 98  |
| <b>Şekil 4.56.</b> %0,50 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmanın enerji absorbsiyonları karşılaştırılması .....          | 99  |
| <b>Şekil 4.57.</b> %0,50 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmada spesifik enerji absorbsiyonları karşılaştırılması .....  | 100 |
| <b>Şekil 4.58.</b> 1000 saat hidrotermal yaşlanmanın %0,50 grafen ilaveli numunelerde maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki. ....      | 101 |
| <b>Şekil 4.59.</b> 1000 saat yaşlandırılmış %0,50 grafen ilaveli numunelerin enerji absorbsiyonları karşılaştırılması .....                  | 102 |
| <b>Şekil 4.60.</b> 1000 saat yaşlandırılmış %0,50 grafen ilaveli numunelerin spesifik enerji absorbsiyonlarının karşılaştırılması .....      | 103 |
| <b>Şekil 4.61.</b> Cam fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları .....     | 104 |
| <b>Şekil 4.62.</b> Cam fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorbsiyonunda ki değişim oranları .....      | 105 |

|                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.63.</b> Cam fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları.....                         | 106 |
| <b>Şekil 4.64.</b> Aramid fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları .....                             | 107 |
| <b>Şekil 4.65.</b> Aramid fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları .....                              | 108 |
| <b>Şekil 4.66.</b> Aramid fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları.....                      | 109 |
| <b>Şekil 4.67.</b> Karbon fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları .....                             | 110 |
| <b>Şekil 4.68.</b> Karbon fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları .....                              | 111 |
| <b>Şekil 4.69.</b> Karbon fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları.....                      | 112 |
| <b>Şekil 4.70.</b> Hibrit S4 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları .....                                | 113 |
| <b>Şekil 4.71.</b> Hibrit S4 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları .....                                 | 114 |
| <b>Şekil 4.72.</b> Hibrit S4 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları .....                        | 114 |
| <b>Şekil 4.73.</b> Hibrit S5 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları .....                                | 115 |
| <b>Şekil 4.74.</b> Hibrit S4 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları .....                                 | 116 |
| <b>Şekil 4.75.</b> Hibrit S5 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları .....                        | 117 |
| <b>Şekil 4.76.</b> Hibrit S6 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları .....                                | 118 |
| <b>Şekil 4.77.</b> Hibrit S6 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları .....                                 | 119 |
| <b>Şekil 4.78.</b> Hibrit S6 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları .....                        | 120 |
| <b>Şekil 4.79.</b> S1 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları.....           | 121 |
| <b>Şekil 4.80.</b> S1 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları ..... | 122 |
| <b>Şekil 4.81.</b> S2 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları.....           | 122 |
| <b>Şekil 4.82.</b> S2 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları ..... | 123 |
| <b>Şekil 4.83.</b> S3 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları.....           | 124 |
| <b>Şekil 4.84.</b> S3 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları ..... | 125 |
| <b>Şekil 4.85.</b> S4 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları.....           | 126 |
| <b>Şekil 4.86.</b> S4 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları ..... | 127 |
| <b>Şekil 4.87.</b> S5 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları.....           | 128 |

|                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.88.</b> S5 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları ..... | 129 |
| <b>Şekil 4.89.</b> S6 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları.....           | 130 |
| <b>Şekil 4.90.</b> S6 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları ..... | 131 |



## ÇİZELGELER LİSTESİ

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Çizelge 3.1.</b> Numunelerin kodları ve özellikleri .....                                                                                 | 24  |
| <b>Çizelge 3.2.</b> Numunelerin kodları ve özellikleri .....                                                                                 | 25  |
| <b>Çizelge 3.3.</b> Numunelerin kodları ve özellikleri .....                                                                                 | 26  |
| <b>Çizelge 4.1.</b> S1 – S6 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri .....                                           | 30  |
| <b>Çizelge 4.2.</b> S7 – S12 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri .....                                          | 36  |
| <b>Çizelge 4.3.</b> S13 – S18 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri .....                                         | 42  |
| <b>Çizelge 4.4.</b> S19 – S24 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri .....                                         | 47  |
| <b>Çizelge 4.5.</b> S25 – S30 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri .....                                         | 52  |
| <b>Çizelge 4.6.</b> S31 – S36 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri .....                                         | 58  |
| <b>Çizelge 4.7.</b> S37 – S42 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri .....                                         | 64  |
| <b>Çizelge 4.8.</b> S43 – S48 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri .....                                         | 70  |
| <b>Çizelge 4.9.</b> S49 – S54 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri .....                                         | 75  |
| <b>Çizelge 4.10.</b> S1 – S54 numunelerin maksimum tepe kuvvetine kadar enerji soğurma kapasiteleri ve spesifik enerji absorpsiyonları ..... | 132 |

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

### Semboller

**Al** : Alüminyum

### Kısaltmalar

**ACGFRP** : Aramid-Karbon-Cam Fiber Takviyeli Kompozit

**AFRP** : Aramid Fiber Takviyeli Kompozit

**CFRP** : Karbon Fiber Takviyeli Kompozit

**CGAFRP** : Karbon-Cam-Aramid Fiber Takviyeli Kompozit

**GACFRP** : Cam-Aramid-Karbon Fiber Takviyeli Kompozit

**GFRP** : Cam Fiber Takviyeli Kompozit

**GNP** : Grafen Nanoplatelet

**H500** : 500 Saat Hidrotermal Yaşlandırma İşlemi

**H1000** : 1000 Saat Hidrotermal Yaşlandırma İşlemi

**EA** : Enerji Absorbsiyonu

**MTK** : Maksimum Tepe Kuvveti

**SEA** : Spesifik Enerji Absorbsiyonu

## 1. GİRİŞ

Otomotiv sektörü veya diğer ulaşım sektörlerinde yolcu güvenliğini sağlamak ve araç bütünlüğünü korumak için birçok çalışma yapılmaktadır. Oluşan kazalar sırasında yolcuların güvenliğini sağlayarak olası yaralanmalar veya daha kötüsü ölümle sonuçlanmasını engellemek için çalışmalar süre gelmektedir. Bunun için herhangi bir kaza anında ortaya çıkan enerjiyi soğuracak malzemeler önem kazanmaktadır. Bununla birlikte bu malzemelerin aynı zamanda günümüzün en büyük problemi olan fosil yakıt kullanan araçlarda yakıt tasarrufu sağlaması, elektrikli araçlarda ise menzilin artırması gerekmektedir. Araç ağırlıkları artıkça tüketilen enerji miktarı artmaktadır. Gerek araç gövdesi gerekse araç içinde kullanılan parçalarda metal ve alaşımları yerine hafif ve sağlamlığı ön plana çıkaracak parçalara yönelim artmaktadır. Araç şasesine monte edilen çarpışma kutularında araca belirli oranda ağırlık katmaktadır. Çarpışma kutularından istenilen en önemli özellik enerji soğurma kapasitesidir. Enerji soğurma özelliği kadar diğer bir özellikte kullanılacak olan malzemenin hafifliğidir. Bunu sağlayacak olan çağımızın malzemeleri kompozit malzemelerdir. Gelişen kompozit malzeme teknolojisiyle birlikte kompozit malzemelerin araçlarda çarpışma kutuları olarak kullanılması önem kazanmaktadır.

### 1.1. Kompozit Malzemeler

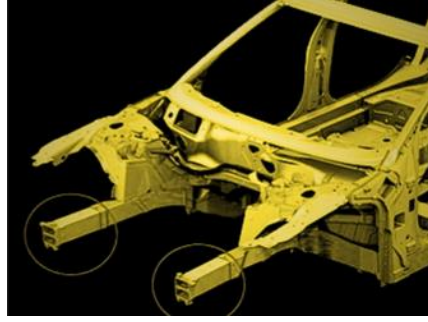
Kompozit en az iki veya daha fazla malzemenin birleşerek üstün özellikler ortaya çıkaran yeni tür malzemelerdir. Kompozit malzemeler gerek hafiflik gerekse sağlamlık açısından tercih edilmektedirler. Üretim yöntemlerinde ki farklılıklar ile birlikte kullanım alanı artmaktadır. Araç sanayi, savunma sanayi, sağlık sektörü, uzay araştırmaları, inşaat sektörü ve birçok alanda kendine yer bulmaktadır. Kompozit malzemelerin genel özellikleri aşağıda belirtilmiştir;

- Mekanik özellikleri çok iyidir.
- Metalik malzemelere kıyasla hafiftirler.
- Isıl ve korozyon dirençleri yüksektir.
- Kimyasal etkileşimlere karşı yüksek dayanımlıdır.
- Pahalıdırlar.
- Fırınlanmaları gerekebilir.

Metallere yapışmaz ve kesme delme gibi işlemlere maruz kaldıklarında lif yapısı zarar gördüğü için mekanik özellikleri etkilenir.

## 1.2. Çarpışma Kutuları

Araçlarda kaza sırasında araç bütünlüğünü koruyarak içerisinde bulunan yolcuların ve sürücünün güvenliği sağlamak amacıyla ortaya çıkan enerjinin sönümlenmesi gerekmektedir. Bu sönümleme iyi yapılmadığı takdirde aracın kütlesi, hızı gibi birçok etkenden dolayı yüksek miktarda enerji açığa çıktığında araç bütünlüğü zarar görebilmektedir. Bu da araç içerisinde bulunan sürücü ve yolcuların can güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Araçlarda kaza sırasında ortaya çıkan bu enerjiyi sönümlemek için araç çarpışma kutuları kullanılmaktadır. Bu çarpışma kutuları imal edilirken araçlar için en önemli problemlerden biri olan yakıt tasarrufu sağlayan hafiflik ve sürdürülebilirlik gibi birçok etken rol oynamaktadır. Bu sebeplerden dolayı çarpışma kutusu üzerine yapılan çalışmalar önem kazanmaktadır. Gerek hafiflik gerek enerjiyi absorbe etme özelliği ve gerekse maliyet gibi etmenler üretim için uygun seçimler yapılabilmesini ön plana çıkarmaktadır. Şekil 1.1’de örnek bir çarpışma kutusunun araçtaki konumu görülmektedir. Daha önceki çalışmaların sonuçlarına bakıldığında geometrik şekillerin enerji sönümlemede farklı sonuçlar verdiği görülmüştür. Absorbe edilen enerji miktarı genel olarak üretilen kutunun geometrisine, malzeme türüne, malzeme kalınlığına ve dolgu malzemesi gibi birçok etkene bağlı olarak değişmektedir. Enerji sönümleme sırasında sönümleme yapacak malzemenin rijit kalması sönümleme yapma yeteneği için pek istenilen bir sonuç değildir. Bu durumda yavaşlama ivmesi istenilen değerlere kadar düşmeyecek ve bu etki araç parçalarına zarar vererek araç içerisinde bulunan yolculara da etkileyerek yaralanmalara hatta istenmeyen sonuçlara sebep olabilmektedir. Çarpışma kutuları ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar genel olarak kullanılan malzeme tipi, üretilen geometrik şekil, dolgu malzemesi kullanmak gibi ana başlıklar olmaktadır. Bununla birlikte çarpışma kutusu üretilirken dokuma tip kompozit malzemeler de kullanılan malzeme türleri arasında önem arz etmektedir. İki boyutlu dokuma tipi daha çok tercih edilmekte bunun sebebi ise dokuma tip kompozitlerin diğer kullanılan kompozit olamayan malzemelere gerek hafiflik gerekse yüksek mukavemet gibi önemli özellikler içermesidir.



**Şekil 1.1.** Çarpışma kutusunun araçtaki konumu (Url 1, 01.07.2024)

Trafik kazalarında her yıl binlerce insan yaşamına veda etmekte veya yaralanmaktadır. Bunun yanında araçlarda da büyük maddi hasarlar meydana gelmektedir. İmal edilen araçlar için belirli standartlarda çarpışma testleri yapılmakta ve araç güvenliğini artırmaya yönelik çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir. Çarpışma kutuları aracın ön kısmına yerleştirilebilen ve kaza anında darbeyi ilk karşılayan kısımlar olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çarpışma kutuları pasif bir güvenlik önlemi olmakla birlikte darbenin ortaya çıkardığı kinetik enerjinin büyük bir kısmını emerek olası zararları asgariye indirmek istenmektedir. Bu sayede hem insan hayatı korunacak hem de araçların hasarının en aza indirgenmesi sağlanmaya çalışılacaktır.

### 1.3. Grafen

Karbon atomunun grafit ve elmas gibi yaygın bilinen allotroplarının yanı sıra karbonun 2 boyutlu ve bal peteği şeklinde ki yapısı grafendir. İlk defa 1940 yılında keşfedilmiştir fakat üretilip kullanılması uzun yılları almıştır. Grafen elektriği ve ısıyı iyi ileten bir iletkenidir. İletkenliğinin yanı sıra grafen ince yapısına rağmen çelikten yaklaşık 100 kat daha güçlüdür. Aynı zamanda %20 oranında esneme yapısına sahip olması grafeni üstün kılan özellikler arasındadır. Suya karşı geçirgen olması filtrasyona uygun olduğunu gösterir. Grafenin endüstride kullanım alanlarını aşağıda belirtilmiştir;

- Arıtma ve tuzdan arınma için su filtrelemede.
- Yarı iletkenlerde.
- Korozyonu önleyen kaplamalarda.
- Optoelektronik iletişim sistemlerinde.
- Güç şebekelerinde ve tasarruflu ışıklarda (Url 2, 01.05.2024).

#### 1.4. Hidrotermal Yaşlanma

Malzemeyi su içerisine tam daldırarak belirli bir derece altında bekletme işlemine hidrotermal yaşlanma denir. Malzemelerin gerek su içerisinde bekletilmesi ki bu su emme absorpsiyonuna bağlı olarak her malzeme de değişmekte; gerekse belirli bir süre ile belirli bir sıcaklık altında malzemeyi sıcaklığa maruz bırakmak malzeme yaşlandırma işlemleridir. Yaşlandırma işlemi malzemenin mekanik özellikleri etkileyerek malzemenin elastikliğini, akma dayanımını, maksimum tepe kuvvetini ve birçok özelliğini etkilemektedir. Bazen bu etkileşimler olumlu sonuçlar verirken bazen de malzemenin yapısında değişiklik yaparak mekanik özellikleri çok kötü etkilemektedir.

Yapay yaşlandırma işlemleri genel olarak laboratuvar ortamlarında yapılmaktadır. Şekil 1.2’de yaşlandırma işlemi gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Hidrotermal yaşlandırma işlemi

Önceki çalışmalarda silindirik boru şekilleri, elyaf sarım açısı, boru içinde dolgu malzemesi ve tüp içinde hücre gibi teknikler incelenmiş olup, hibritleşme için genel olarak metal kompozit tipleri dikkate alınmıştır. Hibrit borular üzerine yapılan önceki çalışmalarda prepreg sarma yöntemi ele alınmıştır. Bu çalışmanın amacı, vakum infüzyon yöntemi ile üretilen cam, aramid ve karbon/epoksi silindirik kompozit borular ile bunların hibritlerinin ezilme davranışlarını incelemek ve karşılaştırmaktır. Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen numunelere 2 farklı oranda (%0,25 ve %0,50) grafen ilave edilmiştir. Aynı zamanda bütün numunelere 500 saat ve 1000 saat süreyle hidrotermal yaşlandırma uygulanmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kompozitler hafiflik ve sağlamlık açısından birçok malzemeye üstünlük sağlayan malzeme türüdür. Çarpışma kutuları genel olarak alüminyum malzemelerde yapılmakta bunlar hafiflik ve enerji emme kapasitesinin verimlerinden dolayı tercih edilmektedir. Kompozit malzemelerin çarpışma kutusu olarak kullanılması için çalışmalar gün gün geçtikçe artmaktadır. Bunun yanında hibrit kompozit olarak metal-kompozit hibritler üzerine de birçok çalışma bulunmaktadır. Ayrıca çarpışma kutularının şekillerinin değiştirilerek enerji emme kapasitelerini geliştirilmesi üzerine de çalışmalar önemli bir yer kaplamaktadır.

Hwang ve Han (2024), malzemenin enerji emilim prensiplerini etkili bir şekilde kullanmak için birleşik kesme-sıkıştırma yüklemesi altında enerji emici yapıların tasarımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Birim hacim başına enerji emiliminin metal enerji emici yapılar için üstün olduğu, birim kütle başına enerji emiliminin ise kompozit enerji emici yapılar için daha iyi olduğunu ve bu nedenle, uygulamaya bağlı olarak hem metaller hem de kompozitler enerji emici yapılar için malzeme olarak etkili bir şekilde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Awd, vd. (2024), hibrit kompozit yapıların çarpışmaya dayanıklı davranışlarının Taguchi yaklaşımıyla optimize edilmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Polivinil klorür dairesel tüpler üzerine cam elyaf sarmışlardır. Optimum çarpma kuvveti verimliliği, asıl PVC tüp ve asıl hibrit tüpten sırasıyla %48 ve %29,82 daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Djamaluddin (2024), elektrikli araç için eksenel yükleme altında köpük dolgulu çarpışma kutusunun optimizasyonu üzerine çalışma yapmıştır. Simülasyon bulguları, çarpışma kutusu numunelerinin aynı kütle ve hacme sahip olmasına rağmen, her numunenin enerjiyi farklı şekilde emdiğini ve tam dolum tasarımının aksine, dolgu tasarımının özgül enerji emilimini artırırken daha az köpük kullanılabileceğini belirtmiştir.

Alabtah, Mahdi ve Khraisheh (2024), biyolojik olarak esinlenerek hazırlanmış prepreg karbon fiber çarpma kutusunun yarı statik eksenel sıkıştırma altında enerji emilim özelliklerine çalışma yapmışlardır. Biyolojik olarak ilham alan bir tasarım geliştirmiş ve karbon fiber takviyeli çarpışma kutusu üretmişlerdir. Geleneksel çelik çarpma kutuları ile karşılaştırıldığında, yeni üretilen CFRP çarpma kutusunun, önemli ölçüde azaltılmış kütle ile enerji emiliminde ön plana çıktığını belirtmişlerdir.

El Baky vd. (2023), metal-kompozit silindirlerin çarpışma enerjisi emilimi uygulamaları için potansiyelini araştırmaktır. Bu bağlamda, sarılmış alüminyum silindirler üzerindeki jüt /cam takviyeli epoksi hibrit kompozitin çarpışma dayanıklılığı performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Alüminyum silindirlerin jüt ve cam takviyeli epoksi katmanlarla hibridizasyonu, başlangıçtaki ilk tepe kuvveti, ortalama çarpma kuvveti, toplam enerji emilimi ve çarpma kuvveti verimliliğinin arttığını gözlemlediler.

Qin vd. (2023), çoklu yükleme koşulları altında değişken kalınlıktaki Al-CFRP hibrit tüplerin çarpışma dayanıklılığını araştırmışlardır. Hibrit tüpün saf alüminyum tüpe kıyasla daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Hou vd. (2023), 3D baskılı kafes yapılarıyla çarpışma kutusunun çarpışmaya dayanıklılık optimizasyonu üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmalarında alüminyum kabuk içerisine 3D yazıcı ile üretilmiş karbon fiberle güçlendirilmiş poliamid 6 (PA6/CF) kompozitler yerleştirmişlerdir. Kafes yapısı olarak altıgen, kagome, reentrant ve üçgen petekler olmak üzere dört farklı kafes yapısını kullanmışlardır. Sonuç olarak sıkıştırma testinden elde edilen deneysel verilerin simülasyon analiziyle iyi bir uyum içinde olduğunu ve kagome kafes yapısının sayısal analiz yoluyla maksimum spesifik enerji emilimi (SEA) değerlerine ulaştığını ortaya koyduğunu belirtmişlerdir.

Cui vd. (2023), origami bazlı peteklerin enerji emme özellikleri üzerine araştırma yapmışlardır. Numuneler 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak oluşturulmuş ve yarı statik basma ile deneylerini yapmışlardır. Reentrant petek yapısıyla karşılaştırıldığında origami bazlı petek, daha düşük bir tepe kırma kuvvetine ve daha düzgün bir gerilim eğrisine sahip olduğunu, bu da onu koruyucu yapısal uygulamalar için ideal bir malzeme haline getirdiğini belirtmişlerdir.

Dharmaraj, Kumar ve Sridhar (2022), kafes yapısının enerji emilimi için çok önemli bir özelliği olduğunu belirtip 9 farklı tip kafes yapısı üzerinde yeni bir tip hücre formu geliştirmeyi amaçlamışlardır. Ve tip 6 dedikleri yapının çarpışmaya dayanıklılık bileşenleri için en uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Bai vd. (2022), farklı parametrelere sahip karbon fiber takviyeli plastik/alüminyum hibrit tüplerin bükülme çökmesini araştırmışlardır. Deneysel test sonucunda hibrit tüplerin enine enerji emiliminin net alüminyum tüpten daha yüksek olduğu bulmuşlardır.

Zhang vd. (2019), genişletilmiş polipropilen köpüğü ile doldurulmuş alüminyum peteklerin dinamik darbe tepkisini ve özelliklerini deneysel ve sayısal olarak

incelemişlerdir. Doldurulmuş peteğin ilk tepe kuvvetinin ve ortalama kuvvetinin, alüminyum petek ve köpük arasındaki etkileşim etkisine bağlı olarak önemli ölçüde arttığı, ancak spesifik enerji absorpsiyonunun azaldığını belirtmişlerdir. Genişletilmiş polipropilen köpük dolgusunun, çıplak alüminyum peteğin darbe özelliklerini iyileştirmede etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Fu vd. (2019), enerji emilimi için biyonik-bambu ince duvarlı yapıların tasarımı üzerine araştırmalar yapmışlardır. Eksenel kırmaya maruz kalan yeni bir biyonik-bambu tüp yapısının enerji emme özelliklerini araştırmayı amaçlamışlardır. Altı farklı kesit konfigürasyonuna sahip tüpler, bambu mikroyapısından ilham alarak tasarlamışlardır. Kaburga şekli ve kaburga sayısının etkilerini LS-DYNA sonlu elemanlar kodu kullanılarak analiz etmişlerdir. Sayısal sonuçların, "X" kaburga şekline ve altı kaburga sayısına sahip biyonik-bambu tüp yapılarının en iyi çarpışmaya elverişliliği sergilediğini gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu biyonik-bambu tüp yapılarının enerji emme yeteneklerini daha da geliştirmek için, "X" şeklindeki kesitin kaburga açısı, merkez mesafesi ve kaburga kalınlığı gibi konfigürasyonel yapının tasarım değişkenlerine ilişkin çok amaçlı optimizasyon kullanılmışlardır. Tepki yüzeyi yöntemi ve çok amaçlı parçacık sürüşü optimizasyonu algoritması, pik kırma kuvvetini en aza indirirken spesifik enerji emilimini en üst düzeye çıkarmak için benimsediklerini belirtmişlerdir. Optimizasyon sonuçları, temel tasarıma kıyasla, optimize edilmiş biyonik-bambu tüp yapısının değerinin, en yüksek kırma kuvvetinden ödün vermeden %6,84 oranında daha da arttığını belirtmişlerdir.

Ming vd. (2019), kirigami yaklaşımıyla tasarlanan ince duvarlı kare tüplerin enerji emilimi üzerine hem sayısal hem de deneysel olarak araştırma yapmışlardır. Kirigami yaklaşımı ile tasarlanan kirigami çarpışma kutusu olarak bilinen yeni bir tüpün, genişleme modun' da çökerek boru şeklindeki yapıların çarpma dayanıklılığını iyileştirmesi önerilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar; kirigami modelinin hem başlangıçtaki tepe kuvveti F maksimumu azalttığını, hem de çökerken istenen genişleme modunu artırdığını ortaya çıkarmıştır. Sayısal simülasyon ile ideal genişleme modunun, F maksimum başlangıç tepe kuvvetinin %39,7'lik bir azalmasıyla başarılı bir şekilde tetiklendiğini bulmuşlardır. Geleneksel kare tüpe kirigami deseni getirilerek tasarlanan ve kirigami çarpışma kutusu olarak bilinen yeni bir tüp, ince duvarlı tüplerin enerji emme kapasitesini geliştirmek için önerilmiştir.

Keshavarzi, Marzbanrad ve Aboutalebi (2019), rijit ve elastik sınır koşullarına sahip dairesel alüminyum çarpışma kutularında enerji absorpsiyonunun karşılaştırılması

üzerine sayısal ve deneysel çalışma yapmışlardır. Araştırmalarında ilk olarak, rijit ve elastik sınır koşulları ile eksenel darbe yükü altındaki ekstrüde alüminyum dairesel boruların çarpışma davranışını incelenmişlerdir. Daha sonra, elastik desteğin (yay) tüp enerji emilimi üzerindeki etkisi sayısal ve deneysel olarak yay sertliği artırılarak enerji emilimi artırılabilirliğini, elastik desteğin kullanılmasının deformasyon şeklinin değişmesine yol açtığını ve maksimum darbe yükünü önemli ölçüde azalttığını kaydetmişlerdir.

Dirgantara vd. (2018), kare kesitli alüminyum köpük dolgulu kolonların ezilme davranışı üzerine araştırma yapmışlardır. Tek duvarlı ve çift duvarlı kolonlara alüminyum köpüğün yerleştirilmesinin etkisini incelenmişler. Çalışmada, malzeme modelinde alüminyum köpüğün gerinim hızının etkisi ele alınmıştır. Sayısal sonuçlar mevcut deneysel verilerle karşılaştırılmış ve çok iyi bir uyum içinde olduğu belirtmişlerdir. Köpük çekirdeğin gerinim oranı etkisini dikkate alan modeller gerinim oranı etkisi dikkate alınmayanlara göre daha iyi tahminler verdiğini belirtmişlerdir. Köşelerde daha yüksek enerji emilimi ve daha büyük yerel deformasyon ile sonuçlanacağını ve bu da genel kırma kuvvetinde hafif bir artışa neden olacağını belirtmişlerdir. Köpük dolgulu kolonların ezilme davranışında köpük çekirdeğin gerinim hızının oldukça önemli bir rol oynadığı ve dikkate alınması gerektiğini belirterek, ayrıca, köpük çekirdek ve kolon duvarı arasındaki etkileşimin, deformasyon modunu bir lokalize kıvrımdan çoklu yayılan kıvrımlara değiştireceğini ve kolonun toplam ortalama ezilme kuvvetinin artmasına yol açacağını bulmuşlardır. Ayrıca, çift duvarlı köpük dolgulu kolonda çekirdek kalınlığının artırılmasının, duvarlar arasında hala etkileşimin olduğu bir noktaya kadar ezilme davranışını iyileştireceği belirterek, çekirdek kalınlığının daha da artması, kolon tepkisini tek duvarlı köpük dolgulu kırma kuvvetine yaklaştıracığını belirlemişlerdir.

Sankar ve Parameswaran (2018), ise dairesel deliklerin, dairesel silindirlerin eksenel darbe altında kademeli olarak çökmesi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Dairesel deliklerin tetik görevi gördüğünü ve ilk pik yükleri düşürdüğünü fakat ilk pik yükü azaltmadaki etkinlikleri, silindir duvar kalınlığının artmasıyla azaldığını belirtmiştir. Deliklerin burkulmaların oluşumunda yük seviyesini artırabileceğini bunun da enerji verimliliğini olumsuz etkileyebileceğini belirtmiştir.

Wang, Liu ve Yao (2018), çok hücreli ince cidarlı kare tüplerin katlanma mekaniği üzerine çalışmalarda hücre miktarını artırarak karşılaştırmalarını yapmışlardır. Hücre miktarlarının artmasıyla ortalama yükün daha da artacağını, örneğin  $15 \times 15$  durumunda ortalama yükün 218,85 kN iken,  $1 \times 1$  numune durumunda 80,43 kN, yani  $15 \times 15$ 'in  $1 \times 1$ 'in

ortalama yükünden 2 kattan daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Sadece deformasyon işleminin kararlılığında değil, aynı zamanda yük kapasitesinde de önemli iyileştirmeler sağlandığını gözlemlemişlerdir.

Sun vd. (2018), filament sargılı karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) ve alüminyum/CFRP hibrit boruların yarı statik eksenel ezilme davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Sarım açılarının ( $25^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$ ;  $0^\circ$  sarım açısı borunun eksenel yönü boyunca) ve kalınlıkların (3 katlı, 6 katlı, 9-katlı) etkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. Yarı statik ezme testleri aracılığıyla filament sarma tekniği ile kalıplanmış karbon elyaf takviyeli polimer boru ve alüminyum/CFRP hibrit borunun çarpmaya dayanıklılık özellikleri üzerine araştırma yapmışlardır. Hem sarma açısının hem de duvar kalınlığının hem CFRP hem de hibrit boruların kırılma ve ezilme özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Aynı laminant kalınlığıyla, sarma açısını artırmak, saf CFRP ve hibrit boruların özgül enerji emilimini, enerji emilimini ve tepe kırma kuvvetini azalttığını belirtmişlerdir. CFRP tüpün aynı sarım açısıyla, CFRP tüpün kalınlığını artırmak hem CFRP hem de hibrit tüplerin özgül enerji emilimi, enerji emilimini ve kırma kuvvetini artırdığını bulmuşlardır.

Eyvazian, Tran ve Hamouda (2018), eksenel ezilmiş oluklu metal borular üzerinde deneysel ve teorik çalışmalar yapmışlardır. Oluk derinliğini 3,5 mm'den 1,7 mm'ye düşürerek, spesifik enerji emilimi ve ezilme kuvveti verimliliği sırasıyla yüzde 19,7 ve yüzde 24,7 artırdığını belirtmişlerdir. Oluğun, metal borular için deformasyon şeklini daha kararlı ve kontrol edilebilir hale getirdiğini, ayrıca dairesel borunun, enerji emici için uygun olan eksenel simetrik şeklini de deforme olmasını teşvik ettiğini belirtmişlerdir. Kabul edilebilir hata payı oranlarında teorik ve deneysel çalışmaların sonuçlarının tutarlı olduğunu söylemişlerdir.

Altın, Güler ve Mert (2017), eksenel olarak sıkıştırılmış ince duvarlı çok hücreli kare ve dairesel boruların enerji emme kapasitesi üzerine köpük dolgu oranının etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada, dört farklı köpük dolgu oranına sahip dairesel kesitli alüminyum borular (%11,4, %22,8, %34,2, %100) yarı statik test koşullarında basma testlerine tabi tutmuşlardır. Aynı zamanda testlerin sonlu elemanlar modelleri hazırlanmış ve validasyon çalışması için LS-DYNA programı kullanılarak analizlerini yapmışlardır. Köpük dolgulu kare tasarımın özgül enerji absorpsiyonunun, minimum özgül enerji absorpsiyonunun değerine sahip boş kare tasarımına göre 5 kat daha büyük olduğu bulmuşlardır. Duvar kalınlığı değiştirilerek, köpük dolgulu kare tasarımın özgül enerji

absorpsiyonunun ve ezilme kuvveti verimliliği performansları sırasıyla %87 ve %42 oranında artıracağını belirtmişlerdir.

Lu vd. (2017), eksenel olarak derecelendirilmiş özel haddelenmiş kare borular için et kalınlığı ve malzeme mukavemetinin eksenel çarpma analizini yapmışlardır. Belirli özel haddelenmiş boruların ilk tepe yükünün 45 kN ile 58 kN arasında olduğu ve bu geleneksel borulardan %52-63 daha düşük olduğu belirtmişlerdir. Eksenel değişken kalınlık ve değişken mukavemetin birleşik hareketi için, özel haddelenmiş boruların enerji emme değeri ve enerji emme verimliliği, geleneksel borulardan sırasıyla %11 ve %10,7 daha büyük olduğunu belirlemişlerdir.

Sun vd. (2017), değişken kalınlıktaki ince cidarlı yapılar için enerji soğurma mekaniğini araştırmışlardır. İnce cidarlı kare yapılara eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş kalınlık ve yanal fonksiyonel derecelendirilmiş kalınlık ayrı ayrı tanıtmakta ve ardından bunların eksenel ezilme yükü altında çarpma dayanıklılıklarını teorik, sayısal ve deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Tüpler için hem teorik çözümlerin hem de sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir.

Zhu vd (2017), metal-kompozit hibrit boruların farklı konfigürasyonlarının ezilme özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlara dayalı olarak, farklı konfigürasyonların çarpışma dayanıklılığı özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Hibrit borunun (dahili olarak bir karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) boru ile doldurulmuş alüminyum boru) en iyi sonuçları verdiği bulmuşlardır. Son olarak hibrit borunun avantajları, türetilen analitik modeller kullanılarak maliyet ve hafiflik açısından daha ayrıntılı olarak araştırdıklarını hibrit borunun aynı enerji emilimi için saf CFRP boruya göre %32,1 maliyet tasarrufu sağladığı ve saf alüminyum boruya göre %33,6 ağırlık tasarrufuna yol açtığını not etmişlerdir. Böyle bir hibrit yapının, verimli bir enerji emici olarak kullanılmak üzere önemli bir potansiyele sahip olacağını belirtmişlerdir.

Wang vd. (2016), farklı yükleme koşulları altında karbon takviyeli kompozit boruların enerji absorpsiyon özellikleri üzerine fiber oryantasyonu ve duvar kalınlığının etkilerini araştırmışlardır. Uygun fiber oryantasyonu ve duvar kalınlığı seçilerek enerji absorpsiyon kapasitesinin geliştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Esnaola vd. (2016), elyaf hacim fraksiyonunun E-cam/polyester otomotiv çarpışma yapılarının enerji emme yetenekleri üzerindeki etkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Çarpışma uygulamaları için farklı elyaf hacim fraksiyonlarına sahip yarı altıgen cam / polyester kompozit yapılar incelenmiştir. Lif içeriğinin etkisini analiz etmek

için malzemenin interlaminar kesme mukavemeti ve spesifik enerji emme kabiliyeti karakterize etmişlerdir. %40 ve %60 arasında farklı lif içeriğine sahip numuneler, yaklaşık 35-40 MPa olan benzer interlaminar kayma mukavemeti değerleri gösterdiğini belirtmişlerdir. Lif yüzdesini %40'tan %47' ye çıkararak malzemenin özgül enerji emme değerlerinin 56 kJ/kg'a yükseldiği bulmuşlardır. Lif hacmi fraksiyonu %47'nin üzerinde olan numuneler için, dağıtılan toplam enerji miktarını benzer olduğunu belirtmişlerdir. Artan lif içeriği, malzemenin doğrusal yoğunluğunu arttıracak, daha yüksek doğrusal yoğunluğa sahip dağılmış enerji miktarlarının aynı değeri, spesifik enerji emme değerlerinde bir azalma anlamına geleceğini belirtmişlerdir.

Beik, Fard ve Jazar (2016), konik ince duvarlı S-şekilli yapıların çarpmaya dayanıklılığı üzerine araştırma yapmışlardır. Takviye edici ve sivrilen S-rayların hem statik hem de dinamik yükleme koşulları altında enerji absorpsiyonunu ve özgül enerji emilimini iyileştirdiğini gösterdiğini belirttiler. S-raylar statik yüklemde %300'den fazla dinamik yüklemde %275 oranında iyileşme sağladığını saptamışlardır.

Kılıçaslan (2015), eksenel darbe yüklemesine maruz kalan alüminyum köpük dolgulu oluklu tek ve çift dairesel boruların sayısal ezilme analizini araştırdı. Çalışmasında, farklı oluk uzunluklarına sahip alüminyum köpük dolgulu oluklu tek ve çift boruların ezilme tepkileri üzerine karşılaştırmaları yaptı. Oluklu boruların ilerleyici ve akordeon tipi deformasyon yaşadığını ve daha küçük ondülasyon uzunluğuna sahip boruların, düşük ilk tepe kuvveti ile düzgün kuvvet-yer değiştirme eğrisi gösterdiğini belirtti. Köpük dolgulu oluklu çift borulu özgül enerji absorpsiyonunu, köpük dolgulu düz borulara göre daha üstün belirtti.

Zhang, Zhang ve Wen (2015), çalışmalarında, eksenel yükleme altında kademeli kalınlığa sahip konik dairesel boruların enerji absorpsiyon özelliklerini araştırmışlardır. Kademeli kalınlığa sahip konik dairesel boruların numuneleri bir tüp sivrilme makinesi ile üretmişler ve ezilme tepkisi üzerindeki şekillendirme etkileri araştırmışlardır. Hem orijinal düz dairesel boru hem de fabrikasyon kademeli kalınlığa sahip konik dairesel boruları test etmiş ve kademeli kalınlığa sahip konik dairesel boruların göreceli değerlerini analiz etmek için karşılaştırmışlardır. Testlerin sayısal simülasyonları, sonlu eleman kodu LS-DYNA ve basitleştirilmiş bir üretim süreci kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen kademeli kalınlığa sahip konik dairesel boruların enerji absorpsiyon veriminin düz borulara göre oldukça yüksek olduğu ve şekillendirme etkilerinin verim artışında önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Li vd. (2014), çoklu yük durumlarında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpük dolgulu borular için ezme analizi ve çok amaçlı optimizasyon üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpük ile doldurulmuş tüpün optimal tasarımları, tek tip köpük ile doldurulmuş tüplerden daha iyi çarpışmaya dayanıklılık özellikleri gösterdiğini belirtmişlerdir.

Eyvazian vd. (2014), oluklu boruların eksenel ezilme davranışı ve enerji emme verimliliği üzerine araştırma yapmışlardır. Oluklu boruların, ilk pik yük olmadan düzgün bir yük-yer değiştirme eğrisine sahip olduğunu, ayrıca olukların eklenmesinin arıza modunu daha öngörülebilir ve kontrol edilebilir hale getirdiğini, pratikte enerji emicilerin güvenilir tasarımı için gerekli olduğundan, son derece umut verici olduğunu belirtmişlerdir.

Onsalung, Thinvongpituk ve Pianthong (2014), poliüretan köpük dolgulu dairesel alüminyum tüpün darbe tepkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Köpük dolgulu ince duvarlı alüminyum borunun darbe altındaki davranışı, farklı çarpışmaya dayanıklılık parametrelerine odaklanarak incelemişlerdir. Daha yüksek yoğunluklu köpük dolgulu tüpte yük verimliliği daha yüksek olduğundan, darbe enerjisinin köpük dolgulu tüpte daha verimli olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, köpükle doldurulmuş tüpün özgül enerji absorpsiyonu, daha yüksek yoğunluklu köpükte daha da düştüğünü bulmuşlardır.

Yan ve Chouw (2013), enerji emme uygulaması için keten lif takviyeli epoksi tüplerin çarpışmaya elverişlilik özelliklerini araştırmışlardır. Tek eksenli sıkıştırma altında test edilen örnekler arasında üç iç çap (36, 54 ve 82 mm), üç kat sayısı (1, 2 ve 3) ve üç uzunluk-çap oranı (1, 1.5 ve 2) kullanmışlardır. Toplam 81 içi boş tüp test edilmiş olup (her tip için üç örnek) ve örneklerin enerji emme yetenekleri değerlendirmişlerdir. Ölçülen parametreler maksimum kırma yükü, maksimum stres, toplam emilen enerji, spesifik emilen enerji ve ezme kuvveti verimliliği olarak belirlemişlerdir. Örneklerin arıza modları fotoğraflardan analiz ettiklerini belirterek keten lifi takviyeli epoksi kompozit tüpün enerji emici olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Tarlocan vd. (2013), enerji emme uygulamaları için ince duvar yapıların tasarımının elverişliliğin artırılması üzerine çalışma yapmışlardır. Doğrudan ve eğik yüklere maruz kalan ince duvarlı yapıların birkaç farklı kesit şekli, performans kriterlerini karşılayan kesiti elde etmek için karşılaştırmışlardır. Enine kesit seçildikten sonra, köpük dolgunun etkisini araştırarak, duvar kalınlığını artırarak ve bir tetik mekanizması getirerek daha iyi çarpışma performansları için tasarım geliştirdiklerini ve tasarımın çarpışma performansını ortalama % 10 oranında artırdığını belirtmişlerdir.

Kim, Yoon ve Shin (2011), farklı takviye liflerine sahip kompozit dairesel boruların ezilme davranışları üzerine bir araştırma yapmışlardır. Hibrit tek yönlü liflerinden yapılan tüpler için kırmanın, tüplerin eksenel yönünde yerleştirilen lif tiplerine göre belirlendiğini belirtmişlerdir. Enerji soğurma bileşenleri olarak yalnızca yüksek enerji soğurma kapasitesinin kullanılması gerekiyorsa, düz dokuma karbon/epoksi tüpleri en uygun olacağına; bir araba gövdesi yapısı olarak hem enerji emme kapasitesi hem de ezilme sonrası bütünlük aynı anda gerekliyse, tek yönlü karbon-kevlar boruları en iyisi olacağı yönünde sonuç bildirmişlerdir.

Alavi Nia ve Haddad Hamedani (2010), çeşitli kesit geometrilerine sahip ince duvarlı boruların enerji absorpsiyonunun ve deformasyonlarının karşılaştırmalı analizini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, çeşitli kesit şekillerine sahip (dairese, kare, dikdörtgen, altıgen, üçgen, piramidal ve konik) ince cidarlı boruların deformasyonları ve enerji yutma kapasitelerini incelemişlerdir. Ve darbe olaylarında maksimum kuvvet söz konusu olduğundan, düzgün yük-deplasman eğrileri ve dolayısıyla maksimum ve ortalama kuvvetler arasında daha az fark olması nedeniyle piramidal ve konik borular tavsiye etmişlerdir.

Ghasamnejad vd. (2009), grafit elyaf takviyeli polimer kompozit kutu yapılarının kırılma karakterizasyonu ve enerji absorpsiyonu üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Ara yüz kırılma düzlemindeki lif oryantasyonu, kompozit malzemelerin katmanlar arası kırılma tokluğunu etkilediğini; 0/90, 90/90 ve 0/45 ara yüz kırılma düzlemlerinin tabakalar arası kırılma tokluğu birbirine yakinken, +60/60 oldukça farklı davrandığını ve 0/90 ara yüz düzlemi, maksimum katmanlar arası kırılma enerjisini gösterirken, +60/60 ara yüz düzlemi için minimum olduğunu bulmuşlardır. Kırma kuvvetlerine maruz kalan uygun kompozit yapı tasarımları, en yüksek tabakalar arası kırılma tokluğu ve sonuç olarak geliştirilmiş bir özgül enerji emilimi sağlayan laminant yerleşiminin uygun şekilde seçilmesiyle elde edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Abdewi vd. (2008), radyal oluklu kompozit boruların yarı statik eksenel ve yanal ezilmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Eksenel ve yanal basınç yüklerine maruz kalan üç farklı geometrik tipteki kompozit tüp üzerinde gerçekleştirilmişlerdir. Bir radyal oluklu kompozit boruya ek olarak, oluk geometrisinin etkisini bilmek için, silindirik kompozit boru ve silindirik boru ile çevrelenmiş oluklu mukavvayı aynı koşullar altında test etmişlerdir. Yük taşıma kapasitesinin eksenel kırmada oluk geometrisinden önemli ölçüde etkilendiğini bununla birlikte, yanal ezme için oluk geometrisinin herhangi bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir.

Zuo vd. (2023), termal ve hidrotermal yaşlanmanın karbon fiber takviyeli plastik kompozit tüplerin çarpışma dayanıklılığı üzerindeki etkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Numuneler çeşitli sıcaklıklar (25°C, 70°C, 100°C, 160°C) ve hidrotermal yaşlandırma (25°C, 160°C) için iki gruba ayırmışlardır. Sıcaklık ve nem emme oranı arttıkça çarpışmaya dayanıklılık özellikleri büyük ölçüde azaldığını, karbon fiber takviyeli kompozitin çarpışmaya dayanıklılığı sıcaklıkla doğrusal olmayan bir bağı olduğu sonucuna varmışlardır.

Oğuz ve Erikliğ (2021), çalışmalarında cam/epoksi numunelerin su alma parametreleri deneysel olarak değerlendirmiştir. Vakum destekli reçine transfer yöntemi ile üretilen cam/epoksi numuneler, hidrotermal yaşlandırma kabiniinde 1000 saat boyunca 25°C ve 70°C sıcaklıklarda damıtılmış su ve deniz suyu içinde bekletilmiştir. Farklı uzunluk/genişlik (L/W) oranlarına sahip numunelerin su kazanım davranışları, farklı su türleri ve farklı sıcaklıklar gibi kriterler temel alınarak incelenmiştir. Ayrıca, numunelerin su alma eğilimi deneysel yöntemle ek olarak Fick yasasına dayalı analitik olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, L/W oranının, su tipinin ve sıcaklığın cam/epoksi kompozitlerin su kazanım karakteri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Deneysel ağırlık ölçümleri, sıcaklık artışının her iki su tipinde de daha fazla su emilimine neden olduğunu göstermiştir. Ayrıca, L/W oranındaki artışın daha fazla su emilimine neden olduğu kaydedilmiştir. Ayrıca, deneysel ve analitik sonuçlar, su alım eğilimlerinin her iki yöntemde de tutarlı olduğunu saptamışlardır.

Wang, Wang ve Xian (2020), hidrotermal olarak yaşlandırılmış hibrit keten/karbon-epoksi kompozitlerin yaşlanma parametrelerini araştırmışlar. Numuneler 6 hafta boyunca 40°C ve 70°C sıcaklıklarda ve %80 bağıl nemde potasyum bromür çözeltisine maruz bırakıldı. Hibrit olmayan keten/epoksi kompoziti, her iki sıcaklıkta da en yüksek emme oranını gösterdiğini; sırasıyla 40 °C ve 70 °C'de %4.02 ve %4.5. Hibrit numunelerin su emme oranının hibrit olmayan keten numunelerine göre daha düşük olduğunu saptamışlardır. 40 °C ve 70 °C'de yaşlandırılan hibrit kompozitlerin maksimum su emme değerleri, hibrit konfigürasyondaki karbon kumaş dış yüzeydeyken ve karbon kumaş dış yüzeydeyken sırasıyla %2,26 ve %2,68 olarak belirlendi.

Abd El Baky vd. (2019), jüt/cam/karbon hibrit kompozitlerin hidrotermal yaşlanma parametrelerini inceleme yapmışlar. Numuneler deniz suyu ve saf suda oda sıcaklığında 60 gün bekletildi. Numunenin saf suyu deniz suyundan daha güçlü bir şekilde emdiğini saptamışlardır. Hibrit olmayan jüt kompozitlerin diğer hibrit gruplara göre daha fazla su absorbe ettiği de gözlemlenmiştir. Hibrit olmayan jüt kompozitin su

geri kazanımı saf suda %17,44, deniz suyunda ise %16,5 olarak saptamışlar. Hibrit kompozitlere cam ve karbon ilavesinin su emilimini azalttığını gözlemlemişler. Hibrit olmayan cam ve hibrit cam-karbon kompozitler her iki su türü için de en düşük su emilimini gösterdiğini, hibrit olmayan cam ve hibrit cam/karbon kompozitlerin su emme değerleri saf suda sırasıyla %7,17 ve %6,02, deniz suyunda ise sırasıyla %5,93 ve %4,85 olarak saptamışlardır.

Chakraverty vd. (2017), hidrotermal daldırma ve higrotermal şartlandırmanın cam elyaf takviyeli epoksi kompozitinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hidrotermal koşullandırma olarak 65°C ile birlikte damıtılmış suya daldırma ve higrotermal koşullandırma olarak 60°C'de %95 bağıl nem içeren bir ortam oluşturmuşlar. Neme maruz kalan numuneleri, maruz kalma süreleriyle birlikte laminer arası kesme mukavemeti, kopma anındaki gerilme/gerinim ve modül değerlerini ortaya çıkarmak için 3 noktalı bükme testine tabi tutulmuştur. İlgili numune, 120 günlük hidrotermal daldırmadan sonra laminer arası kesme mukavemeti değerlerinde %23 ve 90 günlük higrotermal koşullandırmadan sonra %25 oranında bozulmaya uğradığını tespit etmişler. Nem kaynaklı matris plastikleşmesi ve şişmesi nedeniyle cam elyaf takviyeli epoksi kompozit numunesi için camsı geçiş sıcaklığı değerlerinde yaklaşık %8 azalma saptamışlardır.

Soykok vd. (2013), çalışmalarında cam elyaf/epoksi kompozitlerin mekanik olarak tutturulmuş bağlantılarının sıcak suya daldırma işleminden nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. Numuneler, bağlantı montajı ve testinden önce 1 ve 2 hafta süreyle 50, 70 ve 90 °C sıcaklıklarda sıcak suya maruz bırakılmıştır. Çekme testleri gerçekleştirildikten sonra, yaşlandırılmış numunelerdeki bağlantıların başarısızlık davranışının, uygulanan sıcaklık ve sıcak suda bekletme süresi ile sıkı bir şekilde ilişkili olduğu sonucuna varmışlardır. Hem daldırma süresinin uzamasının hem de sıvı sıcaklığının artmasının bağlantıların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği saptamışlardır. Buna ek olarak, cam elyaf takviyeli kompozit plakaların, miktarı daldırma süresi ve sıcaklığa bağlı olan nem emilimi nedeniyle ağırlıklarının arttığını belirtmişlerdir. 6 Nm sıkma torku altında önceden yüklenmiş bağlantı elemanlarına sahip bağlantıların, yaşlandırılmamış numunelerde olduğu gibi, parmakla sıkılmış olanlara kıyasla sertlik ve mukavemet açısından gözle görülür bir avantaj sağladığını belirtmişlerdir.

Gündoğan ve Karaağaç (2020), grafen takviyeli polistiren kompozitlerinin yapısal, ısı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerine araştırma yapmışlardır.

Çalışmalarında matris içine değişik oranlarda grafen takviyesi yapmışlardır. Grafenin parçacık boyutu 30  $\mu\text{m}$ 'dir. Üretimlerini plastik enjeksiyon yöntemi kullanarak yapmışlardır. Üretim sırasında kristal polistirenler eritip nano takviyelerle birleştirdikten sonra kalıplara dökmüşlerdir. Homojen dağılımı sağlamak için 80 Rpm hızında 10 dakika boyunca karıştırmışlardır. Numunelerin mikroyapısını incelemek için SEM analizini kullanmışlar. Ayrıca üretilen numunelere sertlik, çekme ve TGA analizlerini uygulamışlardır. Sonuç olarak grafen takviyesinin saf polistirenin mikro yapısında önemli değişikliğe sebep olmadığını belirtmişlerdir. Grafen takviyeli kompozitlerin malzemenin yüzde uzamasını ortalama %1,3 artırdığını ve maksimum kopma dayanımı değerinde ise %30 oranında azalmaya neden olduğunu saptamışlardır.

Kaftelen Odabaşı vd. (2023), grafen takviyeli karbon fiber kompozitlerin elektriksel, eğilme ve dinamik mekanik özellikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında karbon fiberler ile güçlendirilmiş epoksi matris kompozitlere eklenen grafen nano plateletler vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiş ve farklı grafen nano platelet içeriklerinin (ağırlıkça %0,05, 0,25 ve 1,25) etkisi araştırılmıştır. Ağırlıkça %0,05 ve %0,25 grafen nano platelet ilavesiyle kalınlık boyunca iletkenlik değerlerinde saf kompozite kıyasla sırasıyla 8 ve 73 kat iyileşme olduğunu belirtmişlerdir. Eğilme testi sonuçları, 0,05 grafen nano platelet ilavesiyle eğilme mukavemetinde sadece %6'lık bir artış elde edildiğini, ağırlıkça %0,25 grafen nano platelet ilavesiyle eğilme mukavemetinin saf kompozitle neredeyse aynı kaldığını saptamışlar. Aksine, grafen nano platelet ilavesi (ağırlıkça %1,25) eğilme mukavemetinde saf kompozite göre bir azalmaya neden olduğunu ve bu durumu, taramalı elektron mikroskobu ile incelenen kırık yüzeyler ile doğrulayarak ve 1.25 grafen nano platelet yüklemesi ile önemli miktarda fiber-matriks ayrışmasını gözlemlemişlerdir.

Alshahrani vd. (2022), nano-alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ile doldurulmuş cam takviyeli epoksi ince duvarlı çarpma kutusunun yarı statik ezilme tepkisini ve enerji emilimini deneysel olarak araştırmaktadır. Nano-alüminyum oksit ilavesinin enerji emilimi üzerinde olumlu etki yaptığını gözlemlemişlerdir.

Alshahrani vd. (2022), halloysit kil nanotüplerinin ilavesi ile, cam/epoksi kompozit tüplerin çarpışma dayanıklılığı performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. halloysit kil nanotüplerinin ilavesi, cam/epoksi kompozitlerin enerji emme kapasitelerini artırdığını gözlemlemişlerdir.

Abd El-baky, Hegazy ve Hassan (2022), çalışmada, halloysit nanokil (HNC), montmorillonit kili (MC), alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silika ( $\text{SiO}_2$ ) ve silisyum karbür

(SiC) olmak üzere beş tür nano dolgu maddesiyle güçlendirilmiş cam/epoksi kompozit tüpler test etmişlerdir. Saf cam epoksi ile karşılaştırıldığında enerji emilimlerinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Hegazy vd. (2023), karbon nano toz ile doldurulmuş ince duvarlı kompozit yapıların yanal çarpışma tepkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Genel sonuçlar, karbon nano tozun hem enerji emilimini hem de spesifik enerji emilimin ağırlıkça %0,50'ye kadar ilavesinin arttırdığını gözlemlemişlerdir.

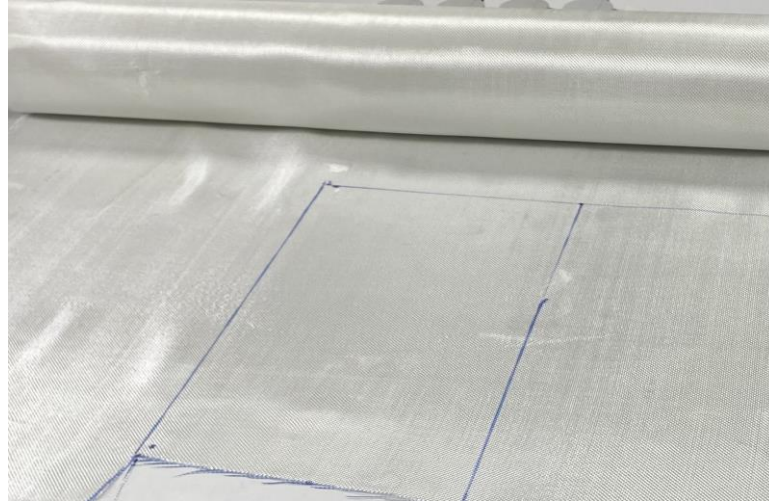
Bağatır (2018), çalışmasında grafen ilavesinin kompozit malzemenin çekme dayanımı üzerindeki etkilerini tespit etmeye çalışmıştır. Bu amaçla, epoksiye %0 (takviyesiz), %0,1, %0,2, %0,3, %0,4, %0,5 ve %1 oranlarında grafen ilave etmiştir. Bunula birlikte %0(takviyesiz), %0,2 ve %0,4 grafen ilave edilmiş epoksi ile el yatırma yöntemi kullanarak cam, aramid ve karbon fiber kompozitleri üretmiş ve karşılaştırmıştır. Grafen takviyesi ile kompozit malzemenin çekme mukavemetinin iyileştirilebileceğini vurgulamıştır. %0(takviyesiz) epoksi kompozit en düşük çekme mukavemetine sahip olduğunu belirtmiş, epoksiye %0,2 grafen takviyesinin en yüksek değerleri verdiğini saptamıştır. Ayrıca fiber takviyeli kompozitlerde %0,4 grafen ilaveli cam fiber takviyeli kompozit malzemenin en iyi sonucu gösterdiğini belirtmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Grafenin önemi son yıllarda artmakta ve kompozit malzemeler ile birlikte kullanımında dikkat çeken bir artış gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, 6 farklı tipte kompozit malzeme bunlar; cam fiber (GFRP), karbon fiber (CFRP), aramid fiber (AFRP) ve bunların hibridizasyonu olan içten dışa aramid-karbon-cam (ACGFRP), karbon-cam-aramid (CGAFRP), cam-aramid-karbon (GACFRP) üretilmiş ve bu numunelere ağırlıkça %0,25 ve %0,50 oranında grafen ilavesi yapılarak numuneler üretilmiştir. Yaşlandırmanın etkilerini anlamak için ise 60 °C 500 saat ve 1000 saat süreyle saf suda bekletilmişlerdir. Bütün numuneler yarı statik testlere tabi tutulmuştur. Gerilim – Yer Değiştirme grafiğinden elde edilen sonuçlar ile maksimum kuvvet, enerji emme kapasitesi ve spesifik enerji absorpsiyonu (SEA) sonuçları hesaplanarak yorumlanmıştır.

#### 3.1. Kompozit Malzemelerin Hazırlanması

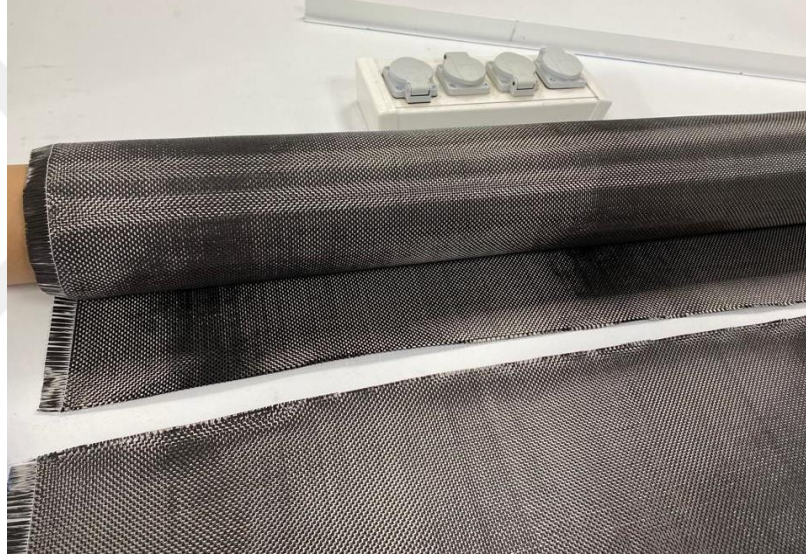
Dost Kimya firmasından temin edilen ve ana malzeme olarak kullanılan cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf tip kumaşlar Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmiştir. Elyafların yoğunlukları 200 gr/m<sup>2</sup>'dir. Nanografi Nano Teknoloji firmasından temin edilen grafen ise Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Grafen tozu 5 nm boyutlarında ve %99,5 saflıkta ve 30µm çapındadır.



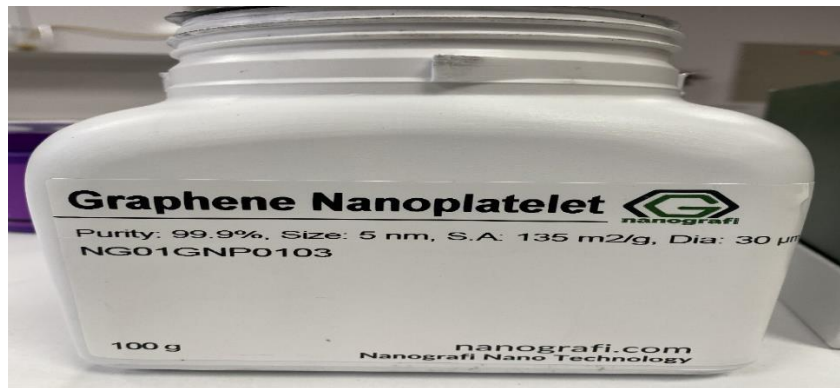
**Şekil 3.1.** Cam elyaf kumaş



Şekil 3.2. Aramid elyaf kumaş



Şekil 3.3. Karbon elyaf kumaş



Şekil 3.4. Grafen nano platelet

Daha sonra bütün kumaşlar 400 mm eninde ve 631,5 mm boyunda olacak şekilde kesilmiştir. Yine aynı numuneler hibridizasyon için 400 mm eninde ve 210,5 mm uzunluğunda kesilerek toplamda 3'lü hibridizasyon masuraya sarılma sayısı 6 kat olacak şekilde ayarlanmıştır. Devamında grafen nano platelet ile takviye edilecek numuneler kesilmiştir. Markalama ve kesme işlemi bittikten sonra grafen takviyesi yapılacak numuneler için grafen tozları aseton içerisinde ilk olarak ele ile ve daha sonra ultrasonik karıştırıcıda 10 dakika süreyle karıştırılarak takviye yapılacak malzemeye uygulanmak için hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.5). Toplam epoksi reçine ağırlığı 160 gram olacak şekilde hesaplandığı için % 0,25'lik grafen takviyesi olarak 0,40 gram grafen nano platelet; %0,50 takviye için 0,80 grafen nano platelet aseton içerisinde çözündürülmüştür. Bu işlemlerden sonra fiberlere grafeni yedirme işlemi için fiberler bir cam fanus içerisinde serilerek karışım üzerine dökülmüş ve 1 gün oda sıcaklığında bekletilen fiberler asetonun tamamen buharlaştığı gözlemlendikten sonra çıkarılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Ultrasonik karıştırma İşlemi



**Şekil 3.6.** Grafen takviye işlemi

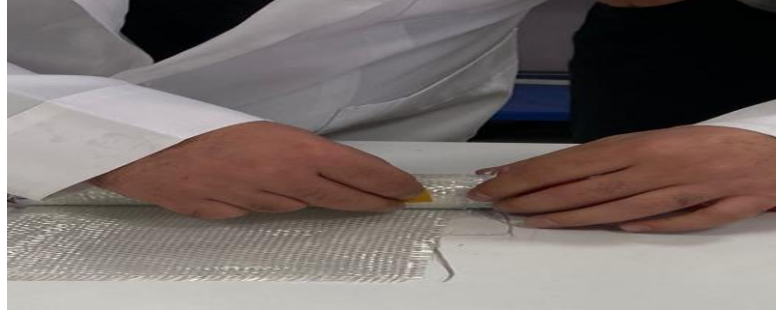
Epoksi olarak LR-285 ve sertleştirici olarak LH-287 kullanılmıştır. Epoksinin yüksek mukavemet değeri için epoksi/sertleştirici oranı 4/1 olarak kullanılmıştır. Cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyafa çok iyi uyum sağlaması, çalışma süresinin uzun olması ve farklı dokuma kumaşları yapıştırırken uyumlu olması sebebiyle LR-182 epoksi seçilmiştir. İmalat aşamasında kullanılan LR-285 epoksi ve LH-287 sertleştirici malzeme Şekil 3.7’de verilmiştir.



**Şekil 3.7.** Epoksi ve sertleştirici malzeme

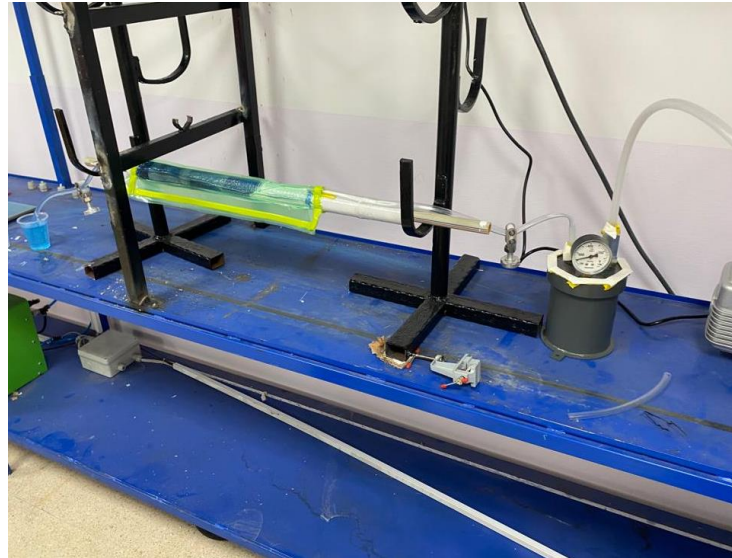
Hazır olan fiberler karton masuraya sarılarak numunenin şekli olan silindirik boru elde edilmeye çalışılmıştır (Şekil 3.8). Fiberleri sararken fazla gerdirmeden bir o kadar da fazla serbest bırakmadan sarma işlemi gerçekleştirilmiştir. Gevşek kalınca vakum

infüzyon sırasında malzeme yüzeyinde kanalcıklar oluşmakta; çok gerdirince de fiber yapısı zarar görmekte ve bu da malzemenin mekanik özelliğini etkilemektedir.



**Şekil 3.8.** Karton masuraya sarım işlemi

Fiber sarma işlemi bittikten sonra fiberlerin üzerine sarılacak ayırıcı kumaş ve grid kesilip sarma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sızdırmazlık sağlayacak naylon kesilerek karton masura içerisinden geçirilip sızdırmaz bant ile kapatılarak vakum verme işlemine hazır hale getirilmiştir. Epoksi reçine ve sertleştirici karıştırılmadan önce sistem kontrol edilerek herhangi bir sızdırmanın olmaması sağlanıp sonrasında sisteme epoksi reçine verilmiştir (Şekil 3.9). Epoksi reçine oranı üretici firmanın önerdiği  $\frac{1}{4}$  oranında karışım yapılarak uygulanmıştır.



**Şekil 3.9.** Epoksi reçine verilen numune

Epoksinin reçinenin kürleşebilmesi için oda şartlarında 24 saat bekletildikten sonra naylon ve ayırıcı kumaş sökülerek kompozitler kesime hazır hale getirilmiştir. Tüm bu işlemler ile öncelikle sadece cam takviyeli kompozit malzeme, sonra karbon fiber

takviyeli kompozit malzeme ve en sonunda aramid takviyeli kompozit malzeme üretilmiştir. Tekil olarak bu kompozitler ürettikten sonra hibrit kompozit aşamasında ise en içte aramid fiber, ortada karbon fiber ve en dışa cam fiber sarılarak üretim yapılmıştır. Daha sonra en içte karbon fiber orta kısımda cam fiber ve en dışa aramid fiber olacak şekilde üretim yapılmış ve en son olarak dizilim sıraları değiştirilip yani en içte cam elyaf ortada aramid elyaf ve en dışta karbon elyaf olmak üzere malzemelerimiz sarılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu numuneleri Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi laboratuvarında bulunan Metkon Metacut 250 cihazında 100 mm uzunluğunda keserek 3 adet numuneye bölünmüştür (Şekil 3.10). Numune iç çapları ise 33,5 mm olarak belirlenmiştir. Kesme işlemi bittikten sonra numunelerin içindeki kartonları ayırmak için suda kısa bir süre bekletip kartonlar parçalamak suretiyle çıkartılıp deneye hazır numune elde edilmiştir.



**Şekil 3.10.** a) Kesme işlemlerinin yapıldığı Metkon Metacut 250 cihazı b) Numunenin kesme işlemi

Her bir masuradan toplamda 3 adet numune elde edilmiştir. İlk üretilen 6 ana numune yani cam, aramid, karbon fiberler ile bunların hibridizasyonu olan aramid-karbon-cam, karbon-cam-aramid ve cam-aramid-karbon silindirik kutular ana parametreler olacak şekilde bunların 2 farklı sürede yaşlandırma işlemi için 12 adet daha numune üretilmiştir. Bu işlemden sonra 2 farklı %'lik grafen katkısı için 12 adet daha numune üretilmiştir. Ve en son olarak olarak grafen katılan numunelerin yaşlandırma

işlemi için 24 adet daha numune üretilmiştir. Toplamda 54 farklı numune üretilmiştir. Numunelerin kodları ve özellikleri Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Numunelerin kodları ve özellikleri

| Numune Adı | Elyaf Türü        | Grafen Oranı (%) | Yaşlandırma Saati (Saat) |
|------------|-------------------|------------------|--------------------------|
| S1         | Cam               | -                | -                        |
| S2         | Aramid            | -                | -                        |
| S3         | Karbon            | -                | -                        |
| S4         | Aramid-Karbon-Cam | -                | -                        |
| S5         | Karbon-Cam-Aramid | -                | -                        |
| S6         | Cam-Aramid-Karbon | -                | -                        |
| S7         | Cam               | 0,25             | -                        |
| S8         | Aramid            | 0,25             | -                        |
| S9         | Karbon            | 0,25             | -                        |
| S10        | Aramid-Karbon-Cam | 0,25             | -                        |
| S11        | Karbon-Cam-Aramid | 0,25             | -                        |
| S12        | Cam-Aramid-Karbon | 0,25             | -                        |
| S13        | Cam               | 0,50             | -                        |
| S14        | Aramid            | 0,50             | -                        |
| S15        | Karbon            | 0,50             | -                        |
| S16        | Aramid-Karbon-Cam | 0,50             | -                        |
| S17        | Karbon-Cam-Aramid | 0,50             | -                        |
| S18        | Cam-Aramid-Karbon | 0,50             | -                        |

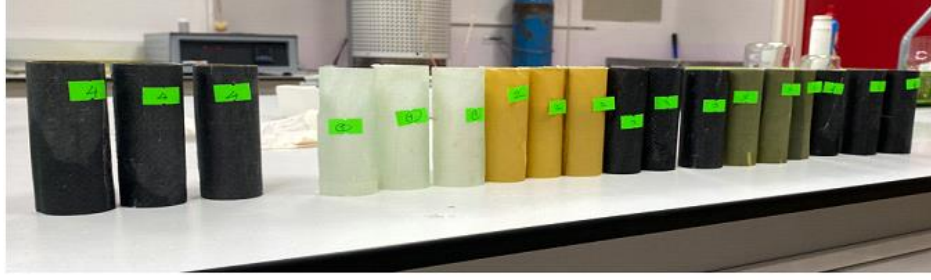
**Çizelge 3.2.** Numunelerin kodları ve özellikleri

| Numune Adı | Elyaf Türü        | Grafen Oranı (%) | Yaşlandırma Saati (Saat) |
|------------|-------------------|------------------|--------------------------|
| S19        | Cam               | -                | 500                      |
| S20        | Aramid            | -                | 500                      |
| S21        | Karbon            | -                | 500                      |
| S22        | Aramid-Karbon-Cam | -                | 500                      |
| S23        | Karbon-Cam-Aramid | -                | 500                      |
| S24        | Cam-Aramid-Karbon | -                | 500                      |
| S25        | Cam               | 0,25             | 500                      |
| S26        | Aramid            | 0,25             | 500                      |
| S27        | Karbon            | 0,25             | 500                      |
| S28        | Aramid-Karbon-Cam | 0,25             | 500                      |
| S29        | Karbon-Cam-Aramid | 0,25             | 500                      |
| S30        | Cam-Aramid-Karbon | 0,25             | 500                      |
| S31        | Cam               | 0,50             | 500                      |
| S32        | Aramid            | 0,50             | 500                      |
| S33        | Karbon            | 0,50             | 500                      |
| S34        | Aramid-Karbon-Cam | 0,50             | 500                      |
| S35        | Karbon-Cam-Aramid | 0,50             | 500                      |
| S36        | Cam-Aramid-Karbon | 0,50             | 500                      |

**Çizelge 3.3.** Numunelerin kodları ve özellikleri

| Numune Adı | Elyaf Türü        | Grafen Oranı (%) | Yaşlandırma Saati (Saat) |
|------------|-------------------|------------------|--------------------------|
| S37        | Cam               | -                | 1000                     |
| S38        | Aramid            | -                | 1000                     |
| S39        | Karbon            | -                | 1000                     |
| S40        | Aramid-Karbon-Cam | -                | 1000                     |
| S41        | Karbon-Cam-Aramid | -                | 1000                     |
| S42        | Cam-Aramid-Karbon | -                | 1000                     |
| S43        | Cam               | 0,25             | 1000                     |
| S44        | Aramid            | 0,25             | 1000                     |
| S45        | Karbon            | 0,25             | 1000                     |
| S46        | Aramid-Karbon-Cam | 0,25             | 1000                     |
| S47        | Karbon-Cam-Aramid | 0,25             | 1000                     |
| S48        | Cam-Aramid-Karbon | 0,25             | 1000                     |
| S49        | Cam               | 0,50             | 1000                     |
| S50        | Aramid            | 0,50             | 1000                     |
| S51        | Karbon            | 0,50             | 1000                     |
| S52        | Aramid-Karbon-Cam | 0,50             | 1000                     |
| S53        | Karbon-Cam-Aramid | 0,50             | 1000                     |
| S54        | Cam-Aramid-Karbon | 0,50             | 1000                     |

Kesimi yapılan grafen takviyeli ve takviyesiz kompozit malzemeler Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



a

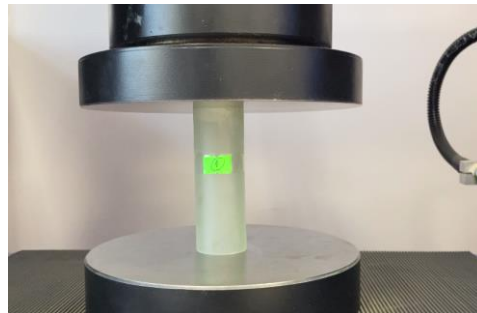


b

Şekil 3.11. Kesimi tamamlanmış numuneler a) Takviyesiz numuneler b) Grafen Takviyeli numuneler

### 3.2. Yarı Statik Basma Testi

Elde ettiğimiz numunelere Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi laboratuvarında bulunan RAAGEN marka, modeli ETM-50-S olan Türkiye üretili cihaz ile 2mm/dk hızla ve 60mm uzunluğa kadar denk gelecek şekilde basma kuvveti uygulanmıştır. 60 mm uzunluktan fazla seçilmesinin sebebi ise numuneler bazen kırılarak üst üste bindirme yapmıştır, bu da malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede yanlış sonuçlar vermektedir. Literatürde yer alan çap ve boy oranı ile basma hızı kullanılmıştır. Numunelerin çap bölü boy oranı 1/3'ten küçük olduğundan burkulma gerçekleşmemiştir. Basma test cihazı şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Basma test cihazı

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

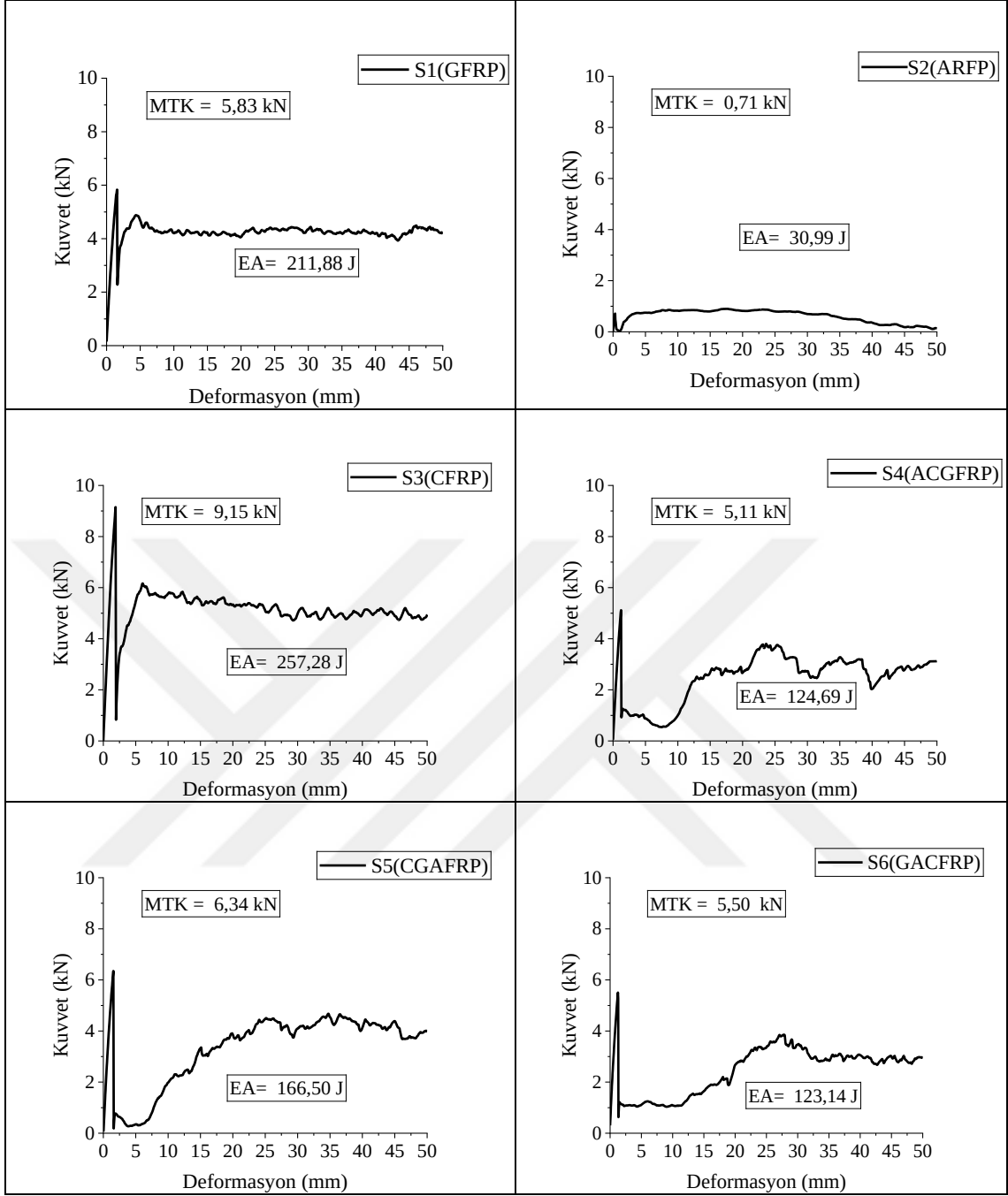
Bu çalışmada, 6 farklı yapıda kompozit malzeme bunlar; epoksi reçine matrisli cam elyaf, aramid elyaf, karbon elyaf ve hibridizasyon olarak sarım sırası içten dışa aramid-karbon-cam, karbon-cam-aramid, cam-aramid-karbon (S1-S6) numuneler ile bunlara %0,25 ve %0,50 oranlarda grafen takviyesi (S7-S18) son olarak bütün numunelerin 60 °C sıcaklık 500 saat ve 1000 saat süre ile hidrotermal yaşlandırması ile (S19-S54) üretilen kompozit numunelerin maksimum ezilme kuvveti, enerji absorpsiyonu ve spesifik enerji absorpsiyonları incelenmiştir.

##### 4.1. Basma Test Sonuçları

Grafen takviyeli ve takviyesiz olarak üretilen ve hidrotermal yaşlandırılmış bütün kompozit malzemeler, Raagen marka cihazla 2mm/dk hızla basma testine tabi tutulmuşlardır. Her numuneden elde edilen gerilim yer değiştirme eğrilerinden faydalanarak kuvvet-yer değiştirme grafikleri çizilmiştir. Bu diyagramdan her bir numunenin maksimum tepe kuvvetleri elde edilmiştir. Ayrıca yine bu diagramın altında kalan alan Matlab paket programı yardımı ile hesaplanarak enerji soğurma değerleri hesaplanmıştır. Farklı türde malzemeleri karşılaştırmak için gerekli olan spesifik enerji absorpsiyonları da enerji soğurma değerinin numunenin ağırlığına bölünerek hesaplanmıştır.

##### 4.1.1. Grafen takviyesiz ve hidrotermal olarak yaşlandırılmamış (S1 – S6) tekil numunelerin test sonuçları

Herhangi bir işleme tabi tutulmayan ve katkısız tekil numunelerin test sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. S1-S6 numunelerinin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.1’den anlaşılabacağı gibi en düşük MTK S2 numunesi elde edilmiş olup yaklaşık olarak değeri 0,71 kN’dur. Bütün numuneler 5 kN’luk maksimum tepe kuvvetini aşarken aramid fiber bu değerin çok altında kalmıştır. Maksimum tepe kuvvetinde en iyi ikinci sonuç S5 numunesi ile karbonun en içte sarılı olduğu numunede saptanmıştır. Diğer hibrit numuneler yani S5 ve S6’nın sonuçları S1 numunesine yakın olmasına rağmen ondan daha düşük değerdedir.

Enerji emme absorpsiyonunu hesaplarken kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin altında kalan kısma bakmamız gerektiğinde en iyi sonuç karbon fiber S3 numunesi ile edilmiştir. Bu değer 257,28 Joule'dür. S3 numunesine yani karbon fibere en yakın değer maksimum tepe kuvvetinde S5 numunesinden daha düşük olan S1 numunesinde 211,88 ile elde edilmiştir. Hibridizasyon yapılan numunelerde en iyi sonuç karbon fiberin en iç kısımda sarılı olduğu S5 ile saptanmıştır. 166,50 Joule ile S3 numunesinden 90,78 Joule daha düşük değer olmasına rağmen hibrit numuneler içinde kayda değer bir sonuçtur. S4 ve S6 numunesi tekil olan S2 numunesinden çok daha iyi sonuçlar vermiştir. S2 numunesi enerji soğurma özelliği olarak ta yine en kötü sonucun sahibidir. Karbon fiberin güçlü lif yapısı onun daha yüksek sonuçlar vermesinde etkili olmuştur. Aramid fiber ise genel olarak düşük epoksi matris direncinden dolayı en düşük değerleri göstermiştir.

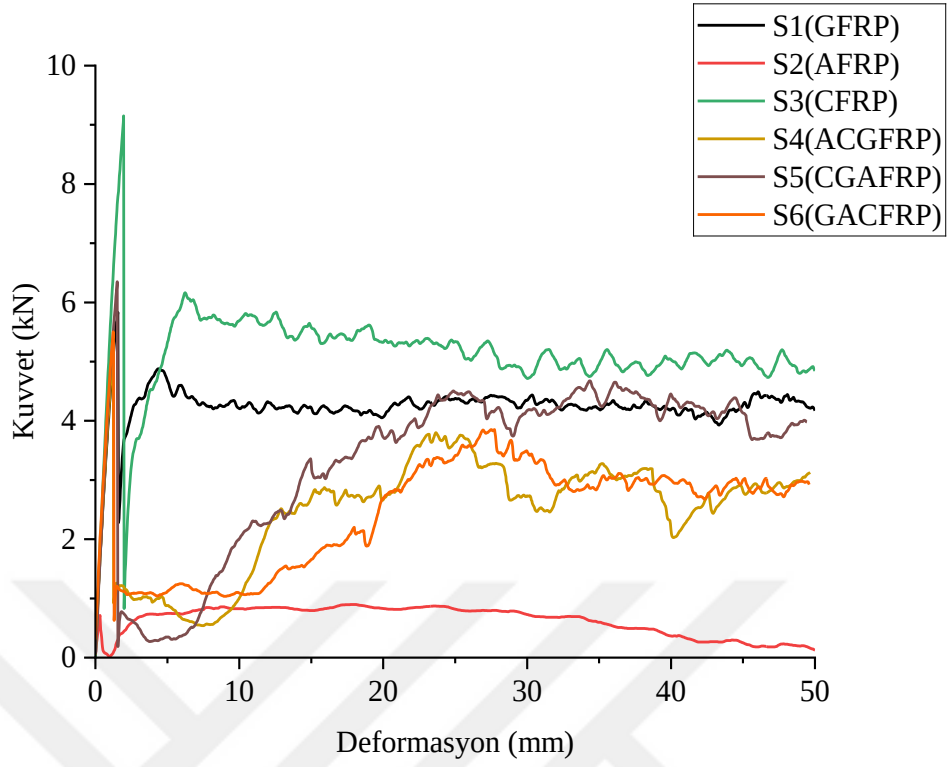
Çizelge 4.1'de S1-S6 numunelerine ait sonuçlar ve ağrılıkları verilerek spesifik enerji absorpsiyonu değerleri verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** S1 – S6 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri

| Numune | Maksimum Tepe Kuvveti(kN) | Enerji Soğurma (J) | Numune Ağrılıkları(gr) | Spesifik Enerji Soğurma(J)/(gr) |
|--------|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|
| S1     | 5,83                      | 211,88             | 22,69                  | 9,33                            |
| S2     | 0,71                      | 30,94              | 8,63                   | 3,58                            |
| S3     | 9,15                      | 257,28             | 24,12                  | 10,66                           |
| S4     | 5,11                      | 124,69             | 19,50                  | 6,39                            |
| S5     | 6,34                      | 166,50             | 21,97                  | 7,57                            |
| S6     | 5,50                      | 123,14             | 20,02                  | 6,15                            |

Çizelge 4.1'e göre enerji absorpsiyonu en yüksek değer olan karbon fiber takviyeli numune ile en düşük değerin olduğu aramid fiber takviyeli numune kıyaslandığında yani karbon/aramid yapıldığında 8,314 kat karbon fiber numunenin daha fazla enerji soğurduğu görölmektedir. Gram başına yapılan enerji soğurma özelliği oranlanacak olursa karbon/aramid 2,974 kata düşmektedir. Aslında ağrılıkları hesaba kattığımız da aramid fiber takviyeli numunenin sonuçlarının çokta kötü olmadığı gözlemlenmektedir.

S1 - S6 numunelerinin karşılaştırılmalı grafiği şekil 4.2'de verilmiştir.

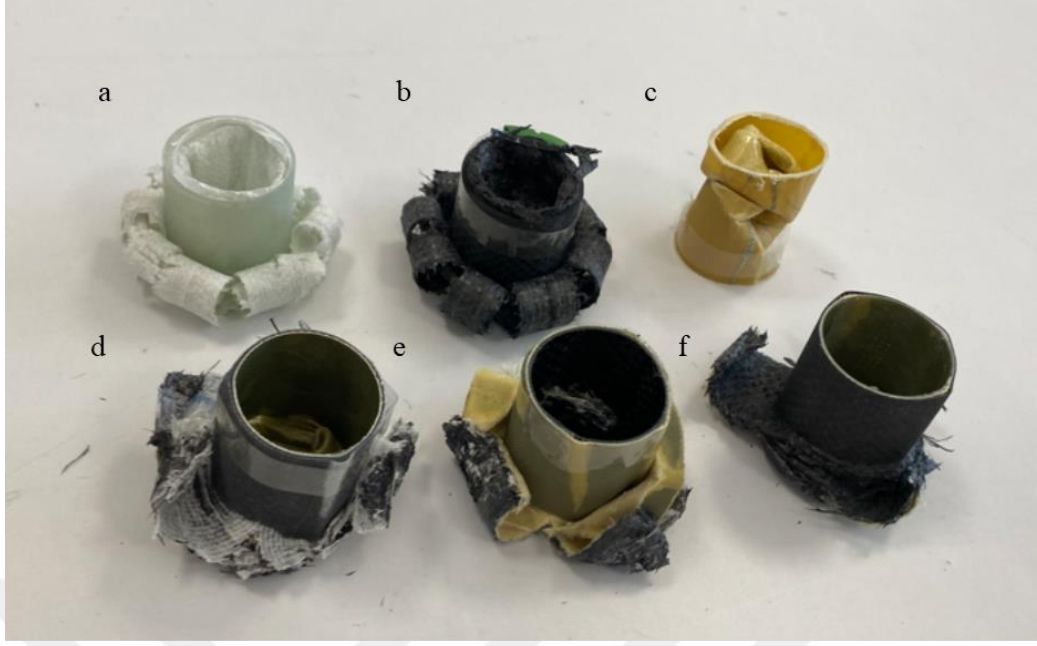


Şekil 4.2. S1- S6 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği

Deney sırasında numunelerdeki değişim ve sonrasında numunelerde oluşan hasar Şekil 4.3 ve 4.4' te verilmiştir. Yapılan basma testinden sonra numunelerin iç tarafındaki katmandan soyulmaya başlandığı gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.3.** S1-S6 numunelerinin deney sırasında ki değişimi ve nihai ezilmiş şekilleri: a) GFRP b) AFRP c) CFRP d) ACGFRP e) CGAFRP e) GACFRP

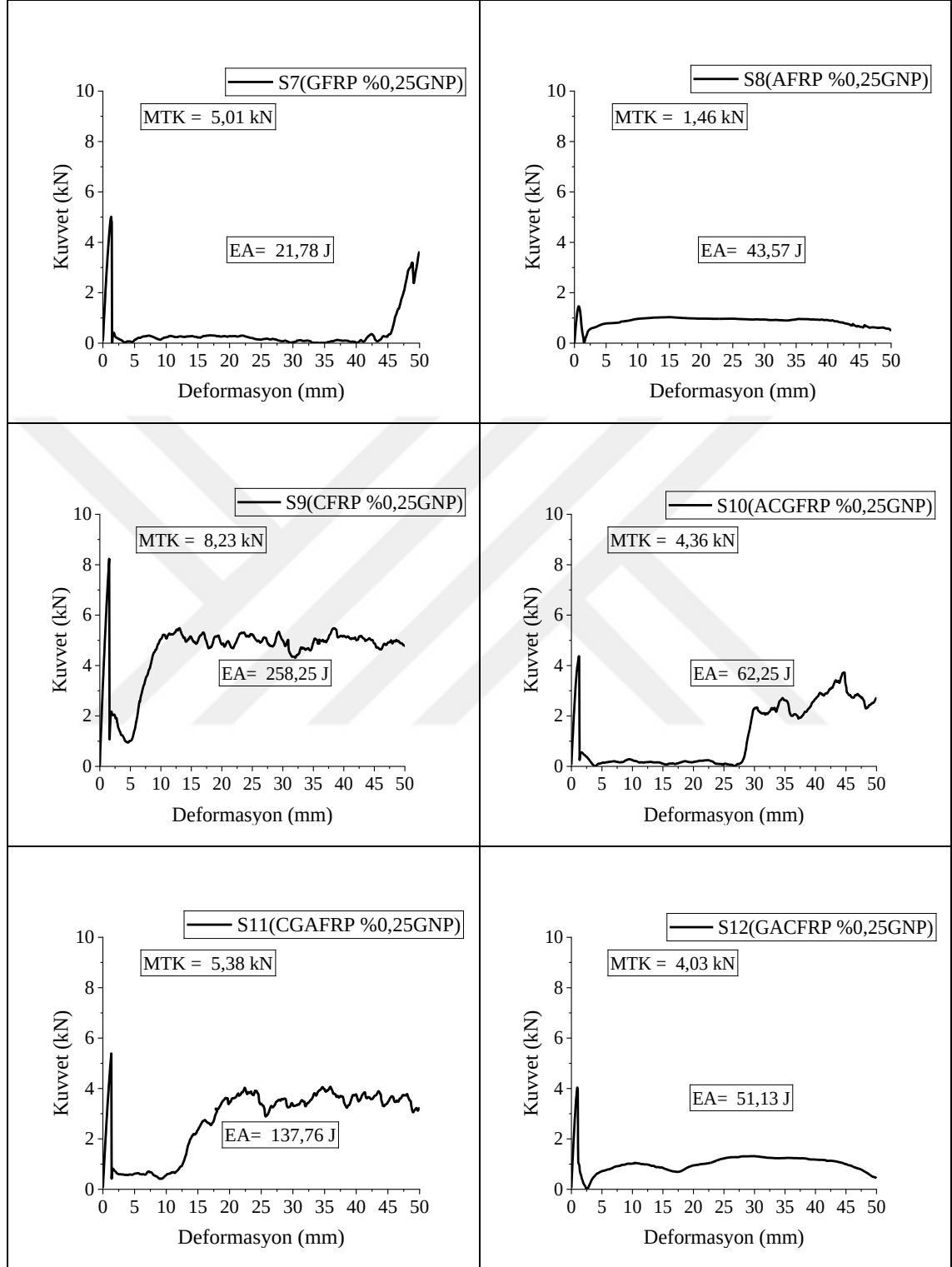


**Şekil 4.4.** S1-S6 numunelerin nihai ezilmiş şekilleri: a) GFRP b) CFRP c) AFRP d) ACGFRP e) CGAFRP e) GACFRP

Şekil 4.3 ve 4.4'te de görüldüğü üzere deney sırasında S1 ve S3 dikey ekseninde matris ve lif kırılmaları gözlemlenmiştir. İçten dışa delaminasyonla hasar görmüştür. Deney sırasında yatay olarak içten dışa doğru çiçek benzeri bir açılma söz konusudur. S2 numunesinde ise herhangi bir matris ve lif kırılması görülmemiştir. Bunun yerine numune katlanarak bükülmüştür. Yeterli epoksi matris direnci oluşmadığından böyle olmuştur. Aramidin epoksi ile etkileşimi diğer iki fibere göre zayıftır. Hibrit numunelerde yani S4, S5 ve S6' da numune hasar modları incelendiğinde diğer numunelerde olduğu gibi yukarıdan aşağıya kırılma gözlemlenmiştir ancak kırılma S1 ve S3 gibi düzenli olarak gerçekleşmemiştir. Aramid dahil tüm katmanlarda lif kopmaları meydana gelmiştir. Ezme sırasında S1 ve S3'ten farklı olarak farklı tipteki lif katmanları arasında soyulma gözlemlenmiştir. Bütün numunelerde izlenen bu delaminasyonla hasar, matris kırılması, fiber kırılması veya katlanma gibi durumlar kuvvet-yer değiştirme eğrisine de yansımıştır.

#### **4.1.2. % 0,25 grafen takviyeli ve hidrotermal olarak yaşlandırılmamış (S7 -S12) numunelerin test sonuçları**

% 0,25 oranında grafen ile takviye edilmiş ve hidrotermal olarak yaşlandırmaya tabi tutulmamış numunelerin test sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. % 0,25 grafen takviyeli hidrotermal yaşlandırılmamış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Grafen takviye edilmesi numunelerin MTK üzerinde pek bir etki etmemiştir. S8 numunesi hariç bütün numunelerin maksimum tepe kuvvetinde düşüşler yaşanmıştır.

Şekil 4.5' den görüldüğü gibi %0,25 grafen ilaveli cam fiber S7 numunesi maksimum tepe kuvveti değeri olarak 5,01 kN' luk bir değere ulaşmıştır. S1 numunesine kıyasla 0,82 kN' luk bir düşüş yaşanmıştır. EA'da ise çok daha büyük bir düşüş gözlemlenmiştir. Takviyesiz olan enerji absorpsiyonu 211,88 joule iken grafen takviyesi ile de bu değer 21,78 joule' e gerileyerek yaklaşık on kat gibi bir düşüş yaşanmıştır. Bu cam fiberin grafen ile iyi bir uyum içinde olmadığını göstermektedir.

S8 numunesi yani aramid fiber diğer numunelere kıyasla grafen ile iyi bir uyum sağlamıştır. Gerek maksimum tepe kuvveti değeri gerekse enerji absorpsiyonunda kayda değer artışlar gözlemlenmiştir. Maksimum tepe kuvveti S2 numunesine göre yaklaşık 2 kattan daha fazla artarak 1,46 kN' luk bir değere ulaşmıştır. Enerji absorpsiyonunda ise yaklaşık %40 oranında bir değer artışı ile 43,57 joule' lük bir değere ulaşmıştır. Bu da aramidin grafen ile uyumunu ortaya çıkarmaktadır.

S9 numunesi tekil numuneler en iyi sonuçları gösterirken %0,25 grafen takviyesinde de en iyi sonuçlara ulaşmıştır. Fakat grafen takviyesi Karbon fibere pek bir olumlu etki yapmamıştır. Diğer taraftan olumsuz olarak çok önemli düşüşler gözlemlenmekle birlikte maksimum tepe kuvveti S3 numunesine göre 0,92 kN' luk bir düşüş ile 8,23 kN olmuştur. Enerji absorpsiyonunda ise 29,03 joule düşüle 228,25 joule gibi bir değer elde edilmiştir.

S10 numunesinde ise maksimum tepe kuvveti değerinde çok önemli oranda olmasa da düşüş gözlemlenmiştir. Maksimum tepe kuvvetinde elde edilen değer 4,36 kN'dur. Maksimum tepe kuvvetinde ki S3'e göre önemsiz düşüş enerji absorpsiyonunda daha büyük değerlere ulaşmıştır. S7 numunesi kadar olmasa da bu numunede ki düşüş yaklaşık yarısından biraz fazla olarak 62,25 joule değeri olarak gözlemlenmiştir. Hibrit numuneler arasında cam fiberden kaynaklı düşüşler kendini göstermektedir.

S11 numunesi karbon fiberin en içte sarılı olduğu numune olarak grafen takviyesiz ve yaşlandırılmamış hibrit numuneler arasında en iyi sonucu gösteren numuneydi. S7 – S12 numunelerinde de S9 numunesinden sonra en iyi maksimum tepe kuvveti ve enerji absorpsiyon değerini vermektedir. Maksimum tepe kuvveti S5 numunesine kıyasla 0,96 kN' luk bir düşüş ile 5,38 kN değerine düşmüştür. Enerji absorpsiyon değerinde ki düşüş ise 28,74 joule' dür. Elde edilen değer 137,76 joule' dür.

S12 numunesi cam fiberin içte olduğu numune olarak hibrit numuneler arasında hem maksimum tepe kuvveti hem de enerji absorpsiyonu değeri olarak en düşük değerleri

vermiştir. Maksimum tepe kuvveti katkısız ve yaşlandırılmamış S6 numunesine oranla %26,72 oranında azalarak 4,03 kN' luk değere düşmüştür. Deney sırasında numuneler içten soyulduğunu gözlemlendiğinden dolayı en içte yer alan fiber, hibrit numuneler için önem arz etmektedir. Enerji absorpsiyonunda da tıpkı S7 numunesinde olduğu gibi elde edilen değer S6 numunesine kıyasla çok düşmüştür.

S7- S12 numunelerin değerleri Çizelge 4.2' de verilmiştir.

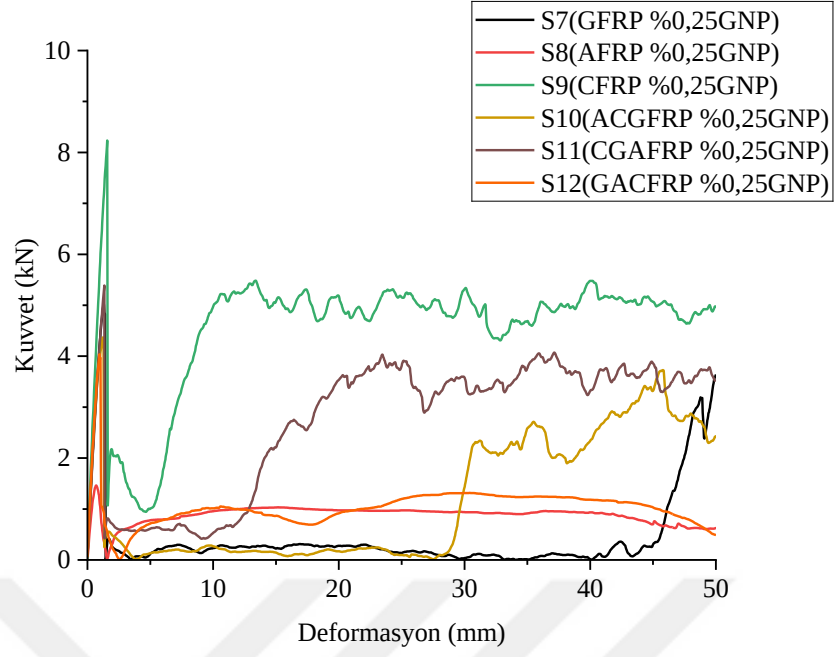
**Çizelge 4.2.** S7 – S12 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri

| Numune | Maksimum Tepe Kuvveti(kN) | Enerji Soğurma (J) | Numune Ağırlıkları(gr) | Spesifik Enerji Soğurma(J)/(gr) |
|--------|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|
| S7     | 5,07                      | 21,78              | 23,68                  | 0,91                            |
| S8     | 1,46                      | 43,57              | 10,53                  | 4,13                            |
| S9     | 8,23                      | 228,25             | 24,22                  | 9,42                            |
| S10    | 4,36                      | 62,25              | 20,60                  | 3,02                            |
| S11    | 5,38                      | 137,76             | 18,11                  | 7,60                            |
| S12    | 4,03                      | 51,13              | 19,81                  | 2,58                            |

Grafen katkısının spesifik enerji absorpsiyonuna etkisi Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere en iyi sonuç karbon fiber numune ile yani S9 ile elde edilirken ikinci en iyi sonuç karbon fiberin iç kısımda yer aldığı hibrit numune ile elde edilmiştir. Bu kısımda dikkate değer sonuç S8 numunesi elde edilmiştir. 4.13 joule/gram olan değer en iyi üçüncü değeri verirken 0.55 joule/gram'lık bir atış gözlemlenmiştir. S7 numunesi ise spesifik enerji absorpsiyonunda en fazla düşüş yaşayarak 1 joule/gram'ın altına düşmüştür. % 0,25 grafen takviyesinin cam fiberin mekanik özelliklerini kötü etkilediği ve bunu aynı zamanda S12 numunesindeki deney sonucuna da yansıttığı görülmüştür.

Grafen ilavesi aramid fiber numunesi hariç değerlerde düşüşler oluşmasına neden olmuştur. Aramid fiberinin düşük epoksi matris direncine katkı sağlayarak esnek yapısını biraz daha gevrek hale getirdiğinden dolayı grafen ilavesi değerlerinde artışa sebep olmuştur.

S7 - S12 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.6' da verilmiştir.

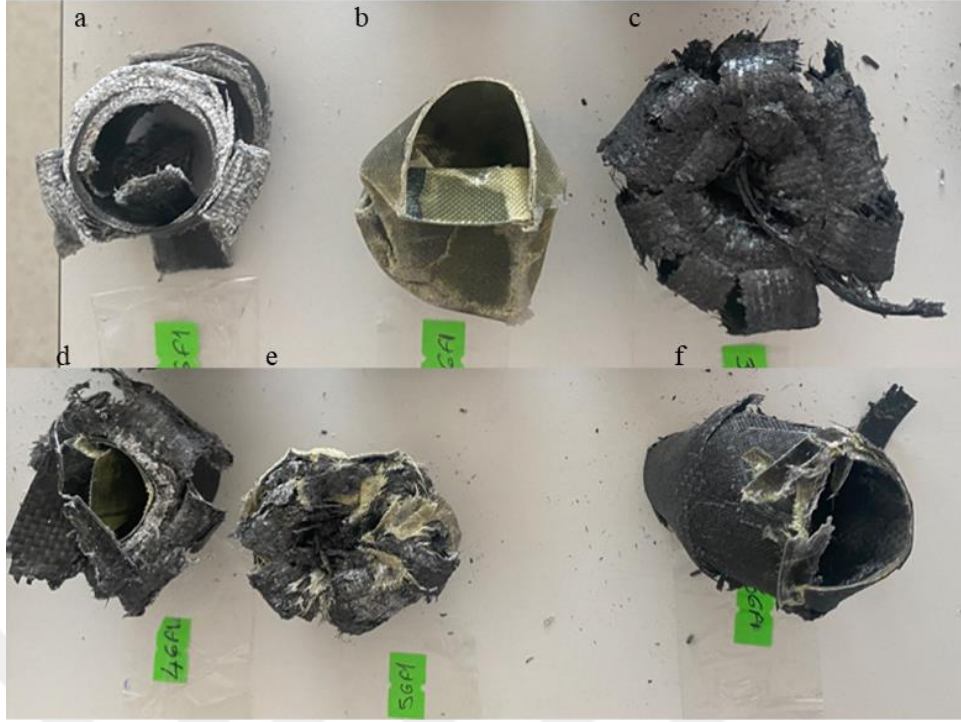


Şekil 4.6. S7 – 12 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.7 ve 4.8’de deney sırasında numunelerdeki değişim ve sonrasında numunelerin ezilmiş nihai şekilleri verilmiştir.



**Şekil 4.7.** S7 – 12 numunelerinin deney sırasındaki boy değişimleri ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25GNP b) AFRP %0,25GNP c) CFRP %0,25GNP d) ACGFRP %0,25GNP e) CGAFRP %0,25GNP e) GACFRP %0,25GNP



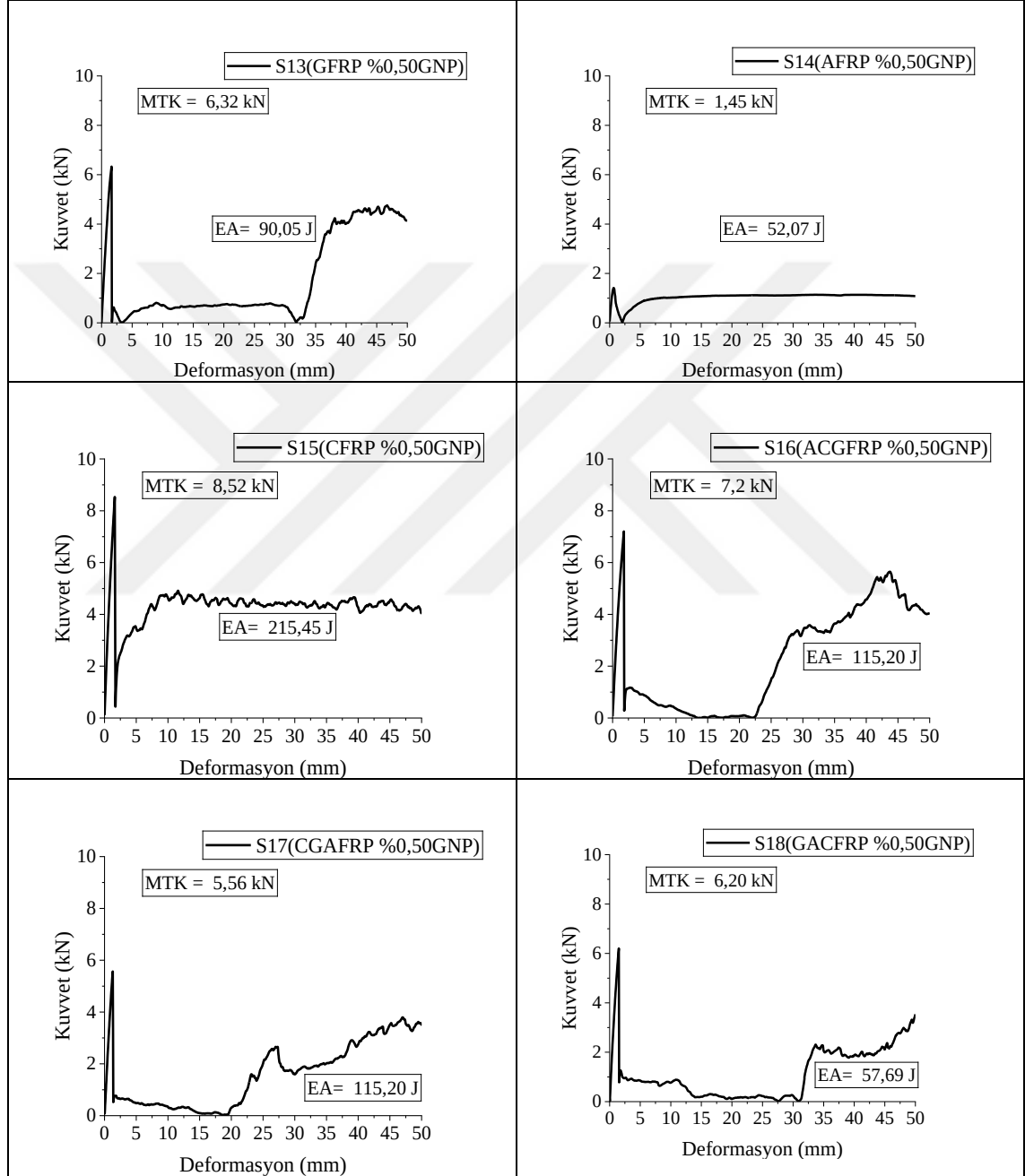
**Şekil 4.8.** S7 – 12 numunelerinin nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25GNP b) AFRP %0,25GNP c) CFRP %0,25GNP d) ACGFRP %0,25GNP e) CGAFRP %0,25GNP e) GACFRP %0,25GNP

Şekil 4.7 ve 4.8’de görüldüğü üzere deney sırasında S7 matris ve fiber kırılması oluşmuştur. S8 numunesinde ise yine herhangi bir matris ve lif kırılması görülmemiştir ve numune katlanarak bükülmüştür. Yetersiz matris epoksi direnci vardır. S9 dikey ekseninde matris ve lif kırılmaları gözlemlenmiştir. İçten dışa delaminasyonla hasar görmüştür ve çiçek benzeri bir açılma söz konusudur. Hibrit numunelerde yani S10, S11 ve S12’de numune hasar modları incelendiğinde diğer numunelerde olduğu gibi yukarıdan aşağıya kırılma gözlemlenmiştir ancak kırılma S9 gibi düzenli olarak gerçekleşmemiştir. Aramid dahil tüm katmanlarda lif kopmaları meydana gelmiştir. Ezme sırasında S7 ve S9’dan farklı olarak farklı tipteki lif katmanları arasında soyulma gözlemlenmiştir. Bütün numunelerde izlenen bu delaminasyonla hasar, matris kırılması, fiber kırılması veya katlanma gibi durumlar kuvvet-yer değiştirme eğrisine de yansımıştır.

Odabaşı vd. (2022), grafen takviyeli karbon fiber kompozitlerin elektriksel, eğilme ve dinamik mekanik özellikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında ağırlıkça %0,25 grafen nano platelet ilavesiyle eğilme mukavemetinin saf kompozitle neredeyse aynı kaldığını saptamışlardır.

#### 4.1.3. %0,50 grafen takviyeli ve hidrotermal olarak yaşlandırılmamış (S13 - S18) numunelerin test sonuçları

%0,50 oranında grafen ile takviye edilmiş ve hidrotermal olarak yaşlandırmaya tabi tutulmamış numunelerin test sonuçları Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. % 0,50 grafen takviyeli hidrotermal yaşlandırılmamış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Grafen takviye oranının genel olarak numuneleri daha gevrek bir yapıya sokarak MTK üzerinde %0,25 grafen takviyesine göre S8 numunesi hariç artışlar gözlemlenmiştir.

Şekil 4.9'de verilen değerlere göre S13 numunesi üzerinde %0,25 grafen takviyesinin aksine %0,50 grafen takviye etmek olumlu yönde etki yaparak takviyesiz cam fiber yani S1 numunesinin dahi üzerinde bir sonuca ulaşarak 6,32 kN'luk bir değere ulaşmıştır. Artış EA'da devam ederek 90,05 joule değerine ulaşsa da bu S1 numunesinden % 57,49 daha az bir değerdir. Grafen takviye oranını artırmak olumlu bir etki yapsa da grafen takviyesizde ki değerlere uzak sonuçlar gözlemlenmiştir.

Aramid fiber numunesine yapılan %0,25 grafen takviyesi olumlu bir etki yapmasına karşı artırılarak yapılan grafen çok az bir miktar maksimum tepe kuvvetini azaltmıştır. S14 numunesinin bu sonucu S2' numunesinden fazla olup 1,41 kN'dur. Enerji absorpsiyonunda ki olumlu artış ise S12 numunesine göre %19,50 artarak 52,07 joule değerine ulaşmıştır. Grafen ve aramidin uyumunu gözler önüne seren bu değer aramid fiber için umut vadetmektedir.

S15 numunesinde ise maksimum tepe kuvveti değerinde S9 numunesine göre artış oluşurken S3 numunesine göre düşük kalarak 8,52 kN'luk bir değer gözlemlenmiştir. Enerji absorpsiyonu ise diğer iki numunenin de altında bir değer ola 215,45 joule'dür. Karbon atomunun bir allotropu olan grafen karbon fiber için pek bir varlık gösterememiştir.

Hibrit numunelerden olan S16 numunesinde aramid fiberin iç kısımda bulunmasının artışı etki etmiştir. Maksimum tepe kuvveti artarak 7,20 kN değerine ulaşmıştır. Bu değer S4 numunesinin de üstünde bir değerdir. Fakat bu artış enerji absorpsiyonunda diğer fiberlerin özellikle cam fiberin zayıflamasından dolayı kendini gösterememiş 115,20 joule değeri gözlemlenmiştir.

S17 numunesinde ise S11 numunesine göre pik kuvvetinde çok az bir artış gözlemlenmiş olup bu değer 5,56 kN'dur. Bu numunede de karbon iç kısımda olup normal tekil olan karbona düşüşler ve artışlar devam etmektedir. Enerji absorpsiyonu da düşüş yaşamış 80,80 joule değerine gerilemiştir.

S18 numunesinde iç kısımda bulunan cam fiberin güçlenmesi maksimum tepe kuvvetinde kendini göstererek değeri 6,20 kN değerine çıkarmıştır. Bu değer hem S6 hem de S12 numunesinden yüksek değerdir. Maksimum tepe kuvvetinde ki bu artış enerji absorpsiyonunda da kendini göstermiş S12 numunesine göre %12,83 artış yaşanırken S6 numunesine göre %53,15 gibi bir düşüş gözlemlenmiştir.

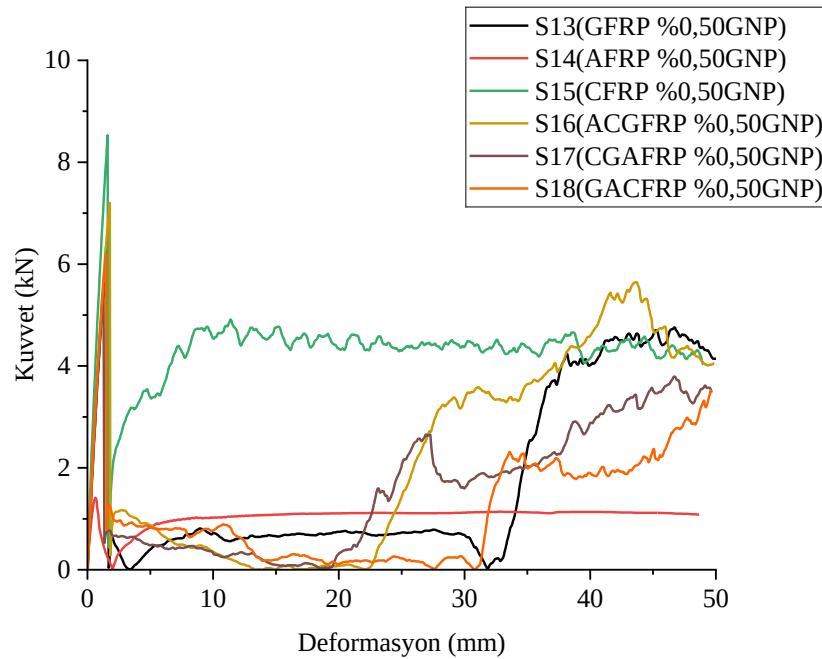
S13- S18 numunelerin değerleri Çizelge 4.3' te verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** S13 – S18 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri

| Numune | Maksimum Tepe Kuvveti(kN) | Enerji Soğurma (J) | Numune Ağırlıkları(gr) | Spesifik Enerji Soğurma(J)/(gr) |
|--------|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|
| S13    | 6,32                      | 90,05              | 26,40                  | 3,41                            |
| S14    | 1,41                      | 52,07              | 10,61                  | 4,90                            |
| S15    | 8,52                      | 215,45             | 21,36                  | 10,08                           |
| S16    | 7,20                      | 115,20             | 25,47                  | 4,52                            |
| S17    | 5,56                      | 80,80              | 18,71                  | 4,31                            |
| S18    | 6,20                      | 57,69              | 20,63                  | 2,79                            |

Çizelge 4.3'te verilen değerlere göre spesifik enerji absorpsiyon S13 numunesi S1 numunesinden %63,45 daha az bir değer olarak hesaplanmışken bu değer S7 numunesinin yaklaşık 3,5 katı bir değerdir. Yine en iyi spesifik enerji emme karbon fiber numunesi elde edilmiş yani S15 numunesinindir. Burada dikkat çeken nokta S14 numunesinin performansıdır. Aramid fiber artışını sürdürerek en iyi ikinci spesifik enerji absorpsiyona sahiptir.

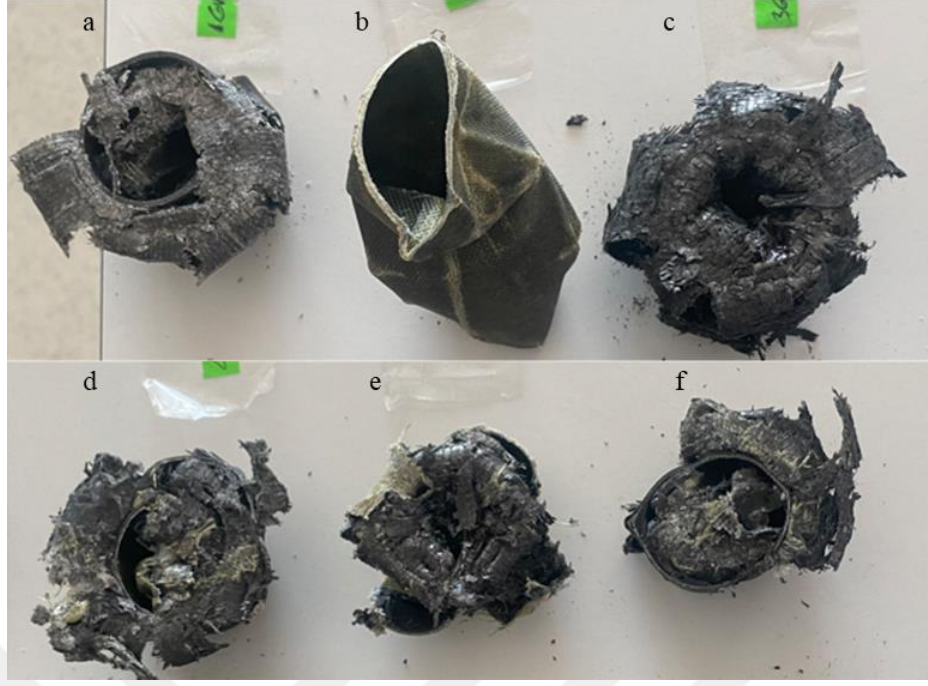
S13 - S18 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.10' da verilmiştir.

**Şekil 4.10.** S13 - S18 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.11 ve 4.12’de deney sırasındaki boy değişimleri ve sonrasında numunelerin ezilmiş nihai şekilleri verilmiştir.



**Şekil 4.11.** S13 – 18 numunelerinin deney sırasında boy değişimleri ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50GNP b) AFRP %0,50GNP c) CFRP %0,50GNP d) ACGFRP %0,50GNP e) CGAFRP %0,50GNP e) GACFRP %0,50GNP

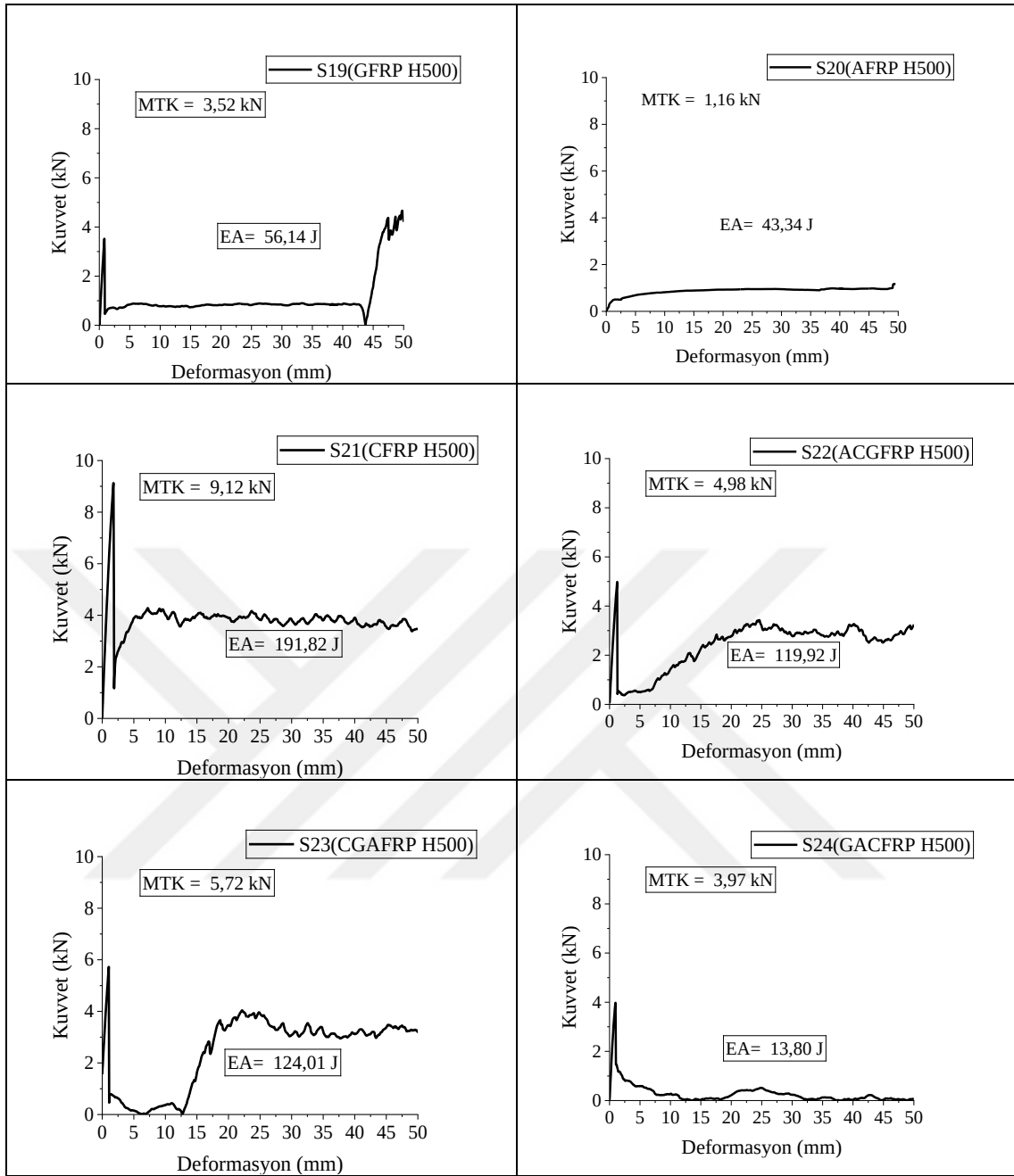


**Şekil 4.12.** S13 – 18 nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50GNP b) AFRP %0,50GNP c) CFRP %0,50GNP d) ACGFRP %0,50GNP e) CGAFRP %0,50GNP e) GACFRP %0,50GNP

Şekil 4.11 ve 4.12’de görüldüğü üzere hasar tipleri diğer numunelerde olduğu gibi meydana gelmiştir. Deney sırasında S13 delaminasyonla hasar görmüş fiber ve matris kırılması oluşmuştur. İçten dışa doğru yine çiçek gibi bir açma söz konusudur. S14 numunesinde ise yine herhangi bir matris ve lif kırılması görülmemiştir ve numune katlanarak bükülmüştür. Yetersiz matris epoksi direnci devam etmektedir. S15 dikey ekseninde matris ve lif kırılmaları gözlemlenmiştir. İçten dışa delaminasyonla hasar görmüştür ve çiçek benzeri bir açılma söz konusudur. Hibrit numunelerde yani S16, S17 ve S18’de numune hasar modları incelendiğinde diğer numunelerde olduğu gibi yukarıdan aşağıya kırılma gözlemlenmiştir ancak yine kırılma S13 ve S15 gibi düzenli değildir. Tüm katmanlarda lif kopmaları meydana gelmiştir. Ezme sırasında S13 ve S15’ten farklı olarak farklı tipteki lif katmanları arasında soyulma gözlemlenmiştir. Bütün numunelerde izlenen bu delaminasyonla hasar, matris kırılması, fiber kırılması veya katlanma gibi durumlar kuvvet-yer değiştirme eğrisine de yansımıştır.

#### **4.1.4. Grafen takviyesiz ve hidrotermal olarak 500 saat yaşlandırılmış (S19 – S24) numunelerin test sonuçları**

500 saat süreyle 60 °C’de hidrotermal olarak yaşlandırmaya tabi tutulmuş ve grafen takviyesiz olan test sonuçları Şekil 4.13’da verilmiştir.



**Şekil 4.13.** 500 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.13'te görüldüğü üzere numunelere uygulanan hidrotermal yaşlanma MTK'da bütün numunelerde olumsuz etki oluşturmuştur. Bu etki enerji absorpsiyonunda da kendini göstermiştir. Belirli bir derecede su içerisinde beklemek mekanik özellikleri etkilemiştir.

S19 numunesi yani cam fiber numune yaşlandırma sonunda maksimum tepe kuvveti S1 numunesine göre 2,31 kN azalma göstererek 3,52 kN değerine düşmüştür. Bu cam fiberin yaşlanmaya verdiği tepkiyi göstermektedir. Düşüş EA'da kendini tıpkı grafen

ilavesinde olduğu gibi göstermektedir. Enerji absorpsiyonu %73,50 oranında düşerek 56,14 joule değerine gerilemiştir.

S20 numunesi ise maksimum tepe kuvvetinde düşüş yaşamış olsa da enerji absorpsiyonunda tıpkı grafen ilavesine benzer tepkiler vermiş ve artış sağlamıştır. Aramid fiberin su absorpsiyonu ile alakalı olan bu durum deney sırasında aramid fiberin gevrek halini esnek bir yapıya dönüştürdüğünü gözlemlememize yardımcı olmuştur. Maksimum tepe kuvvetinde S2'ye kıyasla %29'luk bir değer kaybına uğrayarak 0,5 kN değerine ulaşmıştır. Enerji absorpsiyonunda da ise %39,85'lik artış sağlayarak 43,34 joule'a ulaşmıştır.

S21 numunesi yani karbon fiber yine bütün numuneler arasında en iyi sonucu veren numunedir. Maksimum tepe kuvvetinde çok önemli bir değişiklik yaşamamışına rağmen enerji absorpsiyonunda düşüş kendini göstermiştir. Bu da karbon fiberin yaşlandırmadan etkilendiğinin göstergesidir. Maksimum tepe kuvveti S3 numunesi göre sadece 0,03 kN'luk düşüş göstermiş ve 9,12 kN olmuştur. Enerji absorpsiyonu ise S3 numunesine % 25,44 düşerek 191,82 joule olmuştur.

S22 numunesi aramid fiberin iç kısımda yer aldığı hibrit numune olmakla birlikte aramidin olumlu etkisi cam fiberin düşüşünü tam tolere edemeyerek maksimum tepe kuvvetindeki çok azda olsa düşüşü engelleyememiştir. Elde edilen değer 4,98 kN'dur. Bu S4 numunesinden 0,13 düşüktür. Enerji absorpsiyonunda da durum buna benzerdir. Yaklaşık % 3'lük bir düşüş ile elde edilen değer 119,92 joule'dur.

S23 numunesi ise diğer numunelerde olduğu gibi maksimum tepe kuvvetinde düşüş yaşayarak S5 numunesine oranla yaklaşık %9,77 oranında olan bu düşüş ile 5,72 kN olarak gözlemlenmiştir. Enerji absorpsiyonunda düşüş oranı ise %25,51 oranına ulaşmış ve 124.01 joule olarak hesaplanmıştır.

S24 numunesinde cam fiber en iç kısımda yer almakta ve yaşlandırmanın verdiği olumsuz etkiyi bu numunede de kendini göstermektedir. S6 numunesine göre maksimum tepe kuvvetindeki düşüş 1,53 kN olarak gözlemlenmiş buda yaklaşık olarak %27,81 oranına denk gelmektedir. Elde edilen değer 3,97 kN'dur. Bu düşüş enerji absorpsiyonunda kendini daha fazla göstermiştir. Enerji absorpsiyonunda ki düşüş oranı yaklaşık olarak %88,79 oranında olup hesaplanan değer 13,8 joule'dur.

Yaşlandırma işlemi fiber matris arayüzey bağlarında bozulmalarına yola açarak mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkilere yol açmıştır.

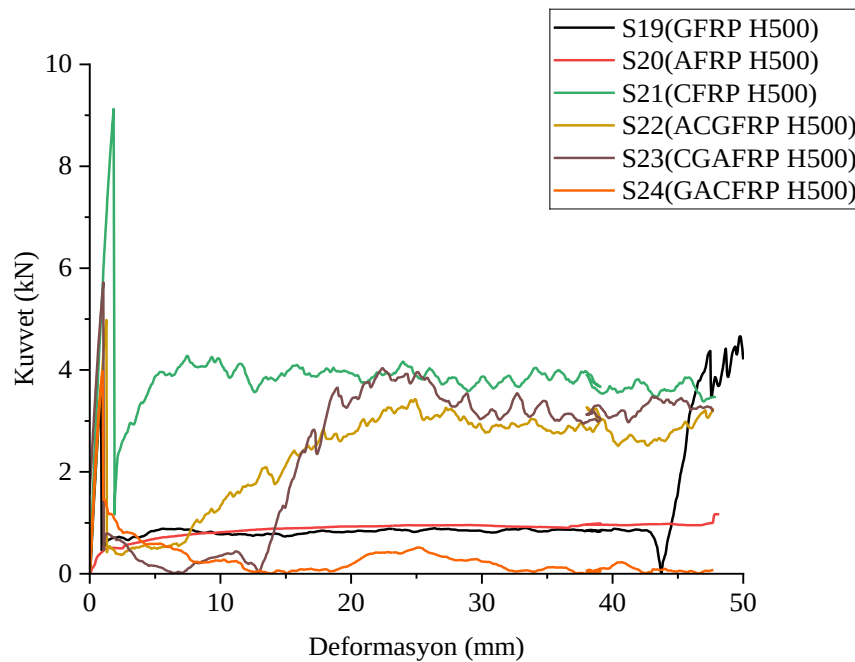
S19- S24 numunelerin değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** S19 – S24 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri

| Numune | Maksimum Tepe Kuvveti(kN) | Enerji Soğurma (J) | Numune Ağırlıkları(gr) | Spesifik Enerji Soğurma(J)/(gr) |
|--------|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|
| S19    | 3,52                      | 56,14              | 23,09                  | 2,43                            |
| S20    | 0,50                      | 43,34              | 9,39                   | 4,61                            |
| S21    | 9,12                      | 191,82             | 24,65                  | 7,78                            |
| S22    | 4,98                      | 119,82             | 19,87                  | 6,03                            |
| S23    | 5,72                      | 124,01             | 23,22                  | 5,34                            |
| S24    | 3,97                      | 13,80              | 20,06                  | 0,68                            |

Çizelge 4.4'te verilen değerlere göre spesifik enerji absorpsiyonunun en iyi olduğu sonuç 7,78 Joule/gram değeri ile karbon fiber numunesinde elde edilmiştir. Spesifik enerji absorpsiyonunda S19 numunesi tıpkı grafen eklenmesinde olduğu gibi S1 numunesine göre düşüş oluşmuştur. S20 numunesi ise S1 numunesine göre artış yaşayarak 4,61 joule/gram seviyesine yükselmiştir. Bu değer S14 numunesinin altında bir değerdir. Aramidin bu olumlu tepkisi hibrit numuneler içinde en iç kısımda sarılı olduğu S22'de de kendini göstermiştir ve ikinci en iyi sonuç bu numune ile elde edilmiştir. S24 numunesinde ise cam fiber en iç kısımda yer almakta ve bu sebepten bu numunenin spesifik enerji absorpsiyonu en kötü değeri vermektedir.

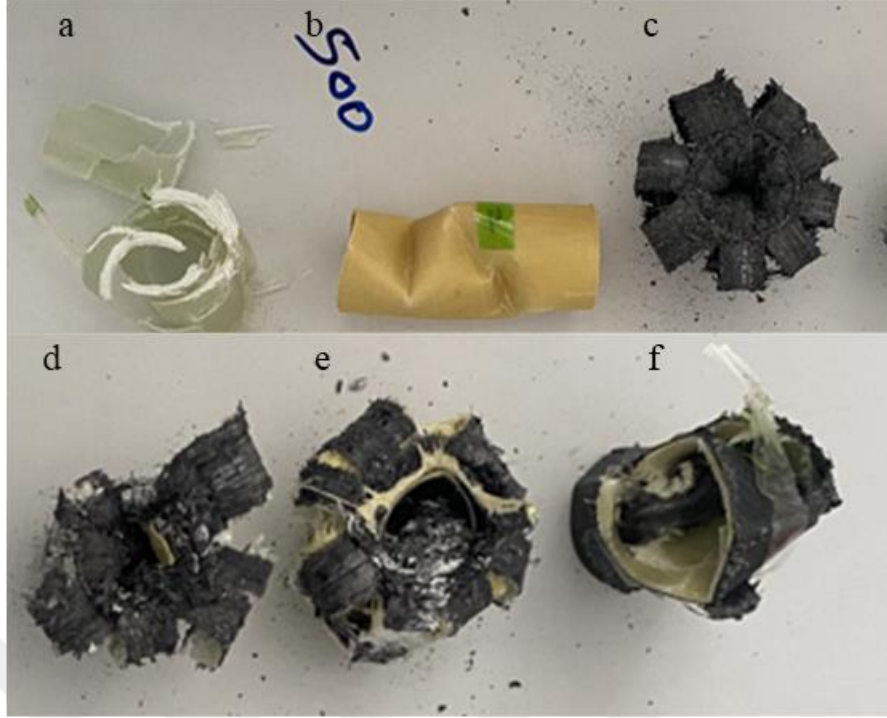
S19 - S24 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir.

**Şekil 4.14.** S19 - S24 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.15 ve 4.16'da deney sırasındaki boy değişimleri ve sonrasında numunelerin ezilmiş nihai şekilleri verilmiştir.



**Şekil 4.15.** S19 – 24 numunelerinin deney sırasında boy değişimleri ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP H500 b) AFRP H500 c) CFRP H500 d) ACGFRP H500 e) CGAFRP H500 f) GACFRP H500



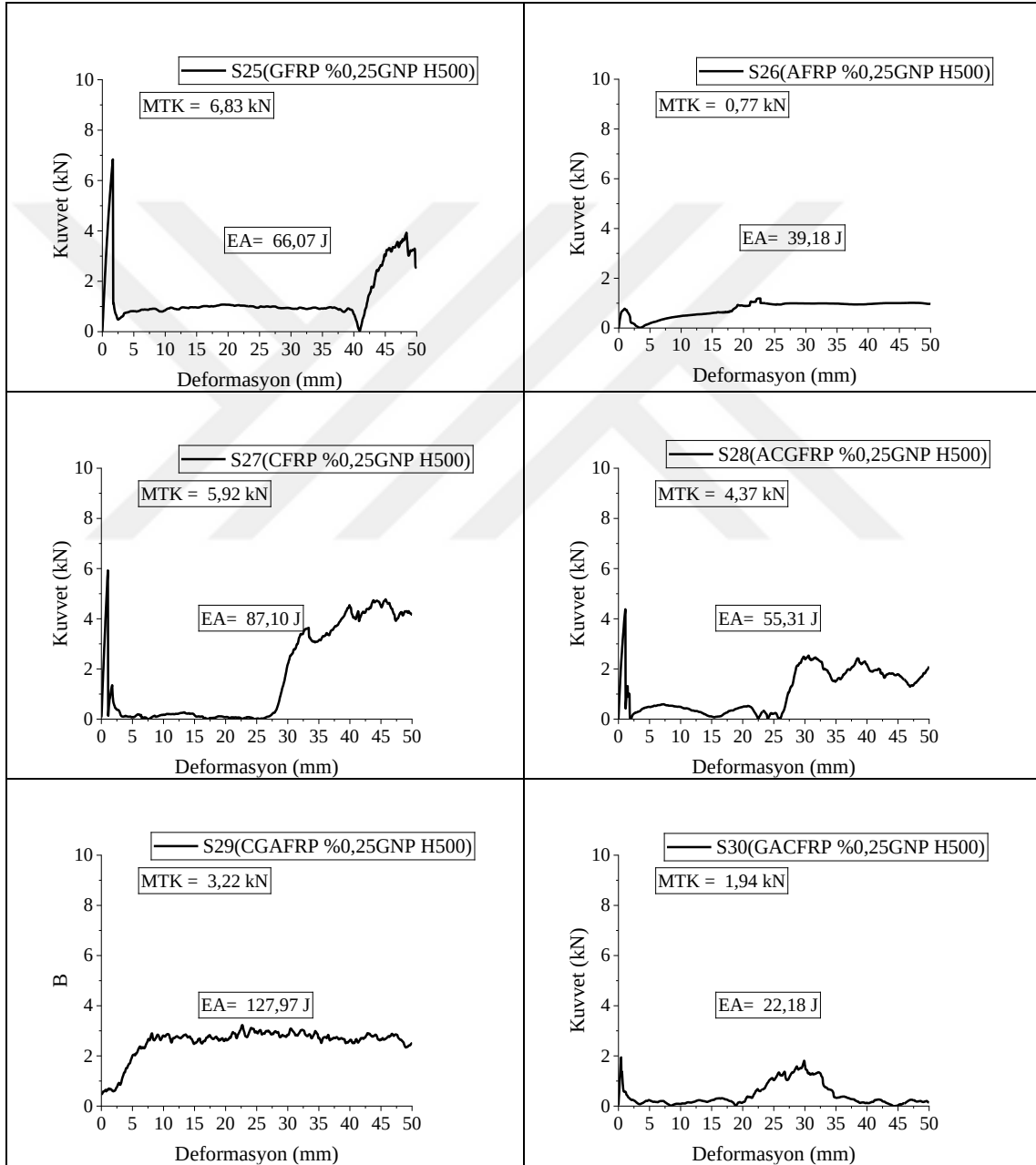
**Şekil 4.16.** S19 – 24 numunelerinin nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP H500 b) AFRP H500 c) CFRP H500 d) ACGFRP H500 e) CGAFRP H500 e) GACFRP H500

Şekil 4.15 ve 4.16’da görüldüğü üzere deney sırasında S19 fiber ve matris kırılması oluşmuştur. S20 numunesinde ise yine herhangi bir matris ve lif kırılması görülmemiştir ve numune katlanarak bükülmeye devam etmiştir. S21 dikey ekseninde matris ve lif kırılmaları gözlemlenmiştir. İçten dışa delaminasyonla hasar görmüştür ve çiçek benzeri bir açılma oluşmuştur. Hibrit numunelerde yani S22, S23 ve S24’de numune hasar modları incelendiğinde diğer numunelerde olduğu gibi yukarıdan aşağıya kırılma gözlemlenmiştir ancak kırılma S21 gibi düzenli olarak gerçekleşmemiştir. Ezme sırasında S21’den farklı olarak farklı tipteki lif katmanları arasında soyulma gözlemlenmiştir. Bütün numunelerde izlenen bu delaminasyonla hasar, matris kırılması, fiber kırılması veya katlanma gibi durumlar kuvvet-yer değiştirme eğrisine de yansımıştır.

Soykok vd. (2013), çalışmalarında cam elyaf/epoksi kompozitleri 1 ve 2 hafta süreyle 50, 70 ve 90 °C sıcaklıklarda sıcak suya maruz bırakmışlar. Hem daldırma süresinin uzamasının hem de sıvı sıcaklığının artmasının bağlantıların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği saptamışlardır.

#### 4.1.5. %0,25 Grafen ile takviye edilmiş ve 500 saat süre ile hidrotermal yaşlandırılmamış (S25 – S30) numunelerin test sonuçları

%0,25 oranında grafen ile takviye edilmiş ve 500 saat süreyle 60 °C’de hidrotermal olarak yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelerin test sonuçları Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. %0,25 grafen ile takviye edilmiş 500 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.17’de görüldüğü üzere %0,25 grafen takviyeli numunelere uygulanan hidrotermal yaşlanma ile sadece % 0,25 grafen ile takviye edilmiş S7 – S12 numunelerine kıyasla S25 numunesi hariç genel bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüş sadece MTK’da değil aynı zamanda EA’da paraleldir. Yani S25 numunesi hariç genel olarak düşüş yaşanmıştır.

S25 numunesi cam fiberin olduğu ve %0,25 grafen ilavesi veya 500 saat hidrotermal yaşlandırma ile gerek maksimum tepe kuvveti gerekse enerji absorpsiyonunda düşüşler olmuştur. Fakat grafen ilaveli numunenin yaşlandırılması ile maksimum tepe kuvvetinde artış gözlemlenmiştir. 6,83 kN’luk bir değer ile asıl numune olan S1 numunesinin de üstünde bir değere ulaşmıştır. Enerji absorpsiyonunda ise yine artış yaşanmıştır. Fakat bu artış maksimum tepe kuvvetinde olduğu gibi S1 numunesinin üstüne çıkan bir değer değildir. 66,07 joule değeri sadece %0,25 grafen ilave edilmiş S7 numunesinin yaklaşık %36,32 oranında fazla olmasına rağmen S1 numunesinin yani katkısız ve yaşlandırılmamış numunesinden %68,81 daha az bir değerdir. Aynı zamanda sadece yaşlandırmaya tabi tutulmuş S19 numunesinden az da olsa fazladır. Cam fiber numune için grafen ilavesi ve yaşlandırma genel olarak olumsuz etkiler ortaya çıkarmıştır.

S26 numunesi ise yani aramid fibere grafen ilavesi veya yaşlandırma ile en iyi uyumu sağlayan numune olmasına rağmen hem %0,25 grafen ilavesi hem de 500 saat yaşlandırma ile değerlerinde düşüş olmuştur. Maksimum tepe kuvveti S7 numunesine göre 0,69 kN düşerek 0,77 kN değerine düşmüştür. Enerji absorpsiyonu ise %10,07’lik bir düşüş yaşayarak 39,18 joule değerine gerilemiştir. Bu değer sadece 500 saat yaşlandırılmış numunenin yani S20’ nin biraz üstünde bir değerdir.

S27 numunesi genel olarak en iyi sonuçları veren karbon fiber numunesi olmakla birlikte gerek yaşlandırmaya veya grafen ilavesine çok az değer düşüşleri ile tepkiler vermiştir. Bu düşüş S27 numunesinde de kendini göstermiştir. Maksimum tepe kuvvetinde S9 numunesine oranla 2,31 kN’luk bir düşüş yaşayarak 5,92 kN gerilemiştir. Bu düşüş enerji absorpsiyonunda kendini daha fazla göstererek %61,84 oranında gerileme yaşanmıştır. Elde edilen değer 87,10 joule’ dür. Karbon fibere yaşlandırma ve grafen ilavesinin aynı anda uygulanması iki işlemin ayrı ayrı uygulamasından yaşanan düşüşlerden daha fazla oranda değer kaybettirmiştir.

S28 numunesi aramid fiberin en içte olduğu hibrit numunedir. S28 maksimum tepe kuvvetinde S10 numunesine göre çok küçük bir değer olan 0,01 kN’luk bir değer artışı ile 4,37 kN değerine ulaşmıştır. Enerji absorpsiyonunda ise cam fiber numunesi hariç diğer numunelerde olduğu gibi düşüş yaşanmıştır. Bu oran yaklaşık olarak

%11.14'tür. Elde edilen değer 55,31 joule' dır ve aynı zamanda sadece yaşlandırılmış numunenin de altında bir değerdir.

S29 numunesinde maksimum tepe kuvvetinde gerek S11 gerekse S23 numunesine göre düşüş olmuştur. S11 ve S23 numunesinin etkileri bu numunede toplam olarak kendini göstermiştir. Maksimum tepe kuvveti S11 2,16 kN azalarak 3,22 kN değerine gerilemiştir. En içte karbon fiberin bulunduğu bu numune tekil numuneler de olan karbon fiber yani S27'de olduğu gibi bir performans göstermiştir. Enerji absorpsiyonunda da S27'de yaşanan düşüş kadar olmasa da %10,73'lük bir düşüşle 127,97 joule değerine gerilemiştir.

S30 numunesinde ise maksimum tepe kuvvetinde ki düşüş kendini göstermiştir. Maksimum tepe kuvvetinde S12 numunesine göre 2,09 kN' luk bir düşüş olmuştur. Elde edilen değer 1,94 kN' dur. Bu düşüş kendini enerji emme absorpsiyonunda da kendini göstermiştir. Yine S12 numunesine göre %56,62'lik bir düşüş yaşanmış ve elde edilen değer 22,18 joule olmuştur.

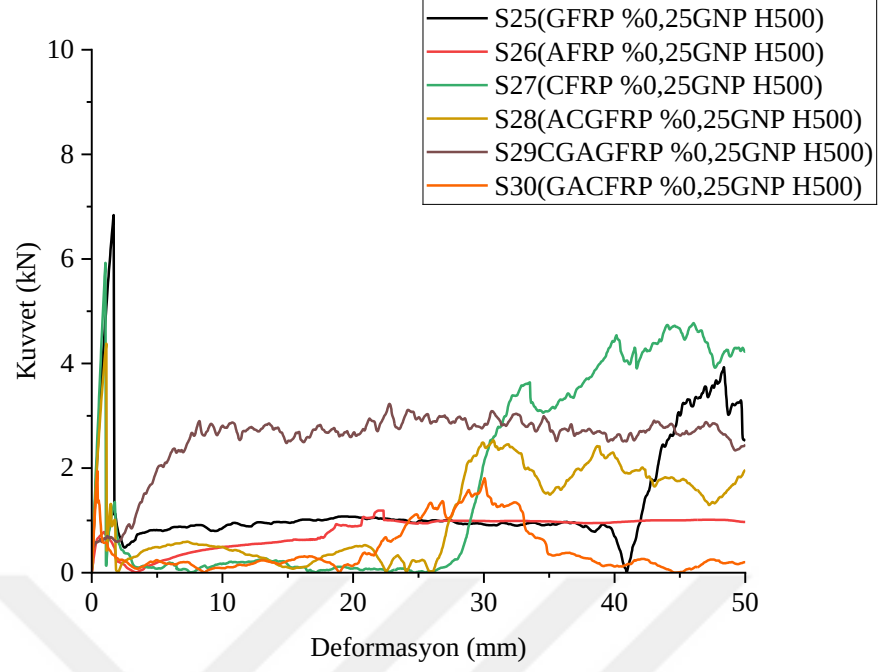
S25- S30 numunelerin değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** S25 – S30 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri

| Numune | Maksimum Tepe Kuvveti(kN) | Enerji Soğurma (J) | Numune Ağırlıkları(gr) | Spesifik Enerji Soğurma(J)/(gr) |
|--------|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|
| S25    | 6,83                      | 66,07              | 25,65                  | 2,57                            |
| S26    | 0,77                      | 39,18              | 11,54                  | 3,39                            |
| S27    | 5,92                      | 87,10              | 24,59                  | 3,54                            |
| S28    | 4,37                      | 55,31              | 22,31                  | 2,47                            |
| S29    | 3,22                      | 127,97             | 19,27                  | 6,64                            |
| S30    | 1,94                      | 22,18              | 19,77                  | 1,12                            |

Çizelge 4.5'te verilen değerlere göre spesifik enerji absorpsiyonları karşılaştırıldığında en iyi sonuçların beklenen numune olan karbon fiber yerine en içte karbon sarılı olan hibrit numune S29 olmuştur. S25 numunesi S7 numunesine kıyasla grafenin düşüş etkisini biraz olumluya çevirerek 2,57 joule/gram değerine yükselmiştir. S26 ise S8' e göre biraz düşüş yaşasa da yine S2' den daha iyi sonuç vermiştir. S27 ise S9'a göre neredeyse 3'te 1 değerine gerilemiştir. S28 ve S30 numunelerinde düşüşler olmuştur.

S25- S30 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.18'de verilmiştir.

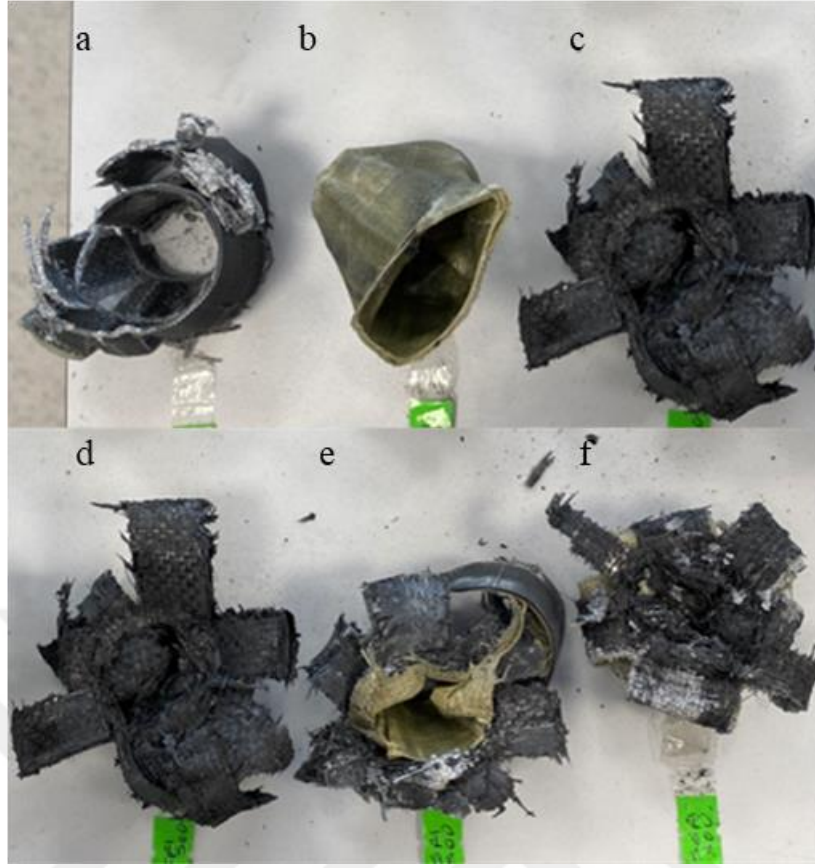


**Şekil 4.18.** S25 - S30 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.19 ve 4.20’de deney sonrasında numunelerin ezilmiş nihai şekilleri verilmiştir.



**Şekil 4.19.** S25 – S30 numunelerinin deney sırasında boy değişimi ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25GNP H500 b) AFRP %0,25GNP H500 c) CFRP %0,25GNP H500 d) ACGFRP %0,25GNP H500 e) CGAFRP %0,25GNP H500 e) GACFRP %0,25GNP H500

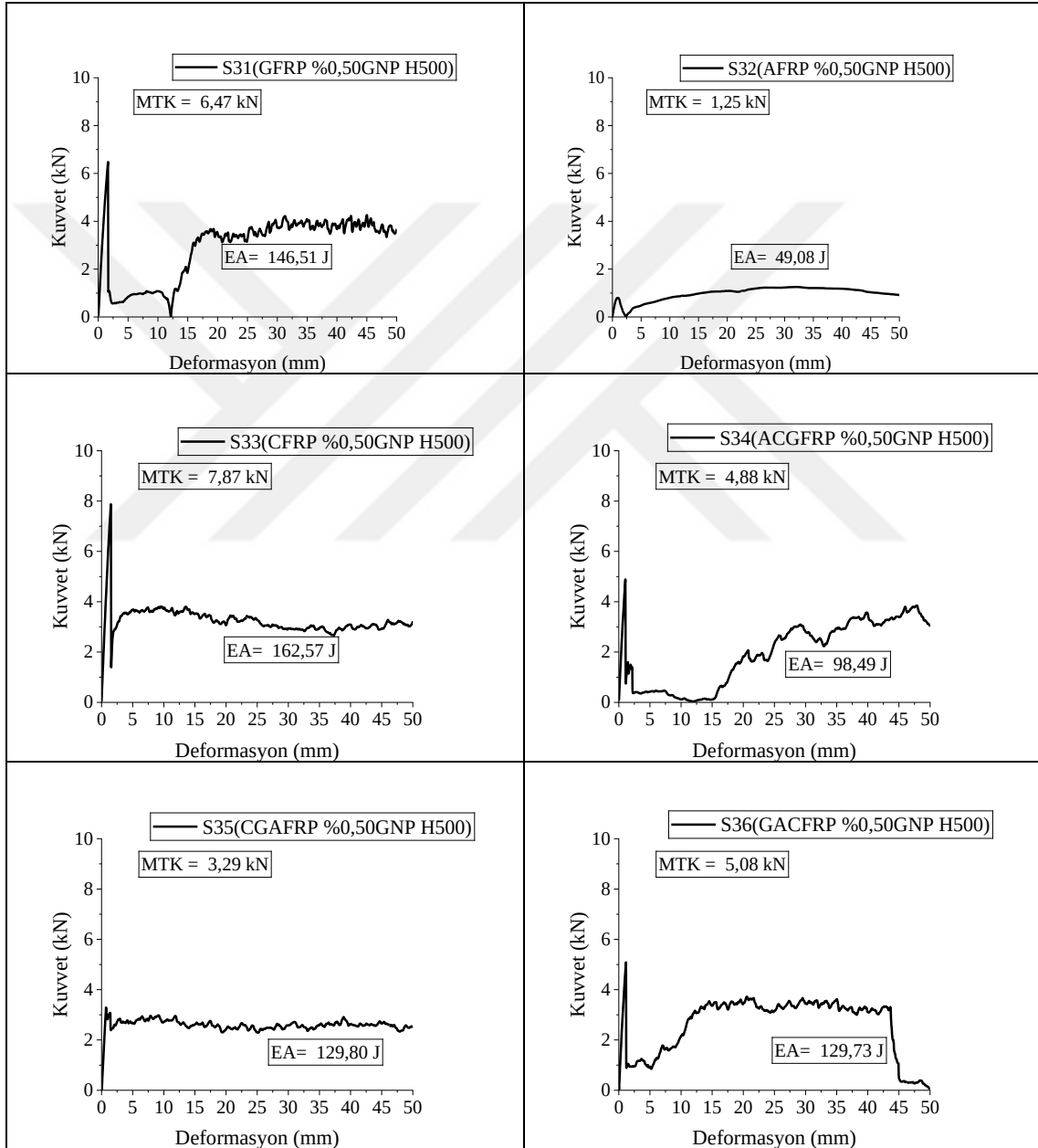


**Şekil 4.20.** S25 – S30 numunelerinin ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25 GNP H500 b) AFRP %0,25GNP H500 c) CFRP %0,25GNP H500 d) ACGFRP %0,25GNP H500 e) CGAFRP %0,25GNP H500 f) GACFRP %0,25GNP H500

Şekil 4.19 ve 4.20’de görüldüğü üzere hasar tipleri diğer numunelerde olduğu gibi gerçekleşmiştir. Deney sırasında S25 benzer şekilde fiber ve matris kırılması oluşmuştur. S26 numunesinde ise yine herhangi bir matris ve lif kırılması görülmemiştir ve numune katlanarak bükülme oluşmuştur. Yetersiz matris epoksi direnci bu numune de kendini fazlasıyla göstermiştir. S27 dikey ekseninde matris ve lif kırılmaları gözlemlenmiştir. İçten dışa delaminasyonla hasar görmüştür ve çiçek benzeri bir açılma gözlemlenmiştir. Hibrit numunelerde yani S28, S29 ve S30’ da yukarıdan aşağıya kırılma gözlemlenmiştir ancak yine kırılma S27 gibi düzenli değildir. Tüm katmanlarda lif kopmaları meydana gelmiştir. Ezme sırasında S27’ den farklı olarak farklı tipteki lif katmanları arasında soyulma olmuştur. Bütün numunelerde izlenen bu delaminasyonla hasar, matris kırılması, fiber kırılması veya katlanma gibi durumlar kuvvet-yer değiştirme eğrisine de yansımıştır.

#### 4.1.6. %0,50 Grafen ile takviye edilmiş ve 500 saat süre ile hidrotermal yaşlandırılmış (S31 – S36) numunelerin test sonuçları

%0,50 oranında grafen ile takviye edilmiş ve 500 saat süreyle 60 °C’de hidrotermal olarak yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelerin test sonuçları Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. %0,50 grafen ile takviye edilmiş 500 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.21’de görüldüğü üzere %0,50 grafen takviyeli numunelere uygulanan 500 saatlik hidrotermal yaşlanma ile S13 – S18 numuneleri ile kıyaslayacak olursak MTK ile EA’da iniş ve çıkışlar gözlemlenmiştir.

S31 numunesinde S13 numunesine maksimum tepe kuvvetinde çok az bir miktar artış elde edilmiştir. 0,15 kN’luk bir artışla 6,47 kN değerine ulaşmıştır. Bu değer %0,25 grafen katkılı 500 saat süreyle yaşlandırılmış numune olan S25’ inde altında bir değerdir. Diğer taraftan enerji absorpsiyonunda %62,69’luk bir değer artışıyla 146,51 joule değerine ulaşmıştır. Tabi bu değerler asıl numune olan yani takviyesiz ve yaşlandırılmamış S1 numunesinin değerinin altında değerlerdir.

S32 numunesi de yaşlandırmanın etkilerini hissetmiş buna bağlı olarak hem maksimum tepe kuvveti hem de enerji emme absorpsiyonunda S14 numunesine kıyasla düşüş gözlemlenmiştir. Maksimum tepe kuvvetinde S14 numunesine göre 0,62 kN’luk bir düşüş yaşayarak 0,79 kN değerine gerilemiştir. Enerji absorpsiyonunda ki düşüş ise %5,74 oranla 49,08 joule değerine gerilemiştir.

S33 numunesinde ki düşüş S32 numunesine kıyasla biraz daha fazladır. Maksimum tepe kuvvetinde ki düşüş S15 numunesine göre 0,65 kN’ dur. Elde edilen değer 7,87 kN ile %0,25 grafen takviyeli 500 saat yaşlandırılmış numune olan S27’ den fazla olsa da asıl numune olan S3’ten düşük bir değerdir. Enerji absorpsiyonunda ki düşüşte S15’ e göre %24,54 oranla 162,57 joule dür. Bu değerde S27 numunesinden yüksek olmasına rağmen S3’ ten düşüktür. Yaşlandırma karbon fiber üzerinde etkisini göstermiştir.

S34 numunesi hibrit numunelerden ve aramidin iç kısımda olduğu numunedir. Bu numunede hem maksimum tepe kuvveti hem de enerji absorpsiyonunda düşüşler olmuştur. Maksimum tepe kuvvetinde S16 numunesinin değerinden 2,32 kN daha düşerek 4,88 kN olmuştur. Enerji absorpsiyonunda ise %14,50’lik bir değer düşüşü yaşamış ve 98,49 Joule değerine gerilemiştir.

S35 numunesi S17 numunesine göre maksimum tepe kuvvetinde düşüş yaşamasına karşın enerji absorpsiyonunda artış olmuştur. Maksimum tepe kuvveti S17’nin maksimum tepe kuvvetinden 2,27 kN daha düşük bir değer olan 3,29 kN’dur. Enerji absorpsiyonu ise tam tersi bir etki ile %60,64 değer artışı gözlemlenmiştir. Bu değer 129,80 joule’dür. Tabi bu değer asıl numune olan yani grafen katkısız ve yaşlandırılmamış S5 numunesine göre düşük değerdir.

S36 numunesindeki de tıpkı S35 numunesinde ki gibi değişiklikler gözlemlenmiştir. Yani S18 numunesine göre maksimum tepe kuvveti düşerken, enerji

absorbsiyonunda artış olmuştur. Maksimum tepe kuvveti 1,12 kN değer düşüş yaşayarak 5,08 kN olmuştur. Enerji absorpsiyonu ise %124,87 artış ile 129,73 joule olmuştur. Bu cam fiberin iç kısımda yer alması ve S31 numunesinde olduğu gibi artışı açıklayabilmektedir.

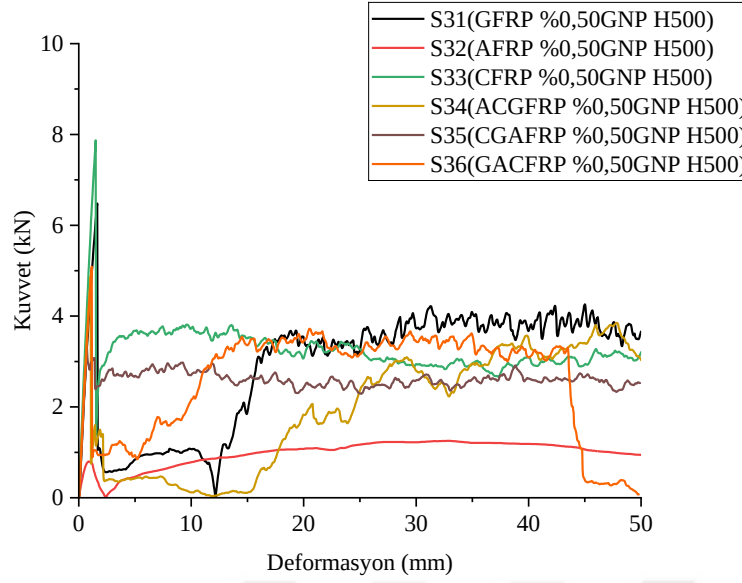
S31- S36 numunelerin değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** 31 – S36 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri

| Numune | Maksimum Tepe Kuvveti(kN) | Enerji Soğurma (J) | Numune Ağırlıkları(gr) | Spesifik Enerji Soğurma(J)/(gr) |
|--------|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|
| S31    | 6,47                      | 146,51             | 27,33                  | 5,36                            |
| S32    | 0,79                      | 49,08              | 11,46                  | 4,28                            |
| S33    | 7,87                      | 162,57             | 21,43                  | 7,58                            |
| S34    | 4,88                      | 98,49              | 25,41                  | 3,87                            |
| S35    | 3,29                      | 129,80             | 19,29                  | 6,72                            |
| S36    | 5,08                      | 129,73             | 20,17                  | 6,43                            |

Çizelge 4.6'da verilen değerlere göre spesifik enerji absorpsiyonları karşılaştırıldığında en iyi sonuç S33 yani karbon fiber numunesi ile elde edilmiştir. Cam fiber numunesi yani S31 S13'e göre sadece grafen takviyesinin olumsuz etkisini azaltmış ve spesifik enerji absorpsiyonunu 5,36 joule/gram değerine çıkarmıştır. S32 numunesi S14'e kıyasla düşüş yaşamış olsa da S2'nin yine üstünde bir değerdir. Hibrit numuneler arasında ise S34 S16'ya göre düşüş yaşamış diğer iki hibrit numune sadece grafen eklenmiş numunelere göre artış elde etmiştir.

S31- S36 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.22'de verilmiştir.

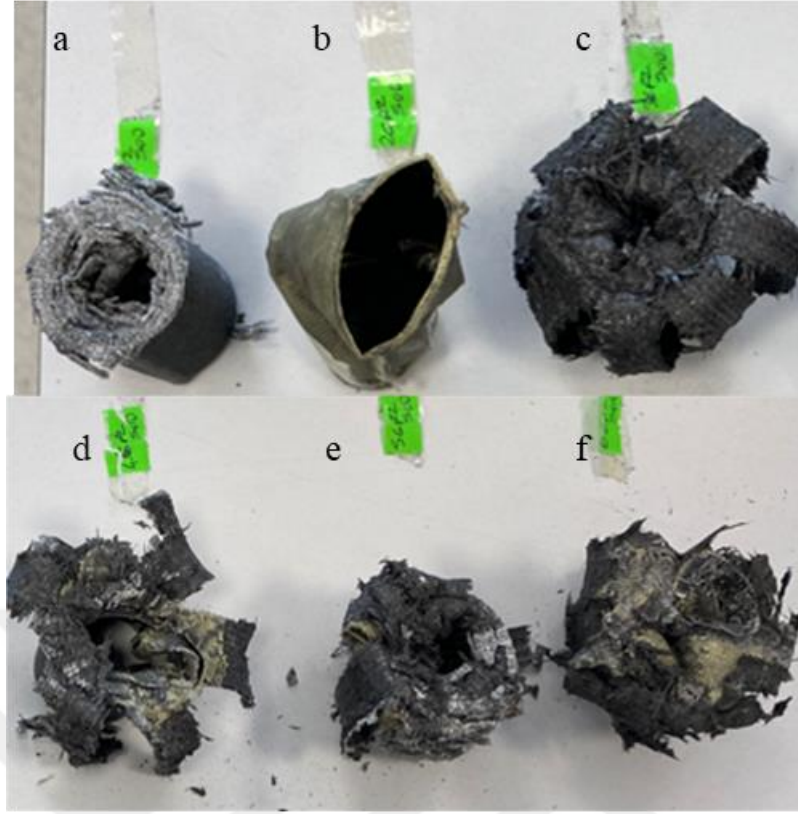


**Şekil 4.22.** S31 - S36 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.23 ve 4.24'te deney sonrasında numunelerin ezilmiş nihai şekilleri verilmiştir.



**Şekil 4.23.** S31 – S36 numunelerinin deney sırasında boy değişimi ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50GNP H500 b) AFRP %0,50GNP H500 c) CFRP %0,50GNP H500 d) ACGFRP %0,50GNP H500 e) CGAFRP %0,50GNP H500 e) GACFRP %0,50GNP H500

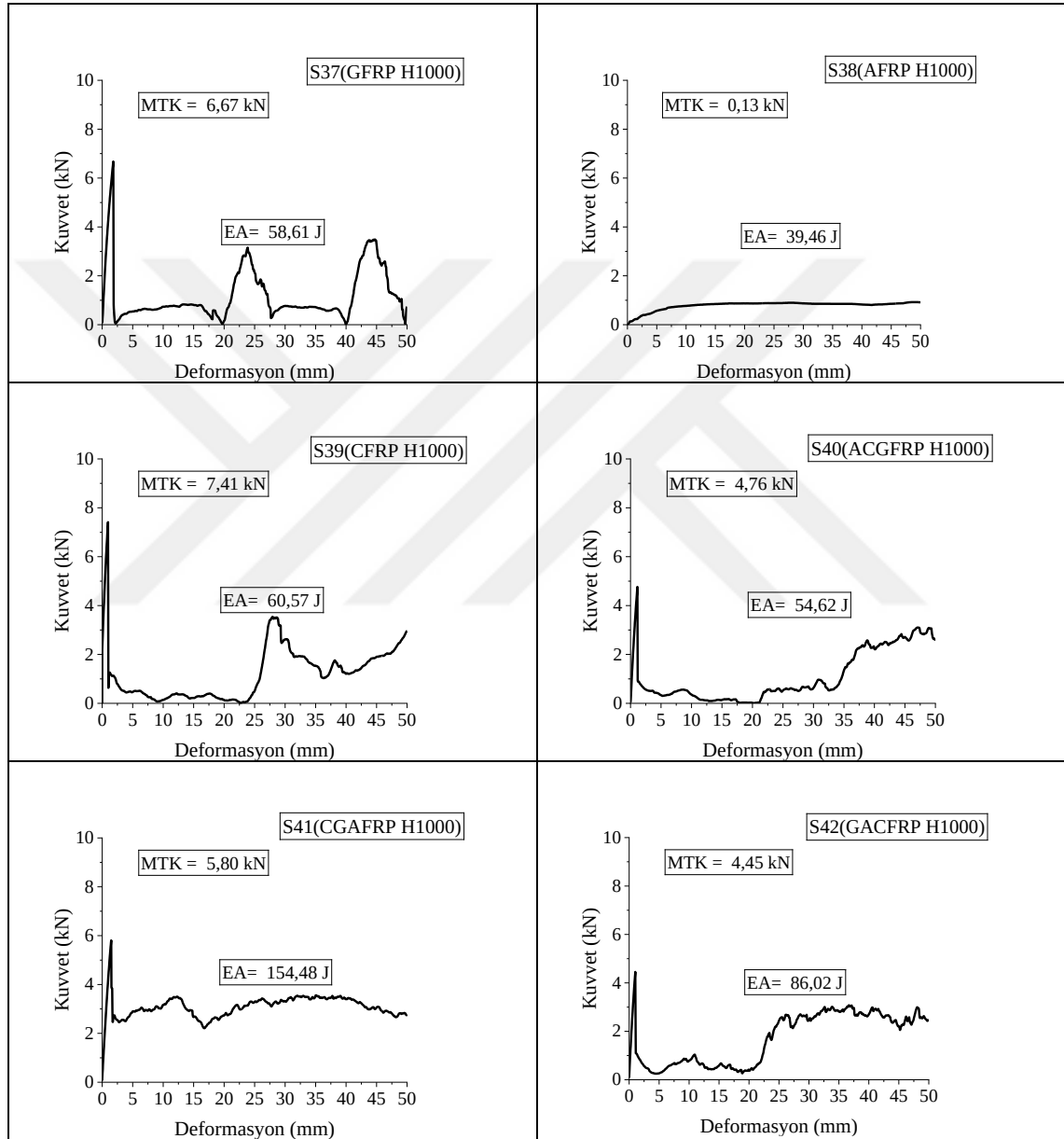


**Şekil 4.24.** S31 – S36 numunelerinin nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50GNP H500 b) AFRP %0,50GNP H500 c) CFRP %0,50GNP H500 d) ACGFRP %0,50GNP H500 e) CGAFRP %0,50GNP H500 f) GACFRP %0,50GNP H500

Şekil 4.23 ve 4.24’de görüldüğü üzere hasar tipleri diğer numunelerde kini aynıdır. Yani S31’de matris ve fiber kırılması oluşmuştur. Çiçek benzeri bir açılma olmamıştır. S32 yine epoksi matrisinin yetersiz emiliminden dolayı bükülme oluşmuştur. S33 delaminasyonla hasara uğramış matris ve fiber kırılmaları oluşmuştur. Çiçeğe benzer açılma söz konusudur. Hibrit numunelerde yani S34, S35 ve S36’da numune hasar modları incelendiğinde ise diğer numunelerde olduğu gibi yukarıdan aşağıya kırılma gözlemlenmiştir ancak kırılma S33’te olduğu gibi düzenli değildir. Tüm katmanlarda lif kopmaları meydana gelmiştir ve ezme sırasında farklı tipteki lif katmanları arasında soyulma gözlemlenmiştir. Bütün numunelerde izlenen bu delaminasyonla hasar, matris kırılması, fiber kırılması veya katlanma gibi durumlar kuvvet-yer değiştirme eğrisine de yansımıştır.

#### 4.1.7. Grafen takviyesiz ve hidrotermal olarak 1000 saat yaşlandırılmış (S37 – S42) numunelerin test sonuçları

1000 saat süreyle 60 °C’de hidrotermal olarak yaşlandırmaya tabi tutulmuş ve grafen takviyesiz olan test sonuçları Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.25. 1000 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.25’de görüldüğü üzere numunelere uygulanan 1000 saat hidrotermal yaşlanma MTK’da cam fiber yani S37, hibrit S41ve S42 numuneleri dışında diğer numunelerde genel olarak bir düşüş yaşanmasına sebep olmuştur. Maksimum tepe

kuvvetindeki artışın yanı sıra EA'da ise bütün S37 – S42 numunelerde yaşlandırılmamış S1 – S6 numunelere göre düşüşe sebebiyet vermiştir.

S37 numunesinde 500 saat yaşlandırılmış S19 numunesine göre maksimum tepe kuvveti 3,15 kN'luk bir artış yaşanarak 6,67 kN değerine ulaşmıştır. Tabi maksimum tepe kuvveti gibi S19 numunesine göre enerji absorpsiyonunda da çok az bir miktar gerçekleşmiştir. Bu değer 58,61 joule ile yaklaşık %4,39'luk bir artıştır. Tabi bu diğer asıl numune olan ve grafensiz yaşlandırılmamış S1 numunesinin çok altında bir değerdir. Yani cam fiberin yaşlandırma karşısında çok etkilendiği görülmektedir.

S38 numunesi ise maksimum tepe kuvvetinde düşüş yaşamış bu düşüş enerji absorpsiyonunda da kendini göstermiştir. Maksimum tepe kuvvetinde ki düşüş S20' nin değerine kıyasla 0,37 gerileyerek 0,13 kN değerine düşmüştür. Enerji absorpsiyonu ise 500 saat yaşlandırılmış numuneye göre yani S20 numunesine göre %8,92'lik bir düşü ile 39,46 joule değerine gerilemiştir. Fakat bu değer yine S2 numunesine yani grafensiz ve yaşlandırılmamış numuneye göre %27,33 daha fazladır.

S39 numunesi yani karbon fiber numune de yaşlandırma süresi arttıkça maksimum tepe kuvvetinde ki düşüş devam etmiştir. Maksimum tepe kuvveti S 21 numunesine göre 1,71 kN gerileyerek 7,41 kN olmuştur. Bu 500 saat yaşlandırmada yaşanan düşüşten daha fazladır. Enerji absorpsiyonunda ki düşüş maksimum tepe kuvvetine kıyasla daha fazladır. Enerji absorpsiyonu %68,42 oranında gerileyerek 60,57 joule değerine düşmüştür. Karbon fiber de cam fiber gibi yaşlandırmadan büyük ölçüde etkilenmiştir.

S40 numunesi yani aramidin en içte sarılı olduğu bu fiber de S22 numunesine göre maksimum tepe kuvvetinde ki düşüş çok küçük olsa da enerji absorpsiyonunda ki düşüş S39 numunesinde olduğu gibi çok fazladır. Maksimum tepe kuvvetinde 0,22 kN'luk bir düşüş olmuştur. Bu kayda değer alınmayacak düşüş ile 4,76 kN değerine gerileme olmuştur. Fakat enerji absorpsiyonunda ki düşüş oran olarak yüksek bir değer olan %54,45'lik bir düşüştür. Bu düşüş ile birlikte 54,62 joule değerine gerilemiştir.

S41 numunesi yine hibrit numunelerden olup karbonun en iç kısımda yer aldığı numunedir. Bu numunede 500 saat yaşlanmaya göre küçük artışlar gözlemlenmekle birlikte yaşlandırılmamış numuneye göre düşüş söz konusudur. Maksimum tepe kuvvetinde S23 numunesine göre 0,08 kN'luk artış gözlemlenmiştir. Elde edilen değer 5,80 kN' dur. Enerji absorpsiyonunda ise %24,57'lik bir artış ile 154,48 joule değerine ulaşmıştır.

S42 numunesi tıpkı S37 numunesinde olduğu gibi gerek maksimum tepe kuvveti gerekse enerji absorpsiyonunda 500 saat yaşlandırılmış numunesine kıyasla değerlerini artırmıştır. Maksimum tepe kuvvetinde S24'e göre 0,48 kN'luk bir artış ile 4,45 kN değerine ulaşmıştır. Enerji absorpsiyon değerinde ise 72,22 joule düşüş yaşayarak 86,02 joule değerine ulaşmıştır.

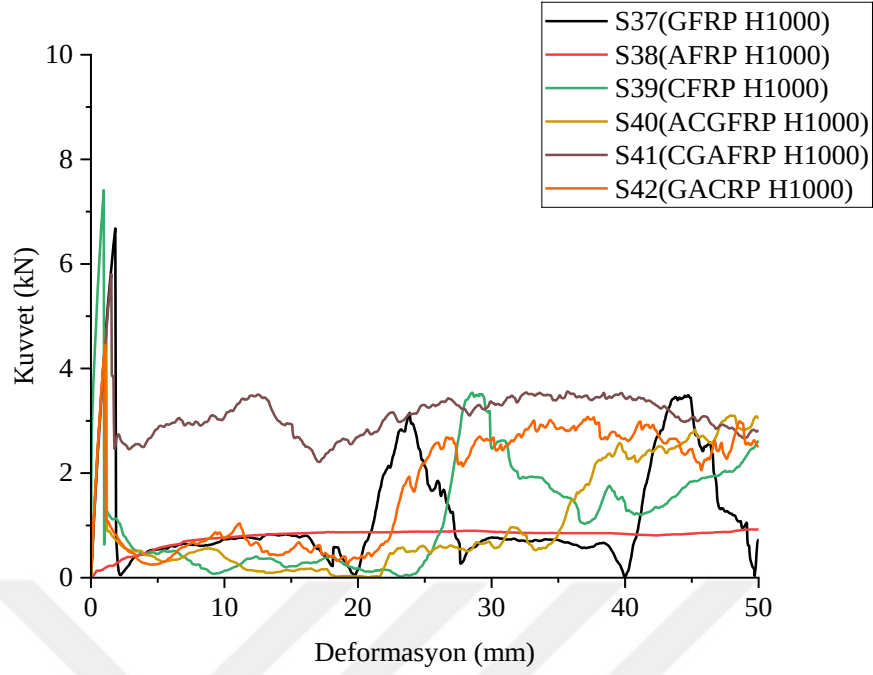
S37- S42 numunelerin değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** S37 – S42 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri

| Numune | Maksimum Tepe Kuvveti(kN) | Enerji Soğurma (J) | Numune Ağırlıkları(gr) | Spesifik Enerji Soğurma(J)/(gr) |
|--------|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|
| S37    | 6,67                      | 58,61              | 23,71                  | 2,47                            |
| S38    | 0,13                      | 39,46              | 9,65                   | 4,08                            |
| S39    | 7,41                      | 60,57              | 25,24                  | 2,39                            |
| S40    | 4,76                      | 54,62              | 20,80                  | 2,62                            |
| S41    | 5,8                       | 154,48             | 23,17                  | 6,66                            |
| S42    | 4,45                      | 86,02              | 21,32                  | 4,03                            |

Çizelge 4.7'de verilen değerlere göre spesifik enerji absorpsiyonları karşılaştıracak olursak en iyi sonucun karbon fiber numunesi değil de yine onun en içte sarılı olduğu hibrit numune ile elde edildiği görülmüştür. 500 saat yaşlandırmaya göre numunelerin spesifik enerji absorpsiyonlarını kıyaslayacak olursak S37 numunesinde çok az bir miktar artış gözlemlenmiş olsa da S42 numunesinde bu artış yaklaşık 6 kata yakındır. Diğer numunelerde ise düşüşler kendini göstermiştir. Özellikle S39 numunesinde ki düşüş yaklaşık 5,39 joule/gram'dır.

S37 – S42 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.26'de verilmiştir.

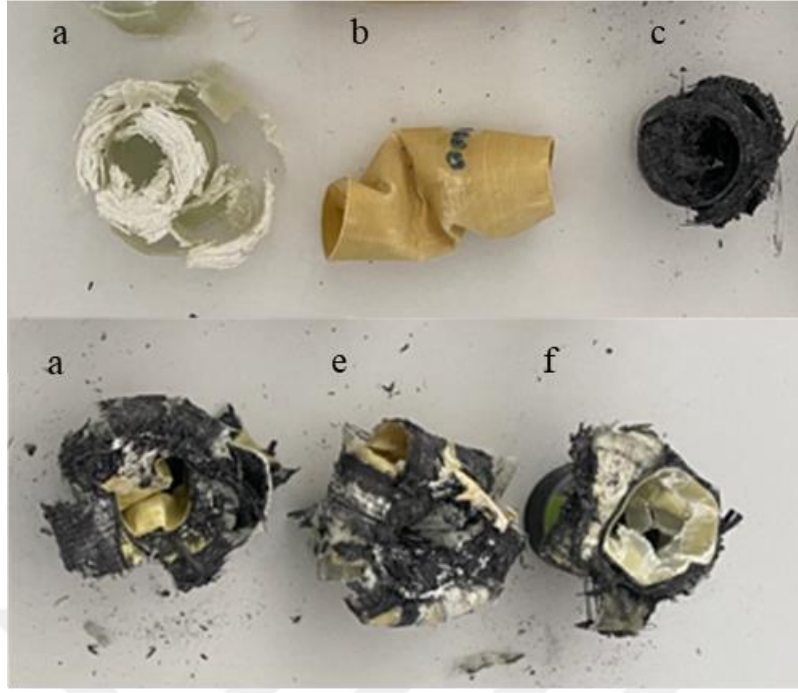


Şekil 4.26. S37 -S42 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.27 ve 4.28’de deney sonrasında numunelerin ezilmiş nihai şekilleri verilmiştir.



**Şekil 4.27.** S37 – S42 numunelerinin deney sırasında boy değişimi nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP H1000 b) AFRP H1000 c) CFRP H1000 d) ACGFRP H1000 e) CGAFRP H1000 f) GACFRP H1000



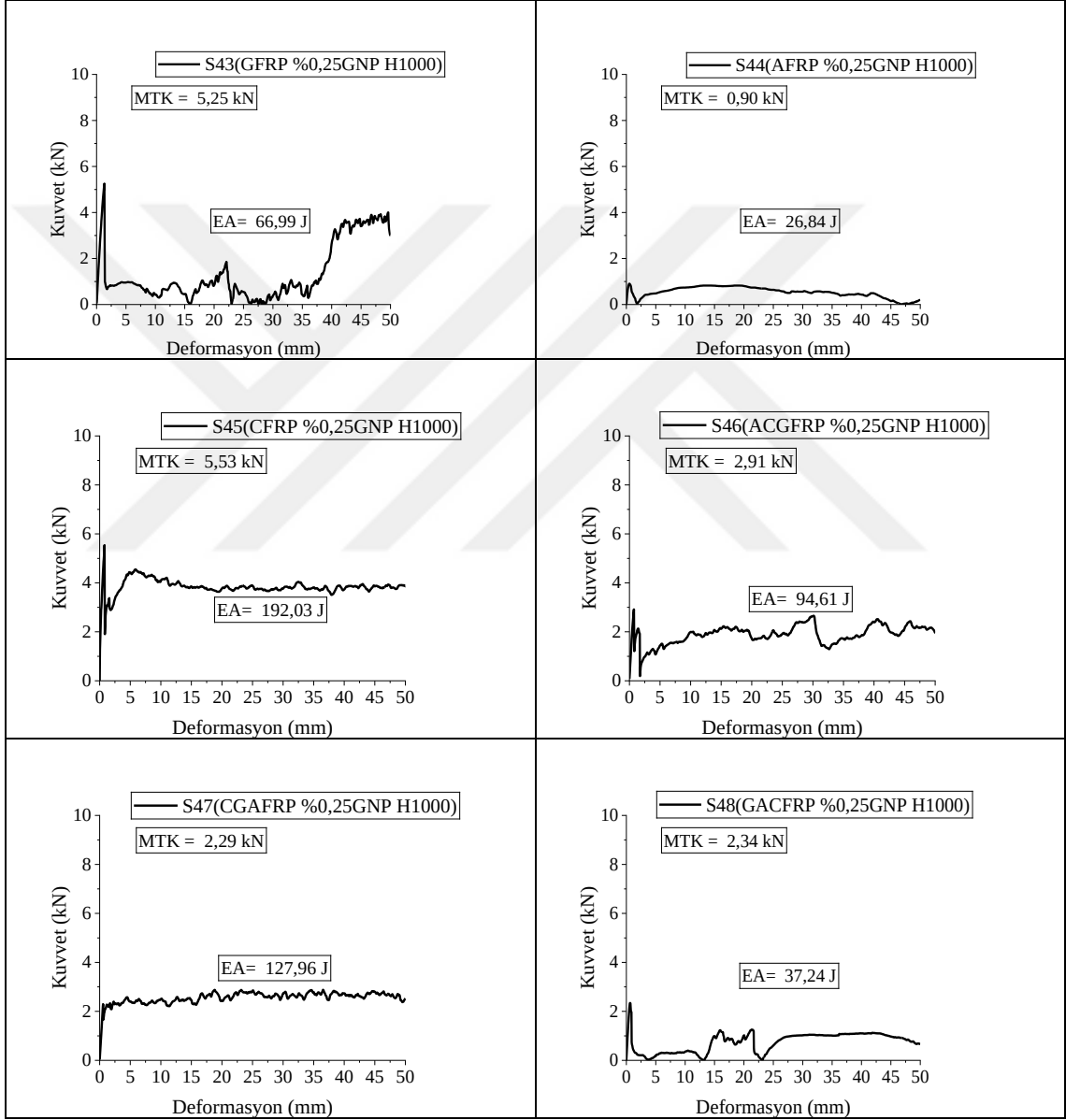
**Şekil 4.28.** S37 – S42 numunelerinin nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP H1000 b) AFRP H1000 c) CFRP H1000 d) ACGFRP H1000 e) CGAFRP H1000 e) GACFRP H1000

Şekil 4.27 ve 4.28’de görüldüğü üzere S37 ve S39’da matris ve fiber kırılmaları yaşanmış ve yatay ekseninde çiçeğe benzer açma gerçekleşmemiştir. S38 numunesinde ise yine herhangi bir matris ve lif kırılması görülmemiştir ve numune katlanarak bükülmesinden vazgeçmemiştir. Yetersiz matris epoksi direnci devam etmiştir. Hibrit numunelerde yani S40, S41 ve S42’de numune hasar modları incelendiğinde yukarıdan aşağıya kırılma gözlemlenmiştir ancak kırılma düzenli değildir. Tüm katmanlarda lif kopmaları meydana gelmiştir. Ezme sırasında yine farklı tipteki lif katmanları arasında soyulma gözlemlenmiştir. Bütün numunelerde izlenen bu delaminasyonla hasar, matris kırılması, fiber kırılması veya katlanma gibi durumlar kuvvet-yer değiştirme eğrisine de yansımıştır.

Li, Ye ve Li (2018), cam elyaf takviyeli malzemenin yaşlanması üzerine yaptıkları çalışmalarında hidrotermal yaşlandırmanın artmasının darbe mukavemetinde artışa sebep olduğunu saptamışlardır.

#### 4.1.8. % 0,25 Grafen ile takviye edilmiş ve 1000 saat süre ile hidrotermal yaşlandırılmış (S43 – S48) numunelerin test sonuçları

%0,25 oranında grafen ile takviye edilmiş ve 1000 saat süreyle 60 °C’de hidrotermal olarak yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelerin test sonuçları Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29. %0,25 grafen ile takviye edilmiş 1000 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.29’da görüldüğü üzere %0,25 grafen takviyeli numunelere uygulanan 1000 saatlik hidrotermal yaşlanma ile S25 – S30 numuneleri ile kıyaslayacak olursak

MTK'da S48 numunesi hariç inişler gözlemlenmiştir. EA'larını kıyaslayacak olursak hibrit numunelerde ya artış ya da 0'a yakın küçük düşüşler gözlemlenmiş olup cam fiber numune olan S43'te de çok azda olsa artışlar yaşandığı saptanmıştır.

S43 numunesi olan cam fiber numune yaşlanmanın etkisini fazla yaşayan numunelerden biri olarak maksimum tepe kuvvetinde %0,25 grafen ilaveli 500 saat yaşlandırılmış S25 numunesine göre maksimum tepe kuvvetinde 1,58 kN'luk düşüş olmuştur. Elde edilen değer 5,25 kN'dur. Enerji absorpsiyonunda ise yaşanan bu düşüşün aksine çok az bir miktar olsa da artış yaşanmıştır. %1,39'luk bir artış ile 66,99 joule değerini görmüştür. Bu artış iyimser bir hava çizmesine karşın grafensiz ve yaşlandırılmamış numune olan S1 numunesi ile kıyaslama da çok düşük değerdir.

S44 numunesi de yaşlandırmadan azda olsa etkilenen numunelerdendir. Maksimum tepe kuvvetinde S26 numunesine kıyasla 0,13 kN'luk bir artış yaşayarak 0,9 kN değerine ulaşmıştır. Enerji absorpsiyonunda güç kaybı yaşanmıştır. %31,49'luk bir düşüş ile 26,84 joule değerine gerilemiştir. Bu değer aramid fiber numuneler içinde en kötü değerdir.

S45 numunesi S43 numunesinde olduğu gibi maksimum tepe kuvvetinde de düşüş yaşasa da enerji absorpsiyonunu artırmıştır. Maksimum tepe kuvvetinde S27 numunesine kıyasla 0,39 kN'luk düşüş yaşayarak 5,53 kN değerine gerilemiştir. Enerji absorpsiyonunda ise %120,47'lik bir değer artışı sağlamıştır. Elde edilen değer 192,03 joule'dür. Tabi bu değerler asıl numune olan S3 numunesinin değerleri altındadır.

S46 numunesi S45 numunesinde olduğu maksimum tepe kuvveti ve enerji absorpsiyonunda ki iniş ve çıkışları izlemiştir. S28 numunesi ile kıyaslandığında maksimum tepe kuvveti değer kaybederek 2,91 kN değeri gözlemlenmiştir. Bu değer S28'e göre 1,46 kN daha azdır. Enerji absorpsiyonunda ise %71,05'lik bir değer artışı ile 94,61 joule değerini görmüştür.

S47 numunesinde maksimum tepe kuvvetinde diğer bütün numunelerde olduğu gibi düşüş olmuştur. S29 numunesi ile kıyaslayacak olursak 0,93 kN'luk bir düşüş gözlemlenmiştir. Elde edilen değer 2,29 kN'dur. Enerji absorpsiyonunda ise 0'a yakın bir değer kaybı olmuştur. S29 127,97 joule iken bu numune ile elde edilen değer 127,96 joule'dür. Neredeyse hiç değer kaybı yaşanmamıştır.

S48 numunesinde diğer hibrit numuneler kıyasla hem maksimum tepe kuvvetinde hem de enerji absorpsiyonunda artışlar gözlemlenmiştir. Maksimum tepe kuvveti S30 numunesine kıyasla 0,40 kN'luk bir artış yaşayarak 2,34 kN'a ulaşmıştır. Enerji

absorbsiyonu ise %67,89 joule' lük bir artış ile 37,24 joule değerine ulaşsa da bu değer S6 numunesine göre kıyasla düşük bir değerdir.

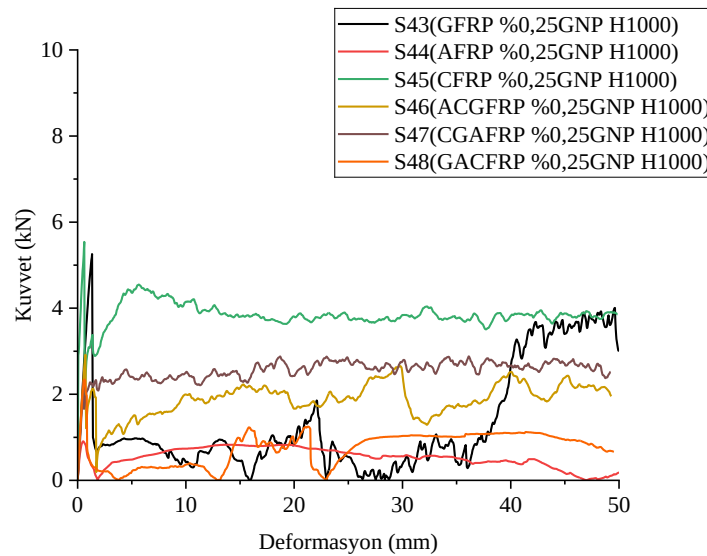
S43- S48 numunelerin değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** S43 – S48 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri

| Numune | Maksimum Tepe Kuvveti(kN) | Enerji Soğurma (J) | Numune Ağırlıkları(gr) | Spesifik Enerji Soğurma(J)/(gr) |
|--------|---------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|
| S43    | 5,25                      | 66,99              | 25,25                  | 2,65                            |
| S44    | 0,90                      | 26,84              | 11,56                  | 2,32                            |
| S45    | 5,53                      | 192,03             | 25,56                  | 7,51                            |
| S46    | 2,91                      | 94,61              | 23,83                  | 3,97                            |
| S47    | 2,29                      | 127,96             | 18,14                  | 7,05                            |
| S48    | 2,34                      | 37,24              | 19,77                  | 1,88                            |

Çizelge 4.8'de verilen değerlere göre spesifik enerji absorpsiyonu karşılaştırılacak olursa en iyi sonuçların S45 ve S47 numunesi ile elde edildiği görülmektedir. En kötü sonuç ise cam fiberin en içte sarılı olduğu S48 numunesi ile elde edildiği görülmektedir. S43 numunesi yani cam fiber 0,08 joule/gram artış sağlamıştır. S44 numunesi S26 numunesine kıyasla spesifik enerji absorpsiyon değerinde düşüş olmuştur. S46 numunesi de S28 numunesine kıyasla 1,5 joule/gram'lık artış sağlamıştır. S48 en kötü spesifik enerji absorpsiyonu sonucunu vermiş olsa da S30 numunesinde 0,76 joule/gram daha fazla değerdedir.

S43- S48 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.30'da verilmiştir.

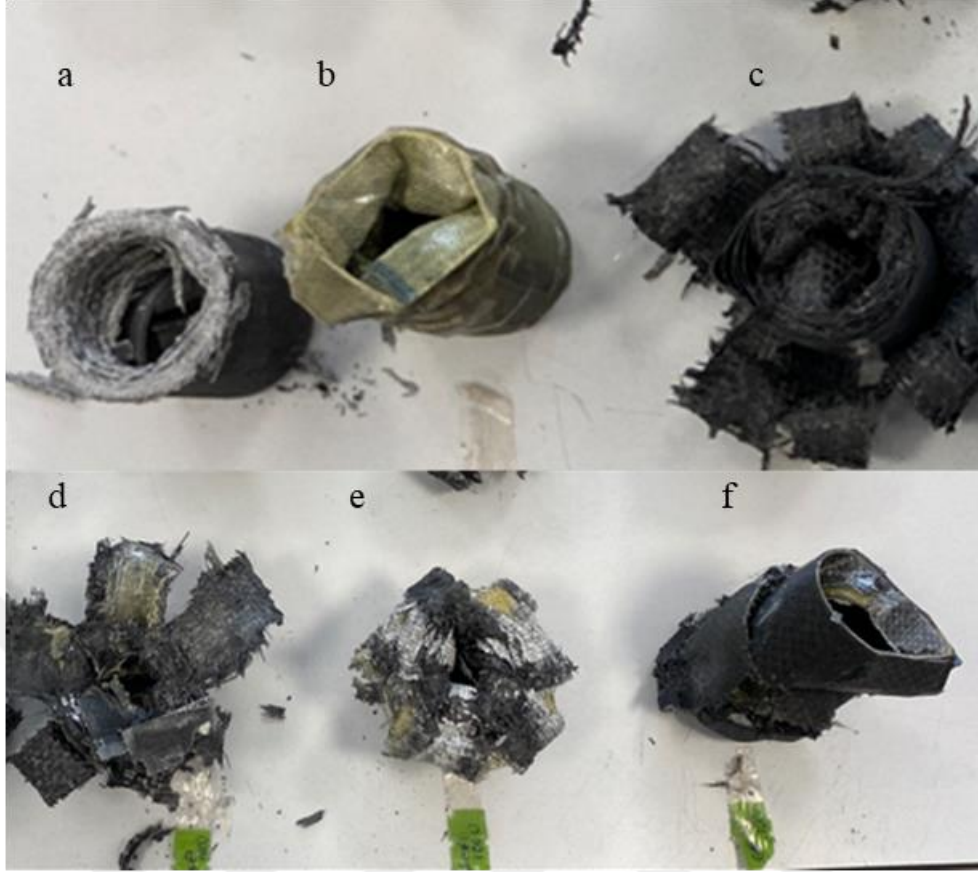


**Şekil 4.30.** S43 – S48 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.31 ve 4.32’de deney sonrasında numunelerin ezilmiş nihai şekilleri verilmiştir.



**Şekil 4.31.** S43 – S48 numunelerinin deney sırasında boy değişimleri nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25GNP H1000 b) AFRP %0,25GNP H1000 c) CFRP %0,25GNP H1000 d) ACGFRP %0,25GNP H1000 e) CGAFRP %0,25GNP H1000 e) GACFRP %0,25GNP H1000

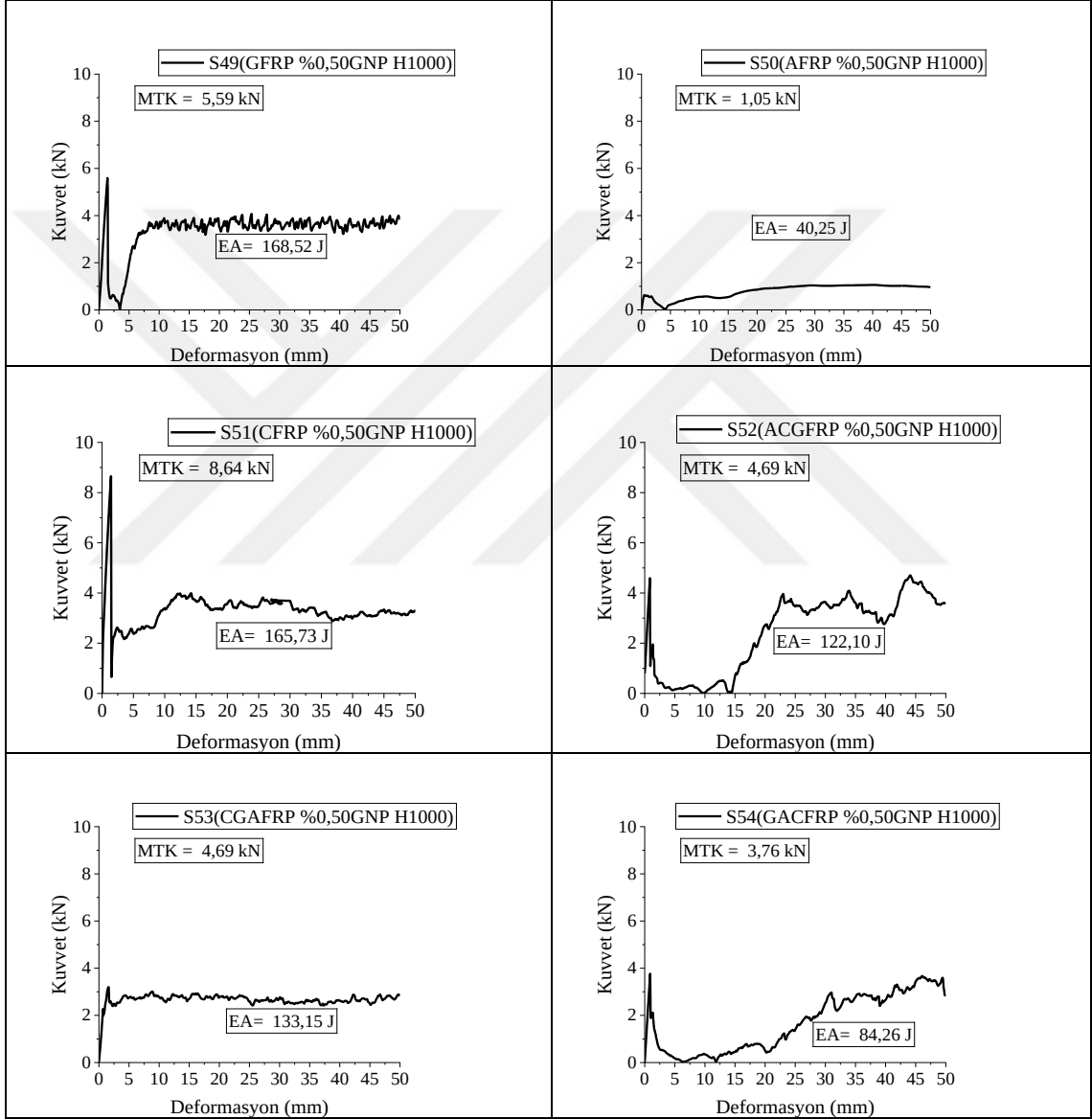


**Şekil 4.32.** S43 – S48 numunelerinin nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,25GNP H1000 b) AFRP %0,25GNP H1000 c) CFRP %0,25GNP H1000 d) ACGFRP %0,25GNP H1000 e) CGAFRP %0,25GNP H1000 f) GACFRP %0,25GNP H1000

Şekil 4.31 ve 4.32’de görüldüğü hasar tipleri incelendiğinde deney sırasında S43 matris ve fiber kırılması yaşamış, S44 numunesinde ise yine herhangi bir matris ve lif kırılması görülmemiştir ve numune katlanarak bükülmüştür. Yetersiz matris epoksi direnci devam etmektedir. S45 dikey ekseninde matris ve lif kırılmaları gözlemlenmiştir. İçten dışa delaminasyonla hasar görmüştür ve çiçek benzeri bir açılma söz konusudur. Hibrit numunelerde yani S46, S47’de numune hasar modları incelendiğinde diğer numunelerde olduğu gibi yukarıdan aşağıya kırılma gözlemlenmiştir ancak kırılma S45 gibi düzenli değildir. Tüm katmanlarda lif kopmaları meydana gelmiştir. Ezme sırasında S45’ten farklı olarak farklı tipteki lif katmanları arasında soyulma gözlemlenmiştir. S48 ise düzensiz matris kırılması yaşamış üst üste binmiştir. Bütün numunelerde izlenen bu delaminasyonla hasar, matris kırılması, fiber kırılması veya katlanma gibi durumlar kuvvet-yer değiştirme eğrisine de yansımıştır.

#### 4.1.9. %0,50 Grafen ile takviye edilmiş ve 1000 saat süre ile hidrotermal yaşlandırılmış (S49 – S54) numunelerin test sonuçları

%0,50 oranında grafen ile takviye edilmiş ve 1000 saat süreyle 60 °C’de hidrotermal olarak yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelerin test sonuçları Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.33. %0,50 grafen ile takviye edilmiş 1000 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.33’de görüldüğü üzere %0,50 grafen takviyeli numunelere uygulanan 1000 saatlik hidrotermal yaşlanma ile S31 – S36 numuneleri ile kıyaslayacak olursak

MTK'da S51 numunesi hariç genel bir düşüş yaşanmıştır. EA'da ise bazı numunelerde artış olsa da bu artış oranları çok büyük değerleri içermemektedir.

S49 numunesi yaşlandırmadan etkilenen numunelerin başında gelmektedir. Bu etkiyi %0,50 grafen ilavesi ve 1000 saat yaşlandırmada da görmekteyiz maksimum tepe kuvvetinde S31 numunesine kıyasla yani 500 saat yaşlandırılmış %0,50 grafen ilaveli numuneye göre 0,88 kN'luk bir düşüş yaşamış ve 5,59 kN değerine ulaşmıştır. Enerji absorpsiyonunda ise grafenin verdiği aşağı yönde etkiyi yok etmesine rağmen yaşlandırılmamış ve grafensiz numuneden daha düşük değer elde edilmiştir. %15,02'lik bir artış ile 168,52 joule değerine ulaşmıştır. Bu değer S1 numunesinden %20,46 daha düşük bir değerdir.

S50 numunesinde ise maksimum tepe kuvveti S32 numunesine göre 0,16 kN'luk bir düşüş ile 0,63 kN değerine gerilemiştir. Enerji absorpsiyonunda da düşüş olmuştur. %17,99 düşüş yaşayarak 40.25 joule değerine gerilemiştir. Fakat bu değer S2 numunesinin %30,75 daha fazla bir orandır. Grafen ilavesi ve yaşlandırmanın olumlu etkileri azalmış olsa da asıl numuneden daha yüksek değerler devam etmiştir.

S51 numunesi yani karbon fiber de yaşlandırmadan etkilenen numunelerin başında gelmektedir. Cam fiber kadar olmasa da gerek maksimum tepe kuvveti gerekse enerji absorpsiyonunda düşüşler olmuştur. S33 numunesine kıyasla maksimum tepe kuvveti 0,77 kN'luk artış ile 8,64 kN'a ulaşmıştır. Yine bu değer S3 numunesine göre daha düşük bir değerdir. Enerji absorpsiyonunda da S33 numunesine kıyasla çok küçük bir miktar artış olmuştur. %1,94'lük bir artış ile 165,73 joule değerine ulaşmıştır.

S52 numunesi hibrit numunelerden olup maksimum emme kuvveti ve enerji absorpsiyonunda tıpkı S49 numunesi gibi davranmıştır. Maksimum tepe kuvvetinde S34 numunesine kıyasla 0,30 kN'luk bir düşüş olmuştur. Elde edilen değer 4,58 kN'dur. Tabi bu değerde S4 numunesine kıyasla düşük bir değerdir. Enerji absorpsiyonunda ise S34'e %23,97'lik bir artış sağlamış ve 122,10 joule değerine ulaşmıştır. Bu değer S4 numunesine yakın bir değer olsa da yine altında bir değerdir.

S53 numunesi de tıpkı S52 ve S49 numunesinde yaşanan düşüş ve artışlar gibi tepkiler vermiştir. Maksimum tepe kuvvetinde düşüş yaşansa da enerji absorpsiyonunda bir miktar artış gözlemlenmiş fakat bu değerler S5 numunesine kıyasla daha düşük değerler olmuştur. Maksimum tepe kuvveti S35'e göre 0,09 kN'luk düşüş ile 3,20 kN değerine gerilemiştir. Enerji absorpsiyonunda da %2,58'lik artış ile 133,15 joule değerine ulaşmıştır.

S54 numunesi hem maksimum tepe kuvveti hem de enerji absorbsiyonunda düşüşler gözlemlenmiştir. En iç kısımda cam fiber bulunan bu numune S36 numunesine kıyasla maksimum tepe kuvvetinde 1,32 kN'luk düşüş olmuştur. Bu düşüş ile 3,76 kN'a gerilemiştir. Enerji absorbsiyonunda ki düşüş ise %35,04'tür. 84,26 joule değerine gerilemiştir. Bu değerler S6 numunesinin altında değerlerdir.

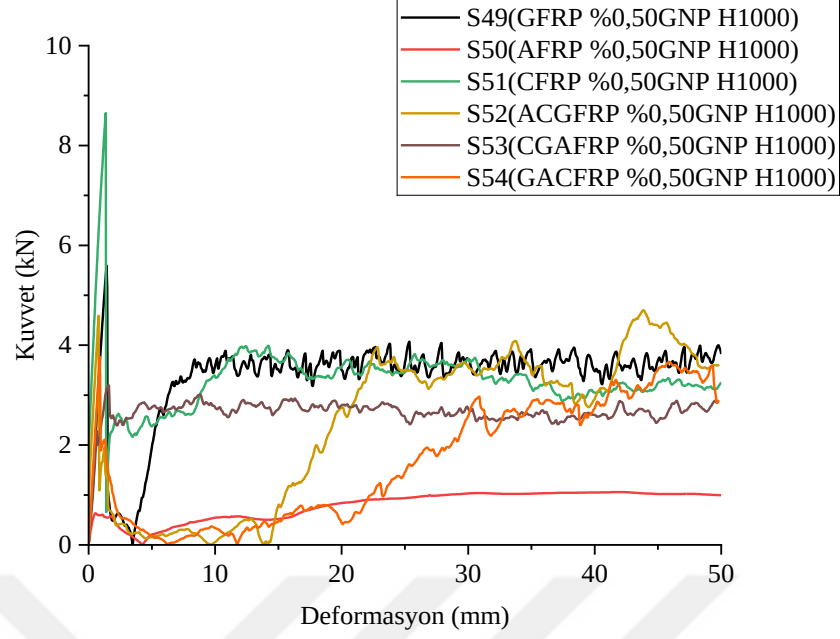
S48- S54 numunelerin değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** S49 – S54 numunelerin maksimum tepe kuvveti ve enerji soğurma kapasiteleri

| Numune | Maksimum Tepe Kuvveti(kN) | Enerji Soğurma (J) | Numune Ağırlıkları(gr) | Spesifik Enerji Soğurma(J) /(gr) |
|--------|---------------------------|--------------------|------------------------|----------------------------------|
| S49    | 5,59                      | 168,52             | 26,35                  | 6,39                             |
| S50    | 0,63                      | 40,25              | 11,47                  | 3,50                             |
| S51    | 8,64                      | 165,73             | 21,30                  | 7,78                             |
| S52    | 4,58                      | 122,10             | 25,35                  | 4,81                             |
| S53    | 3,20                      | 133,15             | 19,29                  | 6,90                             |
| S54    | 3,76                      | 84,26              | 20,95                  | 4,02                             |

Çizelge 4.9'da verilen değerlere göre spesifik enerji absorbsiyonları karşılaştıracak olursak en iyi sonuç yine karbon fiber yani S51 numunesi ile karbonun içte sarılı olduğu S53 numunesinde elde edilmiştir. S49 numunesi 6,39 joule/gram ile spesifik enerji absorbsiyonunu artırmış olsa da S1 numunesine göre yine düşük bir değerdir. S50 numunesi S32 numunesine göre spesifik enerji absorbsiyonunda düşüş yaşayarak 3,50 joule/gram değerine gerilemiştir. S54 numunesi ise 2,41joule/gram değer kaybederek S36 numunesinden daha düşük değerdedir.

S49- S54 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.34'de verilmiştir.



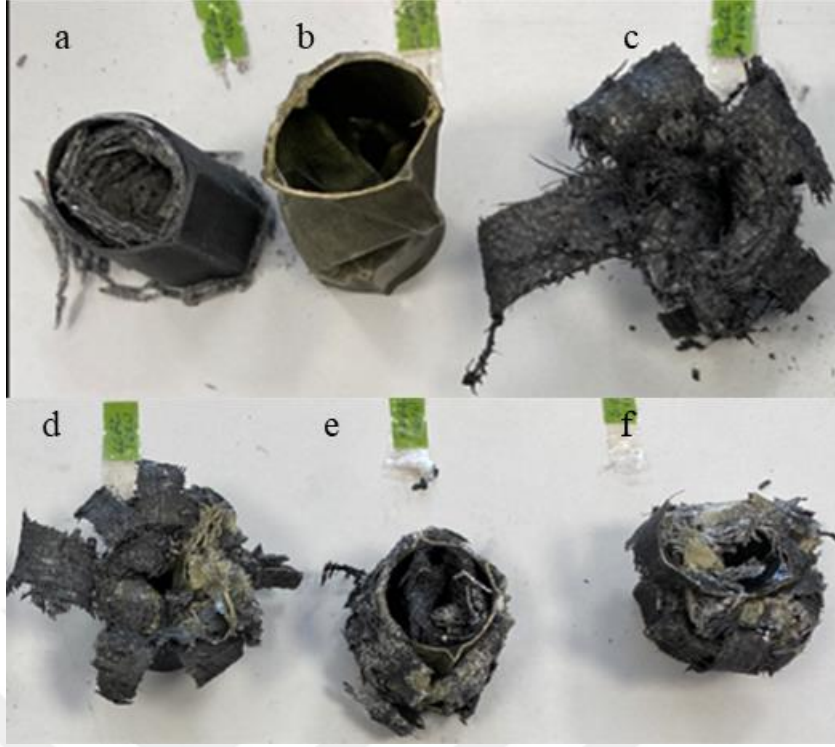
Şekil 4.34. S49 – S54 numunelerinin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.35 ve 4.36’da deney sonrasında numunelerin ezilmiş nihai şekilleri verilmiştir.

Zou ve arkadaşları (2023) çalışmalarında kompozit karbon fiber çarpışma kutularına 70 °C’de hidrotermal yaşlandırma uygulandığında enerji absorpsiyonunun ve spesifik enerji absorpsiyonunun sırasıyla %23 ve %24 azaldığını saptamışlardır.



**Şekil 4.35.** S49 – S54 numunelerinin deney sırasında boy değişimi ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50 GNP H1000 b) AFRP %0,50GNP H1000 c) CFRP %0,50GNP H1000 d) ACGFRP %0,50GNP H1000 e) CGAFRP %0,50GNP H1000 e) GACFRP %0,50GNP H1000



**Şekil 4.36.** S49 – S54 numunelerinin deney sırasında boy değişimi ve nihai ezilmiş son şekilleri: a) GFRP %0,50 GNP H1000 b) AFRP %0,50GNP H1000 c) CFRP %0,50GNP H1000 d) ACGFRP %0,50GNP H1000 e) CGAFRP %0,50GNP H1000 e) GACFRP %0,50GNP H1000

Şekil 4.35 ve 4.36’da görüldüğü üzere hasar tipleri diğer numunelerde olduğu gibi çok fazla değişiklik olmadan meydana gelmiştir. Deney sırasında S49 fiber ve matris kırılması devam etmiştir. S50 numunesinde ise yine herhangi bir matris ve lif kırılması deney süresince görülmemiştir ve numune katlanarak bükülmüştür. Yetersiz matris epoksi direnci devam etmiştir. S51 dikey ekseninde matris ve lif kırılmaları gözlemlenmiş ve içten dışa delaminasyonla hasar görmüştür. Yatay ekseninde ise çiçek benzeri bir açılma söz konusudur. Hibrit numunelerde yani S52, S53 ve S54’de numune hasar modları incelendiğinde diğer numunelerde olduğu gibi yukarıdan aşağıya kırılma gözlemlenmiştir ancak yine kırılma S50 gibi düzenli değildir. Tüm katmanlarda lif kopmaları meydana gelmiştir. Ezme sırasında S50’den farklı olarak farklı tipteki lif katmanları arasında soyulma gözlemlenmiştir. Bütün numunelerde izlenen bu delaminasyonla hasar, matris kırılması, fiber kırılması veya katlanma gibi durumlar kuvvet-yer değiştirme eğrisine de yansımıştır.

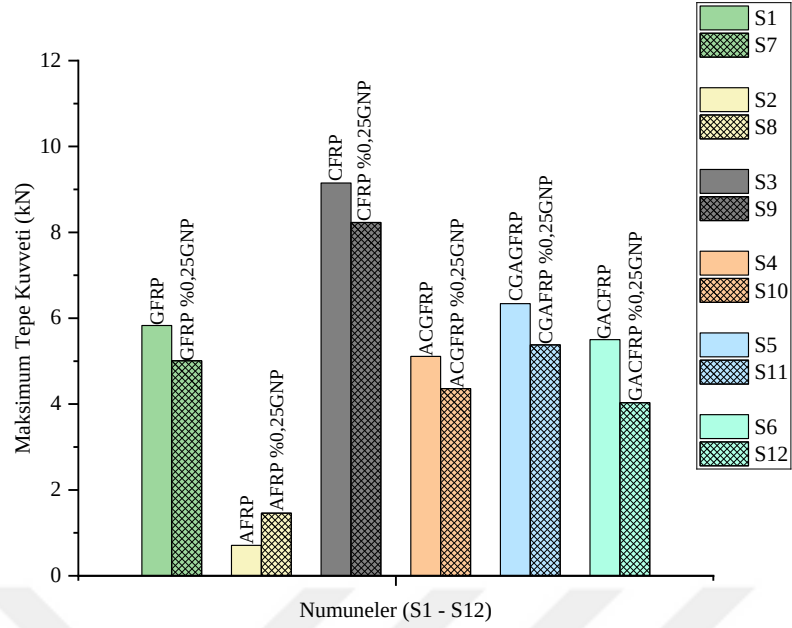
## 4.2. Numune Test Sonuçlarının Birbirleriyle Karşılaştırılması

Yarı statik basma deneyleri sonrası deney sonuçları düz (S1-S6), %0,25 grafen takviyeli (S7 – S12), %0,50 grafen takviyeli (S13 – S18), 500 saat süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (S19 – S24), %0,25 grafen ile takviye edilmiş 500 saat süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (S25 – S30), %0,50 grafen ile takviye edilmiş 500 saat süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (S31 – S36), 500 saat süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (S37 – S42), %0,25 grafen ile takviye edilmiş 1000 saat süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (S43 – S48), %0,50 grafen ile takviye edilmiş 1000 saat süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (S49 – S54) sonuçları karşılaştırmalı grafiklerle kendi aralarında yorumlanmıştır.

Bu numunelerin birbirleriyle karşılaştırma grafikleri yorumları ile birlikte bu bölümde verilmiştir.

### 4.2.1. % 0,25 grafen ilavesinin etkileri

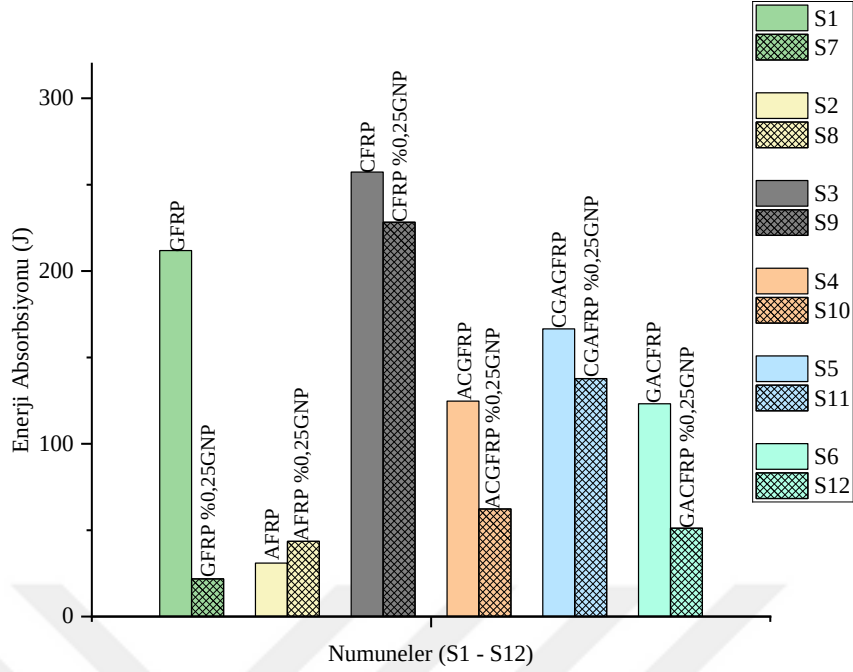
Grafen ilavesi her numune de aynı etkiyi göstermemiştir. Bazı numunelerde maksimum tepe kuvvetinde büyük oranda düşüş yaşanırken, bazılarında artışa sebebiyet vermiş bazılarında ise çok küçük miktar değişikliklere yol açmıştır. Enerji absorpsiyonunda ise de sonuç pek farklı olmamıştır. Maksimum tepe kuvvetinin arttığı bazı durumlarda enerji absorpsiyonunda tam tersi şekilde durumlar yaşanmış yani düşüşler olmuştur. Bu grafen ilavesinin numuneye gevreklik kazandırdığı yani kırılgan bir yapıya çevirmesiyle ilgili olabilir. Enerji absorpsiyonunda ise kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanın fazla olması önemlidir. Yani maksimum tepe kuvvetinin fazla olması eğrinin altında kalan alanı artırmadığı sürece enerji absorpsiyonu düşük olacaktır. Şekil 4.37’de % 0,25 grafen ilavesinin numunelerin maksimum tepe kuvveti üzerindeki etkileri görülmektedir.



Şekil 4.37. %0,25 grafen ilavesinin maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki

Şekil 4.37’de görüldüğü gibi %0,25 grafen ilavesi numunelerin maksimum tepe kuvvetinde S2 numunesinde ki artış dışında önemli bir değişiklik yapmamıştır. Bu artış S2 numunesinin yani aramid fiberin grafen takviyesi ile uyum gösterdiğinin kanıtıdır. S2 numunesi dışında numunelerin maksimum tepe kuvvetinde düşüşler olmuştur. Tabi bu genel olarak çok küçük değerler olsa da S1 numunesinde gözle görülebilir bir düşüş yaşanmıştır. Cam fiberin % 0,25 grafen ilavesine verdiği tepkinin sonucu olarak mekanik özelliklerini kötü etkilediğinin göstergesidir. S3 numunesinde ise kendi allotropu olan grafen düşüşüne sebep olmuştur. S4, S5 ve S6 için de durum pek farklı olmamıştır. Maksimum tepe kuvvetleri düşüşler yaşamış en fazla düşüş cam fiberin en içte sarılı olduğu S6’da görülmüştür.

Şekil 4.38’de numunelerin % 0,25 grafen ilavesi ile elde edilen enerji absorpsiyonları karşılaştırılması verilmiştir.

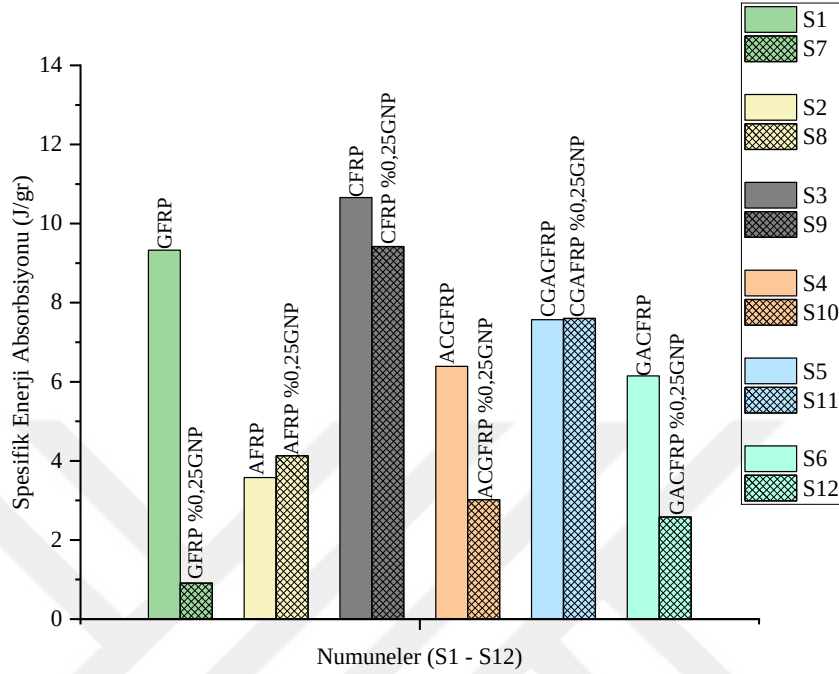


**Şekil 4.38.** %0,25 grafen ilavesi ile elde enerji absorpsiyonların karşılaştırılması

Şekil 4.38’den görüldüğü üzere grafen takviyesinin enerji absorpsiyonu üzerine yaptığı etki maksimum tepe kuvvetinde yaptığı etkiden daha fazla kendini hissettirmiştir. Özellikle S1 numunesinde enerji absorpsiyonunda ki düşüş açık bir şekilde görülmektedir. Bu cam fibere %0,25 grafen ilavesinin mekanik özelliklerini ne kadar etkilediğinin bir kanıtıdır. Öte yandan S2 numunesi grafen ilavesinin pozitif yönde etkilerini göremeye devam etmiştir. Hem maksimum tepe kuvveti hem de enerji absorpsiyonunda ki bu artışlar bunu göstermektedir. S3 numunesi de yani karbon fiber %0,25 grafen ilavesine pek olumlu bir sonuç gösterememiştir. Fakat S3’ te yaşanan bu düşüş S1 numunesi kadar çok büyük oran değildir. Hibrit numunelerde de durum farklı değildir. S4 numunesinde yani aramid fiberin en içte sarılı olduğu numunede grafen ilavesinin etkisi; karbon ve cam fiberde yaşanan düşüşleri karşılayamamıştır ve düşük enerji absorpsiyonu elde edilmiştir. S5 ve S6 numunesinde düşüşler devam etmiştir. S6 numunesi cam fiberin en iç kısımda olmasından kaynaklanan etkiden dolayı hibrit numuneler arasında enerji absorpsiyonunda ki düşüşü en fazla yaşayan numune olmuştur.

Tabi enerji absorpsiyonları önemli bir karşılaştırma parametresi olsa da farklı türdeki malzemeleri karşılaştırmak için en önemli parametre spesifik enerji absorpsiyonudur. Burada ki en önemli kısım malzemenin ağırlığıdır. Enerji absorpsiyonundan elde edilen değer malzemenin ağırlığına bölünerek spesifik enerji

absorbsiyonu elde edilir. Şekil 4.39’da numunelerin % 0,25 grafen ilavesi ile elde ettikleri spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.

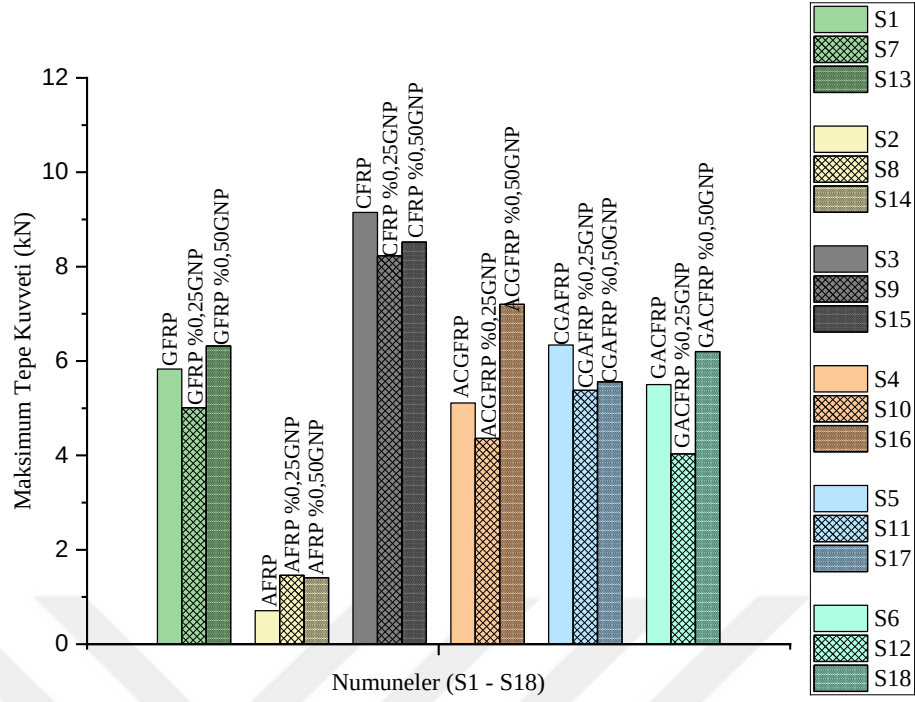


Şekil 4.39. %0,25 grafen ilavesi ile elde edilen spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırılması

Spesifik enerji absorpsiyonları Şekil 4.39’da görüldüğü üzere kısmen artmalar ve azalmalar enerji absorpsiyonunda olduğu gibidir. Grafen ilavesi ile S2 numunesinde artış belirgin seviyelerde iken S5 numunesinde çok küçük miktara artışa yol açmıştır. Geri kalan numunelerde tıpkı maksimum tepe kuvveti veya enerji absorpsiyonunda olduğu gibi düşüş yaşanmıştır.

#### 4.2.2. % 0,50 grafen ilavesinin etkileri

%0,50 grafen ilavesi hemen hemen bütün numunelerde %0.25 grafen ilavesine göre maksimum tepe kuvvetinde artış sağlamıştır. Sadece aramid fiber numunesinde sonucu pek etkilemeyecek bir düşüşe sebebiyet vermiştir. Grafen ilave oranının artırılması numuneler daha gevreklik sağladığı yönde yorumlar ile açıklanabilir. Fakat enerji absorpsiyonunda ki kayıplar bazı numunelerde kendini biraz toparlamış olsa da yine tatmin edici seviyeler ulaşamamıştır. Şekil 4.40’da %0,50 grafen ilavesinin numunelerin maksimum tepe kuvveti üzerinde ki etkileri görülmektedir.

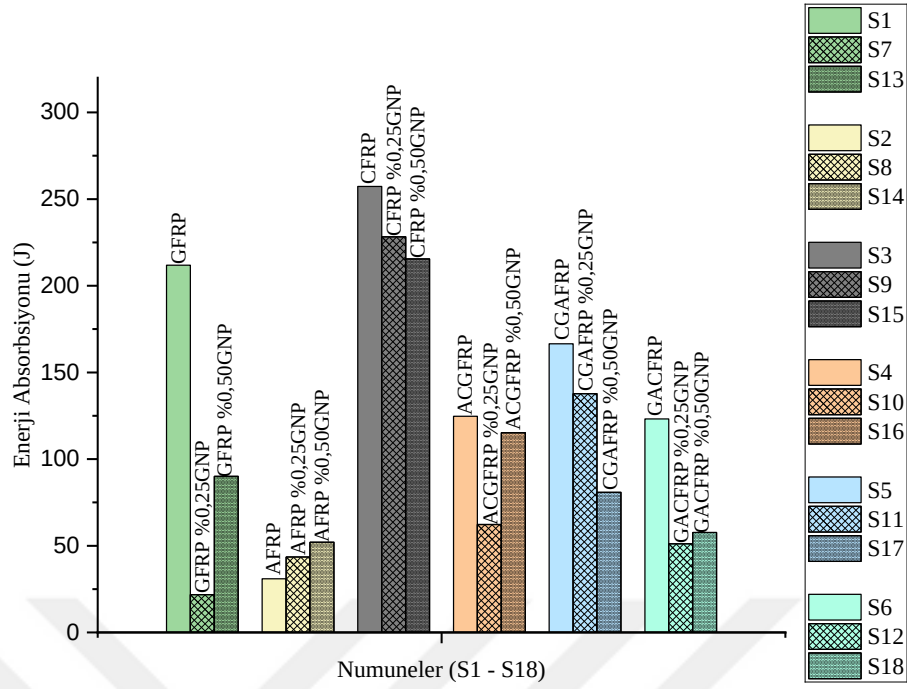


Şekil 4.40. %0,50 grafen ilavesinin maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki

Şekil 4.40’da görüldüğü gibi %0,50 grafen ilavesi %0,25 grafen ilavesine göre S2 numunesi hariç maksimum tepe kuvvetinde olumlu etkiler yapmıştır. Cam fiber ve aramid fiber dışında ki numunelerde %0,50 grafen ilavesi, ilavesiz numunenin üstünde değere ulaşamamıştır. Grafen ilave oranının artırılması cam fiber de gevrekliği biraz daha artırarak maksimum tepe kuvvetini artırmıştır. Deney sırasında numunelerin ilk kırılma noktaları da bu verilerde etkili olmuştur.

Şekil 4.40’da görüldüğü gibi grafenin katkı oranının artırılmasının artıları kendini göstermektedir. Grafen ilavesi artırılarak maksimum tepe kuvvetinde artırım sağlanabileceği gözlemlenmiştir.

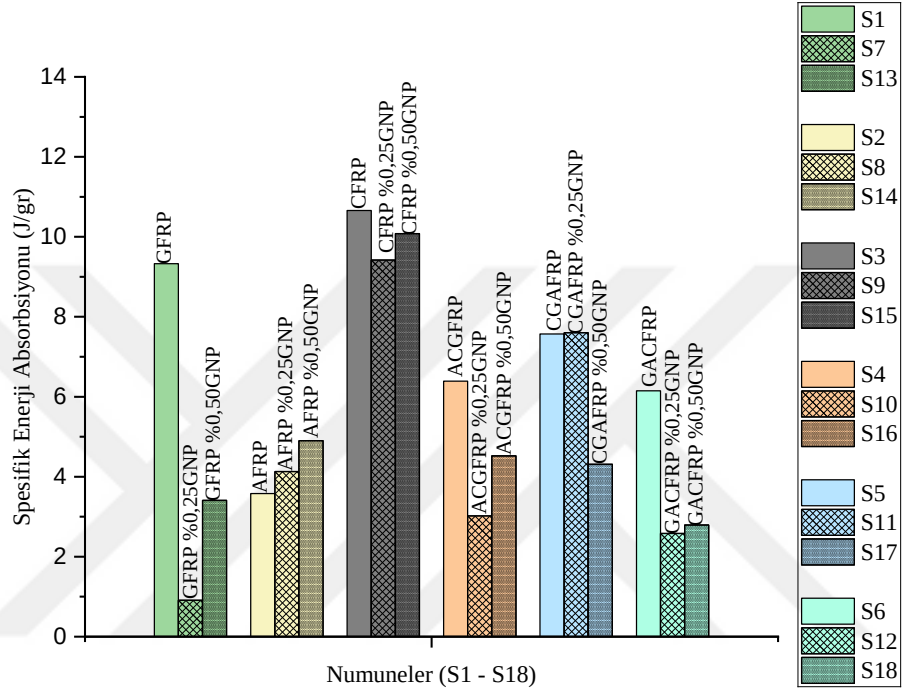
Şekil 4.41’de numunelerin %0,50 grafen ilavesi ile elde edilen enerji absorpsiyonları karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4.41. %0,50 grafen ilavesi ile elde enerji absorpsiyonların karşılaştırılması

Şekil 4.41'den görüldüğü üzere grafen takviyesinin enerji absorpsiyonu üzerine yaptığı etki tıpkı %0,25 grafen ilavesinde olduğu etkiye benzer sonuçlar vermektedir. Bütün numunelerin aramid fiber numunesi hariç grafensiz olmayan yani tekil numunelerine göre enerji absorpsiyonunda düşüş olmuştur. Yine Şekil 4.32'den anlaşıldığı gibi %0,50 grafen ilavesinde enerji absorpsiyonu karbon fiber yani S3 numunesi ve onun en içte sarılı olduğu S5 numunesi hariç %0,25 grafen ilavesine göre artışlar görülmüştür. Tabi bu artışlar S2 numunesi dışında bütün numuneler de asıl numuneler olan S1-S6 numunelerin enerji absorpsiyon değerlerinin altında kalmıştır. Bu sonuçlar aramid fiberin grafene olan uyumunu göstermekle birlikte cam fiber ve karbon fiber için aynı şeyleri söylemek pek de mümkün değildir. Karbon fiber özellikle kendi allotropu ile hiçbir şekilde etkileşim göstermemiş genel olarak düşüşler göstermiştir. Cam fiber ise ilk oranda çok kötü bir düşüş sergilemiş olsa da daha sonra miktarın artırılmasında toparlama göstermiştir. Tabi yine tekil olarak elde ettiği enerji absorpsiyonundan uzak bir değere sahip olmuştur. Hibrit numuneler de ise en etkileyici faktör numunelerin sarım sırası olmuştur. Yapılan deneyler sırasında numunelerin içten soyulmaya başladığı gözlemlenmiş bu da en içte bulunan numunenin tepkisine göre hibrit numune sonuçlarına etki etmiştir.

Tüm bu faktörlerle birlikte spesifik enerji absorpsiyonları da genel olarak enerji absorpsiyon değerlerine paralel hareketler yapmıştır. Ama bazen numune ağırlıklarından kaynaklanan oranlardan dolayı küçük değişiklikler saptanmıştır. Şekil 4.42’de %0,50 grafen ilavesi ile elde edilen spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.



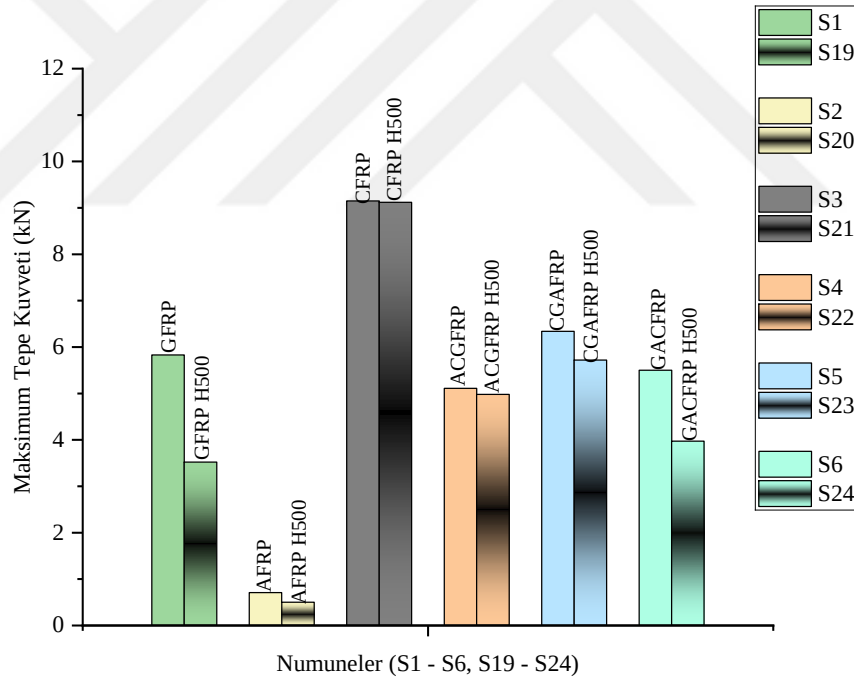
Şekil 4.42. %0,50 grafen ilavesi ile elde edilen spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırılması

Spesifik enerji absorpsiyonları Şekil 4.42’de görüldüğü üzere grafen ilavesiz olan numunelere göre kısmen artmalar ve azalmalar enerji absorpsiyonunda olduğu gibidir. Grafen ilavesi ile grafensiz olan numuneler göre S2 numunesinde artış düzenli olarak kendini göstermiştir. Geri kalan numunelerde tıpkı maksimum tepe kuvveti veya enerji absorpsiyonunda olduğu gibi grafensiz olan numuneler göre düşüş yaşanmıştır. Grafen ilavesinin %0,25’ ten %0,50’ye çıkarılması spesifik enerji absorpsiyonları üzerinde S5 numunesi hariç biraz toparlanmalara yol açsa da yine de grafen ilave edilmemiş numunelerde eldi edilen değerlerin üstüne çıkamamışlardır. Cam fiber numunesi grafen ilave oranının artırılması ile olumlu etkilerini devam ettirmiş fakat yine de asıl grafensiz numunenin altında kalmıştır. Aramid fiber grafenin ilavesi ile elde yukarı yönlü ivmesine devam etmiştir. Bütün numuneler spesifik enerji absorpsiyonunda yukarı yönlü

hareketine devam ederken S11 numunesinde düşüş olmuştur. Bu numunede enerji absorpsiyonunda da düşüş olmuştur.

#### 4.2.3. 500 saat hidrotermal yaşlanmanın grafensiz numuneler üzerindeki etkileri

500 saat 60 °C saf su içinde hidrotermal olarak yaşlandırmaya bırakılmış numunelerin gerek maksimum tepe kuvveti gerekse de enerji absorpsiyonunda S2 numunesi yani aramid hariç düşüler yaşanmıştır. Yaşlandırmanın etkileri numunelerde kendini göstermiştir ama aramid fiber numunesinde bu etki olumlu bir etki yapmış numuneye deney sırasında da gözlenen bir esneklik kazandırmıştır. Bu esneklik sayesinde aramid fiber numunesi kırılmadan büzölmeye çalışmış bu da enerji absorpsiyonunda olumlu etkilere yol açmıştır. Şekil 4.43’de 500 saat hidrotermal yaşlandırılmış numunelerin maksimum tepe kuvveti üzerinde ki etkileri görölmektedir.

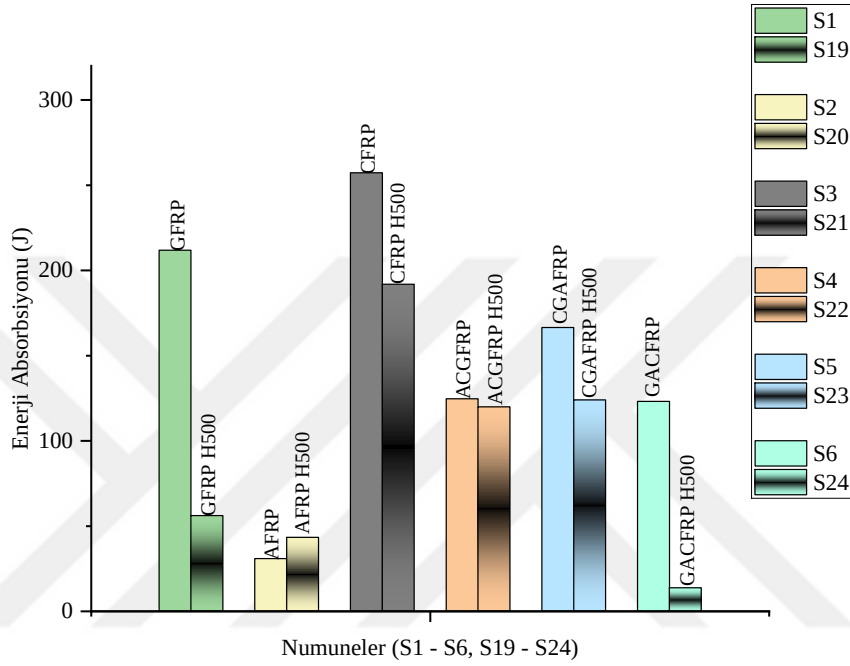


Şekil 4.43. 500 saat hidrotermal yaşlanmanın maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki

Şekil 4.43’de göröldüğü üzere S1 numunesi yani cam fiber yaşlandırma etkilerini tıpkı grafen ilavesinde olduğı gibi düşerek göstermiştir. S3 numunesinde maksimum tepe kuvvetini çok küçük bir düşüş olmuştur. S4 ve S5 numunelerinde ki düşüler de S3 numunesine nazaran fazla olsa da S6 numunesine göre daha düşük oranda kalmıştır. Zira

S6 numunesinde iç kısımda cam fiber bulunmakta ve bu sebepten diğer hibrit numuneler oranla daha fazla etkilendiğini göstergesi kabul edilmektedir.

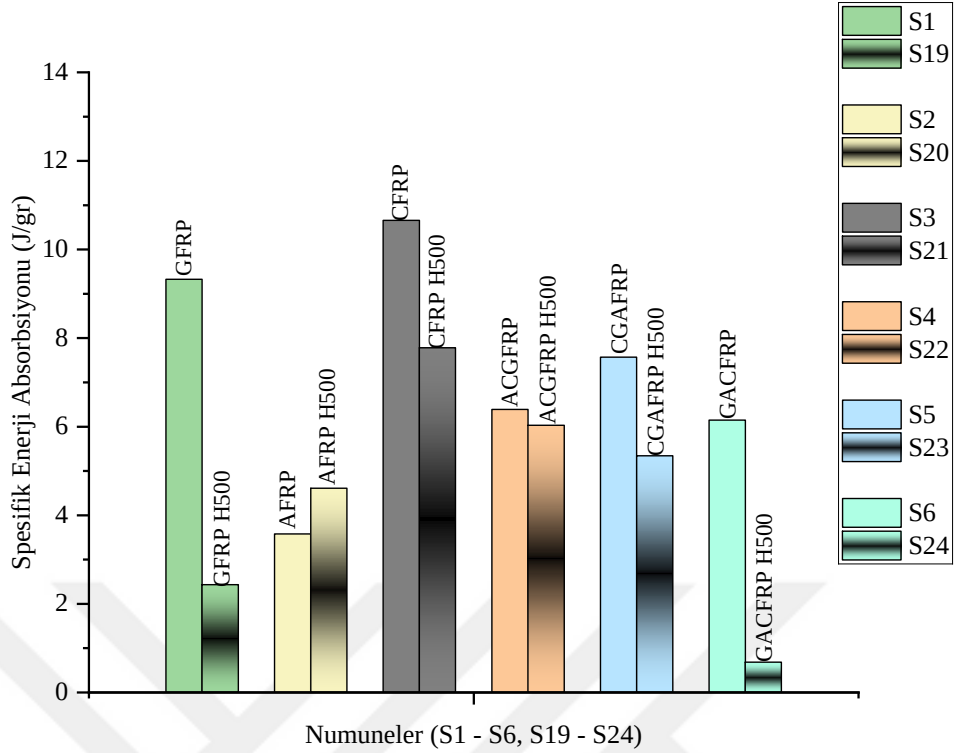
Maksimum tepe kuvvetinde ki düşüşlere benzer şekilde enerji absorpsiyonunda da düşüşler yaşanmıştır. Şekil 4.44’de numunelerin 500 saat hidrotermal yaşlandırma ile elde edilen enerji absorpsiyonları karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4.44. 500 saat hidrotermal yaşlandırılmış numunelerin enerji absorpsiyonlarının karşılaştırılması

Şekil 4.44’den görüldüğü üzere 500 saat hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerin enerji absorpsiyonları tıpkı maksimum kuvvet grafiğine benzer şekilde hareket etmişlerdir. Aramid fiber numunesi hariç yaşlandırma enerji absorpsiyonunda düşüşe sebebiyet vermiştir. Cam fiber yani S1 numunesi düşüşün çok fazla olduğu numunelerden biri olarak karşımıza çıkmakta ve cam fiberin en içte yer aldığı hibrit numunelerden olan S6 numunesinde de bu düşüş kendini iyiden iyiye göstermektedir. Aramid fiber ise tıpkı maksimum tepe kuvvetinde olduğu gibi enerji absorpsiyonunda da artışını devam ettirmiştir. S3 numunesi ile diğer ki hibrit numune S4 ve S5 te düşüşler belirli oranlarda olmuştur.

Enerji absorpsiyonundan ziyade diğer belirleyici etken olan spesifik enerji absorpsiyonunda da yine S2 numunesi ön plana çıkmakta ve yaşlanmanın etkisini pozitifçe çevirmiştir. Şekil 4.45’de 500 saat yaşlandırma ile elde edilen spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.

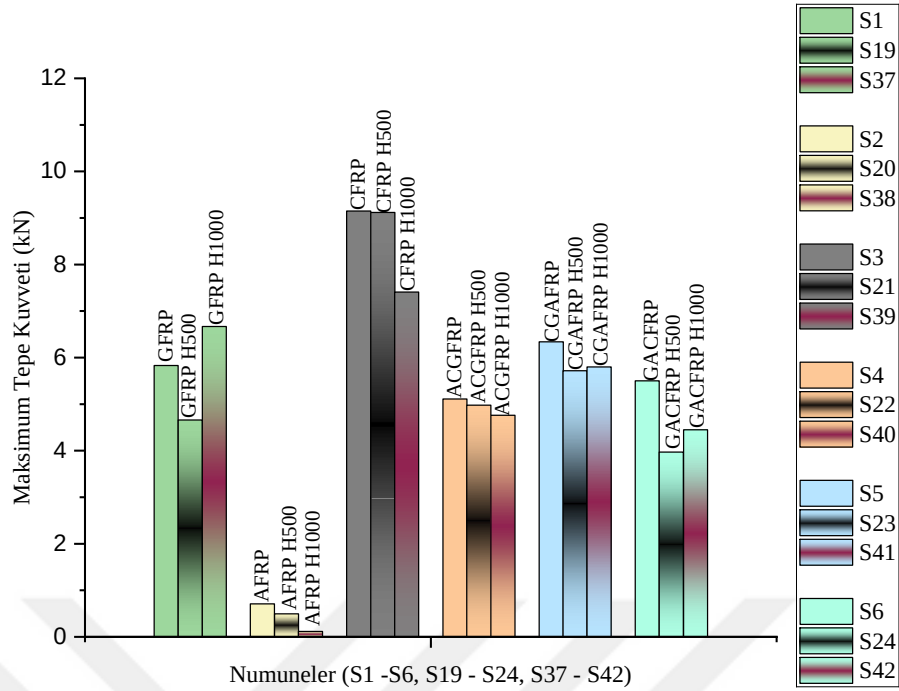


Şekil 4.45. 500 saat yaşlandırma ile elde edilen spesifik enerji absorpsiyonların karşılaştırılması

Spesifik enerji absorpsiyonları Şekil 4.45’de görüldüğü üzere S2 numunesi hariç düşüşler yaşamakta ve bu düşüş en fazla kendini S1 numunesi ile yani cam fiber de kendini göstermiştir. Aynı zamanda bu etkiyi S6 numunesinde yani cam fiberin en içte sarılı olduğu numune de görmekteyiz. Diğer numunelerdeki düşüşler S4 dışında benzer iken S4 numunesi yani aramid fiberin en içte sarılı olduğu numune düşüşten daha az etkilendiği Şekil 4.45’de açıkça görülmektedir.

#### 4.2.4. 1000 saat hidrotermal yaşlanmanın grafensiz numuneler üzerindeki etkileri

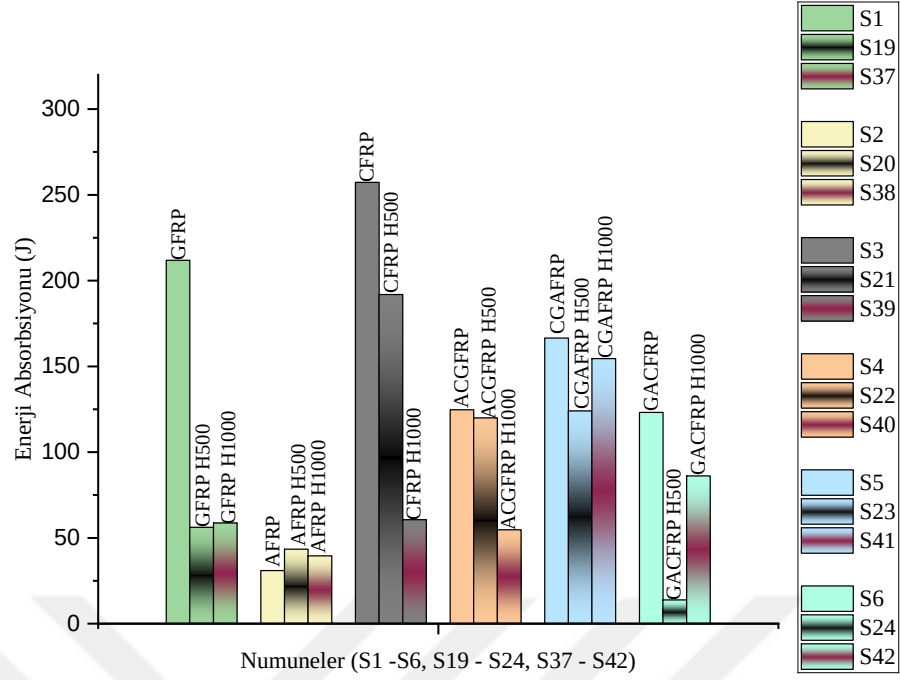
1000 saat hidrotermal olarak yaşlandırılmış numunelerde maksimum kuvvet ve enerji absorpsiyonlarında bazı numunelerde yükseliş görülürken bazılarında ise düşüşler gözlemlenmiştir. Şekil 4.46’de 1000 saat yaşlandırılmış numunelerin maksimum tepe kuvveti üzerinde ki etkileri görülmektedir.



**Şekil 4.46.** 1000 saat hidrotermal yaşlanmanın maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki

Şekil 4.46’da görüldüğü 1000 saat yaşlandırma yaşlandırılmamış numuneler kıyasla S1 numunesi hariç genel olarak maksimum tepe kuvvetinde düşüslere sebebiyet vermiştir. Su absorpsiyon süresinin artması cam fiberde olumlu etkilere yol açmış ve değerinde artışa sebebiyet vermiştir. Yaşlandırılmamış numuneler kıyasla S3 numunesi hariç diğer numunelerde daha az düşüş gözlemlenmiştir. 500 saat yaşlandırmaya göre de kıyaslayacak olursak yine karbon fiber hariç çok fazla oranda düşüşler veya artışlar olmamıştır. Yine Şekil 4.46’da görüldüğü üzere yaşlandırma saatinin 500 saatten 1000 saate çıkarılması cam fiber numunesi üzerinde olumlu etkiler yapmıştır aramid fiber de ise biraz düşüş yaşanırken karbon fiber ve hibrit numunelerden olan S22 numunesinde de yani aramid fiberin iç kısımda sarılı olduğu numunede de düşüş gözlemlenmiştir. S23 numunesinde ise yaşlandırma süresinin 500 saatten 1000 saate çıkarılması çok küçük bir miktar artış gözlemlenirken S24 numunesinde bu artış biraz daha fazladır. Bu cam numunenin en içte sarılı olduğu numunedir.

Maksimum tepe kuvvetlerinde ki bu artış kendini enerji absorpsiyonunda fazla gösterememiştir. Şekil 4.47’de 1000 saat yaşlandırma ile elde edilen enerji absorpsiyonları karşılaştırılması verilmiştir.

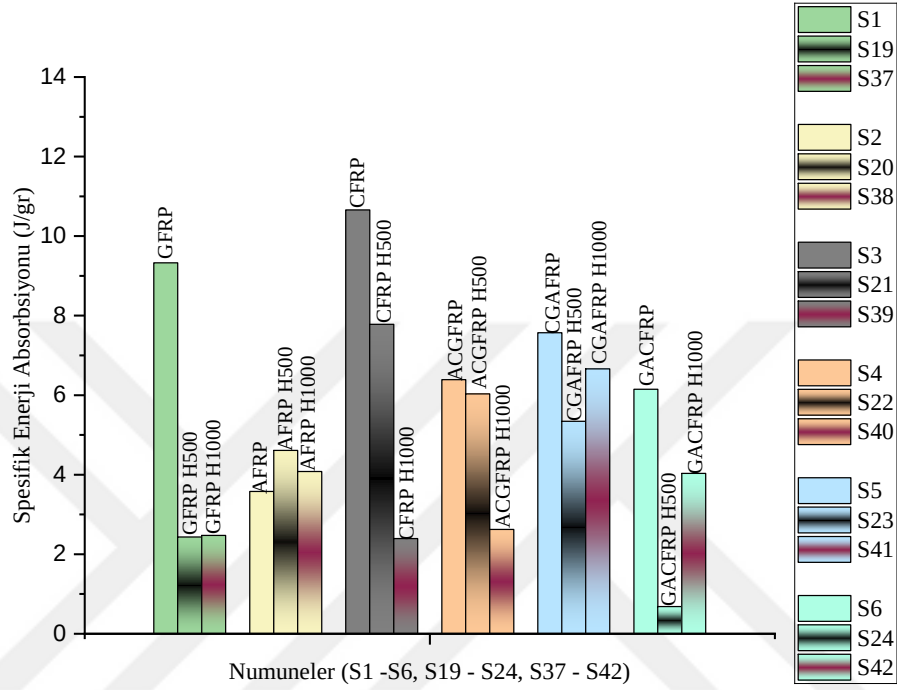


Şekil 4.47. 1000 saat yaşlandırılmış numunelerin enerji absorpsiyonların karşılaştırılması

Şekil 4.47’den görüldüğü üzere enerji absorpsiyonunda yaşlandırmanın etkisini en fazla hisseden numune gerek yaşlandırılmamış numuneye kıyasla gerekse 500 saat yaşlandırılmış numuneye göre karbon fiber numunesi olmuştur. Neredeyse cam fiberin enerji absorpsiyon değerine kadar bir gerileme gözlemlenmiştir. Aramid fiber dışında bütün numunelerde yaşlandırılmamış numuneler göre düşüşler görülmüştür. Yaşlandırmanın süresinin artırılması yaşlandırılmamış numuneler göre sadece aramid fiber için olumlu etki yapmış olmasına rağmen 500 saat yaşlandırmaya oranla daha düşük bir değer elde edilmiştir. Yine Şekil 4.47’den anlaşıldığı üzere 500 saat yaşlandırılmış numunelerin yaşlandırma sürelerini 1000 saate çıkarmak cam fiber numunesi ve onun en içte sarılı olduğu hibrit numune ile S41 numunesinde artışlara sebebiyet vermiştir. Bunun dışında kalan numuneler de 500 saatten 1000 saate çıkarılması ile düşüş gözlemlenmiştir. Deney sırasında numunelerin kırıldığı yer çok büyük önem teşkil etmekteydi. Çünkü numune çok aşağıdan kırılması veya üst tarafından kırılması eğrinin altında kalan alanı fazlasıyla etkilemekte idi. Bazen numuneler üst üste bindirme yaparak ortaya çıkan sonucu etkilemiştir. Veya esneyerek kırılma olmadan deney cihazı dışına çıkmıştır. Bu daha çok aramid fiber numunesinde yaşanmıştır.

Spesifik enerji absorpsiyonu enerji absorpsiyonunun numunenin ağırlığına bölünmesi ile elde edildiğinden bu numunelerde su absorpsiyon değeri enerji absorpsiyon

değerlerini etkilemektedir. Emilen su miktarı numuneye ekstradan ağırlık katmıştır. Numunenin ağırlık değerini de etkilediği için farklı da genel olarak enerji absorpsiyon değerlerine paralel hareketler yapmıştır. Şekil 4.48’de 1000 saat yaşlandırma ile elde edilen spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.



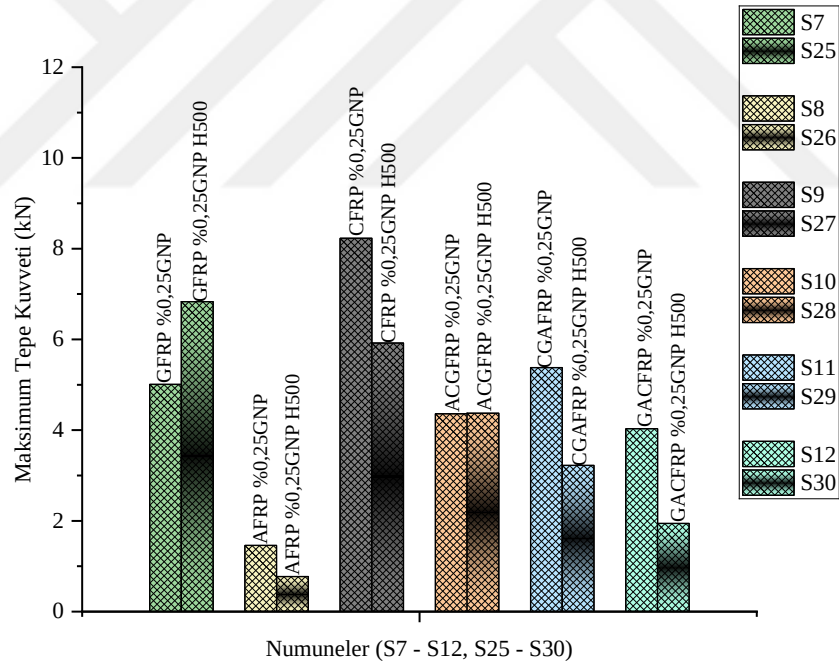
Şekil 4.48. 100 saat yaşlandırılmış numunelerin spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırılması

Şekil 4.48’de görüldüğü üzere 1000 saat yaşlandırmanın hiç yaşlandırılmamış numuneler göre spesifik enerji absorpsiyonu üzerinde ki etkisi enerji absorpsiyonunda olduğu gibidir. Aramid fiber numunesi hariç hiç yaşlandırılmamış numuneler göre yaşlandırma süresinin artırılması numuneleri kötü etkilemiştir. Karbon fiberin yani S3 numunesin de 1000 saat yaşlandırma ile elde edilen spesifik enerji absorpsiyonu diğer numunelerin 1000 saat yaşlandırması elde edilen değer in altında bir değerdir. Karbonun yaşlandırma ile çok etkilendiğinin göstergesidir. 500 saat yaşlandırmaya göre kıyaslayacak olursak düşüş ve artışlar farklılıklar göstermiştir. Yaşlandırma süresinin 500 saatten 1000 saate artırılması spesifik enerji absorpsiyonu üzerinde S19, S23 ve S24 numunelerini olumlu etkilemiştir. Geri kalan numunelerde düşüslere sebebiyet vermiştir. 500 saatten 1000 saate yaşlandırmanın artırılması ile en fazla düşüş enerji absorpsiyonunda olduğu gibi karbon fiber numunesinde yaşanmıştır. Karbon fiberin

hidrotermal yaşlandırmaya karşı kötü bir tutum sergilediğinin göstergesi olarak kabul edilebilir.

#### 4.2.5. 500 saat hidrotermal yaşlanmanın %0,25 grafen takviyeli numuneler üzerindeki etkileri

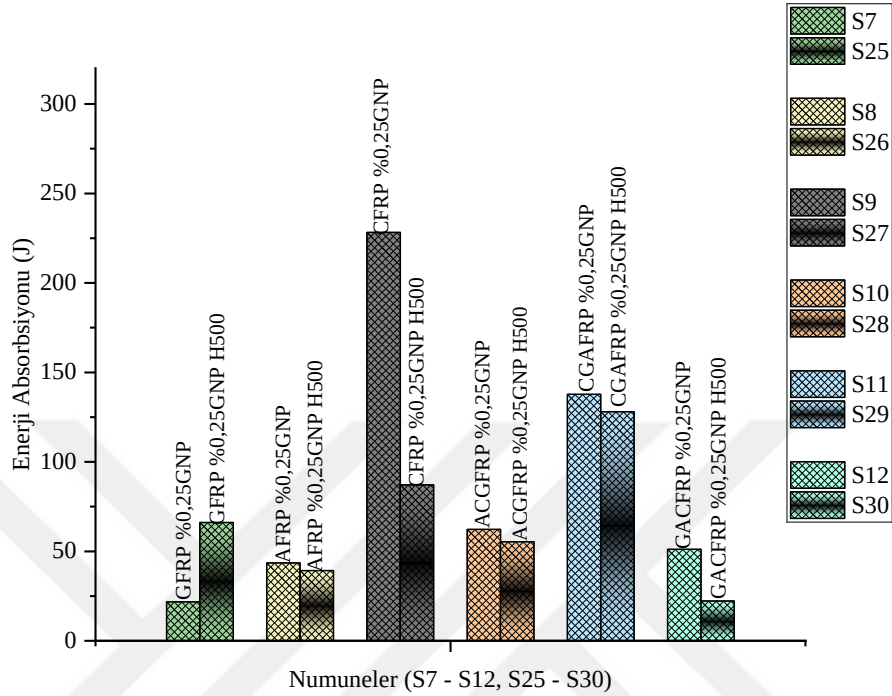
%0,25 grafen ile takviye edilmiş ve 500 saat 60 °C saf su içinde hidrotermal olarak yaşlandırmaya bırakılmış numunelerin gerek maksimum tepe kuvveti gerekse de enerji absorpsiyonunda genel olarak düşüşler yaşanmıştır. S7 numunesi yani cam fiber numunesi grafen takviyesi ile kaybettiği değerleri yaşlandırmanın etkileri ile silmeye çalışsa da yine S1 numunesinden çok uzaklaşmıştır. Şekil 4.49'da %0,25 grafen ile takviye edilmiş ve 500 saat 60 °C saf su içinde hidrotermal olarak yaşlandırmaya bırakılmış numunelerin maksimum tepe kuvvet karşılaştırmalı grafiği görülmektedir.



Şekil 4.49. %0,25 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmanın maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki

Şekil 4.49'dan görüldüğü üzere S7 ve S10 numunesi dışında maksimum tepe kuvvetinde düşüşler olmuştur. S10 numunesinde ki artış ise yok denecek kadar azdır. Bu da hem grafen hem yaşlandırma da numunelerin özelliklerinin etkilendiklerini göstermektedir.

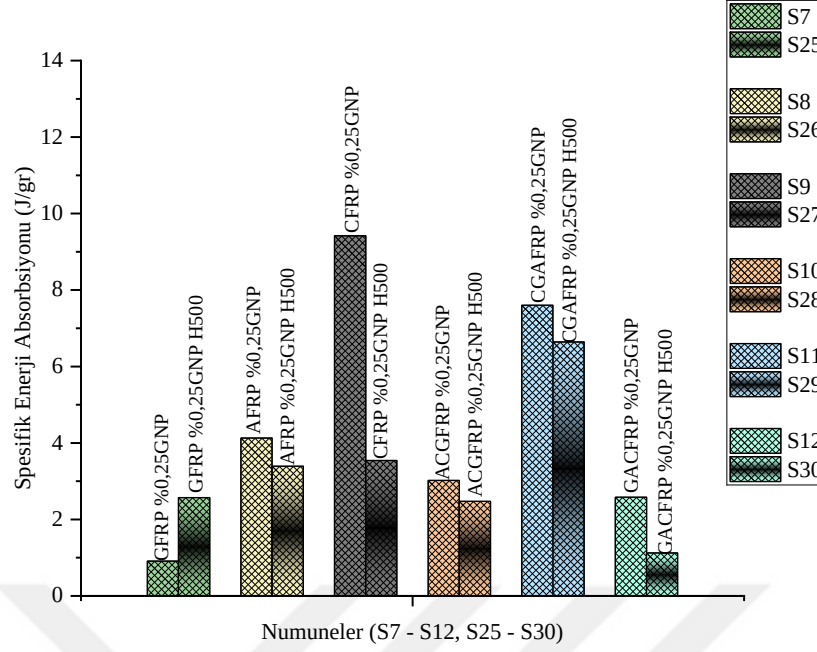
Şekil 4.50’de %0,25 grafen ile takviye edilmiş ve 500 saat hidrotermal olarak yaşlandırmaya bırakılmış numunelerin enerji absorpsiyonları karşılaştırılması verilmiştir.



**Şekil 4.50.** %0,25 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmanın enerji absorpsiyonları karşılaştırılması

Şekil 4.50’den görüldüğü üzere 500 saat hidrotermal olarak yaşlandırma %0,25 oranında takviye edilmiş numuneler üzerinde maksimum tepe kuvvetinde olduğu gibi iyi yönde etki yapmamıştır. Bir tek S7 numunesinde artışa sebebiyet vermiştir. Bu artış cam fiberin en içte sarılı olduğu S12 numunesinde diğer fiberlerin düşüşünü karşılayamamış S12 numunesinde enerji absorpsiyonunda düşüş olmuştur. S9 numunesi yine en fazla düşüşü yaşayan numunelerden olup karbonun yaşlandırmaya verdiği tepkiyi açık bir şekilde göstermektedir.

Enerji absorpsiyonlarında ki düşüşe benzer şekilde spesifik enerji absorpsiyonlarında düşüşler ve artışlar yaşanmıştır. Şekil 4.51’de % 0,25 grafen ilaveli numunelerde 500 saat yaşlandırma ile elde edilen spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.

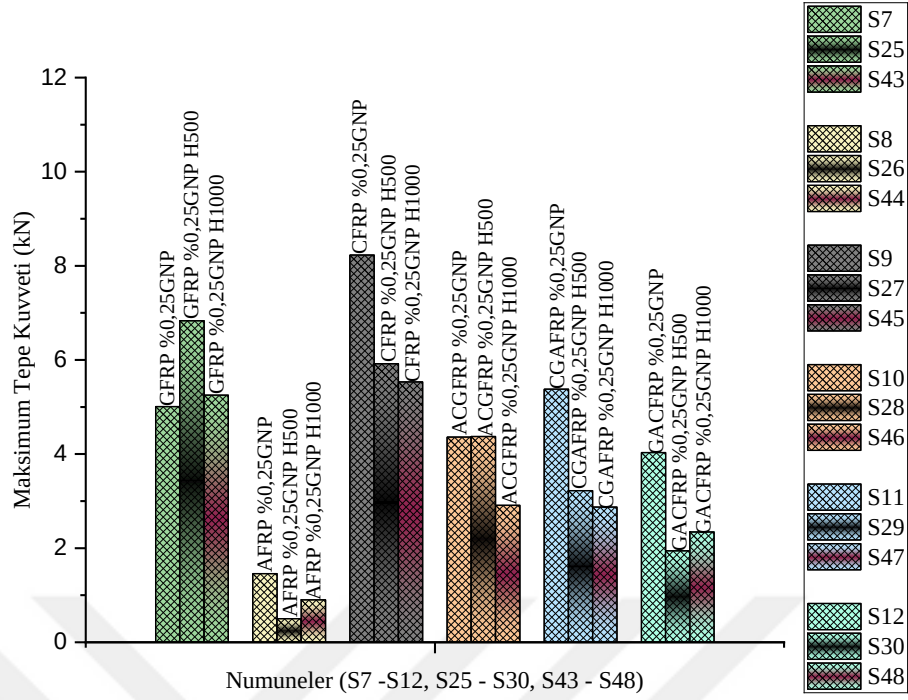


**Şekil 4.51.** %0,25 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmanın spesifik enerji absorpsiyonları karşılaştırılması

Spesifik enerji absorpsiyonları Şekil 4.51’de görüldüğü üzere tıpkı enerji absorpsiyonunda olduğu gibi S7 numunesi hariç kötü etkilenmiştir. Her ne kadar S7 numunesi artış yaşamış olsa da asıl numunesi olan S1 e göre değeri çok çok aşağıdadır. En fazla düşüş diğer maksimum tepe kuvveti ve enerji absorpsiyonunda olduğu gibi S9 numunesinin yaşlandırılması gözlemlenmiştir. Diğer numunelerde ki düşüş enerji absorpsiyonunda ki düşüşlere benzerdir.

#### 4.2.6. 1000 saat hidrotermal yaşlanmanın %0,25 grafen takviyeli numuneler üzerindeki etkileri

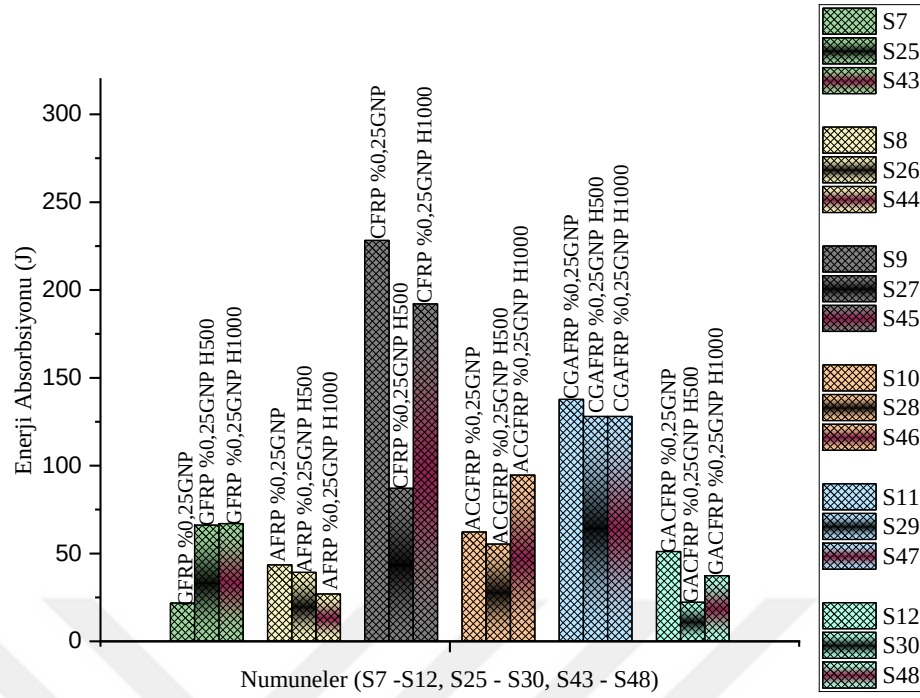
1000 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış %0,25 grafen ilaveli numunelerde maksimum kuvvet ve enerji absorpsiyonlarında genel olarak bir düşüş söz konusu olsa da artış yapan numunelerde olmuştur. Şekil 4.52’de 1000 saat yaşlandırılmış %0,25 grafen ilave edilmiş numunelerin maksimum tepe kuvveti üzerinde ki etkileri görülmektedir.



**Şekil 4.52.** 1000 saat hidrotermal yaşlanmanın %0,25 grafen ilaveli numunelerde maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki

Şekil 4.52’de görüldüğü 1000 saat yaşlandırma %0,25 grafen ilaveli numunelerde hiç yaşlandırılmamış %0,25 grafen ilaveli numuneler göre cam fiber yani S7 numunesi dışında düşüşe sebebiyet vermiştir. Cam fiber numunesinde ki artış ise çok fazla bir artış değildir. Genel olarak yaşlandırma numunelerin maksimum tepe kuvvetini olumsuz etkilemiştir. 500 saat yaşlandırılmış %0,25 grafen ilaveli numuneler ile kıyasladığımızda aramid fiber numunesi S26 ile cam fiberin en içte sarılı olduğu hibrit S30 numunesi dışında artış yaşanmamıştır. %0,25 grafen ilavesinde yaşlandırma saatinin 500 saatten 1000 saate çıkarılması numunelerin maksimum tepe kuvvetinde genel olarak iyi bir etki yapmamıştır. 500 saatte kıyasla artış yapan tek numune olan hibrit S30 numunesi olsa da çok fazla bir artış yakalayamamıştır. Cam fiberin su emme oranının artması biraz olsun numunenin özelliklerini etkilemiştir. Karbon fiber aramid fiber ve hibrit S29 numunesinde ki yaşlandırmanın 500 saatten 1000 saate çıkarılması ile gözlemlenen düşüşler S28 numunesine oranla daha azdır.

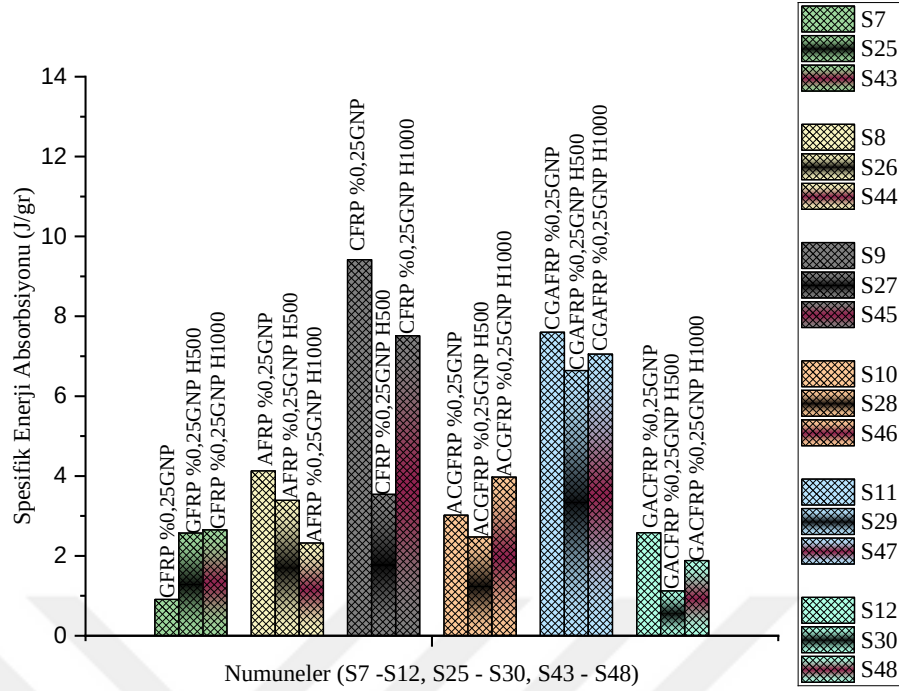
Maksimum tepe kuvvetlerinde ki değer kaybeden numune fazla olmasına rağmen enerji absorpsiyonunda artışlar iki numunede kendini göstermiştir. Şekil 4.53’te 1000 saat yaşlandırılmış %0,25 grafen ilaveli numunelerin enerji absorpsiyonları karşılaştırılması verilmiştir.



**Şekil 4.53.** 1000 saat yaşlandırılmış %0,25 grafen ilaveli numunelerin enerji absorpsiyonları karşılaştırılması

Şekil 4.53'den görüldüğü üzere enerji absorpsiyonunda yaşlandırma süresinin artması hiç yaşlandırılmamış %0,25 grafen ilaveli numuneler göre her ne kadar düşüşleri getirirse de S7 ve S10 numunesinde olumlu etki yapmıştır. Bu numune dışında diğer numuneler 1000 saat yaşlandırmaya yaşlandırılmamış numuneler göre düşüş ile cevap vermiştir. Düşüşler yaşlandırılmamış %0,25 grafen ilaveli numunelere göre yaşanmış olsa da 500 saat yaşlandırılmış %0,25 grafen takviyeli numunelere göre artışlar daha ön plandadır. 500 saat yaşlandırılmış numunelerin yaşlandırma sürelerini 1000 saate çıkarınca genel olarak düşüş beklenirken su absorpsiyon miktarının artması numunelerin biraz daha enerji absorpsiyonuna değer katmıştır. Burada yaşlandırmanın olumlu etkisi görülmektedir. Fakat bu değerler yine de asıl numunelerin altında değerlerdir. Aramid fiber numunesinde ise grafen ilavesi ve yaşlandırma ayrı ayrı olumlu etki yapmasına rağmen ikisinin birlikte uygulanması aramid fiber numunesine iyi yönde etki yapmamıştır. Bu düşüş asıl numuneden yani S2' den fazla uzak bir değer değildir.

Spesifik enerji absorpsiyonu enerji absorpsiyonlarını kıyaslayacak olursak bu numunelerin yine ağırlıkları ön plana çıkacaktır. Su emme süresinin artması numunelerin ağırlıklarına fazladan değer katmıştır. Şekil 4.54'te 1000 saat yaşlandırılmış %0,25 grafen ilaveli numunelerin elde edilen spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.



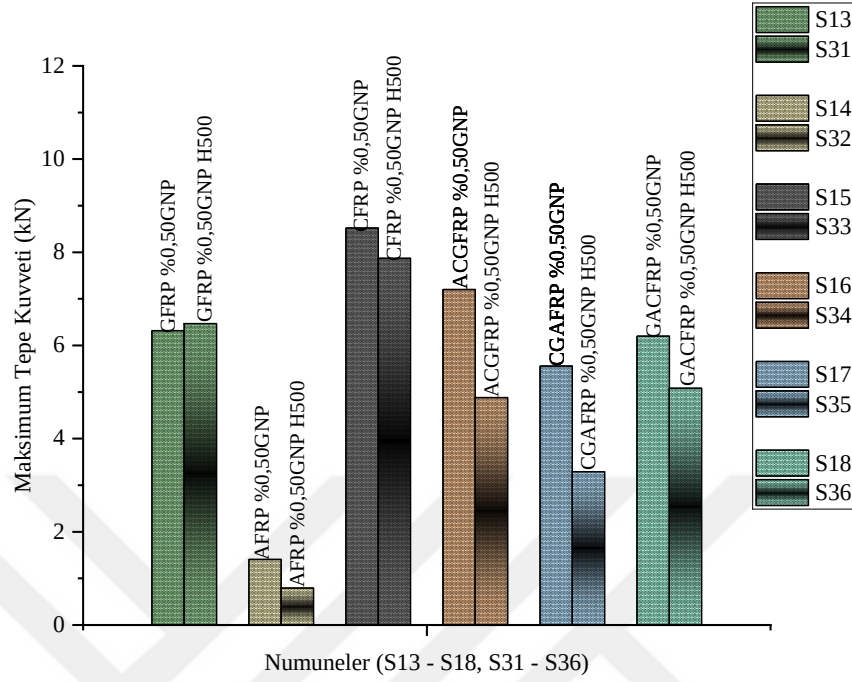
**Şekil 4.54.** 1000 saat yaşlandırılmış %0,25 grafen ilaveli numunelerin spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırılması

Şekil 4.54'te anlaşıldığı gibi spesifik enerji absorpsiyonlarında tıpkı enerji absorpsiyonunda olduğu gibi hiç yaşlandırılmamış %0,25 grafen ilaveli numunelere kıyasla artışlara ve düşüşler gözlemlenmiştir. S7 ve S10 numunesi dışında kalan bütün numunelerde hiç yaşlandırılmamış %0,25 grafen ilaveli numunelere kıyasla düşüş olmuştur. Tabi bu düşüş ve artışları bir de 500 saat yaşlandırma ile kıyaslamak gerekir. Yaşlandırma süresinin 500 saatten 1000 saate çıkarılması spesifik enerji absorpsiyonu üzerinde aramid fiber numunesi yani S26 numunesi hariç olumlu etki yapmıştır. Bütün numunelerde artış gözlemlenmiştir. Tabi bu artışlara rağmen değerler grafen ilavesiz ve yaşlandırmaya uğratılmamış numunelere ulaşmamışlardır.

#### 4.2.7. 500 saat hidrotermal yaşlanmanın %0,50 grafen takviyeli numuneler üzerindeki etkileri

%0,50 grafen ile takviye edilmiş ve 500 saat 60 °C saf su içinde hidrotermal olarak yaşlandırmaya bırakılmış numunelerin maksimum tepe kuvvetlerinde genel olarak düşüler yaşanmış olsa da enerji absorpsiyonlarında düşüş ve artışlar gözlemlenmiştir. Şekil 4.55'de %0,50 grafen ile takviye edilmiş ve saat 60 °C saf su içinde hidrotermal

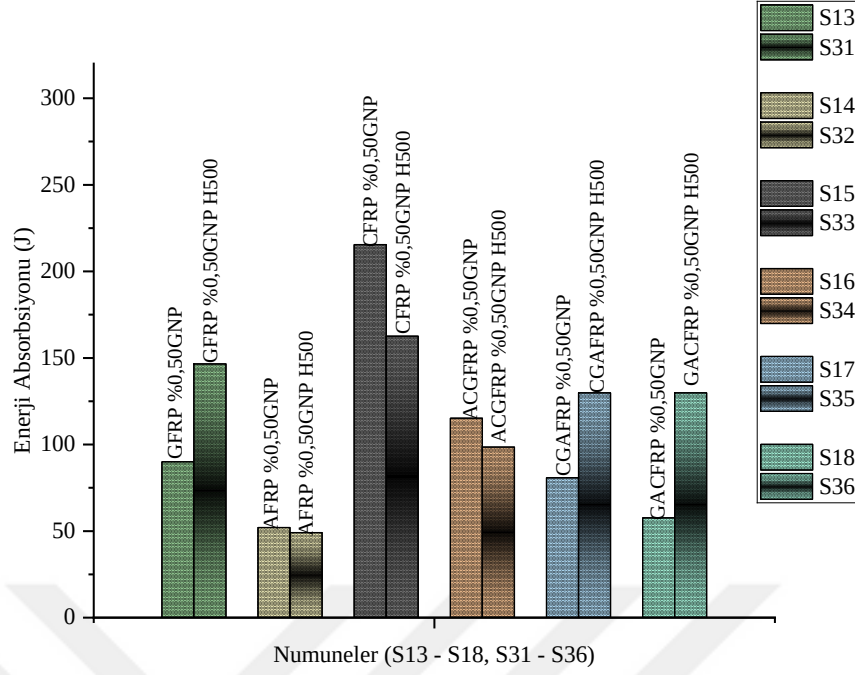
olarak yaşlandırmaya bırakılmış numunelerin maksimum tepe kuvvet karşılaştırmalı grafiği görülmektedir.



Şekil 4.55. %0,50 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmanın maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki.

Şekil 4.55’den görüldüğü üzere S13 numunesi hariç bütün numunelerde maksimum tepe kuvvetinde düşüş yaşanmıştır. S13 numunesinde ki artış ise çok büyük bir artış değildir. Yani yaşlandırma çok az miktarda da olsa %0,50 grafen ilaveli numunelerde maksimum tepe kuvvetini azaltmaya yönelik bir unsur olmuştur.

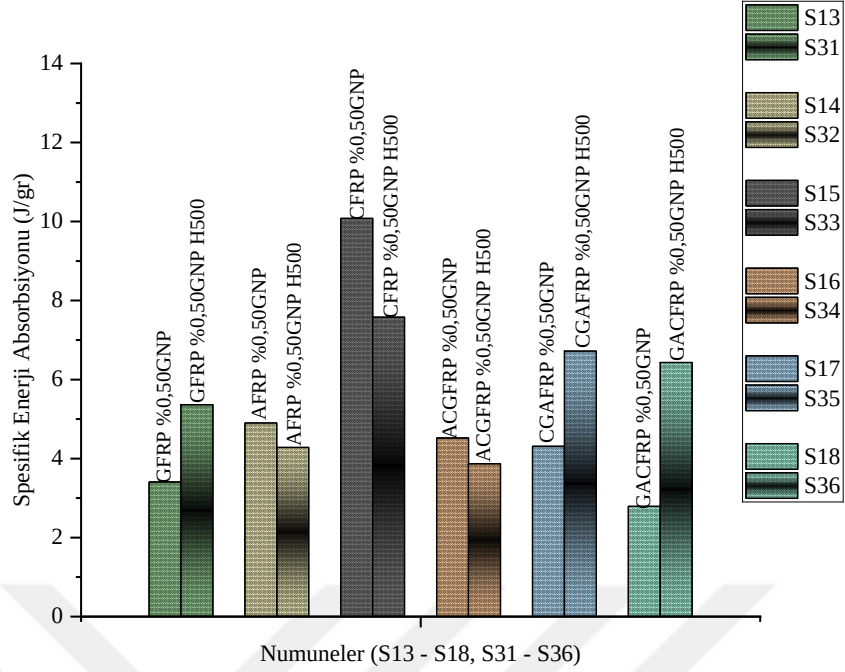
Şekil 4.56’da %0,50 grafen ile takviye edilmiş ve 500 saat hidrotermal olarak yaşlandırmaya bırakılmış numunelerin enerji absorpsiyonları karşılaştırılması verilmiştir.



**Şekil 4.56.** %0,50 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmanın enerji absorpsiyonları karşılaştırılması

Şekil 4.56’da görüldüğü üzere 500 saat hidrotermal olarak yaşlandırma %0,50 oranında takviye edilmiş numunelerde S13, S17 ve S18 numunelerinde artışa neden olmuş diğer numunelerde ise düşüşe sebebiyet vermiştir. Aramid fiber numunesinde çok az bir düşüş olmuştur. Aynı şekilde aramid fiberin iç kısımda yer aldığı hibrit numune S16’ da ki düşüş değeri de çok fazla değildir.

Enerji absorpsiyonlarında ki değişikliklere benzer düşüşe şekilde spesifik enerji absorpsiyonlarında düşüşler ve artışlar yaşanmıştır. Şekil 4.57’de %0,50 grafen ilaveli numunelerde 500 saat yaşlandırma ile elde edilen spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.

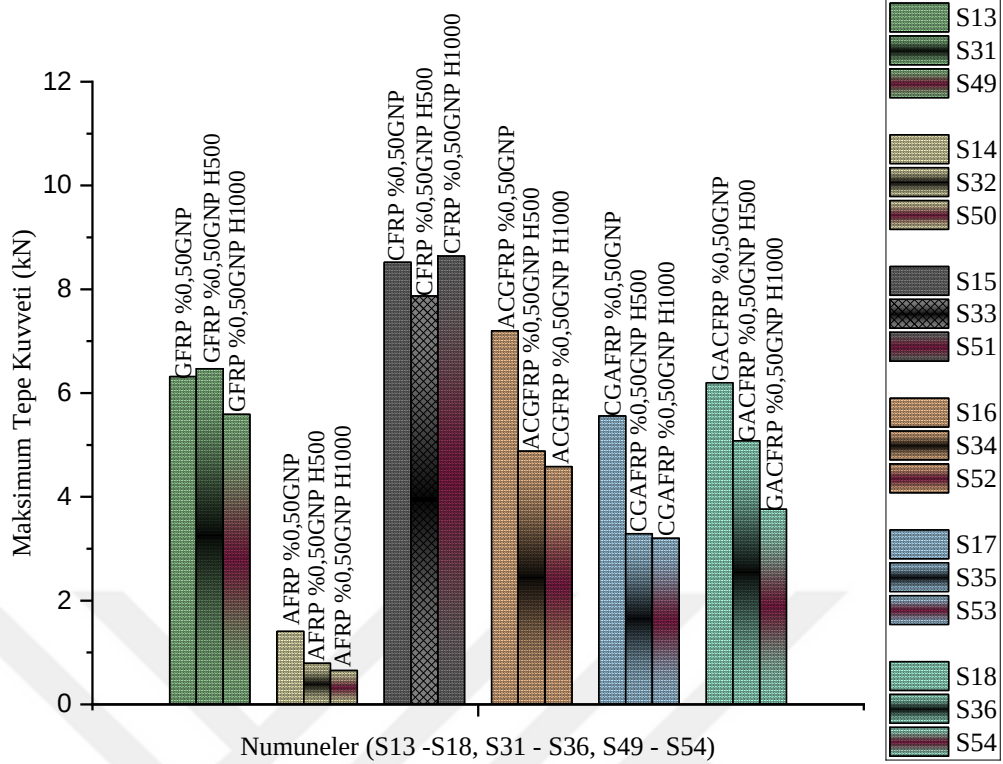


**Şekil 4.57.** %0,50 grafen ilaveli numunelerde 500 saat hidrotermal yaşlanmada spesifik enerji absorpsiyonları karşılaştırılması

Spesifik enerji absorpsiyonları Şekil 4.57’de görüldüğü üzere enerji absorpsiyonuna benzer bir grafik oluşturmuştur. Cam fiber numunesi S13 ve cam fiberin en içte sarılı olduğu hibrit S18 ile diğer hibrit numune S17 artmıştır. S17’de en içte sarılı olan karbon fiber numunesi tekil olarak sarılı olduğu S15 numunesinde aynı performansı gösterememiştir. Burada hibridizasyon bu numunenin enerji absorpsiyonunda etkili olmuştur. Aramid fiber numunesinde ki düşüşte çok az miktarda olup asıl numune olan S2’nin üstünde bir değerdir.

#### 4.2.8. 1000 saat hidrotermal yaşlanmanın %0,50 grafen takviyeli numuneler üzerindeki etkileri

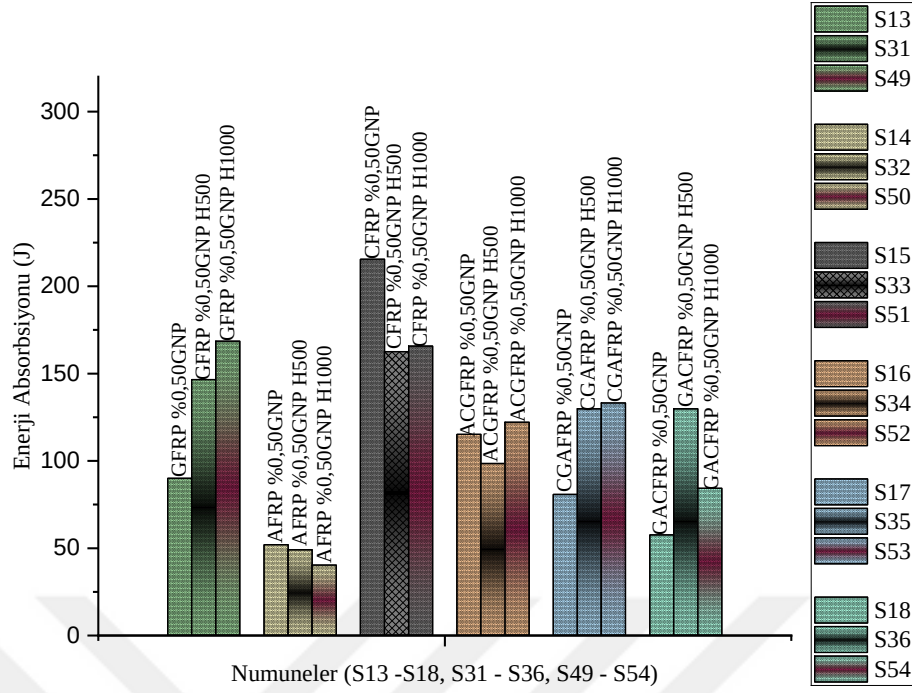
1000 saat süreyle hidrotermal olarak yaşlandırılmış %0,50 grafen ilaveli numunelerde maksimum kuvvetinde genel olarak bir düşüş yaşanmış; enerji absorpsiyon değerinde ise artışların yoğunluklu olduğu bir durum söz konusu olmuştur. Şekil 4.58’de 1000 saat yaşlandırılmış %0,50 grafen ilave edilmiş numunelerin maksimum tepe kuvveti üzerinde ki etkileri görülmektedir.



**Şekil 4.58.** 1000 saat hidrotermal yaşlanmanın %0,50 grafen ilaveli numunelerde maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etki.

Şekil 4.58’de görüldüğü üzere 1000 saat yaşlandırma %0,50 grafen ilaveli numunelerde hiç yaşlandırılmamış %0,50 grafen ilaveli numunelere göre S15 numunesi hariç olumsuz yönde etki yapmıştır. S15 numunesi yani karbon fiberde pek bir değişiklik olmamış kayda değer olmayacak bir artış yaşanmıştır. Yaşlandırma süresinin artırılması bütün numuneleri etkilemiştir. 500 saat yaşlandırmaya göre de benzer bir grafik ortaya çıkmıştır. Yani yaşlandırma saatinin 500 saatten 1000 saate çıkarılması %0,50 grafen ilaveli numunelerde karbon fiber numunesi hariç düşüşe yol açmıştır. Karbon fiber yani S33 çok az miktarda artışa uğramıştır.

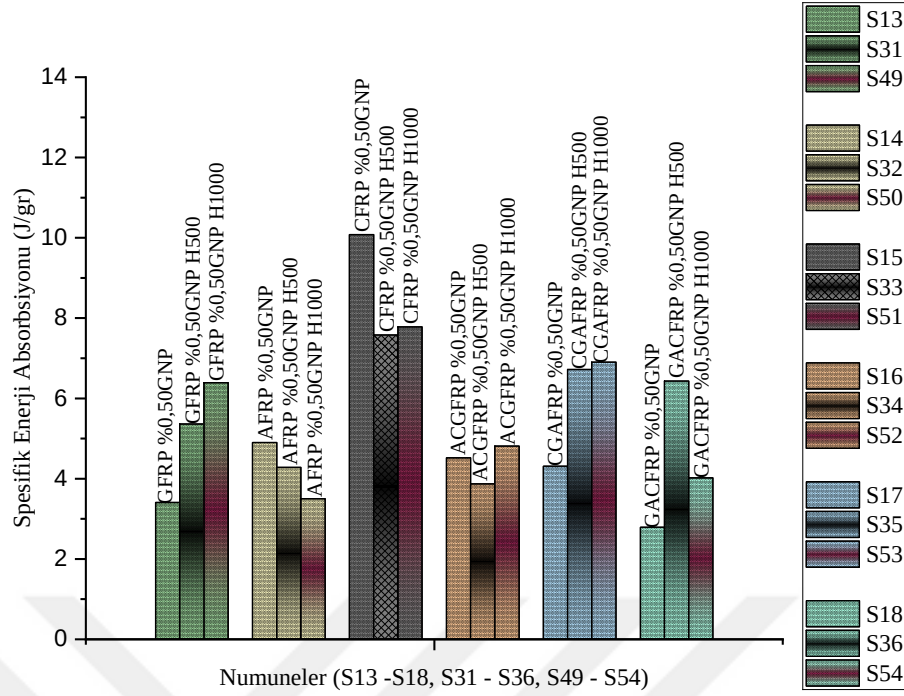
Maksimum tepe kuvvetlerinde neredeyse bütün numuneler değer kaybederken enerji absorbsiyonunda bu durum değişmiştir. Şekil 4.59’da 1000 saat yaşlandırılmış %0,50 grafen ilaveli numunelerin enerji absorbsiyonları karşılaştırılması verilmiştir.



**Şekil 4.59.** 1000 saat yaşlandırılmış %0,50 grafen ilaveli numunelerin enerji absorpsiyonları karşılaştırılması

Şekil 4.59'dan görüldüğü üzere enerji absorpsiyonunda yaşlandırma süresinin artması numunelerin hiç yaşlandırılmamış %0,50 grafen ilaveli numunelere kıyasla enerji absorpsiyonunda artışa sebebiyet verse de S14 ve S15 numunelerinde düşüş yaşanmıştır. Diğer numunelerde su absorpsiyonu numunelere biraz esneklik kazandırıp enerji absorpsiyonuna olumlu katkı yapmıştır. 500 saat yaşlandırmaya göre de kıyaslayacak olursak yine numune farklılıklar gözlemlenmiştir. 500 saat yaşlandırılmış numunelerin yaşlandırma sürelerini 1000 saate çıkarınca S31, S33, S34 ve S35 numunelerinde artışa sebebiyet vermiştir. 500 saatten 1000 saate yaşlandırma süresinin çıkarılması aramid fiberde yani S32'de çok az bir miktarda düşüşe sebebiyet vermiştir. Yaşlandırma süresi uzatılması yani su emme absorpsiyonunu artarken numuneler esneklik kazanabiliyor fakat sürenin artması sıcaklığa da maruz kalma süresini artırması ile olumsuz yönde de etkilere yol açtığı gözlemlenmiştir.

Spesifik enerji absorpsiyonu da genel olarak numunelerde enerji absorpsiyonuna paralel seyreden bir parametre olmuştur. Şekil 4.60'da 1000 saat yaşlandırılmış %0,50 grafen ilaveli numunelerin elde edilen spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.

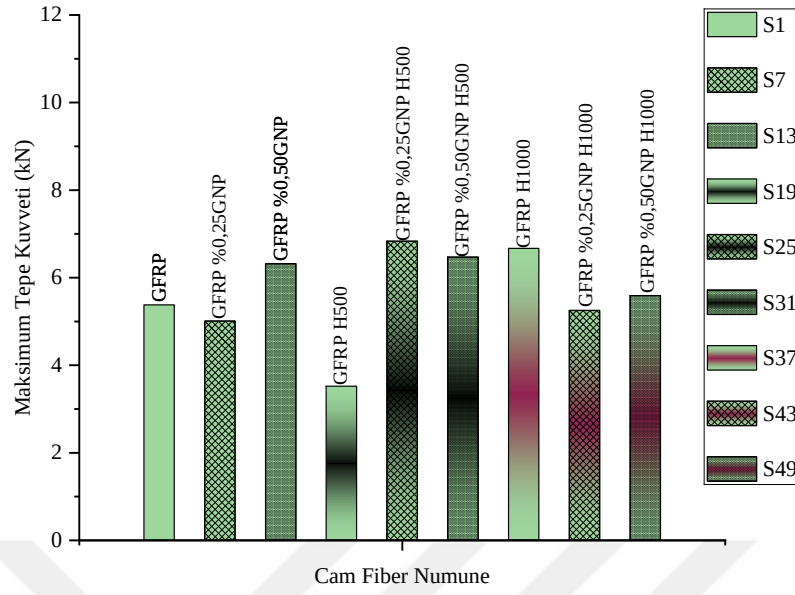


**Şekil 4.60.** 1000 saat yaşlandırılmış %0,50 grafen ilaveli numunelerin spesifik enerji absorpsiyonlarının karşılaştırılması

Şekil 4.60'dan anlaşıldığı gibi spesifik enerji absorpsiyonlarında tıpkı enerji absorpsiyonuna benzer düşüş ve artışlar olmuştur. Hiç yaşlandırılmamış %0,50 grafen ilaveli numune olan S13, S16, S17 ve S18 numunelerinde 1000 saat yaşlandırma ile artışlar gözlemlenirken S14 ve S15 numunelerinde düşüşler yaşanmıştır. Spesifik enerji absorpsiyonun 500 saat yaşlandırma ile kıyaslayacak olursak artış ve düşüşler bazı numuneler de farklılık göstermiştir. Yine Şekil 4.60' da görüldüğü üzere S32 numunesi hariç bütün spesifik enerji absorpsiyonunda yaşlandırmanın 500 saatten 1000 saate çıkarılması olumlu etki yaparak artışa yol açmıştır. Fakat bu değerlerin hepsi grafensiz ve yaşlandırılmamış numuneler ile kıyaslanacak olursa daha düşük değerdedir.

#### 4.2.9. Cam fiberin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları

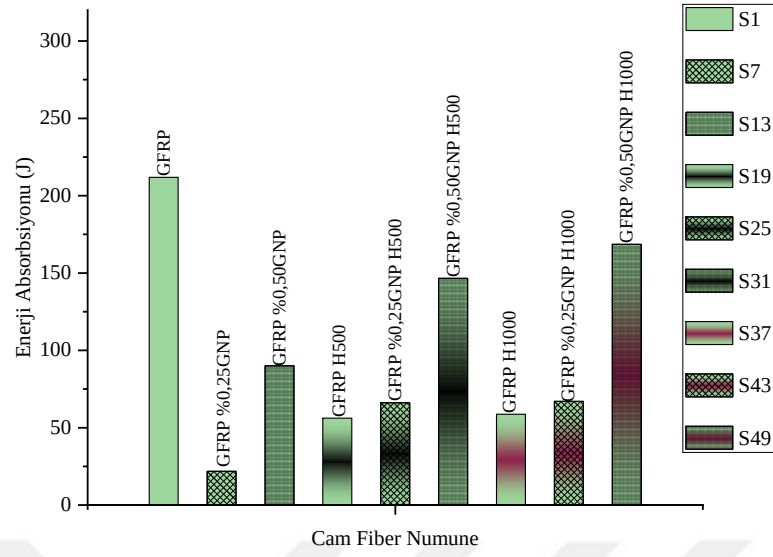
Cam fiber S1 numunesi ana numunelerden olup her numunede uygulanan grafen ilavesi ve yaşlandırma bu numuneye de uygulanmıştır. Bu numunede grafen ilavesi ve yaşlandırma genel olarak değerlerin düşmesine yol açmıştır. Şekil 4.61'de grafen ilavesinin ve yaşlandırmanın S1 numunesinin maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etkiler açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.61.** Cam fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları

Şekil 4.61’de görüldüğü gibi cam fiber numunesi yani S1 maksimum tepe kuvvetinde %0,25 oranında pekiyi bir tepki vermemiştir. Grafen oranının artırılması maksimum tepe kuvvetinde artışa sebebiyet vermiştir. Bu cam fibere biraz gevreklik kazandırdığı yönde bir yorumla açıklanabilir. Hidrotermal yaşlandırma işlemi 500 saat değerini düşürse de 1000 saat yaşlandırma da değer artmıştır. Grafen ilaveli durumda hidrotermal yaşlandırmada da değerler genel olarak artmış sadece %0,50 grafen ilaveli 1000 saat yaşlandırma da az bir şey düşüş görülmüştür. Maksimum kuvvetin en iyi olduğu değer %0,25 grafen ilaveli 500 saat hidrotermal yaşlandırma ile elde edilmiştir. Bu değer 6,83 kN’dur. Bu aynı zamanda grafen ilavesiz numunenin 1000 saat hidrotermal yaşlandırılması ile elde edilen 6,67 kN değerine çok yakındır. En kötü maksimum tepe kuvveti ise grafensiz 500 saat hidrotermal yaşlandırma da 3,52 kN ile elde edilmiştir.

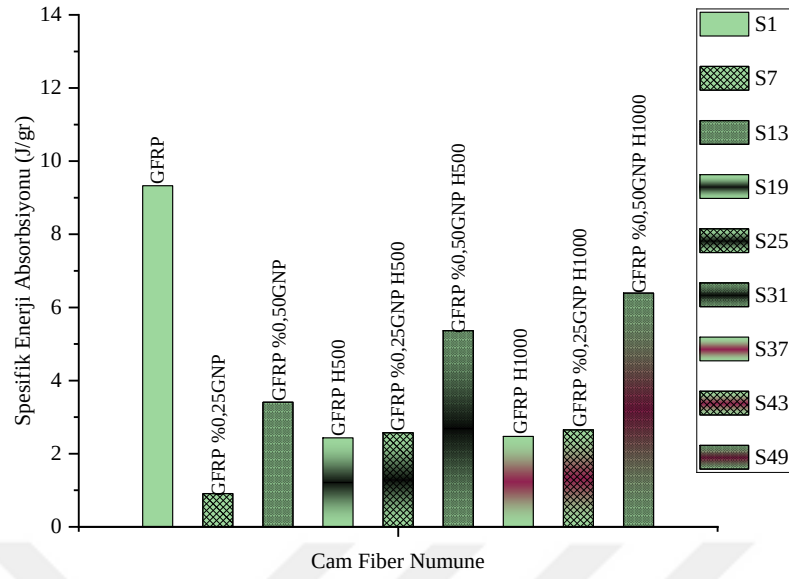
Enerji absorpsiyonunda ise genel olarak bir düşüş yaşanmıştır. Şekil 4.62’de cam fiber numunenin enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 4.62.** Cam fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.62’de anlaşıldığı gibi ne grafen ilavesi ne de hidrotermal yaşlandırma enerji absorpsiyonunu olumlu etkilememiştir. Genel olarak grafen ilave oranının ve hidrotermal yaşlandırmanın artırılması S1 numunesine olumlu etki yaptığı görülmektedir. Fakat bu etki S1 olarak yani grafensiz ve hidrotermal yaşlandırmaya uğratılmamış numuneye göre düşük değerde kalmıştır. En iyi enerji absorpsiyonu S1 ile 211,88 joule ile elde edilmiştir. En kötü sonuç ise grafen ilavesin %0,25 ilavesi yani S7 ile elde edilmiştir. Bu değer 21,78 joule’ dür.

Spesifik enerji absorpsiyonu da enerji absorpsiyonuna genel olarak paralel şekilde bir grafik oluşturmuştur. Şekil 4.63’te cam fiber numunenin spesifik enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

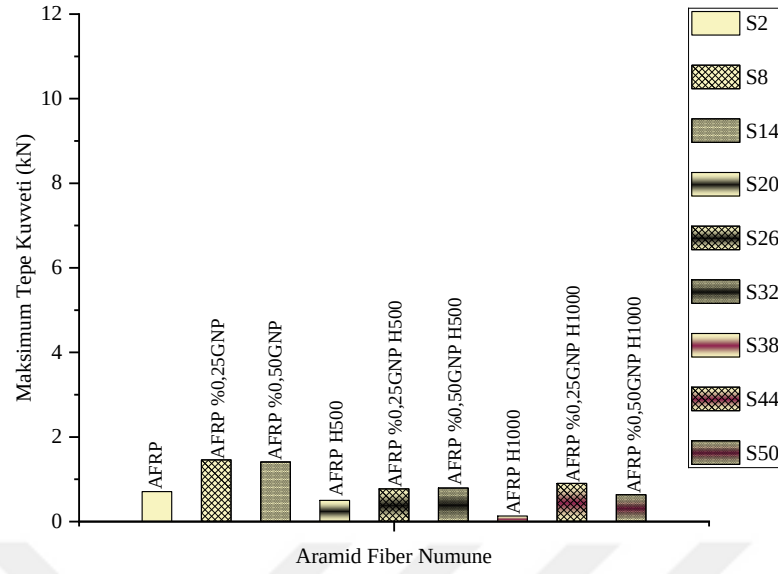


**Şekil 4.63.** Cam fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.63'te görüldüğü üzere spesifik enerji absorpsiyonu da enerji absorpsiyonunda olduğu gibi en iyi sonuç asıl numune olan S1 ile elde edilmiştir. Bu değer 9,33 joule/gram'dır. En kötü değer yine S7 ile elde edilmiş ve lede edilen bu değer 0,91 joule/gram'dır. Yani grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma cam fiber numunesinin spesifik enerji absorpsiyon kötü etkilemiştir.

#### 4.2.10. Aramid fiberin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları

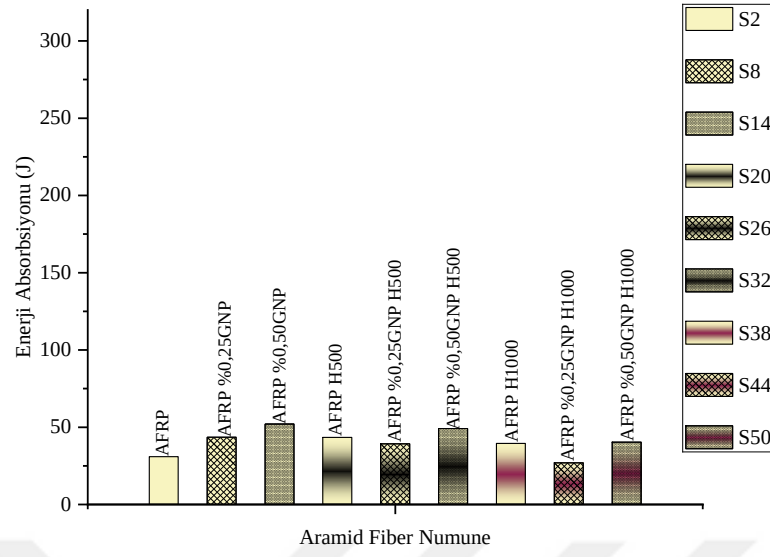
Aramid fiber S2 numunesine grafen ilavesi ve yaşlandırma genel olarak diğer numunelerin aksine maksimum tepe kuvveti, enerji absorpsiyonu ve spesifik enerji absorpsiyonunda pozitif yönde etkilere yol açmıştır. Şekil 4.64'de grafen ilavesinin ve yaşlandırmanın S2 numunesinin maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etkiler açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.64.** Aramid fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları

Şekil 4.64’de görüldüğü üzere aramid fiber numunesi yani S2 maksimum tepe kuvvetinde uygulanan %0,25, %0,50 grafen ilaveleri ve bazı hidrotermal yaşlandırmalar S2’ nin maksimum tepe kuvveti değerlerini artırmıştır. En iyi sonuç S8 numunesi ile elde edilmiştir. Bu değer 1,46 değer kN’dur. En kötü sonuç ise S38 numunesi ile elde edilmiş ve 0,13 kN’dur. Aramid fiber grafen ilavesine balistik uygulamalarında da olumlu etki veren bir fiber türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı zamanda su emme absorpsiyonu iyi olan bir malzeme türüdür.

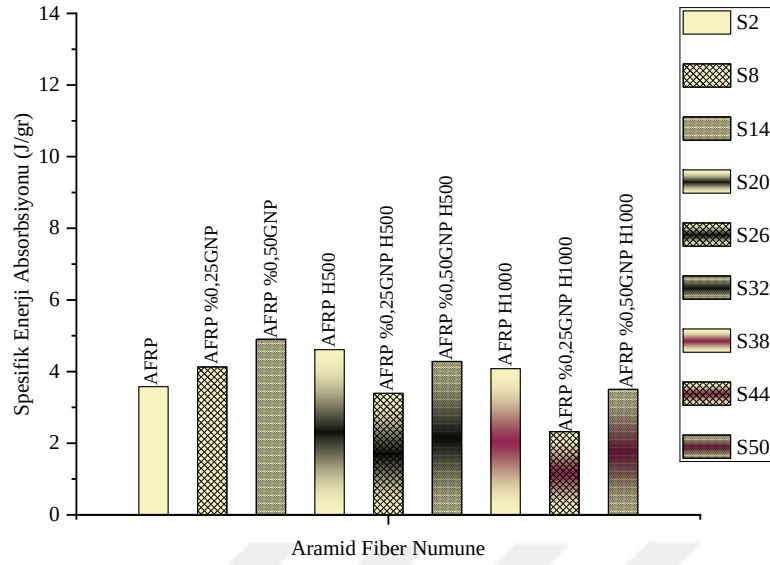
Enerji absorpsiyonunda da genel olarak bir artış söz konusudur. Şekil 4.65’de aramid fiber numunenin enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.65. Aramid fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.65’de görüldüğü üzere tıpkı maksimum tepe kuvvetinde olduğu gibi enerji absorpsiyonları da grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırmadan genel olarak olumlu yönde etkilenecek artış göstermiştir. Sadece %0,25 grafen ilaveli ve 1000 saat hidrotermal yaşlandırılmalı numunede yani S44’te 4,15 joule gibi bir düşüş oluşmuştur. En iyi sonuç S14 numunesinde 52,07 joule ile elde edilmiştir. Grafen ilavesinin artırılması kendini göstermiştir. En kötü sonuç ise S44 numunesinde 26,84 joule ile elde edilmiştir. Bu değer S1 numunesinden çok uzak bir değer değildir.

Spesifik enerji absorpsiyonu da enerji absorpsiyonuna genel olarak paralel şekilde bir grafik oluşturmuştur. Şekil 4.66’da aramid fiber numunenin spesifik enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

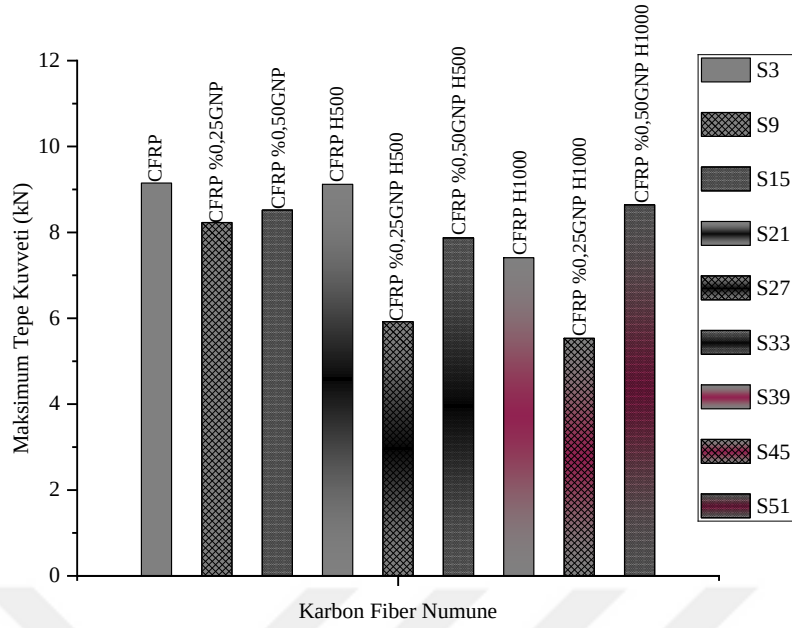


**Şekil 4.66.** Aramid fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.66'da görüldüğü üzere spesifik enerji absorpsiyonu da enerji absorpsiyonunda olduğu gibi en iyi sonuç S14 ile elde edilmiştir. Bu değer 4,9 joule/gram'dır. En kötü değer yine S44 ile elde edilmiş ve lede edilen bu değer 2,32 joule/gram'dır. Bu en kötü değer bile cam fiber numunenin en kötü değerinden yine yüksek bir değerdir.

#### 4.2.11. Karbon fiberin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları

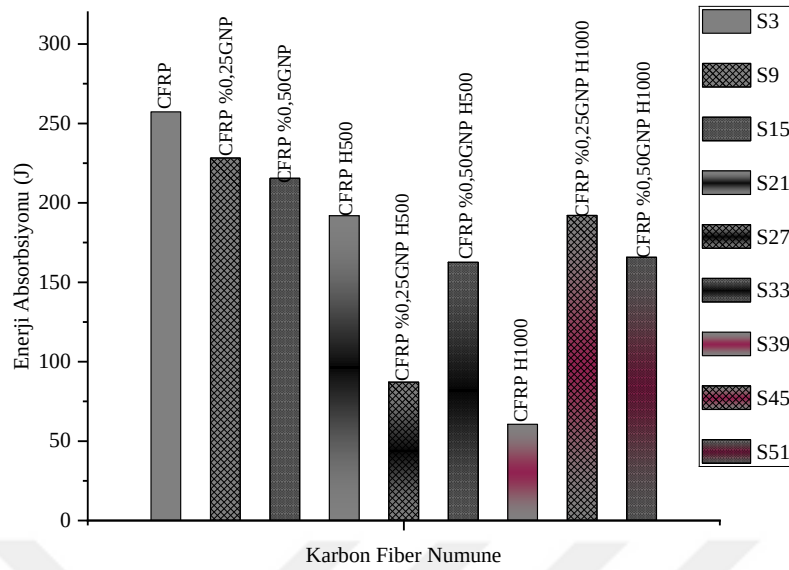
Karbon fiber S3 numunesine grafen ilavesi ve yaşlandırma genel olarak pek olumlu etki yaptığından bahsedilemez. Şekil 4.67'de grafen ilavesinin ve yaşlandırmanın S3 numunesinin maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etkiler açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.67.** Karbon fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları

Şekil 4.67’de görüldüğü karbon fiber numunesinde maksimum tepe kuvvetinde ne grafen ilavesinin ne de hidrotermal yaşlandırmanın çok fazla bir etki yaptığı söylenemez. Bütün sonuçlar asıl numune olan S3’ ten daha düşüktür. Ona en yakın sonuç 500 saat yaşlandırılmış numune olan S21’dir. En iyi sonuç 9,15 kN ile S3 numunesi olurken en kötü sonuç 5,53 kN ile S45 yani %0,25 grafen ilaveli 1000 saat yaşlandırılmış numune olmuştur. Karbon kendi allotropu olan grafen ile iyi bir uyum sağlayamamıştır. Aynı zamanda hidrotermal yaşlandırmanın etkilerini de fazla yaşayan numunelerden biridir.

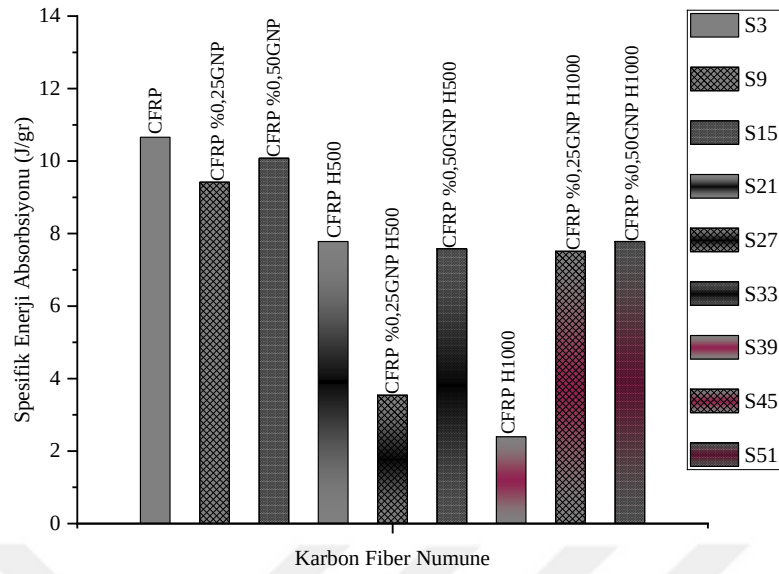
Karbon fiber numunenin grafen ile olan uyumsuzluğunu en iyi örnekleyen parametrelerden biri de enerji absorpsiyonunda ki düşüşlerdir. Enerji absorpsiyonunda da genel olarak bir düşüş söz konusudur. Şekil 4.68’de karbon fiber numunenin enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.68. Karbon fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.68’de görüldüğü üzere tıpkı maksimum tepe kuvvetinde olduğu gibi enerji absorpsiyonları da grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırmadan genel olarak olumlu yönde etkilendiği söylenemez. Hatta enerji absorpsiyonunda ki düşüşler daha net bir şekilde görülmektedir. En yüksek değer asıl numune olan yani grafensiz ve hidrotermal yaşlandırılmamış S3 ile 257,28 joule olmuştur. En düşük değer ise karbonun 1000 saat yaşlandırılması ile yani S39 ile elde edilmiş ve 60,57 joule olmuştur. Karbon fiber genel olarak yaşlandırma işleminden kötü etkilenmiştir. Maksimum tepe kuvveti ile farklılık olması bazen grafen ilavesi ile kazanılan gevreklik enerji absorpsiyonunda etkili olmamaktadır.

Spesifik enerji absorpsiyonu bu numune de enerji absorpsiyonuna genel olarak paralel şekilde bir grafik oluşturmuştur. Şekil 4.69’da karbon fiber numunenin spesifik enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

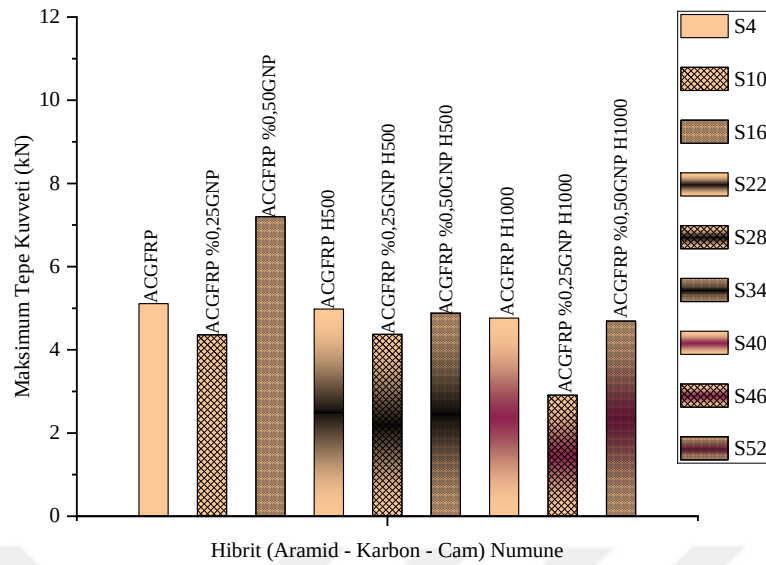


**Şekil 4.69.** Karbon fiber numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.69’da görüldüğü üzere spesifik enerji absorpsiyonunun en iyi sonucu da enerji absorpsiyonunda olduğu gibi asıl numune olan S3 ile elde edilmiştir. Bu değer 10,66 joule/gram’dır. En kötü değer yine S39 ile elde edilmiş ve elde edilen bu değer 2,39 joule/gram’dır. Bu değer neredeyse aramid fiber numunenin en kötü spesifik enerji absorpsiyon değerine eş bir değerdir. Karbon fiber için grafen ilavesiz ve hidrotermal yaşlandırılmamış numune en iyi numune olduğunu gözlemlemiş olduk.

#### 4.2.12. Hibrit S4 (aramid – karbon – cam) numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları

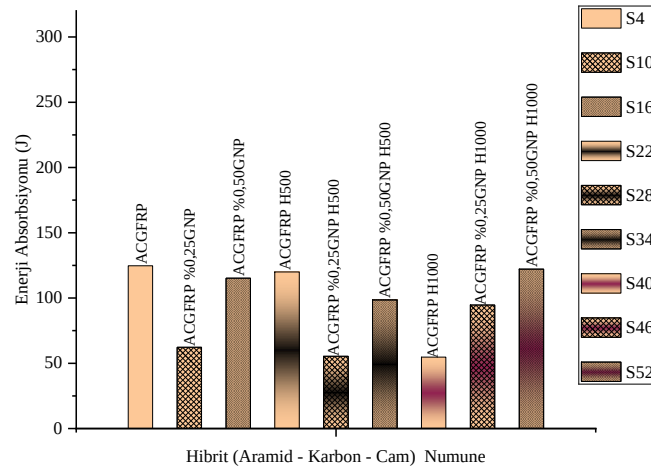
Hibrit S4 numunesine grafen ilavesi ve yaşlandırma genel düşüşler ve artışlar ile cevap vermiştir. Şekil 4.70’te grafen ilavesinin ve yaşlandırmanın S4 numunesinin maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etkiler açıkça görülmektedir



**Şekil 4.70.** Hibrit S4 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları

Şekil 4.70’de görüldüğü üzere S4 numunesinde maksimum tepe kuvvetinde grafen ilavesinin artırılması olumlu etkilere yol açmıştır. En iyi maksimum tepe kuvveti %0,50 grafen ilaveli yaşlandırılmamış numune olan S16 ile elde edilmiştir. Bu değer 7,2 kN’dur. Bu numune en içten dışa aramid, karbon ve cam olacak şekilde sarılmıştır. Deney sırasında numunelerin iç kısımdan açılmaya başlayarak tepki vermesi en içte sarılı olan fiberi önemli kılmaktadır. Aramid fiberin grafen ile uyum sağladığını sonuçlarda görmüştük. S4 numunesinde en kötü sonuç S46 numunesi ile 2,91 kN olarak elde edilmiştir. Bu grafen oranı %0,25 olan ve 1000 saat hidrotermal yaşlandırılmış numunedir.

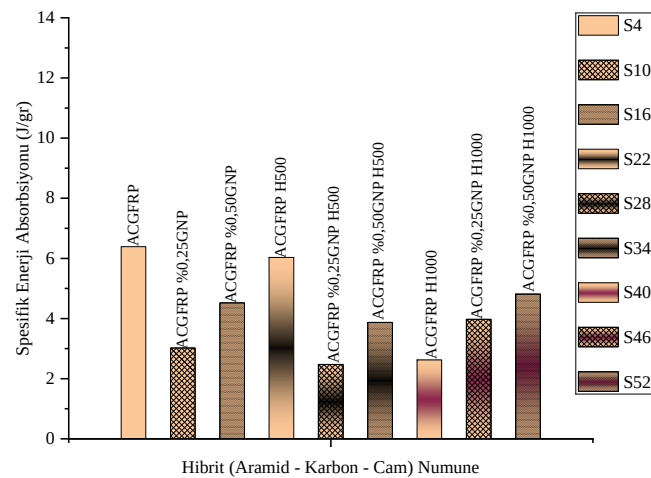
S4 numunesinin enerji absorpsiyonunda ise maksimum tepe kuvvetinden farklı değişiklikler göstermiştir. Şekil 4.71’de S4 numunesinin enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 4.71.** Hibrit S4 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.71’de görüldüğü üzere maksimum tepe kuvvetindekiden farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır. Maksimum tepe kuvvetini etkileyen etkenler enerji absorpsiyonunda farklılaşmıştır. En iyi sonuç asıl numune olan S4 ile elde edilirken bu değer 124,69 joule olmuştur. En kötü sonuç ise grafen ilavesiz ve 1000 saat yaşlandırılmış numune olan S40 ile elde edilmiştir. Bu değer 54,62 joule’dür. Aramid fiberin içte olması ve grafen veya yaşlandırmaya verdiği olumlu tepkiler diğer fiberlerden gelen kayıpları karşılamaya yetmemiştir.

Spesifik enerji absorpsiyonu da enerji absorpsiyonuna paralel olsa da değişiklikler olmuştur. Şekil 4.72’de S4 numunesinin spesifik enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

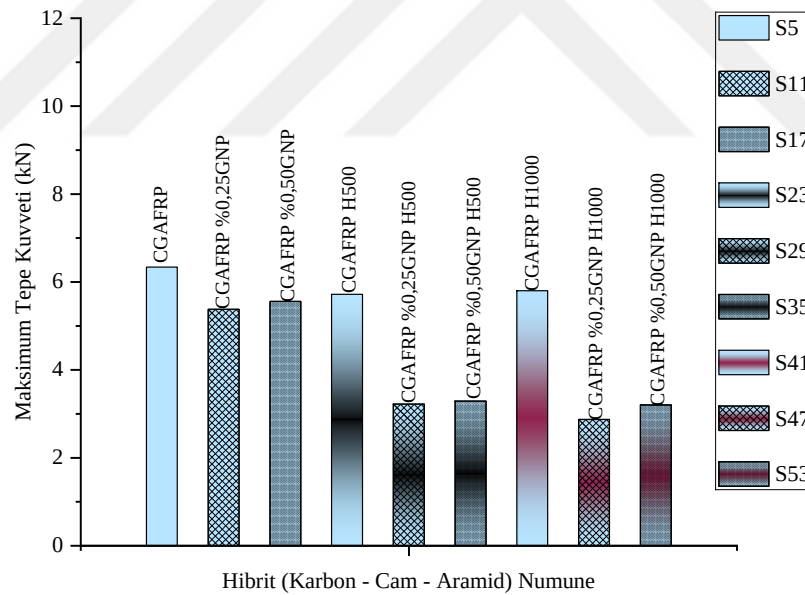


**Şekil 4.72.** Hibrit S4 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.72’de görüldüğü üzere spesifik enerji absorpsiyonunun en iyi sonucu da enerji absorpsiyonunda olduğu gibi asıl numune olan S4 ile elde edilmiştir. Bu değer 6,39 joule/gram’dır. En kötü değer ise değişiklik göstermiş S28 ile elde edilmiş ve elde edilen bu değer 2,47 joule/gram’dır. Yani grafen ilavesi veya hidrotermal yaşlandırma olumlu yönde katkı sağlamamıştır.

#### 4.2.13. Hibrit S5 (karbon – cam - aramid) numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları

Hibrit S5 numunesi de grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırmaya genel olarak düşüler ile tepki vermiştir. Bu numunede en iç kısımda karbon fiber bulunması bu numunenin temel karakteristik özelliklerini etkilemiştir. Şekil 4.73’te grafen ilavesinin ve yaşlandırmanın S5 numunesinin maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etkiler açıkça görülmektedir.

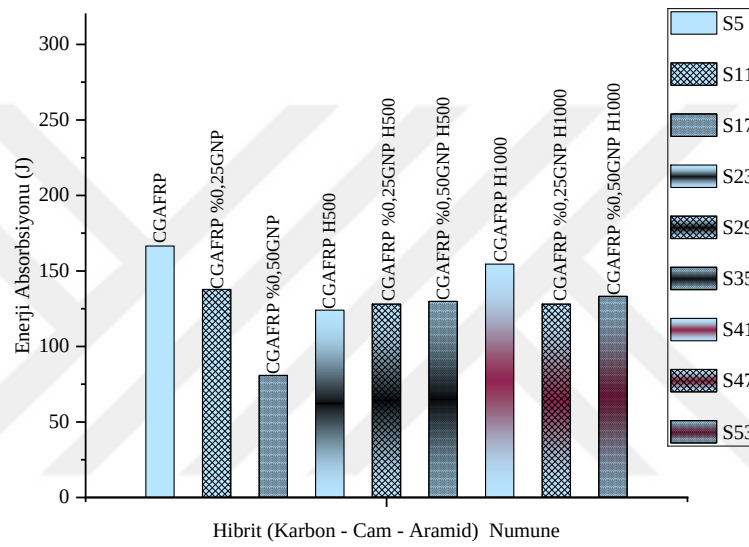


Şekil 4.73. Hibrit S5 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları

Şekil 4.73’te görüldüğü üzere S5 numunesinde maksimum tepe kuvvetinde grafen ilavesinin artırılması olumsuz etkilere yol açmıştır. En iç kısımda karbonun bulunması ve karbonunda genel olarak hidrotermal yaşlandırma ve grafen ilavesi ile düşüşler yaşaması bu numunede de kendini göstermiştir. En iyi maksimum tepe kuvveti grafen ilavesiz ve hidrotermal yaşlandırılmamış numune yani S5 ile elde edilmiştir. Elde edilen değer 6,34

kN' dur. En kötü sonuç ise %0,25 grafen ilaveli 500 saat yaşlandırılmış S47 numunesi 2,87 kN olarak elde edilmiştir. Aslında diğer grafen ilaveli yaşlandırılmış numune sonuçları da bu sonuca pekte uzak değildir.

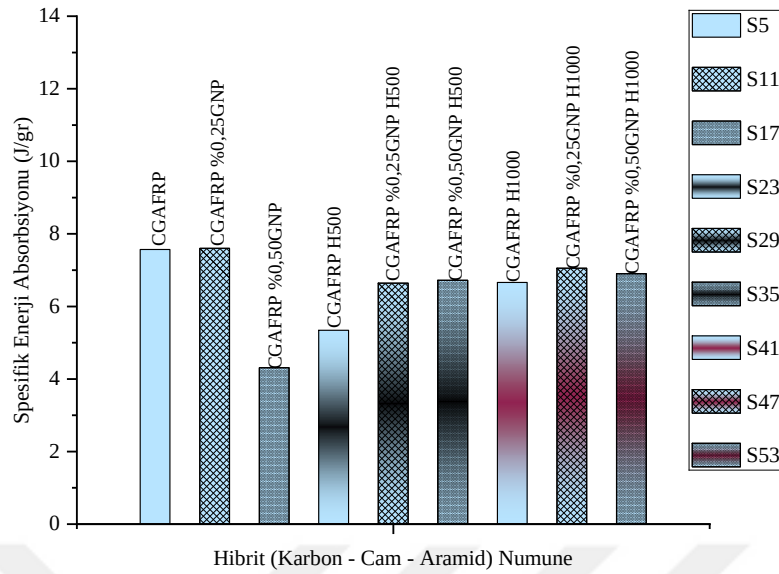
S5 numunesinin enerji absorpsiyonunda da grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma etkisini göstermiş ve sonuçlarda dalgalanmalar yaşanmıştır. Şekil 4.74'de S5 numunesinin enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.74. Hibrit S4 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.74'de görüldüğü üzere grafen ilavesinin %0,25'ten %0,50'ye çıkarılması numunenin enerji absorpsiyonunda kötü etki yapmıştır. Daha sonra yapılan hidrotermal yaşlandırmalar biraz toparlamış olsa da asıl numuneye yani S5' in değerine hiçbir numune ulaşamamıştır. 166,55 joule ile en iyi sonuç S5 numunesinde elde edilmiştir. En kötü sonuç ise %0,50 grafen ilaveli S17 numunesi ile elde edilmiştir ve tam olarak 80,8 joule'dür.

Spesifik enerji absorpsiyonunda enerji absorpsiyonuna göre az da olsa değişiklikler yaşanmıştır. Şekil 4.75'de S5 numunesinin spesifik enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

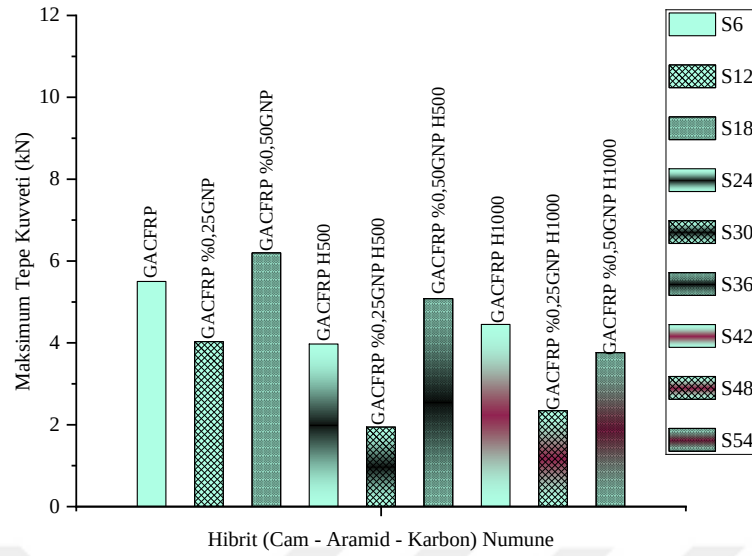


**Şekil 4.75.** Hibrit S5 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.75’de görüldüğü üzere spesifik enerji absorpsiyonunun en iyi sonucu enerji absorpsiyonunda olduğu gibi S5 değildir. En iyi sonuç %0,25 grafen ilavesi ile yani S11 ile elde edilmiştir. Bu değer 6,39 joule/gram’dır. Bu sonuç S5’ in sonucundan 0,03 joule/gram fazladır. En kötü değer ise değişiklik göstermemiştir. S17 ile elde edilmiş ve elde edilen bu değer 4,31 joule/gram’dır. Genel olarak grafen ilavesi veya hidrotermal yaşlandırma olumlu yönde katkı sağlamamıştır.

#### 4.2.14. Hibrit S6 (cam – aramid - karbon) numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile değişim oranları

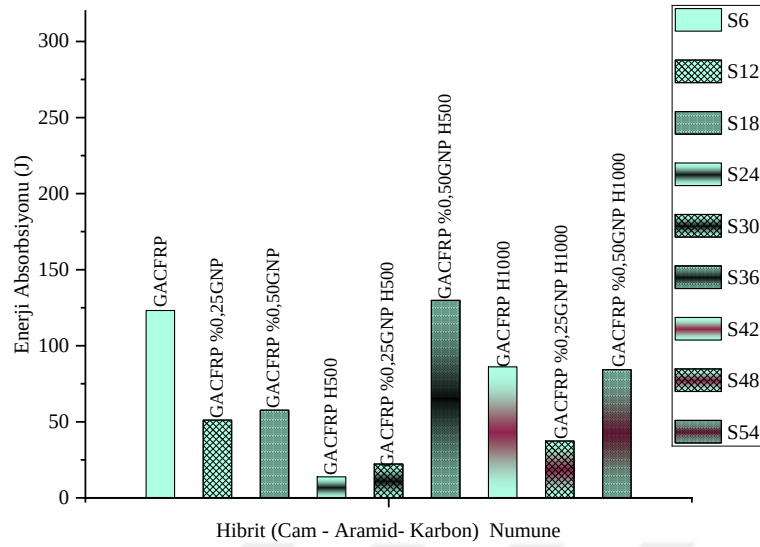
Hibrit S6 numunesi de grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırmaya maksimum tepe kuvvetinde olumlu tepki vermiştir. Bu numunede en iç kısımda cam fiber bulunmaktadır. Cam fiber yani S1 numunesi bu numuneye benzer sonuçlar vermiştir. Şekil 4.76’da grafen ilavesinin ve yaşlandırmanın S6 numunesinin maksimum tepe kuvveti üzerinde yaptığı etkiler açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.76.** Hibrit S6 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile maksimum tepe kuvvetindeki değişim oranları

Şekil 4.76’da görüldüğü üzere S6 numunesinde maksimum tepe kuvvetinde grafen ilavesini %0,25’ten %0,50’ye çıkarılması belirgin bir şekilde artışa sebep olmuştur. Hidrotermal yaşlandırma ise genel olarak düşüşlere yol açmıştır. En iyi sonuç %0,50 grafen ilaveli numune ile yani S18 numunesinde ulaşılmış olup bu değer 6,20 kN’dur. En kötü sonucu ise S30 ile elde edilmiştir. Elde edilen değer 1,94 kN’dur.

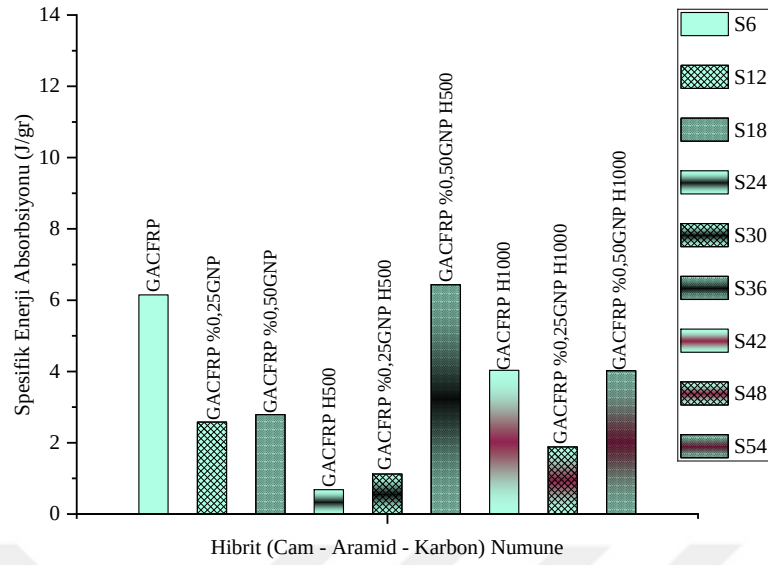
S6 numunesinin enerji absorpsiyonunda grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma sonuçları maksimum tepe kuvvetinden daha farklı etkilere sahip olmuştur. Şekil 4.77’de S6 numunesinin enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 4.77.** Hibrit S6 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.77’de görüldüğü üzere grafen ilavesinin %0,25’ten %0,50’ye çıkarılması ve 500 saat yaşlandırma numunenin enerji absorpsiyonunda olumlu bir etki yapmıştır. Grafen ilavesi ile kazanılan gevreklik hidrotermal yaşlandırma ile esnekliği beraberinde getirmiş ve iyi bir sonuç ortaya çıkarmıştır. Hidrotermal yaşlandırma süresinin artırılması ise tekrardan kötü etkilemiştir. En iyi enerji absorpsiyon değeri 129,73 joule ile S36’da elde edilmiştir. En kötü değer ise S24 ile 13,8 joule olarak elde edilmiştir. %0,25 grafen ilaveli 500 saat yaşlandırılmış numune olan S30’ da S24’e uzak bir sonuç elde etmemiştir.

Spesifik enerji absorpsiyonunda enerji absorpsiyonuna benzer bir şekilde etkileşimler olmuştur. Şekil 4.78’de S6 numunesinin spesifik enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

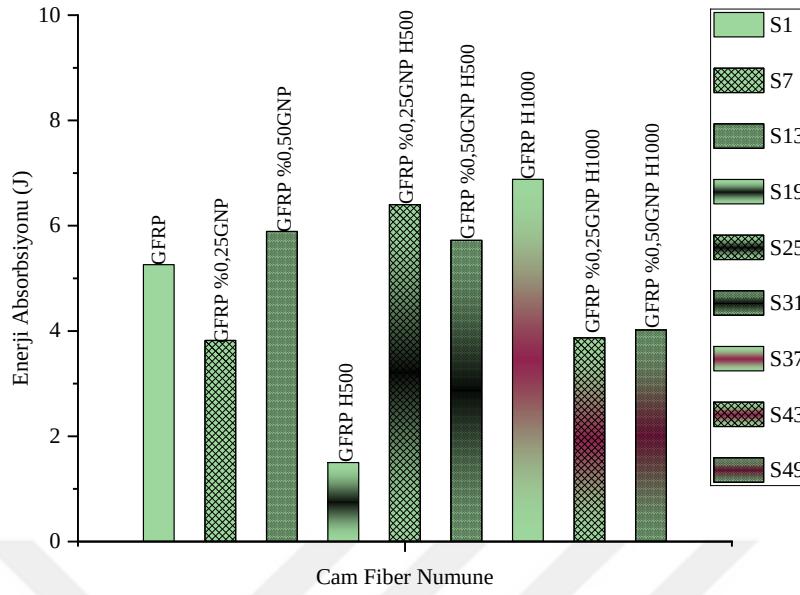


**Şekil 4.78.** Hibrit S6 numunesinin grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.78’de görüldüğü üzere spesifik enerji absorpsiyonunun en iyi sonucu enerji absorpsiyonunda olduğu gibi S36 numunesi ile elde edilmiştir. Bu değer 6,43 joule/gram’dır. En kötü değer ise değişiklik göstermemiştir. S24 ile elde edilmiş ve elde edilen bu değer 0,68 joule/gram’dır. Bu sonuç bütün numuneler arasında elde edilen en kötü sonuçtur.

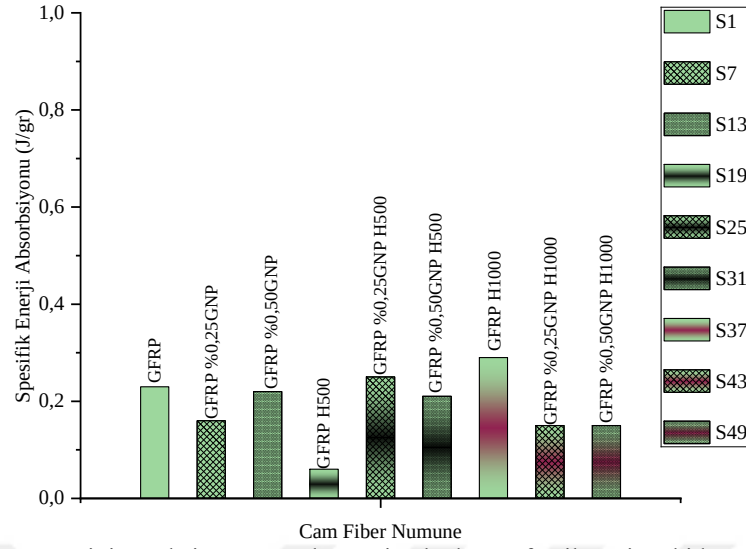
#### 4.2.15. Maksimum tepe kuvvetine kadar numunelerin enerji absorpsiyonlarının ve spesifik enerji absorpsiyonları

Numunelerin yarı statik basma sırasında kırıldığı nokta genel olarak enerji absorpsiyonunu etkilemiştir. Be etkileşim bazen iyi yönde etki ederken bazen de negatif etki bırakmıştır. Bu da doğal olarak spesifik enerji absorpsiyonunu da etkilemektedir. Bu sebepten numunelerin maksimum tepe kuvvetine kadar olan enerji absorpsiyonları ve spesifik enerji absorpsiyonu değerlerini karşılaştırılması gereği doğmuştur. Şekil 4.79’da S1 numunesinin yani cam fiberin maksimum tepe kuvvetine kadar enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 4.79.** S1 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

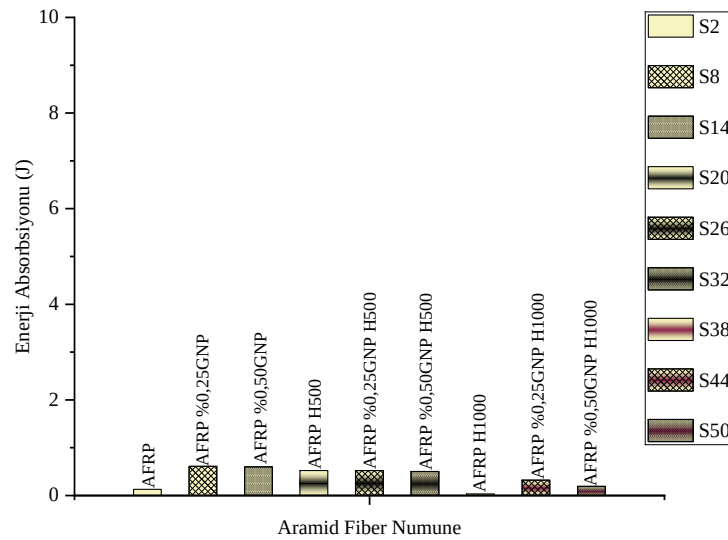
Şekil 4.79’da görüldüğü üzere maksimum tepe kuvvetine kadar cam fiber numunesinin enerji absorpsiyon değeri en yüksek olan 1000 saat olarak yaşlandırılmış numune ile yani S37 ile elde edilmiştir. Bu değer 6,88 joule’dür. En kötü sonuç ise 500 saat yaşlandırılmış grafen ilavesiz S19 numunesi ile elde edilmiş olup 1,5 joule’ dür. 50 mm’ye kadar uygulanan yarı statik basma sırasında en iyi numune grafen ilavesiz ve yaşlandırılmamış numune olarak öne çıkarken en kötü numune ise %0,25 grafen ilaveli numune yani S7 olmuştur. Spesifik enerji absorpsiyonunda da enerji absorpsiyonunda olduğu gibi en iyi sonuç 1000 saat yaşlandırılmış grafen ilavesiz numune olan S37 ile elde edilirken en kötü sonuç grafen ilavesiz 500 saat yaşlandırılmış numune olan S19 ile elde edilmiştir (Şekil 4.80). Bu değerler sırasıyla 0,29 joule/gram ve 0,06 joule/gram’dır.



**Şekil 4.80.** S1 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

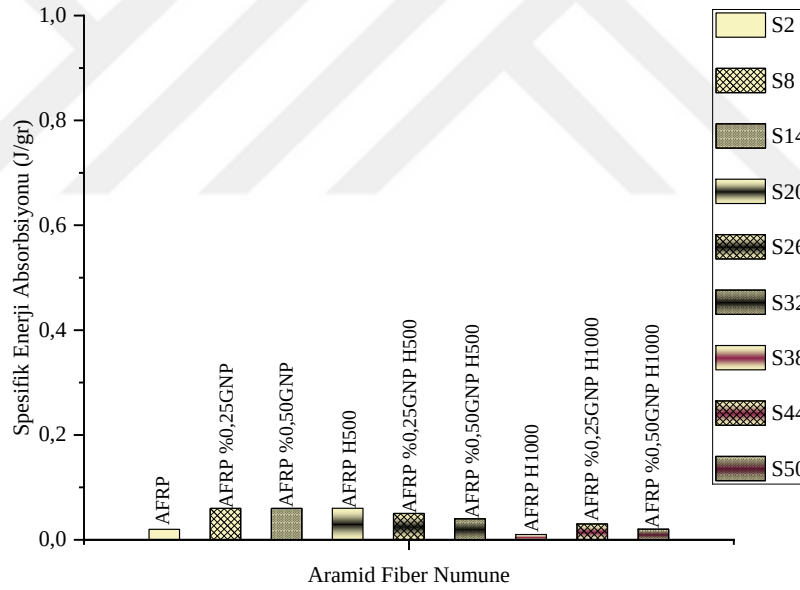
Şekil 4.80’de görüldüğü üzere spesifik enerji absorpsiyonlarında ki iniş ve çıkışlar enerji absorpsiyonunun benzeridir. Normal olarak yapılan yarı statik basma testinde yani 50 mm’ye kadar uygulanan deneyde en iyi sonuç S1 ile elde edilirken en kötü yine S7 yani %0,25 grafen ilavesinde elde edilmişti.

Şekil 4.81’de ise S1 numunesinin yani aramid fiberin maksimum tepe kuvvetine kadar enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 4.81.** S2 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.81’de görüldüğü üzere maksimum tepe kuvvetine kadar aramid fiber numunesinin enerji absorpsiyon değeri en yüksek olan numune %0,25 grafen ilaveli olan numune S8 olsa da S14 yani %0,50 grafen ilaveli numune de çok yakın bir değerdir. Bu değerler sırasıyla 0,61 ve 0,60 joule’dür. En kötü sonuç ise 1000 saat yaşlandırılmış grafen ilavesiz numune olan S38 ile elde edilmiş olup bu değer 0,03 joule’ dür. 50 mm’ya kadar yapılan yarı statik basma testinde en iyi sonuç S14 numunesi yani %0,50 grafen ilaveli numune ile edilirken, en kötü sonuç S44 numunesi ile yani %0,25 grafen ilavesi ve 1000 saat yaşlandırılmış numune ile elde edilmiştir. Spesifik enerji absorpsiyonları da enerji absorpsiyonunda olduğu gibi en iyi numune S8 ve S14 olurken değerleri aynı olup 0,06 Joule/gram’dır. En kötü sonuç ise S38 numunesinde olup bu değer yaklaşık 0,001 Joule/gram’dır. Şekil 4.82’de aramid fiberin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları verilmiştir.

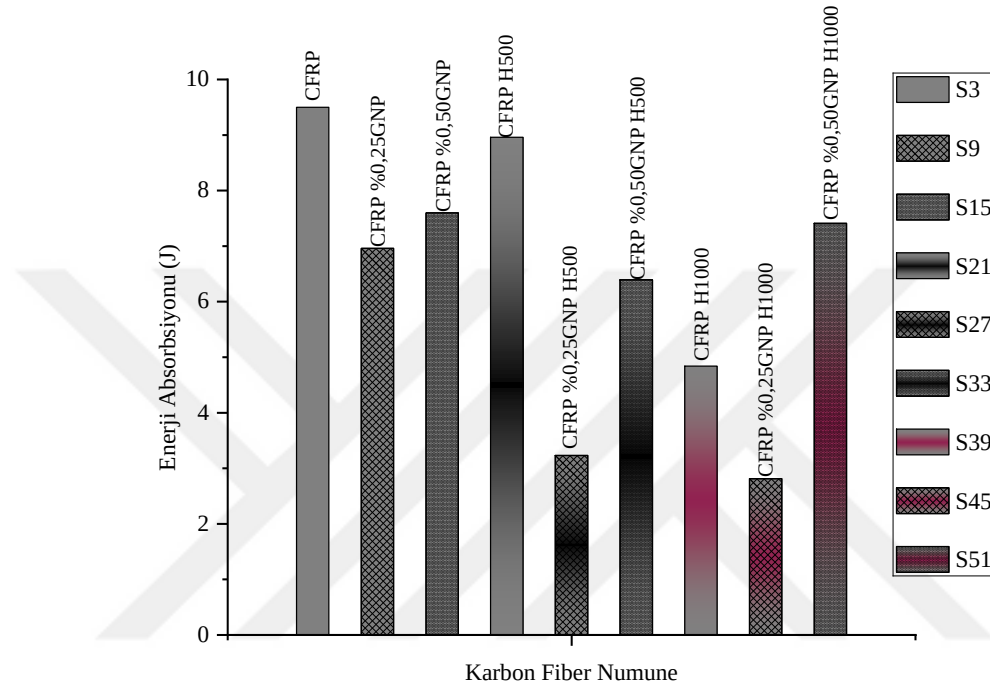


Şekil 4.82. S2 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.82’de görüldüğü gibi en kötü en iyi sonuç asıl deneye kıyaslayacak olursak kısmen benzerlik göstermemektedir. Asıl uygulanan deneyde en iyi sonuç %0,50 grafen ilavesinde yani S14 iken en kötü sonuç %0,25 grafen ilaveli 1000 saat yaşlandırılmış numune olan S44 ile elde edilmiştir.

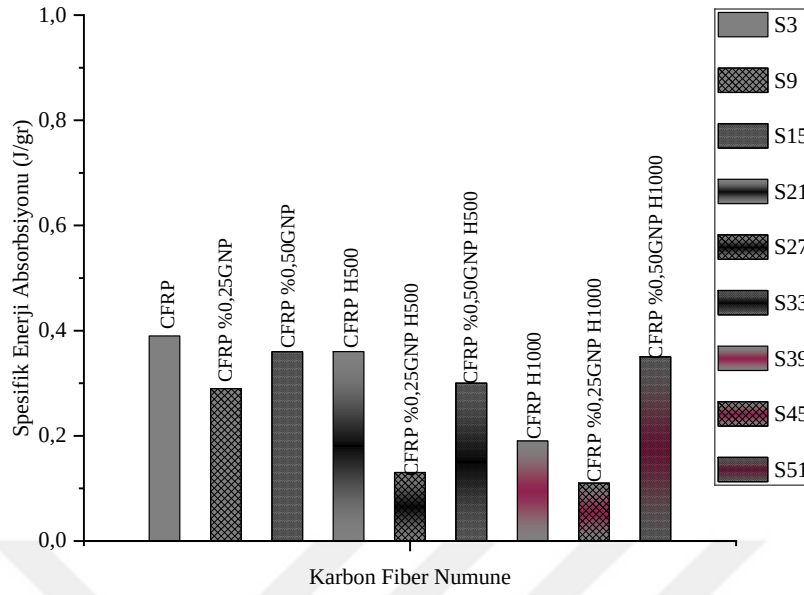
Grafen ilavesi aramid fiberi iyi yönde etkilediği maksimum tepe kuvvetine kadar olan kısımda hesaplanan enerji absorpsiyonu ve spesifik enerji absorpsiyonunda da kendini göstermiştir.

Şekil 4.83’de ise karbon fiber numunesi yani S3’ün maksimum tepe kuvvetine kadar enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 4.83.** S3 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.83’de anlaşıldığı gibi enerji absorpsiyon değeri en iyi olan numune yaşlandırılmamış ve grafen ilave edilmemiş numune olan S3 numunesidir. Elde edilen değer 9,5 joule’dür. 50 mm’ ye kadar uygulanan yarı statik basma deneyinde de yine en iyi sonuç S3 ile elde edilmişti. Maksimum tepe kuvvetine kadar olan kısımda en kötü sonuç %0,25 grafen ilaveli numune olan S45 ile 2,81 joule elde edilirken 50 mm’ye kadar uygulanan deneyde en kötü sonuç grafen ilavesiz ve 1000 saat yaşlandırılmış numune olan S39 ile elde edilmişti. Spesifik enerji absorpsiyonunda da hemen hemen enerji absorpsiyonuna paralel sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.84’de karbon fiberin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları verilmiştir.

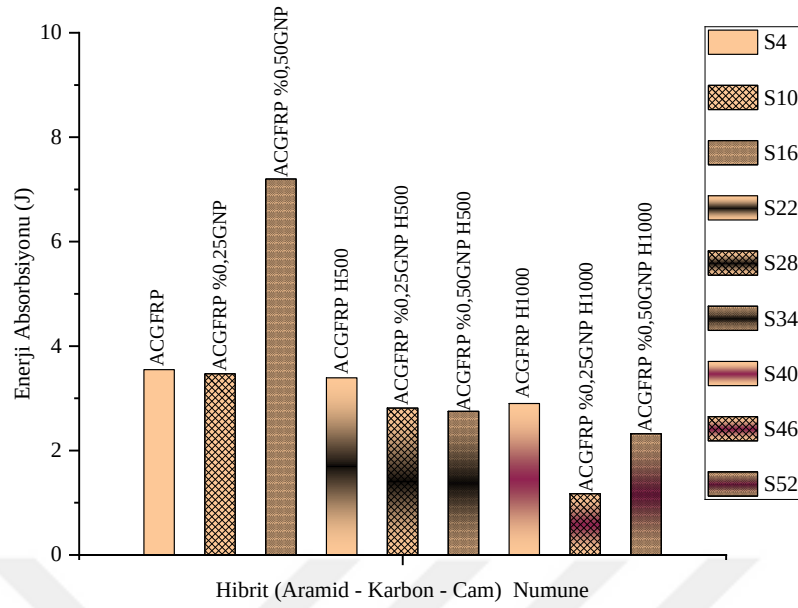


**Şekil 4.84.** S3 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.84’de görüldüğü gibi en iyi sonuç 0,23 joule/gram ile S3’de olurken en kötü sonuç 0,11 joule/gram ile S45 numunesi yani %0,25 grafen ilaveli ve 1000 saat yaşlandırılmış numune ile elde edilmiştir. 50 mm’ye kadar uygulanan yarı statik basma deneyinde ise en iyi sonuç veren numune aynı olurken en kötü sonuç S39 numunesi ile yani grafen ilavesiz 1000 saat yaşlandırılmış numune ile elde edilmişti.

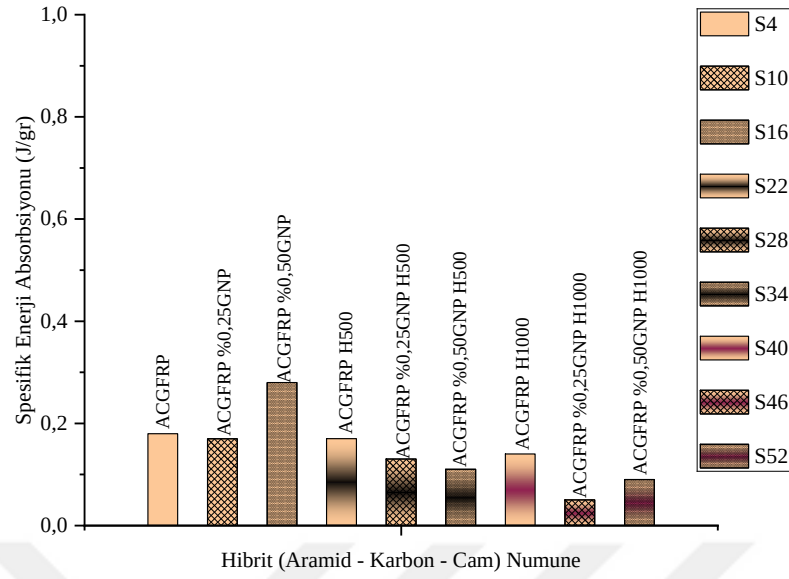
Karbon genel olarak grafen ilavesi ve yaşlandırmadan kötü etkilendiğini maksimum tepe kuvvetine kadar hesaplanan enerji absorpsiyonu ve spesifik enerji absorpsiyonunda da belli etmiştir.

Şekil 4.85’de hibrit numunelerden olan S4 yani içten dışa sarım sırası aramid-karbon-cam fiberin maksimum tepe kuvvetine kadar enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 4.85.** S4 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

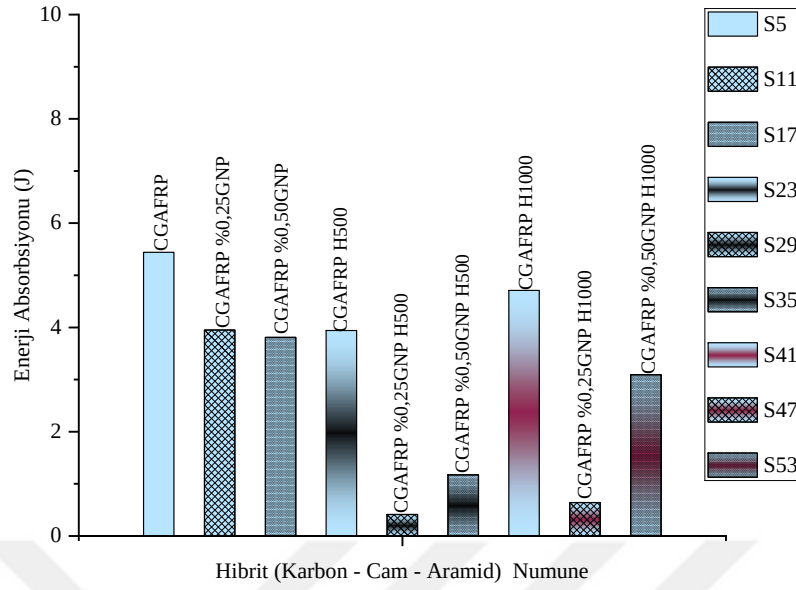
Şekil 4.85’de görüldüğü üzere maksimum tepe kuvvetine kadar hesaplanan enerji absorpsiyonunda elde edilen en iyi sonuç %0,50 grafen ilaveli S16 numunesidir. Elde edilen değer 7,2 joule’dür. Bu değer neredeyse karbon fibere yakın bir değerdir. En kötü sonuç ise %0,25 grafen ilaveli ve 1000 saat yaşlandırılmış numune olan S46 ile elde edilmiş olup bu değer 1,17 joule’dür. 50 mm’ ye kadar uygulanan deneyde en iyi sonuç S4 numunesi ile elde edilirken en kötü sonuç 1000 saat yaşlandırılmış numune olan S40 ile elde edilmişti. Deney sırasında numuneler iç kısımda soyulamaya başladığından dolayı hibrit numuneler için iç kısımda bulunan numune genel olarak o numunenin karakteristiğini belirlemeye yardımcı olmaktadır. Aramid fiberin grafen ile olan uyumu tekil numunede de kendini göstermişti. Spesifik enerji absorpsiyonunda da pek bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Şekil 4.86’da S4’ün maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları verilmiştir.



**Şekil 4.86.** S4 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

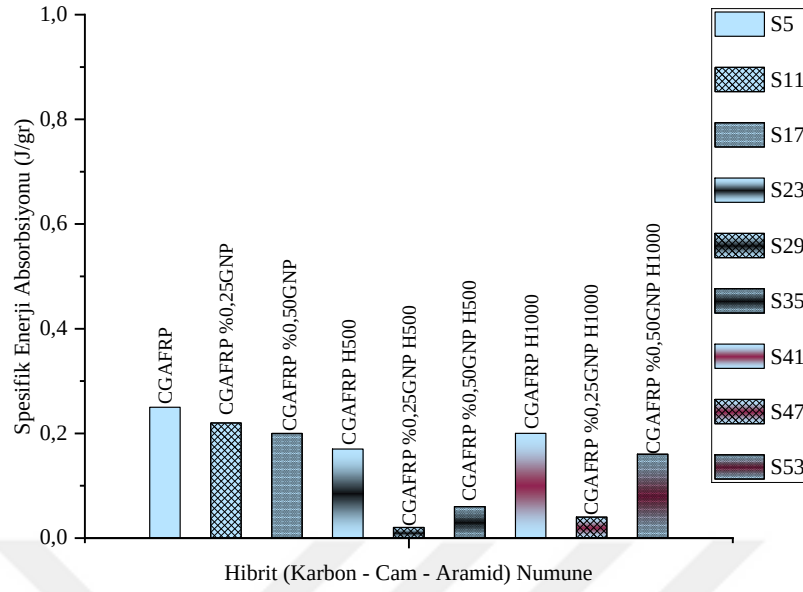
Şekil 4.86’da görüldüğü gibi en iyi sonuç 0,28 joule/gram ile S16’da olurken en kötü sonuç %0,25 grafen ilaveli 1000 saat yaşlandırılmış numune S46 ile 0,11 joule/gram ile elde edilmiştir. 50 mm’ye kadar uygulanan yarı statik basma deneyinde ise en iyi sonuç veren numune S4 olurken en kötü sonuç S28 numunesi ile yani %0,25 grafen ilaveli 500 saat yaşlandırılmış numune ile elde edilmişti.

Şekil 4.87’de ise hibrit numunelerden olan S5 yani içten dışa sarım sırası karbon-cam-aramid fiberin maksimum tepe kuvvetine kadar enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 4.87.** S5 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

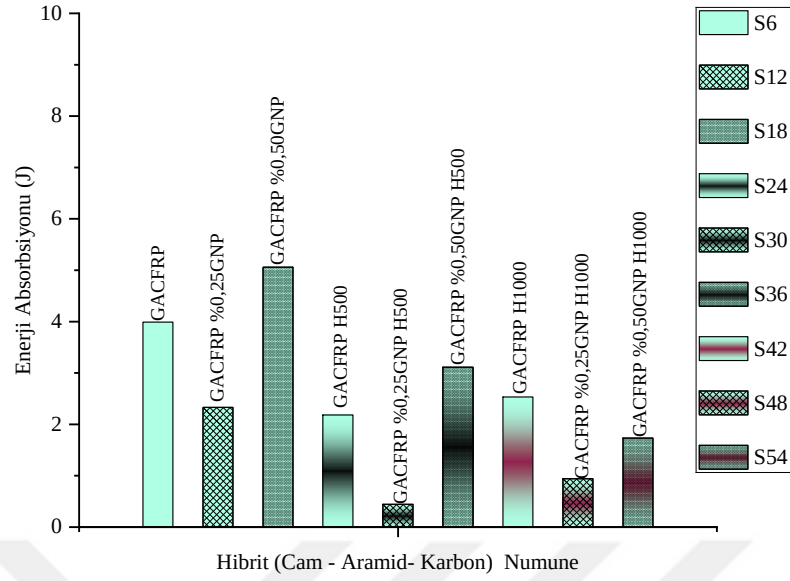
Şekil 4.87’de görüldüğü üzere maksimum tepe kuvvetine kadar olan enerji absorpsiyon değerinde tıpkı karbon fiberin yani S3 numunesinde olduğu gibi asıl numune olan S5 numunesi ile elde edilmiştir. Elde edilen değer 5,44 joule’dür. En kötü sonuç ise %0,25 grafen ilaveli ve 500 saat yaşlandırılmış numune olan S29 ile edilmiş olup bu değer 0,41 joule gibi çok düşük bir değerdir. 50 mm’ ye kadar hesaplan değerlerde en iyi değeri veren numune değişmezken en kötü sonucu veren numune %0,50 grafen ilaveli numune olan S17 olmuştur. Aslında orda ki değerler birbirlerinden pekte uzak değerler değildir. Spesifik enerji absorpsiyonu da sonuçlar benzerlik göstermiştir. Şekil 4.88’de S5’in maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları verilmiştir.



**Şekil 4.88.** S5 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

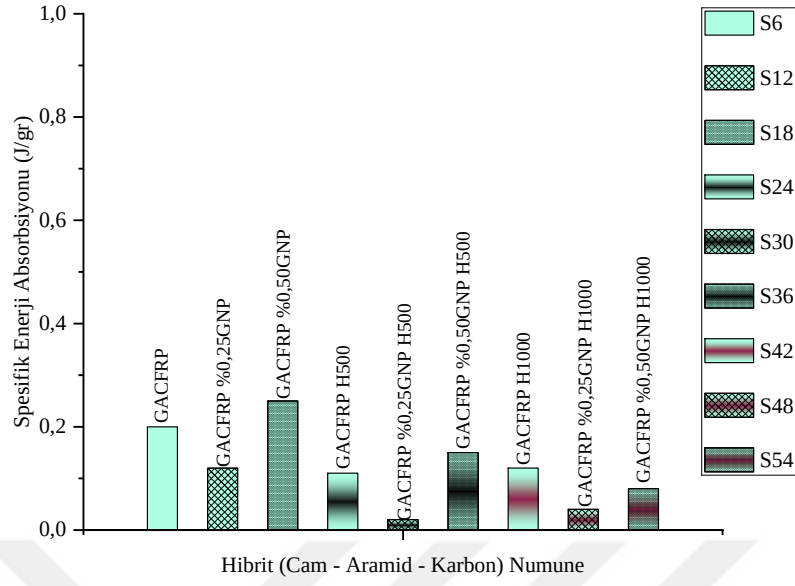
Şekil 4.88’de görüldüğü gibi en iyi sonuç 0,25 joule/gram ile grafensiz ve yaşlandırmamış S5’ de olurken en kötü sonuç %0,25 grafen ilaveli 500 saat yaşlandırılmış numune S29 ile 0,02 joule/gram ile elde edilmiştir. 50 mm’ye kadar uygulanan yarı statik basma deneyinde ise en iyi sonuç veren numune S11 olurken değeri S5 numunesine çokta uzak değildi. En kötü sonuç S17 numunesi ile yani %0,50 grafen ilaveli numune ile elde edilmişti.

Şekil 4.9’da son hibrit numunelerden olan S6 yani içten dışa sarım sırası cam-aramid-karbon fiberin maksimum tepe kuvvetine kadar enerji absorpsiyon değerinin grafen ilavesine ve hidrotermal yaşlandırmaya verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 4.89.** S6 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.89’da görüldüğü üzere maksimum tepe kuvvetine kadar olan enerji absorpsiyon değerinde en iyi sonuç S18 numunesi ile yani %0,50 grafen ilaveli numune ile elde edilmiştir. Bu değer 5,06 joule’ dür. En kötü sonuç ise %0,25 grafen ilaveli ve 500 saat yaşlandırılmış numune olan S30 ile 0,44 joule olmuştur. 50 mm’ ye kadar olan enerji absorpsiyonunda en iyi değer %0,50 grafen ilaveli ve 500 saat yaşlandırılmış numune olurken en kötü değer ise 500 saat yaşlandırılmış numune olan S24 olmuştur. Numunenin kırılma noktası enerji absorpsiyonunda büyük bir rol oynamıştır. Spesifik enerji absorpsiyonu da diğer numunelere benzer şekilde enerji absorpsiyonuna benzer sonuçlar vermiştir. Şekil 4.90’da S6’nın maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları verilmiştir.



**Şekil 4.90.** S6 numunesinin maksimum tepe kuvvetine kadar grafen ilavesi ve hidrotermal yaşlandırma ile spesifik enerji absorpsiyonunda ki değişim oranları

Şekil 4.90’da görüldüğü gibi en iyi sonuç tıpkı enerji absorpsiyonunda olduğu gibi 0,25 joule/gram ile %0,50 grafen ilaveli S18’de olurken en kötü sonuç %0,25 grafen ilaveli 500 saat yaşlandırılmış numune S30 ile 0,02 joule/gram ile elde edilmiştir. 50 mm’ye kadar uygulanan yarı statik basma deneyinde ise en iyi sonuç veren numune %0,50 grafen ilaveli ve 1000 saat yaşlandırılmış S36 olurken en kötü sonuç 500 saat yaşlandırılmış S24 numunesi ile elde edilmiştir.

Çizelge 4.10’da S1 – S54 numunelerine ait maksimum tepe kuvvetlerine kadar enerji soğurma kapasiteleri ve spesifik enerji absorpsiyonları verilmiştir.

**Çizelge 4.10.** S1 – S54 numunelerin maksimum tepe kuvvetine kadar enerji soğurma kapasiteleri ve spesifik enerji absorpsiyonları

| Numune | Enerji soğurma (j) | Spesifik enerji soğurma (j/g) | Numune | Enerji soğurma (j) | Spesifik enerji soğurma (j/g) | Numune | Enerji soğurma (j) | Spesifik enerji soğurma (j/g) |
|--------|--------------------|-------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------|
| S1     | 5,26               | 0,23                          | S19    | 1,5                | 0,06                          | S37    | 6,88               | 0,29                          |
| S2     | 0,13               | 0,02                          | S20    | 0,52               | 0,06                          | S38    | 0,03               | 0,001                         |
| S3     | 9,50               | 0,39                          | S21    | 8,96               | 0,36                          | S39    | 4,84               | 0,19                          |
| S4     | 3,55               | 0,18                          | S22    | 3,39               | 0,17                          | S40    | 2,90               | 0,14                          |
| S5     | 5,44               | 0,25                          | S23    | 3,94               | 0,17                          | S41    | 4,71               | 0,20                          |
| S6     | 3,99               | 0,20                          | S24    | 2,18               | 0,11                          | S42    | 2,53               | 0,12                          |
| S7     | 3,82               | 0,16                          | S25    | 6,40               | 0,25                          | S43    | 3,87               | 0,15                          |
| S8     | 0,61               | 0,06                          | S26    | 0,52               | 0,05                          | S44    | 0,32               | 0,03                          |
| S9     | 6,96               | 0,29                          | S27    | 3,23               | 0,13                          | S45    | 2,81               | 0,11                          |
| S10    | 3,47               | 0,17                          | S28    | 2,81               | 0,13                          | S46    | 1,17               | 0,05                          |
| S11    | 3,95               | 0,22                          | S29    | 0,41               | 0,02                          | S47    | 0,64               | 0,04                          |
| S12    | 2,33               | 0,12                          | S30    | 0,44               | 0,02                          | S48    | 0,94               | 0,04                          |
| S13    | 5,89               | 0,22                          | S31    | 5,72               | 0,21                          | S49    | 4,02               | 0,15                          |
| S14    | 0,6                | 0,06                          | S32    | 0,50               | 0,04                          | S50    | 0,19               | 0,02                          |
| S15    | 7,6                | 0,36                          | S33    | 6,39               | 0,30                          | S51    | 7,41               | 0,35                          |
| S16    | 7,2                | 0,28                          | S34    | 2,75               | 0,11                          | S52    | 2,32               | 0,09                          |
| S17    | 3,81               | 0,20                          | S35    | 1,17               | 0,06                          | S53    | 3,09               | 0,16                          |
| S18    | 5,06               | 0,25                          | S36    | 3,11               | 0,15                          | S54    | 1,73               | 0,08                          |

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, 6 farklı yapıda bulunan kütlece farklı oranlarda (%0,25 ve %0,50) grafen ile takviye edilerek ve zaman olarak farklı (500 saat ve 1000 saat) hidrotermal olarak yaşlandırmaya tabi tutulan epoksi reçine matrisli vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiş silindirik kutulara yarı statik basma deneyi uygulanmıştır. Maksimum tepe kuvvetleri, enerji absorpsiyonları ve spesifik enerji absorpsiyonları incelenmiştir.

#### 5.1.1. Yarı statik basma sonuçları

- Farklı fiber tiplerinin ve hibridizasyonun maksimum tepe kuvveti, enerji absorpsiyonu ve spesifik enerji absorpsiyonunu belirlemek amacıyla uygulanan yarı statik basma testinde en iyi sonuçlar S3 numunesi ile yani grafen ilavesiz ve yaşlandırılmamış karbon fiber numunesinde elde edilmiştir. Bu yüzden üretim için tavsiye ettiğimiz silindirik kutu karbon fiber numunedir.

Maksimum tepe kuvveti açısından en düşük değer S38 numunesin de yani 1000 saat yaşlandırılmış aramid fiberde elde edilmiştir, fakat bu numune de spesifik enerji absorpsiyonu ve enerji absorpsiyonlarında en düşük değer saptanmamıştır.

Enerji absorpsiyonları ve spesifik enerji absorpsiyonu en kötü sonuç S24 numunesinde yani 500 saat hidrotermal yaşlandırılmış cam fiber numunesinde elde edilmiştir.

Grafen ilavesi genel S2 numunesi yani aramid fiber numunesi hariç numuneler üzerinde fazla bir etki gösterememiştir. S2 numunesi grafen ile iyi bir etkileşim ortaya çıkarmıştır. Grafen ilave edilmesi genel olarak değerlerinde artışlara sebep olmuştur.

Hidrotermal yaşlandırma işlemi S2 numunesi hariç genel olarak numunelerin değerlerinde düşüşlere yol açmıştır. S2 numunesinde esneklik kazandırarak değerlerinin artmasına sebep olmuştur.

S1 numunesi yani cam fiber hidrotermal yaşlandırmadan en fazla etkilenen numune olmuştur. Aynı zamanda grafen ilavesi değerlerinin düşmesine neden olurken grafen ilave oranının artırılması olumlu etki yaptığı saptanmıştır.

Hibrit numunelerde önemli olan hibridizasyon sırası olmuştur. Deney sırasında numunelerin iç kısımdan açılmaya başlandığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden hibridizasyonda numunelerin sarım sırası karakteristiklerini etkilemiştir.

Maksimum tepe kuvvetine kadar olan enerji absorpsiyonlarında da en iyi numune S3 ile karbon fiber numune olurken en kötü numune 1000 saat yaşlandırılmış aramid fiber numunesi olan S38 oldu. Spesifik enerji absorpsiyonlarında da aynı numunelerin en iyi ve en kötü sonuca sahip olduğu gözlemlendi.

Hibrit kompozit malzeme üretecek olursak karbon fiberin en içte sarılı olduğu numune üretim için tavsiye ettiğimiz numunedir.

## 5.2. Öneriler

Doktora çalışmamızda fiber tiplerinin ve hibridizasyonun değişik yüzdelerde grafen ilavesi ve değişik sürelerde hidrotermal yaşlandırılmasının silindirik kutuların maksimum tepe kuvveti, enerji absorpsiyonu ve spesifik enerji absorpsiyonunda etkili oldukları gözlemlenmiştir. Vakum infüzyon yöntemi yerine elle yatırma veya prepreg sarım yöntemi gibi farklı yöntemler kullanılıp kompozit malzemeler üretilerek yarı statik basma testi uygulanabilir. Ayrıca numune şekilleri silindirik yerine beşgen veya altıgen gibi değişik şekiller seçilerek ve dolgu malzemesi eklenerek farklı çalışmalar yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Abd El-baky, M. A., Hegazy, D. A. and Hassan, M. A., 2022, "Novel energy absorbent composites for crashworthiness applications", *Journal of Industrial Textiles*, c. 51, sy 4\_suppl, ss. 6403S-6442S, Haz. 2022, doi: 10.1177/15280837221086040.
- Abd El-baky, M. and Attia, M., 2019, "Water absorption effect on the in-plane shear properties of jute-glass-carbon-reinforced composites using Iosipescu test", *J. Compos. Mater.*, c. 53, sy 21, ss. 3033-3045, Eyl. 2019, doi: 10.1177/0021998318809525.
- Abdewi, E. F., Sulaiman, S., Hamouda, A. M. S. and Mahdi, E., 2008, "Quasi-static axial and lateral crushing of radial corrugated composite tubes", *Thin-Walled Struct.*, c. 46, sy 3, ss. 320-332, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.tws.2007.07.018.
- Alabtah, F. G., Mahdi, E. and Khraisheh, M., 2024, "Energy absorption characteristics of a bio-inspired prepreg carbon fiber crash box under quasi-static axial compression", *Composites Part C: Open Access*, c. 14, s. 100487, Tem. 2024, doi: 10.1016/j.jcomc.2024.100487.
- Alavi Nia, A. and Haddad Hamedani, J., 2010, "Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries", *Thin-Walled Struct.*, c. 48, sy 12, ss. 946-954, Ara. 2010, doi: 10.1016/j.tws.2010.07.003.
- Alshahrani, H., Sebaey, T. A., Hegazy, D. A. and Abd El-baky, M. A., 2022, "Effects of halloysite clay nanotubes on the energy absorption and failure mechanisms of glass/epoxy composite tubes subjected to quasi-static axial crushing", *Polymer Composites*, c. 43, sy 10, ss. 7099-7117, Eki. 2022, doi: 10.1002/pc.26771.
- Alshahrani, H., Sebaey, T. A., Hegazy, D. A. and El-baky, M. A. A., 2022, "Development of efficient energy absorption components for crashworthiness applications: An experimental study", *Polymers for Advanced Techs*, c. 33, sy 9, ss. 2921-2942, Eyl. 2022, doi: 10.1002/pat.5759.
- Altin, M., Güler, M. A. and Mert, S. K., 2017, "The effect of percent foam fill ratio on the energy absorption capacity of axially compressed thin-walled multi-cell square and circular tubes", *Int. J. Mech. Sci.*, c. 131-132, ss. 368-379, Eki. 2017, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.07.003.
- Awd Allah, M. M., Abd El Aal, M. I. And Abd El-baky, M. A., 2024, "Optimizing the crashworthy behaviors of hybrid composite structures through Taguchi approach", *Polymer Composites*, s. pc.28312, Mar. 2024, doi: 10.1002/pc.28312.
- Bağatır, T., 2018, Grafen Nanopartikül Takviyesinin Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.

- Bai, C., Zhou, T., Ma, Q. and Gan, X., 2022, "Multi-objective crashworthiness optimization of CFRP/Al hybrid tube under transverse loading", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, c. 41, sy 9-10, ss. 364-382, May. 2022, doi: 10.1177/07316844211051747.
- Beik, V., Fard, M. and Jazar, R., 2016, "Crashworthiness of tapered thin-walled S-shaped structures", *Thin-Walled Struct.*, c. 102, ss. 139-147, May. 2016, doi: 10.1016/j.tws.2016.01.013.
- Chakraverty, A. P., Mohanty, U. K., Mishra, S. C. and Biswal, B. B., 2017, "Effect of Hydrothermal immersion and Hygrothermal Conditioning on Mechanical Properties of GRE Composite", *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, c. 178, s. 012013, Şub. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/178/1/012013.
- Cui, Z., J. Qi, Y. T., Zou, T. and Duan, Y., 2023, "Research on the energy absorption properties of origami-based honeycombs", *Thin-Walled Structures*, c. 184, s. 110520, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.tws.2022.110520.
- Dharmaraj, M., Satheesh Kumar, K. V. and Sridhar, C., 2022, "Crashworthiness unit cell design investigation for energy absorption analysis", *Materials Today: Proceedings*, c. 50, ss. 1282-1290, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.08.151.
- Dirgantara, T., Jusuf, A., Kurniati, E. O., Gunawan, L. and Putra, I. S., 2018, "Crashworthiness analysis of foam-filled square column considering strain rate effect of the foam", *Thin-Walled Struct.*, c. 129, ss. 365-380, Ağu. 2018, doi: 10.1016/j.tws.2018.04.004.
- Djamaluddin, F., 2023, "Optimization of foam-filled crash-box under axial loading for pure electric vehicle", *Results in Materials*, c. 21, s. 100-505, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rinma.2023.100505.
- El-baky, M. A. A., Allah, M. M. A., Kamel, M. and Abdel-Aziem, W., 2023, "Fabrication of Glass/Jute Hybrid Composite over Wrapped Aluminum Cylinders: An Advanced Material for Automotive Applications", *Fibers Polym*, c. 24, sy 1, ss. 143-155, Oca. 2023, doi: 10.1007/s12221-023-00116-9.
- Esnaola, A., Tena, I., Aurrekoetxea, J., Gallego, I. and Ulacia, I., 2016, "Effect of fibre volume fraction on energy absorption capabilities of E-glass/polyester automotive crash structures", *Compos. Part B Eng.*, c. 85, ss. 1-7, Şub. 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.09.007.
- Eyvazian, A., Habibi, M. K., Hamouda, A. M. and Hedayati, R., 2015, "Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes", *Mater. Des.* 1980-2015, c. 54, ss. 1028-1038, Şub. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.09.031.
- Eyvazian, A., Tran, T. N. and Hamouda, A. M., 2018, "Experimental and theoretical studies on axially crushed corrugated metal tubes", *Int. J. Non-Linear Mech.*, c. 101, ss. 86-94, May. 2018, doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2018.02.009.

- Fu, J., Liu, Q., Liufu, K., Deng, Y., Fang, J. and Li, Q., 2019, "Design of bionic-bamboo thin-walled structures for energy absorption", *Thin-Walled Struct.*, c. 135, ss. 400-413, Şub. 2019, doi: 10.1016/j.tws.2018.10.003.
- Ghasemnejad, H., Blackman, B. R. K., Hadavinia, H. and Sudall, B., 2009, "Experimental studies on fracture characterisation and energy absorption of GFRP composite box structures", *Compos. Struct.*, c. 88, sy 2, ss. 253-261, Nis. 2009, doi: 10.1016/j.compstruct.2008.04.006.
- Gündoğan, K. and Karaağaç, D., 2020, "Grafen Takviyeli PS Kompozitlerinin Yapısal, Isıl Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", *Bilge Int. J. Sci. Technol. Res.*, c. 4, sy 1, ss. 21-26, Mar. 2020, doi: 10.30516/bilgesci.640084.
- Hegazy, D. A., Awd Allah, M. M., Alshahrani, H., Sebaey, T. A. and Abd El-Baky, M. A., 2023, "Lateral crashing response of thin-walled composite structures filled with carbon nanopowder", *Polymer Composites*, s. pc.27702, Agu. 2023, doi: 10.1002/pc.27702.
- Hou, W., He, P., Yang, Y. and Sang, L. 2023, "Crashworthiness optimization of crash box with 3D-printed lattice structures", *International Journal of Mechanical Sciences*, c. 247, s. 108198, Haz. 2023, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108198.
- Hwang, Y. H. and Han, J.H., 2024, "Crashworthiness of Energy Absorbing Structures Under Combined Shear-Compression Loading: Effects of Materials and Geometries", *Int. J. Aeronaut. Space Sci.*, Tem. 2024, doi: 10.1007/s42405-024-00779-5.
- Kaftelen-Odabaşı, H., Odabaşı, A., Özdemir, M. and Baydoğan, M., 2023, "A study on graphene reinforced carbon fiber epoxy composites: Investigation of electrical, flexural, and dynamic mechanical properties", *Polym. Compos.*, c. 44, sy 1, ss. 121-135, Oca. 2023, doi: 10.1002/pc.27031.
- Keshavarzi, A., Marzbanrad, J. and Haji Aboutalebi, F., 2019, "Comparison of Energy Absorption in Circular Aluminium Crash Boxes with Rigid and Elastic Boundary Conditions: Numerical and Experimental Investigations", *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, c. 16, sy 1, ss. 6200-6213, Mar. 2019, doi: 10.15282/ijame.16.1.2019.9.0471.
- Kılıçaslan, C., 2015, "Numerical crushing analysis of aluminum foam-filled corrugated single- and double-circular tubes subjected to axial impact loading", *Thin-Walled Struct.*, c. 96, ss. 82-94, Kas. 2015, doi: 10.1016/j.tws.2015.08.009.
- Kim, J. S., Yoon, H. J. and Shin, K.B., 2011, "A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers", *Int. J. Impact Eng.*, c. 38, sy 4, ss. 198-207, Nis. 2011, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.11.007.
- Li, G., Zhang, Z., Sun, G., Xu, F. and Huang, X., 2014, "Crushing analysis and multiobjective optimization for functionally graded foam-filled tubes under multiple load cases", *Int. J. Mech. Sci.*, c. 89, ss. 439-452, Ara. 2014, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2014.10.001.

- Li, R., Ye, L. and Li, G., 2018, "Long-Term Hydrothermal Aging Behavior and Aging Mechanism of Glass Fibre Reinforced Polyamide 6 Composites", *J. Macromol. Sci. Part B*, c. 57, sy 2, ss. 67-82, Şub. 2018, doi: 10.1080/00222348.2018.1432174.
- Lu, R., Liu, X., Chen, S., Hu, X. and Liu, L., 2017, "Axial crashing analysis for tailor rolled square tubes with axially graded both wall thickness and material strength", *Thin-Walled Struct.*, c. 117, ss. 10-24, Ağu. 2017, doi: 10.1016/j.tws.2017.04.001.
- Ming, S., Song, Z., Li, T., Du, K., Zhou, C. and Wang, B. 2020, "The energy absorption of thin-walled tubes designed by origami approach applied to the ends", *Mater. Des.*, c. 192, s. 108725, Tem. 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108725.
- Oğuz, Z. A. ve Erkliş, A., 2021, "Hidrotermal Olarak Yaşlandırılmış Hibrit Aramid/Cam/Epoksi Kompozitlerin Su Emme Davranışlarının İncelenmesi", *Iğdır Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Dergisi*, c. 11, sy 3, ss. 2255-2267, Eyl. 2021, doi: 10.21597/jist.904186.
- Onsalung, N., Thinvongpituk, C. and Pianthong, K., 2014, "Impact Response of Circular Aluminum Tube Filled with Polyurethane Foam", *Mater. Trans.*, c. 55, sy 1, ss. 207-215, 2014, doi: 10.2320/matertrans.M2013293.
- Qin, F., Vautard, L., Drzal, T. and Yu, J., 2015, "Mechanical and electrical properties of carbon fiber composites with incorporation of graphene nanoplatelets at the fiber-matrix interphase", *Compos. Part B Eng.*, c. 69, ss. 335-341, Şub. 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.10.014.
- Ravi Sankar, H. and Parameswaran, V., 2018, "Effect of circular perforations on the progressive collapse of circular cylinders under axial impact", *Int. J. Impact Eng.*, c. 122, ss. 346-362, Ara. 2018, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.09.001.
- Soykok, I. F., Sayman, O., Ozen, M. and Korkmaz, B., 2013, "Failure analysis of mechanically fastened glass fiber/epoxy composite joints under thermal effects", *Compos. Part B Eng.*, c. 45, sy 1, ss. 192-199, Şub. 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.08.008.
- Sun, G., Pang, T., Xu, C., Zheng, G. and Song, J., 2017, "Energy absorption mechanics for variable thickness thin-walled structures", *Thin-Walled Struct.*, c. 118, ss. 214-228, Eyl. 2017, doi: 10.1016/j.tws.2017.04.004.
- Sun, G., Wang, Z., Hong, J., Song, K. and Li, Q., 2018, "Experimental investigation of the quasi-static axial crushing behavior of filament-wound CFRP and aluminum/CFRP hybrid tubes", *Compos. Struct.*, c. 194, ss. 208-225, Haz. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.02.005.
- Tarlochan, F., Samer, F., Hamouda, A. M. S., Ramesh, S. and Khalid, K., 2013, "Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces", *Thin-Walled Struct.*, c. 71, ss. 7-17, Eki. 2013, doi: 10.1016/j.tws.2013.04.003.

Url 1 (erişim tarihi 01.06.2024) <https://www.ceyrekmuhendis.com/carpisma-kutulari>

Url 2 (erişim tarihi 01.05.2024) <https://tr.wikipedia.org/wiki/Grafen>

- Wang, A., Wang, X. and Xian, G., 2020, “Mechanical, low-velocity impact, and hydrothermal aging properties of flax/carbon hybrid composite plates”, *Polym. Test.*, c. 90, s. 106759, Eki. 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106759.
- Wang, Y., Feng, J., Wu, J. and Hu, D., 2016, “Effects of fiber orientation and wall thickness on energy absorption characteristics of carbon-reinforced composite tubes under different loading conditions”, *Compos. Struct.*, c. 153, ss. 356-368, Eki. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.06.033.
- Wang, Z., Liu, J. and Yao, S., 2018, “On folding mechanics of multi-cell thin-walled square tubes”, *Compos. Part B Eng.*, c. 132, ss. 17-27, Oca. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.07.036.
- X. Qin, Q. Ma, X. Gan, M. Cai, ve W. Cai, “Failure analysis and multi-objective optimization of crashworthiness of variable thickness Al-CFRP hybrid tubes under multiple loading conditions”, *Thin-Walled Structures*, c. 184, s. 110452, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.tws.2022.110452.
- Yan, L. and Chouw, N. 2013, “Crashworthiness characteristics of flax fibre reinforced epoxy tubes for energy absorption application”, *Mater. Des.*, c. 51, ss. 629-640, Eki. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.04.014.
- Zhang, X., Zhang, H. and Wen, Z., 2015, “Axial crushing of tapered circular tubes with graded thickness”, *Int. J. Mech. Sci.*, c. 92, ss. 12-23, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2014.11.022.
- Zhang, Y., Liu, Q., He, Z., Zong, Z. and Fang, J., 2019, “Dynamic impact response of aluminum honeycombs filled with Expanded Polypropylene foam”, *Compos. Part B Eng.*, c. 156, ss. 17-27, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.08.043.
- Zhu, G., Sun, G., Liu, Q., Li, G. and Li, Q., 2017, “On crushing characteristics of different configurations of metal-composites hybrid tubes”, *Compos. Struct.*, c. 175, ss. 58-69, Eyl. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.04.072.
- Zuo, W., Luo, Q., Li, Q. and Sun, G., 2023, “Effect of thermal and hydrothermal aging on the crashworthiness of carbon fiber reinforced plastic composite tubes”, *Composite Structures*, c. 303, s. 116136, Oca. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116136.

**ÖZGEÇMİŞ****KİŞİSEL BİLGİLER**

**Adı Soyadı** : Baran Erkek  
**Uyruğu** : T.C

**EĞİTİM****Derece**

**Lise** : Diyarbakır Anadolu Lisesi 1999  
**Lisans** : Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği 2004  
**Yüksek Lisans** : Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği 2018

**İŞ DENEYİMLERİ**

| <b>Yıl</b> | <b>Kurum</b>            | <b>Görevi</b>     |
|------------|-------------------------|-------------------|
| 2004-2005  | Tellioğlu Mühendislik   | Makine Mühendisi  |
| 2005-2006  | Özkılıç İplik Fabrikası | Bakım Şefi        |
| 2007-2010  | Ceylan Otomotiv Volvo   | Makine Mühendisi  |
| 2010-2012  | MMO Diyarbakır Şube     | Teknik Görevli    |
| 2012-..... | Van YYÜ Van MYO         | Öğretim Görevlisi |