# Polimer Matrisli Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Hatice Kaçaker

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Polimer Bilim ve Teknolojisi Anabilim Dalı

Mart 2025

# Production and Characterization of Polymer Matrix Hybrid Composites

Hatice Kaçaker

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Polymer Science and Technology

March 2025

# Polimer Matrisli Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Hatice Kaçaker

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Polimer Bilim ve Teknolojisi Anabilim Dalı
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Ayşegül Aşkın

Mart 2025

**ONAY**

Polimer Bilim ve Teknolojisi Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Hatice Kaçaker**'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Polimer Matrisli Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ayşegül AŞKIN

İkinci Danışman : --

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Ayşegül AŞKIN

Üye: Prof. Dr. Hande ÇELEBİ

Üye: Prof. Dr. Hamed GHORBANPOOR

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. ..... .....

Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Ayşegül Aşkın danışmanlığında hazırlamış olduğum "Polimer Matrisli Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

17/03/2025

Hatice Kaçaker

İmza

# ÖZET

Kompozit malzemeler sahip oldukları avantajlar sayesinde havacılık, denizcilik, otomotiv, spor ve savunma sanayii gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İki ya da daha fazla elyafın tek bir matris içerisinde birlikte kullanılmasıyla hibrit kompozitler elde edilmektedir. Hibridizasyon sayesinde kompozitin özellikleri optimize edilebilmektedir. Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin artırılmasında kullanılan elyaf tipinin, miktarının, yönlenmesinin ve elyaf ile matris ara yüzey bağlanmasının önemi yüksektir.

Bu çalışmada vakum infüzyon yöntemiyle polyester matris içerisine karbon elyaf, cam elyaf ve poliamit-66 kumaşı takviyesi ile polimer matrisli hibrit kompozit plakalar ((EC)3S, (CE)3S, (CE)3S-PA66) olarak isimlendirilmiş ve üretilmiştir. Ayrıca takviye malzemelerinin üretilen hibrit polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Elde edilen kompozit plakaların mekanik özelliklerini değerlendirmek için dinamik mekanik analiz (DMA), Charpy çentikli darbe testi, çekme testi, üç nokta eğme testi, çift konsol kiriş testi (DCB) ve uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre yüksek mukavemetli karbon elyafların yük yönüne paralel olmasının çekme mukavemetinde pozitif etki yarattığı; darbe yönüne dik olan cam elyafların ise darbe mukavemetini artırdığı görülmüştür. Basma gerilmesine karşı daha dayanıklı olan cam elyafların yük yönüne dik olması üç nokta eğme testinde mukavemeti artırmıştır. Dinamik mekaniz analiz sonuçlarına göre üretim yönüne paralel karbon elyafların depolama modülünü artırdığı görülmektedir. PA66 kumaş ilavesiyle de tabakalar arası kırılma tokluğu ve darbe mukavemeti değerlerinde artış elde edilirken, diğer özelliklerde düşüş görülmüştür. Üretilen hibrit kompozitlerin üretimi ile dengelenmiş özellikler elde edilirken, maliyetten de kazanç sağlamak mümkün olabilecektir.

**Anahtar kelimeler:** Cam elyaf; hibrit kompozit; karbon elyaf; PA66 keçe; vakum infüzyon

# SUMMARY

Composite materials are used in many areas such as aviation, marine, automotive, sports and defense industries due to their advantages. Hybrid composites are obtained by using two or more fibers together in a single matrix. The properties of the composite can be optimized thanks to hybridization. The type, amount, orientation of the fiber used in increasing the mechanical properties of fiber-reinforced composites and the bonding of the fiber and matrix interface are of great importance.

In this study, polymer matrix hybrid composite plates (named as (EC)3S, (CE)3S, (CE)3S-PA66) were produced by vacuum infusion method with carbon fiber, glass fiber and polyamide-66 fabric reinforcement in polyester matrix. In addition, the effect of reinforcement materials on the mechanical properties of the produced hybrid polymer composites was investigated.

Dynamic mechanical analysis (DMA), Charpy impact test, tensile test, three-point bending test, double cantilever beam test (DCB) were applied to evaluate the mechanical properties of the obtained composite plates. According to the test results, it was observed that high strength carbon fibers being parallel to the load direction had a positive effect on tensile strength; glass fibers being perpendicular to the impact direction increased the impact strength. Glass fibers being more resistant to compressive stress increased the strength in the three-point bending test being perpendicular to the load direction. According to the dynamic mechanical analysis results, it was observed that carbon fibers being parallel to the production direction increased the storage modulus. While an increase was obtained in interlayer fracture toughness and impact strength values with the addition of PA66 fabric, a decrease was observed in other properties. While balanced properties were obtained with the production of the produced hybrid composites, it would be possible to gain cost.

**Keywords:** Carbon fiber; E-glass fiber; hybrid composite; PA66 veil; vacuum infusion;

# TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca başta tez danışmanım Prof. Dr. Ayşegül Aşkın ve İzmir Yüksek Teknolojisi Enstitüsü Makine Mühendisliği bölümünden Prof. Dr. Metin Tanoğlu hocama ve tüm ekibine, Prof. Dr. Macid Nurbaş ve Dr. Öğr. Üyesi Hamed Ghorbanpoor hocalarıma, aileme gösterdikleri sabır ve destek için çok teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

**ÖZET**.....vi

**SUMMARY**……..……vii

**TEŞEKKÜR**……...……...viii

**İÇİNDEKİLER**.....ix

**ŞEKİLLER DİZİNİ**…….…….……xii

**ÇİZELGELER DİZİNİ**……..……..xiv

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**…….……...xv

**1. GİRİŞ VE AMAÇ**……...…….……...1

**2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE TEORİK BİLGİLER**……...……..3

2.1. Teorik Bilgiler…….…….…….……3

2.1.1. Kompozit Malzemenin Bileşenleri …….…….…….3

2.1.2. Kompozit Malzemenin Çeşitleri…….…….....…...4

2.1.3. Hibrit Kompozitler …….…….....5

2.1.4. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri …….....6

2.1.5. Polimer Matrisli Kompozitlerin Başlıca Özellikleri …….....10

2.2. Literatür Araştırması…….…….……...…...….12

**3. MATERYAL VE YÖNTEM**……..……...…...16

3.1. Materyal…….……..16

3.2. Yöntem…….…….…….....17

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

3.2.1. Vakum infüzyon……..17

3.2.2. Çekme testi……..18

3.2.3. Charpy darbe testi……19

3.2.4. Üç nokta eğme testi……20

3.2.5. Dinamik mekanik analiz……..21

3.2.6. Çift konsol kiriş testi (DCB)……23

**4. BULGULAR VE TARTIŞMA**……..……..……...…25

4.1. Çekme Testi Sonuçları…….……..…....….25

4.1.1. (EC)3S'in çekme özellikleri…….……...…….25

4.1.2. (CE)3S'in çekme özellikleri……..…….…..…..……..27

4.1.3. (CE)3S-PA66'nın çekme özellikleri …….……..……...….....29

4.2. Charpy Darbe Testi Sonuçları …….…….……...…31

4.2.1. (EC)3S'in darbe özellikleri …….…..…….....31

4.2.2. (CE)3S'in darbe özellikleri ……..…….……...……33

4.2.3. (CE)3S-PA66'nın darbe özellikleri …….…….....…..35

4.3. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları…….…….…….……....…....36

4.3.1. (EC)3S'in üç nokta eğme özellikleri …….……...…...……...36

4.3.2. (CE)3S'in üç nokta eğme özellikleri ……..……....….....…..…....38

4.3.3. (CE)3S-PA66'nın üç nokta eğme özellikleri …….……..……..…..…....39

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

4.4. Dinamik Mekanik Analiz Sonuçları…..…….……...……..…..…..40

4.4.1. (EC)3S'in DMA sonuçları……..……...…….40

4.4.2. (CE)3S'in DMA sonuçları …….…….……...….....41

4.4.3. (CE)3S-PA66'nın DMA sonuçları ……..……...…….…..43

4.5. Çift Konsol Kiriş Test Sonuçları..……..……...…….……...44

**5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**……...…….....47

**KAYNAKLAR DİZİNİ**.....50

**EK AÇIKLAMALAR…..**.....55

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Şekil** **Sayfa**

2.1. Üç ana hibrit konfigürasyonu: (a) ara katman, (b) katman içi (c) iplik içi …..……..5

3.1. Vakum infüzyon tekniği ……17

3.2. Gerilim–gerinim(uzama) grafiği …..……...……..19

3.3. Çentik darbe testinin şematik gösterimi …….....…….……...…….....20

3.4. Elastik, viskoz (plastik) ve viskoelastik malzemelerin gösterimi ……..…….....22

3.5. Depolama modülü, kayıp modül, tanδ eğrileri ve $T_g$ sıcaklığı ……...…….....22

3.6. Çift konsol kiriş test numunesi, yükleme blokları, kuvvet ve yönü gösterimi.....24

4.1. (EC)3S'in gerinim-gerilim grafiği ……...…….……25

4.2. (EC)3S numunelerinin çekme testi öncesi görüntüleri …….……...…..26

4.3. (EC)3S numunelerinin çekme testi sonrası görüntüleri ……..…….……..27

4.4. (EC)3S numunelerinin çekme testi sonrası yan görüntüleri ……..27

4.5. (CE)3S numunelerinin gerinim-gerilim grafiği …..……...……28

4.6. (CE)3S numunelerinin çekme testi öncesi görüntüleri ……..…….……..29

4.7. (CE)3S numunelerinin çekme testi sonrası görüntüleri ……29

4.8. (CE)3S-PA66'nın gerinim-gerilim grafiği …….……...……....30

4.9. (CE)3S-PA66 numunelerinin çekme testi öncesi görüntüleri …….……..…….....31

4.10. (CE)3S-PA66 numunelerinin çekme testi sonrası görüntüleri …….…...…….....31

4.11. (EC)3S numunelerinin a) darbe testi öncesi ve b) test sonrası görüntüleri .....…....32

4.12. (EC)3S numunelerinin darbe testi sonrası yan görüntüleri …….....…….…33

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Şekil** **Sayfa**

4.13. (CE)3S numunelerinin a) darbe testi öncesi ve b) test sonrası görüntüleri…….…....34

4.14. (CE)3S-PA66 numunelerinin a) darbe testi öncesi ve b) test sonrası görüntüleri..…...36

4.15. (EC)3S numunelerinin a) eğme testi öncesi ve b) test sonrası görüntüleri…….……....37

4.16. (EC)3S numunelerinin eğme testi sonrası yan görüntüleri …….....…….…....38

4.17. (CE)3S numunelerinin a) eğme testi öncesi ve b) test sonrası görüntüleri…….....39

4.18. (CE)3S-PA66 numunelerinin a) eğme testi öncesi ve b) test sonrası görüntüleri…...40

4.19. (EC)3S'in tipik depolama modülü-sıcaklık ve kayıp modülü-sıcaklık grafikleri…...40

4.20. (EC)3S'in tipik tan delta-sıcaklık grafiği ……..…….....41

4.21. (CE)3S'in tipik depolama modülü-sıcaklık ve kayıp modülü-sıcaklık grafikleri…...42

4.22. (CE)3S'in tipik tan delta-sıcaklık grafiği ……..…..…….....42

4.23. (CE)3S-PA66'nın tipik depolama modülü-sıcaklık ve kayıp modülü-sıcaklık grafikleri……..…….……43

4.24. (CE)3S-PA66'nın tipik tan delta-sıcaklık grafiği ……..……..…….....44

4.25. (CE)3S'ın (referans) kırılma tokluğu-kırılma mesafesi grafikleri ……..….....45

4.26. (CE)3S-PA66'nın kırılma tokluğu-kırılma mesafesi grafikleri…….....46

# ÇİZELGELER DİZİNİ

**Çizelge** **Sayfa**

3.1. Kompozit plaka konfigürasyonları…….....…….16

4.1. (EC)3S'in çekme özellikleri …….…….....……26

4.2. (CE)3S'in çekme özellikleri ……..…….…….…….....……28

4.3. (CE)3S-PA66'nın çekme özellikleri …….…….....….....30

4.4. (EC)3S'in darbe özellikleri…….…….....….....32

4.5. (CE)3S'in darbe özellikleri …….…….....…….....34

4.6. (CE)3S-PA66'nın darbe özellikleri …….…….....……35

4.7. (EC)3S'in eğme özellikleri…….…….....….....37

4.8. (CE)3S'in eğme özellikleri…….……...…….....……..38

4.9. (CE)3S-PA66'nın eğme özellikleri…….…….....….....39

4.10. (CE)3S'in (referans) mod-I tabakalar arası kırılma tokluğu……..……..44

4.11. (CE)3S-PA66'nın mod-I tabakalar arası kırılma tokluğu…….…….....….....45

5.1. Kompozit plakaların test sonuçlarının karşılaştırılması ….....…..……...47

# SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| **Simgeler** | **Açıklama** |
|---|---|
| $^{o}$ | Derece |
| $^{o}C$ | Santigrat Derece |
| % | Yüzde Oran |
| δ | Delta |

| **Kısaltmalar** | **Açıklama** |
|---|---|
| ASTM | Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu |
| BMC | Dökme Kalıplama Bileşiği |
| C | Karbon Elyaf |
| CFRP | Karbon Elyaf Takviyeli Polimer |
| DCB | Çift Konsol Kiriş Testi |
| DMA | Dinamik Mekaniz Analiz |
| E | Cam Elyaf |
| GI | Mode I Kırılma Enerjisi |
| $G_{IC}$ | Mode I Tabakalar Arası Kırılma Enerjisi Tokluğu |
| GPa | Gigapaskal |
| kJ | Kilo Joule |
| $m^2$ | Metrekare |
| mm | Milimetre |
| MEK-P | Metil Etil Keton Peroksit |

# SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| Kısaltmalar | Açıklama |
|---|---|
| MPa | Megapaskal |
| N | Newton |
| PA | Poliamid |
| PA66 | Poliamid 6,6 |
| PET | Poli Etilen Tetrafalat |
| PVA | Poli Vinil Alkol |
| SEM | Taramalı Elektron Mikroskobu |
| SMC | Levha Kalıplama Bileşiği |
| $T_g$ | Camsı Geçiş Sıcaklığı |
| VARTM | Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama |

# 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Hibrit kompozitler, iki veya daha fazla farklı özelliklere sahip matris ya da takviye elemanlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulan özel bir malzemedir. Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin artırılmasında kullanılan elyaf tipinin, miktarının, yönlenmesinin ve elyaf ile matris ara yüzey bağlanmasının önemi yüksektir. Kompozitler genel olarak matris ve takviye bileşenlerinden oluşur. Kompozitlerin yüksek mukavemet ve sertlik, düşük yoğunluk, uzun yorulma ömrü, korozyon direnci, termal stabilite, termal yalıtım ve yapının amaçlanan işlevine uyum sağlama gibi benzersiz avantajları vardır. Bunun nedeni, malzemenin düşük yoğunluğu ve anizotropik ve heterojen karakteri nedeniyle yüksek spesifik mukavemeti ve sertliğidir. Anizotropik ve heterojen özellikler ayrıca belirli bir işleve hizmet etmek için optimum konfigürasyona sahip bir yapı tasarlama özgürlüğü sağlar (Daniel ve Ishai,1994). Polimer kompozitler son zamanlarda araştırmacılar için en önemli alanlardan biri haline gelmiştir. Bunun nedeni, polimer kompozitlerin, günümüzde yapısal uygulamalarda kullanılan geleneksel alaşımların ve kompozitlerin çoğundan daha iyi bir mukavemet-ağırlık oranına sahip olmasıdır. Üstelik araştırmacılar, istenen mekanik özellikleri elde etmek için yeni hibrit polimer kompozitler de geliştiriyorlar. (Sinha vd., 2020). Fiber hibridizasyonu, kompozit malzemeleri güçlendirmek için umut verici bir stratejidir. İki veya daha fazla fiber tipini birleştirerek bu hibrit kompozitler, hibrit olmayan kompozitlere göre mekanik özellikler daha iyi bir denge sunar. Ancak her iki lif arasındaki sinerjistik etkiler nedeniyle mekanik özelliklerini tahmin etmek zordur (Swolfs vd., 2014). Takviyelerin matris içindeki düzeni kompozitlerin mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple son zamanlarda hibrit kompozitler üzerine birçok çalışma yapılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, poliester matris içerisine karbon elyaf, cam elyaf ve poliamit-66 kumaşı takviyesi ile polimer matrisli hibrit kompozit üretmek ve üretilen hibrit polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine takviye maddelerinin etkisini incelemektir. Kompozit üretiminde takviye elemanları olarak tek yönlü karbon elyaf (Cwud 500A, Metyx) ve cam elyaf (St-Axial 90-UD-675, Sönmez Tekstil) ve PA 66 kumaş (17gsm, N-FusionTM), reçine olarak da Polipol-335 ortoftalik polyester reçine kullanılmıştır. Reçine içine hızlandırıcı olarak ağırlıkça % 0,5 Conap ve sertleştirici olarak ağırlıkça % 1,5 Metil Etil Keton Peroksit

(MEK-P) ilave edilmiştir. Kompozit plakalar vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Bu çalışmada üretilen kompozit plakaların ((EC)3S, (CE)3S, (CE)3S-PA66) isimlendirilmesinde C, E ve PA66 sırasıyla karbon, cam ve poliamit-66 kumaşını, sayılar ise tekrarlanan birim sayısını temsil etmektedir. Bu çalışmada özellikle hibrit polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine odaklanılarak takviye çeşidi, yönelimi gibi kritik faktörlerden etkilenen mekanik davranışları incelenmiştir.

# 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE TEORİK BİLGİLER

Literatür araştırması ve teorik bilgiler alt başlıklarda açıklanmıştır.

## 2.1. Teorik Bilgiler

### 2.1.1. Kompozit malzemelerin bileşenleri

Kompozit malzemeler temelde matris fazı ve takviye fazı olarak iki fazdan oluşur. Matris fazı, kompozit malzemenin temel yapısını oluşturan ve takviye elemanlarını bir arada tutan bileşendir. Aynı zamanda dış etkilere karşı takviye elemanlarını korur ve kompozite şekil verir. Matris malzemeleri, polimer (reçine), metal veya seramik gibi farklı türlerde olabilir. Polimer bazlı kompozit malzemelerde matris fazı olarak genellikle iki tip reçine kullanılır. Bunlar termoset ve termoplastik reçinelerdir. Termoplastik reçineler, termal işleme tabi tutulduklarında moleküler yapıları bozulmadan akışkan hale gelir, soğuduklarında ise tekrar katılaşır. Bu özellik, onları kolayca şekillendirebilir ve yeniden işlenebilir hale getirir. Termoplastik reçinelerin yeniden işlenebilirlik, esneklik, düşük işlem sıcaklıkları gibi birçok avantajları vardır. Termoplastikler bir veya iki boyutlu moleküler yapılardır; termosetlerden farklı olarak çapraz bağlı değildirler. Sertlik ve dayanıklılık özellikleri, monomer birimlerinin doğal özelliklerinden ve yüksek molekül ağırlığından gelir. Termoplastikler genellikle yüksek sıcaklıklarda yumuşama sıcaklığına sahiptirler (Associates, 1999). Polietilen, polipropilen, polistiren, poliamid vb. reçineler yaygın olarak kullanılan termoplastik reçinelerdir. Termoset reçineler kolaylıkla işlenir ve lamine edilir. Termoplastiklere göre darbelere karşı daha hassas ve kırılgan olmalarına rağmen genellikle daha ucuz, mekanik özellikler açısından daha üstün olabilirler. Yüksek sıcaklıklara, kimyasallara ve aşınmaya karşı daha dirençlidirler. Bu yüzden yüksek sıcaklık altında çalışacak uygulamalarda tercih edilirler. Termoset reçineler, genellikle sıvı haldeyken ya da düşük viskoziteye sahipken işlenebilirler. Bu, onları döküm, enjeksiyon ve laminasyon gibi işlemlerle kolay işlenebilir kılar. Termosetler, genellikle ısı veya kimyasal bir reaksiyon aracılığıyla sertleşir, sonrasında yeniden şekillendirilemezler. Bu özelliği onları genellikle daha dayanıklı ve yüksek performanslı malzemeler haline getirir. En yaygın termoset reçineler epoksi, polyester ve vinil ester reçinelerdir (Park, 2014). Polyester reçinelerin

birçok avantajı vardır; kullanımı çok kolaydır, en ekonomik reçine sistemleridir ve ayrıca iyi kimyasal dirence sahiptirler (Associates, 1999).

Kompozit malzemelerde, mekanik özelliklerin belirlenmesinde fiberler önemli bir rol oynamaktadır. Uygulanan yükler doğrudan fiberlere iletilir ve yüklerin büyük kısmı fiberler ile taşınır. Bu yüzden kompozit malzemelerde fiberlerin seçimi oldukça önemlidir ve bu seçim, tasarımın gereksinimlerine göre yapılmalıdır. Takviyeler kaynaklarına göre doğal ve sentetik lifler olarak sınıflandırılabilinir. Doğal lifler çoğunlukla bitkilerden elde edilen selülozik materyallerdir. Doğal elyaflar biyobozunur, çevre dostu, ucuz ve çoğu sentetik elyaftan daha hafiftir. Ancak sentetik elyafların mekanik mukavemeti çoğu doğal elyaftan çok daha iyidir. (Ayan, 2019). Cam elyaf, karbon elyaf, aramid elyaf polimer matrisli kompozitlerde takviye olarak kullanılan yaygın olarak kullanılan sentetik elyaflardır. Karbon elyaf, yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip, çok güçlü ve hafif bir elyaftır. Yüksek performans gerektiren alanlarda, özellikle havacılık, uzay ve otomotivde kullanılır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve serttir. Karbon fiberler yüksek mukavemete ve sertliğe sahipken, cam lifler orta derecede dayanıklılığa ve düşük sertliğe sahiptir. Karbon fiberler düşük uzamaya sahip olmasına rağmen cam elyaflar yüksek uzamaya sahip liflerdir. Cam elyafı, düşük maliyetli, kolay ulaşılabilir, iyi dayanıklılık ve elektriksel yalıtım özelliklerine sahiptir. Aramid elyafı, yüksek darbe direncine sahip olup, balistik koruma ve savunma sanayisinde kullanılır. Yüksek dayanıklılık ve hafiflik sunar, fakat karbon elyafına göre daha düşük sertliğe sahiptir. (camelyaf.net, 2024)

### 2.1.2. Kompozit malzeme çeşitleri

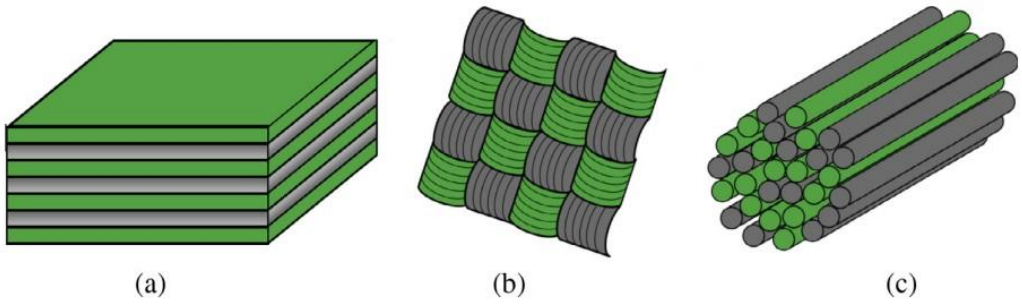
Kompozit malzemeler üç ana kategoriye ayrılırlar; (i) parçacık takviyeli, (ii) elyaf takviyeli ve (iii) yapısal kompozitler. Parçacık takviyeli kompozitler, bir malzemenin makro boyuttaki parçacıklarının diğer bir malzemenin matrisinde yer almasıyla oluşur ve bu parçacık fazı matristen daha sert ve daha katıdır. Elyaf takviyeli kompozitler, bir malzemenin fiberleri ve diğerinin matris malzemesinden oluşur. (Reddy, 2004). Mekanik özellikler çoğunlukla fiberlerin özelliklerine bağlıdır ve uygulanan yük, fiber/matris arayüzü yoluyla matris fazı tarafından fiberlere iletilir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler havacılık, denizcilik, otomotiv, spor ve savunma sanayii gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İki ya da daha fazla elyafların tek bir matriks içerisinde birlikte kullanılmasıyla hibrit kompozitler elde edilmektedir. Bu hibritleşme sayesinde kompozitin özellikleri daha da iyileştirebilmektedir. Yapısal kompozitler, kompozitlerin ve homojen malzemelerin birleşimidir ve yapı elemanlarının geometrik tasarımı yapının mekanik özelliklerini etkiler. En yaygın yapısal kompozitler lamine kompozitler ve sandviç panellerdir (Callister, 2006).

### 2.1.3. Hibrit kompozitler

Hibrit kompozitler, iki veya daha fazla farklı özelliklere sahip matris ya da takviye elemanlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulan özel bir malzemedir. Hibritleme, genellikle malzemenin performans, maliyet ve dayanıklılık açısından optimize edilmiş özelliklere sahip olması amacıyla tasarlanır. Hibrit kompozitler, elyaf ve matris seçimi ile istenilen özelliklerin kontrollü olarak önemli ölçüde elde edilmesini sağlar. Özellikler, aynı reçine matrisine dahil edilen farklı türdeki elyaflar seçilerek malzemeye göre uyarlanır. Hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinde kullanılan elyaf tipinin, miktarının, yönlenmesinin ve elyaf ile matris ara yüzey bağlanmasının önemi yüksektir. Elyaflar farklı yönlenmelerde farklı özellikler gösterebilmektedirler. Genel olarak iki fiber tipini tek bir kompozitte bir araya getirmenin amacı, her iki fiberin avantajlarını korumak ve bazı dezavantajları azaltmaktır.

Farklı elyaf malzemeler kullanılarak uygun maliyet, ağırlık tasarrufu, azaltılmış çentik hassasiyeti, geliştirilmiş kırılma dayanıklılığı, daha uzun yorulma ömrü ve geliştirilmiş darbe direnci sağlanabilir. (Callister, 2006).




**Şekil 2.1.** Üç ana hibrit konfigürasyonu: (a) ara katman, (b) katman içi (c) iplik içi

Hibrit kompozitler Şekil 2.1'de gösterildiği üzere temelde ara katmanlı ve iç katmanlı ve iplik içi olarak üç kategoriye ayrılır. Ara katman konfigürasyonunda, iki fiber tipinin katmanları birbiri üzerine istiflenir. Bu, hibrit bir kompozit üretmenin en basit ve en ucuz yöntemidir. Katman içi hibritte, iki fiber türü katmanların içinde karıştırılır. Bu, farklı ipliklerin bir kumaş halinde birlikte dokunduğu şekilde gösterilmektedir. Paralel demetler gibi diğer katman içi konfigürasyonlar da mümkündür. İki elyaf türü aynı zamanda elyaf seviyesinde karıştırılabilir veya birleştirilebilir, böylece iplik içi hibrit elde edilir. (Swolfs vd., 2014).

### 2.1.4. Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri

Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri, kompozitin özelliklerine ve kullanılacak polimerin türüne bağlı olarak çeşitlenir. En yaygın kullanılan üretim yöntemleri şunlardır:

**El Yatırması Yöntemi (Hand Lay-Up):** Büyük boyutlu yapısal parçaları için yaygın olarak kullanılan en basit tekniktir. Bu teknikte, genellikle keçe veya dokuma biçimindeki elyaf, hazırlanan bir kalıp üzerine veya içine yerleştirilir. İstenilen kalınlık elde edilene kadar bu işleme devam edilerek çok tabakalı bir malzeme oluşturulur. Reçine içinde kalan hava bir rulo yardımı ile çıkartılır. Hazırlanan kalıp içine viskozitesi yüksek olan reçine ile kaplanarak, kompozit yapı oluşturulur Yöntem, düşük maliyetli olmasına rağmen, yüksek üretim hızına sahip değildir ve genellikle büyük, kalın parçalar için kullanılır. (Can ve Değirmenci, 2017).

**Prepreg Yöntemi:** Prepreg, fiberlerin önceden reçineyle kaplanmış halidir. Bu materyaller, belirli bir sıcaklık ve basınç altında kalıba yerleştirilerek, kompozit malzeme üretilebilir. Prepreg yöntemi, yüksek performanslı kompozitler üretmek için yaygın olarak kullanılır.

**Sıcak Presleme:** Bu yöntemde, fiberlerin yerleştirildiği pre-pregler veya reçineler, ısı ve basınç altında kalıplara yerleştirilir. Isı, reçinenin akışkanlaşmasını sağlarken, basınç, fiberlerin düzgün bir şekilde yerleşmesini ve kompozitin dayanıklılığını artırır.

**Pultrüzyon:** Sürekli takviye fiberleri, bir reçine tankından geçirildikten sonra fiber demetleri sıcak bir kalıpta sertleştirilir. Pultrüzyon metodu, ekstrüzyona benzemektedir.

Ancak ekstrüzyonda üretilecek parçanın hammaddesi kalıba itilir, pultrüzyonda ise kalıba çekilir. Yöntem ile sabit kesitli değişik profiller, çubuklar, düz ve oluklu levhalar üretilmektedir. Üretim hızı yüksektir Bu yöntem, uzun süreli ve yüksek hacimli üretim için uygundur. (Can ve Değirmenci, 2017).

**RTM (Reçine Transfer Kalıplama):** RTM, bir fiber tabakası kalıba yerleştirilip, vakum veya basınç yardımıyla reçinenin kalıba enjekte edilmesiyle çalışır. Bu yöntem, karmaşık şekillerde ve yüksek kaliteli yüzeylere sahip kompozitler için kullanılır.

**Santrifüj (Savurma) Yöntemi (Kapalı Kalıplama):** Silindirik parçaların üretimi için uygun bir yöntemdir. Kırpılmış elyaf ve sertleştirici katılmış reçine, silindirik bir kabın içine doldurulur ve döndürülen kabın cidarlarına merkezkaç kuvvetler yardımıyla dağılan kompozit malzeme sıcak hava ile sertleştirilir. Boru, depo ve silindirik ürünlerin yapımında kullanılır (Can ve Değirmenci, 2017).

**SMC & BMC:** SMC takviye malzemesi olarak kırpılmış lif ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan pestil biçiminde malzemedir. Sürekli lifler, 25-50 mm kırpılmış olarak ve kompozitin toplam ağırlığının %25-30 oranında kullanılır. Pestil halindeki hazır kalıplama bileşimi, uygun uzunluklarda rulo haline getirilip, reçinenin uçuculuğunu önlemek üzere naylon ambalajda paketlenerek, sıcaklık kontrollü bir ortamda depolanır. Malzeme daha sonra, uygun kalıplama viskozitesine ulaşılana kadar olgunlaştırılır Olgunlaşan pestiller kalıba alınarak basınç ve sıcaklık altında üretim gerçekleşir. SMC üstün performans özellikleri nedeniyle, yüksek hacimli üretime elverişlidir. BMC; takviye malzemesi olarak kırpılmış lif (poliester) ve dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan hamur biçiminde malzemedir. (Can ve Değirmenci, 2017).

**Şişirmeli kalıplama:** Polimer malzemelerin boru, şişe, kova, depo gibi içi boş ürünler üretmek için kullanılan bir plastik şekillendirme yöntemidir. Bu yöntem, polimerin erimiş formunun bir kalıp içinde şişirilerek belirli bir şekil almasını sağlar. Şişirmeli kalıplamanın türleri şunlardır: Ekstrüzyon şişirme kalıplama, enjeksiyon şişirme kalıplama, germe şişirme kalıplama. Şişirmeli kalıplama avantajları arasında yüksek üretim hızları, düşük maliyetli kalıplar, içi boş ve hafif yapıların elde edilebilmesi sayılabilir. Ayrıca, büyük boyutlu ve karmaşık şekillerde ürünler üretmek mümkündür. Ancak, işlem, genellikle yalnızca termoplastik malzemelerle yapılabilir ve bazı özel malzemeler için uygun olmayabilir.

Bu yöntemler, her biri farklı üretim hedeflerine ve kompozit malzemenin kullanacağı alana göre seçilebilir. Üretim sürecinde kullanılan teknikler, kompozitin performansını, maliyetini ve üretim hızını etkiler.

**Vakum İnfüzyon:** Vakumlanmış ortam içerisinde reçinenin ilerlemesi prensibiyle çalışan bu yöntemde, imalat hazırlıkları tamamlanmış ürünün el değmeden üretimi amaçlanmaktadır. Çoğu zaman karmaşık yapılara sahip kompozit elemanların üretimi için kullanılan bu yenilikçi metotta, malzemelere emdirilen reçinenin uygun viskoziteli olması önemlidir. (Durgun,2014). Vakum infüzyon yöntemi, temelde şu adımları izler: İlk olarak, kompozit malzemenin fiber takviyesi (örneğin cam, karbon fiberleri) kalıba düzgün bir şekilde yerleştirilir. Bu fiberler, belirli bir yönelime sahip olabilir ve bu da malzemenin mekanik özelliklerini etkiler. Fiberlerin üzerine vakum örtüsü (genellikle vakum torbası veya folyo) kapatılır. Vakum pompası ile hava, kalıptan çekilir. Böylece sisteme vakum uygulanmış olur. Bu, fiberlerin sıkışmasını engelleyerek, reçinenin doğru şekilde dağılmasına yardımcı olur. Reçine (genellikle termoset reçineler) vakum etkisiyle fiber matrisin içine enjekte edilir. Reçine, vakum sayesinde fiberlerin arasına düzgün bir şekilde yayılır. Reçine tam olarak fiberleri sarmalı ve homojen bir malzeme yapısı oluşturmalıdır. Reçine tüm fiberleri doldurduktan sonra, kalıp, genellikle basınç veya sıcaklık uygulanarak reçinenin sertleşmesi sağlanır. Bu, kompozitin son şeklinin alınmasına yardımcı olur. Reçine sertleştikten sonra, kalıp açılır ve kompozit malzeme çıkarılır. Bu yöntem, genellikle yüksek kaliteli kompozitlerin üretimi için tercih edilir.

Kullanım alanları:

Vakum infüzyon yöntemi, her geçen gün daha fazla sektörde kullanılmakta ve sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda avantaj sağlamaktadır. Vakum infüzyon yöntemi, özellikle yüksek performans gerektiren ve büyük boyutlu kompozit malzemelerin üretimi için yaygın olarak kullanılır. Başlıca kullanım alanları şunlardır:

Otomotiv endüstrisi: Hafif ve dayanıklı parçaların üretimi.

Havacılık ve uzay: Hafiflik ve yüksek dayanıklılık gerektiren parçalar.

Yelkenli ve tekne yapımı: Büyük, güçlü ve hafif kompozit parçaların üretimi.

Rüzgâr türbinleri: Yüksek dayanıklılığa sahip büyük yapılar.

Vakum infüzyon yönteminin avantajları:

Yüksek kalite ve homojenlik: Vakum infüzyon, reçinenin fiberler arasına homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu, kompozit malzemenin daha yüksek kaliteye ve düzgün bir yapıya sahip olmasına olanak tanır.

Düşük reçine miktarı: Bu yöntemde, vakum yardımıyla reçine, yalnızca gerekli olan yerlere çekilir. Bu, reçine israfını azaltır ve malzemenin daha hafif olmasını sağlar. Aynı zamanda daha düşük maliyetli bir üretim süreci oluşturur.

Karmaşık parçaların üretimi: Vakum infüzyon yöntemi, karmaşık geometrilere sahip büyük parçaların üretiminde kullanılabilir. Fiberlerin düzgün bir şekilde yerleştirilmesi ve reçinenin etkili bir şekilde yayılması, daha karmaşık şekillerde bile yüksek kaliteli ürünler üretmeyi mümkün kılar.

Düşük işçilik gereksinimi: El ile yerleştirilen fiberler ve reçine işlemleri genellikle daha az iş gücü gerektirir. Yöntem, büyük hacimli üretimlerde otomasyona olanak sağlar, bu da iş gücü maliyetlerini düşürür.

Daha az çevresel etki: Vakum infüzyon yöntemi, geleneksel el ile dökme ve diğer kompozit üretim tekniklerine göre daha çevre dostudur çünkü reçine daha verimli bir şekilde kullanılır ve hava veya çözücülerle ilgili daha az atık ortaya çıkar.

Yüksek dayanıklılık ve performans: Vakum infüzyon yöntemiyle üretilen kompozitler genellikle yüksek mukavemet ve dayanıklılığa sahip olur. Fiberlerin tam olarak sarılması ve homojen reçine dağılımı, yüksek performanslı kompozit malzemelerin elde edilmesini sağlar.

Daha iyi yüzey kalitesi: Yüzeyde genellikle pürüzsüz ve düzgün bir bitiş elde edilir, bu da özellikle estetik gereksinimlerin olduğu uygulamalarda avantaj sağlar.

Vakum infüzyon yönteminin dezavantajları:

Diğer basit yöntemlere göre kullanılan ekipman sayısı fazla olduğundan daha yüksek iş gücü gerektirir ve bu sebeple de maliyet artar. İşlem basamakları kısmen karmaşıktır. Düşük vizkoziteye düşük reçine kullanımı mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilir. Reçine ile ıslanmamış bölgeler kalabilir; bu da pahalı atık malzeme demektir (Durgun, 2014).

### 2.1.5. Polimer matrisli kompozitlerin başlıca özellikleri

Polimerik kompozit malzemelerin başlıca mekanik özellikleri, bu malzemelerin kullanıldığı uygulamalarda performanslarını belirleyen kritik faktörlerdir. Polimerik kompozitler, genellikle bir polimer matris ve takviye malzemesi (fiber veya dolgu maddesi) kombinasyonundan oluşur. Mekanik özellikler, polimerik kompozitlerin özelliklerini, dayanıklılığını, verimliliğini ve uygulanabilirliğini belirler. Hangi özelliklerin ön planda olması gerektiği, kompozitin kullanılacağı endüstriye ve uygulamaya bağlı olarak değişir. Malzemelerin başlıca mekanik özellikleri şunlardır:

**Çekme dayanımı:** Polimerik kompozitlerin, çekme kuvvetlerine karşı gösterdiği dirençtir. Yük altında gerilme ve uzama sırasında kompozitin dayanacağı maksimum gerilme seviyesidir. Kompozit malzemenin dayanıklılığı ve uygulama alanına uygunluğu, bu özellik üzerinden değerlendirilir.

**Elastik modül:** Elastik modül, bir malzemenin elastik deformasyon gösterme kapasitesini belirler. Yük altında malzeme deformasyona uğrarken, elastik modül bu deformasyonun ne kadar sınırlı olduğunu gösterir. Polimerik kompozitlerde, takviye malzemesinin türü ve yönelimi elastik modülü etkiler. Kompozitler genellikle yüksek elastik modül değerlerine sahip olabilir, özellikle fiber takviyeli polimerler.

**Çekme uzaması:** Polimerik kompozitlerin, çekme kuvveti altında ne kadar uzayabileceğini gösteren bir özelliktir. Takviye malzemesinin türü ve yönelimi, kompozitin uzama kapasitesini etkiler. Yüksek uzama değerleri, malzemenin daha elastik ve şekil alabilir olduğunu gösterir.

**Kopma dayanımı:** Kopma dayanımı, bir malzemenin kopmadan önce ne kadar enerji absorbe edebileceğini ölçen bir özelliktir. Polimerik kompozitlerde, fiberlerin yönelimi ve matrisin özellikleri bu dayanımı etkiler. Yüksek kopma dayanımına sahip kompozitler, kırılmadan önce büyük miktarda deformasyon gösterebilir.

**Eğilme dayanımı:** Bu özellik, kompozitlerin eğilme veya bükülme sırasında kırılma direncini ölçer. Kompozit malzemelerin bükülme yükleri altında gösterdiği dayanım, yapısal uygulamalarda çok önemlidir, örneğin, otobüs, uçak ve otomobil parçalarında.

**Sıkıştırma dayanımı:** Sıkıştırma dayanımı, polimerik kompozitlerin sıkıştırma kuvvetlerine karşı gösterdiği dirençtir. Kompozit malzeme, sıkıştırılmaya çalışıldığında, malzemenin ne kadar dayanıklı olacağı bu özellik ile belirlenir.

**Darbe dayanımı:** Polimerik kompozitlerin, aniden uygulanan darbelere karşı gösterdiği dirençtir. Bu özellik, özellikle düşük sıcaklıkta veya yüksek hızda darbeye maruz kalan uygulamalar için çok önemlidir (örneğin, otomotiv ve havacılık endüstrileri).

**Yoğunluk:** Polimerik kompozitlerin yoğunluğu, malzemenin belirli bir hacimdeki kütlesini ifade eder. Kompozitler genellikle hafif malzemeler olarak tercih edilir, çünkü düşük yoğunlukları sayesinde ağırlık avantajı sağlarlar. Hafiflik, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde önemli bir özelliktir.

**Sertlik:** Sertlik, malzemenin yüzeyine uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği dirençtir. Polimerik kompozitlerin sertlik değeri, genellikle Rockwell, Vickers veya Brinell sertlik testleri ile ölçülür. Sertlik, aşınmaya karşı dirençli olma özelliğini de belirler.

**Yorulma dayanımı:** Yorgunluk dayanımı, malzemenin sürekli değişen veya döngüsel yükler altında ne kadar süre dayanabileceğini ölçen bir özelliktir. Kompozit malzemeler, özellikle yüksek performanslı ve uzun ömürlü ürünler için bu özelliğe ihtiyaç duyar.

**Tabakalar arası kırılma tokluğu:** Mod-1 tabakalar arası kırılma tokluğu, özellikle polimerik kompozitler ve lamine polimer yapıların mekanik özellikleri ile ilgili bir terimdir ve malzemenin tabakalar arasındaki bağların dayanıklılığını ifade eder. Bu özellik, özellikle kompozit malzemelerin fiber ve matris arasındaki etkileşim ve tabakalar arasında meydana gelen kırılma davranışlarıyla ilgilidir. Mod-1, Düzlem Çekme (Mode I) olarak da bilinen bir kırılma türüdür ve kırılma yüzeyinin paralel olduğu düzlemdeki açılma hareketini ifade eder. Yani, bir polimerik kompozit malzeme, tabakalar arasında çekme yönünde bir yük uygulandığında, bu tabakalar arasındaki açılma (delaminasyon) ve kırılma davranışları önem kazanır. Tabakalar arası kırılma tokluğu, polimerik kompozit malzemelerin, tabakalar arasında meydana gelen delaminasyon (katmanlar arası ayrılma) gibi kırılma türlerine karşı gösterdiği dirençtir. Bu tokluk, kompozitlerin performansını ve dayanıklılığını belirleyen önemli bir özelliktir, çünkü tabakalar arası kırılma, kompozitlerin yük taşıma kapasitesini ve mekanik stabilitesini ciddi şekilde etkileyebilir. Tabakalar arası kırılma, genellikle kompozitin katmanlarının birbirinden ayrılması (delaminasyon) ile sonuçlanır ve bu durum, yüksek performans gereksinimi olan uygulamalarda problem oluşturabilir.

Mod-1 Kırılma Tipik Özellikler: Düşük delaminasyon riski; yüksek kırılma tokluğu, tabakalar arasında daha iyi bağlanma sağlar, böylece delaminasyon riski azalır ve kompozitlerin daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Şekil değiştirme yeteneği; tabakalar arası kırılma tokluğu, malzemenin şekil değiştirme kapasitesini arttırabilir. Yük altında daha fazla deformasyon gösteren kompozitler, ani kırılmalara karşı daha dayanıklıdır. Yük taşıma kapasitesinin arttırılması; bu özellik, kompozitin, özellikle katmanlar arası yük transferini etkili bir şekilde yapabilmesini sağlar. Böylece yük taşıma kapasitesi artar, kompozitler daha güçlü hale gelir. Mod-1 tabakalar arası kırılma tokluğu, polimerik kompozitlerin dayanıklılığı ve güvenliği açısından kritik bir parametredir. Bu özellik, özellikle çok katmanlı kompozitlerde, dış etkenler (darbe, ısıl yükler, vb.) altında malzemenin performansını belirler. Yüksek kırılma tokluğuna sahip kompozitler, daha güvenli ve dayanıklı uygulamalara olanak tanır.

## 2.2. Literatür Araştırması

Birçok araştırmacı, fiber takviyeli polimerlerin özelliklerini geliştirmeye odaklanmıştır. Genellikle, son yıllarda fiber takviyeli polimerlerin mekanik özelliklerini geliştirmeye ilgi gösteren iki yöntem kullanılmaktadır: Birincisi; reçine tokluğunu iyileştirmek için farklı tipte partikül dolgu maddeleri kullanımıdır. İkincisi ise fiber takviyeli polimerlerin kompozit düzleminde farklı fiberlerin hibridizasyonudur. (Chavhan ve Wankhade, 2019). Yazman vd. (2024), endüstride yaygın olarak karbon fiber takviyeli plastikler ve cam elyaf takviyeli plastiklerin hibridizasyonunu çalışmışlardır. Çalışmada, yüksek mukavemetinin yanı sıra yüksek maliyetli karbon elyaf takviyeli kompozitin, cam elyaf takviyesi hibridizasyonu ile yeterli mukavemeti sağlayacak hibrit kompozitlerin daha düşük maliyetle üretilmesi mümkün olduğunu ortaya konulmuştur. Zhu vd. (2025), çalışmalarında tek yönlü cam ve karbon elyafları kullanarak, aynı elyaf kumaş sayısında ancak farklı sıra dizimlerine sahip hibrit kompozitler üzerine çalışmış ve mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Elyafların bulunduğu kat sırasının mekanik özellikler üzerinde farklı etkileri olduğunu ortaya koymuşlardır. İkbal ve Wei (2016), karbon ve cam elyaf ile yaptıkları farklı elyaf dağılımlarına sahip çalışmalarında, karbon fiber içeriğinin oranının çekme ve sıkıştırma mekanik özelliklerini ve hibridizasyon etkisi olarak adlandırılan etkiyi büyük ölçüde etkilediğini ve en önemli parametrelerden biri olarak ele alınması gerektiğini

belirtmişlerdir. Karbon elyaflar içerisine eklenen daha sünek olan cam elyafların sünekliği artırdığı görmüşlerdir. Dispersiyon derecesinin mekanik performansı önemli ölçüde etkilemese de kompozitlerin hasar modlarını etkilediğini ortaya koymuşlardır. Madenci vd. (2020), çalışmalarında pultrüzyon yöntemiyle ürettikleri cam elyaf takviyeli profili 0 ve 90 derece yönlerinde keserek numunelerin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda tek tip elyafın olduğu profilde, farklı açılarda kullanılan elyafların farklı mekanik özellikler ortaya koyduğunu görmüşlerdir. Bekele vd. (2024), palmiye yaprağı sapı takviyeli kompozite farklı oranlarda sisal lifi ilave etmişler, sisal lifi eklenmesi ve oranın artmasıyla çekme ve darbe mukavemetlerinde artış görmüşlerdir. Khan (2024) bambu ve kenar liflerini kullanarak yaptığı çalışmada, hibrit olmayan lif takviyeli kompozitler ve liflerin üç farklı oranda kullanılmasıyla yaptığı çalışmalarda, birçok fiziksel ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlar, çalışma sonucunda hibridizasyonun ve lif birleşim oranlarının özelliklere farklı etkilerde bulunduğunu göstermişlerdir. Hashim vd. (2023), ananas yaprağı lifi ve karbon elyaf kullanarak yaptıkları hibrit kompozitlerde, elyafları farklı istifleme sırası ile kullanarak sonuçları değerlendirmişlerdir. Çekme ve eğme testi sonuçları, istifleme sırasının çekme ve eğilme özelliklerini etkilediğini göstermiştir. Sonuç olarak istifleme sırasının anti-simetrik laminatlar üzerinde önemli etkisi olduğu görmüşlerdir. Chen vd (2019), hibrit karbon/cam/bazalt fiberlerin eğilme performansını araştırmak için sistematik bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu üç elyafın malzeme özelliklerinde önemli farklılıklar olması nedeniyle, hibrit laminantların eğilme performansları; eğilme modülü, eğilme mukavemeti ve süneklik, farklı hibrit oranları ve istifleme dizileri ile farkı özellikler göstermişlerdir. Wisnom vd. (2016), hibrit etkisinin büyüklüğünün kat kalınlığına bağlı olduğunu çalıştıkları karbon/cam elyaf takviyeli epoksi kompozitler üzerinde görmüşlerdir. Kalın yani blok şekilde istiflenen elyafların hibridizasyona önemli bir etkisi olmayacağını görmüşlerdir. Pegoretti vd. (2004), araştırmalarında cam elyaf (E-glass) ve polivinil alkol (PVA) kumaşlarla, iç katmanlı ve ara katmanlı hibrit kompozitlerin çekme ve darbe mekanik özelliklerini araştırmış, gerilim-gerinim eğrileri, katların istiflenme sıralarından ve yükleme yönlerinden önemli ölçüde etkilenmiş olduğu görmüşlerdir. Darbe verileri, iç katmanlı hibrit kompozitlerin, ara katmanlı hibrit kompozitler ve homojen kompozitlerle karşılaştırıldığında daha yüksek süneklik indeksi değerlerine ulaştığını göstermiştir. Liu vd. (2022), çalışmalarında farklı yönelimlerde karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) sandviçler geliştirmişler, mekanik testler tek yönlü CFRP laminatların fiber yönüne bağlı olarak bariz anizotropi olduğunu göstermiştir. CFRP(0°)'nin ana hata modlarının kırılma ve karbon fiberlerden kopması

olduğunu, CFRP(45°) ve CFRP(90°)'nin ana hata modlarının, reçine matrisinin çatlaması ve fiber/matris arayüzünde bağların açılması olduğunu, ancak karbon fiberin neredeyse hiç zarar görmediğini ortaya koymuşlardır. Park ve Jang (2000), ara katman aramid/polietilen (PE) fiber hibritlerinin, katman içi hibritlerden daha yüksek bir penetrasyon darbe direncine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu, ara katman hibritlerinde katman içi hibritlere göre daha kolay gelişen delaminasyonlardan kaynaklandığı yorumunda bulunmuşlardır. Cirino vd. (1988), kayma yönü, lif yönü ve malzeme türü gibi faktörlerin, malzemelerin davranışını etkilediği göstermişlerdir. Suarez vd. (1986) grafit/epoksi ve aramid/epoksi kompozitlerde, fiber en-boy oranından ziyade, fiber oryantasyonunun değiştirilmesiyle daha büyük deneysel sönüm değerleri elde etmiştir. Banakar vd. (2012), yaptıkları çalışmalarında $30^o$, $45^o$ ve $90^0$ yönünde hazırlanmış cam elyaf takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçlarını değerlendirmişler, çekme özelliklerinin lamine polimer kompozitlerin fiber yönelimine bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Kim ve Lee (2010), fiber takviyeli kompozitlerde fiber yönelimi ve fiber içeriğinin çekme mukavemeti üzerindeki etkisi incelemişler, $0^o$ yönünün çekme mukavemeti, lif içeriğiyle orantılı olarak arttığını göstermişlerdir. Ayrıca, mukavemetin sadece içerik miktarına bağlı olmadığını, daha yüksek miktarda olsa dahi farklı yönlenmeye sahip denemelerin mukavemetlerinin daha düşük olabileceğini göstermişlerdir. Nak-Ho ve Suh (1979), üç farklı elyaf-matris kombinasyonuna sahip kompozit yapılar için tek yönlü elyafın üç farklı yönelimde/açıda kullanarak ortaya koydukları çalışmalarında elyaf yöneliminin sürtünme ve aşınma üzerinde farklı etkilere sahip olduğunu göstermişlerdir. Wang vd. (2014), yaptıkları çalışmalarında tek yönlü elyafın farklı oryantasyonlarda kullanılmasının Young's Modülü üzerine etkisini incelemiş, sonuçların farklı mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermişlerdir. Mortazavian ve Fatemi (2015), yaptıkları çalışmalarında iki farklı termoplastik matris fazı içerisinde kullandıkları farklı yönelimlere sahip elyafların çekme testlerini farklı sıcaklıklarda gerçekleştirerek çeşitli sonuçlara ulaşmışlardır. Bu çalışma ile matris seçimi, elyaf yönelimi ve test sıcaklıklarının farklı sonuçlara sebep olduğu test etmişler, elyaf yöneliminin önemini görmüşlerdir. Ban ve Haithem (2013), yaptıkları çalışmalarında farklı yönelimlere sahip elyafların çekme mukavemeti, darbe mukavemeti ve sertlik özelliklerine etkilerini incelemişler, çekme ve darbe mukavemetine etkisini görmüş, sertlik özelliklerinde ise dikkate değer bir fark görmemişlerdir. Yapılan çalışmalar gösteriyor ki fiberle güçlendirilmiş kompozitler, fiber yönelimlerinden dolayı güçlü anizotropik mekanik davranış göstermektedir.

Ayrıca bu tez çalışmasında, PA66 kumaş ilavesinin delaminasyon direncinin iyileştirilmesine etkisi incelenmek üzere çeşitli testler yapılmıştır. Elyaf takviyeli polimer kompozitler, süneklik eksikliğiyle bilinir ve genellikle uyarı vermeden ani ve yıkıcı bir kırılma yaşar. Kırılgandırlar ve bu nedenle kırılma öncesinde uyarı sağlayamazlar. (Ribeiro vd., 2024) Yapılan çeşitli araştırmalarda, yüksek performanslı fiber takviyeli kompozitlerin delaminasyon direncinin iyileştirilmesi araştırılmıştır. Son zamanlarda, termoplastik veya termoset filmlerin, mikro veya nanofiber dokunmamış kumaşların tabakalar arası bölgeye yerleştirilmesine dayanan bir teknik geliştirilmiştirlerdir. (Beylergil vd., 2018). Böylece delaminasyon dayanımı daha uygun maliyet ve daha kolay proses koşullarında artırıla bilinir. Literatürde, kompozitlerde delaminasyon dayanımını artırmak için de farklı çalışmalar yapılmıştır. Elango vd. (2024), çalışmalarında çatlak ilerlemesinin ve fiber oryantasyonunun lamine kompozit delaminasyon kırılma tokluğunu nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Lif yöneliminin tabakalar arası kırılma dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelemek üzere yaptıkları çalışmalarında lifleri dört farklı yönelimde kullanmışlardır. Ara katmana ilave ettikleri geri dönüştürülmüş öğütülmüş karbon ve hibrit dolgu maddelerinin, katmanlar arası alanı kırmak için gereken enerjiyi artırarak sertliği, delaminasyon direncini ve kırılma dayanıklılığını artırdığını göstermişlerdir. Fiber yönelimi, laminantın bükülme modülünü ve kırılma enerjisini azaltmıştır. Ayrıca fiber oryantasyonun, tabakalar arası sürtünme ve köprüleme nedeniyle kırılma dayanıklılığını etkilediğini ortaya koymuşlardır. Yokozeki vd. (2009), ile Recently ve Ragosta (2005), çalışmalarında matris içerisine dolgu malzemeleri ekleyerek delaminasyon dayanımını artırmışlardır. Ancak bu durum viskozitenin artması, homojen olmayan dağılımların görülmesi, proses zorluklarına sebep olabileceği yorumunda bulunmuşlardır. Orozco vd., (2015), poliamid (PA) ve polietilen tereftalat (PET) kumaşların, bir cam elyaf/vinil ester kompozitinin tabakalar arası kırılma dayanıklılığı üzerindeki etkilerini araştırmışlar, PA kumaşların mod-I tabakalar arası kırılma tokluğunu artırdığını göstermişlerdir. Hamer vd., (2011), ile O'Donovan vd., (2014), PA kumaşların mod-I tabakalar arası kırılma tokluğunu artırdığını göstermişlerdir. Bu çalışmada ise PA66 kumaşların hibrit kompozitlerdeki kırılma tokluğuna etkisi incelenmiştir.

# 3. MATERYAL VE YÖNTEM

## 3.1. Materyal

Bu çalışmada takviye elemanları olarak tek yönlü karbon elyaf (Cwud 500A, Metyx) ve cam elyaf (St-Axial 90-UD-675, Sönmez Tekstil) ve Poliamit 66 kumaş (17gsm, N-FusionTM), reçine olarak da Polipol-335 reçine kullanılmıştır. Polipol-335; ortofitalik bazlı, 1,08 gr/cm3 yoğunlukta, düşük vizkosite, düşük hacimsel çekme ve yüksek mekanik özellikleri olan doymamış bir poliester reçinedir. Reçine için hızlandırıcı olarak ağırlıkça %0,5 Conap ve sertleştirici olarak ağırlıkça %1,5 MEK-P ilave edilmiştir. Elyaf kumaşları tek yönlü olup, konfigürasyonları üretim yönüne paralel ($0^o$) veya dik ($90^o$) olacak şekilde denemeler tasarlanmıştır.

Kompozit plaka konfigürasyonlarının isimlendirilmesi; C, E, PA66 sırasıyla karbon elyaf, cam elyaf (E-glass) ve poliamid-66 kumaşlarını temsil edecek şekilde; (CE)3S, (EC)3S ve (CE)3S-PA66 olarak yapılmıştır. PA66 keçe kumaşlar kompozit katmanları arasına ilave edilerek (CE)3S-PA66 numunesi elde edilmiştir. Örneklerde elyaf yönlenmesi 0o/90o olarak belirtilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Kompozit plaka konfigürasyonları

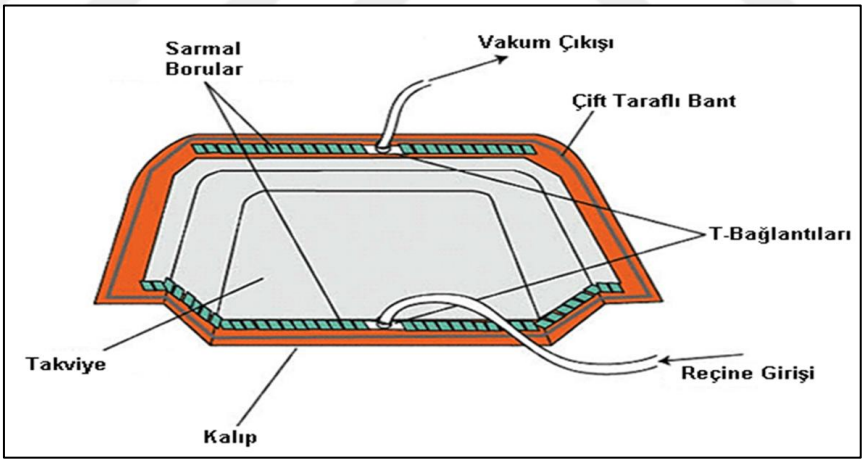
| | **Konfigürasyonlar** | **Dizilim sıralaması** | **Elyaf yönleri** |
|---|---|---|---|
| **1** | (EC)3S | E/C/E/C/E/C | 0/90/0/90/0/90 |
| **2** | (CE)3S | C/E/C/E/C/E | 0/90/0/90/0/90 |
| **3** | (CE)3S-PA66 | C/E/C/PA66/E/C/E | 0/90/0/-/90/0/90 |

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Vakum infüzyon

Kompozit plakalar vakum infüzyon yöntemiyle (VARTM) üretilmiştir. Bu yöntem bir çeşit kapalı kalıp prosesidir. Vakum infüzyon yöntemi; kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan, fiber takviyesi ile polimer matrisin birleşimini sağlayan bir işlem tekniğidir. Bu yöntemde, fiber matris, vakum altında polimer reçinesi ile doldurulur. Vakum infüzyon yöntemi, genellikle yüksek performanslı kompozit malzemelerin üretimi için tercih edilir.

Bu çalışmada, $0^o$ yönündeki elyaflar, reçine akış yönüne paralel, $90^o$ yönündekiler ise diktir. Kompozitler oda sıcaklığında 24 saat kalıpta kürlenmiştir. Kürleme sonucunda sertleşen kompozit laminantlar kalıptan çıkarıldıktan sonra, 100 $^oC$ etüvde 2 saat post kürleme yapılmıştır. Vakum infüzyon tekniğinin şematik gösterimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.




**Şekil 3.1.** Vakum infüzyon tekniği

Vakum infüzyon tekniği ile üretilen kompozit plakalara şu testler yapılmıştır:
Çekme testi; SHIMADZU AG-IC ekipmanı ile ASTM D3039/D3039M-08 (2014), Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Çekme Özellikleri için Standart Test Yöntemi standardına göre yapılmıştır.

Charpy çentikli darbe testi; CEAST Resil Impactor ile ASTM D6110-18 (2018), Plastiklerin Çentikli Numunelerinin Charpy Darbe Direncini Belirlemek İçin Standart Test Yöntemi standardına göre yapılmıştır.

Üç nokta eğme testi; ASTM D790-17 (2017), Takviyesiz ve Takviyeli Plastiklerin ve Elektrik Yalıtım Malzemelerinin Eğilme Özelliklerine Yönelik Standart Test Yöntemleri standardına göre yapılmıştır.

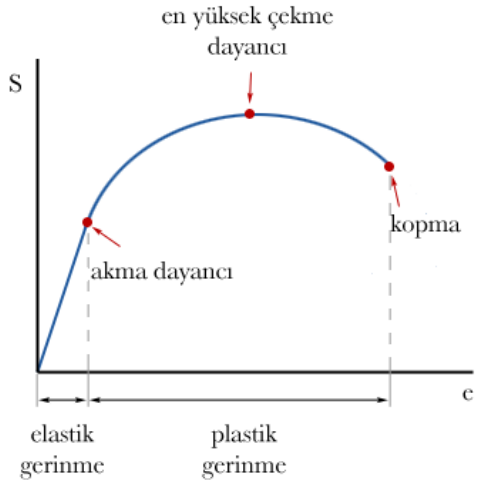
Mod-1 tabakalar arası kırılma tokluğu testi; ASTM D5528-13 (2022), Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Polimer Matris Kompozitlerinin Mod I İnterlaminar Kırılma Tokluğu için Standart Test Yöntemi standardına göre yapılmıştır.

Dinamik mekanik analiz (DMA); ASTM D4065-20 (2020), Plastikler İçin Standart Uygulama: Dinamik Mekanik Özellikler: Prosedürlerin Belirlenmesi ve Raporlanması standardına göre yapılmıştır.

### 3.2.2. Çekme testi

Çekme deneyi standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin tek eksende, belirli bir hızla ve sabit sıcaklıkta koparılıncaya kadar çekilmesidir. Bu test, malzemenin gerilme altındaki davranışını anlamak ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için kritik bir testtir. Kompozit malzemelerin yük taşıma kapasitesini ve güvenilirliğini değerlendirmek için bu test oldukça önemlidir.

Çekme sırasında, numuneye uygulanan gerilim ve malzemenin uzama miktarı ölçülür. Uygulanan güç ve malzemenin uzama miktarı sürekli olarak kaydedilir. Bu veriler, malzemenin davranışını belirlemek için kullanılır. Test sırasında malzeme, belirli bir noktada plastik deformasyona uğrayarak kopar veya kırılır. Bu, kompozit malzemenin çekme dayanımını gösterir. Test sonunda elde edilen veriler gerilim-gerinim grafiği üzerinde analiz edilir. Bu grafikten; maksimum çekme gerilmesi, kopma gerilmesi, elastik modül, uzama (%), Poisson oranı, akma dayanımı, kırılma ve kopma noktası, tokluk vb. özellikler hesaplanabilir. Örnek gerilim-gerinim(uzama) grafiği Şekil 4.1’de gösterilmiştir.




**Şekil 3.2.** Gerilim–gerinim(uzama) grafiği

Çekme testi SHIMADZU AG-IC ekipmanı ile ASTM D3039 (ASTM D3039, 2014) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Çekme testi ile numunelerden elde edilen gerilim (MPa) – uzama (%) eğrilerinden eğim ve maksimum değerler ölçülmüş, çekme mukavemeti, elastik modül ve uzama (%) değerleri hesaplanmıştır.

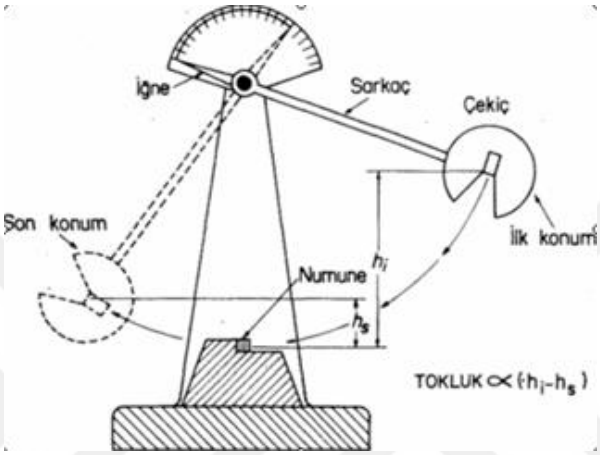
### 3.2.3. Charpy darbe testi

Darbe deneyinin genel olarak amacı, malzemelerin dinamik zorlamalar altında kırılması için gerekli enerji miktarını tespit etmektir. Çentikli darbe deneyi, malzemelerin darbe dayanımını ve çentik kırılma direncini ölçmek için kullanılan bir test yöntemidir. Kompozit malzemeler gibi kırılgan veya enerji soğurması beklenen malzemelerin dayanıklılığını değerlendirmek için yaygın olarak uygulanır. Bu test, özellikle malzemenin darbe yükleri altında ne kadar enerji absorbe edebileceğini ve çentik etkisinin malzeme kırılmasına nasıl katkıda bulunduğunu incelemek için kullanılır.

Test numunesinin merkezine, belirli derinlikte ve şekilde bir çentik açılır. Çentik, malzemenin kırılma direncini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Çentik ne kadar derinse, malzemenin kırılma davranışı o kadar zayıf olur. Numune test makinesine yerleştirilir ve belirli bir hızla darbe uygulamak için düşürülen çekiç kullanılır. Darbe sırasında numune, çentikten kırılır. Çekiç tarafından uygulanan darbe enerjisi, numunenin

kırılmasına ve kırılma sonrası soğurduğu enerji (kırılma enerjisi) ölçülür. Bu değer, kompozit malzemenin darbe dayanımını gösterir.

Deneyler CEAST Resil Impactor ile ASTM D6110 (ASTM D6110-18, 2018) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test numune boyutları standarda uygun kesilmiş, numunenin orta kısmına çentik açılmıştır.




**Şekil 3.3.** Çentik darbe testinin şematik gösterimi

### 3.2.4. Üç nokta eğme testi

Üç nokta eğme testi, kompozit malzemelerin eğilme dayanımını, sertliğini, plastik deformasyon ve kırılma davranışlarını ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir test yöntemidir. Bu test, malzemenin eğilme yükleri altındaki mekanik özelliklerini değerlendirirken, özellikle esneklik modülü, akma dayanımı ve kırılma enerjisi gibi özellikleri belirlemek için kullanılır. Bu test, özellikle yapısal uygulamalarda ve yük taşıma kapasitesi gerektiren tasarımlarda kompozit malzemelerin performansını değerlendirmede kritik bir rol oynar.

Eğme, iki desteğe serbest olarak oturtulan genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının, yön değiştirmeksizin ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değişmesidir. Eğme deneyinde, deney numunesine bir kuvvet etki ettiğinde, numune kesitinin bir kısmında basma gerilmesi, kesitin geri kalan kısmında çekme gerilmesi meydana gelir. Çeşitli eğme deneyi yöntemleri vardır. Bunların içinde en çok uygulananı üç

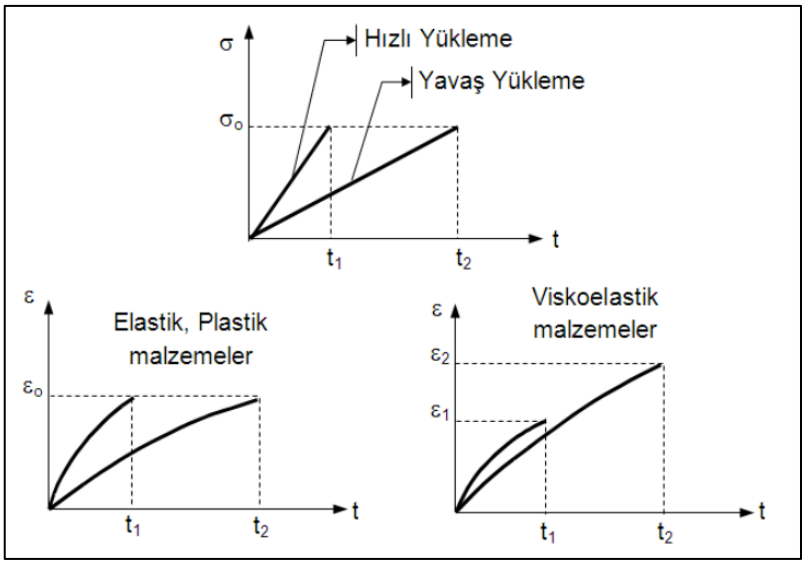
nokta eğme deneyidir. Bu yöntemlerde ana amaç, malzeme çatlayana kadar tek yönde eğmektir (OMU, 2021). Deney sonucunda, numunenin kırıldığı andaki maksimum yükü ve eğilme miktarı (δ) değerleri kaydedilir. Deneyler ASTM D790-03 (ASTM D790-17, 2017) standardına göre MTS-100 kN yük hücresi ekipmanı ile gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme testi ile denemelerden elde edilen kuvvet(N)-mesafe(mm) eğrilerinden maksimum değerler ölçülmüş, eğme mukavemeti ve eğme modül değerleri hesaplanmıştır.

### 3.2.5. Dinamik mekanik analiz

DMA ile malzemeye devamlı şekilde artıp azalan gerinim, belirli frekans değerinde uygulanır. En yüksek gerilim değeri ve gerinim arasındaki faz farklılığı ölçülerek malzemelerin viskoelastik özellikleri belirlenir. Bu analiz malzemelerin strese, sıcaklığa, frekansa ve diğer değerlere tepkisinin incelenmesine olanak tanır.

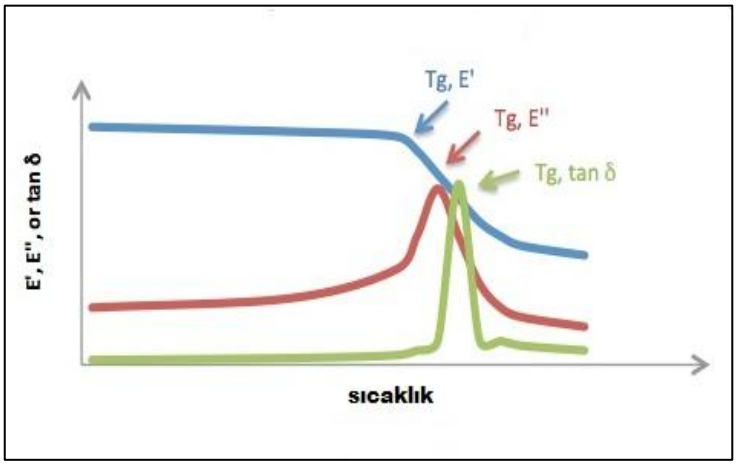
DMA, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan bir tekniktir ve genellikle malzemelerin dinamik davranışlarını anlamak amacıyla uygulanır. Özellikle kompozitlerin esneklik, sertlik, viskozite, ısıl dayanıklılık, yük taşıma kapasitesi, tartışmalı sıcaklıklar gibi özelliklerini değerlendirerek, malzemenin performansını ve güvenilirliğini detaylı bir şekilde incelemeye yardımcı olur. DMA, malzemenin zaman, sıcaklık, frekans ve deformasyon gibi farklı koşullar altında nasıl davrandığını anlamamıza yardımcı olur. Depolama modülü, kayıp modülü, camsı geçiş sıcaklıkları bu analiz ile belirlenmiştir

Depolama modülü, malzemenin elastik bölgedeki modül değerine eş değer modülü olup, test edilen malzemelerin karşılaştırmalı olarak mukavemetlerini ölçmek için kullanılır. Eğrilerin yükseklerindeki değişimler, polimer zincirlerinin esnekliğindeki değişimleri yansıtmaktadır. Eğer malzeme ideal bir esnek malzeme davranışı gösterirse, oluşan gerilim ile gerinim doğru orantılıdır ve gerilim gerinim sinyalleri aynı fazdadır. İdeal bir elastik malzemenin davranışı, Hooke Kanunu ile temsil edilir. İdeal viskoz bir malzeme için, gerilim ile gerinim hızı doğru orantılı, gerilim-gerinim arasında 90 derecelik bir faz farklılığı vardır. İdeal viskoz bir malzemenin davranışı Newton Kanunu ile temsil edilir. Şekil 3.4'te elastik, viskoz(plastik) ve viskoelastik malzemelerin gösterimi grafik üzerinde açıklanmıştır.




**Şekil 3.4.** Elastik, viskoz(plastik) ve viskoelastik malzemelerin gösterimi

Depolama modülü; elastik gerilimin gerinime oranıdır. Bir malzemenin enerjiyi elastik olarak saklayabilmesini temsil eder. Kayıp modülü; viskoz gerilimin gerinime oranıdır. Bir malzemenin enerjiyi dağıtabilmesini temsil eder. Kompleks modül; bir malzemenin deformasyona karşı toplam dayanıklılığını temsil eder. Kayıp modülü ile depolama modülünün oranından, tan(δ) elde edilir. Tan delta eğrisinin maksimum noktasından; $T_g$ sıcaklığı belirlenir. Şekil 3.5'te örnek depolama modülü, kayıp modül, tanδ eğrileri ve $T_g$ sıcaklığı eğrileri grafik üzerinde gösterilmiştir. Testler ASTM D4065 standardına göre yapılmıştır.

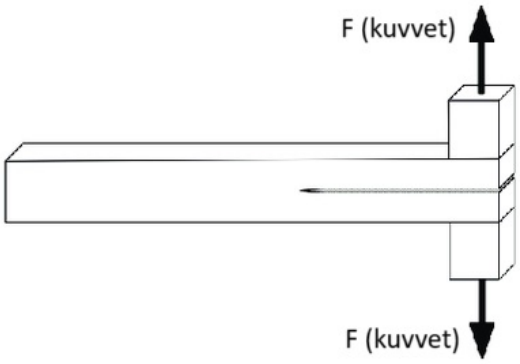



**Şekil 3.5.** Depolama modülü, kayıp modül, tanδ eğrileri ve $T_g$ sıcaklığı

### 3.2.6. Çift konsol kiriş testi (DCB)

Kompozit malzemeler genellikle birden fazla katmandan oluşur. Bu katmanlar, fiber takviyeler ve matris malzemesi arasındaki bağlar aracılığıyla birleştirilir. Kompozit malzemelerin en büyük zayıflık noktalarından biri, bu katmanlar arasındaki bağların zayıf olabilmesidir. Yük altında, özellikle kompozit malzemenin kırılma veya delaminasyon (katmanların ayrılması) durumunda, bu katmanlar arası kırılma tokluğu önemli bir faktör haline gelir. Tabakalar arası kırılma tokluğu, malzemenin katmanlar arasındaki bağların kırılmasına karşı ne kadar direnç gösterdiğini ifade eder. Yüksek tabakalar arası kırılma tokluğu, kompozitin yük taşıma kapasitesini artırırken, aynı zamanda delaminasyon ve çatlamaya karşı dayanıklılığını da güçlendirir.

Çift konsol kiriş testi, kompozit malzemelerin delaminasyon (katmanlar arası ayrılma) davranışlarını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir test yöntemidir. Bu test, özellikle kompozitlerin yapısal bütünlüğünü incelemek ve delaminasyon gerilmesi ile enerji soğurma kapasitesini ölçmek amacıyla uygulanır. Bu test, kompozit numunesinin iki uçtan desteklendiği ve ortasına uygulanan statik ve döngüsel yükleme koşulları altında Mod I kırılma enerjisi (GI)'nin başlama ve yayılma değerlerini ölçmek için en yaygın kullanılan yöntemdir. Test sırasında, malzeme numunesinin katmanlar arası yapısal bütünlük izlenir ve malzeme üzerindeki gerilme ve deformasyon ölçülür. Özellikle çok katmanlı kompozit malzemeler için çok faydalıdır, çünkü bu malzemeler genellikle delaminasyon riski taşır. Çift konsol kiriş testi, kompozit malzemenin delaminasyon davranışını doğrudan ölçen bir testtir. Kompozit malzemenin katmanlar arası bağlarındaki zayıflık ve delaminasyon özelliklerini hassas bir şekilde belirler. Bağ mukavemeti, tek bir parametre, enerji kırılma tokluğu ($G_{IC}$) aracılığıyla ölçülür (Broughton, 2012). Çift konsol kiriş test numunesi, yükleme blokları, kuvvet ve yönü Şekil 3.6’da gösterilmiştir.




**Şekil 3.6.** Çift konsol kiriş test numunesi, yükleme blokları, kuvvet ve yönü gösterimi

(CE)3S'te karbon elyaf ($0^o$) / cam elyaf ($90^o$) şeklinde elyaf dizilimi vardır. (CE)3S-PA66 ise aynı yönelimdeki karbon elyaf ile cam elyaf katmanları arasına PA66 kumaş ilave edilerek oluşturulmuştur. PA66 kumaş ilavesinin tabakalar arası kırılma mukavemetine etkisi incelenmiştir. Deneme ASTM D5528-13 (ASTM D5528-13, 2022) standardına göre yapılmıştır. (CE)3S-PA66 için referans numuneler (CE)3S'ten elde edilmiştir.

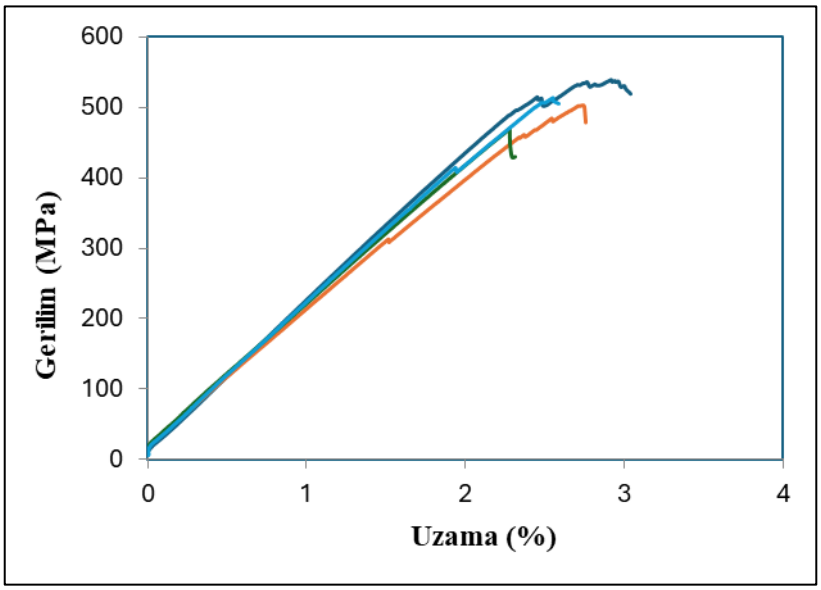
# 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

## 4.1. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi SHIMADZU AG-IC ekipmanı ile ASTM D3039 (ASTM D3039, 2014) standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Çekme testi ile numunelerden elde edilen gerilim (MPa) – uzama (%) eğrilerinden eğim ve maksimum değerler ölçülmüş, çekme mukavemeti, elastik modül ve uzama (%) değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar tablolarda aşağıda sunulmuştur.

### 4.1.1. (EC)3S'in çekme özellikleri

(EC)3S plakasından alınan dört farklı numune ile elde edilen gerilim-uzama grafikleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



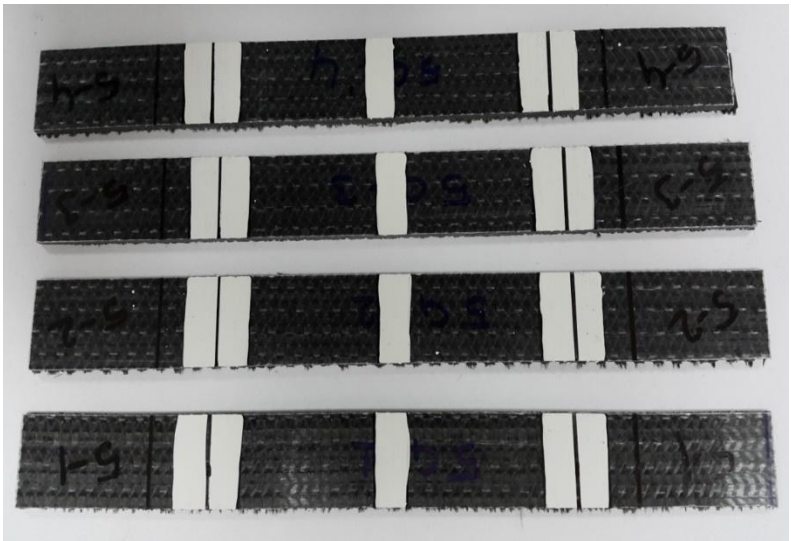

**Şekil 4.1.** (EC)3S'in gerinim-gerilim grafiği

Şekil 4.1'de numunelerin maksimum gerilim ve uzama grafiği çizilmiştir. Grafikteki eğrilerin eğimlerinden elastik modülleri hesaplanmıştır. Elde edilen çekme özellikleri Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

**Çizelge 4.1.** (EC)3S'in çekme özellikleri

| | **Çekme mukavemeti (MPa)** | **Elastik modül (GPa)** | **Uzama (%)** |
|---|---|---|---|
| **Numune-1** | 539,3 | 21,61 | 2,96 |
| **Numune-2** | 503,5 | 19,34 | 2,74 |
| **Numune-3** | 469,6 | 19,67 | 2,27 |
| **Numune-4** | 519,3 | 20,37 | 2,74 |
| **Ortalama** | **507,9** | **20,24** | **2,67** |
| **Standart Sapma** | **103,1** | **17,9** | **0,7** |

Çizelge 4.1'de (EC)3S numunelerinin çekme mukavemeti, elastik modülü ve uzaması gösterilmiştir. Ayrıca, ortalamaları ve standart sapmaları da belirtilmiştir. Test verilerine göre, numunelerin ortalama mukavemeti 507,9 MPa, elastik modülü 20,24 GPa, uzaması ise %2,67 hesaplanmıştır. Şekil 4.2'te numunelerin test öncesi, Şekil 4.3'te numunelerin test sonrası ve Şekil 4.4 'te numunelerin test sonrası yan görüntüleri görülmektedir. Numunelerde ortadan ikiye kopma olmamıştır. Numunelerde tabakalara ayrılarak deformasyon gözlenmiştir.



**Şekil 4.2.** (EC)3S numunelerinin çekme testi öncesi görüntüleri



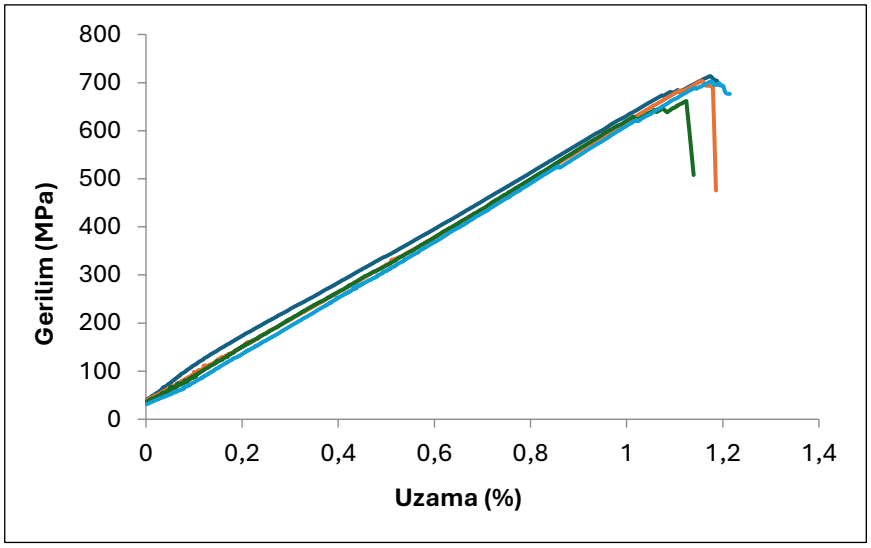
**Şekil 4.3.** (EC)3S numunelerinin çekme testi sonrası görüntüleri



**Şekil 4.4.** (EC)3S numunelerinin çekme testi sonrası yan görüntüleri

### 4.1.2. (CE)3S'in çekme özellikleri

(CE)3S plakasından alınan dört farklı numune ile elde edilen gerilim-uzama grafikleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.




**Şekil 4.5.** (CE)3S'in gerinim-gerilim grafiği

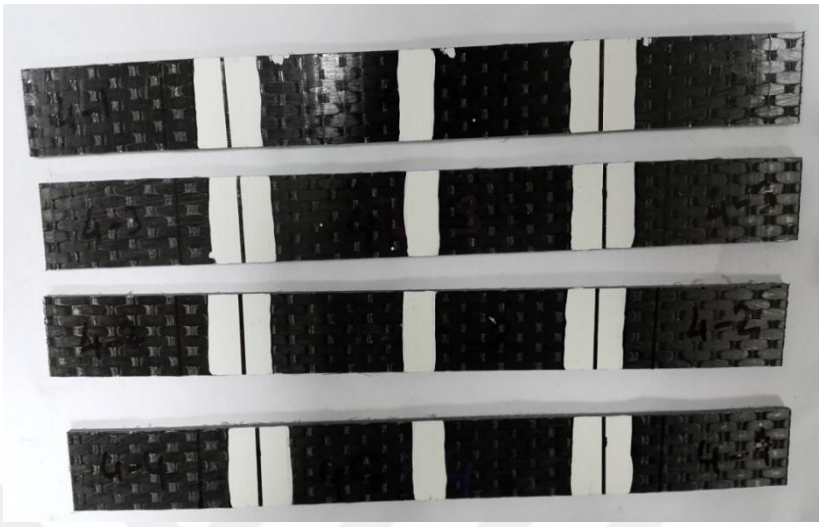
Şekil 4.5'te numunelerin maksimum gerilim ve uzama grafiği çizilmiştir. Grafikteki eğrilerin eğimlerinden elastik modülleri hesaplanmıştır. Elde edilen çekme özellikleri Çizelge 4.2'de gösterilmektedir.

**Çizelge 4.2.** (CE)3S'in çekme özellikleri

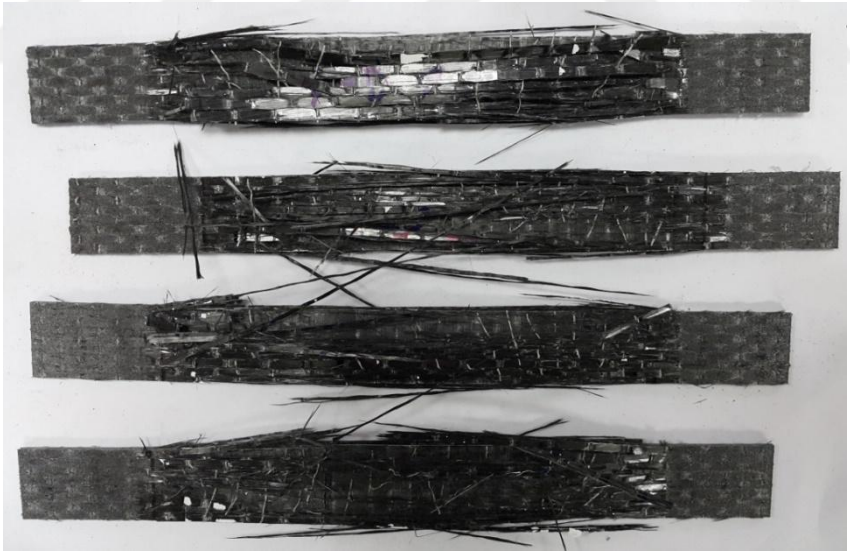
| | **Çekme mukavemeti (MPa)** | **Elastik modül (GPa)** | **Uzama (%)** |
|---|---|---|---|
| **Numune-1** | 713,4 | 57,98 | 1,18 |
| **Numune-2** | 702,8 | 57,70 | 1,15 |
| **Numune-3** | 661,4 | 58,70 | 1,12 |
| **Numune-4** | 702,3 | 59,16 | 1,17 |
| **Ortalama** | **694,9** | **58,38** | **1,12** |
| **Standart Sapma** | **22,9** | **0,6** | **0,0** |

Çizelge 4.2'de (CE)3S numunelerinin çekme mukavemeti, elastik modülü ve uzaması gösterilmiştir. Ayrıca, ortalamaları ve standart sapmaları da belirtilmiştir. Test verilerine göre, numunelerin ortalama mukavemeti 694,9 MPa, elastik modülü 58,38 GPa, uzaması ise %1,12 hesaplanmıştır.

Şekil 4.6'da numunelerin test öncesi ve Şekil 4.7'de numunelerin test sonrası görüntüleri görülmektedir. Numunelerde ortadan ikiye kopma olmamıştır.



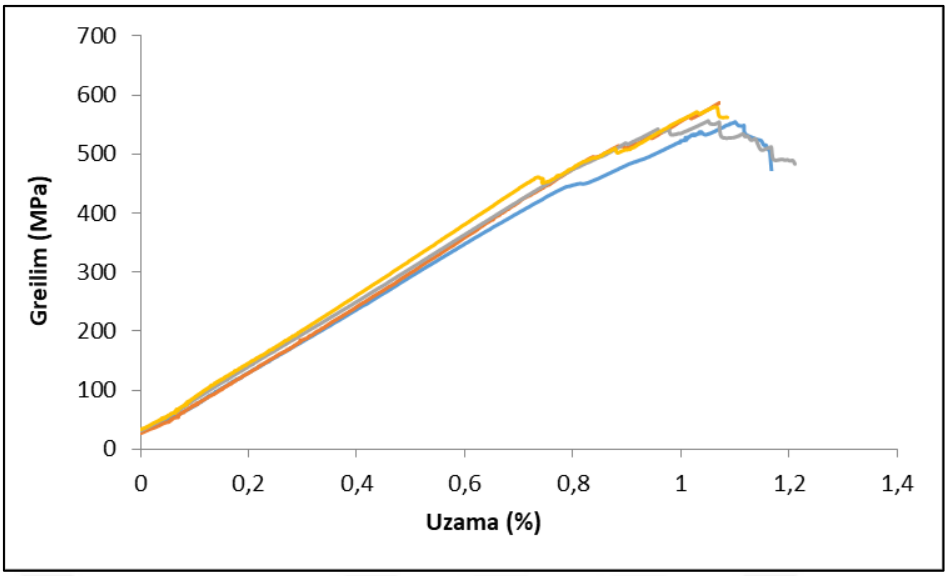
**Şekil 4.6.** (CE)3S numunelerinin çekme testi öncesi görüntüleri



**Şekil 4.7.** (CE)3S numunelerinin çekme testi sonrası görüntüleri

### 4.1.3. (CE)3S-PA66'nın çekme özellikleri

Dört farklı numune ile elde edilen gerilim-uzama grafikleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



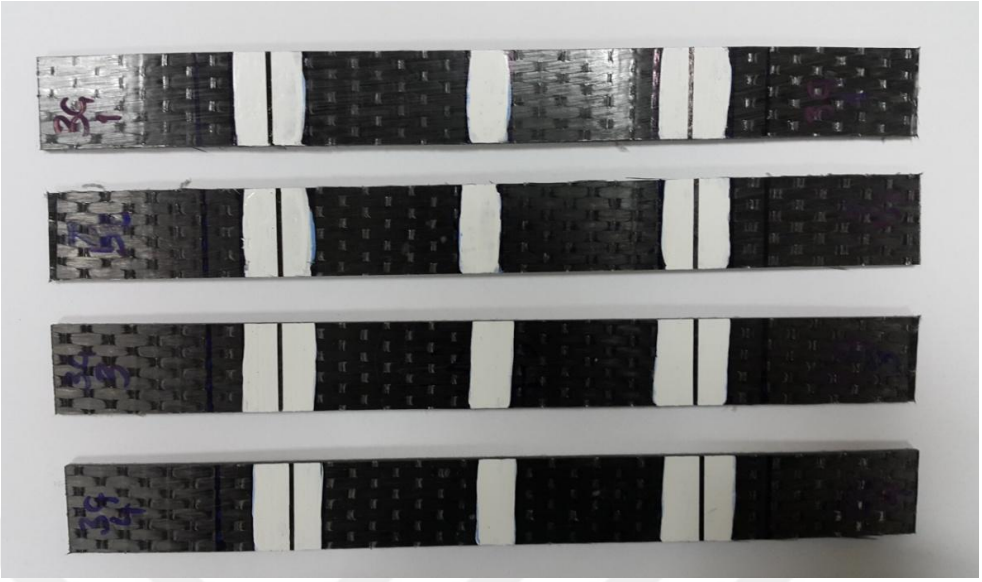

**Şekil 4.8.** (CE)3S-PA66'nın gerinim-gerilim grafiği

Şekil 4.8'de numunelerin maksimum gerilim ve uzama grafiği çizilmiştir. Grafikteki eğrilerin eğimlerinden elastik modülleri hesaplanmıştır. Elde edilen çekme özellikleri Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

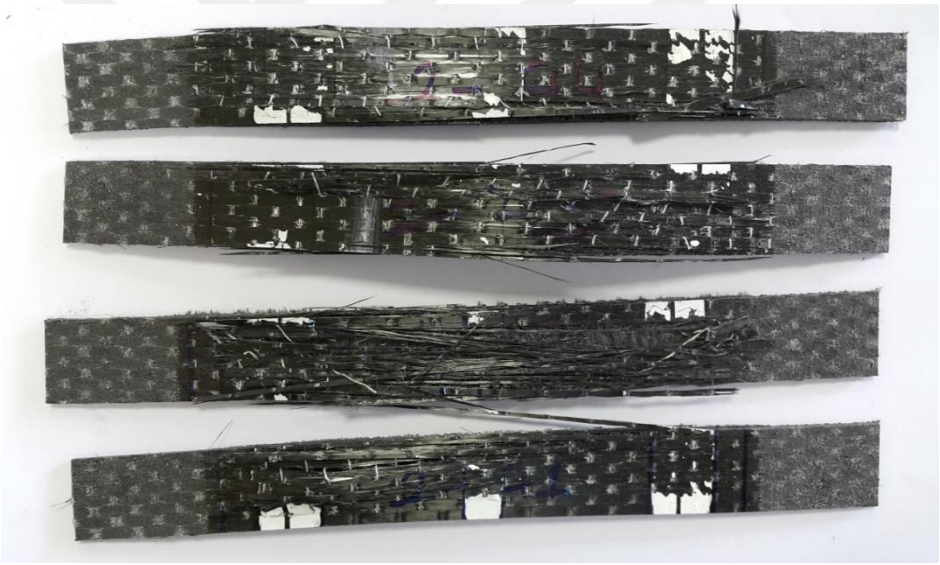
**Çizelge 4.3.** (CE)3S-PA66'nın çekme özellikleri

| | **Çekme mukavemeti (MPa)** | **Elastik modül (GPa)** | **Uzama (%)** |
|---|---|---|---|
| **Numune-1** | 519,7 | 48,02 | 1,09 |
| **Numune-2** | 509,8 | 45,50 | 1,08 |
| **Numune-3** | 534,8 | 45,48 | 1,08 |
| **Numune-4** | 574,1 | 49,69 | 1,09 |
| **Ortalama** | **534,6** | **47,17** | **1,09** |
| **Standart Sapma** | **28,2** | **2,0** | **0,0** |

Çizelge 4.3'te (CE)3S-PA66'nın çekme mukavemeti, elastik modülü ve uzaması gösterilmiştir. Ayrıca, ortalamaları ve standart sapmaları da belirtilmiştir. Test verilerine göre, numunelerin ortalama mukavemeti 534,6 MPa, elastik modülü 47,17 GPa, uzaması ise %1,09 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.9'da numunelerin test öncesi ve Şekil 4.10'da numunelerin test sonrası görüntüleri görülmektedir. Numunelerde ortadan ikiye kopma olmamıştır.



**Şekil 4.9.** (CE)3S-PA66 numunelerinin çekme testi öncesi görüntüleri



**Şekil 4.10.** (CE)3S-PA66 numunelerinin çekme testi sonrası görüntüleri

## 4.2. Charpy Darbe Test Sonuçları

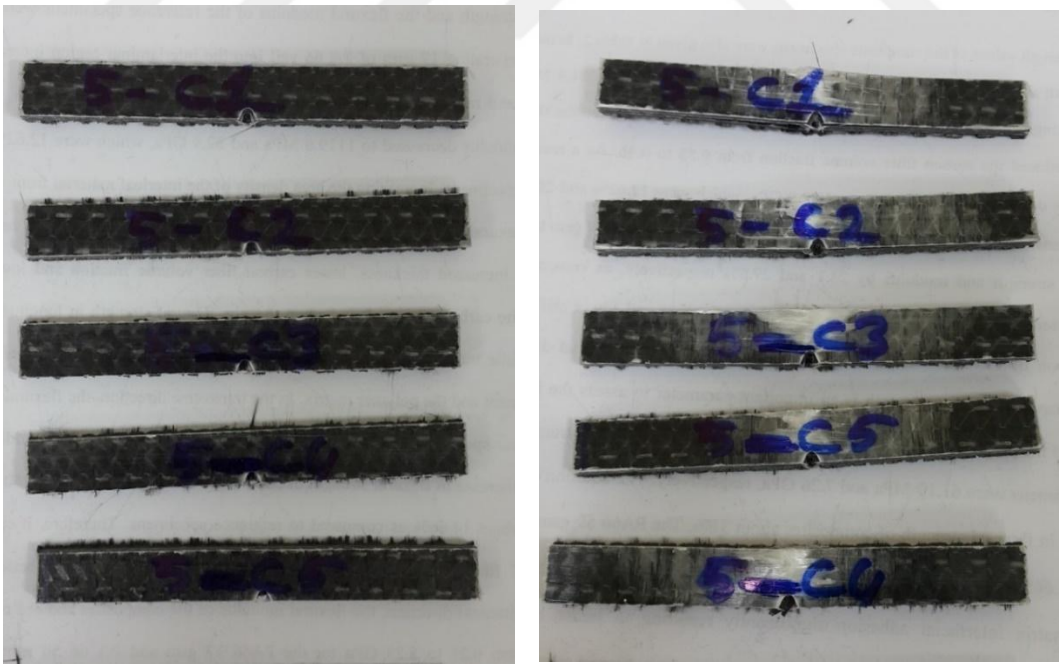
### 4.2.1. (EC)3S'in darbe özellikleri

Çentikli numunelere uygulanan darbe sonucu kırılma enerjileri ölçülmüş, darbe mukavemeti hesaplanmıştır. Numunelerin kırılma enerjileri ve darbe mukavemetleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** (EC)3S'in darbe özellikleri

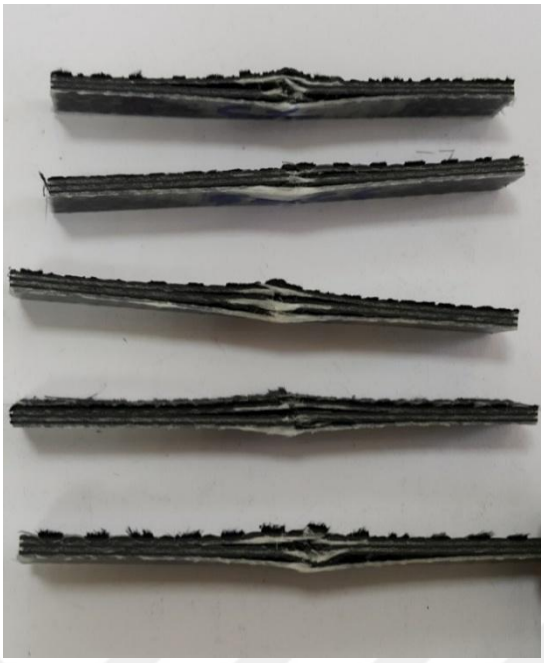
| | **Kırılma Enerjisi (kJ)** | **Darbe Mukavemeti (kJ/m$^2$)** |
|---|---|---|
| **Numune-1** | 4,976 | 197,347 |
| **Numune-2** | 4,504 | 184,807 |
| **Numune-3** | 5,007 | 201,846 |
| **Numune-4** | 4,413 | 180,991 |
| **Numune-5** | 3,281 | 141,994 |
| **Ortalama** | **4,436** | **181,97** |

Çizelge 4.4'te gösterildiği gibi darbe mukavemetlerin ortalaması 181,397 kJ/m$^2$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'te (EC)3S numunelerinin test öncesi ve test sonrası görüntüleri gösterilmiştir.



**a)** **b)**

**Şekil 4.11.** (EC)3S numunelerinin a) darbe testi öncesi ve b) test sonrası görüntüleri



**Şekil 4.12.** (EC)3S numunelerinin darbe testi sonrası yan görüntüleri

(EC)3S'in numunelerinde ortadan kırılma veya eğilme olmayıp, tabakalar arası deformasyon meydana gelmiştir.

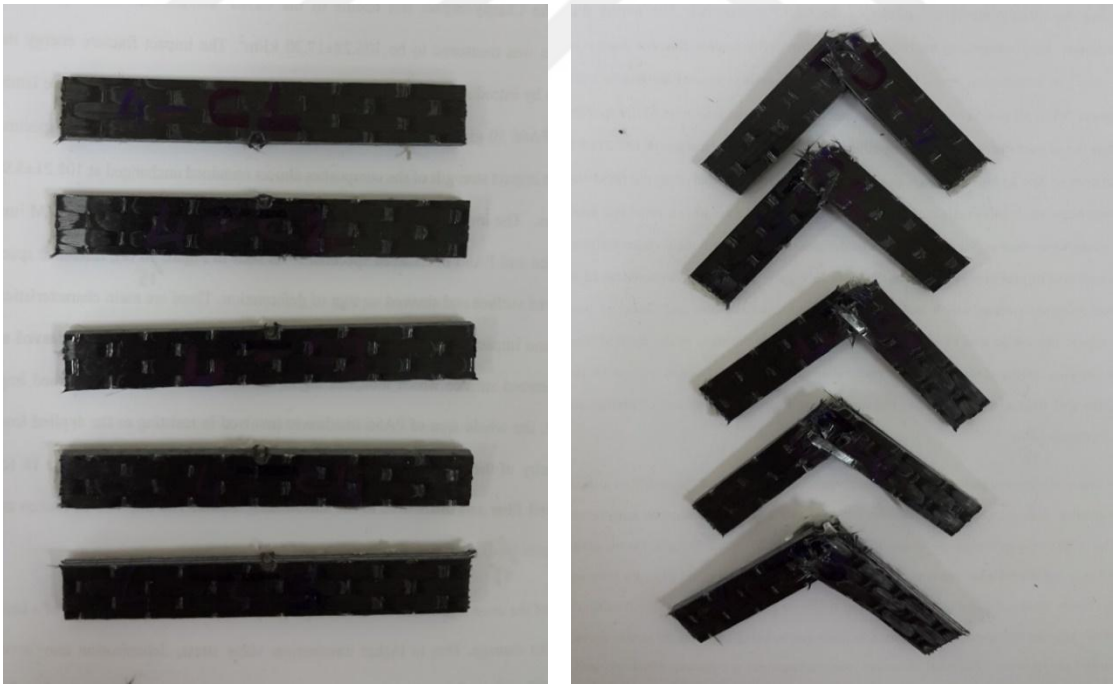
### 4.2.2. (CE)3S'in darbe özellikleri

Çentikli numunelere uygulanan darbe sonucu kırılma enerjileri ölçülmüş, darbe mukavemeti hesaplanmıştır. Numunelerin kırılma enerjileri ve darbe mukavemetleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** (CE)3S'in darbe özellikleri

| | **Kırılma Enerjisi (kJ)** | **Darbe Mukavemeti (kJ/m$^2$)** |
|---|---|---|
| **Numune-1** | 3,096 | 102,163 |
| **Numune-2** | 3,511 | 115,080 |
| **Numune-3** | 2,688 | 97,270 |
| **Numune-4** | 2,797 | 101,129 |
| **Numune-5** | 3,446 | 118,459 |
| **Ortalama** | **3,102** | **106,820** |

Çizelge 4.5'te gösterildiği gibi darbe mukavemetlerin ortalaması 106,820 kJ/m$^2$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.13'te (CE)3S numunelerinin test öncesi ve test sonrası görüntüleri gösterilmiştir.



**a)** **b)**

**Şekil 4.13.** (CE)3S numunelerinin a) darbe testi öncesi ve b) test sonrası görüntüleri

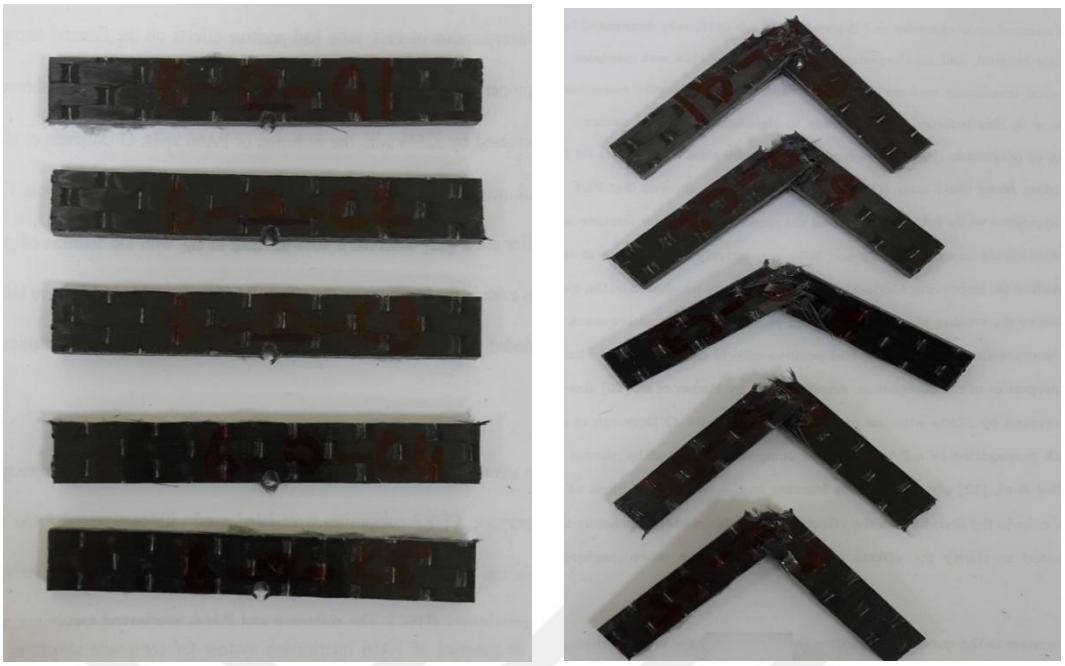
### 4.2.3. (CE)3S-PA66'nın darbe özellikleri

Çentikli numunelere uygulanan darbe sonucu kırılma enerjileri ölçülmüş, darbe mukavemeti hesaplanmıştır. Numunelerin kırılma enerjileri ve darbe mukavemetleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** (CE)3S-PA66'nın darbe özellikleri

| | **Kırılma Enerjisi (kJ)** | **Darbe Mukavemeti ($kJ/m^2$)** |
|---|---|---|
| **Numune-1** | 3,096 | 117,255 |
| **Numune-2** | 2,929 | 112,104 |
| **Numune-3** | 3,012 | 118,118 |
| **Numune-4** | 2,804 | 116,252 |
| **Numune-5** | 2,632 | 108,891 |
| **Ortalama** | **2,895** | **114,524** |

Çizelge 4.6'da gösterildiği gibi darbe mukavemetlerin ortalaması 114,524 $kJ/m^2$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.14'te (CE)3S-PA66 numunelerinin test öncesi ve test sonrası görüntüleri gösterilmiştir.



**a)** **b)**

**Şekil 4.14.** (CE)3S-PA66 numunelerinin a) darbe testi öncesi ve b) test sonrası görüntüleri

## 4.3. Üç Nokta Eğme Test Sonuçları

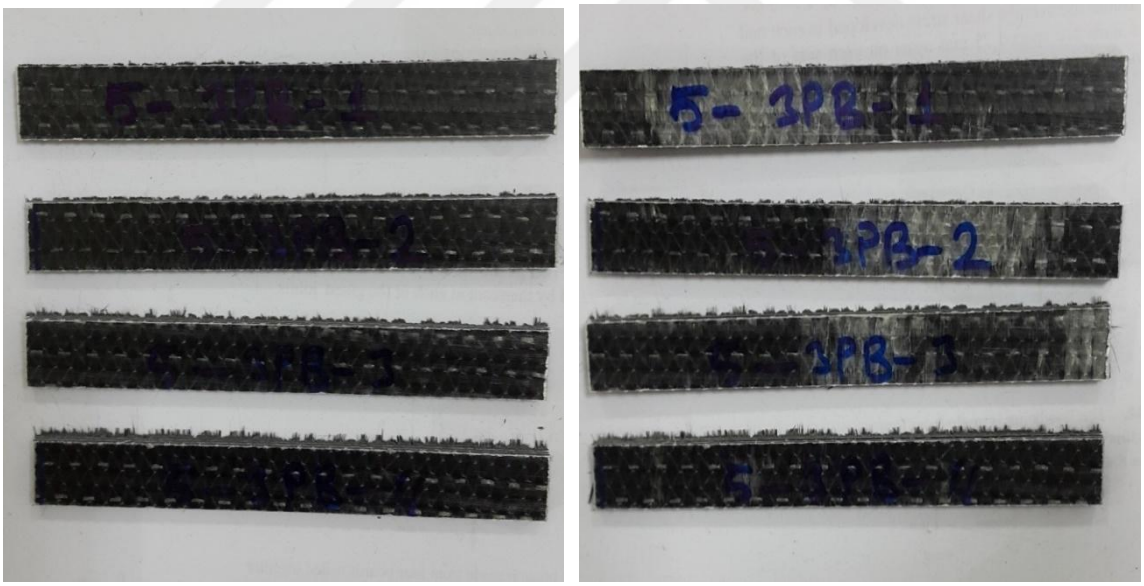
### 4.3.1. (EC)3S'in üç nokta eğme özellikleri

Test sonuçlarına göre; numunelerin eğme mukavemeti ortalaması 498,93 MPa ve eğme modül ortalaması 18,29 GPa hesaplanmıştır. Numunelerin eğme mukavemeti ve eğme modülü sonuçları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** (EC)3S'in eğme özellikleri

| | **Eğme mukavemeti (MPa)** | **Eğme modülü (GPa)** |
|---|---|---|
| **Numune-1** | 515,95 | 20.53 |
| **Numune-2** | 476,41 | 17,74 |
| **Numune-3** | 516,90 | 18,50 |
| **Numune-4** | 486,48 | 16,38 |
| **Ortalama** | **498,93** | **18,29** |
| **Standart sapma** | **20,61** | **1,73** |

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da (EC)3S numunelerinin test öncesi ve test sonrası görüntüleri gösterilmiştir.



**(a)** **(b)**

**Şekil 4.15.** (EC)3S numunelerinin eğme testi öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri



**Şekil 4.16.** (EC)3S numunelerinin eğme testi sonrası yan görüntüleri

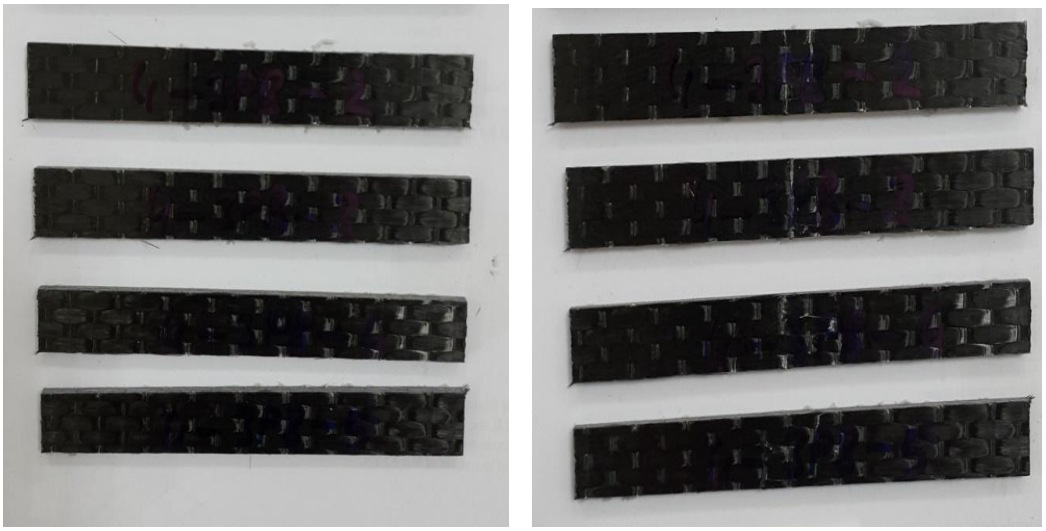
### 4.3.2. (CE)3S'in üç nokta eğme özellikleri

Test sonuçlarına göre; numunelerin eğme mukavemeti ortalaması 379,72 MPa ve eğme modül ortalaması 46,71 GPa hesaplanmıştır. Numunelerin eğme mukavemeti ve eğme modülü sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** (CE)3S'in eğme özellikleri

| | **Eğme mukavemeti (MPa)** | **Eğme modülü (GPa)** |
|---|---|---|
| **Numune-1** | 392,15 | 49,74 |
| **Numune-2** | 356,55 | 40,75 |
| **Numune-3** | 411,71 | 49,69 |
| **Numune-4** | 358,47 | 46,67 |
| **Ortalama** | **379,72** | **46,71** |
| **Standart sapma** | **26,87** | **4,23** |

Şekil 4.17'de (CE)3S numunelerinin test öncesi ve test sonrası görüntüleri gösterilmiştir.



(a) (b)

**Şekil 4.17.** (CE)3S numunelerin eğme testi öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri

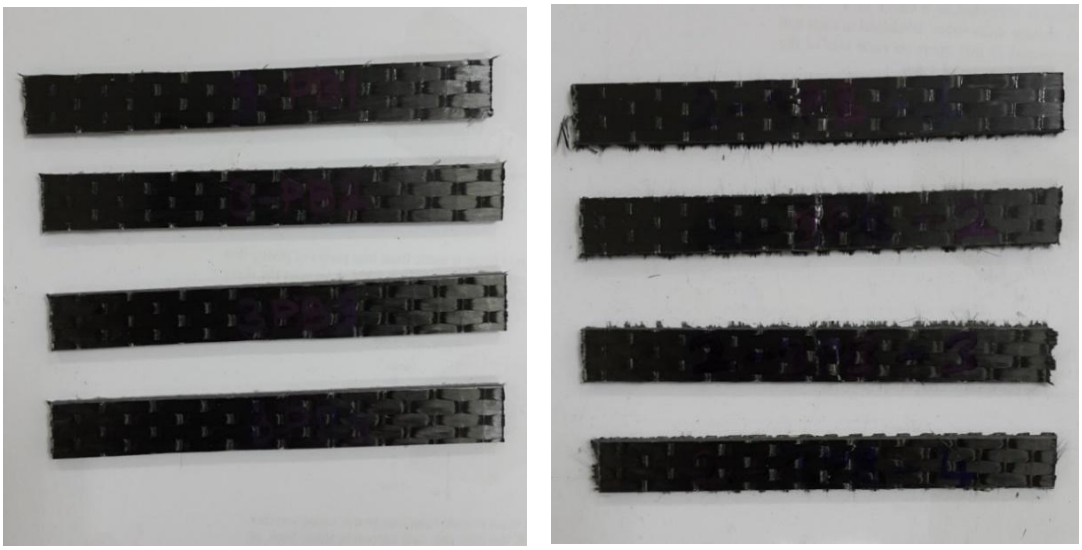
### 4.3.3. (CE)3S-PA66'nın üç nokta eğme özellikleri

Test sonuçlarına göre; numunelerin eğme mukavemeti ortalaması 227,60 MPa ve eğme modül ortalaması 31,04 GPa hesaplanmıştır. Numunelerin eğme mukavemeti ve eğme modülü sonuçları Çizelge 4.9'da verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** (CE)3S-PA66'nın eğme özellikleri

| | **Eğme mukavemeti (MPa)** | **Eğme modülü (GPa)** |
|---|---|---|
| **Numune-1** | 233,07 | 30,68 |
| **Numune-2** | 201,96 | 31,15 |
| **Numune-3** | 247,78 | 31,31 |
| **Ortalama** | **227,60** | **31,04** |
| **Standart sapma** | **23,39** | **0,32** |

Şekil 4.18'de (CE)3S-PA66 numunelerinin test öncesi ve test sonrası görüntüleri gösterilmiştir.



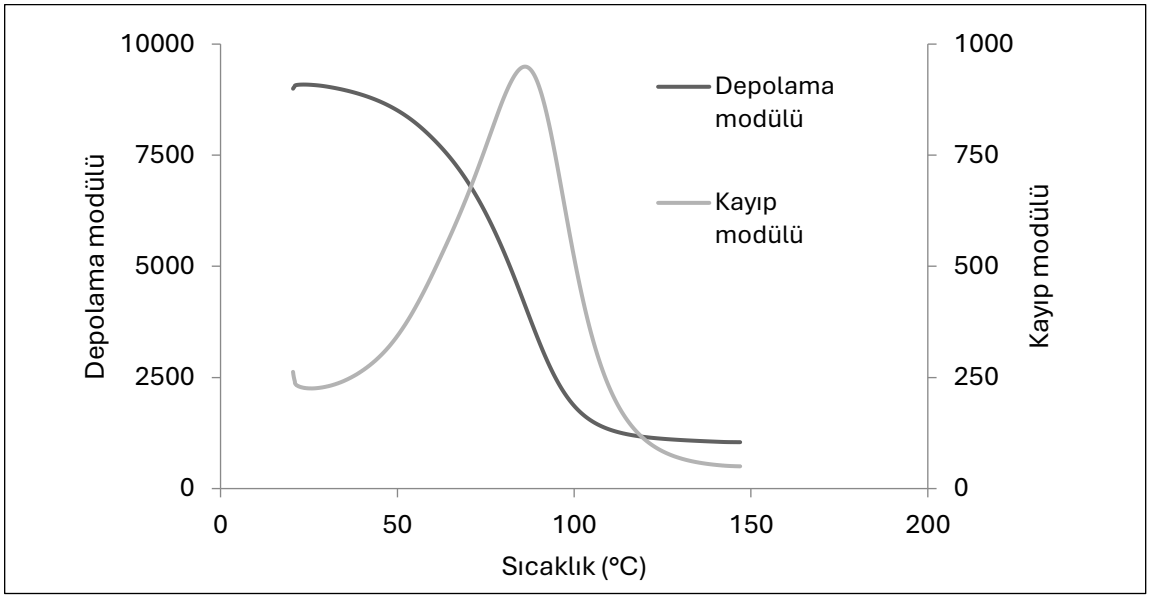
**(a)** **(b)**

**Şekil 4.18.** (CE)3S-PA66 numunelerinin eğme testi öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri

## 4.4. Dinamik Mekanik Analiz Sonuçları

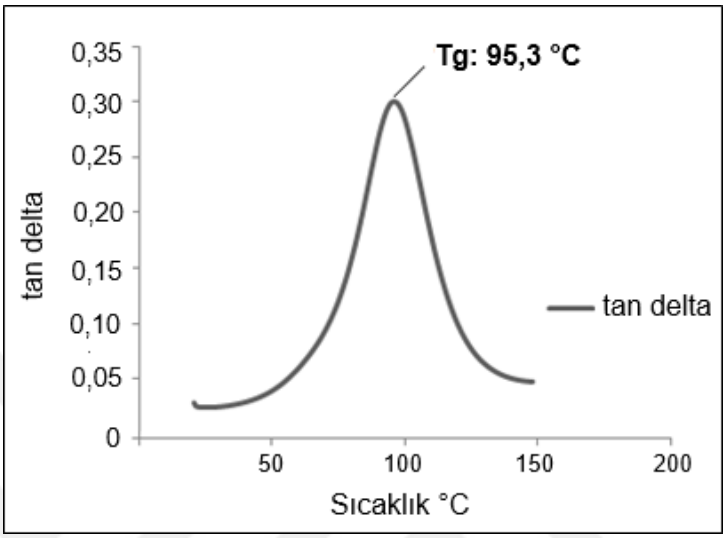
### 4.4.1. (EC)3S'in DMA sonuçları

Test sonucu elde edilen verilerle (EC)3S için tipik depolama modülü - sıcaklık ve kayıp modül - sıcaklık eğrileri Şekil 4.19'da gösterilmiştir.




**Şekil 4.19.** (EC)3S'in tipik depolama modülü-sıcaklık ve kayıp modülü-sıcaklık grafikleri

(EC)3S için maksimum depolama modülü ve kayıp modül değerleri 9090,01 MPa ve 949,32 MPa olarak Şekil 4.19'dan ölçülmüştür. Tan delta – sıcaklık değerlerinden tan delta eğrisi çizilmiş ve Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

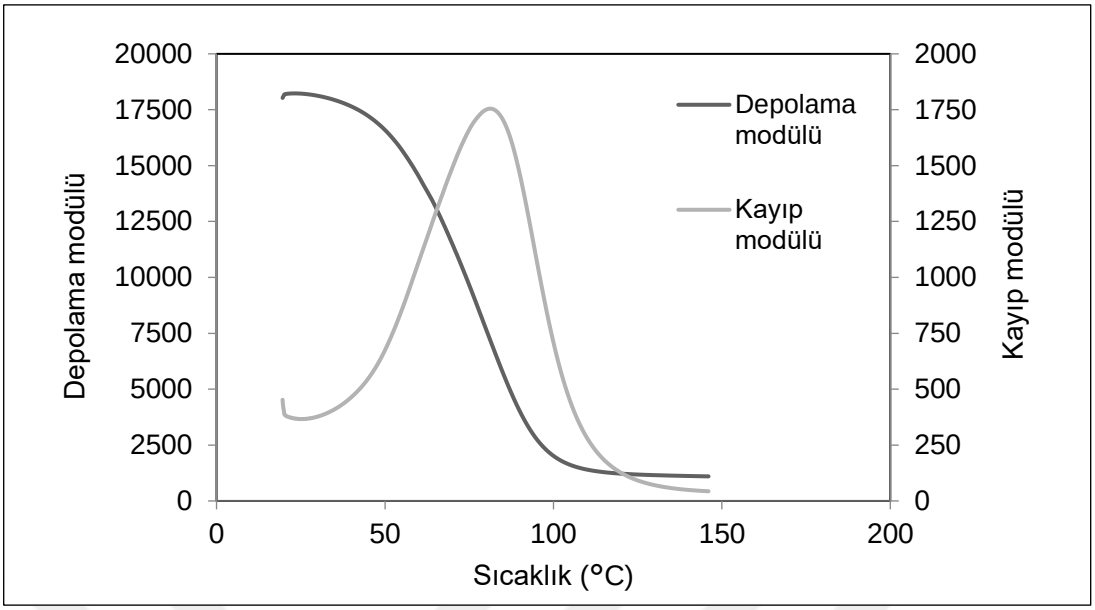



**Şekil 4.20.** (EC)3S'in tipik tan delta-sıcaklık grafiği

Şekil 4.20'de gösterilen tan delta eğrisinin maksimum noktasından camsı geçiş sıcaklığı ($T_g$) belirlenmiştir. (EC)3S için camsı geçiş sıcaklığı 95,3 C°'dir.

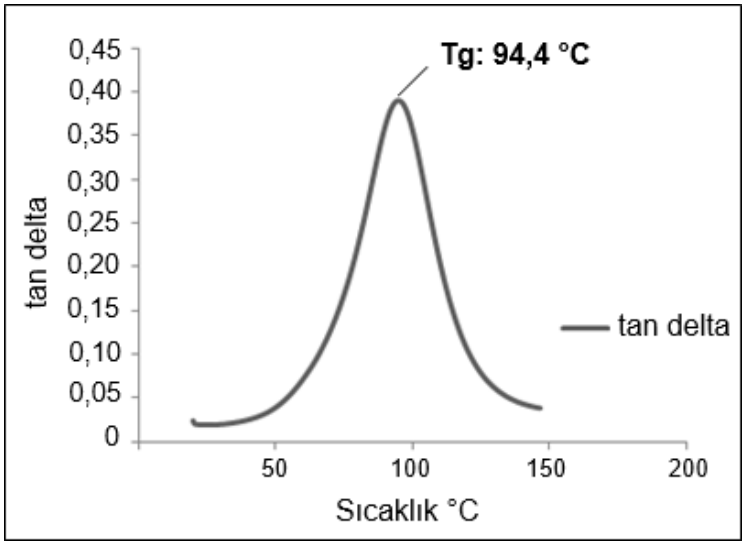
### 4.4.2. (CE)3S'in DMA sonuçları

Test sonucu elde edilen verilerle (CE)3S için tipik depolama modülü - sıcaklık ve kayıp modül - sıcaklık eğrileri Şekil 4.21'de gösterilmiştir.




**Şekil 4.21.** (CE)3S'in tipik depolama modülü-sıcaklık ve kayıp modülü-sıcaklık grafikleri

(CE)3S için maksimum depolama modülü ve kayıp modül değerleri 18230,4 MPa ve 1754,72 MPa olarak Şekil 4.21'den ölçülmüştür. Tan delta – sıcaklık değerlerinden tan delta eğrisi çizilmiş ve Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

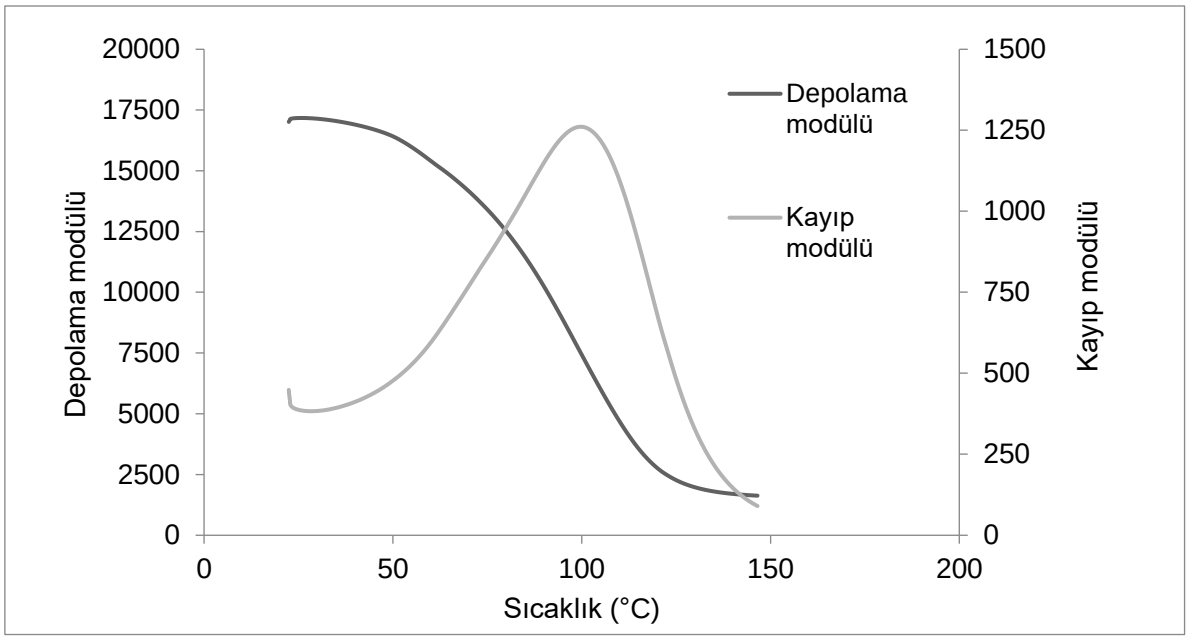



**Şekil 4.22.** (CE)3S'in tipik tan delta-sıcaklık grafiği

Şekil 4.22'da gösterilen tan delta eğrisinin maksimum noktasından camsı geçiş sıcaklığı ($T_g$) belirlenmiştir. (CE)3S için camsı geçiş sıcaklığı 94,4 C°'dir.

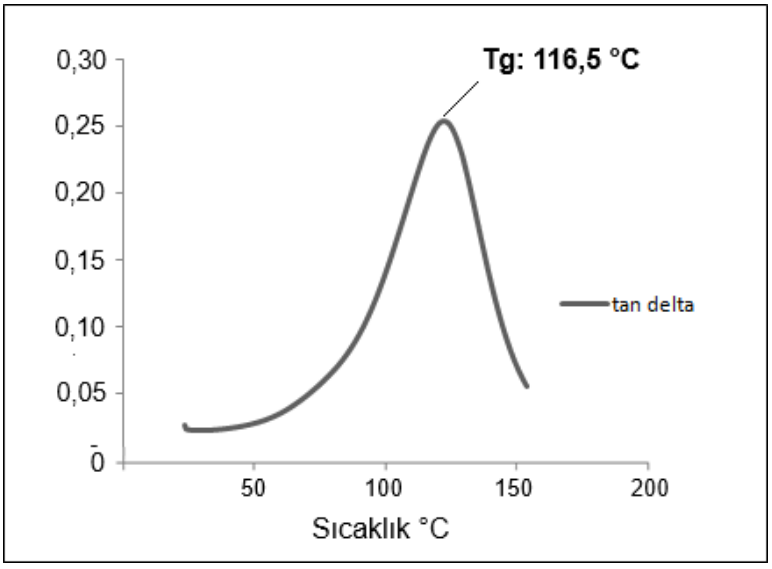
### 4.4.3. (CE)3S-PA66'nın DMA sonuçları

Test sonucu elde edilen verilerle (CE)3S-PA66'nın tipik depolama modülü-sıcaklık ve kayıp modül-sıcaklık eğrileri Şekil 4.23'de gösterilmiştir.




**Şekil 4.23.** (CE)3S-PA66 tipik depolama modülü-sıcaklık ve kayıp modülü-sıcaklık grafikleri

(CE)3S-PA66'e ait maksimum depolama modülü ve kayıp modül değerleri 17173,1 MPa ve 1260,9 MPa olarak Şekil 4.23'ten ölçülmüştür. Tan delta – sıcaklık değerlerinden tan delta eğrisi çizilmiş ve Şekil 4.24'te gösterilmiştir.




**Şekil 4.24:** (CE)3S-PA66'nın tipik tan delta-sıcaklık grafiği

Şekil 4.24'te gösterilen tan delta eğrisinin maksimum noktasından camsı geçiş sıcaklığı ($T_g$) belirlenmiştir. (CE)3S-PA66'nın camsı geçiş sıcaklığı 116,5 C°'dir.

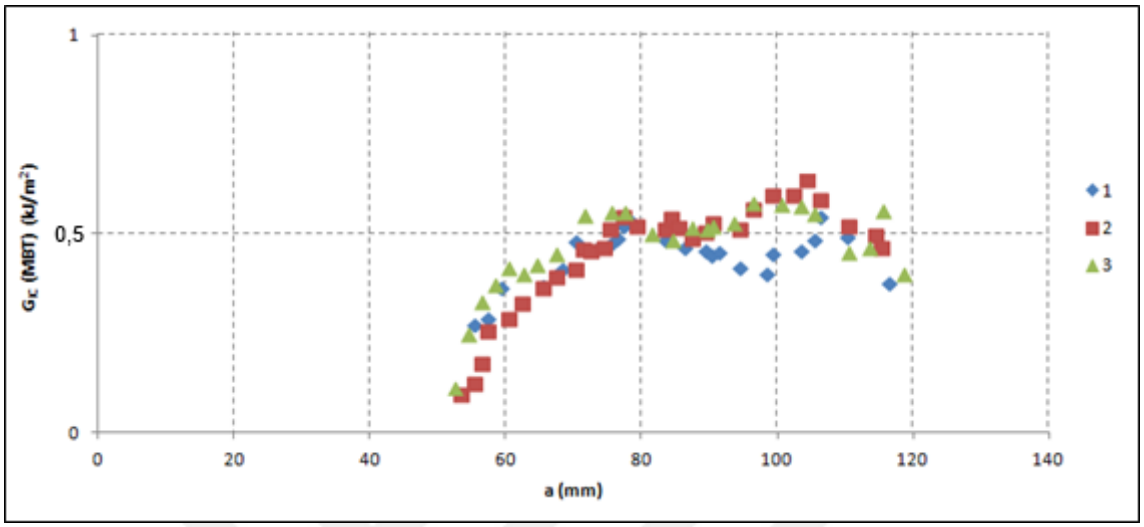
## 4.5. Çift Konsol Kiriş Test Sonuçları

(CE)3S'in tabakalar arası kırılma tokluğu hesaplanarak Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.10.** (CE)3S'in (referans) mod-I tabakalar arası kırılma tokluğu

| | **Gıc, Mod-I Tabakalar Arası Kırılma Tokluğu ($kJ/m^2$)** |
|---|---|
| **Numune-1** | 0,4429 |
| **Numune-2** | 0,4655 |
| **Numune-3** | 0,4474 |
| **Ortalama** | **0,4519** |
| **Standart Sapma** | **0,0119** |

Çizelge 4.10'da (CE)3S'nin (referans) ortalama kırılma tokluğu 0,4519 kJ/m$^2$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.25'te numunelerin kırılma tokluğu–çatlak mesafesi grafiği çizilmiştir.



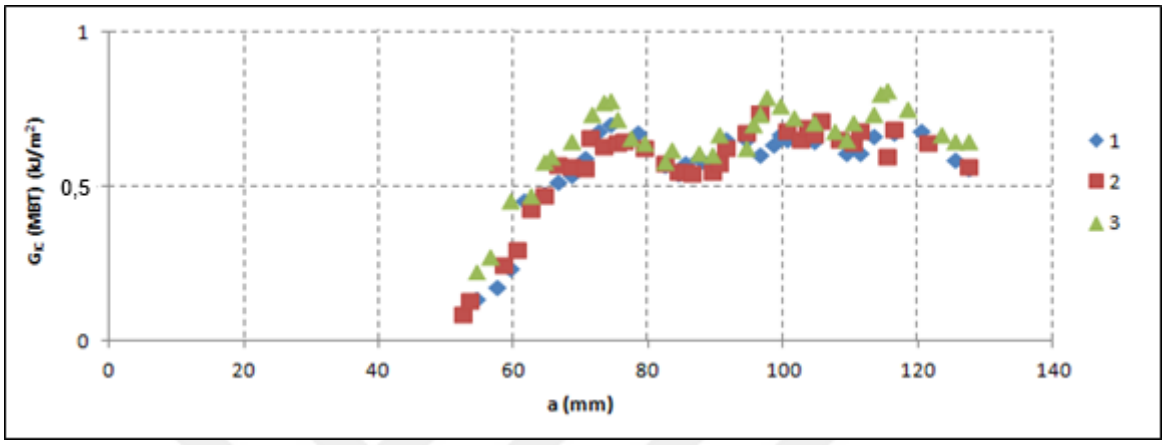

**Şekil 4.25.** (CE)3S (referans)'in kırılma tokluğu-kırılma mesafesi grafikleri

(CE)3S-PA66'nın tabakalar arası kırılma tokluğu hesaplanarak Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.11.** (CE)3S-PA66'nın mod-I tabakalar arası kırılma tokluğu

| | **GIc, Mod-I Tabakalar Arası Kırılma Tokluğu (kJ/m$^2$)** |
|---|---|
| **Numune-1** | 0,5701 |
| **Numune-2** | 0,5712 |
| **Numune-3** | 0,6570 |
| **Ortalama** | **0,5994** |
| **Standart Sapma** | **0,0498** |

Çizelge 4.11'de (CE)3S-PA66 için ortalama kırılma tokluğu 0,5994 kJ/m$^2$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.26'da numunelerin kırılma tokluğu–çatlak mesafesi grafiği çizilmiştir.




**Şekil 4.26.** (CE)3S-PA66'nın kırılma tokluğu-kırılma mesafesi grafikleri

# 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile elde edilen; (EC)3S ve (CE)3S ve (CE)3S-PA66 konfigürasyonlarına ait test sonuç ortalamaları Çizelge 5.1'de karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarına göre hibritler kendi aralarında elyaf yönlenmesine göre ve PA66 kumaş ilavesine göre değerlendirilmiştir.

**Çizelge 5.1.** Kompozit plakaların test sonuçlarının karşılaştırılması

| | **Çekme mukavemeti (MPa)** | **Elastik modül (GPa)** | **Darbe Mukavemeti (kJ/mm$^2$)** | **Eğme Mukavemeti (MPa)** | **Eğme Modülü (GPa)** | **Depolama Modülü (MPa)** | **Kayıp Modül (MPa)** | **Mod-I Kırılma Tokluğu (kJ/m$^2$)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **(EC)3S** | 507,90 | 20,24 | 181,39 | 498,93 | 18,29 | 9090,01 | 949,32 | NA |
| **(CE)3S** | 694,90 | 58,38 | 106,82 | 379,72 | 46,71 | 18230,4 | 1754,72 | 0,45 |
| **(CE)3S-PA66** | 534,60 | 47,17 | 114,52 | 227,60 | 31,04 | 17173,1 | 1260,9 | 0,60 |

Çekme testi sonuçlarına göre plakalar karşılaştırıldığında; en yüksek çekme mukavemeti (CE)3S'den elde edilmiştir. Bu konfigürasyon, karbon/cam ($0^o/90^o$) dizilimine sahiptir. Yüksek mukavemetli karbon elyaflar yük yönüne paralel olmasının pozitif etkisi görülmüştür. PA66 kumaş ilavesinin etkisi incelendiğinde; (CE)3S-PA66'ün mukavemeti, (CE)3S'ye kıyasla %23 düşmüştür. Bu test, kompozit malzemenin gerilme altındaki davranışını anlamak, yük taşıma kapasitesini ve güvenilirliğini değerlendirmek, mekanik özelliklerini belirlemek için kritik bir testtir.

Ikbal ve Wei (2016), yaptıkları çalışmada, cam ve karbon fiber içeren kompozit laminalar ile hibrit laminaları kıyaslamışlardır. Bu çalışmada, tek yönlü karbon elyafların elastik modül ve çekme mukavemetlerinin cam elyaflara göre 2 kattan daha fazla olduğu görülmüştür. Cam elyaf yapıya karbon elyaf hibridizasyonu ile, cam-karbon hibrit sistemdeki karbon elyaf oranı arttıkça, elastik modül ve çekme mukavemetinin de doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Bu çalışma ile benzer şekilde, çekme yönündeki karbon elyafların artmasının; miktarsal ya da yönelimsel olarak, çekme özelliklerine doğrudan etki ettiği görülmüştür.

Zhu vd. (2025), yaptıkları çalışmada cam elyaf ve karbon elyaf kompozitleri, hibritleyerek kıyaslamışlardır. 6 kat elyafı farklı dizilimlerde hibritlemişler, 1/3 oranda karbon elyaf ilavesiyle çekme mukavemetine olan artışı gözlemlemişlerdir. Karbon elyafları lamina yapısının merkezinde tutarak daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Çentikli numunelere yapılan darbe testi sonuçlarına göre; cam/karbon($0^o/90^o$) dizilimine sahip (EC)3S konfigürasyonunun darbe mukavemeti daha yüksektir. Bu konfigürasyon (CE)3S ile karşılaştırıldığında, darbe yönüne dik olan cam elyafların darbe mukavemetini artırdığı görülmüştür. (CE)3S ile (CE)3S-PA66 karşılaştırıldığında, PA66 kumaş ilavesinin darbe mukavemetini %8 artırdığı görülmüştür. Bu test, özellikle malzemenin darbe yükleri altında ne kadar enerji absorbe edebileceğini ve çentik etkisinin malzeme kırılmasına nasıl katkıda bulunduğunu gösterir.

Üç nokta eğme testi sonucu elde edilen verilere göre; $(EC)_{3S}$ konfigürasyonunun eğme mukavemetinin daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Eğme testi sırasında numune üzerinde oluşan basma gerilmesine karşı karbon elyaflar daha dayanıksızdır. $(EC)_{3S}$ konfigürasyonunda, basma gerilmesine karşı daha dayanıklı olan cam elyaflar yük yönüne diktir ($0^o$). (CE)3S ile (CE)3S-PA66 karşılaştırıldığında ise, PA66 kumaş ilavesiyle eğme mukavemetinde %40 düşüş görülmüştür. Bu test, özellikle yapısal uygulamalarda ve yük taşıma kapasitesi gerektiren tasarımlarda kompozit malzemelerin performansını değerlendirmede kritik bir rol oynar.

Madenci vd. (2020) ise yaptıkları çalışmada, pultrüzyon yöntemiyle ürettiği cam elyaf takviyeli profili $0^o$ ve $90^o$ yönlerinde keserek numunelerin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, üretim yönüne paralel ($0^o$) cam elyaf takviyeli kompozit, üretim yönüne dik kesilen ($90^o$) cam takviyeli kompozite göre eğme mukavemetlerinde ciddi bir düşüş görülmüştür.

Dinamik mekanik analiz sonuçlarına göre; (CE)3S konfigürasyonunun depolama modülü yüksektir. Depolama modülü, malzemenin elastik (geri dönüşümlü) özelliklerini gösterir. Bu, malzemenin sertliğini ve mekanik stabilitesini yansıtan bir parametredir. (EC)3S ve (CE)3S kıyaslandığında; (CE)3S ($0^o/90^o$) karbon/cam dizilimine sahiptir, $0^o$ yönelimindeki (üretim yönüne paralel) karbon elyafların depolama modülünü 2 kat artırdığı görülmektedir. Yüksek depolama modülü, kompozit malzemenin daha rijit olduğunu

gösterir. Bir malzemenin enerjiyi elastik olarak saklayabilmesini temsil eder. PA66 ilavesinin etkisi incelendiğinde ise depolama modülünde %5,8 düşüş olduğu görülmüştür.

Çift konsol kiriş testinde, PA66 kumaş ilavesinin tabakalar arası kırılma mukavemetine etkisi incelenmiştir. Elde edilen verilerle $(CE)_{3S}$ ve $(CE)_{3S}$-PA66 örneklerinin Mod-I kırılma tokluğu sırasıyla 0,45 ve 0,60 kJ/m$^2$ ölçülmüştür. Bu sonuçlarına göre, PA66 kumaş ilavesinin kırılma tokluğunu %32,6 artırdığı hesaplanmıştır, Şekil 4.25 ve 4.26'da verilen grafikler kıyaslandığında; kırılma tokluğundaki yükseliş, PA66'nın çatlak ilerlemesi esnasında çatlak ilerlemesine karşı gösterdiği direnç ile ilgilidir. Yüksek tabakalar arası kırılma tokluğu, kompozitin yük taşıma kapasitesini artırırken, aynı zamanda delaminasyon ve çatlamaya karşı dayanıklılığını da güçlendirir.

Beylergil vd (2018), çalışmalarında epoksi matrisli karbon fiber takviyeli kompozit lamina içerisine poliamid tül ilave ederek kırılma tokluğuna etkisini araştırmışlar ve tokluğa ciddi oranda katkıda bulunduğunu ölçmüşlerdir.

Bu çalışmada, 3 farklı hibrit kompozit konfigürasyonda birçok farklı mekanik özellik için değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre, farklı dizilimlere sahip konfigürasyonlarda, elyafların dizilim yönüne göre farklı özelliklerin ön plana çıktığı görüşmüştür. Üretim yönüne paralel olan ($0^o$) karbon elyafların, yüksek çekme mukavemeti, çekme modülü, eğme modülü ve depolama modülü özelliklerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Üretim yönüne paralel olan ($0^o$) cam elyafların ise, yüksek darbe mukavemeti ve eğme mukavemeti özelliklerinde etkisi görülmüştür. Ayrıca, tabakalar arası kırılma tokluğunu artırmak üzere yapıya ilave edilen PA66 ilavesinin, diğer mekanik özellikler üzerinde yaptığı etki araştırılmış; çekme mukavemeti, eğme mukavemeti ve depolama modülü özelliklerinde düşüşe sebep olurken, darbe mukavemetine artış sağladığı tespit edilmiştir. Çalışma sonucuna göre farklı hibrit kompozitler ile dengelenmiş özellikler elde edilirken, maliyetten de kazanç sağlamanın mümkün olacağı görülmüştür.

# KAYNAKLAR DİZİNİ


Associates, E. G., 1999. *Marine Composites*, Second edition, Eric Greene Associates, Maryland, USA.

ASTM D3039/D3039M-08 (2014), *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,* ASTM.

ASTM D4065-20 (2020), *Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: Determination and Report of Procedures,* ASTM.

ASTM D5528-13 (2022), *Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites,* ASTM.

ASTM D6110-18, (2018) *Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics,* ASTM.

ASTM D790-17 (2017), *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials,* ASTM.

Ayan, M. Ç., (2019). *Pamuk Elyaf Takviyeli Biyo Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,* Yüksek lisans tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, s. iv.

Ban, B., Haithem, H., (2013). *Effect of Fiber Orientation for Fiber Glass Reinforced Composite Material on Mechanical Properties*, International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME) Volume 1, Issue5

Banakar, P., Shivananda, H.K., Niranjan, H.B., *(2012). Influence of Fiber Orientation and Thickness on Tensile Properties of Laminated Polymer Composites,* Int. J. Pure Appl. Sci. Technol., 9(1) (2012), pp. 61-68

Bekele A. A., Takele, H., Mekonnen, H. T., Yigezu, B. S., Nega, A. Y., (2024) *Experimental investigation on tensile strength and impact strength of palmyra palm leaf stalk – Sisal fiber reinforced polymer hybrid composite*, doi:10.1016/j.heliyon.2024.e39555

Beylergil, B., Tanoğlu, M., & Aktaş, E. (2018). *Effect of polyamide-6,6 (PA 66) nonwoven veils on the mechanical performance of carbon fiber/epoxy composites. Composite Structures, 194, 21–35.* doi:10.1016/j.compstruct.2018.03.

# KAYNAKLAR DİZİNİ


Broughton W., 2012. *Adhesives in Marine Engineering, 6 – Testing the mechanical, thermaland, checmical properties of adhesives for marine environments.* Woodhead Publishing Limited

Callister W.D., 2006. *Materials Science and Engineering An Introduction*, 7 edition, Wiley Publishing

Camelyaf.net. *Cam Elyaf ve Karbon Elyaf: Karşılaştırma ve Kullanım Alanları.* Erişim: https://camelyaf.net/cam-elyaf-ve-karbon-elyaf-karsilastirma-ve-kullanim-alanlari/?ut . Erişim tarihi: 20.09.2024

Can, O. S., Değirmenci, M., 2017. *Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri,* Lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, s.74-90.

Chavhan, G. R., Wankhade, L. N. (2019). *Improvement of the mechanical properties of hybrid composites prepared by fibers, fiber-metals, and nano-filler particles – A review. Materials Today: Proceedings.* doi:10.1016/j.matpr.2019.08.240

Chen, D., Sun, G., Meng, M., Jin, X., Li, Q. (2019). *Flexural performance and cost efficiency of carbon/basalt/glass hybrid FRP composite laminates. Thin-Walled Structures, 142, 516–531.* doi:10.1016/j.tws.2019.03.056

Cirino, M., Friedrich, K., Pipes, R. B. (1988). *The effect of fiber orientation on the abrasive wear behavior of polymer composite materials. Wear,* 121(2), 127–141. doi:10.1016/0043-1648(88)90038-5

Daniel, I.M. and Ishai, O., 1994. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, New York.

Durgun, İ., 2014. *Vakum İnfüzyon Yöntemiyle Kompozit Parça Üretimi,* 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, s.3-5.

Elango, I., Arumugam, V., Dhakal, H. N., (2024). *Fabrication and comparison of interlaminar fracture toughness behaviour of glass epoxy composites with recycled milled Kevlar-carbon hybrid fillers*, doi:10.1016/j.heliyon.2024.e38842

Hamer S., Leibovich H., Green A., Intrater R., Avrahami R., Zussman E., Siegmann A, Sherman D. (2011). *Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Nylon 66 Nanofibrilmat Interleaved Carbon/Epoxy Laminates*. Polymer Composites, 32(11), 1781–1789. doi:10.1002/pc.21210

# KAYNAKLAR DİZİNİ

Hashim, M. K. R., Abdul Majid, M. S., Ridzuan, M.J.M., Kasim, F. H., Uda, M.N.A., Arsat, Z.A., Abdullah, F., Firdaus, M., Muttalib, A., Afnan Uda, M. N., (2023). *The mechanical properties of pineapple leaf fibre (PALF)/carbon hybrid laminate composites at anti-symmetric ply orientation*, doi:10.1016/j.matpr.2023.04.003

Ikbal, M. H., Wei, L. (2016). *Effect of proportion of carbon fiber content and the dispersion of two fiber types on tensile and compressive properties of intra-layer hybrid composites. Textile Research Journal, 87(3), 305–328.* doi:10.1177/0040517516629146

Khan, A., Sapuan, S.M., Zainudin, E.S., Zuhri, M.Y.M. (2024). *Physical, mechanical and thermal properties of novel bamboo/kenaf fiber-reinforced polylactic acid (PLA) hybrid composites*, doi.org/10.1016/j.coco.2024.102103

Kim, J.W., and Lee, D.G. (2010). *Effect of Fiber Orientation and Fiber Contents on the Tensile Strength in Fiber-Reinforced Composites*, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 10(5), 3650–3653. doi:10.1166/jnn.2010.2303

Liu, J. A., Dong, Z. Q., Zhu, X. Y., Sun, W. B., Huang, Z. Q. (2022). *Flexural properties of lightweight carbon fiber/epoxy resin composite sandwiches with different fiber directions*, doi:10.1088/2053-1591/ac4dc5

Madenci, E., Onuralp Özkılıç, Y., & Gemi, L. (2020). *Experimental and Theoretical Investigation on Flexure Performance of Pultruded GFRP Composite Beams with Damage Analyses. Composite Structures, 112162.* doi:10.1016/j.compstruct.2020.112162

Mortazavian, S., & Fatemi, A. (2015). *Effects of fiber orientation and anisotropy on tensile strength and elastic modulus of short fiber reinforced polymer composites*. Composites Part B: Engineering, 72, 116–129 doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.041

Naik, N.K., Ramasimha, R., Arya, H., Prabhu, S.V., ShamaRao, N. (2001) *Impact response and damage tolerance characteristics of glass-carbon/epoxy hybrid composite plates*, Composites: Part B, 32, 565. doi.org/10.1016/S1359-8368(01)00036-1

# KAYNAKLAR DİZİNİ


Nak-Ho, S., Suh, N. P. (1979). *Effect of fiber orientation on friction and wear of fiber reinforced polymeric composites.* Wear, 53(1), 129-141. doi:10.1016/0043-1648(79)90224-2

O'Donovan K, Ray D, McCarthy M. A. (2014). *Toughening Effects of Interleaved Nylon Veils on Glass Fabric / Low-Styrene-Emission Unsaturated Polyester Resin Composites.* J.Appl. Polym. Sci 2014; 132(7): 41462. doi:10.1002/app.41462

Park, R., & Jang, J., (2000). *Effect of laminate geometry on impact performance of aramid fiber / polyethylene fiber hybrid composites.* Journal of Applied Polymer Science, 75 (7), 952-959. doi:10.1002/(sici)10974628(20000214)75:7<952::aidapp12>3.0.co;2-v

Park, S-J., 2014. *Carbon Fibers*, Springer.

Pegoretti, A., Fabbri, E., Migliaresi, C., Pilati, F., (2004). *Intraply and interply hybrid composites based on E-glass and poly(vinyl alcohol) woven fabrics: tensile and, impact properties*, Society of Chemical Industry. Polymer International, 53, 1290. doi:10.1002/pi.1514

Ragosta G., Abbate M., Musto P., Scarinzi G., Mascia L. (2005). *Epoxy–silica particulate nanocomposites: chemical interactions, reinforcement and fracture toughness.* Polymer 2005; 46(23): 10506–10516. doi.org/10.1016/j.polymer.2005.08.028

Reddy J. N., (2004). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis*, Second Edition, CRC Press, USA.

Ribeiro, F., Correia, L., Sena-Cruz, J., (2024). *Mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional interlayer hybrid FRP composites,* doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.138418

Saz-Orozco BD, Ray D, Stanley W. F. (2015). *Effect of thermoplastic veils on interlaminar fracture Toughness of a Glass Fiber / Vinyl Ester Composite*. Polym Compos 2015; doi:10.1002/pc.23840.

Sinha, A. K., Narang, H. K., Bhattacharya, S., (2020). *Mechanical properties of hybrid polymer composites: a review.* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, *42(8). doi:10.1007/s40430-020-02517-w*

# KAYNAKLAR DİZİNİ

Suarez, S. A., Gibson, R. F., Sun, C. T., Chaturvedi, S. K. (1986). *The influence of fiber length and fiber orientation on damping and stiffness of polymer composite materials. Experimental Mechanics, 26(2), 175–184. doi:10.1007/bf02320012*

Swolfs, Y., Gorbatikh, L., Verpoest, I. (2014). *Fibre hybridisation in polymer composites: A review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 67, 181–200. doi:10.1016/j.compositesa.2014.08*

Yazman, Ş., Gemi, L., Morkavuk, S., Köklü, U. (2024). *Investigation of the effect of symmetrical hybrid stacking on drilling machinability of unidirectional CFRP, GFRP and hybrid composites: Drilling tests and damage analysis*, doi:10.1016/j.compositesa.2024.108486

Yokozeki T., Iwahori Y., Ishibashi M., Yanagisawa T., Imai K., Arai M., Takahashi T., Enomoto K. (2009). *Fracture toughness improvement of CFRP laminates by dispersion of cupstacked carbon nanotubes*. Compos Sci Technol 2009; 69(14): 2268–2273. doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.12.017

Wang, H. W., Zhou, H. W., Gui, L. L., Ji, H. W., & Zhang, X. C. (2014). *Analysis of effect of fiber orientation on Young's modulus for unidirectional fiber reinforced composites.* Composites Part B: Engineering, 56, 733–739. doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.020

Wisnom, M. R., Czél, G., Swolfs, Y., Jalalvand, M., Gorbatikh, L., Verpoest, I. (2016) *Hybrid effects in thin ply carbon/glass unidirectional laminates: Accurate experimental determination and prediction. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 88, 131–139.* doi:10.1016/j.compositesa.2016.04.014

Zhu, X., Deng, J., Heidari, A., Jamei, M., Alizadeh, A., (2025). *Mechanical performance evaluation of optimal hybrid composite fabricated with glass and carbon fibers and thermoplastic polypropylene matrix or fencing sports athletes*, doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108346

# EK AÇIKLAMALAR

Çalışmadan elde edilen sonuçların bir kısmı aşağıda ayrıntıları verilen Uluslararası bir sempozyumda sunulmuş ve bir makalede yayınlanmıştır.

Taşçı H., Aşkın A., Tanoğlu M., (2017). *"Development of Carbon-Glass Fiber Reinforced Hybrid Composites by Vacuum Infusion Technique"* Journal of the Turkish Chemical Society B , no.2, pp.35-42, 2017

Taşçı H., Aşkın A., Tanoğlu M. "Mechanical properties of carbon–e-glass/polyester hybrid composites" V. International Polymeric Composites Symposium and Workshops, İzmir, Türkiye, 2-4 Kasım 2017.