



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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KARBON FİBER-CAM ELYAF HİBRİT KOMPOZİTLERİN  
DİZİLİŞ SIRASININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**Burak KARAAHMETOĞLU**

**Aralık-2024  
BATMAN**

T.C.  
BATMAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON FİBER-CAM ELYAF HİBRİT KOMPOZİTLERİN  
DİZİLİŞ SIRASININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ

Burak KARAAHMETOĞLU

Danışman  
Prof. Dr. Hamit ADIN

Diğer Jüri Üyeleri

Dr.Öğr. Üyesi İsmail BAYAR

Dr.Öğr. Üyesi Hayri YILDIRIM

Aralık-2024  
BATMAN

## TEZ KABUL VE ONAYI

Burak KARAAHMETOĞLU tarafından hazırlanan "Karbon fiber-Cam fiber Hibrit Kompozitlerin Diziliş Sırasının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi" adlı tez çalışması 20/11/2024 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Hamit ADİN

.....

#### Danışman

Prof. Dr. Hamit ADİN

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi İsmail BAYAR

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hayri YILDIRIM

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

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

## ETİK BEYANI

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 beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

## ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

İmza

Burak KARAAHMETOĞLU

Tarih: 20.11.2024

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### KARBON FİBER VE CAM ELYAF HİBRİT KOMPOZİTLERİNİN DİZİLİŞ SİRASININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Burak KARAAHMETOĞLU**

**Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Hamit ADİN**

**2024, 60 Sayfa**

Hibrit kompozitler farklı özellikteki materyallerin tabaka halinde bir araya gelmesiyle elde edilirler. Kompozitteki tabakaların türü, miktarı, diziliş sırası, oryantasyon açısı gibi değişken parametreler, hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerdir. Bu çalışmada üretilen karbon fiber-cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin üretim sırasındaki diziliş sırasının kompozitin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Malzemenin özellikleri bazı testler uygulanarak incelenmiştir. Testlerde kullanılan malzemeler, reçine epoksi ile cam elyaf ve karbon elyaf olup, hot press yöntemi kullanılarak farklı dizilimlerde 2 adet cam – karbon elyaf takviyeli hibrit kompozit plakalar üretilmiştir. Numuneler çekme ve üç nokta eğme deneyi olmak üzere 2 farklı deneye tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda diziliş sırasının bu malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda K1 diziliş sırasına sahip numunelerin mukavemetinin K2 diziliş sırasına sahip numunelere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Cam Elyaf, Hibrit Kompozit, Karbon Fiber, Reçine, Hot press

## **ABSTRACT**

### **MASTER THESIS**

# **INVESTIGATION OF THE EFFECT ON ITS MECHANICAL PROPERTIES SEQUENCE ORDER OF CARBON FIBER-GLASS FIBER HYBRID COMPOSITES**

**Burak KARAAHMETOĞLU**

**Batman University Graduate Education Institute**

**Mechanical Engineering Department of Science**

**Advisor: Prof. Dr. Hamit ADİN**

**2024, 60 Pages**

Hybrid composites are obtained by combining materials with different properties in layers in order to better meet the usage areas and needs. Variable parameters such as the type, amount, arrangement and orientation angle of the layers in the composite are the most important factors that determine the mechanical properties of hybrid composites. In this study, the effect of sequence order of the carbon fiber-glass fiber reinforced hybrid composites produced during production on the mechanical properties of the composite was examined. The properties of the material were examined by applying some tests. The materials used in the tests were resin epoxy, glass fiber and carbon fiber, and two glass-carbon fiber reinforced hybrid composite plates were produced in different alignments using the hot press method. The materials used in the tests were resin epoxy, glass fiber and carbon fiber, and two glass-carbon fiber reinforced hybrid composite plates were produced in different alignments using the hot press method. The samples were subjected to 2 different tests: tensile and three-point bending tests. In line with the results obtained, the effect of the sequence order on the mechanical properties of these materials was examined. As a result of this examination, it has been determined that the specimens with a K1 stacking sequence have higher strength compared to those with a K2 stacking sequence.

**Key Words:** Glass Fiber, Hybrid Composite, Carbon Fiber, Resin, Hot press

## ÖNSÖZ

Bu çalışma boyunca bana bilgi ve tecrübeleriyle her zaman yardımda bulunan, çalışma konusunun belirlenmesinde ve çalışmanın hazırlanma sürecinin her aşamasında bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hamit ADİN 'e teşekkürü borç bilirim. Ayrıca her daim yanımda olup bana manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Sevgi KARAAHMETOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim.

Burak KARAAHMETOĞLU  
BATMAN-2024



## İÇİNDEKİLER

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÖNSÖZ .....</b>                                        | <b>vi</b> |
| <b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>                             | <b>ix</b> |
| <b>TABLolar LİSTESİ .....</b>                             | <b>x</b>  |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>                      | <b>xi</b> |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                     | <b>1</b>  |
| <b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>                        | <b>2</b>  |
| 2.1. Kompozitler.....                                     | 2         |
| 2.1.1 Matris malzemeleri .....                            | 2         |
| 2.1.2. Takviye malzemeleri .....                          | 3         |
| 2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....         | 3         |
| 2.2.1. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler .....  | 3         |
| 2.2.1.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler .....       | 3         |
| 2.2.1.1.1 Termoplastikler .....                           | 4         |
| 2.2.1.1.2 Termosetler .....                               | 4         |
| 2.2.1.1.2.1 Epoksi reçineler .....                        | 5         |
| 2.2.1.1.2.2. Prepregler .....                             | 5         |
| 2.2.1.2. Metal matrisli kompozit malzemeler .....         | 6         |
| 2.2.1.3. Seramik matrisli kompozit malzemeler .....       | 6         |
| 2.2.2. Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler ..... | 6         |
| 2.2.2.1. Elyaf (Lif) takviyeli kompozit malzemeler .....  | 6         |
| 2.2.2.1.1 Cam elyaf .....                                 | 7         |
| 2.2.2.1.2 Karbon elyaf.....                               | 7         |
| 2.2.2.1.3 Aramid elyaf.....                               | 8         |
| 2.2.2.1.4 Bazalt elyaf.....                               | 8         |
| 2.2.2.2. Tabakalı kompozit malzemeler.....                | 9         |
| 2.2.2.3. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler .....     | 10        |
| 2.2.2.4. Hibrit kompozit malzemeler .....                 | 10        |
| 2.3. Hibrit Kompozitlerin Üretim Yöntemleri .....         | 11        |
| 2.3.1. Elle yatırma yöntemi .....                         | 11        |
| 2.3.2. Sprey püskürtme yöntemi.....                       | 12        |
| 2.3.3. Vakum torbalama metodu .....                       | 12        |
| 2.3.4 Vakum infüzyon yöntemi .....                        | 13        |
| 2.3.5 Reçine transfer ile kalıplama metodu(RTM).....      | 14        |
| 2.3.6. Sıcak presleme yöntemi.....                        | 14        |
| 2.3.7. Sıkıştırarak kalıplama metodu .....                | 15        |
| 2.3.8 Otoklav yöntemi .....                               | 16        |
| 2.4. Literatür Araştırması .....                          | 16        |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>                         | <b>24</b> |
| 3.1 Kullanılan Malzemeler.....                            | 24        |
| 3.1.1 Karbon fiber.....                                   | 24        |
| 3.1.2 Cam fiber .....                                     | 25        |
| 3.1.3 Epoksi reçine ve sertleştirici.....                 | 25        |
| 3.2. Hibrit Kompozit Numunelerin Üretimi.....             | 29        |
| 3.3. Mekanik Test Aşamaları .....                         | 34        |
| 3.3.1 Çekme testi .....                                   | 34        |
| 3.3.2. Üç noktadan eğme testi .....                       | 38        |
| <b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>            | <b>41</b> |
| 4.1. Çekme Deneyi Sonuçları.....                          | 41        |
| 4.2. Üç Noktadan Eğme Test Sonuçları .....                | 47        |



|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| <b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b> | <b>53</b> |
| 5.1. Sonuçlar.....                   | 53        |
| 5.2. Öneriler .....                  | 54        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>               | <b>55</b> |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                     | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Takviyeli kompozit malzeme görseli .....                                                                                       | 2     |
| Şekil 2.2. Matris malzeme çeşitleri .....                                                                                                 | 3     |
| Şekil 2.3. Takviye malzemesine göre kompozitler.....                                                                                      | 6     |
| Şekil 2.4.(a) cam fiber, (b) karbon fiber, (c) Aramid, (d) bazalt .....                                                                   | 9     |
| Şekil 2.5.Tabaka diziliminin şematik gösterimi; (a) tek yönlü dizilim, (b) çapraz dizilim, (c) açılı dizilim, (ç) çok yönlü dizilim ..... | 9     |
| Şekil 2.6. Elle yatırma yöntemi .....                                                                                                     | 12    |
| Şekil 2.7. Püskürtme metodu .....                                                                                                         | 12    |
| Şekil 2.8. Vakum torbalama metodu .....                                                                                                   | 13    |
| Şekil 2.9.Vakum infüzyon tekniği .....                                                                                                    | 13    |
| Şekil 2.10. Reçine transfer ile kalıplama metodu .....                                                                                    | 14    |
| Şekil 2.11.Sıcak presleme şeması.....                                                                                                     | 15    |
| Şekil 2.12. Sıkıştırarak kalıplama metodu .....                                                                                           | 15    |
| Şekil 2.13. Otoklav metodu .....                                                                                                          | 16    |
| Şekil 3.1. 245 gr/m2 Karbon fiber twill dokuma kumaş .....                                                                                | 24    |
| Şekil 3.2.390 gr/m2 E-Cam fiber twill dokuma kumaş .....                                                                                  | 25    |
| Şekil 3.3.Üretim akış şeması .....                                                                                                        | 28    |
| Şekil 3.4. Tabakalı hibrit kompozitlerin dizilimi .....                                                                                   | 29    |
| Şekil 3. 5. Elyaf tabakalarının tezgâha yatırıldığı kürlenmeye bırakıldığı görselleri.....                                                | 30    |
| Şekil 3.6. Prepreglerin sıcak prese bırakılmadan önceki görseli .....                                                                     | 31    |
| Şekil 3.7. Hot press işlemi .....                                                                                                         | 31    |
| Şekil 3.8.Üretilen hibrit kompozit malzemeler .....                                                                                       | 32    |
| Şekil 3.9. Su jeti ile numunelerin kesilmesi .....                                                                                        | 33    |
| Şekil 3.10. Çekme deneyinde kullanılacak numunenin 3 boyutlu çizimi .....                                                                 | 35    |
| Şekil 3.11. Çekme testi öncesi pabuç takılmış kompozit numunelerin görüntüsü .....                                                        | 35    |
| Şekil 3.12. Çekme test cihazı ve deneyin yapılışı .....                                                                                   | 37    |
| Şekil 3.13. 3 noktadan eğme deneyinde kullanılacak numunenin 3 boyutlu çizimi .....                                                       | 38    |
| Şekil 3.14. 3 Noktadan eğme testi numuneleri .....                                                                                        | 39    |
| Şekil 3.15. Üç noktadan eğme testi .....                                                                                                  | 39    |
| Şekil 3.16. Üç noktadan eğme testinin uygulanma anı.....                                                                                  | 40    |
| Şekil 3.17. Üç noktadan eğme testine tabi tutulan numunenin son hali .....                                                                | 40    |
| Şekil 4.1. K11 ve K21 numunelerinin kuvvet-uzama grafiği .....                                                                            | 41    |
| Şekil 4.2. K12 ve K22 numunelerinin kuvvet uzama grafiği .....                                                                            | 42    |
| Şekil 4.3. K13 ve K23 numunelerinin kuvvet uzama grafiği .....                                                                            | 43    |
| Şekil 4.4. K11 ve K21 numunelerinin çekme gerilmesi ve şekil değişim grafiği .....                                                        | 44    |
| Şekil 4.5. K12 ve K22 numunelerinin çekme gerilmesi ve şekil değişim grafiği .....                                                        | 45    |
| Şekil 4.6. K13 ve K23 numunelerinin çekme gerilmesi ve şekil değişim grafiği .....                                                        | 46    |
| Şekil 4.7. Numunelerin maksimum çekme gerilmelerinin karşılaştırılması .....                                                              | 46    |
| Şekil 4.8. K11 ve K21 numunelerinin eğilme gerilmesi ve şekil değişimi grafiği.....                                                       | 48    |
| Şekil 4.9. K13 ve K23 numunelerinin eğilme gerilmesi ve şekil değişimi grafiği.....                                                       | 48    |
| Şekil 4.10. K14 ve K24 numunelerinin eğilme gerilmesi ve şekil değişimi grafiği.....                                                      | 49    |
| Şekil 4.11. K15 ve K25 numunelerinin eğilme gerilmesi ve şekil değişimi grafiği.....                                                      | 50    |
| Şekil 4.12. Numunelerin maksimum eğme gerilmelerinin karşılaştırılması .....                                                              | 50    |

## TABLolar LİSTESİ

| Tablo                                                                                                           | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Tablo 2.1.</b> Bazı yaygın reçinelerin termal özellikleri.....                                               | 5     |
| <b>Tablo 2.2.</b> E-cam ve S-cam elyafların kimyasal bileşimi(ağırlıkça %) .....                                | 7     |
| <b>Tablo 2.3.</b> E-Cam elyafların mekanik özellikleri .....                                                    | 7     |
| <b>Tablo 2.4.</b> Standart karbon elyafların mekanik özellikleri.....                                           | 8     |
| <b>Tablo 2.5.</b> Standart aramid elyafların mekanik özellikleri .....                                          | 8     |
| <b>Tablo 2.6.</b> Standart bazalt elyafların mekanik özellikleri .....                                          | 8     |
| <b>Tablo 2.7.</b> Çift yönlü cam ve karbon kumaşın diziliş sırası özellikleri.....                              | 19    |
| <b>Tablo 2.8.</b> Çift yönlü cam, karbon ve keten kumaşın diziliş sırası ve özellikleri .....                   | 20    |
| <b>Tablo 2.9.</b> Numunelerde kullanılan elyafların oryantasyon açıları .....                                   | 22    |
| <b>Tablo 3.1.</b> 245 gr Karbon fiber kumaşın mekanik özellikleri .....                                         | 24    |
| <b>Tablo 3.2.</b> 390 gr E-Cam fiber kumaşın mekanik özellikleri.....                                           | 25    |
| <b>Tablo 3.3.</b> F-RES 21 reçine özellikleri.....                                                              | 26    |
| <b>Tablo 3.4.</b> F-HARD 22 sertleştirici özellikleri.....                                                      | 26    |
| <b>Tablo 3.5.</b> F-RES21 reçine ve F-HARD 22 sertleştirici karışımın özellikleri .....                         | 26    |
| <b>Tablo 3.6.</b> F-RES21 reçine ve F-HARD22 sertleştirici malzemelerinin karışımının mekanik özellikleri ..... | 26    |
| <b>Tablo 3.7.</b> Üretilen kompozit numunelerin elyaf dizilimi.....                                             | 33    |
| <b>Tablo 4.1.</b> K1 ve K2 hibrit kompozit malzemelere ait numunelerin kopma kuvveti.....                       | 43    |
| <b>Tablo 4.2.</b> K1 ve K2 kombinasyonlarına ait numunelerin üç nokta eğme testi maksimum sehim miktarı.....    | 51    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\sigma_c$ : Çekme gerilmesi (MPa)

**F**: Uygulanan kuvvet (N)

**A**: Numunenin kesit alanı (mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  : Şekil değişimi

**l** : Numunenin son boyu (mm)

**l<sub>0</sub>** : Numunenin ilk boyu (mm)

$\Delta L$ : Uzama miktarı (mm)

$\sigma_e$ : Eğilme gerilmesi (MPa)

**L**: Destek aralık açıklığı (mm)

**b**: Numune genişliği (mm)

**h**: Numune kalınlığı (mm)

### Kısaltmalar

**ASTM**: American Society for Testing and Materials

**C**: Karbon fiber

**G**: Cam fiber

**B**: Bazalt

**J**: Jüt

**F**: Keten

**MPa**: Megapaskal

**N**: Newton

**mm**: Milimetre

**K1**: 1 numaralı diziliş sırasına sahip kombinasyon

**K2**: 2 numaralı diziliş sırasına sahip kombinasyon

## 1. GİRİŞ

Günümüzde elektrik-elektronik sektörü, havacılık sektörü, mühendislik sektörü ve inşaat sektörü gibi birçok alanda teknolojinin ilerlemesi ile birlikte; çelik gibi geleneksel materyallerin yerine mukavemeti/ağırlığı yüksek kompozit malzemeler kullanılmıştır. Çünkü kompozit malzemeler hafif ve dayanıklı malzemelerdir. Zamanla kompozit malzemelerin öneminin artmasıyla birlikte ihtiyaçlara uygun doğru kompozitlerin üretilmesi ve geliştirilmesi sürecinde hızlanmıştır. Kompozit malzemeler için elemanları güçlendirmek amacıyla kullanılan birçok farklı elyaf türünün olması, kompozitmalzemelerden yüksek mukavemet, yüksek sertlik, düşük yoğunluk (hafiflik) ve düşük maliyet gibi istenilen özelliklerin elde edilmesini kolaylaştırmıştır. Bu nedenle farklı elyafların bir arada kullanılmasıyla hibrit kompozitler elde edilmiştir.

Hibrit kompozitler iki veya daha fazla farklı tipte fiberin ortak bir matris içinde birleştirilmesiyle üretilen malzemelerdir. Takviye elemanı olarak cam ve karbon elyaf kullanılarak elde edilen hibrit kompozitlerin performans ve maliyet açısından avantajları, cam ve karbon elyaf içeren hibrit kompozitlerin kullanımının yaygınlaşmasına sebep olmuştur. Yüksek modüllü, düşük uzamalı fiber (karbon), hibrit kompozit malzemeyi sertleştirir ve yüksek yük taşıma özelliği verir. Diğer taraftan, düşük modüllü, yüksek uzamalı düşük fiyatlı fiber (E-glass) hibrit kompozit malzemeyi daha sünek ve hasara dayanıklı hale getirir ve malzeme maliyetini düşürür. Hibrit kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, 2 elyaf türünün hacim oranlarına ve 2 elyaf türünün kompozit içindeki birleşme ve dağılımına bağlıdır (Al Nimer,2021).

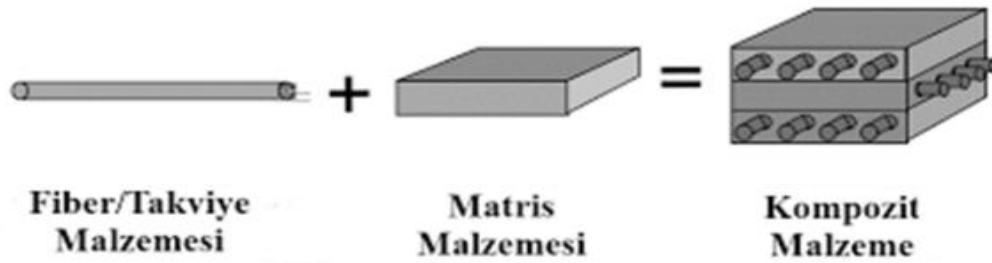
Bu çalışmada öncelikle, hibrit kompozitlerden (Cam elyafı+Karbon elyafı/epoksi) yapılmış bazı numunelerin test edilmesi olacaktır. Hot press yöntemiyle simetrik oranlarda birleştirilen Cam elyaf-Karbon elyaf malzemeler ASTM standartlarında su jetiyle kesilerek çekme testi, darbe testi ve üç noktadan eğme testine tabi tutulacaktır. Bu testlerin sonuçları bize ortaya çıkan yeni malzemenin mekanik özellikleri hakkında detaylı bilgi verecektir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Kompozitler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip malzemelerin makro ve mikro boyutta birleşmesi sonucunda oluşan farklı özelliklere sahip malzemeye denir (Saleem, et al. 2020; Czél et al.2016).

Endüstriyel takviye malzemesi, olarak çoğunlukla ısıyla sertleşen polimerlere dayalı epoksi matrislerde, cam, karbon, bazalt aramid vb. elyaflar kullanılır (Saleem, et al.,2020).



**Şekil 2.1.** Takviyeli kompozit malzeme görseli (Charvan & Narendar, 2021)

Genel olarak kompozit malzemeler matris faz ve takviye faz olarak iki bileşimden oluşur. Matris malzeme içerisinde yapıya göre polimer, metal ya da seramik esaslı olarak farklı birleşimlerden oluşur. Takviye ediciler ise, elyaf, parçacık, tabaka, lamel veya dolgu maddeleri gibi birleşimlerden oluşur. Matrisin amacı takviye (elyaf) malzemelerini bir arada tutarak olumsuz dış etkilere karşı koruyup kollamaktır. Ayrıca sertlik ve tokluk gibi özelliklerin oluşmasında da matris malzemeleri önemlidir. Aynı zamanda takviye fazı matrisin genel mekanik özelliklerini geliştirmekte ve gelen yükü fiberlere dağıtma özelliğine de sahiptir(Cardarelli,2008;Harper,2002).Hibrit kompozitler ise, aynı matris içinde bulunan iki veya daha fazla tipte fiber takviyesini birleştiren bir tür kompozit malzeme çeşididir.

#### 2.1.1. Matris malzemeleri

Matris bileşeni, uygulanan bir yükü ara yüzey bağı aracılığıyla takviye bileşenine iletir ve dağıtır. Bu sayede takviye bileşenini planlandığı gibi kalmasını sağlayarak hasarın önüne geçer. Kompozit malzemelerde matris bileşenlerinin mekanik

özellikleri, yük takviye edici bileşenlerin işlevlerini yerine getirebilmelerinde önemli rol oynamaktadır(Kaya, 2016).

### 2.1.2. Takviye malzemeleri

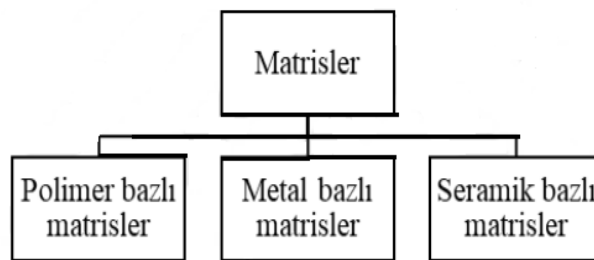
Takviye bileşeni, üretim esnasında matris bileşenin tane büyüklüğünün kontrolünü sağlar ve iletilen yükleri paylaşarak karşı direnç oluşturur. Ara yüzey bağı, genel olarak kırılma bir yapıya sahip olmasına rağmen takviye bileşenine kopmadan aktarır. Bu kısım, malzemenin elastisite modülünü etkileyen en önemli kısımdır (Kaya, 2016).

## 2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin en yaygın sınıflandırması yapılarının matris ve takviye bileşenlerine dayanmaktadır(Kur,2023).

### 2.2.1. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan matris çeşitleri Şekil 2.2'de belirtilmiştir.



Şekil 2.2. Matris malzeme çeşitleri (Kur,2023)

#### 2.2.1.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler

Termal davranışlarına göre polimer matrisler iki kategoriye ayrılır: termoplastikler ve termosetler (Vinson & Sierakowski, 2008).

#### 2.2.1.1.1. Termoplastikler

Termoplastikler çapraz bağlı olmayan, kimyasal olarak çok özelmakro molekülleri temsil eder (Vinson & Sierakowski, 2008; Biron, 2018). Isı ile erir, şekil alır ve soğuyarak tekrar sertleşir. Termoplastik malzemeler ısıtma ve soğutma çevrimleri ile yapıya zarar vermeden deforme olabilmektedir (Biron, 2018). Makro moleküller arasında kimyasal bağların bulunmaması nedeniyle artan sıcaklıkla birlikte sürünme ve gevşeme davranışları termosetler kadar iyi değildir (Biron, 2018). Mükemmel direnç ve hasar direncine sahip olan termoplastik matrisli kompozitler, termoset plastiklere göre daha yüksek sertliğe ve daha az kırılabilirliğe sahiptir (Saba vd. , 2017; Peters, 2013). Ancak termoplastik kompozit kalıplama, termoset kompozit kalıplamaya göre daha pahalıdır ve enerji yoğun bir işlemdir (Saba vd. , 2017).

Polietilen, polistiren, polipropilen (PP), akrilonitril bütadien stiren (ABS), poliasetal, polikarbonat (PC), polivinilklorürler (PVC), Nylon 6,6, Nylon 6, PET ve PBT gibi termoplastik polimerler, polietereterketon (PEEK), polifenilen sülfid (PPS), polisülfon (PSF), poliamid-imid (PAI), polieter-imid (PEI) gibi malzemeler termoplastik matris malzemelere örnektir (Vinson & Sierakowski, 2008).

#### 2.2.1.1.2. Termosetler

Kurumadan önce serbest duran makromoleküller olan termoset polimerler, kürleme sırasında kovalent çapraz bağlarla bağlanarak makromoleküllerinin üç boyutlu doğasıyla karakterize edilir (Biron, 2018). Moleküler zincirleri kovalent çapraz bağlarla bağlı olduğundan basınç ve ısı altında oluştuktan sonra tekrar şekillendirilemeyen polimerlerdir (Vinson & Sierakowski, 2008). Üç boyutlu yapı kovalent bağlanma yoluyla elde edildiğinden bu malzemeler oldukça katıdır. Moleküler zincirler arasındaki bağlar iyi bir sünme davranışı gösterir çünkü makromoleküllerin birbirlerinden uzaklaşma yeteneğini sınırlarlar (Biron, 2018). Termoset kompozitler ayrıca iyi yorulma mukavemetine sahiptir (Saba vd. , 2017).

Epoksiler, vinil esterler, doymamış polyesterler PMC'lerde kullanılan geleneksel ısıyla sertleşen matrisler olmasına rağmen, fenolikler, bismaleimidler (BMI), poliamidler, polibenzimidazoller ve siyanat esterler yüksek sıcaklık uygulamalarında



kullanılan termoset matris malzemeler arasındadır (Vinson&Sierakowski, 2008;Mallick, 1997).

#### 2.2.1.1.2.1. Epoksi reçineler

En yaygın termoset matrislerinden biri olan epoksi reçineler, kimyasal yapılarında iki veya daha fazla 1,2 epoksit grubu (bir oksijen atomu ve iki karbon atomu) içeren polimerlerdir. Bu reçinelerin sentez yöntemlerine bağlı olarak tokluk, kimyasal direnç, esneklik, sertlik, yüksek mukavemet, ısı verim ve elektriksel verim gibi özellikler elde edilebilmektedir. Bu malzeme çeşitliliğinin bir sonucu olarak epoksi reçineler koruyucu kaplamalarda, yapıştırıcılarda, yüzeylerde, metallerde, tekstillerde ve tekstil takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (May, 2018). Lineer yapıya sahip oligomerik bir bileşik olan epoksi reçineler, kürlleme maddesi ilavesi ile oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta kürleşerek termoset ürüne dönüştürülebilir. Bileşimde çapraz yoğunluk arttıkça reçinenin sertlik, mukavemet, camsı geçiş sıcaklığı gibi özellikleri iyileşirken sertliği azalır (Chawla, 2012).

Epoksi reçineler polyester reçinelere göre daha pahalıdır. Ancak bismaleimidler ve poliamidlerle aynı termal dayanıma sahip değildir (Peters, 2013). Tablo 2.1'de epoksi reçinelerin ve çeşitli termoset matrislerin termal özelliklerini karşılaştırmaktadır.

**Tablo 2.1.**Bazı yaygın reçinelerin termal özellikleri (John ve Nair 2014; Li et al., 2019; Mottram et al.,1992)

|                                                    | <b>Epoksi</b> | <b>Fenolikler</b> | <b>BMI</b> | <b>Siyanat Ester</b> |
|----------------------------------------------------|---------------|-------------------|------------|----------------------|
| En yüksek kullanım sıcaklığı °C                    | 180           | 200               | 200        | 150-200              |
| Kürleşme sıcaklığı °C                              | RT-180        | 150-190           | 220-300    | 180-250              |
| TGA onset sıcaklığı °C                             | 260-340       | 300-360           | 360-400    | 400-420              |
| Camlaşma sıcaklığı °C                              | 150-220       | 170               | 230-380    | 250-270              |
| Isıl genleşme sıcaklığı $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | 45-65         | 55-100            | 44         | 59                   |

#### 2.2.1.1.2.2. Prepregler

Bir prepreg, matris (veya reçine) ve fiber takviyesinin bir kombinasyonudur. Başka bir deyişle prepreg, reçineye takviye katılarak kullanıma hazır hale getirilen elyaflar için kullanılan genel bir terimdir. Bu bölüm üretimde kullanıma hazırdır. Prepregler, ısı ve basınç altında sertleşerek son derece güçlü ancak hafif bileşenler oluşturan, fiberle güçlendirilmiş reçinelerdir (Yıldız,2019).

### 2.2.1.2. Metal matrisli kompozit malzemeler

Metal matrisli kompozit malzemeler, ana malzemeleri çeşitli metal ve metal alaşımından meydana gelir. Metal esaslı yapıya gömülü takviye fazı, farklı geometrilere sahip olabilir. Ayrıca bu takviye fazı, metal esaslı yapıdan daha düşük özellikler gösterir (Kaya, 2016).

### 2.2.1.3. Seramik matrisli kompozit malzemeler

Seramik matrisli kompozit malzemeler, yüksek sıcaklık dayanımı ve hafifliklerinden dolayı oldukça kullanışlıdır. Daha az esnek ve dayanıklıdır ve ısı şokuna daha duyarlıdır. Bu yüzden genellikle lifle takviye edilirler. Elektriksel olarak yalıtkan özellikleri çok iyidir (Kaya, 2016).

### 2.2.2. Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler

Takviye malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Yastımoğlu ve Özkan, 2017).



Şekil 2.3. Takviye malzemesine göre kompozitler (Yastımoğlu ve Özkan, 2017)

#### 2.2.2.1. Elyaf (Lif) takviyeli kompozit malzemeler

Fiber takviyeli kompozitlerin ana bileşeni olan fiber, kompozit yapının mukavemetinin ana bileşenidir (Agarwal et al.,2017; Mallick, 2007).Kompozit bir yapıda kullanılacak lif tipinin, lif oranının, lif uzunluğunun ve lif yöneliminin doğru seçimi; kompozit malzemelerin fiziksel, mekanik, elektriksel ve termal özelliklerinde önemlidir (Mallick, 2007). Kompozit malzemelerde en yaygın olarak kullanılan sentetik

elyaflar şunlardır: Her ne kadar cam, karbon ve Kevlar elyafları, yüksek maliyet nedeniyle yüksek performans istenen yerlerde boron elyafları ve ince malzemeler kullanılmaktadır (Agarwal et al., 2017).

#### 2.2.2.1.1. Cam elyaf

Cam elyaflar, düşük maliyetleri ve yüksek mukavemetleri nedeniyle kompozit malzemelerde en sık kullanılan takviye elyaflarıdır. Diğer önemli avantajları, kimyasal dayanıklılık ve mükemmel soğutma özelliklerine sahip olmasıdır. Bu elyafların dezavantajları, diğer ticari elyaflara göre küçük alana sahip olmaları, yoğunluğunun daha yüksek olması, aşınmanın kolay olması ve dolayısıyla mukavemetinin düşük ve mukavemetinin zayıf olmasıdır. Elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan iki tür cam elyafı E-cam elyafı ve S-cam elyafıdır. S-cam elyafları E-cam elyaflardan ayıran fark, Tablo 2.2'de gösterildiği gibi bileşimdeki farklılık ve S-cam elyafların daha yüksek üretim maliyetidir (Mallick, 2007).

**Tablo 2.2.**E-cam ve S-cam elyafların kimyasal bileşimi(ağırlıkça %) (Mallick, 2007)

|       | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO | MgO | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O |
|-------|------------------|--------------------------------|-----|-----|-------------------------------|-------------------|
| E-cam | 54.5             | 14.5                           | 17  | 4.5 | 8.5                           | 0.5               |
| S-cam | 64               | 26                             | -   | 10  | -                             | -                 |

**Tablo 2.3.**E-Cam elyafın mekanik özellikleri (Petrucchi vd., 2013)

| Cam elyaf tipi | Yoğunluk(gr/cm <sup>3</sup> ) | Çekme Mukavemeti (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) |
|----------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------|
| E-cam          | 2.54                          | 2680                   | 72                      |

#### 2.2.2.1.2. Karbon elyaf

Karbon fiberlere grafit fiberler de denir. İyi bir kimyasal dirence sahip hafif ve güçlü elyaflardır. Karbon elyaf malzemelerin yüksek mukavemetli oluşu, düşük yoğunluğa ve sürtünme gibi üstün özelliklere sahip olmasıyla başta havacılık ve uzay sanayisine hâkim elyaf çeşididir. Karbon elyafların mekanik özellikleri, karbon zincirlerinin atomik konfigürasyonu ve grafit kristal yapıya benzer olan bağlantıları ile belirlenir. Karbon elyafın gücü, karbon atomik yapıların karbon elyafı yönü boyunca en güçlü atomik bağlantılarıyla yönlendirilmesiyle kontrol edilir (Yi et al., 2018).

Karbon elyaf takviyeli kompozitler, yüksek elastisite modülüne, yüksek mukavemete, düşük termal genleşme katsayısına sahip olup ayrıca yüksek sıcaklıklarda

iyi bir aşınma direnci ve hafiflik özelliklerine sahiptir. Karbon elyafların en yaygın kullanım alanları roket uygulamaları ve savunma sanayisidir (Sayan, 2014).

**Tablo 2.4.**Standart karbon elyafın mekanik özellikleri (Petrucci et al., 2013)

| Karbon elyaf | Yoğunluk( $\text{gr/cm}^3$ ) | Çekme Mukavemeti (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) |
|--------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Standart     | 1.76                         | 3790                   | 230                     |

#### 2.2.2.1.3. Aramid elyaf

Günümüzde kullanılan kevlar olarak bilinen aramid elyaflar en önemli elyaflardır. Çünkü yüksek mukavemet, tokluk ve hafiflik özelliklerine sahiptir. Çelik ile karşılaştırıldığında ağırlık ve mukavemet olarak çok yüksek bir çekme mukavemetine sahiptir. Ayrıca yüksek elastisite modülüne ve yüksek derecede kristal özelliklere sahiptir (Sayan,2014).

**Tablo 2.5.**Standart aramid elyafın mekanik özellikleri (Petrucci et al., 2013)

| Aramid elyaf | Yoğunluk( $\text{gr/cm}^3$ ) | Çekme Mukavemeti (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) |
|--------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Standart     | 1.44                         | 2757                   | 112                     |

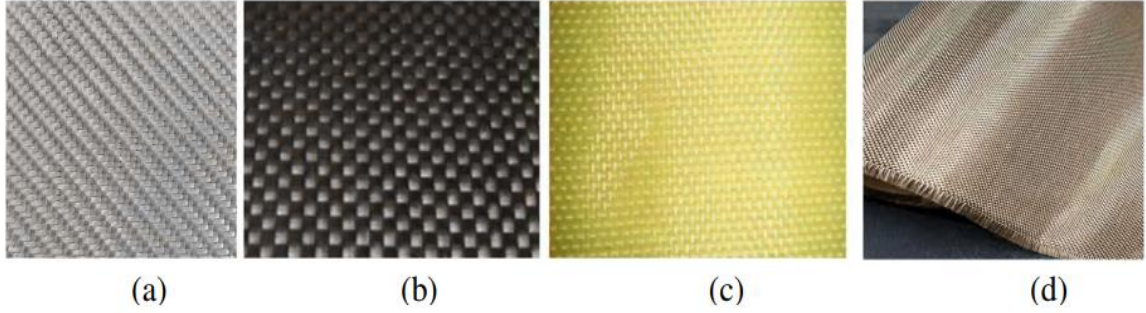
#### 2.2.2.1.4. Bazalt elyaf

Bazalt elyaflar, yangına ve korozyona karşı iyi dirence sahiptirler. Titreşim ve akustik yalıtım özelliğine sahip olup diğer takviye elemanlarına göre daha ucuz ve çevre dostudur (Meenakshi et al., 2019).

Bazalt elyafın enine yöndeki mukavemeti boyuna yöndeki mukavemete göre düşüktür. Erime noktası 984 ile 1260 °C arasındadır ( Petrucci et al., 2013).

**Tablo 2.6.**Standart bazalt elyafın mekanik özellikleri (Petrucci et al., 2013)

| Bazalt elyaf | Yoğunluk( $\text{gr/cm}^3$ ) | Çekme Mukavemeti (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) |
|--------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Standart     | 2.65                         | 3000                   | 87                      |



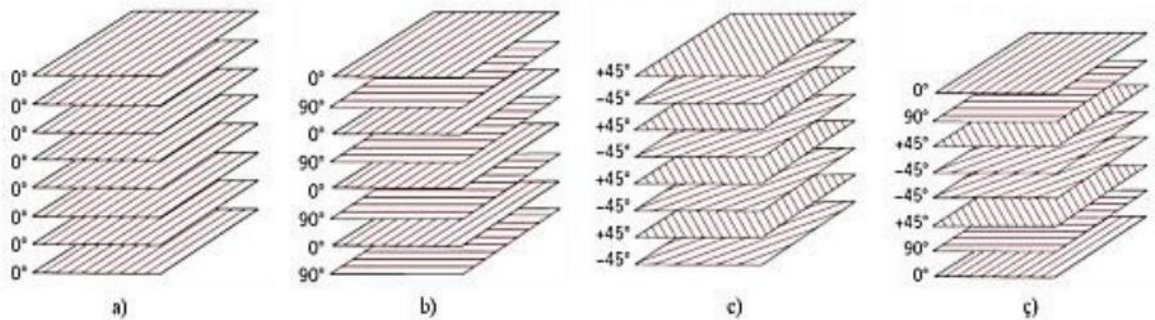
**Şekil 2.4.**(a) cam fiber, (b) karbon fiber, (c) Aramid, (d) bazalt fiber (Wang et al.,2008)

#### 2.2.2.2. Tabakalı kompozit malzemeler

Tabakalı kompozitler en az iki farklı malzeme tabakalarının aynı yahut farklı doğrultularda üst üste istiflenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu tabakalar çoğunlukla peş peşe sıralanan polimerler, seramikler ve metallere oluşturulmaktadır (Arı,2023).

Tabakalı kompozitler kullanarak zayıf özelliklere sahip malzemenin sağlamlaştırılması ve geliştirilmesi gerçekleştirilir. Korozyon direnci zayıf metallerin yüzeyine daha yüksek korozyon direncine sahip plastiklerin ya da metallerin kaplanması ile korozyon özelliğinin sağlanması mümkündür. Ayrıca iki boyutlu düzlemde tabakalı kompozit malzemeler yüksek dayanımları nedeniyle karmaşık formdaki malzemeleri üretmeyi mümkün kılar ( Cardarelli, 2008; Kaw,2010).

Şekil 2.5'te görüldüğü üzere bu yapılarda, laminant özellikleri ve yüksek mukavemetli yönün katmandan katmana nasıl değiştiği çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu bağlamda, laminant kompozitler tabaka dizilimine göre; tek yönlü, çapraz, açılı ve çok yönlü olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır.



**Şekil 2.5.**Tabaka diziliminin şematik gösterimi; (a) tek yönlü dizilim, (b) çapraz dizilim, (c) açılı dizilim, (ç) çok yönlü dizilim (Kaw, 2010)

### 2.2.2.3. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler, parçacık formundaki takviye malzemelerinin bir matris malzemesine dahil edilmesiyle oluşturulur. Polimer matris içerisinde seramik veya metal parçacık kullanımı en yaygın olanıdır. Metal parçacık tercih edildiğinde ısı ve elektriksel iletkenlik sağlanırken, metal matriste kullanılan seramik parçacıklar kompozit malzemenin sertliğini ve ısı direncini yükseltir (Yastımoğlu ve Özkan,2017).

### 2.2.2.4. Hibrit kompozit malzemeler

Aynı kompozit yapı içerisinde iki veya daha fazla takviye elemanı bulunduran kompozitler hibrit kompozitlerdir. Yeni kompozitlerin geliştirilmesi için iyi bir fırsattır. Örneğin; Kevlar ucuz bir elyafır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit fiber nispeten sert ve pahalıdır ancak iyi bir basma dayanımına sahiptir. Bu iki elyafı yapılan hibrit kompozitin sertliği grafitten daha iyi, daha ucuz ve Kevlar elyafı kompozitten daha yüksek basma dayanımına sahiptir (Kaya, 2016).

Hibrit kompozit malzeme üretiminde kullanılan takviye elemanları; cam elyaf, carbon elyaf, bazalt elyaf, aramid elyaf, vb.'dir. Takviye edilen elyaflar hibridizasyonla birleştirilerek istenilen özelliklere sahip malzeme elde edilebilir ve geliştirilebilir(Sayan, 2014).

Hibrit kompozitleri, çok sayıda takviye malzemesinin tek bir matriste birleştirilmesiyle meydana geldiğini ifade etmiştir. Bu kombinasyonla, bileşenlerinin dezavantajları azaltılırken, bileşenlerinin tamamlayıcı faydalarına sahip yeni bir kompozit malzeme elde etmek mümkün olabilir. Bu kompozitler, fiber/reçine sistemlerinin çeşitliliği ile tasarımcılara esneklik sunmakta ve bu özelliğinden dolayı mühendisler ve bilim adamlarının artan ilgisini çekmektedir (Gururaja &Rao, 2012; Pegoretti et al.,2004).

Hibrit bir kompozit malzeme üretmek için pek çok takviye ve reçine malzemesi mevcuttur. Bununla birlikte, literatürde en çok tercih edilen sistem, takviye malzemesi olarak karbon ve cam elyafın bir epoksi matris içinde kombinasyonudur. Epoksi bazlı karbon/cam fiber takviyeli hibrit kompozitler, makul maliyetle yüksek dayanım ve uzama özelliklerine sahip bir malzeme sunar ( Wan et al.,2018).

Belirli mühendislik uygulamalarında hibrit kompozit malzemelerin artan kullanımı, mekanik özellikleri hakkında bilgi gerektirir. Bu nedenle literatürde çekme, basma ve eğilme tipi yükler altındaki davranışları ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır.

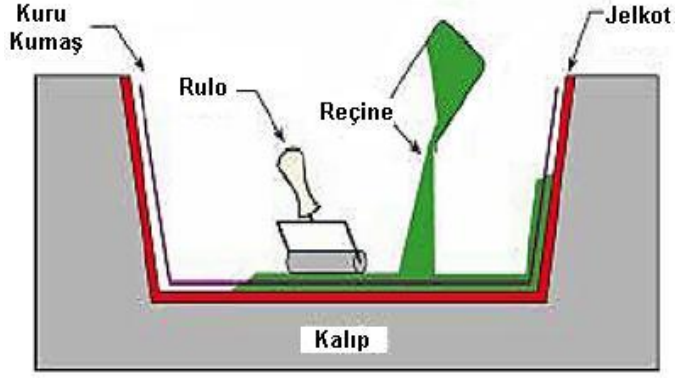
Takviye malzemesinin karıştırılmasına dayanan beş tür hibrit kompozit vardır:

- **Katmanlararası hibrit:** Farklı türde elyaf katmanları istiflenir.
- **Katman içi hibrit:** Aynı katmanda birden çok lif türü bulunur.
- **Birbirine karışmış hibrit:** Farklı elyaf türleri rastgele karıştırılır, bu nedenle hibrit kompozitte belirli bir elyaf tipi konsantrasyonu yoktur.
- **Seçici yerleştirme:** Takviye malzemeleri, temel laminat tabakasında ekstra mukavemetin gerekli olduğu yerde konumlandırılır.
- **Süper hibrit kompozitler:** Belirli bir konfigürasyona ve istifleme sırasına göre yerleştirilmiş metal kompozit katlardan oluşur (Kretsis, 1987; Ravishankar, et al., 2019).

### 2.3. Hibrit Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

#### 2.3.1. Elle yatırma yöntemi

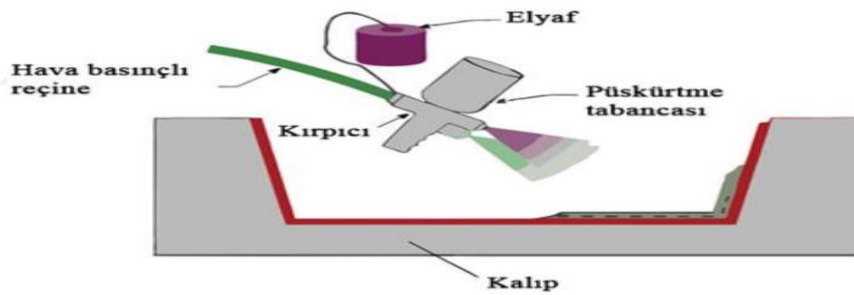
Hibrit kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan en eski ve en basit imalat prosesi olan el yatırma prosesi, küçük hacimde küçük şerit parçaları üretmek için iyi bir yöntemdir. Üretimin başlangıcında yüksek kaliteli bir yüzey elde etmek için kalıp yüzeyine jelkot ve pigment uygulanır. Takviyeler kaplamanın üzerine yerleştirilir ve reçine dökülür. Hava kabarcıkları rulolama tekniğiyle giderilir, kompozit sıkıştırılır ve tüm takviyeler reçine ile doldurulur. Takviye ve reçine ilavesine istenilen kalınlığa ulaşıncaya kadar devam edilir. Ekipman maliyetinin düşük olması, kullanım kolaylığı, parçanın mukavemetinin yüksek olması ve tasarımın basitliği bu yöntemin avantajları olsa da dezavantajları ise üretilen parçaların oldukça pratik ve pürüzsüz bir çalışma yüzeyi olmasıdır (Vinson & Sierakowski, 2006).



Şekil 2.6. Elle yatırma yöntemi (Kchany, 2015)

### 2.3.2. Sprey püskürtme yöntemi

Sprey püskürtme yöntemi, termoset reçine ve doğranmış elyaf karışımının bir püskürtme tabancası kullanılarak bir kalıba püskürtülmesi ve ardından kompozitin belirli hava koşulları altında kurlanmasına izin verilmesi tekniğine dayanmaktadır (Middleton, 2015).

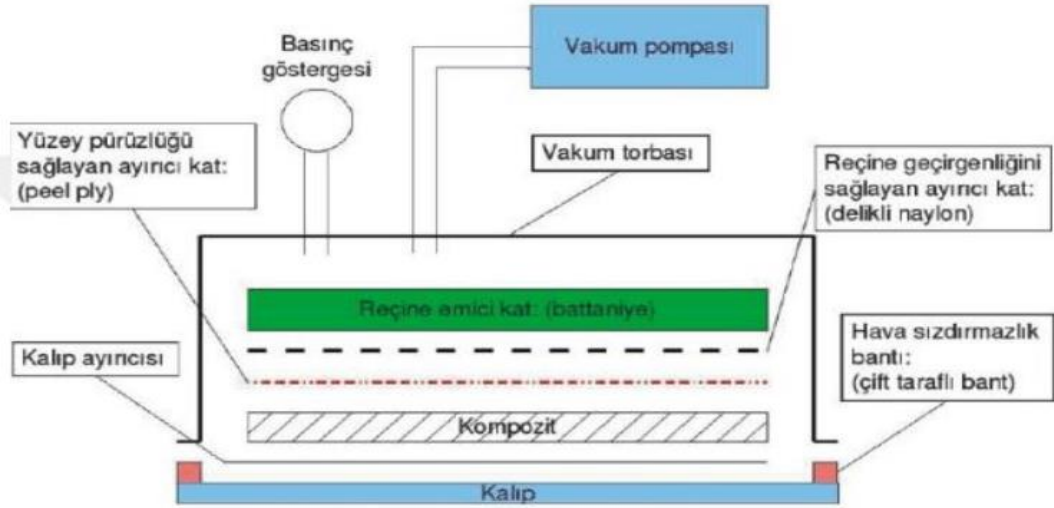


Şekil 2.7. Püskürtme metodu (İmak, 2015)

### 2.3.3. Vakum torbalama metodu

Uygulama açısından elle yatırma metoduna benzer fakat dezavantajlarını da ortadan kaldırdığı söylenebilir. Örneğin; Lif yoğunluğu ne kadar yüksek olursa, hava kabarcıkları ve boşluklar o kadar az görünür. Torba sayesinde sağlığa zararlı maddelerin solunması azaltılmış olur. Kalıp ayırıcı, yüzey pürüzlüğü sağlayan ayırıcı kat, reçine geçirgenliği sağlayan ayırıcı kat (delikli naylon), hava sızdırmazlık bandı, reçine emici kat (battaniye) , vakum pompası ve vakum torbasından oluşur (Durgun ve Vatansever, 2013).

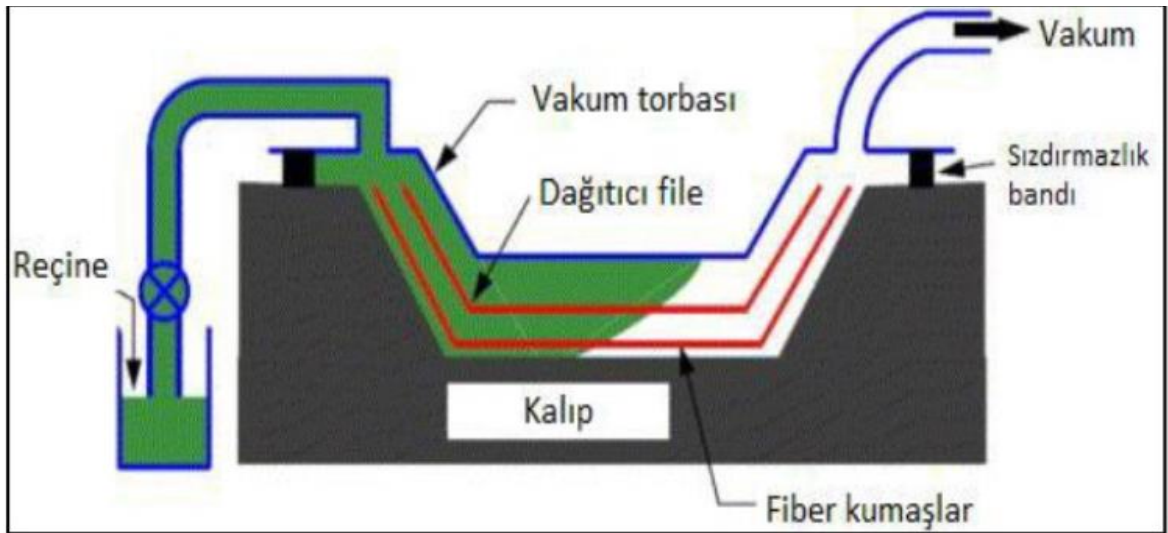




Şekil 2.8. Vakum torbalama metodu (Durgun ve Vatansever, 2013)

#### 2.3.4. Vakum infüzyon yöntemi

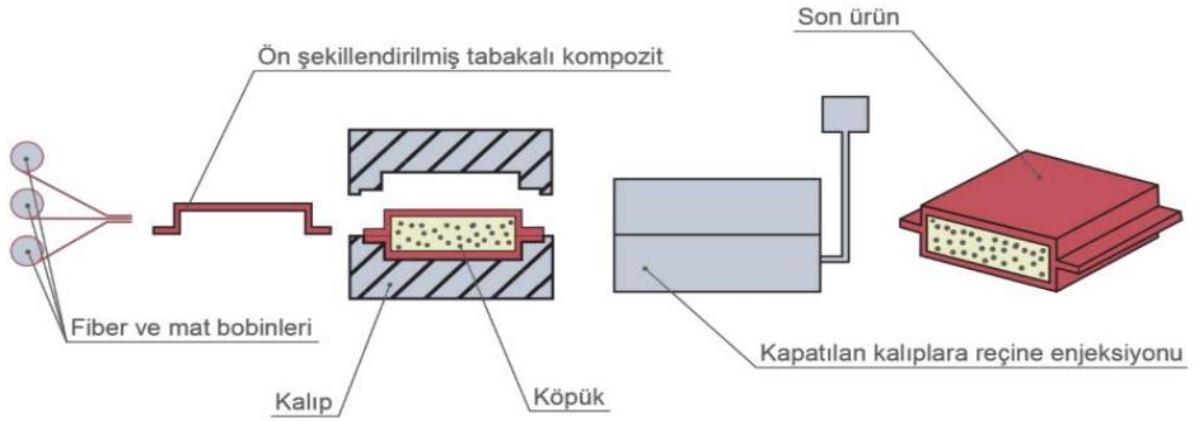
Vakumlu infüzyon yöntemi katların laminat içinde sıkıştırma ve basınç konsolidasyonunu sağlar. Vakumlu infüzyon yöntemi, elle yatırma yönteminin geliştirilmiş bir versiyonu olarak da bilinir. Bu işlemde kalıp tabanı yatay olarak tutulur ve prepreg kompozitler kalıp tabanına eşit dağılımlı olarak yerleştirilir. Daha sonra yatay olarak katmanlı olarak kompozitlerin üzerine yerleştirilir. Son olarak tüm kompozit laminatlar bir vakum poşeti ile kaplanır ve mühürleyiciler kullanılarak düzgün bir şekilde kapatılır. Bu teknik kullanılarak karmaşık parçalar yapılabilir. Concorde uçaklarının ve F1 araçlarının parçaları bu yöntem kullanılarak hazırlanmaktadır (Sayer,2010).



Şekil 2.9. Vakum infüzyon tekniği (Nabil et al.,2019)

### 2.3.5. Reçine transfer ile kalıplama metodu (RTM)

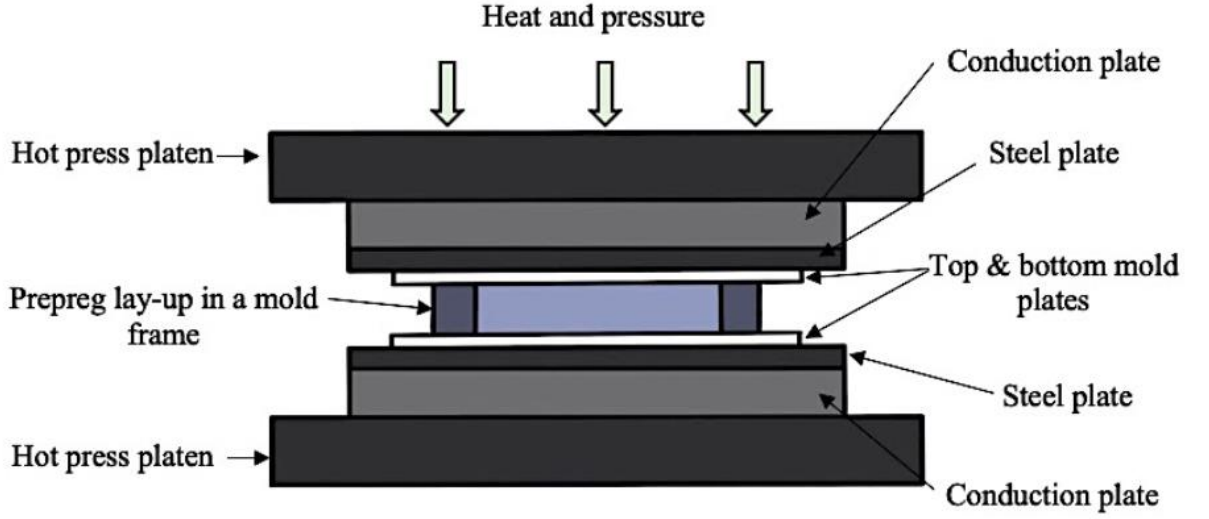
Bu yöntemde erkek ve dişi kalıplar kullanılarak alt kalıba (dişi) fiber hasır veya kumaş preformlar yerleştirilerek üst kalıp kapatılır. Düşük basınç altında kalıba enjekte edilir. Kalıp tamamen dolduğunda enjekte edilen reçine kumaş yapısının açık alanlarına girer. Aynı zamanda reçinenin akmasını sağlamak için kalıbın yanlarından hava dışarı atılır. Isı ve basınca maruz kaldığında kumaş yapısındaki açıklıklar ve ipliklerin arasındaki boşluklar reçine ile dolar. Enjeksiyondan sonra kalıp ısıtılır ve matrisin kurumasına izin verilir. Nihai ürün kürlenme işleminden sonraya gelir. RTM tekniği kullanılarak, her iki yüzeyi de düzgün malzeme üretimi yapılabilir (Vinson & Sierakowski, 2006; Irving & Soutis, 2019).



Şekil 2.10. Reçine transfer ile kalıplama metodu (Kahraman, 2017)

### 2.3.6. Sıcak presleme yöntemi

Yüksek performanslı kompozit düz plaka üretmenin en kolay yöntemi, sıcak presleme adı verilen bir işlemi kullanmaktır. Bu yöntem, ısı ve tek eksenli basıncın eş zamanlı uygulanmasını içerir ve çoğunlukla plaka ve pelet gibi basit şekillerin imalatında kullanılır. Sıcak presleme işleminin ana parametreleri şunları içerir: (i) presleme sıcaklığı, (ii) presleme basıncı ve (iii) matris kürlenme süresi. Genellikle matrisin termal genişlemesini dengelemek ve basınç uygulanması sırasında parçanın şeklini korumak için bir kalıp kullanılır. Basit bir sıcak press makinesinin şematik gösterimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Gül, 2019).

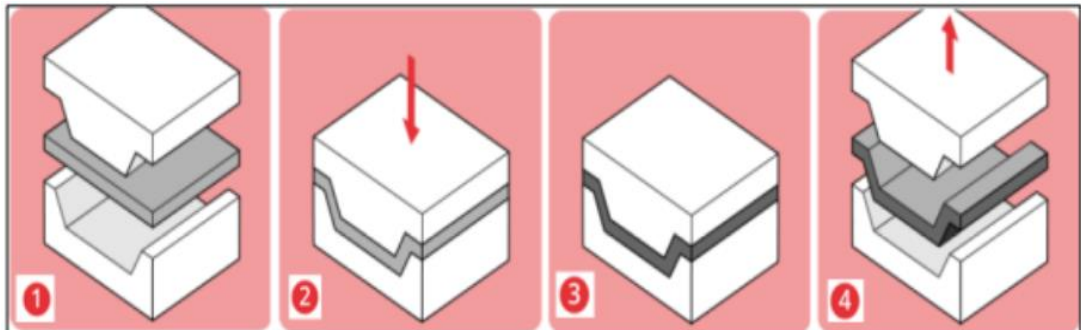


Şekil 2.11.Sıcak presleme şeması (Gul,2019)

Şekil 2.11 'den de anlaşılacağı gibi, bir sıcak pres makinesi iletim plakaları, çelik plakalar, kalıp plakaları ve merdaneler gibi çok sayıda parça içerir. Prepreg yerleşimi kalıbın içine yerleştirilir ve üst plaka tarafından tek eksenli bir basınç eşit şekilde uygulanır. Basınç miktarı ve sertleşme süresi polimer matrisin özelliklerine bağlıdır (Gul,2019).

### 2.3.7. Sıkıştırarak kalıplama metodu

Yüksek basınçlı bir preste genellikle sıcaklık uygulayarak şekil vermeye dayalı bir üretim yöntemidir. Alt ve üst kalıptan oluşur ve kalıplanacak malzemenin alt kalıba konulmasıyla presleme işlemleri yapılır (Arabacılar, 2021).



Şekil 2.12. Sıkıştırarak kalıplama metodu (Arabacılar, 2021)

### 2.3.8. Otoklav yöntemi

Otoklav yöntemi, yüksek sıcaklık ve basınç altında sertleşebilen malzemelerin üretiminde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle prepreg (önceden reçinelenmiş) kumaşlar ve karbon fiber, cam fiber gibi takviye malzemelerle yapılan hibrit kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Malzeme kapalı bir ortamda ısı ve basınç kullanılarak sertleştirilebilir. İşlem, yüksek mukavemet ve dayanıklılık elde edilmesini sağlar.



Şekil 2.13. Otoklav metodu (Kahraman, 2017)

### 2.4. Literatür Araştırması

Literatürde ise en yaygın katmanlı hibrit kompozit malzeme türü interply hibrit kompozit malzemelerdir. Katmanlı bir kompozit yapı, farklı takviye elemanlarının (farklı fiber malzemelerden) ve her katmanda farklı tipte fiberlerden oluşan bir istiften meydana gelmektedir (Strong, 2008).

Başka bir çalışmada karbon, karbon ve cam elyafı kullanarak karbon-karbon-karbon-cam bazalt- karbon ve bazalt-camdan oluşan kompozit malzemeler üretilmiş ve bu yapıların mekanik özelliklerini araştırılarak etkileri test edilmiştir. Bu testlerin sonucunda bazalttan yapılan hibrit yapıların, camdan yapılan hibrit yapılardan daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir (Dorigato & Pegoretti, 2013).

Hibrit kompozitler farklı şekillerde üretilmektedir. Bunları aşağıdaki üç gruba ayırabiliriz:

- Matris içinde iki veya daha fazla katman bulunur. Her katmanın belirli bir yönde takviyesi vardır ve her katmanda belirli bir tür elyaf kullanılır. Tabakalar ise istenilen şekilde yerleştirilirler.
- İki veya daha fazla elyaf bir katmanda karıştırılır ve katmanlar, hibrit bir kompozit elde etmek için gerektiği şekilde birleştirilir.
- Reçine matris katmanı ve metal matrisli katmanları gibi çeşitli kompozit yapılardan oluşan süper hibritler elde etmek mümkündür. Süper hibritlerde katmanlar reçine ile birleştirilir(Yıldızhan, 2013).

Hafif yük taşıyan yapı için cam ve karbon fiberlerle güçlendirilmiş hibrit kompozit malzemelerde bulunan düz dokuma cam fiberlerin ve twill karbon fiberlerin farklı diziliş sırası için çekme, basma ve üç noktadan eğme testlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır (Zhang et al., 2011).

Oryantasyon açıları  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $45^\circ$  olan S-cam, aramid ve karbon fiber takviyeli 12 katmanlı hibrit kompozit numunelerde burulma davranışlarını incelemiş ve diziliş sırasının burulmaya doğrudan etki ettiği tespit edilmiştir (Yeter et al, 2014).

Cam, karbon ve bazalt elyaflardan elle yatırma tekniği kullanılarak tek tip ve hibrit kompozit numuneler üretilmiş ve bu numuneler mekanik ve dinamik deneylere tabi tutulmuştur(Mohamed et al, 2017).

Başka bir çalışmada; Cam elyaf, karbon elyaf ve epoksi reçine kullanılarak farklı konum açlarına ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , twill, düz ) sahip 12 farklı katmandan oluşan 8 hibrit kompozit üretilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla çekme ve yorulma deneyleri uygulanmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre en yüksek gerilme  $0^\circ$  fiber açısına sahip karbon cam numunesinde, en düşük gerilme ise  $45^\circ$  fiber açısına sahip karbon cam numunesinde bulunmuştur. Yorulma gerilmesi açısından en yüksek değer  $0^\circ$  fiber açısına sahip numunede, en düşük değer ise  $45^\circ$  fiber açısına sahip numunede tespit edilmiştir. Düz karbon, twill cam elyaf dokuma kumaş kullanılan numunenin sonsuz ömürlü olduğu tespit edilmiştir (İmak, 2015).

Cam elyaf ve reçine transfer yöntemi kullanılarak yapılmış 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 katlı, farklı bağlantı dizilimine sahip 17 adet kompozit numune bulunmaktadır. Katman sayısının, liflerin sırasının ve yöneliminin kompozit üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, katman sayısı ve kalınlığının artmasının mukavemeti azalttığı, lifler arasındaki oranın artmasının ise katman kalınlığını azaltarak kapasiteyi arttırdığı

tespit edilmiştir. Fiber açısı azaldıkça mukavemet değerlerinin de azaldığı görülmüştür (Daban,2016).

4 adet 8 katmanlı fiberglas ve karbon fiberden meydana gelen hibrit kompozit numuneler üzerinde eğilme testleri yapılarak, karbon fiber katman sayısının malzemenin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, A1 kombinasyonunda karbon fiber kullanılmamasına rağmen A2 kombinasyonunda 2 kat, A3 kombinasyonunda 4 kat, A4 kombinasyonunda ise 6 kat karbon fiber kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda karbon elyafly kumaş sayısı arttıkça elastisite modülünün arttığı ve sönümlenme oranlarının azaldığı tespit edilmiştir (Utomo et al., 2016).

4 mm kalınlığında, 18 katmanlı hibrit kompozit malzemeler, cam-karbon elyaf ve epoksi reçine kullanılarak üretilmiştir. Malzemelerden birinde sadece ilk ve son katmanda karbon elyaf kullanılırken, diğesinde yalnızca orta katmanda kullanılmıştır. Numuneler üzerinde farklı derinlik ve genişlikte yüzey çatlakları açılarak darbe testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, iç kısmı karbon elyafly numunelerin mukavemetinin daha düşük olduğu, dış katmanı karbon elyafly numunelerin ise daha az çökme gösterdiği tespit edilmiş olup, çatlak derinliğinin artmasıyla malzeme mukavemetinin düştüğü tespit edilmiştir (Güneş, 2013).

105 °C sıcaklıkta 8 MPa basınca preslenen, cam elyaf epoksi reçine, karbon elyaf epoksi reçine ve cam karbon elyaf epoksi reçine kullanılarak yapılan 8 katmanlı kompozit numunelerin kırılma dayanıklılığına çatlak boyutu, açısı ve konumunun etkisi 100 dakika boyunca incelenmiştir. Malzemenin bir tarafında, her iki yanında ve ortasında 4mm, 6mm ve 8mm boyutlarında 0°, 30°, 45° ve 60° açılarda çatlaklar açılarak numuneler 1 mm/dk hızda çekme deneyine tabi tutulmuştur. En yüksek kırılma dayanıklılığı yalnızca karbon fiberlerin kullanıldığı kompozit malzemelerde, en düşük kırılma dayanıklılığı ise yalnızca cam elyafların kullanıldığı kompozit malzemelerde bulunmuştur. Çatlak açısı arttıkça kırılma tokluğunun azaldığı, çatlak boyutunun arttığı ve kompozitin taşıyabileceği yük miktarının azaldığı tespit edilmiştir (Arasan, 2014).

İki elyafın bir arada tek bir kompozit malzemede kullanılmasıyla elde edilen hibrit kompozit oldukça tok olduğu ve basma dayanımının düşük olduğu tespit edilmiştir. Üretilen hibrit kompozit malzemede istenilen özelliklerin elde edilmesi için üretim sırasında katman sırası değiştirilebilmektedir(Aktaş, 2015).

7 katlı cam elyaf epoksi reçine, karbon elyaf epoksi reçine ve cam-karbon elyaf epoksi reçine kullanılarak 5 farklı kombinasyonda numuneler üretilmiştir.Bu beş farklı

kombinasyon, kumaşların diziliş sırasının hibrit kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılmıştır( Agarwal et al.,2014).

**Tablo 2.7.**Çift yönlü cam ve karbon kumaşın diziliş sırası özellikleri (Agarwal et al., 2014)

| Sıra No | Code | Stacking Sequence | Glass Content | Carbon Content |
|---------|------|-------------------|---------------|----------------|
| 1       | GC1  | G-G-G-G-G-G-G     | % 50          | % 0            |
| 2       | GC2  | G-G-C-C-C-G-G     | % 32          | % 18           |
| 3       | GC3  | G-C-G-C-G-C-G     | % 32          | % 18           |
| 4       | GC4  | C-C-G-G-G-C-C     | % 22          | % 28           |
| 5       | GC5  | C-C-C-C-C-C-C     | % 0           | % 50           |

Note: G-Glass fabric C-Carbon fabric

6 katlı cam fiber(G) ve karbon fiberden(C) oluşan vakum destekli reçine infüzyon yöntemiyle C-G-G-C-G-G-C ve G-C-G-C-G-C-G olmak üzere iki farklı kombinasyonda hibrit kompozit malzeme üretilmiştir. Bu iki hibrit kompozit malzemeden alınan numunelere çekme ve eğme testleri yapılmıştır. Bunun sonucunda çekme mukavemeti, gerinim ve modül gibi çekme özelliklerinin, karbon kumaşın diziliminden önemli ölçüde etkilendiği bulunmuştur. Dış kısmında karbon kumaş bulunan katmanın yüksek çekme mukavemeti ve modüle sahip olduğu, dış kısmında cam kumaş bulunan katmanın ise nispeten daha düşük çekme özelliklerine sahip olduğu bulunmuştur ( Nagaraja et al. ,2020).

8 katlı cam fiber(G) ve karbon fiberden(C) oluşan elle yatırma yöntemiyle  $[C]_8$ ,  $[C_2G_2]_s$ ,  $[CG_3]_s$ ,  $[CGCG]_s$  ve  $[G]_8$  olmak üzere 5 farklı kombinasyonda malzeme üretilmiştir. Bu çalışmada hibrit kompozit laminatların çekme, basma ve eğme tepkilerine karşı farklı cam/karbon oranları ve diziliş sırası incelenmiştir (Zhang et al.,2012).

10 katlı cam fiber(G) ve karbon fiberden (C) oluşan elle yatırma yöntemiyle üretilen  $[C]_{10}$ ,  $[CGGCG]_s$ ,  $[GCGGC]_s$ ,  $[G]_{10}$  olmak üzere farklı dizilişlere sahip iki saf kompozit ve iki farklı hibrit kompozit üretilmiştir. Bu kompozitler sertlik, darbe, çekme, eğilme testlere tabi tutularak mekanik özellikleri araştırılıp birbirleriyle karşılaştırılmıştır. $[CGGCG]_s$  ve  $[GCGGC]_s$  hibrit kompozitler mekanik özellikleri incelenip karşılaştırıldığında şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- $[GCGGC]_s$  dizilimine sahip hibrit kompozit malzemenin çekme gerilimi, tokluğu ve eğilme uzaması,  $[CGGCG]_s$  dizilimine sahip hibrit kompozit malzemeden sırasıyla %7.1, %22.8 ve %21.7 daha yüksektir.

- [CGGCG]<sub>s</sub>'nin gerilme modülü ve eğilme modülü, [GCGGC]<sub>s</sub> ile karşılaştırıldığında sırasıyla %20 ve %36.2 daha yüksektir.
- [GCGGC]<sub>s</sub>'nin çekme mukavemeti ve eğilme mukavemeti, [CGGCG]<sub>s</sub>'den fazladır (Jesthy et al.,2018).

6 katlı cam fiber(G),karbon fiber(C) ve keten(F) fiberden oluşan elle yatırma yöntemiyle üretilen [C/F/G/G/F/C],[ G/C/F/F/C/G],[ F/G/C/C/G/F] olmak üzere 3 farklı dizilişe sahip hibrit kompozit malzeme üretilmiştir.

**Tablo 2.8.**Çift yönlü cam, karbon ve keten kumaşın diziliş sırası ve özellikleri (Sudheer et al.,2023)

| No | Fibre stacking sequences | Width (mm) | Lenght (mm) | Number of layers | thickness (mm) |
|----|--------------------------|------------|-------------|------------------|----------------|
| C1 | C/F/G/G/F/C              | 210        | 320         | 6                | 4              |
| C2 | G/C/F/F/C/G              | 210        | 320         | 6                | 4              |
| C3 | F/G/C/C/G/F              | 210        | 320         | 6                | 4              |

Bu malzemeler çekme, darbe ve eğme testlerine tabi tutulmuş olup üretilen hibrit kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu testler sonucunda yüzey katmanı olarak keten lifi içeren hibrit kompozit, destek olarak cam elyafın ve çekirdek olarak karbon elyafın yüksek mukavemet özelliklerinden dolayı daha iyi çekme mukavemetine sahiptir. Yüzey katmanındaki karbonun birleşiminden oluşan hibrit kompozit, çekirdek olarak cam katman ve destek olarak keten katmanı nedeniyle daha iyi darbe direnci göstermiştir. İstifleme sırasının yani yüzey katmanındaki karbon, destek katmanı olarak keten ve çekirdek olarak cam nedeniyle malzeme daha iyi dayanıklılık göstermiştir (Sudheer et al. , 2023).

Bu çalışmada günümüzde son zamanlarda önemi artan doğal fiber takviyeli, kompozit yapıların sentetik kompozit yapıların yerini alması amacıyla bu çalışmayı oluşturulmuştur. Çalışmada hibrit kompozit malzeme farklı oranlarda selülozik yapıda fiber lifler içeren kenevir ve muz tekyönlü fiberlere 4 farklı kat dizilimi uygulanarak (0/0),(0/45),(0/90) ve (+45/-45) polyester tabanlı fenolformaldehit reçine ile sıcak pres kullanılarak üretilmiştir. Çekme, eğilme, darbe ve ILSS testleri ASTM standartlarına uygun olarak uygulanmıştır ve bunun sonucunda fiberlerin diziliş sırasının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir (Prashanth,2021).

İki simetrik dört katmanlı cam/karbon hibrit kompozit ([GC]<sub>s</sub>,[CG]<sub>s</sub>) ile iki adet dört katmanlı karbon ve cam kompozit malzeme ([C]<sub>4</sub>, [G]<sub>4</sub>) elle yatırma ve sıkıştırılmalı kalıplama teknikleri kullanılarak ayrı ayrı üretildi.Bu malzemelerin çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı gibi statik mekanik özellikleri ile depolama



modülü, kayıp modülü ve kayıp faktörü gibi dinamik mekanik özellikleri ASTM standartlarına göre deneysel olarak değerlendirilmiş ve raporlanmış ve kompozit malzemelerin diziliş sırasının statik ve dinamik mekanik özellikler üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Sonuç olarak karbon fiber[C]<sub>4</sub>'ün , darbe dayanımı dışında cam fiber[G]<sub>4</sub>' ten daha yüksek mekanik dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, hibrit laminantlar arasında çekme mukavemeti ve darbe mukavemetindeki farklılık minimum düzeydedir ve [CG]<sub>s</sub> hibrit kompozit malzeme, [GC]<sub>s</sub> hibrit kompozitten daha yüksek eğilme mukavemetine sahip olduğu gözlenmiştir. Hibrit kompozit[CG]<sub>s</sub> 'nin depolama modülü, kayıp modülü ve kayıp faktörü, [GC]<sub>s</sub> hibrit kompozit ve [C]<sub>4</sub> karbon fiber kompozit malzemedan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir(Murugan et al., 2014).

Cam fiber (FG), kenaf (K) ve jüt (J) takviye malzemeler kullanılarak 4 farklı hibrit kompozit malzeme üretilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, doğal elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe enerjisi altındaki dinamik tepkisini incelemektir. Ayrıca bu malzemelerin mekanik özelliklerini incelemek için çekme ve darbe deneyleri yapılmıştır. Kompozitlerin konfigürasyonları; FG-J-K-J-FG, FG-K-K-K-FG, FG-J-J-J-FG, FG-K-J-K-FG En iyi iki tasarım, 10 J'den 40 J'ye kadar olan darbe enerjisi seviyelerine göre seçildi. Bu dizilimlerden FG-J-J-J-FG ve FG-J-K-J-FG'nin, diğer iki dizilime göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Üçüncü numune ise en yüksek çekme testi sonucu olan 124.05 MPa'ya ulaştığı tespit edilmiştir. Yapılan testlerden, her iki tasarımın da absorbe edilen enerjinin yanı sıra doğrusal olarak artan darbe kuvvetine sahip olduğu görülmüştür. Üçüncü dizilim, dördüncü dizilime kıyasla daha düşük bir tepe kuvvetine sahiptir. Bu nedenle dördüncü numunenin darbe dayanımı daha iyi olduğu tespit edilmiştir(Noret al.,2017).

Cam (G) ve karbon (C) fiberden meydana gelen prepreglerin dizilim sırası değiştirilerek dört tip simetrik tabaka yapısı oluşturulmuştur. Laminat kompozitlerin üretiminde hot press yöntemi kullanılmıştır. Her bir kompozit yapıda 48 tane prepreg katman kullanılmış olup, (C8/G8/G8)<sub>s</sub>, (G8/C8/G8)<sub>s</sub>, (G8/G8/C8)<sub>s</sub>ve (C8/G8/C8)<sub>s</sub> kombinasyonlarda düzenlenmiştir. Hazırlanan hibrit kompozit malzemeler ASTM standartlarında kesilerek 3 noktadan eğme testine tabi tutularak malzemenin mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Eğilme testlerinin sonuçları, en yüksek eğilme mukavemetinin (1260 MPa) (G8/C8/G8)<sub>s</sub> konfigürasyonlu hibrit kompozit malzemedede olduğunu, en yüksek eğilme modülünün (79.64 GPa) ise (C8/G8/C8)<sub>s</sub> konfigürasyonlu hibrit kompozitte olduğunu göstermiştir (Gul,2019).

Bu çalışmada karbon(C) ve cam olmak(G) üzere 12 katlı  $[(C_0^{0_{Twill}})_6/(G_0^{0_{Twill}})_6]$ ,  $[(C_0^{0_{Twill}})_6/(G_0^{0_{tek yönlü}})_6]$ ,  $[(C_{45^{0_{tek yönlü}}})_6 / (G_0^{0_{Twill}})_6]$  olacak şekilde 3 farklı kombinasyonda elle yatırma tekniğiyle epoksi reçine kullanılarak üretilmiştir.

**Tablo 2.9.**Numunelerde kullanılan elyafların oryantasyon açıları ( İmak vd.,2016)

| Numune Numarası | 1     | 2     | 3     |
|-----------------|-------|-------|-------|
| Karbon Elyaf    | Twill | Twill | 45°   |
| Cam Elyaf       | Twill | 0°    | Twill |

Plakalar, otomatik kontrollü ve elektrikli ısıtılmalı bir hidrolik ısı presi ve 30 bar basınçta tutulan bir pompa ünitesi kullanılarak üretildi. Pişirme işlemi, sıcaklığın kademeli olarak 30, 50, 70 ve 100 santigrat dereceye yükseltilmesiyle gerçekleştirildi. 3 farklı numune için kompozit plakalar Tablo 2.9’da gösterilen dizilimde ASTM 3479 M standardına göre 25x250 mm ebatlarında kesilerek her kombinasyonda 15 numune olmak üzere 45 numune ile üretildi. Elde edilen numuneler çekme ve yorulma testlerine tabi tutulmuştur.

- Çekme testlerisönucundamaksimum stress karbon twill/ cam twill dizilimli numunede 517 MPa, minimum stres ise karbon 45° / cam twill dizilimli numunede 216 MPa olarak elde edilmiştir.
- Karbon twill/ cam twill dizilimli numunede maksimum yorulma stresi 483 MPa, karbon 45° / cam twill dizilimli numunede ise minimum yorulma stresi 143 MPa olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni, fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin fiberlerin yönüne bağlı olarak değişmesidir.
- Aynı oryantasyon ve oryantasyona sahip numunelerin mekanik özelliklerinde, fiber ve matris arasındaki zayıf bağlanma, fiberlerin tekdüze olmayan mekanik özellikleri ve fiberlerin matris içinde eşit olmayan dağılımı gibi nedenlerden dolayı farklılıklar gözlemlenmiştir(İmak, vd. ,2016).

10 katlı karbon ve cam fiberden üretilen  $[G3C2]_s$  ve  $[C2G3]_s$  dizilimindeki iki hibrit kompozit malzemenin diziliş sırasının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve bu kapsamda üretilen hibrit kompozit malzeme çekme, eğme ve darbe deneylerine tabi tutulmuştur. Bu deneylerin sonucunda  $[G3C2]_s$  dizilimine sahip hibrit kompozit malzemenin çekme geriliminin  $[C2G3]_s$  dizilimine göre % 11.5 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. $[C2G3]_s$  dizilimine sahip hibrit kompozit malzemenin eğilme gerilmesinin

[G3C2]<sub>s</sub> dizilimine sahip hibrit kompozit malzemeye göre % 22.9 artış gösterdiği görülmüştür(Jesthi et al.,2018).

Diğer bir çalışmada isekarbon ve cam elyaflar kullanılarak 4 katlı C<sub>4</sub>, G<sub>4</sub>, CGGC ve GCCG olmak üzere 4 farklı diziliştekompozit malzemeler üretilmiştir. Bu malzemelere çekme, 3 noktadan eğme ve titreşim testi yapılmıştır. Bu testlerin sonunda diziliş sırasının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir(Aydın vd.,2018).

4 katlı olacak şekilde karbon (C) ve bazalttan (B) oluşan [CBBC],[BCCB],[BCBC],[CBCB],[BBCC],[CCCC] ve [BBBB] olmak üzere 7 farklı dizilişe sahip kompozit malzemeler sıkıştırarak kalıplama tekniği kullanılarak üretilmiştir. Üretilen bu kompozit malzemeler ASTM standartlarına göre kesilip, çekme, eğilme, sertlik ve darbe testlerine tabi tutulmuştur. Bu deneyler sonucunda üst katmanı karbon fiber olan laminatlar, üst katman olarak bazalt fiberden üretilen laminatlara göre daha iyi mekanik mukavemet ortaya koyduğu tespit edilmiştir (Naveen et al.,2021).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

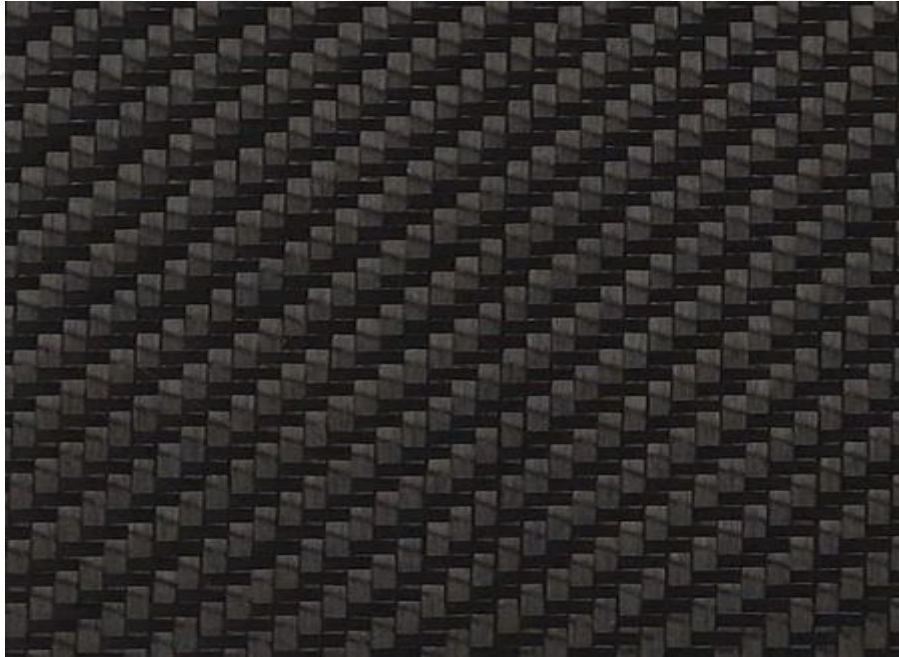
#### 3.1. Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1. Karbon fiber

Bu çalışmada takviye malzemesi olarak Fibermak A.Ş'den temin ettiğimiz Karbon Fiber 245 twill dokuma kumaş kullanılmıştır. Kumaşın kalınlığı 0,39 mm'dir.

**Tablo 3.1.**245 gr Karbon fiber kumaşın mekanik özellikleri

| Özellikler        | Birim             | Karbon Fiber Twill |
|-------------------|-------------------|--------------------|
| Yoğunluk          | g/cm <sup>3</sup> | 1.76               |
| Elastisite Modülü | GPa               | 238                |
| Çekme Dayanımı    | MPa               | 3950               |
| Termal İletkenlik | W/m               | 17                 |
| Kopma Uzaması     | %                 | 1.7                |
| Elyaf Çapı        | µm                | 7                  |
| Ağırlığı          | g/m <sup>2</sup>  | 245                |



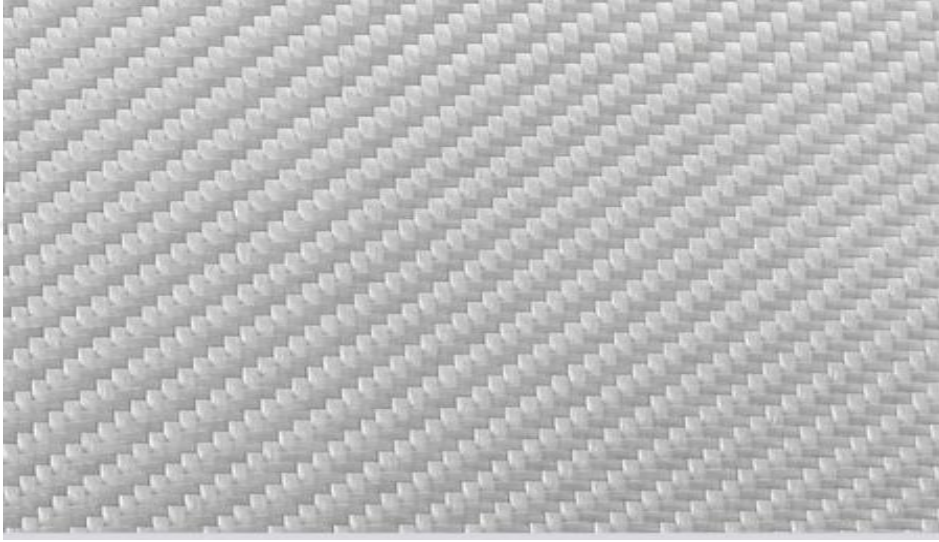
**Şekil 3.1.** 245 gr/m<sup>2</sup> Karbon fiber twill dokuma kumaş

### 3.1.2. Cam fiber

Hibrit kompozit malzememizi üretmemiz için diğer takviye malzememiz cam fiber olarak E-Cam 390gr/m<sup>2</sup> twill dokumalı kumaş kullanılmıştır. Malzeme Fibermak A.Ş'den temin edilmiştir. Cam fiber kumaşın kalınlığı 0,32 mm'dir.

**Tablo 3.2.**390 gr E-Cam fiber kumaşın mekanik özellikleri

| Özellikler        | Birim             | Cam Fiber Twill |
|-------------------|-------------------|-----------------|
| Yoğunluk          | g/cm <sup>3</sup> | 2.56            |
| Elastisite Modülü | GPa               | 76              |
| Çekme Dayanımı    | GPa               | 3.5             |
| Kopma Uzaması     | %                 | 4.8             |
| Elyaf Çapı        | μ                 | 17              |
| Ağırlığı          | g/m <sup>2</sup>  | 390             |



**Şekil 3.2.**390 gr/m<sup>2</sup> E-Cam fiber twill dokuma kumaş

### 3.1.3. Epoksi reçine ve sertleştirici

Matris olarak Solvent tipli prepreg reçine F-RES 21 (Fibermak Kompozit, Türkiye) kullanılmıştır. Bu reçine düşük viskoziteye ve yüksek lif nemi içeriğine sahiptir ve ayrıca 90°C'den 150°C'ye kadar geniş bir kurlenme aralığına sahiptir. Sertleştirici olarak F-HARD 22 (Fibermak Kompozit, Türkiye) kullanılmıştır. Reçine ve sertleştirici arasındaki ağırlık oranı 21/100'dür. Jelleşme süresi 80°C'de 30-60 dakikadır.

**Tablo 3.3.F-RES 21 reçine özellikleri**

|                                 |              |                   |
|---------------------------------|--------------|-------------------|
| <b>Görünüm</b>                  | Berrak, sıvı |                   |
| <b>Renk</b>                     | Sarı         |                   |
| <b>Viskozite (25°C)</b>         | 400-650      | mPa. s            |
| <b>Yoğunluk (25°C)</b>          | 1.05         | g/cm <sup>3</sup> |
| <b>Raf Ömrü (Oda sıcaklığı)</b> | 12           | Ay                |

**Tablo 3.4.F-HARD 22 sertleştirici özellikleri**

|                         |             |                   |
|-------------------------|-------------|-------------------|
| <b>Görünüm</b>          | Koyu macun  |                   |
| <b>Renk</b>             | Beyaz       |                   |
| <b>Viskozite (25°C)</b> | 35000-45000 | mPa. s            |
| <b>Yoğunluk (25°C)</b>  | 1.1         | g/cm <sup>3</sup> |
| <b>Raf Ömrü (4°C)</b>   | 12          | Ay                |

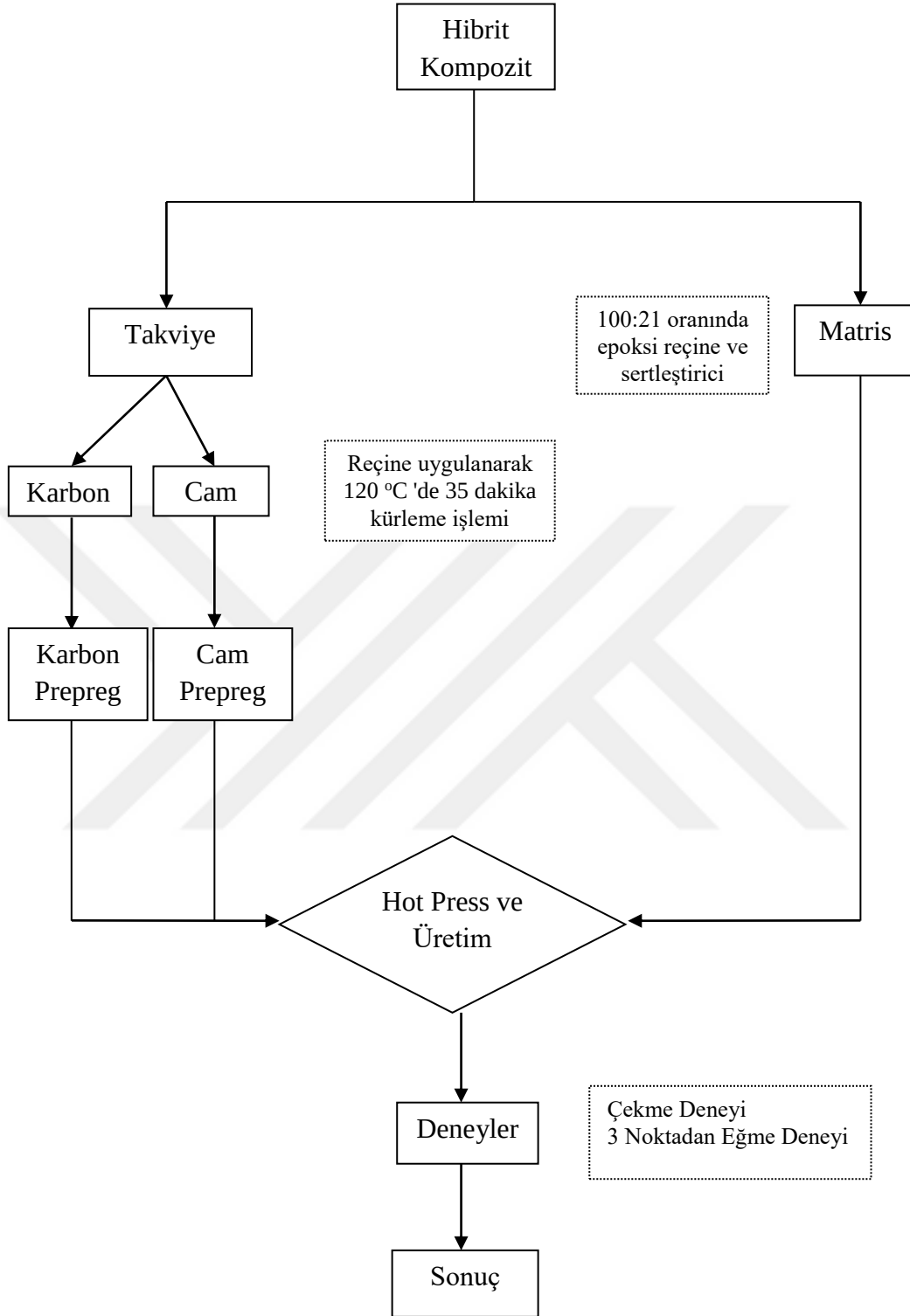
**Tablo 3.5.F-RES21 reçine ve F-HARD 22 sertleştirici karışımın özellikleri**

| <b>Reçine ve Sertleştirici Karışımın Özellikleri</b>                                     |                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Renk                                                                                     | Beyaz                                                            |
| Karışım Oranı (Ağırlıkça)                                                                | F-RES 21 (Reçine): 100 gr<br>100 F-HARD 22 (Sertleştirici): 21gr |
| Karışım Viskozitesi (25°C)                                                               | 500-800 MPa s                                                    |
| Pot Life (25°C)                                                                          | 100 gr: 24 saat                                                  |
| Jelleşme Süresi                                                                          | 80 °C: 30-60 dakika                                              |
| Prepreg Raf Ömrü                                                                         | 23 °C' de 6-9 ay<br>-18 °C' de 36 ay                             |
| Prepreg Kürleme<br>(4 kat 245 gr/m2 twill dokuma<br>karbon fiber kumaş için geçerlidir). | 90°C' de 10 saat<br>120 °C' de 35 dakika<br>150 °C' de 20 dakika |

**Tablo 3.6.F-RES21 reçine ve F-HARD22 sertleştirici malzemelerinin karışımının mekanik özellikleri**

| <b>Reçine ve Sertleştirici Karışımın Mekanik Özellikleri</b> |                               |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Camsı Geçiş Sıcaklığı                                        | 120 °C' de 1 saat: 120-125 °C |
| Çekme Gerilimi                                               | 80MPa                         |
| Çekme Modülü                                                 | 3300 MPa                      |
| Eğilme Gerilimi                                              | 125 MPa                       |
| Eğilme Modülü                                                | 3200 MPa                      |

Öncelikle Karbon Fiber 245 twill dokuma kumaş ve E-Cam 390gr/m<sup>2</sup> twill dokumalı kumaşlara 100 gram F-RES21 reçine 21 gram F-HARD22 sertleştiriciden meydana gelen reçine karışımı kumaşın her tarafına eşit olarak uygulanmıştır. Reçine kaplanan kumaş 120 °C sıcaklıkta 35 dakika kürlenerek her iki kumaş içinde reçine oranı % 35 olan prepregler üretilmiştir. Sıcak presleme ile elde edilen numunelerde matris malzemesi olarak F-RES21 reçine ve F-HARD22 sertleştirici kullanılmıştır. Kompozit uygulamalarda bu tip reçineler genellikle solvent tipi prepreglerde kullanılır. Belirtilen parametrelerin girilmesi gerekmektedir, aksi takdirde sistem koşullarında olumsuz değişiklikler olabilir. Karıştırma esnasında yan çeperlerde ve dipte kalan bileşenler sistem içerisine tamamen dâhil olmalıdır. Karışımın büyük miktarları hazırlanırken ekzotermik reaksiyonlar nedeniyle servis ömründe azalma görülebilir. Fazla miktarlarda karışım yerine birden fazla az miktarda karışım önerilir. Reçine sistemine, kullanım ve prepreg prosesine göre %10 ila %20 arasında epoksi solvent katılabilir.



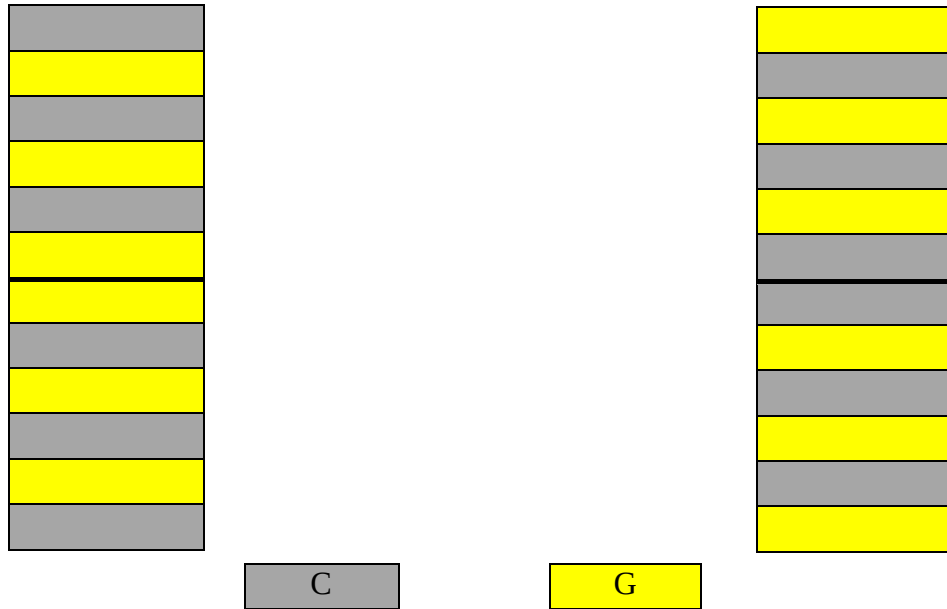
**Şekil 3.3.** Üretim akış şeması



### 3.2. Hibrit Kompozit Numunelerin Üretimi

Bu tez çalışmasında takviye olarak Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 'de özelliklerini belirttiğimiz Karbon fiber 245 twill dokuma kumaş ile E-Cam 390 twill dokuma kumaş kullanılmıştır. Matris olarak Tablo 3.3. ve Tablo 3.4 'te özelliklerini belirttiğimiz F--RES21 reçine ve F-HARD22 sertleştirici kullanılarak 12 tabakalı hibrit kompozit malzeme simetrik olacak şekilde üretilmiştir. Bu tezde kullanılan tüm hibrit kompozit plakalar Fibermak Mühendislik Makina Kalıp Kompozit Sanayi ve Tic. Ltd. Bu şirket tarafından üretilmiştir. Hibrit kompozitler, simetrik, karbon fiberin "C", cam fiberin "G" olarak ifade edildiği [CGCGCG]<sub>s</sub> ve [GCGCGC]<sub>s</sub> diziliminde tasarlanarak 500 mm x 500 mm boyutunda plakalar, kumaşlardan üretilen prepreglerin istenilen dizilimde istiflenerek sıcak presleme tekniği ile üretilmiştir. Şekil 3.3'te çizilen akış şemasında bu üretim aşama aşama belirtilmiştir.

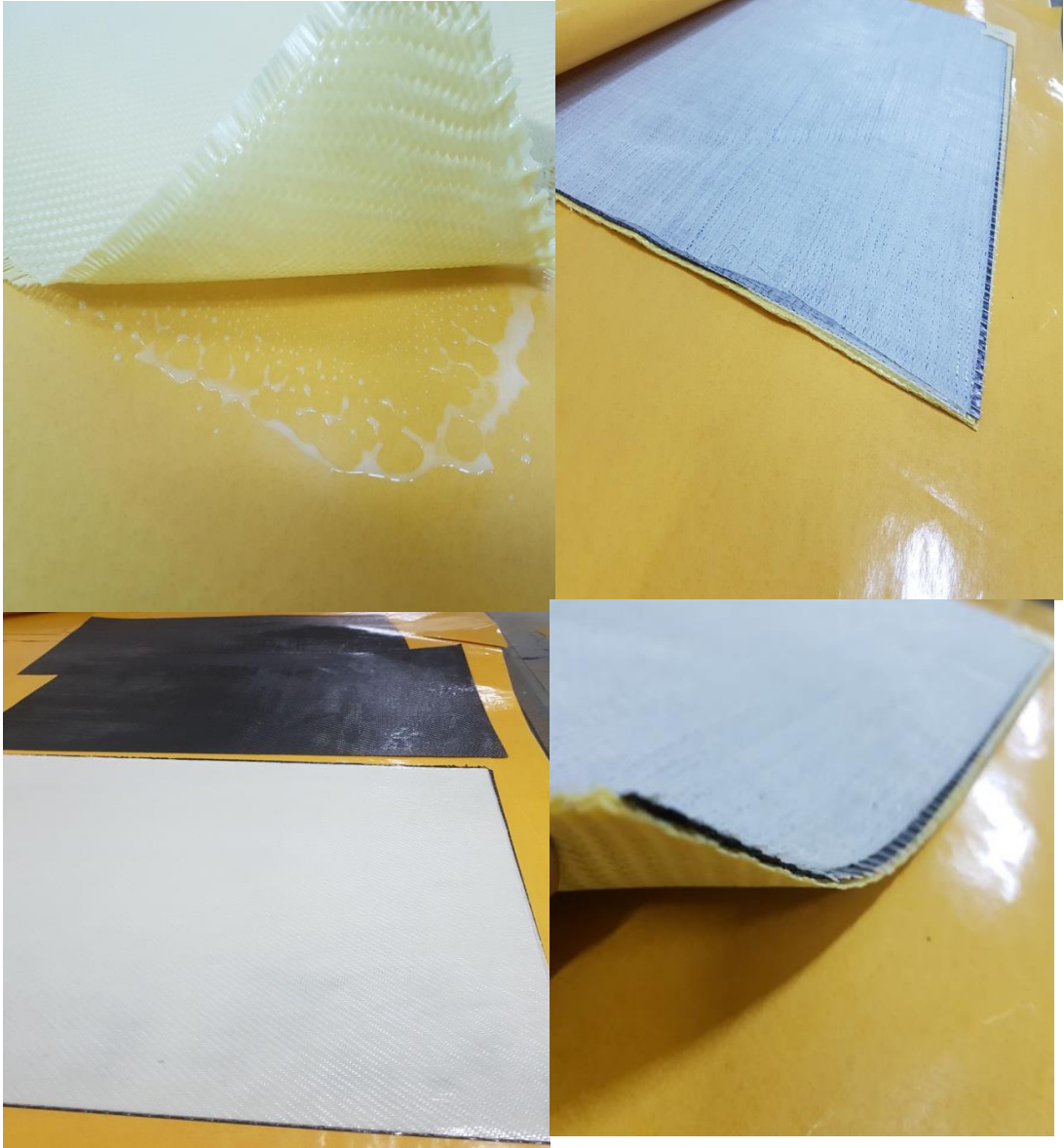
Şekil 3.4'te 12 katmanlı hibrit kompozit bir plaka oluşturmak için elyaf kumaşların nasıl yerleştirildiğinin şematik bir gösterimi bulunmaktadır. Bu çalışmada elyafların diziliş sırasının ve hibridizasyonun kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.4. Tabakalı hibrit kompozitlerin dizilimi

Elyaf lar dizilim yapılmadan önce prepreg hale getirilmiştir. Elyaf lar 500x500 mm kesildikten sonra her bir elyaf reçine ve sertleştirici olarak ağırlıkça karıştırma oranı 21/100 oranında reçine emdirilerek kürleşmeye bırakılarak prepreg üretimi

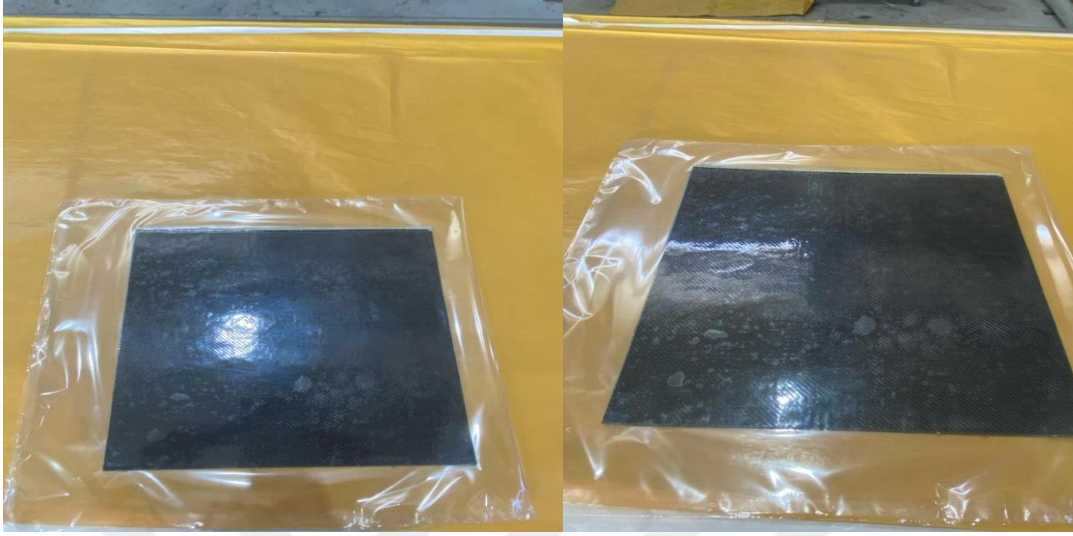
yapılmıştır. Reçine emdirilen kumaş 120 °C sıcaklıkta 35 dakika kürlenmiştir. Şekil3.5'te üretilen hibrit kompozit malzemenin 500-mm x 500-mm boyutundaki kesimden önce elyaf tabakalarının tezgâha yatırıldığı kürlenmeye bırakıldığı görseller verilmektedir.



**Şekil 3. 5.** Elyaf tabakalarının tezgâha yatırıldığı kürlenmeye bırakıldığı görselleri

Bu çalışmada prepreg malzeme kullanmamızın sebebi prepreg malzeme, özellikle hot press yöntemine uygun bir yapı sağlar, çünkü reçine içeriklerinin ve fiberlerin kontrollü bir şekilde birleşmesini sağlar. Prepreg katmanların arasındaki hava boşluklarını ortadan kaldırmak ve reçinenin daha homojen dağılmasını sağlamak için vakum torbası kullanılır. Bu, kompozitin dayanıklılığını artırır. Hazırlanan prepreg katmanları, belirlenen düzene vakum torbasına yerleştirilir. Katmanların birbirine

paralel olması sağlanmalıdır. Şekil 3.6'da oluşturulan prepreglerin sıcak prese bırakılmadan önceki görselleri verilmiştir.



Şekil 3.6. Prepreglerin sıcak prese bırakılmadan önceki görseli

Şekil 3.7 'de gösterildiği üzere üretilen prepregler, 12 katlı simetrik [CGCGCG]s ve [GCGCGC]siki farklı dizilimde simetrik olacak şekilde kalıp üzerine yerleştirilmiştir. 9 bar basınç uygulanıp, 120 °C 'de 1 saat kürlenmiştir.



Şekil 3.7. Hot press işlemi



Kürlenme işleminden sonra üretilen malzemeler Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Üretilen hibrit kompozit malzemelerin elyafların diziliş konfigürasyonu Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

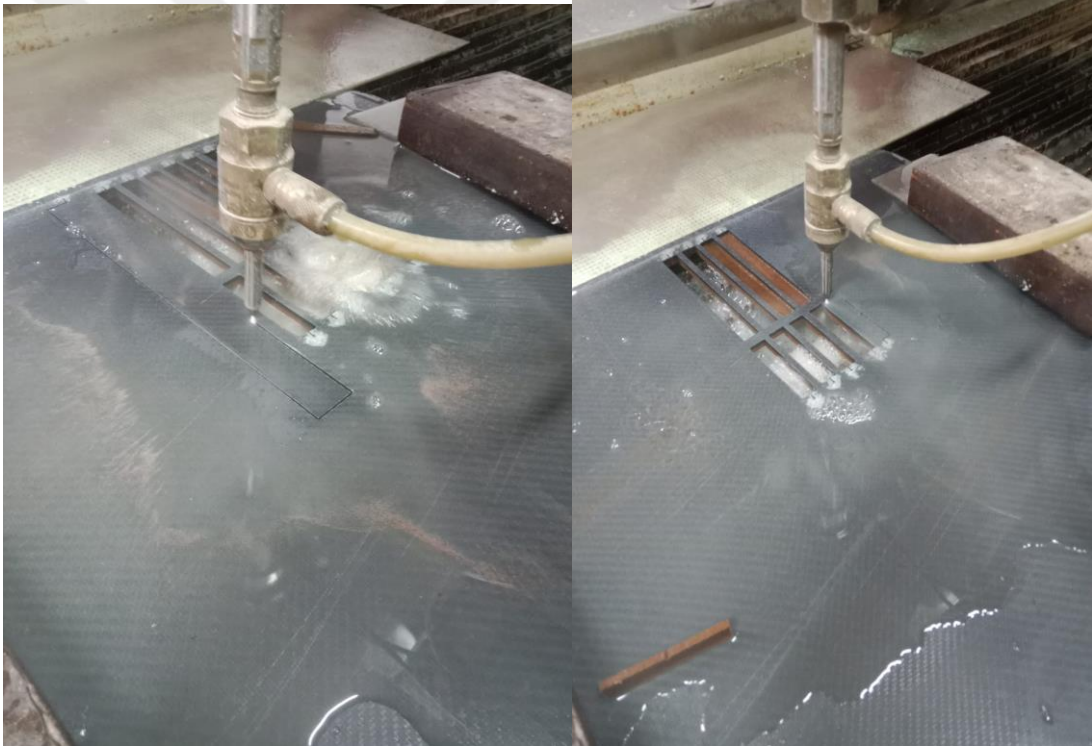


**Şekil 3.8.** Üretilen hibrit kompozit malzemeler

**Tablo 3.7.** Üretilen kompozit numunelerin elyaf dizilimi

| Kodlar | İstifleme Dizilimi    | Diziliş Sırası          |
|--------|-----------------------|-------------------------|
| K1     | [CGCGCG] <sub>s</sub> | C-G-C-G-C-G-G-C-G-C-G-C |
| K2     | [GCGCGC] <sub>s</sub> | G-C-G-C-G-C-C-G-C-G-C-G |

Tablo 3.7 'de belirtildiği gibi üretilen numunelerin hepsi 12 tabakalı olup 6 tabaka karbon kumaş ve 6 tabaka cam kumaş kullanılmıştır. Her iki kombinasyonda da hibrit kompozit malzemelerin dizilimi simetriktir. Burada K1 1'inci kombinasyondaki diziliş sırasını, K2 2'nci kombinasyondaki diziliş sırasını, C karbon fiberi, G cam fiberi temsil etmektedir. Daha sonra üretilen hibrit kompozit numuneler su jeti ile kesilerek ASTM standartlarına uygun test numuneleri elde edilmiştir.



**Şekil 3.9.** Su jeti ile numunelerin kesilmesi

Test numuneleri her bir hibrit kompozit numune için çekme testi 5 adet, üç noktadan eğme testi için 5 adet olacak şekilde ASTM standartlarına uygun olarak su jeti ile kesimi yapılmıştır.

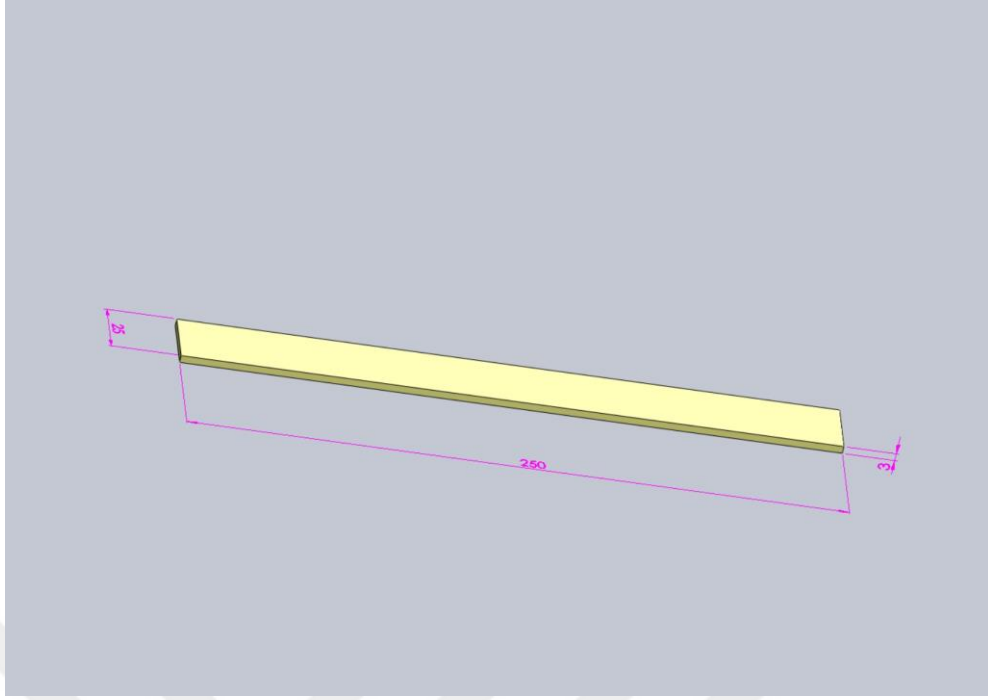
### 3.3. Mekanik Test Aşamaları

Üretilen 2 farklı dizilimdeki hibrit kompozit malzememizin diziliş sırasının mekanik özelliklerine etkisini incelemek öncelikle numunelerin mekanik özelliklerini elde etmemiz gerekmektedir. ASTM standartlarında kesilen numuneleri çekme ve 3 noktadan eğme testlerine tabi tutup numunelerin mekanik özelliklerini tespit edip, bu özelliklere göre iki numune arasında karşılaştırma yapıp sonuçları inceleyeceğiz.

#### 3.3.1. Çekme testi

Çekme testi, standartlara uygun olarak üretilen numunelerin bir eksen boyunca kırılıncaya kadar sabit oranda çekme kuvvetine tabi tutulduğu bir yöntemdir. Bu test sonunda elde edilen veriler doğrultusunda gerilme kuvveti altında malzemenin nasıl davranış göstereceği ve bu malzemenin kullanım alanlarındaki etkinliği hakkında bilgi edineceğiz. Bu testten elde edilen veriler kullanılarak malzemenin mekanik özellikleri hesaplanır. Çekme test cihazının biri sabit, diğeri hareketli olmak üzere iki farklı çenesi vardır. Test, numunenin bu çenelere takılması ve numunenin hareketli çenede sıkılmasıyla başlar. Kuvvet sayesinde numunede oluşan uzama, cihazın bağlı olduğu bilgisayara kaydedilmektedir.

Öncelikle çekme deneyi için ASTM D3039 standartlarında kesilmiş numunenin Solidworks programında 3 boyutlu çizimi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.10.** Çekme deneyinde kullanılacak numunenin 3 boyutlu çizimi

Tablo 3.7 'de verilen dizilimlerde üretilen 2 farklı numune için kompozit plakalar ASTM D3039 standartlarına göre 25 mm × 250 mm boyutlarında kesilmiş ve her numune için 5 adet olacak şekilde 10 adet numune elde edilmiştir. Kompozit numunelerin çekme deneylerinin çekme cihazında hasar görmeden sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi için çekme numunelerinin çekme çenesine bağlanan yüzeylerine 25 mm × 60 mm boyutlarında pabuç kesilerek yapıştırılmıştır. Pabuçlu hazırlanan K1 ve K2 numunelerinin görüntüleri Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.11.** Çekme testi öncesi pabuç takılmış kompozit numunelerin görüntüsü

Çekme deneyi Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarında yapılmıştır. Şekil 3.12' de gösterildiği gibi hibrit kompozitlerin çekme testleri 250 kN kapasiteli hücreyle Shimadzu Marka Universal test cihazında 1 mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir

Çekme gerilmesi için eşitlik 3.1 ve 3.2'deki formüller kullanılarak çekme gerilmesi grafikleri oluşturulmuştur.

$$\sigma_{\text{Ç}} = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

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

Bu denklemlerde  $\sigma_{\text{Ç}}$ : Çekme gerilmesi (MPa), F:Uygulanan yük (N),A: numunenin kesit alanı (mm<sup>2</sup>),  $\varepsilon$ : şekil değiştirme,  $\Delta L$ :Uzama miktarı (mm), $L_0$ : Numunenin ilk boyu (mm)'dir.





Şekil 3.12.Çekme test cihazı ve deneyin yapılışı

### 3.3.2. Üç noktadan eğme testi

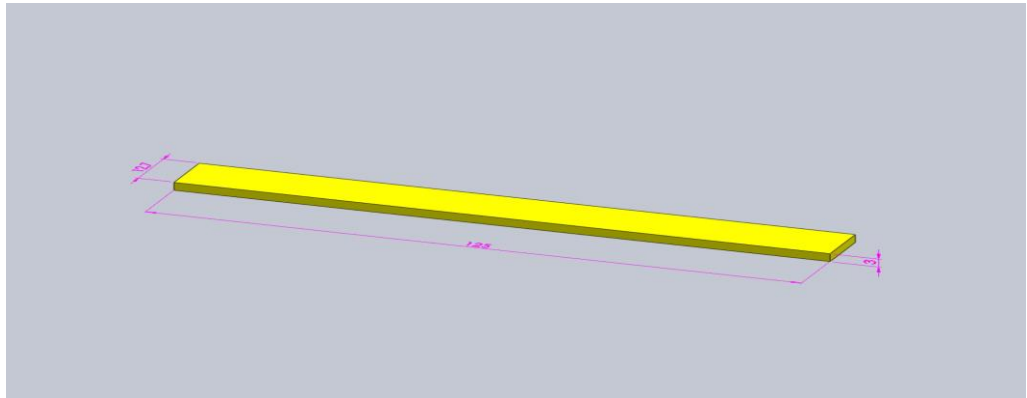
Bir malzemenin eğilme sırasındaki mekanik özelliklerini belirlemek için üç nokta eğilme testi yapılır. Test düzeneğinde numune iki destek üzerine yerleştirilir ve orta noktadan eğilmeye zorlanır. Test numunesine kuvvet uygulandığında numunenin iç yüzeye yakın kısımlarında basma gerilmeleri, dış yüzeye yakın kısımlarında ise gerilmeler oluşur. Buradaki temel hesaplama maksimum bükülme gerilimini hesaplamaktır. Maksimum eğilme gerilmesi hesaplamak için eşitlik (3.3)'te belirtilen formül kullanılır(Gör, 2018).

$$\sigma_e = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = \frac{6 \times D \times d}{L^2} \quad (3.4)$$

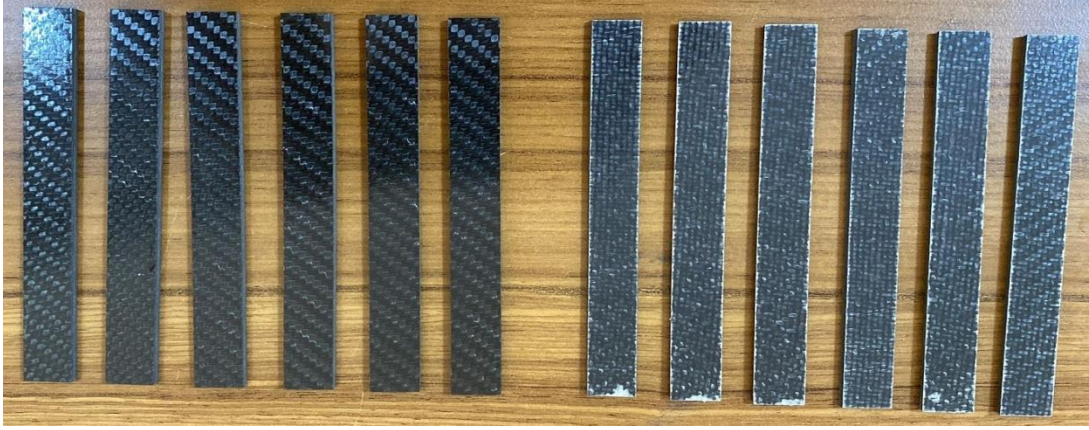
Bu denklemlerde  $\sigma_e$ : Eğilme gerilmesi (N/mm<sup>2</sup>), F: Kuvvet (N), L: İki destek arası mesafe (mm), b: Genişlik (mm), h: Yükseklik (mm),  $\varepsilon$ : Kirişin dış yüzeyindeki şekil değiştirme (mm/mm), D: Sehim, d: Kirişin yüksekliği (mm) olarak belirtilmiştir.

Şekil 3.13'te üç noktadan eğme deneyinde kullanacağımız ASTM D790 standartlarında kestiğimiz numunenin üç boyutlu çizimi gösterilmiştir.



Şekil 3.13. 3 noktadan eğme deneyinde kullanılacak numunenin 3 boyutlu çizimi

Şekil 3.14'te gösterildiği gibi üç noktadan eğme testi için Tablo 3.7 'de verilen dizilimlerde üretilen 2 farklı numune için kompozit plakalar ASTM D790 standartlarına göre 12.7 mm × 125 mm boyutlarında kesilmiş ve her dizilim için 5 adet olacak şekilde 10 adet numune elde edilmiştir. Bu deneyde universal test cihazının çeneleri çıkartılarak üç noktadan eğme deneyi yapılacak şekilde yeniden düzenlenmiştir.



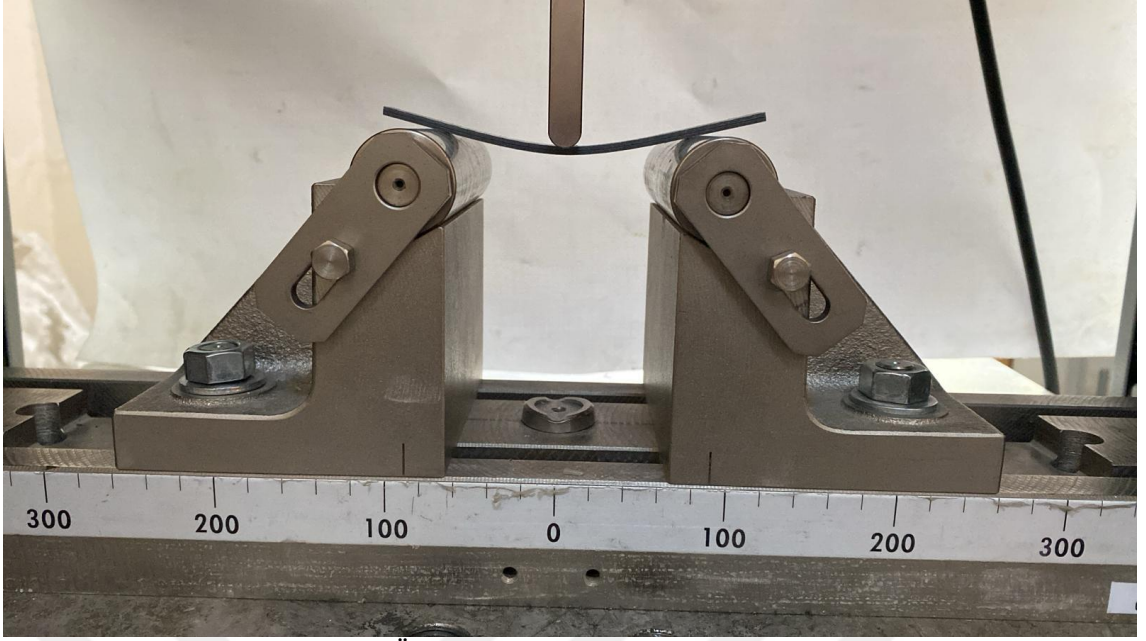
**Şekil 3.14.** 3 Noktadan eğme testi numuneleri

Üç noktada eğme testi Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarında yapılmıştır. Hibrit kompozitlerin eğilme testleri, daha doğru ölçüm için 5 kN kuvvet hücresine sahip uluslararası Shimadzu test makinesinde 1 mm/dk hızında gerçekleştirildi. Çekme testleri aparata bağlı düz çenelere tutturulan numuneler çekilerek, eğilme testleri ise kelepçe çeneleri çıkarılarak üç nokta eğme test aparatı cihaza takılarak yapılmıştır. Eğme testi sırasında destek arası mesafe numune kalınlığının 32 katı olacak şekilde ayarlanmıştır. İcra ettiğimiz üç noktadan eğme test düzeneği Şekil 3.15'te, numuneye üç noktadan eğme testinin uygulanma anı Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.15.** Üç noktadan eğme testi





**Şekil 3.16.** Üç noktadan eğme testinin uygulanma anı

Üç noktadan eğme testi uygulandıktan sonra numunenin son hali Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



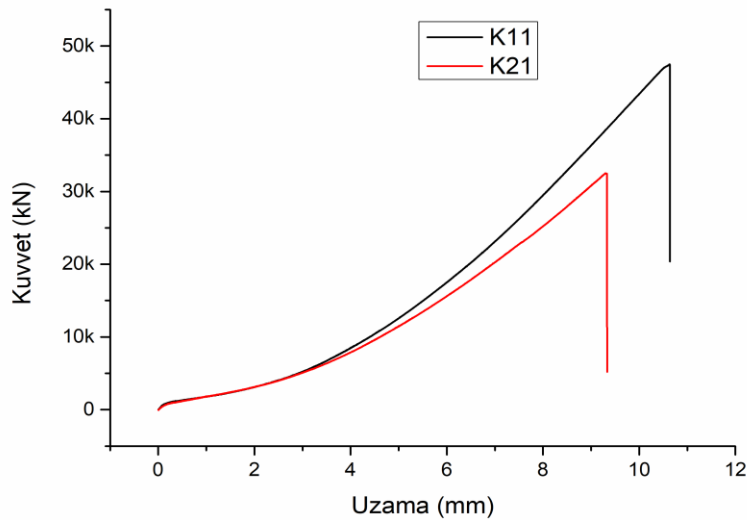
**Şekil 3.17.** Üç noktadan eğme testine tabi tutulan numunenin son hali

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Üretilen farklı dizilişe sahip her iki hibrit kompozit malzemelerden elde edilen numuneler çekme ve üç noktadan eğme testlerine tabi tutulmuş bunun sonucunda numunelerin kuvvet-uzama, çekme ve eğme gerilmeleri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar alt başlıklarda detaylı olarak açıklanmıştır.

##### 4.1. Çekme Deneyi Sonuçları

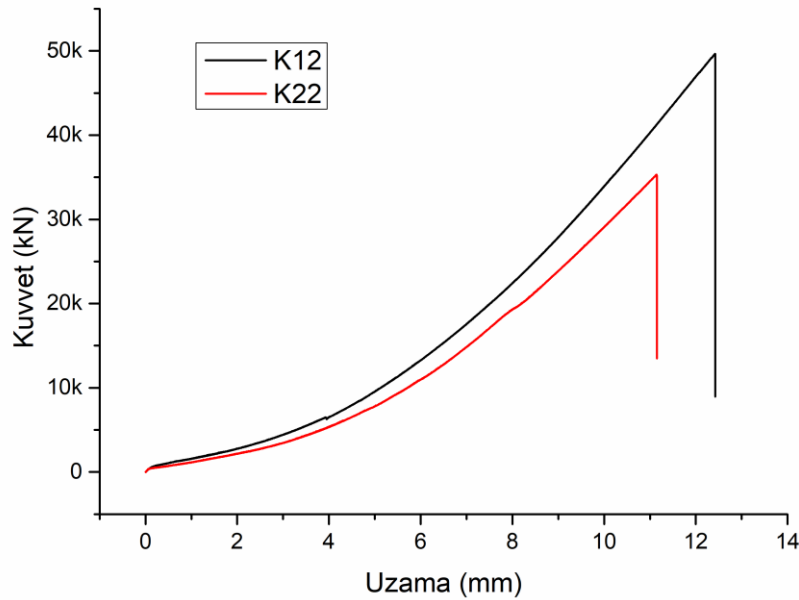
Cam fiber ve Karbon fiber kumaşları prepreg haline getirip ürettiğimiz farklı kombinasyona sahip hibrit kompozit numuneler çekme deneyine tabi tutulmuştur. Tablo 3.7’de gösterildiği üzere birinci kombinasyonda dizilime sahip numunemiz K1, ikinci kombinasyondaki dizilime sahip numunemiz K2 olarak adlandırılmıştır. K1 numunesinden ASTM 3039 standartlarında 5 numune, K2 numunesinden 5 olmak üzere toplam 10 tane numune elde edilmiştir. Ancak K1 ve K2 numunesinden iki tanesine çekme deneyi uygularken deneyin yarısında pabuç koptuğu için o numuneden sağlıklı veri alınamamıştır. Bu yüzden çekme deneyi K1 numunesinden 3 adet numuneden ve K2 numunesinden 3 adet numuneden elde ettiğimiz verilerle karşılaştırma yapılmıştır. K1 numunesinden elde ettiğimiz 3 numune K11, K12, K13 olarak, K2 numunesinden elde ettiğimiz 3 numune K21, K22, K23 olarak adlandırılmıştır. Öncelikle K11 ve K21 numunelerine ait kuvvet uzama grafiği Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. K11 ve K21 numunelerinin kuvvet-uzama grafiği

Şekil 4.1 'de karbon ve cam fiberden üretilen farklı dizilişlerdeki K11 ve K21 hibrit kompozit numunelerinin kuvvet uzama grafiği incelendiğinde K11 numunesinde uygulanan kuvvet 47429.7 N'a ulaştığında malzemede kopma meydana gelmiştir. Kopma anında malzemede 10.63 mm uzama meydana gelmiştir. K21 numunesini incelediğimizde ise malzemeye uygulanan kuvvet 32429.7 N'a ulaştığında kopma meydana gelmiştir. K21 numunesinin boyunda kopma anında 9.33 mm uzama meydana gelmiştir. Burada K1 kombinasyonuna ait numunenin kopması için K2 kombinasyonuna ait numuneye kıyasla daha çok kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır.

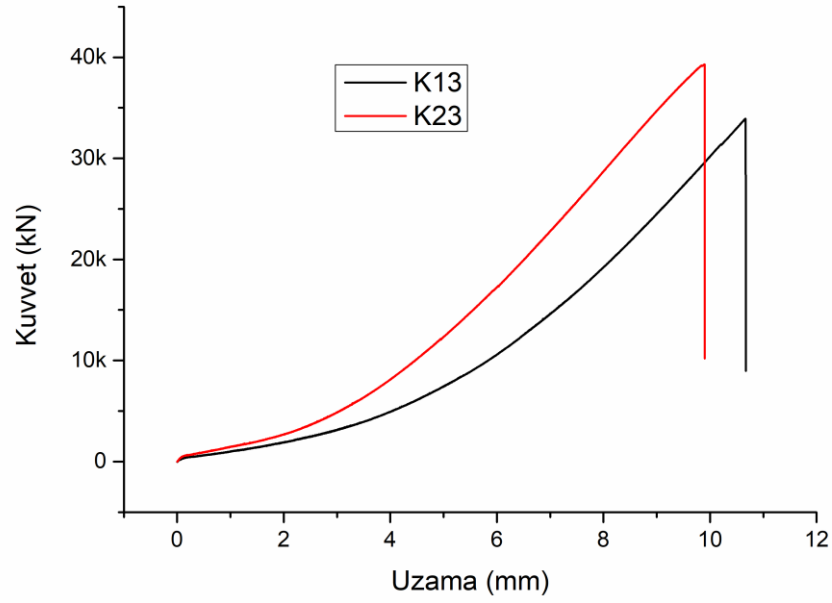
Şekil 4.2'de ise K12 ve K22 numunelerine ait kuvvet uzama grafiği belirtilmiştir.



Şekil 4.2. K12 ve K22 numunelerinin kuvvet uzama grafiği

Şekil 4.2'deki K12 ve K22 kuvvet uzama grafiğini incelediğimizde K12 numunesine uygulanan kuvvet 49640.6 N'a ulaştığında kopma meydana gelmiştir. Kopma anında malzeme ilk boyuna göre 12.42 mm uzadığı gözlemlenmektedir. K22 numunesinde ise kopma kuvveti 34710.9 N olduğu görülmüştür. K22 numunesi kopma anında ilk boyuna göre 11.15 mm uzadığı tespit edilmiştir. Grafik incelendiğinde kopma anından sonra her iki numunede de uygulanan kuvvette keskin bir düşüş görülmektedir. Malzeme koparken, kopma bölgesinde oluşan çatlaklar veya ayrılmalar, kuvvetin çok hızlı bir şekilde dağılmasına neden olur. Bu da kuvvetin aniden düşmesine neden olmaktadır.

K13 ve K23 numunelerinin kuvvet uzama grafiği ise Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.3.** K13 ve K23 numunelerinin kuvvet uzama grafiği

Şekil 4.3'te yer alan grafik incelendiğinde K13 numunesine uygulanan kuvvet 39062.5 N olduğunda kopma meydana gelmiştir. K13 numunesinde kopma anında malzemenin boyunda meydana gelen uzama 9.90 mm'dir. K23 numunesinde ise malzemeye uygulanan kuvvet 33398.4 N'a ulaştığında kopma meydana gelmiştir. Bunun yanında K23 numunesinin kopma anında boyu 10.66mm uzadığı görülmektedir. Önceki grafiklerde görüldüğü üzere bu grafikte de kopma anından sonra uygulanan kuvvette keskin bir düşüş gözlemlenmektedir. Tablo 4.1'de K1 ve K2 hibrit kompozit malzemelere ait kopma kuvvetleri gösterilmiştir.

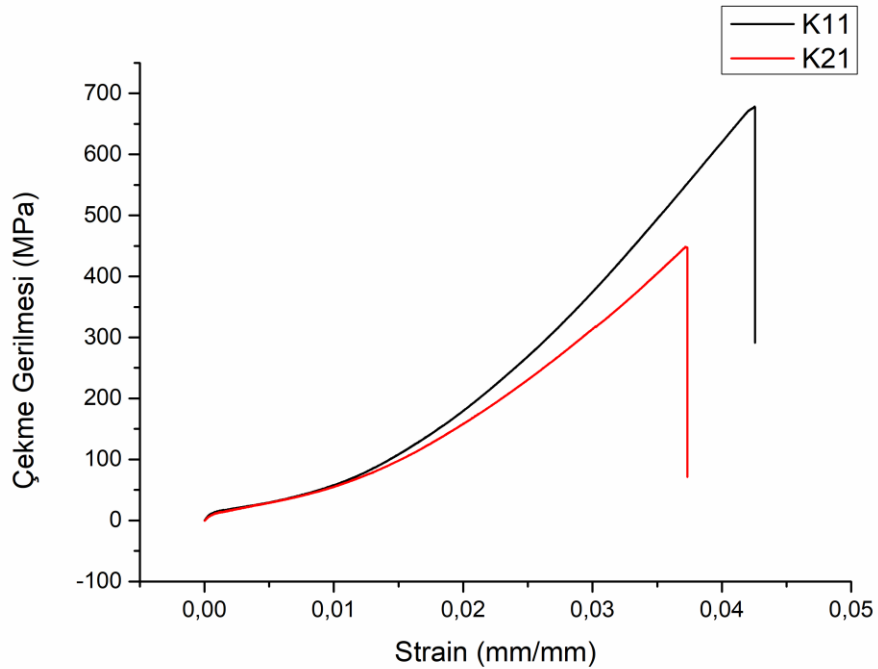
**Tablo 4.1.** K1 ve K2 hibrit kompozit malzemelere ait numunelerin kopma kuvveti

| Hibrit Kompozit | Malzeme Numuneler | Kopma Kuvveti (N) |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| K1              | K11               | 47429.7           |
|                 | K12               | 31710.9           |
|                 | K13               | 39062.5           |
| K2              | K21               | 32429.7           |
|                 | K22               | 34710.9           |
|                 | K23               | 33398.4           |

Genel olarak Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3'teki grafikleri incelediğimizde K1 dizilimine sahip numunelerde K2 dizilimine sahip numunelere göre kopma yükü daha fazladır. Ayrıca genelde K1 dizilimine sahip numunelerin kopma anında ilk boyuna

göre uzama miktarı K2 dizilimine sahip numunelere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi K1 dizilimine sahip numunelerin her iki yüzeyi karbon fiber malzemeden K2 dizilimine sahip numunelerin ise cam fiberden oluşmasından dolayı karbon fiber malzemeler genellikle cam fiber malzemelere göre daha yüksek kopma kuvvetine ve daha iyi dayanıklılığa sahiptir. Bundan dolayı K1 kombinasyonuna sahip numuneler daha yüksek kopma kuvvetine sahiptir.

Ayrıca K1 ve K2 kombinasyonlarına ait numunelere çekme deneyi uygulanarak elde edilen veriler eşitlik 3.1 ve eşitlik 3.2'deki formüllere yerleştirilerek aşağıdaki çekme ve şekil değişimi grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen çekme gerilmesi ve şekil değişimi grafiklerini inceleyecek olursak öncelikle K11 ve K12 numunelerinin çekme gerilmesi- şekil değiştirme grafiği Şekil 4.4 'te gösterilmiştir.

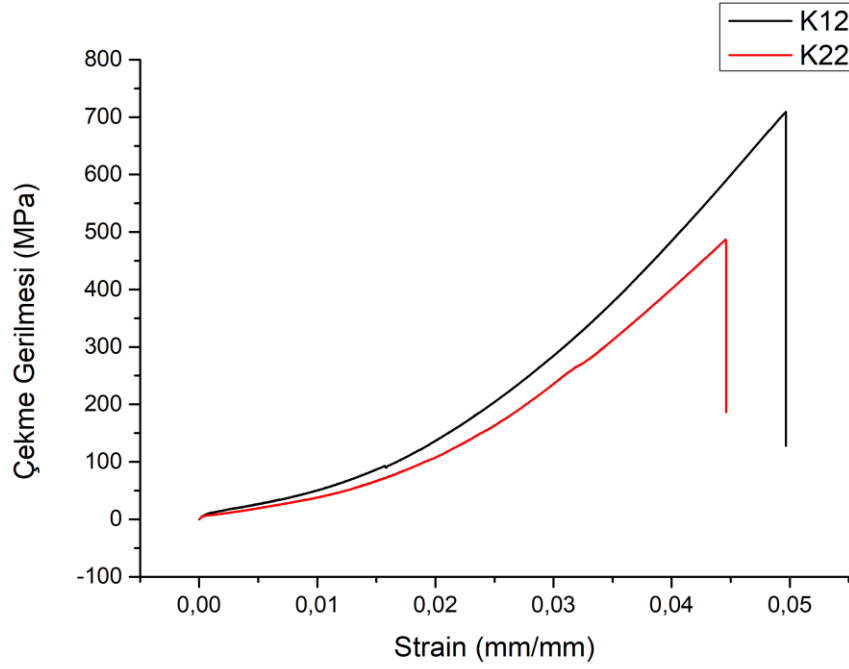


Şekil 4.4. K11 ve K21 numunelerinin çekme gerilmesi ve şekil değişim grafiği

K11 ve K21 numunelerinin stress strain grafiğini incelediğimizde K11 numunesinin en yüksek çekme gerilmesinin 678.57 MPa, en yüksek şekil değişiminin 0.042 mm olduğu görülmektedir. Eşitlik 3.1'deki formülü kullanarak hesaplanan kopma gerilmesi ise 677.56 MPa olarak bulunmuştur.

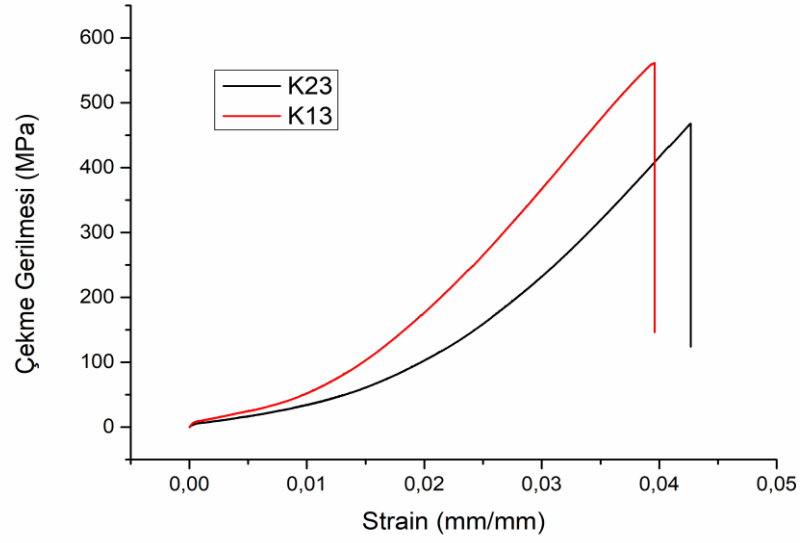
K21 numunesinin ise en yüksek çekme gerilmesinin 448.706 MPa, en yüksek şekil değişiminin 0.037 mm olduğu tespit edilmiş olup, kopma gerilmesi 447.30 MPa olarak hesaplanmıştır. K12 ve K22 numunelerinin çekme gerilmesi ve şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.





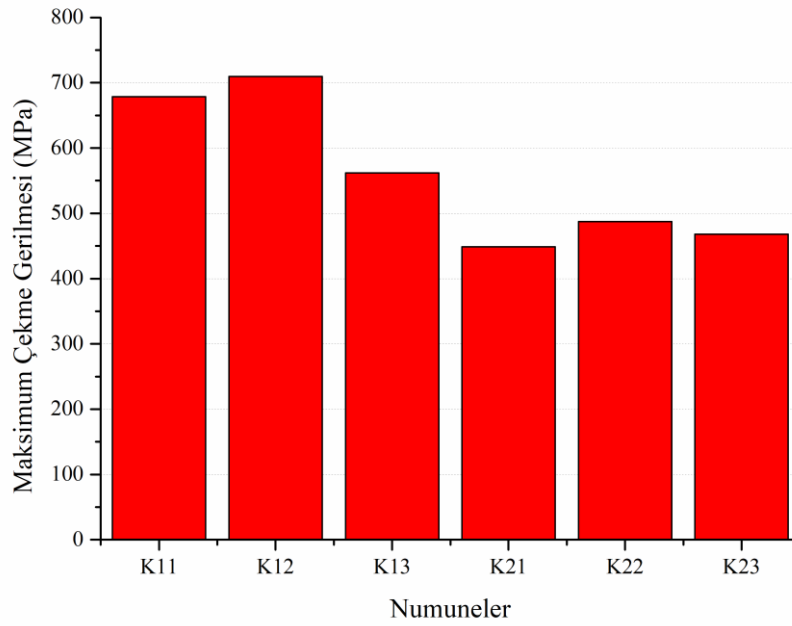
**Şekil 4.5.** K12 ve K22 numunelerinin çekme gerilmesi ve şekil değişim grafiği

K12 ve K22 numunelerinin stress strain grafiğini incelediğimizde K12 numunesinin en yüksek çekme gerilmesinin 709.48 MPa, en yüksek şekil değişimi ise 0.049 mm olduğugörülmektedir. Eşitlik 3.1'deki formülü kullanarak hesaplanan kopma gerilmesi ise 687.05 MPa olarak bulunmuştur. K22 numunesine baktığımızda en yüksek çekme gerilmesinin 487.17 MPa, en yüksek şekil değişiminin 0.044 mm olduğu tespit edilmiştir. Kopma gerilmesi ise 478.77 MPa olarak bulunmuştur. Şekil 4.6'da ise K13 ve K23 numunelerinin çekme gerilmesi ve şekil değişimi grafiği gösterilmiştir.



**Şekil 4.6.** K13 ve K23 numunelerinin çekme gerilmesi ve şekil değişim grafiği

Şekil 4.6 'da verilen grafiği incelediğimizde K13 numunesinin en yüksek çekme gerilmesi 561.83 MPa, en yüksek şekil değiştirmesi 0.039 mm'dir. K13 numunesinin kopma gerilmesi ise 558.03 MPa olarak bulunmuştur. Bunun yanında K23 numunesini incelediğimizde en yüksek çekme gerilmesi 468.103 MPa, en yüksek şekil değiştirmesi 0.042 mm'dir. K23 numunesinin kopma gerilmesi ise 460.668 MPa olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 4.7.** Numunelerin maksimum çekme gerilmelerinin karşılaştırılması

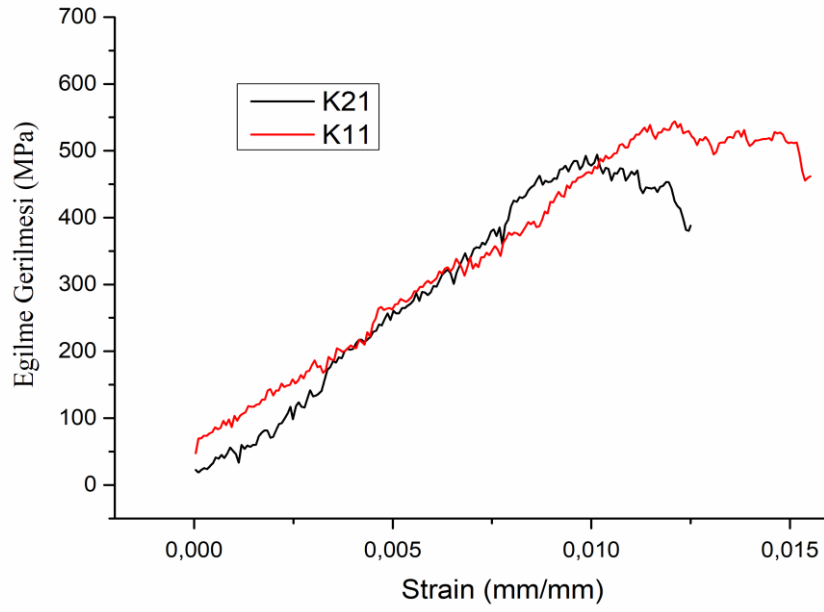
Şekil 4.7'de gösterilen grafikte K11,K12 ve K13 numunelerinin maksimum çekme gerilmelerinin, K21,K22 ve K23 numunelerine göre daha fazla olduğunu görmekteyiz. K1 dizilimine sahip numunelerin her iki dış yüzeyinin karbon, K2 dizilimine sahip numunelerin her iki yüzeyinin cam elyaftan meydana gelmesi K1 dizilimine sahip kombinasyonunun çekme dayanımının K2 dizilimine sahip kombinasyona göre fazla olmasında etkisi olduğu değerlendirilmektedir. Çünkü karbon elyaf cam elyafa göre daha yüksek çekme çekme dayanımına ve sertliğe sahiptir. Nitekim yapılan çalışmaları incelediğimizde Nagaraja K.C. ve diğerlerinin yaptığı çalışmada 7 katlı iki farklı dizilişe sahip hibrit kompozit malzemeden oluşan numunelere çekme ve eğme deneyleri yapıldığında dış kısmında karbon fiber olan numunenin dış kısmı cam fiber olan numuneye göre daha fazla çekme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür.

#### **4.2. Üç Noktadan Eğme Test Sonuçları**

Cam fiber ve Karbon fiber kumaşları prepreg haline getirip ürettiğimiz farklı kombinasyona sahip hibrit kompozit numuneler üç noktadan eğme deneyine tabi tutulmuştur. Tablo 3,7'de gösterildiği üzere birinci kombinasyondaki dizilime sahip numunemiz K1, ikinci kombinasyondaki dizilime sahip numunemiz K2 olarak adlandırılmıştır.K1 numunesinden ASTM D790 standartlarında 5 numune, K2 numunesinden 5 olmak üzere toplam 10 tane numune elde edilmiştir. Ancak numunelerinin bir tanesinin verileri sağlıklı bir biçimde alınamadığı için her iki kombinasyondan 4 numune karşılaştırılmıştır. Üç noktadan eğme deneyinden elde ettiğimiz veriler eşitlik 3.3 ve eşitlik 3.4'teki formüllere yerleştirilerek K1 ve K2 hibrit kompozit numunelere ait eğilme gerilmesi şekil değişimi grafikleri elde edilmiştir.

Test sonuçları, ürettiğimiz hibrit kompozit numunelerin eğilme davranışı hakkında bilgi verir. Eğilme dayanımı, malzemenin mukavemetine dair önemli bir gösterge sağlar. Ayrıca, malzemenin elastik ve plastik davranışı, kırılma veya delaminasyon (katmanlar arasında ayrılma) gibi olaylar da gözlemlenebilir.

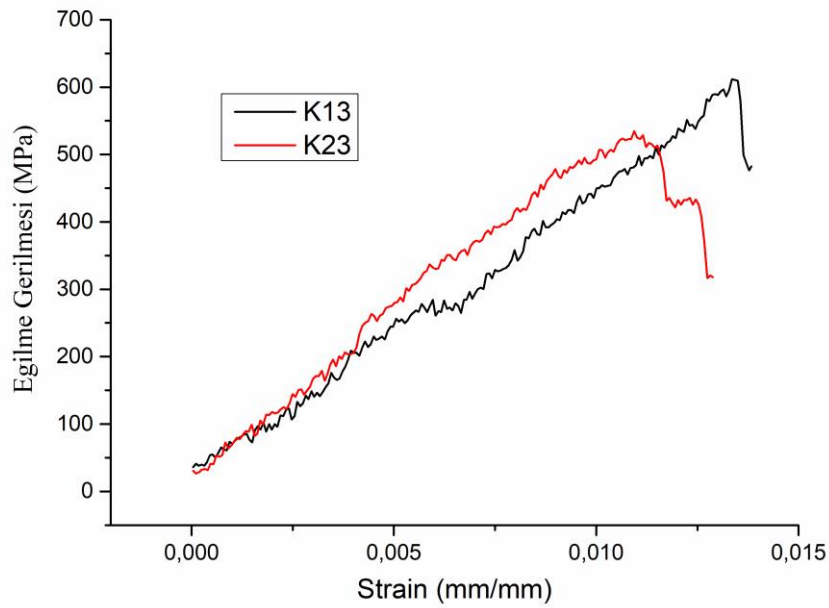
Öncelikli olarak K11 ve K12 numunelerine ait eğilme gerilmesi-şekil değişimi grafiği şekil 4.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.8.** K11 ve K21 numunelerinin eğilme gerilmesi ve şekil değişimi grafiği

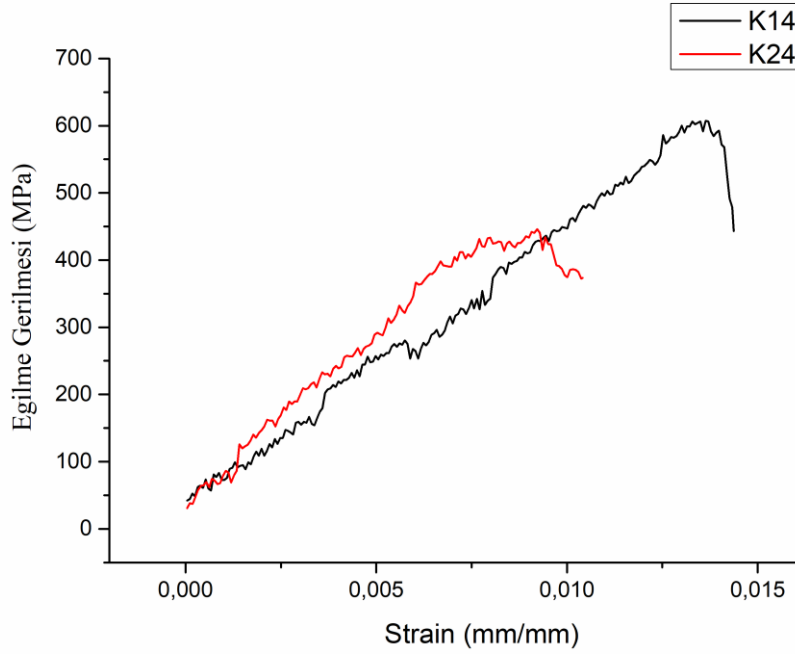
Şekil 4.8'i incelediğimizde K11 numunesinin maksimum eğilme gerilmesinin 590.55 MPa, maksimum şekil değiştirmesi 0.015 mm/mm olduğu görülmektedir. K21 numunesinde ise maksimum eğilme gerilmesinin 511.20 MPa, maksimum şekil değiştirmesinin ise 0.012 mm/mm olduğu görülmektedir.

Şekil 4.9' da ise K13 ve K23 numunelerinin eğilme gerilmesi ve şekil değişimi grafiği gösterilmiştir.



**Şekil 4.9.** K13 ve K23 numunelerinin eğilme gerilmesi ve şekil değişimi grafiği

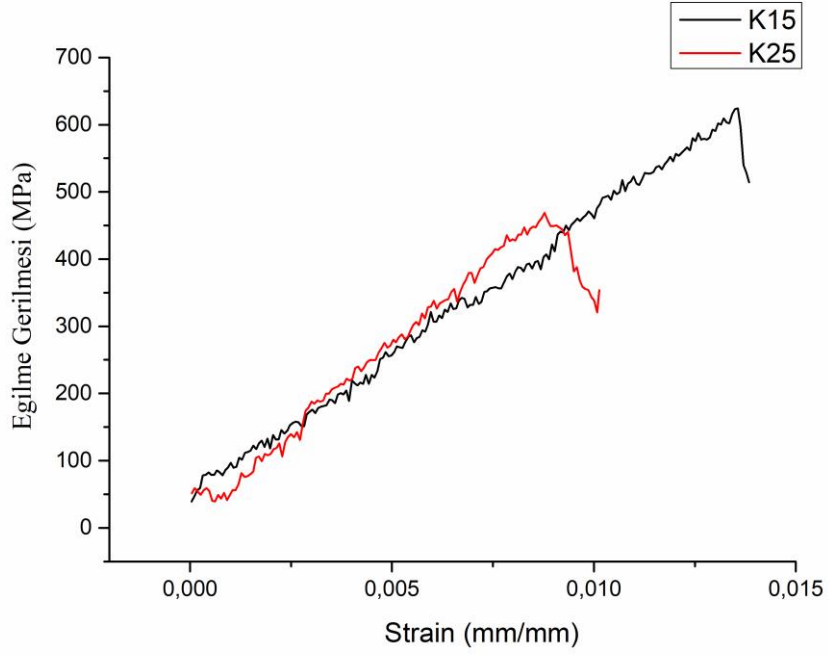
Şekil 4.9'da görüldüğü üzere K13 numunesinin maksimum eğilme gerilmesi 653.82 MPa iken K23 numunesinin maksimum eğilme gerilmesi 560.35 MPa olduğu görülmektedir. Bunun yanında K13 numunesinin maksimum şekil değişimi 0.013 mm/mm iken, K23 numunesinin maksimum şekil değişimi 0.012 mm/mm olarak görülmektedir. Diğer numunelerimiz olan K14 ve K24'ün eğilme gerilmesi- şekil değişimi grafikleri Şekil 4.10'da belirtilmiştir.



**Şekil 4.10.** K14 ve K24 numunelerinin eğilme gerilmesi ve şekil değişimi grafiği

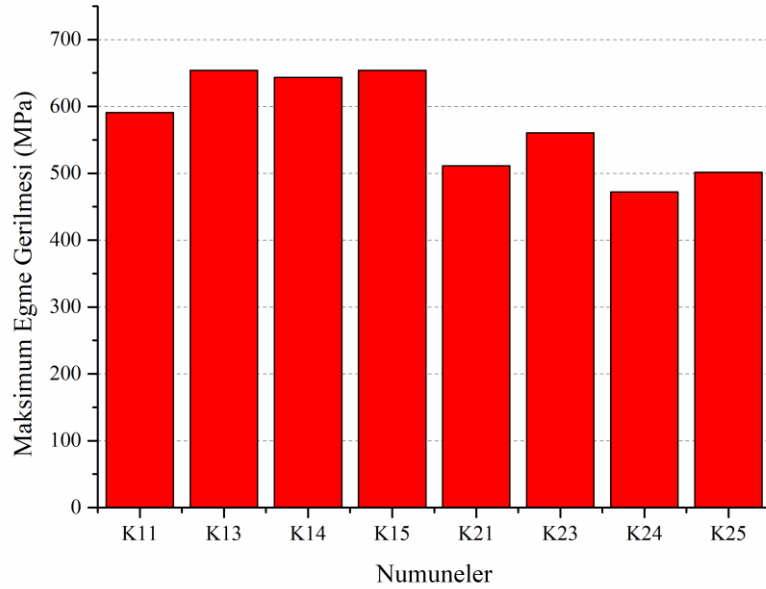
Şekil 4.10'u incelediğimizde K14 numunesinin maksimum eğilme gerilmesinin 643.27 MPa, maksimum şekil değiştirmesi 0.014 mm/mm olduğu görülmektedir. K24 numunesinde ise maksimum eğilme gerilmesinin 471.87 MPa, maksimum şekil değiştirmesinin ise 0.010 mm/mm olduğu görülmektedir.

Şekil 4.11'de K15 ve K25 numunelerinin eğilme gerilmesi ve şekil değişimi grafiği gösterilmiştir.



**Şekil 4.11.** K15 ve K25 numunelerinin eğilme gerilmesi ve şekil değişimi grafiği

Şekil 4.11'i incelediğimizde K15 numunesinin maksimum eğilme gerilmesinin 653.82 MPa, maksimum şekil değiştirmesi 0.013 mm/mm olduğu görülmektedir. K25 numunesinde ise maksimum eğilme gerilmesinin 501.37MPa, maksimum şekil değiştirmesinin ise 0.010 mm/mm olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.12.** Numunelerin maksimum eğme gerilmelerinin karşılaştırılması

- Şekil 4.12 'yi incelediğimizde K11,K13,K14 ve K15 numunelerinin eğilme gerilmesi ve şekil değişiminin K21,K23,K24 ve K25 numunelerine göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. K1 diziliş sırasına sahip numunelerin her iki dış yüzeyinin karbon, K2 diziliş sırasına sahip numunelerin her iki yüzeyinin cam elyaftan meydana gelmesi K1 dizilimine ait eğilme gerilmesi ve şekil değişiminin K2 diziliminden daha fazla olmasında etkisi olduğu değerlendirilmektedir. K1 dizilimine sahip numunelerin maksimum eğme gerilmeleri K2 dizilimine sahip numunelere göre % 16.7 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Güneş 'in yaptığı yüksek lisans çalışmasında cam ve karbon fiberden oluşan 18 katmanlı iki farklı dizilişe sahip hibrit kompozit malzemeye mekanik testleri uyguladıktan sonra iç kısmı karbon elyaf olan numunelerin dış kısmı karbon elyaf olan numunelere göre mukavemetinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca K1 dizilimine ait numunelerin eğme gerilmesi ve şekil değiştirmesinin K2 diziliminden büyük olması K1 dizilimine sahip numunelerin K2 dizilimine sahip numunelere göre mukavemet ve tokluğunun yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Bunun yanında Tablo 4.2 'de ise K1 ve K2 kombinasyonuna ait numunelerin maksimum sehim( deflection) değerleri gösterilmektedir.

**Tablo 4.2.** K1 ve K2 kombinasyonlarına ait numunelerin üç nokta eğme testi maksimum sehim miktarı

| Hibrit Kompozit | Malzeme Numuneler | Maksimum Sehim(mm) |
|-----------------|-------------------|--------------------|
| K1              | K11               | 7.43               |
|                 | K13               | 6.62               |
|                 | K14               | 6.86               |
|                 | K15               | 6.62               |
| K2              | K21               | 5.77               |
|                 | K23               | 5.95               |
|                 | K24               | 4.80               |
|                 | K25               | 4.68               |

Malzemenin mukavemet kapasitesi eğme testinde gösterilir. Kırılmadan önceki son nokta malzemenin mukavemetini belirler. Üç noktadan eğme deneyini yaptığımızda malzemede meydana gelen sehim miktarı malzemenin mekanik özelliklerinin yanı sıra deformasyon davranışı hakkında da bize bilgi verir. Tablo 4.2' de görüldüğü üzere kırılmadan önceki maksimum sehim miktarlarını incelediğimizde K1 dizilimine ait numunelerdeki maksimum sehim miktarları, K2 dizilimine göre daha fazladır. Çünkü K1 dizilimine sahip numunelerin ortasında simetrik olarak bulunan çift cam fiberlerin, K2 numunesinin ortasında simetrik olarak bulunan çift karbon fibere göre sünekliği daha fazladır.





## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu tezde cam ve karbon fiberden oluşan prepregler kullanılarak iki farklı dizilimde hibrit kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen malzemelere çekme ve üç noktadan eğme testleri uygulanmış olup elde edilen sonuçlar aşağıda arz edilmiştir.

- Çekme deneyi sonucunda K1 dizilimine sahip hibrit kompozit malzemede kopma meydana gelmesi için K2 dizilimine sahip hibrit kompozit malzemeye göre daha fazla kuvvet uygulanması gerekmektedir. Bunun yanında K1 dizilimine sahip hibrit kompozit malzemede uzaman miktarı K2 dizilime sahip hibrit kompozite göre nispeten daha fazla uzama meydana gelmiştir.

- Ayrıca K1 dizilimine sahip hibrit kompozit malzemenin çekme dayanımının K2 dizilimine sahip hibrit kompozit malzemeye göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun K1 dizilimindeki hibrit kompozit malzemenin dış katmanının her iki tarafının karbon fiberden oluşmasının sebep olduğu düşünülmektedir. K1 diziliminin dış katmanlarının karbon olması K1 dizilimine sahip hibrit kompozit malzemenin mukavemetini arttırdığı düşünülmektedir. Çünkü karbon fiber cam fibere göre daha güçlü çekme mukavemeti ve sertliğe sahiptir. Ancak kırılma yönünden cam fibere göre daha kırılgandır. K1 dizilimine sahip numunelerde K2 dizilimine sahip numunelere göre nispeten daha çok uzama meydana gelmesi K1 dizilimine sahip hibrit kompozit malzemenin merkezinde yer alan simetrik cam fiber katmandan kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylece kompozit malzemenin hem mukavemetini hem de sünekliğini arttırmış bulunmaktayız. K2 diziliminin en yüksek çekme dayanımından K1 diziliminin en yüksek çekme dayanımına % 45.6 artış meydana gelmiştir.

- Bunun yanında eğme gerilmelerini karşılaştıracak olursak K1 dizilimine sahip hibrit kompozit numunelerin eğilme gerilmesi K2 dizilimine sahip hibrit kompozit numunelerin eğilme gerilmesine göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Çünkü K1 dizilimine sahip hibrit kompozitin dış yüzeyinin her iki katmanında karbon fiber bulunmaktadır. Bu durum her iki dış yüzeyinde karbon bulunan K1 diziliminin mukavemetinin dış yüzeyinin her iki tarafında cam fiber ve ortasında karbon fiber bulunan K2 dizilimine göre daha fazla olduğunu göstermektedir. K2 diziliminin en

yüksek eğilme gerilmesinden K1 diziliminin en yüksek eğilme gerilmesine % 16.7 artış meydana gelmiştir. Her bir dizilimin maksimum sehim miktarlarını karşılaştıracak olursak Tablo 4.2'de ifade edildiği gibi K1 dizilimine sahip hibrit kompozit numunelerde maksimum sehim miktarı K2 dizilimine sahip numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. K1 dizilimine sahip numunenin merkezinde yer alan simetrik cam fiberin ve K2 dizilimine sahip numunenin merkezinde yer alan simetrik karbon fiberin bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir. Çünkü cam fiber karbon fibere göre sünekliği daha fazladır. K1 diziliminin merkezinde yer alan simetrik çift cam fiber K2 diziliminin merkezinde yer alan karbon fibere göre malzemenin sünekliğini arttırmıştır. Bu da K1 dizilimine sahip numunelerde K2 dizilimine göre daha fazla sehim oluşturmaya sebep olmuştur.

- Yapılan mekanik testler sonucunda kullanılan kumaş türü ve kumaşların diziliş sırasının numunelerin mekanik özelliklerini etkilediği tespit edilmiştir.

## 5.2. Öneriler

Bu çalışmada karbon ve cam elyaflar reçine emdirilerek prepreg haline getirilip hot press yöntemiyle üretilmiştir. Prepreglerin istiflenmesiyle hot press yöntemiyle üretilen kompozit malzeme diğer kompozit üretim tekniklerine göre daha kolay ve daha az maliyetle yapılabilir. Çünkü prepreglere önceden reçine emdirildiği için elle yatırma, vakum infüzyon gibi işlemlerde ihtiyaç duyulan reçineye bu işlemde gerek duyulmaz. Ayrıca karbon fiberin yüksek mukavemeti cam fiberin sünekliği ile hem mukavemeti yüksek hem de esnek olan hibrit kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Bunun yanında karbon ve cam fiber ısı dayanıklılığı yüksek malzemeler olduğu için bu malzemelerden elde ettiğimiz hibrit kompozitler yüksek sıcaklık gerektiren yerlerde kullanılabilir. Karbon ve cam fiber malzemeler korozyon direnci yüksek malzemelerdir. Bundan dolayı cam ve karbon fiberden oluşan hibrit kompozit malzemeler korozyonlu ortamlarda rahatlıkla kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- Agarwal, G., Patnaik, A., Sharma, R.K. & Agarwal, J.(2014). " Effect of stacking sequence on physical, mechanical and tribological properties of glass–carbon hybrid composites " *Research Article* DOI:10.1007/s40544-014-0068-9 *Friction* 2(4): 354–364 (2014).
- Agarwal, B. D., Broutman, L. J. & Chandrashekhara, K.(2017)."Analysis and performance of fiber composite,"*John Wiley & Sons*.
- Aktaş, O.(2015). “Hibrit Kompozitlerin Titreşim Davranışlarının İncelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Al-Nimer, K.N.M. (2021). " Karbon – e cam / epoksi hibrit kompozitlerin çekme basma ve darbe özelliklerinin sayısal analizi". Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arabacılar, Z. (2021). "Kuş tüyü materyalinden biyokompozit yapıların geliştirilmesi" Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Kayseri.
- Arasan, Ş.(2014). “Hibrit Kompozitlerin Kırılma Tokluğunun Belirlenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Bilimleri Fen Enstitüsü, Uşak.
- Arı,B.(2023). "Yüksek darbe dayanımlı aramid/cam elyaf hibrit kompozitmalzemelerin üretimi ve mekanik performanslarının incelenmesi." Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bursa.
- Aydın,M.R.,Acar,V.,Yapıcı,F.,Yıldız,K.,Topcu,M.V. ve Gündoğdu,Ö.(2018)."Inter-ply Hibrit Kompozit Yapılarda Elyaf Diziliş Sıralamasının Mekanik ve Dinamik Özelliklere Etkisi "İğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der. / Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech. 8(3): 255-263, 2018DOI: 10.21597/jist.458649.
- Biron, M.&Andrew, W.(2018)." Thermoplastics and thermoplastic composites".3rd edition.
- Cardarelli, F.(2008). *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*. Basım Yeri: *Springer Sci Ence & Business Media*.
- Charvani, S., Reddy Gopal Ch. & Narendar, G. (2021). Investigation on impact and thermogravimetric analysis of aramid and carbon based nanocomposites. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 1126(1):782-899.
- Chawla, K. K.(2012).Composite materials: science and engineering, *Springer Science & Business*.
- Czél, G., Jalalvand, M. & Wisnom, M., (2016). Design and characterisation of advanced pseudo-ductile uni-directional thin-ply carbon/epoxy glass/epoxy hybrid composites. *Composite Structures*,143:362-370.

- Daban, Y.(2016). “Kompozit Plakalarda Farklı Tabaka Sayısı, Farklı Yapı Ve İstifleme Sırasına Bağlı Optimum Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Durgun, İ. ve Vatansever, O.(2013). Vakum Torbalama Yöntemi İle Karbon Fiber Parça Üretimi, II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, Kuşadası.
- Gör, A.(2018). "Elyaf Takviyeli Hibrit Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi".Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak.
- Gururaja, M.N. &Rao, A.N.H.(2012). “A Review on Recent Applications and FutureProspectus of Hybrid Composites.” *International Journal of Soft Computing andEngineering (IJSCE)* 1 (6): 352–55.
- Gul, S.(2019). "Experimental and Numerical Investigation of Mechanical Effect of Externally Weak Layers In Thick Hybrid Composites." Yüksek Lisans Tezi, Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- Güneş, A.(2013). “Üzerinde Yüzey Çatlağı Bulunan Hibrit Tabakalanmış Kompozit Levhaların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Harper, C.A. (2002). Handbook Of Plastics, *Elastomers, And Composites*. Basım Yeri: Mcgraw-Hill New York.
- Irving, P. E. & Soutis, C. (Eds.) (2019). Polymer composites in the aerospace industry, *Woodhead Publishing*.
- İmak, A.(2015). “Tabakalı Hibrit Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışlarının Analizi”. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- İmak, A., Solmaz,M. ve Topkaya, Y. (2016). "Tabakalı Hibrit Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışlarının Analizi " *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 3, No: 3, 2016 (448-458)* DOI:10.31202/ecjse.258572.
- John, B. &Nair, C. R. (2014)." Handbook of thermoset plastics " *William Andrew Publishing*, 511-554.
- Jesthi, D.K. , Nayak, A. , Mohanty, S.S. , Rout, A.K. &Nayak, R.K. (2018). " Evaluation of mechanical properties of hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 377* DOI 10.1088/1757-899X/377/1/012157.
- Jesthi, D.K. , Mohanty, S.S., Nayak, A., Mohanty, S.S., Panigrahi A. &Nayak R. (2018). " Improvement of mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced polymer composites through inter-ply arrangement " *Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012182IOP>.

- Kahraman, İ. (2017). " Cam, bazalt ve karbon fiber esaslı hibrit kardan milinin filament sarma tekniği ile üretimi ve matematiksel optimizasyonu" Doktora Tezi Anadolu Üniversitesi Eskişehir.
- Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.
- Kaw, A.K.(2010). *Mechanics Of Composite Materials*. Basım Yeri: CRC Press.
- Kchany, S.A.A. (2015). "Hybridization Effects on Tensile and Flexural behavior of Laminated Composite Plates". Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Kretsis, G. (1987). "A Review of the Tensile, Compressive, Flexural and Shear Properties of Hybrid Fibre-Reinforced Plastics." *Composites* 18 (1): 13–23. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(87\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0010-4361(87)90003-6).
- Kur, M. (2023). "Cam-Karbon Kumaş Hibrit Kompozit Plakaların Farklı Çevre Koşullarındaki Düşük Hızlı Darbe Davranışı" Yüksek lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Li, J., Fan, W., Ma, Y., Xue, L., Yuan, L., Dang, W. & Meng, J. (2019) "Influence of Reinforcement Structures and Hybrid Types on Inter-Lamina shear Performance of Carbon-Glass Hybrid Fibers/Bismaleimide Composites under Long-Term Thermo-Oxidative Aging", *Polymers*, 11(8), 1288.
- Mallick, P. K. (2007). "Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design" *CRC press*.
- May, C.(Ed.)(2018). " Epoxy Resins Chemistry and Technology, Second Edition. <https://doi.org/10.1201/9780203756713>.
- Meenakshi, C.M. & Krishnamoorthy, A. (2019) " Study on the effect of surface modification on the mechanical and thermal behaviour of flax, sisal and glass fiber-reinforced epoxy hybrid composites", 7(2): 153-169.
- Middleton, B. (2015). *Composites: Manufacture and Application, Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality: Structural Composites, Injection Molding, and 3D Printing*, 53.
- Mohamed, N.M., El-Wazery, M.S, El-Elamy, I. & Zoalfakar, S.H. (2017). " Mechanical and Dynamic Properties of Hybrid Composite laminates." *International Journal of Advanced Engineering and Global Technology*, 05(03): 1703–1725.
- Mottram, J. T., Geary, B. & Taylor, R. (1992). "Thermal expansion of phenolic resin and phenolic-fibre composites", *Journal of materials science*, 27(18), 5015- 5026, (1992).

- Murugan, R., Ramesh, R. & Padmanabhan, K. (2014). " Investigation on Static and Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Based Woven Fabric Glass/Carbon Hybrid Composite Laminates. " *Procedia Engineering Volume 97, 2014, Pages 459-468*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.270>.
- Nabil, B., Raji, M., Boujmal, R., Essabir, H., Bensalah, M.-O., Bouhfid, R. & El Kacem Qaiss, A. (2019). "Numerical Modeling Of Hybrid Composite Materials. Modelling Of Damage Processes In Biocomposites, Fibre Reinforced Composites And Hybrid Composites " .*Woodhead Publishing, 57- 101*.
- Nagaraja, K.C, Rajanna, S., Prakash, G.S., Koppad, P.G. & Alipour, M. (2020). " Studying the effect of different carbon and glass fabric stacking sequence on mechanical properties of epoxy hybrid composite laminates." *Composites Communications Volume 21 October 2020, 100425*.
- Naveen, R., Mathan, A., Dhushyanath, D. & Kumar, M. (2021). "Investigation on the effect of stacking sequence on mechanical properties of a basalt and carbon fiber hybrid composite." *Journal of Engineering Research - ICMMS Special Issue*. <https://doi.org/10.36909/jer.ICMMS.15803>
- Nor A. F. M., Sultana M. T. H., Hamdana A., Azmi A. M. R., & Jayakrisna K. (2017). Hybrid Composites Based On Kenaf, Jute, Fiberglass Woven Fabrics: Tensile and Impact Properties. *Materials Today: Proceedings*, 5, 11198–11207.
- Peters, S. T. (Ed.) (2013). *Handbook of composites*, Springer Science & Business Media.
- Petrucci, R., Santulli, C., Puglia, D., Sarasini, F., Torre, L. & Kenny, J. (2013). "Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion. " *Materials & Design*, 49: 728-735.
- Polat, B. (2019). "Cam takviyeli polimer matrisli termoplastik kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırılması" Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Pegorotti A., Fabbri, E., Migliaresi, C. & Pilati F. (2004). " Intraply and interply hybrid composites based E-glass and poly(vinyl alcohol) woven fabrics: tensile and impact properties " *Polym Int* 53:1290–1297. <https://doi.org/10.1002/pi.1514>.
- Prashanth, M., Gouda, P. S. S., Manjunatha, T. S., Banapurmath, N. R. & Edacheriane, A. (2021) " Understanding the impact of fiber orientation on mechanical, interlaminar shear strength, and fracture properties of jute–banana hybrid composite laminates " <https://doi.org/10.1002/pc.26239>.
- Ravishankar, B., Nayak K. & Kader M. A. (2019). " Hybrid composites for automotive applications " *Volume 38, Issue 18*.

- Saba, N., Jawaid, M. & Sultan, M. T. H. (2017).“ Thermal properties of oil palm biomass based composites”, *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials*, 95-122 .
- Saleem, A., Medina, L. & Skrifvars, M. (2020). " Influence of fiber coating and polymermodification on mechanical and thermal properties ofbasalt/basalt reinforced polypropylene hybrid composites." *Journal of composites science*, 4(3):119.
- Sayan, B. (2014). "Thermo-mechanical characterization of hybrid composites using finite element based micromechanics. University of Florida." *ProQuest Dissertations Publishing*, 3716.
- Sayer, M., Bektaş , N. & Sayman, O. (2010). "An experimental investigation on the impact behavior of hybrid composite plates." *Composite Structures*. 92:1256-1262.
- Sudheer Kumar, B. , Nagendra, D. , Bala Murali, M., Sukesh, K. & Chanti, K.(2023) " Influence of Stacking Sequences on Mechanical Properties of Carbon, Glass, Flax - Epoxy Reinforced Hybrid Composites ." *HBRP Publication Research and Reviews: Journal of Mechanics and Machines Volume 5 Issue 1*.
- Utomo, J.T., Susilo, D.D.&Raharja, W.W.(2016). “The Influence Of The Number And Position Of The Carbon Fiber Lamina On The Natural Frequency And Damping Ratio Of The Carbon-Glass Hybrid Composite”. *International Conference on Engineering, Science and Nanotechnology, AIP Conf. Proc.* 1788, 030046-1-030046-6.<https://doi.org/10.1063/1.4968299>.
- Vinson, J. R. and Sierakowski, R. L. (2006) " The behavior of structures composed of composite materials." *Springer*, 105.
- Wang, X., Hu, B., Feng, Y., Liang , F., Mo, J., Xiong , J. & Qui, Y. (2008). "Low velocity impact properties of 3D woven basalt/aramid hybrid composites." *Composites Science and Technology*, 68:444-450.
- Wang, Q., Wu, W. & Li, W. (2018). “Compression Properties of Interlayer and Intralayer Carbon/Glass Hybrid Composites.” *Polymers* 10 (4),343 <https://doi.org/10.3390/polym10040343>.
- Yastımoğlu, F. ve Özkan, A. (2017). "Tekrarlanan yükler altında kompozit malzemelerin yapılarının incelenmesini amaçlayan deney aygıtı tasarımı." *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- Yeter E., Erkiğ A. ve Bulut M. (2014) "Hybridization effects on the buckling behavior of laminated composite plate " *Composite Structures* Volume 118, Pages 19-27.
- Yıldız, R. (2019). " Karbon prepreg, cam prepreg ve bazalt elyaf ile üretilmiş hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Yıldızhan, İ. (2013). "Hibrit kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı" Yüksek Lisans Tezi Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Yi, X.-S. , Du, S. & Zhang, L.(2018). Composite Materials Engineering, Volume 1 Fundamentals Of Composite Materials, *Chemical Industry Press*, 141-156, China.
- Zhang, J.,Chaisombat, K., He, S. &Chun ,H.W. (2012). "Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures"*Materials & Design (1980-2015)*Volume 36, April 2012, Pages 75-80.

