



**CAM VE KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT  
MALZEMELERİN FARKLI İSTİFLEME ŞEKİLLERİNE  
GÖRE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Oğuzhan ALBAYRAK**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Mekanik Bilim Dalı  
Prof. Dr. Hamit AKBULUT**

**2019**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CAM VE KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT  
MALZEMELERİN FARKLI İSTİFLEME ŞEKİLLERİNE GÖRE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Oğuzhan ALBAYRAK**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Mekanik Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2019**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**CAM VE KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN  
FARKLI İSTİFLEME ŞEKİLLERİNE GÖRE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

Prof. Dr. Hamit AKBULUT danışmanlığında, Oğuzhan ALBAYRAK tarafından hazırlanan bu çalışma, 22/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Mekanik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Hamit AKBULUT

İmza : 

Üye : Prof. Dr. Mehmet GAUGALI

İmza : 

Üye : Prof. Dr. Murat Demir AYDIN

İmza : 

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 31/01/2019 tarih ve 05/32 nolu kararı ile onaylanmıştır.

  
Prof. Dr. Mehmet KARAKAN  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### **CAM VE KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN FARKLI İSTİFLEME ŞEKİLLERİNE GÖRE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Oğuzhan ALBAYRAK

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Mekanik Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

İki veya daha fazla malzemenin çeşitli yöntemlerle bir araya getirilmesi ile oluşan yeni tür malzemeler kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadır. Kompozit malzemeler, kendilerini oluşturan malzemelerden farklı özellikler sergilemektedir. Gelişen teknolojilerle birlikte, özellikle savunma sanayisinde, uzay ve havacılık sektöründe, inşaat mühendisliği alanında, otomotiv ve ulaşım sektöründe, sağlık sektöründe, vb. kompozitlerden sıklıkla yararlanılmaktadır. Bu tez kapsamında, sekiz tabakadan oluşan kompozit malzemeler, vakum infüzyon metodu ile üretilmiştir. Çalışmada, karbon elyaf ve cam elyaf, sekiz farklı şekilde istiflenerek, sekiz farklı kompozit numune ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen kompozit numuneler üzerinde çekme deneyi ve üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneysel veriler, sonlu elemanlar metodunu baz alan ANSYS programı ile nümerik olarak analiz edilmiş ve deneysel sonuçlar ile nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının önemli oranda örtüştüğü görülmüştür.

**2019, 59 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Cam elyaf, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, karbon elyaf, tabakalı kompozit

## **ABSTRACT**

MS Thesis

### **DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF FIBERGLASS AND CARBON FIBER COMPOSITE MATERIALS DEPENDING ON FIBER STACKING SEQUENCE**

Oğuzhan ALBAYRAK

Atatürk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

Composite materials are new type of materials that consist of two or more materials combined with various methods. Composite materials exhibit different properties than the constituent materials. With advancing technologies, especially in defense industry, aerospace and aerospace industry, civil engineering, automotive and transportation sector, health sector, etc. composites are often used. In this thesis, composite materials consisting of eight layers were produced by vacuum infusion method. In the study, carbon fiber and glass fiber were stacked in eight different ways and eight different composite samples were exposed. Tensile tests and three point bending tests were performed on the composite samples. In addition, the experimental data were analyzed numerically with the ANSYS program based on the finite element method and the experimental results and numerical analysis results were compared. It was observed that the experimental results were significantly coincide with the analysis results.

**2019, 59 pages**

**Keywords:** Fiberglass, tensile strength, bending strength, carbon fiber, laminated composite

## TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Hamit AKBULUT'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında bilgi ve tecrübeleri ile yardımcı olan Sayın Öğr. Gör. Levent PEHLİVAN'a, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet BAŞOĞLU'na, Sayın Öğr. Gör. A. Tahir KALKIŞIM'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Desteklerini her zaman yanımda hissettiğim kıymetli eşim Zeynep Neşe'ye, kızım Ayşe Duru'ya ve oğlum Ali Deniz'e şükranlarımı sunarım.

**Oğuzhan ALBAYRAK**

**Ocak 2019**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
1.2. Kaynak Özetleri.....	1
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>8</b>
2.1. Kompozit Malzemeler .....	8
2.2.1. Kompozisyonlarına göre kompozitlerin sınıflandırılması.....	9
2.2.2. Yapılarını oluşturan malzeme türlerine göre kompozitlerin sınıflandırılması .....	11
2.3. Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzemeler .....	12
2.3.1. Takviye malzemeleri .....	12
2.3.2. Matris malzemeleri.....	14
2.4. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Bazı Yöntemler.....	16
2.5. Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	18
2.6. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları .....	18
2.7. Kompozit Malzemelerin Başlıca Kullanım Alanları.....	19
2.8. ANSYS Paket Programı .....	19
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>20</b>
3.1. Materyal.....	20
3.1.1. Cam Elyaf (C) .....	20
3.1.2. Karbon elyaf (K) .....	20
3.1.3. Epoksi reçine .....	21
3.2. Yöntem .....	21
3.2.1. Kompozit malzemelerin üretilmesi .....	22

3.2.2. Deney numunelerinin elde edilmesi .....	27
3.2.3. Çekme deneyi .....	29
3.2.4. Üç nokta eğilme deneyi .....	30
3.2.5. ANSYS analizi .....	32
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>41</b>
4.1. Çekme Deneyi Sonuçları .....	41
4.2. Üç Nokta Eğilme Deneyi Sonuçları .....	45
4.3. ANSYS Analiz Sonuçları .....	49
4.3.1. Çekme analizleri .....	49
4.3.2. Eğilme analizleri .....	51
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>55</b>
KAYNAKLAR .....	57
ÖZGEÇMİŞ .....	60



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

C	Cam elyaf
CNC	Bilgisayar destekli nümerik kontrol
$E_f$	Elastisite modülü
K	Karbon elyaf
PAN	Poliakrilonitrit
PMC	Fiberler veya diğ er takviye malzemeler içeren kompozitler
RTM	Reçine transfer kalıplama
VARTM	Vakum Destekli reçine kalıplama
$\sigma_f$	Eğilme mukavemeti

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kompozitlerin kompozisyonlarına göre sınıflandırılması .....	10
Şekil 3.1. Deneilerde kullanılan cam elyaf kumaş.....	20
Şekil 3.2. Deneilerde kullanılan karbon elyaf.....	21
Şekil 3.3. Sıcaklık kontrollü vakum infüzyon üretim ünitesi .....	22
Şekil 3.4. Cam elyafın tezgâha yerleştirilmesi.....	23
Şekil 3.5. Karbon elyafın tezgâha yerleştirilmesi .....	23
Şekil 3.6. Farklı istiflenme şekillerine sahip numunelerin hazırlanması.....	24
Şekil 3.7. Tezgâha sızdırmazlık poşeti serilmesi.....	24
Şekil 3.8. Epoksi reçinenin vakumlanması .....	25
Şekil 3.9. Üretime ait genel bir görünüm.....	25
Şekil 3.10. Reçinenin elyafa nüfuz etmesi.....	26
Şekil 3.11. Üretilmiş olan kompozit malzemenin difüzyon filesinden ayrılması.....	26
Şekil 3.12. CNC Freze tezgâhında numunelerin kesilmesi.....	28
Şekil 3.13. CNC freze ile deney numunelerinin elde edilişi.....	28
Şekil 3.14. Çekme deneyinde kullanılan numune boyutları .....	29
Şekil 3.15. Çekme deneyi cihazı.....	30
Şekil 3.16. Üç nokta eğilme deneyinde kullanılan numune boyutları .....	31
Şekil 3.17. ANSYS Workbench'in görünümü.....	32
Şekil 3.18. Malzeme özelliklerinin girilebilmesi için Engineering Data seçilmesi.....	33
Şekil 3.19. Malzeme özelliklerinin girilmesi.....	33
Şekil 3.20. Malzeme geometrilerinin girilebilmesi için ANSYS Geometry sekmesi .....	34
Şekil 3.21. Çekme numunesinin ANSYS'de modellenmesi.....	34
Şekil 3.22. Eğilme numunesinin ANSYS'de modellenmesi .....	35
Şekil 3.23. Model oluşturulması .....	35
Şekil 3.24. Çekme numunesi için "Assignment" adımının gerçekleştirilmesi .....	36
Şekil 3.25. Çekme numunesi için "Mesh" adımının gerçekleştirilmesi .....	37
Şekil 3.26. Eğilme numunesi için "Assignment" adımının gerçekleştirilmesi.....	37
Şekil 3.27. Eğilme numunesi için "Mesh" adımının gerçekleştirilmesi .....	38

<b>Şekil 3.28.</b> Çekme numunesi için Fixed support adımı .....	38
<b>Şekil 3.29.</b> Çekme numunesi için displacement adımı .....	39
<b>Şekil 3.30.</b> Eğilme numunesi için Fixed support adımı .....	39
<b>Şekil 3.31.</b> Eğilme numunesi için displacement adımı .....	40
<b>Şekil 4.1.</b> (a) N8, (b) N7 numunelerinin çekme deneyi görüntüleri .....	41
<b>Şekil 4.2.</b> (a) N1, (b) N2 numunelerinin çekme deneyi görüntüleri .....	42
<b>Şekil 4.3.</b> (a) N3, (b) N4 numunelerinin çekme deneyi görüntüleri .....	42
<b>Şekil 4.4.</b> (a) N5, (b) N6 numunelerinin çekme deneyi görüntüleri .....	43
<b>Şekil 4.5.</b> İstif düzenlerine göre çekme dayanımlarında meydana gelen değişim .....	44
<b>Şekil 4.6.</b> Çekme deneyi sonucu elde edilen gerilme-gerinim eğrileri .....	45
<b>Şekil 4.7.</b> (a) N8, (b) N7 numunelerinin eğilme deneyi görüntüleri .....	46
<b>Şekil 4.8.</b> (a) N1; (b) N2 numunelerinin eğilme deneyi görüntüleri .....	46
<b>Şekil 4.9.</b> (a) N3; (b) N4 numunelerinin eğilme deneyi görüntüleri .....	47
<b>Şekil 4.10.</b> (a) N5; (b) N6 numunelerinin eğilme deneyi görüntüleri .....	47
<b>Şekil 4.11.</b> İstif şekillerine göre eğilme dayanımlarında meydana gelen değişim .....	48
<b>Şekil 4.12.</b> İstif şekillerine göre elastisite modülleri .....	49
<b>Şekil 4.13.</b> N8 numunesinin ANSYS’de modellenerek gerilme analizinin yapılması .....	49
<b>Şekil 4.14.</b> N7 numunesinin ANSYS’de modellenerek gerilme analizinin yapılması .....	50
<b>Şekil 4.15.</b> Çekme deneyinden elde edilen çekme dayanımı değerleri ile ANSYS analizi sonucunda elde edilen çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması .....	51
<b>Şekil 4.16.</b> N8 numunesinin ANSYS eğilme analizi .....	51
<b>Şekil 4.17.</b> N8 numunesinin ANSYS eğilme analizi .....	52
<b>Şekil 4.18.</b> N7 numunesinin ANSYS eğilme analizi .....	52
<b>Şekil 4.19.</b> N7 numunesinin ANSYS eğilme analizi .....	52
<b>Şekil 4.20.</b> Eğilme deneyinden elde edilen eğilme mukavemeti değerleri ile ANSYS analizinden elde edilen eğilme mukavemeti değerlerinin karşılaştırılması .....	54

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Karbon elyafın bazı özellikleri .....	21
Çizelge 3.2. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin istiflenme düzenleri .....	27
Çizelge 4.1. Çekme deneyi sonuçları.....	43
Çizelge 4.2. Eğilme deneyi sonuçları .....	48
Çizelge 4.3. ANSYS analizi ile elde edilen çekme dayanımı değerleri .....	50
Çizelge 4.4. ANSYS analizi ile elde edilen eğilme mukavemeti değerleri .....	53

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Amaç ve Kapsam

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin çeşitli yöntemlerle bir araya getirilmesi ile elde edilen yeni tür malzemelerdir. Ortaya çıkan yeni malzeme kendini oluşturan malzemelere göre farklı özelliklere kavuşmaktadır. Bu özellikler arasında, kompozitin kullanım amacına göre daha yüksek dayanım, esneklik, hafiflik olabileceği gibi maliyetin azaltılması olarak da sayılabilmektedir. Gelişen teknolojilerle birlikte, özellikle savunma sanayisinde, uzay ve havacılık sektöründe, inşaat mühendisliği alanında, otomotiv ve ulaşım sektöründe ve sağlık sektöründe kompozitlerden sıklıkla yararlanılmaktadır.

Çalışma kapsamında sekiz tabakadan oluşan kompozit malzemeler, vakum infüzyon metodu ile elde edilmiştir. Karbon ve cam elyafların kullanıldığı bu malzemeler sekiz farklı şekilde istiflenerek sekiz farklı kompozit plaka üretilmiştir. Bu plakalardan kesimle numuneler elde edilmiştir. Deney numuneleri üzerinde çekme deneyi, üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilmiş ve malzemelerin bazı mekanik özellikleri bulunmuştur. Ayrıca, deneysel veriler sonlu elemanlar metodunu baz alan paket ANSYS programı ile de analiz edilmiş ve deneysel sonuçlar ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

### 1.2. Kaynak Özetleri

Literatürde kompozit malzeme üretimi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Literatür özeti aşağıda sunulmuştur.

Botelho *et al.* (2003) çalışmalarında, arayüzey polimerizasyonu ve sıcak sıkıştırma kalıplama teknikleriyle elde edilen farklı karbon takviye / poliamid kompozitlerinin çekme, basınç ve aratabaka kayma özelliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada, elyaf hacim fraksiyonlarının ve matrisin mekanik özellikler üzerindeki etkileri çekme,

aratabaka kayma ve basınç testleri ile belirlenmiştir. Genel olarak sonuçlar, karbon elyaf içeriğinin artmasıyla birlikte kompozit elastiklik modülünde, çekme ve basınç dayanımında az da olsa bir artış meydana geldiğini göstermiştir. Kompozitlerde meydana gelen hasar gelişimi, optik ve taramalı elektron mikroskop teknikleri ile gözlemlenmiştir.

Ochola *et al.* (2004) çalışmalarında, teknolojik uygulamalarda metalik malzemelerin yerini alabilecek olan kompozit malzemelerin seçiminin, özellikle bu malzemelerin sunduğu büyük ağırlık tasarrufundan ötürü daha belirgin hale gelmiş olduğundan bahsetmişlerdir. Çalışmada, hem karbon elyaf takviyeli polimerin hem de cam elyaf takviyeli polimerin gerilme oranı hassasiyeti, tek bir tabaka konfigürasyonunun test edilmesi ile incelenmiştir. Malzemenin basınç altındaki özellikleri, her iki tabaka sisteminin de düşük ve yüksek deformasyon seviyelerinde test edilmesiyle belirlenmiştir. Tabakalar, 48 katmanlı çapraz karbon elyaf ve cam elyaf epoksiden imal edilmiştir. Dinamik test sonuçları aynı boyutlardaki numuneler üzerinde yapılan statik basınç testleri ile karşılaştırılmıştır.

De Paiva *et al.* (2005) çalışmalarında, dört grup karbon elyaf ile güçlendirilmiş kompozitin havacılık endüstrisinde kullanımını eğilme ve tabaka içi kayma testleri ile araştırmışlardır.

Ray (2006) çalışmasında, nemli ve termal ortamlarda elyaf takviyeli polimer kompozitlerde meydana gelen ağırlık değişim davranışlarını araştırmıştır. Higrotermal yaşlanma sırasında arayüzde belirgin bir zayıflama görüldüğü, bunun da mekanik özellikleri olumsuz etkilediğinden bahsedilmiştir. Çalışmada, higrotermal koşullar altında karbon / epoksi ve cam / epoksi kompozitlerin kayma direnci üzerinde sıcaklığın zararlı etkisi değerlendirilmiştir.

Demirel (2007) yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında, otoklav yöntemi ile hazırlanmış olduğu tek yönlü karbon elyaf-epoksi reçineden oluşan kompozit malzemelerde, elyaf açısının tabakalı epoksi kompozit malzemeler üzerindeki etkilerini

çesitli karakterizasyon teknikleri kullanarak incelemiştir. Hazırlanan kompozit malzemelerin karakterizasyonu için; mekanik özelliklerin belirlenmesinde çekme, sıkıştırma, taşıma ve düzlem içi kayma testi, termal özelliklerin belirlenmesinde diferansiyel taramalı kalorimetre ve termogravimetrik analiz, kırılma yüzeylerinin karakterizasyonunda taramalı elektron mikroskobu analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan mekanik karakterizasyon çalışmaları sonunda, elyaf yönlenmelerinin kompozitin mukavemetinde oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Solmaz ve Gür (2007) çalışmalarında, farklı oryantasyon açalarına sahip tabakalı kompozit yapılara çekme deneyleri yapmışlardır. Matris malzemesi olarak polyeşter reçine, takviye malzemesi olarak ise 0.3- 0.4mm çaplı çelik telden oluşan 2 farklı takviye kullanmışlardır. Takviye malzemesinin kesiti ve oryantasyon açaları değiştirilerek plaka üzerinde oluşan gerilme ve gerinimler incelenmiştir. Sonuç olarak, aynı takviye malzemesi ve takviye malzemesi kesitine sahip tabakalı kompozitlerden antisimetrik dizilime sahip olan tabakalı kompozitler için elde edilen gerilme değerlerinin, simetrik dizilime sahip olan tabakalı kompozitler için elde edilen gerilme değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı oryantasyon açısı ve dizilimine sahip olan tabakalı kompozitlerde takviye malzemesi kesitinin artması ile birlikte gerilme değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir.

Akbulut and Sonmez (2008) çalışmalarında, düzlem içi yüklemeye tabi tutulan tabakalı kompozit plakaların kalınlığını (veya ağırlığını) en aza indirmek için bir optimizasyon prosedürü önermişlerdir. Elyaf oryantasyon açısı ve tabaka kalınlığı tasarım değişkenleri olarak seçilmiştir. Çesitli yüklenme durumları için sayısal sonuçlar elde edilmiştir.

Cao *et al.* (2009) karbon elyaf tabakaları, hibrit karbon/cam elyaf tabakaları, hibrit karbon/bazalt tabakalarından oluşan kompozitlerin farklı sıcaklıklardaki çekme mukavemetlerini incelemişlerdir. Sıcaklık 16°C ile 200°C arasında seçilmiştir. Deney sonuçları, sıcaklıktaki artışla birlikte hibrit kompozitlerin çekme mukavemetlerinin azaldığını göstermiştir.

Sugie *et al.* (2009) çalışmalarında, karbon ve cam elyaf kullanarak tabakalı kompozitler üretmişlerdir. Tabakalı kompozitlerin mekanik ve dinamik özelliklerini araştırmışlardır. Reçine olarak doymamış polyester ve epoksi reçine kullanmışlardır. Kompozitlere yapılan darbe testleri, reçinenin doymamış polyester olması durumunda enerji yutma özelliğinin reçinenin epoksi olması durumuna göre daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Abu Talib *et al.* (2010) çalışmalarında, epoksi matrisi içinde cam elyaf ve karbon elyaflar içeren tahrik şaftları dizayn etmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Bir tabaka karbon-epoksi ve üç tabaka cam-epoksi 0°, 45° ve 90° konfigürasyonlarında kullanılmıştır. Sonuçlar, karbon elyafların sarım açısının 0°'den 90°'ye çıkmasıyla, şaftın doğal frekansında %44,5'lik bir kayıp olduğunu göstermiştir. Burulmanın, sargı açısının artırılmasıyla düzenli olarak artmayan bir değere sahip olduğu ve en kötü istifleme sırası için, şaftın burulma mukavemetinin %46.07'sini kaybettiği görülmüştür.

Koyanagi *et al.* (2010) çalışmalarında, elyaf / matris arayüzü karakterizasyonunun, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin uzun vadeli özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, karbon / epoksi arayüzey mukavemetinin zaman ve sıcaklığa olan bağlantısı araştırılmıştır. Tek doğrultulu numuneler, çekme yükü altında, çeşitli sıcaklıklarda deney hızlarında kopuncaya kadar deneye tabi tutulmuşlardır.

Fiore *et al.* (2011) çalışmalarında, cam elyaf takviyeli kompozitler ile tek yönlü bazalt elyaf ve cam elyafla güçlendirilmiş hibrid kompozit malzemeleri vakum torbalama tekniği ile üretmişlerdir. Çalışmada, kompozitlere, bazalt tabakalarının sayısı ve konumlarının kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini değerlendirmek amacıyla üç nokta eğilme ve çekme testleri yapılmıştır. Deney sonuçları, dış tabakaları bazalt lif olan kompozitlerin, mekanik özelliklerinin diğer kompozitlere göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ek olarak, tek yönlü bazaltın tabakaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için basitleştirilmiş bir sayısal model önerilmiştir.



Banakar and Shivananda (2012) çalışmalarında, karbon elyaf takviyeli epoksi reçine kompozitlerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu kapsamda tabakaların elyaf oryantasyonlarının etkisi araştırılmış olup; malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Tabakalar, ASTM standartlarına göre kesilerek numuneler elde edilmiş ve çekme ve burkulma deneyleri yapılmıştır. Bu araştırma, mekanik özelliklerin ağırlıklı olarak tabakalı polimer kompozitlerin elyaf yönüne bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

Dong *et al.* (2012) çalışmalarında, cam ve karbon fiberlerle güçlendirilmiş hibrit kompozitlerin eğilme özelliklerini araştırmışlardır. Kompozitler, karbon tabakanın üzerine yerleştirilen farklı konfigürasyonlarda cam elyafların elle yatırılmasıyla üretilmiştir. Numuneler üzerinde üç nokta eğilme testi yapılmıştır. Eğilme modülü, eğilme dayanımı ve kırılma gerilmeleri sonlu elemanlar analizi ile tahmin edilmiştir. Eğilme modülünün cam elyaf yüzdesindeki artışla azaldığı belirlenmiştir.

Türkmen ve Köksal (2013), el yatırması yöntemi ile üretmiş oldukları, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kompozitler üzerinde üç nokta eğme, çekme ve darbe testleri yapmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, elyaf katman sayısına bağlı olarak kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Darbe test sonuçlarına göre ise katman sayısındaki artış ile birlikte malzemelerin absorbe ettiği enerji değerlerinin de arttığı görülmüştür.

Boumbimba *et al.* (2014) yapmış oldukları çalışmada, akrilik tri-blok kopolimerler ile güçlendirilmiş cam elyaf / epoksi reçineli tabakalı kompozitler üretmişlerdir. Kompozitlerin, mikroyapı, termomekanik özellikleri ve darbe dayanımları araştırılmıştır. Tabakalı kompozitler üzerinde düşük hızlı darbe testleri yapmak için bir damla ağırlık kulesi kullanılmıştır. Epoksi matrisine nanogüçlendirici katılması ile kompozitin mukavemet ve darbe dayanımında bir artış meydana geldiği görülmüştür.

Murugan *et al.* (2014) çalışmalarında, epoksi tabanlı cam / karbon elyaflı tabakalı hibrit kompozitlerin statik ve dinamik mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, dört

tabakalı cam/karbonlar farklı istif şekillerinde imal edilmiştir. Yüksek modüle sahip karbon elyaf tabakaların cam elyaf tabakalarından daha yüksek mukavemete sahip olduğu belirlenmiştir.

Sakin ve Daban (2015) çalışmalarında, kompozit plakalarda cam-dokuma tipi, istifleme sırası ve tabaka sayısı gibi parametrelerin mekanik özelliklere olan etkisini araştırmışlardır. Kompozit plakaları vakum destekli reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilmiş olan kompozit plakalar üzerinde çekme ve üç nokta eğme gibi temel mekanik testler yapmışlardır. Sonuç olarak, istifleme sırasında reçine geçirgenliği en düşük olan 200 gr/m<sup>2</sup> cam dokumaların merkezde bulunmasının çekme mukavemetini düşürürken eğilme mukavemetini artırdığını, test sonuçlarının, cam-dokuma tipinin yanı sıra, reçine geçirgenliği, istifleme sırası ve tabaka sayısından da etkilendiğini belirtmişlerdir.

Schiffer and Tagarielli (2015) çalışmalarında, kalınlık yönünde yüklenmiş bir karbon / epoksi kompozit tabakanın kırılmasını modellemek ve kırılma yüklerinin numune boyutu üzerine etkisini öngörmek için Sonlu elemanlar hesaplamaları yapmışlardır. Kırılma süreçlerini, ABAQUS programını kullanarak modellemişlerdir.

Daban (2016) yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında, kompozit plakalarda cam-dokuma tipi, istifleme sırası ve tabaka sayısı gibi parametrelerin mekanik özelliklere etkisini araştırmıştır. Kompozit plakalar vakum destekli reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi ile üretilmiştir. On yedi farklı istifleme ve altı farklı tabaka sayısına sahip plakalar elde edilmiştir. Elde edilen kompozit plakalar için çekme ve üç nokta eğme gibi temel mekanik deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak, tekrarlı enjeksiyon ile iyi ıslanan cam elyafların, kompozit plakanın mekanik özelliklerini artırdığı görülmüştür.

Pathak *et al.* (2016) yapmış oldukları çalışmada, karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin, elyaf-matris arayüzey özelliklerine bağlı olduğundan bahsedilmiştir. Çalışmanın amacı, polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek olup, karbon elyaf / grafen oksit epoksi hibrid bileşiklerinin

geliştirilmesi için dolgu maddesi olarak grafen oksit kullanılmıştır. İlk etapta, epoksi reçinesi, ağırlıkça %0,1 ila %0,6 arasında grafen oksit ile modifiye edilmiştir. Sıkıştırma-kalıplama tekniği ile hibrid kompozitler geliştirmek için karbon elyaflar modifiye epoksi reçine ile doyurulmuştur. Sentezlenmiş olan grafen oksitler, çeşitli analizler ile karakterize edilmiştir.

Ma *et al.* (2017) çalışmalarında, farklı matris malzemelere sahip, tek doğrultulu, karbon elyaf takviyeli plastikler imal etmişlerdir. Matris malzemesi olarak termoplastik poliamid 6 ve ısı ile sertleşen epoksi kullanmışlardır. Tek yönlü karbon elyaf takviyeli poliamid 6 ve tek yönlü karbon elyaf takviyeli epoksi tabakalarda çok sayıda eksenel çekme testi gerçekleştirmişlerdir. Mekanik özellikler ve kopma davranışları, elyaf dağılımları, emdirme koşulları ve ara yüzey kayma mukavemetleri belirlenerek tartışılmıştır. Çekme mukavemetleri, modifiye bir küresel yük paylaşım modeli vasıtasıyla öngörülmüş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, epoksi matris malzemesi, karbon elyaf ve cam elyaf ile takviye edilerek vakum infüzyon metodu ile sekiz tabakalı olarak üretilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri deneysel olarak ve ANSYS analizi kullanılarak araştırılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalarda, epoksi matris malzemesi, karbon elyaf ve cam elyaf ile takviye edilerek vakum infüzyon metodu ile sekiz tabakalı olarak üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlendiği ve ANSYS ile analiz edilerek deney sonuçları ile ANSYS analiz sonuçlarının karşılaştırıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak çalışılmış olan tabakalı kompozitlerin, farklı istif düzenlerinde sahip olacakları çekme ve eğilme mukavemetleri belirlenmiş, ayrıca ANSYS programı ile kompozit numuneler modellenmiştir. Modellenmiş olan numunelerin çekme ve eğilme analizleri ANSYS programı ile yapılmış, deney sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Daha önce yapılmış olan çalışmalarda, tabakalı kompozitlere yapılmış olan çekme ve üç nokta eğilme deneylerinde en iyi sonuçların tabaka sayısının 6 ila 8 olduğu kompozitlerde bulunduğu ifade edilmiş olduğu göz önüne alınarak, kompozitler sekiz tabakalı olarak üretilmiştir (Daban 2016).

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Kompozit Malzemeler

**Kompozit Malzeme;** iki veya daha fazla farklı malzemenin kullanım amacına yönelik karıştırılması veya belli bir düzende bir araya getirilmesiyle hazırlanan malzemelerdir (Saçak 2004). Kompozitler, farklı iki malzemenin makroskopik ölçekte bir araya gelmesi ile elde edilirler (Jones 1999). Kompozitler, istenilen uygulama alanına göre hazırlanabilirler, genel olarak mekanik ve fiziksel özellikleri elde edildikleri malzemelerden daha üstündür. Kompozit üretiminde esas amaç, farklı maddelerin iyi özelliklerini yeni bir malzeme altında toplayabilmektir. Kompozitler, istenen özelliklerin sağlanabilmesi için çeşitli fazların uygun düzeylerde bir araya getirildiği çok fazlı kombinasyonlardır (Beşergil 2016).

Bir kompozit malzeme, genellikle düşük modül ve dayanıma sahip reçine veya metalik matris ana fazı ile bunun içinde dağılmış daha az oranda kullanılan tali fazı olan takviye elemanından oluşmaktadır (Şahin 2015). Matris elemanı, kompozit malzemeyi oluşturan ana malzemedir. Takviye elemanı, matris malzeme içinde yer alır ve kompozit yapının temel mukavemet elemanıdır.

### 2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler matris malzemesinin türüne göre, takviye elemanının geometrisine göre veya kompozisyonlarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Kompozitlerin genel bir sınıflandırılması aşağıdaki gibi yapılabilir (Beşergil 2016);

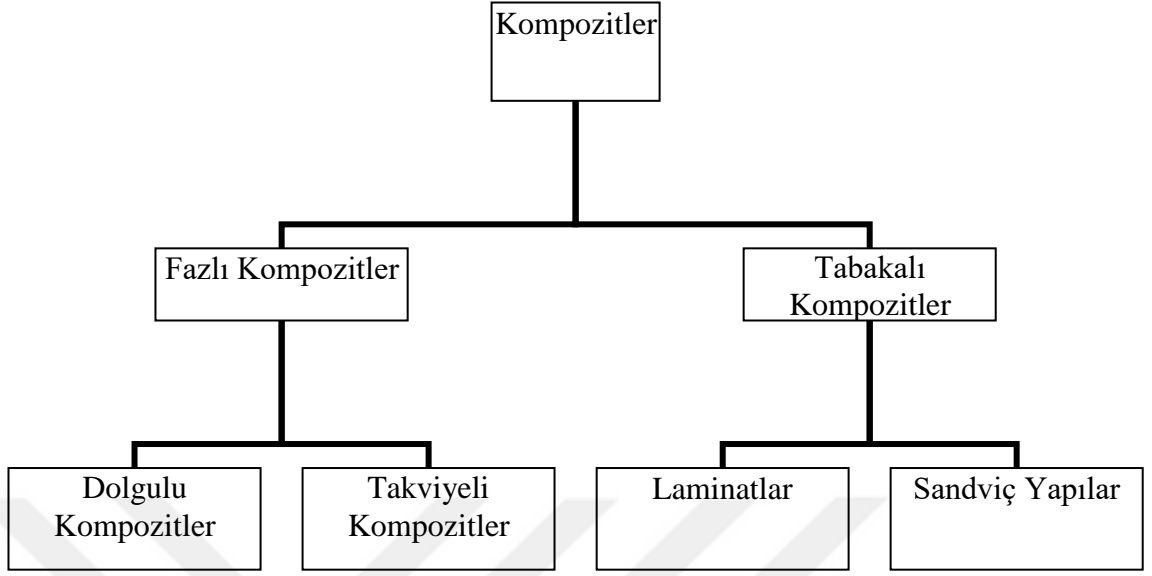
- Matrise göre sınıflama
- Polimer matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler

- Seramik matrisli kompozitler
- Karbon-karbon kompozitler
- Takviye Geometrisine göre sınıflama
- Partikül katkılı kompozitler
- Sürekli elyaf katkılı kompozitler
- Kısa elyaf katkılı kompozitler
- Nanopartikül takviyeli kompozitler

### **2.2.1. Kompozisyonlarına göre kompozitlerin sınıflandırılması**

Kompozitler kompozisyonlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Şekil 2.1) (Beşergil 2016);

- Fazlı Kompozitler:
- Dolgulu kompozitler,
- Takviyeli Kompozitler,
- Elyaf Takviyeli Kompozitler
- Partikül Takviyeli Kompozitler
- Tabakalı Kompozitler:
- Laminatlı Kompozitler
- Sandviç Yapılar



**Şekil 2.1.** Kompozitlerin kompozisyonlarına göre sınıflandırılması (Beşergil 2016)

#### **Fazlı Kompozitler:**

**Dolgulu Kompozitler:** Konvansiyonal kompozitler, mikrofil kompozitler ve hibrit kompozitler şeklinde sınıflandırılmaktadır.

**Takviyeli Kompozitler:** Matris malzemesine göre, polimer matris kompozitler, metal matris kompozitler, seramik matris kompozitler, karbon grafit matris kompozitler şeklinde sınıflandırılabilen iken, takviye malzemesine göre elyaf takviyeli kompozitler, partikül takviyeli kompozitler ve flak takviyeli kompozitler şeklinde sınıflandırılabilir.

**Elyaf Takviyeli Kompozitler:** Sürekli elyaflı kompozitler ve süreksiz elyaflı kompozitler şeklinde sınıflandırılır.

**Partikül Takviyeli Kompozitler:** Takviye malzemenin kuvvetlendirme mekanizmasına göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar, büyük partikül takviyeli kompozitler ve dispersiyonla kuvvatlendirilmiş kompozitlerdir (Beşergil 2016).

**Tabakalı Kompozitler:**

**Laminatlı kompozitler**, bu tür kompozitlerde laminatlar istiflenmiş, bağlanmış elyaf takviyeli levhalardan oluşur. İstiflenme farklı açılarda olabilmektedir (Beşergil 2016). Temel malzeme eksenleri doğrultusunda değişik yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste konularak bir araya getirilmesi ile iki tabakalı kompozitler elde edilmektedir. Laminatlar, matris içerisine rastgele yönlendirilmiş elyafları tek yönlü elyaflar veya farklı elyaf takviyeli tabakadan oluşabilmektedir (Şahin 2015). Yapısal bir laminat özel bir yığılma (lay up) veya tabaka (ply) düzenlenmeye sahiptir. Laminat lay-up bir laminattaki üst üste tabakaların koordinat sistemine göre elyaf oryantasyonunu tanımlar (Beşergil 2016).

**2.2.2. Yapılarını oluşturan malzeme türlerine göre kompozitlerin sınıflandırılması**

Kompozitler matris malzeme türlerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Beşergil 2016);

**Polimer matris kompozitler;** Kullanım alanı yaygın olan kompozitlerdir. Elyaf takviyeli polimerler olarak da adlandırılır. Polimer matris kompozitlerin gerilme kuvveti, sıklığı, kırılma dayanımı yüksek olup, aşınmaya, delinmeye, korozyona karşı dirençli malzemelerdir. Termal dirençleri düşüktür.

**Metal matris kompozitler;** Bir metal matris ile güçlendiricilerin oluşturduğu kompozitlerdir. Matris olarak genellikle, alüminyum, magnezyum, titanyum alaşımlar kullanılır.

**Seramik matrisli kompozitler;** Seramikler inorganik bileşikler olup, doğada kayaların kimyasal etkilerle karşı ayrışması sonucu oluşan kil ve benzeri maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilmektedirler. Seramik matrisli kompozitler, matris elemanı seramik, takviye elemanı kısa elyaflar olan kompozitlerdir.

**Karbon-karbon kompozitler;** Karbon elyaf takviye malzemesi ve karbon matris kullanılarak elde edilen kompozitlerdir.

**Nanokompozitler:** Kompoziti meydana getiren bir veya daha çok fazın nano boyutlarda olduğu kompozitlerdir. Nanokompozitler, mineral dolgulu ve %10'dan daha az miktarda nano boyutlu mineral içeren yeni tür kompozit malzemelerdir. Kullanılan nano boyutlu parçacıkların boy-en oranı ve yüzey alanları yüksektir (Şahin 2015). Partikül boyutlarının nanometre boyutlarında olması ile kompozitteki arayüz etkileşimleri de arttığı için malzeme özellikleri de değişmektedir (Beşergil 2016).

### 2.3. Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan bazı takviye elemanları ile matris malzemeleri aşağıda açıklanmıştır.

#### 2.3.1. Takviye malzemeleri

**Cam elyaflar:** Kompozitlerde kullanılan ilk lif türü olan cam elyafları erimiş camın 0,8-3,0 mm çapında kalıplar ile çekilerek daha sonra yüksek hızla uzatılması ile elde edilir. Genellikle, cam elyafları düz dairesel kesitlere sahiptir. Bununla birlikte, dikdörtgen (kare veya düzlem), üçgen ve altıgen kesitli elyafların yanı sıra içi boş dairesel elyaflar da bulunmaktadır.

Kompozitlerin bileşeni olarak cam elyafların sağladığı önemli özellikler; yüksek mukavemet, yüksek kimyasal ve biyolojik direnç ve düşük maliyettir. Monolitik cam unsurları olarak lifler su emmez ve sudaki boyutlarını değiştirmez. Aynı nedenle, kırılğan ve yüzey hasarına karşı hassastırlar (Jones 1999). Kompozit endüstrisinde sıklıkla cam elyaflar kullanılmaktadır. Ucuz olan cam elyafların üretimi de kolaydır, kimyasal maddelere karşı dirençlidirler.



**Karbon elyaflar:** Organik liflerin oksijensiz ortamda yakılmalarıyla (piroliz) üretilir; bunların Poliakrilonitrit (PAN) tabanlı ve perde tabanlı elyaflar olmak üzere iki ana tipi vardır. PAN esaslı lifler için işlem üç aşamadan oluşur: stabilizasyon, karbonizasyon ve grafitleştirme. Birinci aşamada (stabilizasyon) poliakrilonitril filamentlerin bir sistemi bir oksidasyon fırınında yaklaşık 400°C'ye kadar ısıtılır ve sonraki aşamada (inert bir gaz ortamında 900°C'de karbonizasyon) ısıtılır, karbon dışındaki filamentler uzaklaştırılır veya karbona dönüştürülür. 2800°C'ye ulaşan bir sıcaklıkta art arda ısıtma işlemi yapılırken (grafitleşme), elyafın uzunluğu boyunca yönlendirilmiş bir kristal karbon yapısı oluşur ve böylece PAN bazlı karbon elyafları elde edilir. Piroliz materyal kaybına eşlik ettiğinden, karbon elyafları gözenekli bir yapıya sahiptir ve özgül ağırlıkları grafitten daha düşüktür. Karbon elyaflarının özellikleri, kristalin boyut, kristal yönelimi, gözeneklilik ve karbon yapısının saflığından etkilenir. Karbon elyaflar, yüksek modül ve mukavemet, yüksek kimyasal ve biyolojik direnç, yüksek elektrik iletkenliği ve düşük termal genişleme katsayısına sahiptir (Vasiliev and Morozov 2013). Cam elyaflar ile karşılaştırıldığında elyaf sertliğinin önemli ölçüde iyileştirilmesi, karbon (veya grafit) elyafların geliştirilmesiyle elde edilmiştir.

**Kuvars elyafları:** Cam elyaflarına benzerdir sıcaklıkta erimiş kuvars kristalleri veya kumdan elde edilen kuvars çubuklarının yüksek hızla gerilmesiyle elde edilir. Erimiş kuvarsların viskozitesi, ince elyafları doğrudan üretmek için çok yüksek olduğu için, cam elyafı imal etmek için geliştirilen orijinal proses kullanılamaz. Bununla birlikte, bu daha karmaşık işlem, cam elyafa göre daha yüksek termal dirence sahip elyaflar ortaya çıkarır (Vasiliev and Morozov 2013).

**Bazalt elyafları:** Cam elyafları için kullanılan aynı işlem, mineral elyafların, örneğin erimiş bazalt kayalarından elde edilmiş bazalt elyafların imalinde kullanılabilir. Nispeten düşük mukavemetli ve yüksek yoğunluğa sahip olan bazalt elyafları, havacılık yapıları gibi yüksek performanslı yapılar için kullanılamazken, inşaat mühendisliği alanında ön gerilmeli betonarme yapılar için umut verici takviye elemanlarıdır (Vasiliev and Morozov 2013).

**Organik elyaflar:** Takviye elemanı olarak kompozitlerde kullanılabilir. Doğal olarak, sadece yüksek performanslı elyaflar, yani yüksek sertlik ve mukavemete sahip elyaflar bu amaçla kullanılabilir. Bu gereksinimleri karşılayan en yaygın kullanılan organik elyaflar aramid (aromatik poliamit) elyaf olarak bilinirler. Mühendislik uygulamaları için geliştirilmiş kompozitlerin bileşenleri olan aramid elyafları, yüksek özgül mukavemet ve sertlik sağlayan düşük yoğunluk, düşük ısı iletkenliği, yüksek ısı yalıtımı ve negatif bir termal genleşme katsayısı ile karakterize edilir (Vasiliev and Morozov 2013). Bir aromatik poliamid olan poli(p-fenilen tereftalamid)'dir. Metallerle karşı üstün özellikler sergiler (Beşergil 2016).

**Polietilen elyaf:** Polietilen elyafları cam elyaflara benzer şekilde polimer erimesinden ekstrüzyon yöntemi ile üretilir. Polimer elyaflar, su emmezler ve yüksek kimyasal direnç gösterirler ancak nispeten düşük sıcaklık ve süne direnci gösterirler (Vasiliev and Morozov 2013).

Yukarıda varılmış olan takviye elemanlarından elyaf takviye olarak yaygın bir şekilde kullanılanları cam, karbon ve aramidler olarak sıralanabilir.

### 2.3.2. Matris malzemeleri

#### Termosetler

**Epoksi Reçineler:** Epoksiler matris malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedirler. Epoksi reçineler epoksi grupları ihtiva eden reçinelerdir (Beşergil 2016). Epoksiler termoset polimerlerdir. Termoset polimer, zincirleri arasında yoğun çapraz bağ bulunan polimerlerdir, çapraz bağlı yapıları nedeni ile ısı ile eritmeleri güçtür ancak yüksek sıcaklıklarda ısıtıldıklarında bozunurlar (Saçak 2012). Epoksilerin mekanik özellikleri ve çevreye dirençleri diğer pek çok termoset malzemedeki üstündür. Bu nedenle uygulamada epoksiler önem arz etmektedir. Epoksi reçinelerin viskoziteleri düşüktür. Kürleme maddesine bağlı olarak 50-150°C arasında kürlenirler, kürlenmesi kolaydır.

Epoksi reçineler kırılğan olup dayanıklılıklarının artırılabilmesi için bazen termoplastik partiküllerle karıştırılabilirler. Epoksilerin önemli özellikleri aşağıda sıralanmıştır;

- Üretimleri kolaydır
- Büzölmeleri zayıftır
- Yapışma özellikleri iyidir
- Alev dayanıklıdır
- Kimyasal maddelere karşı dirençlidir
- Mekanik özellikleri iyidir
- Sıcak kalıplanabilir
- 50-150°C'de kürlenebilir
- Kürlenede yan ürün çıkmaz

**Polyester Reçineler:** Doymamış reçineler olan polyesterler iyi işlenebilir olup çevresel koşullara dirençlidirler. Polyester reçineler, kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Çoğu viskoz stiren-polyester çözeltisi halindedir. Stiren ilavesi ile polyesterin viskozitesi düşürmekte ve polyester moleküler zincirlerin çapraz bağlar oluşturarak kürlenmesini sağlamaktadır. Ürün, basınç uygulanmadan kalıplanabilmektedir. Polyester reçinelerin depolanma süreleri kısıtlıdır.

**Üretan Reçineler:** Poliüretanlar kauçuk gibi elastik, metaller gibi dayanıklı, uzun ömürlü plastiklerdir. Çoğu poliüretan çapraz bağlı olup ısıtıldıklarında termoset plastikler elde edilmektedir. Çapraz bağlı olmayan poliüretanlar da vardır ve bunlar doğrusal moleküler düzende bulunan termoplastiklerdir. Poliüretanlar yırtılmaya, çizilmeye, darbeye dayanıklı, sıkı malzemelerdir.

**Fenolik Reçineler:** Fenolikler bazik ortamda fenol ve formaldehitin polimerizasyonu ile elde edilir. Fenolikler termoset plastiklerdir, kalıplama prosesinde ısıtıldıklarında çapraz bağlar oluşur. Fenolik reçineler, sert, esnemeyen, ısıya dayanıklı ve kırılğan yapıya sahip polimerlerdir. Fenolik reçinelerin bazı özellikleri aşağıda sıralanmaktadır;

- İzolasyon özellikleri iyidir
- Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır
- Kimyasal maddelere dayanıklıdır
- Zayıf asitlere dayanıklıdır
- Nem absorpsiyonu düşüktür

### **Termoplastikler**

Termoplastikler, polimer matris kompozitlerde az kullanılan plastikler grubudur. Bunlar, ısıtıldıklarında kolayca şekillendirilebilen, soğuduktan sonra tekrar ısıtıldıklarında yeniden şekillendirilebilen plastiklerdir (Beşergil 2016). Polietilen, polipropilen, polistiren, polikarbonat, polivinilklorür termoplastiklere örnek olarak verilebilir. Termoplastikler yüksek erime sıcaklığına sahiptirler. İşlenmeleri esnasında erime sıcaklıklarının üzerinde ısıtılırlar. Isı enerjisi, termoplastikleri etkileyerek, mekanik ve fiziksel özelliklerinin zayıflamasına neden olur (Saçak 2012).

### **2.4. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Bazı Yöntemler**

Matris olarak bir polimer reçine, takviye olarak fiberler veya diğer takviye malzemeler içeren kompozitler (PMC) aşağıdaki yöntemlerle üretilebilmektedir (Şahin 2015):

**Elle Yatırma:** Kalıp üzerine yağlayıcı ve ardından katkı maddeleri karıştırılmış matris polimer sürülür. Polimer belli bir kıvama kadar kurutulur ve üzerine takviye amacıyla kullanılacak olan elyaflar elle yerleştirilir. Polimer bir rulo yardımıyla elyaflara iyice emdirilir. Sertleştirme uygun çapraz bağlayıcılar kullanılarak oda sıcaklığında ya da fırında yapılır.

**Püskürtme:** Reçine ve takviye lifleri birlikte kalıp veya malzeme yüzeyine püskürtülür. Özel bir püskürtme tabancası kullanılır. Kaplama kalınlığı istenilen düzeye geldiğinde

tabanca durdurulur, malzeme yüzeyi rulo veya fırça ile düzeltilir. Son aşamada kompozit oda sıcaklığında ya da fırında sertleştirilir.

**Filament sarma:** Sürekli haldeki takviye elyafları, içerisinde reçine ve sertleştirici bulunan bir banyodan geçirilerek ısıtılıp dönen mandrel üzerine sarılır. Reçine sertleştikten sonra mandrel çıkarılarak mandrelin şeklini almış olan kompozit elde edilir.

**Sıkıştırarak kalıplama:** Elyaflar kullanılarak yapılan sıkıştırarak kalıplamada, elyaflar kalıp içerisine uygun konumda yerleştirilir ve üzerine reçine dökülür. Kalıp kapatılarak basınç altında şekillendirme yapılır.

**Pultruzyon:** Bobinlerden alınan çok sayıda elyaf bir yönlendiriciye gönderilerek birbirlerine paralel hale getirilir. Daha sonra reçine banyosunda ıslatılır ve ısıtılan bir kap içerisine gönderilir. Kalıp içerisinden geçir esnasında, reçine liflerle birlikte kalıp geometrisinde sertleşir.

**Reçine transfer kalıplama:** Takviye malzeme doğrudan veya bir ön şekillendirme yapıldıktan sonra kalıba konur. Üst kalıp alttakinin üzerine kapatılır ve aradaki boşluğa reçine enjekte edilir. Kalıp ısıtılarak kütleme yapılır. Reçinenin iyi nüfuz edebilmesi için kalıp boşluklarına vakum uygulanabilir. Bu durumda yapılan üretim metodu vakum destekli reçine enjeksiyonu olarak adlandırılır (Beşergil 2016).

**Vakum Destekli reçine kalıplama (VARTM):** Vakumlanmış ortam içerisinde reçinenin ilerlemesi prensibiyle çalışan bir yöntemdir.

## 2.5. Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemerde genellikle kendi başlarına elde edilemeyen, bileşenlerinin en iyi özelliklerinin bir malzeme de toplanması önemli avantaj sağlamaktadır. Kompozit malzeme üretimi ile aşağıda sıralanan özellikte malzemeler elde edilebilmektedir;

- Yüksek dayanım
- Yüksek rijitlik
- Yüksek yorulma dayanımı
- Mükemmel aşınma direnci
- Yüksek sıcaklık kapasitesi
- İyi korozyon direnci
- İyi termal ve ısı iletkenliği
- Hafiflik
- Estetik görünüm (Şahin 2015)

## 2.6. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin dezavantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Üretim güçlüğü
- Pahalı olması
- İşlenmesinin güç olması yanında maliyetin yüksek oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi
- Diğer bazı malzemeler gibi geri dönüşümünün olmayışı
- Kırılma uzamasının az oluşu (Şahin 2015)

İlaveten, kompozit malzemelerin değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler göstermesi ve aynı kompozit malzeme için çekme, basınç, kesme ve eğilme mukavemet değerlerinin farklılıklar göstermesi olarak sıralanabilir. Kompozit malzemelerin dezavantajlı yanlarını ortadan kaldırmaya yönelik teorik çalışmalar yapılmakta olup, bu

Çalışmaların olumlu sonuçlanması halinde kompozit malzemelerin metalik malzemelerin yerini alabileceği düşünülmektedir.

## 2.7. Kompozit Malzemelerin Başlıca Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler genel olarak, savunma sanayisinde, uzay ve havacılık sektöründe, inşaat alanında, otomotiv ve ulaşım sektöründe ve sağlık sektöründe kullanılmaktadır.

## 2.8. ANSYS Paket Programı

ANSYS paket programı, sonlu elemanlar metodu ile zm yapan bir sayısal analiz programıdır. Pek çok mühendislik alanında kullanılabilir. Özellikle statik ve dinamik analizler, termal analizler, akışkan akışı analizleri, elektromagnetik alan analizleri gibi analizler bu analizler ANSYS programı ile gerçekleştirilebilmektedir.

Mekanik zelliklerin belirlenmesi için yapılacak adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yapılacak analiz türü seçilir (Static Structural)
- Malzeme bilgileri girilir (Engineering Data)
- Numune geometrisi oluşturulur (Geometry)
- Numune malzeme özellikleri atanır (Model-Mesh)
- Numunenin, sabitlenecek ve çekilecek-eğilecek kısımları belirlenir (Model-Fixed support-Displacement)
- zm kısmına geçilir (Model-Solve)

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Cam Elyaf (C)

Bu çalışmada, kullanılan cam elyaf kumaş yapısı Şekil 3.1’de görülmektedir. Tam adı örgülü cam elyaf kumaştır. Düz dokuludur. Cam elyafın alansal kütle değeri  $300\text{gr}/\text{m}^2$  dir.

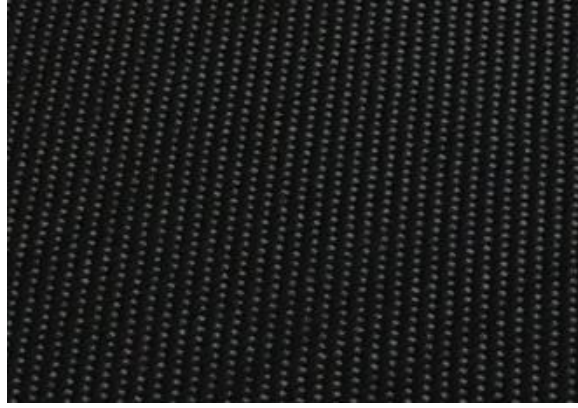


**Şekil 3.1.** Deneylerde kullanılan cam elyaf kumaş

##### 3.1.2. Karbon elyaf (K)

Çalışmada kullanılan karbon elyaf  $200\text{gr}/\text{m}^2$  lik alansal kütleyle sahiptir. Deneylerde kullanılan karbon elyaf Şekil 3.2’de görülmektedir. Karbon elyafın bazı özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.





**Şekil 3.2.** Deneylerde kullanılan karbon elyaf

**Çizelge 3.1.** Karbon elyafın bazı özellikleri

	Karbon Elyaf
Özgül kütle	1,8 gr/cm <sup>3</sup>
Isıl iletkenlik	20 W/mK
Elektriksel özdirenç	1650 µΩ
Kopma uzaması	% 1,6-2,2

### 3.1.3. Epoksi reçine

Çalışmada kullanılan epoksi reçine Araldite ly 1564 vakum infüzyon reçinesidir. Sertleştirici olarak Aradur 3487 kullanılmıştır. 100 gr reçineye 33,3 gr sertleştirici ilave edilmiştir (Kısa vd 2017).

## 3.2. Yöntem

Bu kısımda çalışma kapsamında yapılan deneyler hakkında bilgi verilmiştir. Öncelikle kompozit malzemelerin üretilmesi anlatılmış, ardından sırasıyla çekme deneyi, üç nokta eğilme deneyi açıklanmıştır. Son olarak sonlu elemanlar yönteminden bahsedilmiştir.

### 3.2.1. Kompozit malzemelerin üretilmesi

Kompozit plaklar vakum infüzyon metodu ile Gümüşhane Üniversitesi, Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi'nde üretilmiştir. Vakum infüzyon prosesi, vakum pompası, vakum tankı (reçine toplama tankı), kalıp ve reçine kovası olmak üzere 4 kısımdan oluşmaktadır. Şekil 3.3'de de sıcaklık kontrollü vakum infüzyon üretim ünitesi (yatırma tezgahı) görülmektedir.



**Şekil 3.3.** Sıcaklık kontrollü vakum infüzyon üretim ünitesi

Aşağıda vakum infüzyon metodunun aşamaları sıralanmıştır:

- Kalıp hazırlanır.
- Takviye malzemeleri istiflenir, aralarına kaymamaları için yapıştırıcı püskürtülür.
- Takviye malzemelerinin kenarları kalıba uygun olarak kesilir.
- Kalıbın çevresine göre reçine hatları ve vakum hatları ayarlanır, infüzyon macunu kalıbın etrafını çevreleyecek şekilde yapıştırılır ve vakum tankları hatlara bağlanır.

- Vakum torbası, kalıp üzerine yeterli derecede baskı yapabilecek şekilde kalıba göre kesilir, infüzyon macunu ile kalıp etrafına sızdırmaz şekilde yapıştırılır.
- Vakum infüzyon düzeneğine vakum göstergesi bağlanır ve vakum pompası çalıştırılır.
- Reçine akışı sağlanır.
- Kompozit yapı, vakum altında tamamen sertleşinceye kadar tutulur ve kalıptan çıkarılır (Durgun vd 2013).

Şekil 3.4'te cam elyafın tezgâha yerleştirilmesi, Şekil 3.5'de karbon elyafın tezgâha yerleştirilmesi, Şekil 3.6'da farklı istiflenmiş numunelerin hazırlanması görülmektedir.



**Şekil 3.4.** Cam elyafın tezgâha yerleştirilmesi



**Şekil 3.5.** Karbon elyafın tezgâha yerleştirilmesi

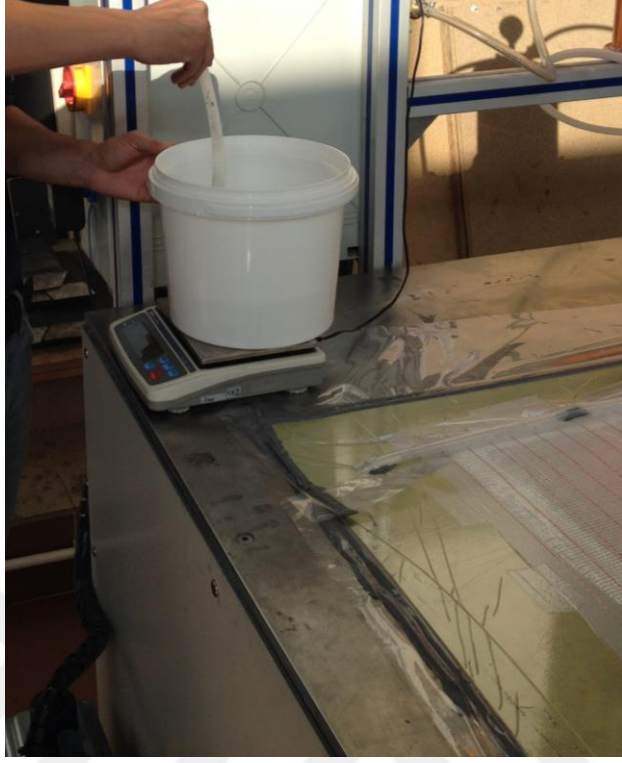


**Şekil 3.6.** Farklı istiflenme şekillerine sahip numunelerin hazırlanması

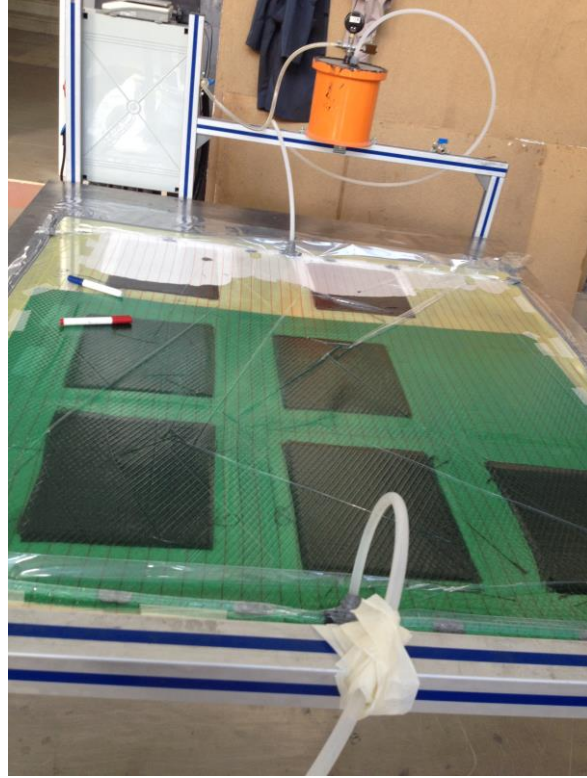
Şekil 3.7’de tezgâha sızdırmazlık poşeti serilmesi, Şekil 3.8’de epoksi reçine vakumlanırken görülmektedir. Şekil 3.9’da üretime ait genel bir görünüm verilmiştir.



**Şekil 3.7.** Tezgâha sızdırmazlık poşeti serilmesi

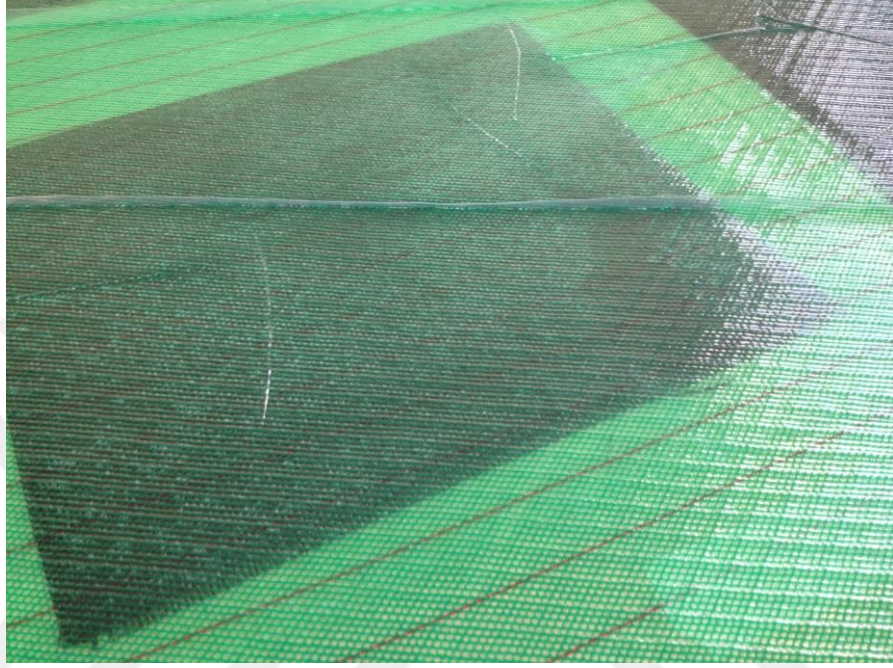


**Şekil 3.8.** Epoksi reçinenin vakumlanması



**Şekil 3.9.** Üretime ait genel bir görünüm

Şekil 3.10’da epoksi reçinenin malzemelere nüfuz etmesi, Şekil 3.11’de üretilmiş olan kompozit malzemenin difüzyon filesinden ayrılması görülmektedir.



Şekil 3.10. Reçinenin elyafa nüfuz etmesi



Şekil 3.11. Üretilmiş olan kompozit malzemenin difüzyon filesinden ayrılması

Vakum infüzyon metodu ile hazırlanan cam elyaf takviyeli kompozitler ile karbon elyaf takviyeli kompozitler farklı düzenlerde istiflenerek yeni kompozit malzemeler elde edilmiştir. Kompozitler sekiz tabakalı olarak üretilmiştir. Daban (2016) çalışmasında farklı tabaka sayılarında hazırlanmış olduğu kompozitlere çekme ve üç nokta eğilme deneyleri yapmış ve en iyi sonuçları tabaka sayısının 6 ila 8 olduğu kompozitlerde almıştır. Bu çalışmada kullanılan istiflenme düzeni Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin istiflenme düzenleri

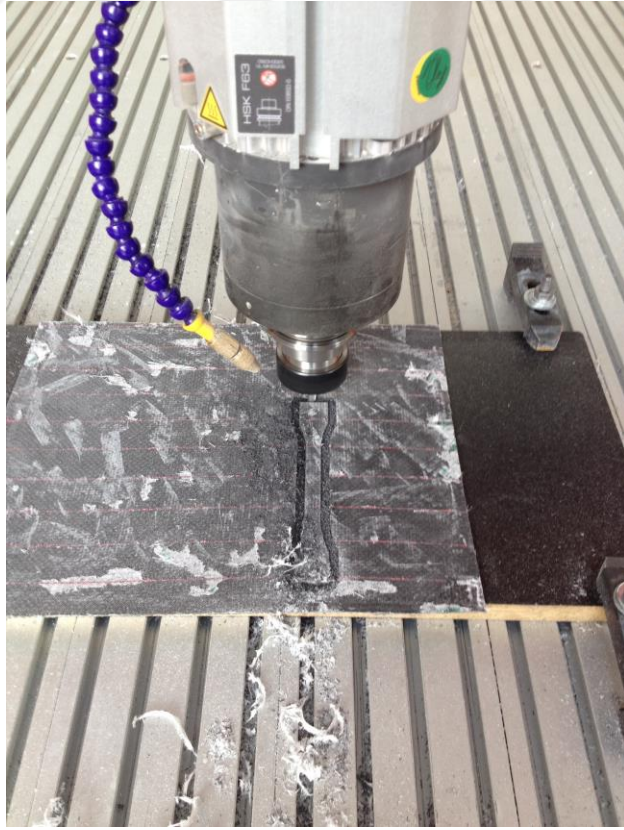
Numune Kodu	İstif Sırası
N1	KKCCCCCKK
N2	KCKCCKCK
N3	CKCKKCKC
N4	CCKKKKCC
N5	KCCKKCKK
N6	CKKCCCKK
N7	KKKKKKKK
N8	CCCCCCCC

### 3.2.2. Deney numunelerinin elde edilmesi

Deneylerde, elde edilen kompozit malzemelerden CNC Freze ile kesilen numuneler kullanılmıştır. Şekil 3.12’de CNC Freze tezgâhında numunelerin kesilmesi görülmektedir. CNC freze ile deney numunelerinin elde edilişi, Şekil 3.13’te görülmektedir.



Şekil 3.12. CNC Freze tezgâhında numunelerin kesilmesi

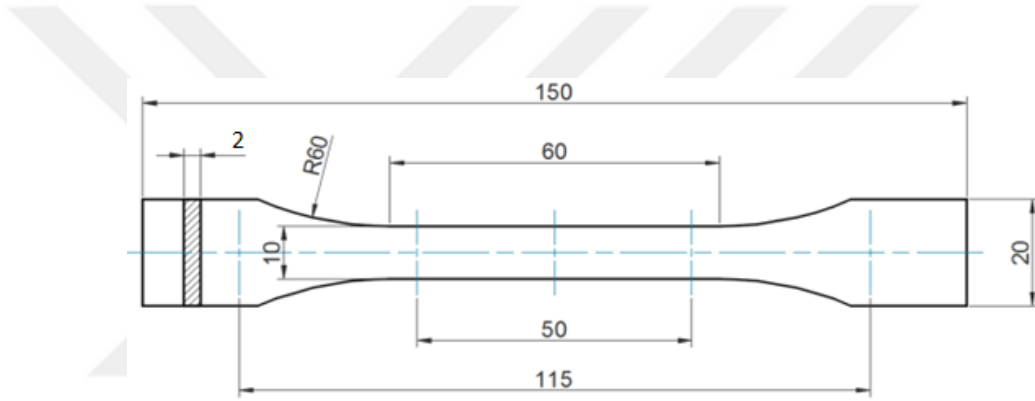


Şekil 3.13. CNC freze ile deney numunelerinin elde edilişi



### 3.2.3. Çekme deneyi

Çekme deneyleri ASTM D 3039 esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyinde kullanılan numuneler CNC frezede kesilerek elde edilmiştir. Numune ölçüleri standarda bağlı kalarak Şekil 3.14'te gösterildiği şekilde seçilmiştir. Numune kalınlığı 2 mm'dir. Çekme deneylerinde Gümüşhane Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu'nda bulunan Zwick Roell Z010 marka cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.15). Cihaz 5 ton kapasitelidir. Her bir deney numunesi için 5 çekme deneyi yapılmıştır. Çekme deneyi ile kompozit numunelerin çekme mukavemetleri belirlenmiştir.



Şekil 3.14. Çekme deneyinde kullanılan numune boyutları (Sakin 2017)

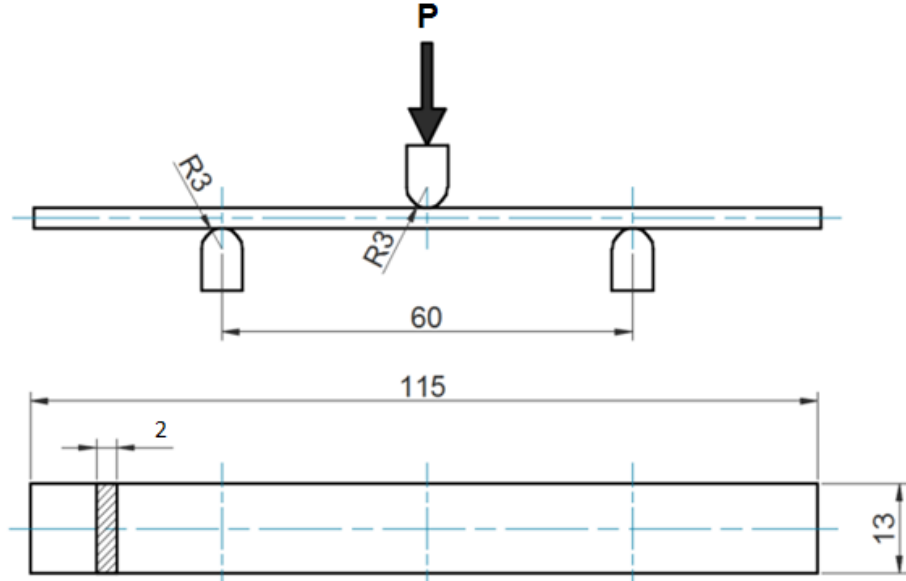


Şekil 3.15. Çekme deneyi cihazı

### 3.2.4. Üç nokta eğilme deneyi

Üç nokta eğilme deneyleri ASTM D 790 esas alınarak yapılmıştır. Üç nokta eğilme deneyinde kullanılan numuneler CNC frezede, boyutları ilgili standarda bağlı olarak belirlendikten sonra kesilerek elde edilmiştir. Numune kalınlığı 2 mm olarak seçilmiş olup ölçüler Şekil 3.16'da görülmektedir. Deney hızı Eşitlik 3.1'de verilen şekil değiştirme hızı ile hesaplanmıştır. Eşitlik 3.1'de  $R$  [mm/dak] şekil değişim hızı,  $L$  [mm] iki destek arası mesafe,  $d$  [mm] numune kalınlığıdır.  $Z$ , standartta belirtildiği gibi 0,01 1/dk olarak alınmıştır.

$$R = \frac{Z * L^2}{6 * d} \text{ [mm/dk]} \quad (3.1)$$



**Şekil 3.16.** Üç nokta eğilme deneyinde kullanılan numune boyutları (Sakin 2017)

Numunelerin eğilme mukavemetleri ( $\sigma_f$ ) Eşitlik 3.2'den, elastisite modülleri ( $E_f$ ) Eşitlik 3.3'ten hesaplanmıştır.  $\sigma_f$

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad [\text{MPa}] \quad (3.2)$$

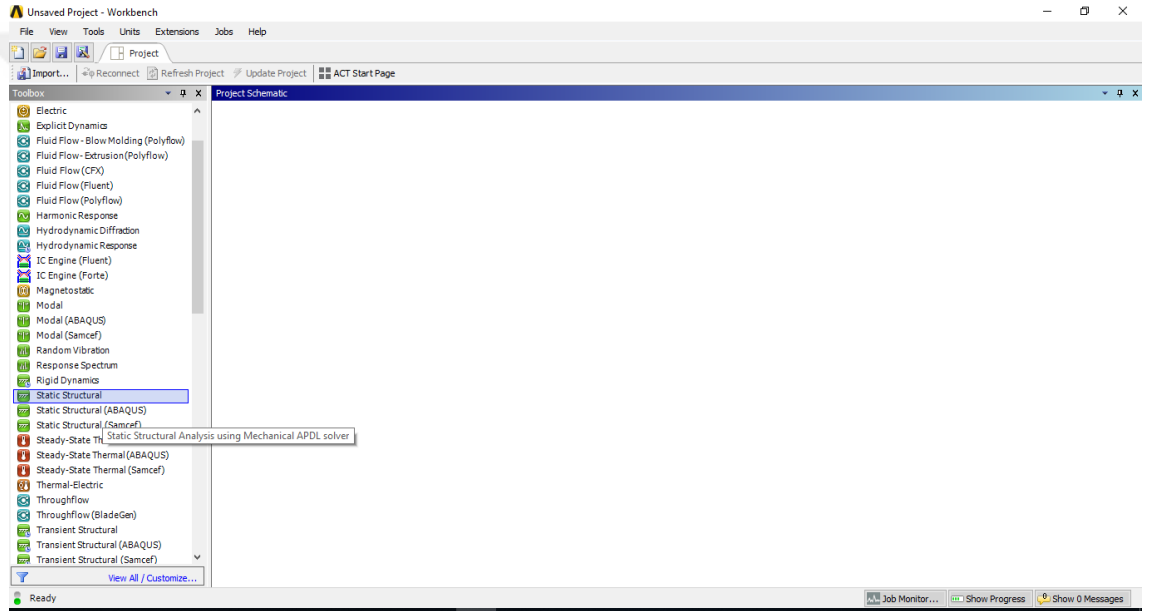
$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad [\text{GPa}] \quad (3.3)$$

Burada; P [N] maksimum yük, L [mm] iki destek arasındaki mesafe, b [mm] numunenin eni, d [mm] numune kalınlığı, m, yük-gerinim eğrisinin eğimidir. Her bir deney numunesi için adet 5 üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Üç nokta eğilme deneyi ile kompozit numunelerin eğilme mukavemetleri belirlenmiştir.

### 3.2.5. ANSYS analizi

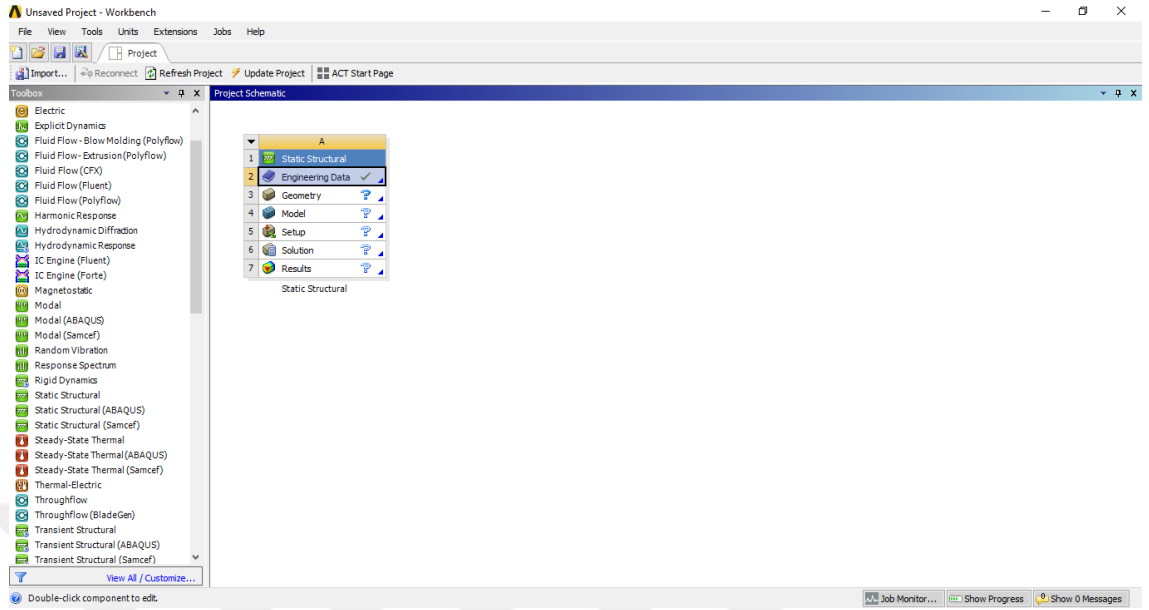
Numunelerin çekme mukavemetleri ve eğilme mukavemetleri ANSYS paket programı ile belirlenmiştir. ANSYS programında analizlerin yapılabilmesi için gerçekleştirilen adımlar aşağıda sıralanmıştır.

- ANSYS Workbench analizi programı açılır ve analiz çeşidi seçilir (Şekil 3.17).



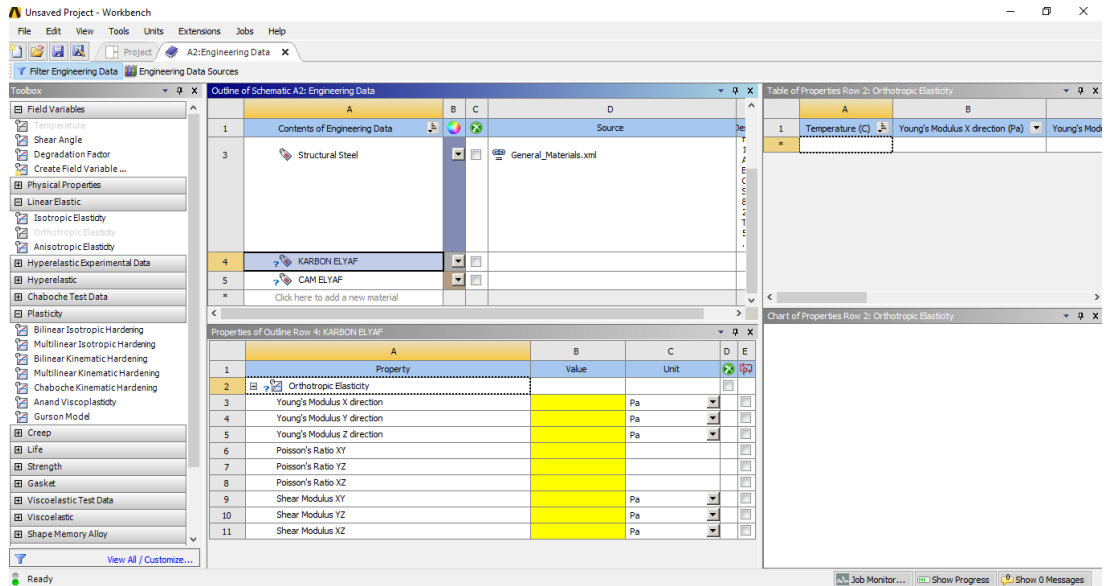
Şekil 3.17. ANSYS Workbench'in görünümü

- Seçilen malzeme özelliklerinin girilebilmesi için Engineering Data seçilir (Şekil 3.18).



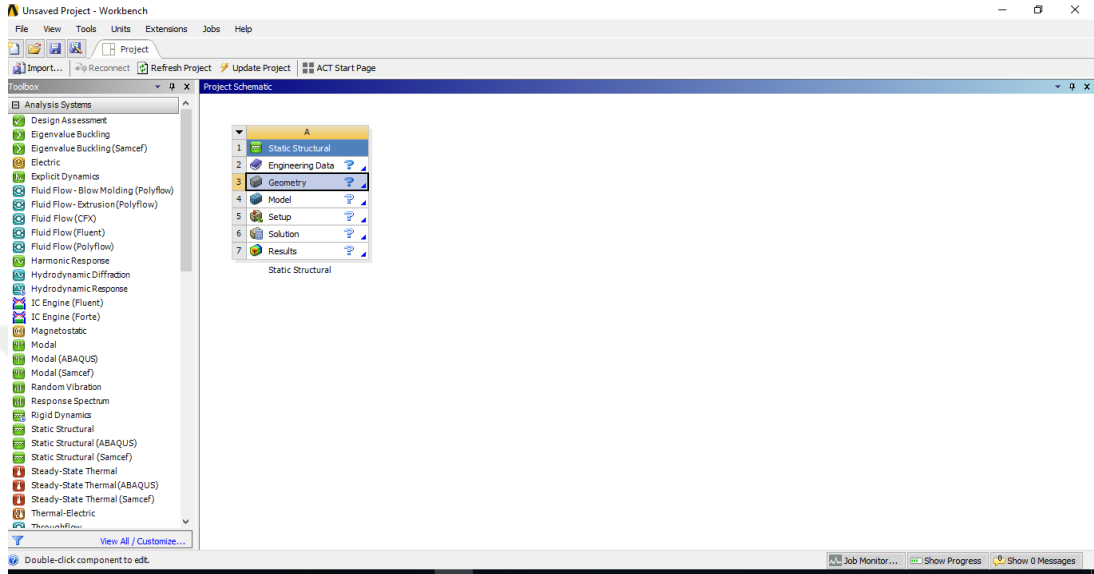
**Şekil 3.18.** Malzeme özelliklerinin girilebilmesi için Engineering Data seçilmesi

- Üretici firmadan temin edilen karbon ve cam elyaf malzeme özellikleri girilir (Şekil 3.19).



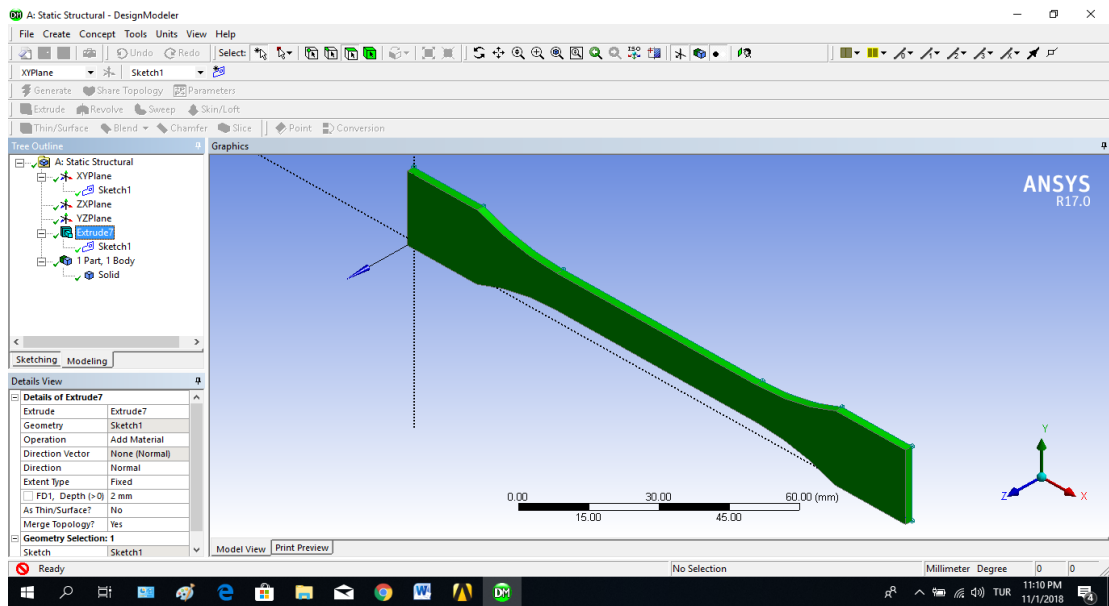
**Şekil 3.19.** Malzeme özelliklerinin girilmesi

- Üretilen malzemelerin, deney standartlarına göre geometrilerinin oluşturmak için “Geometry” açılır (Şekil 3.20).

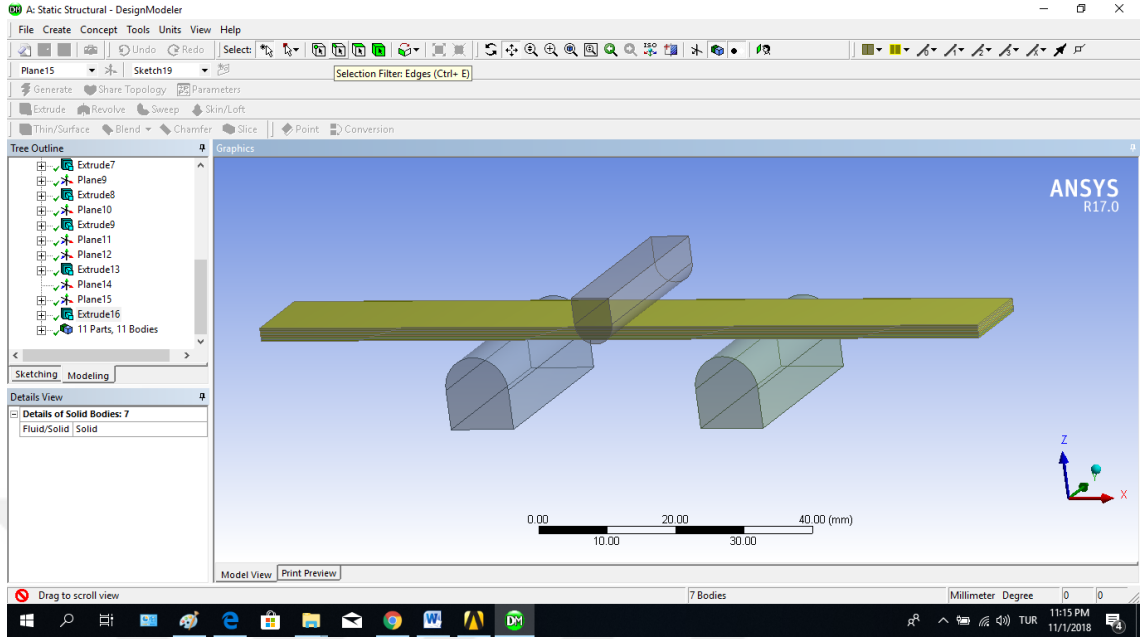


Şekil 3.20. Malzeme geometrilerinin girilebilmesi için ANSYS Geometry sekmesi

- Standartlara göre oluşturulan çekme numunesi geometrisi (Şekil 3.21) ve üç nokta eğilme numunesi geometrisi (Şekil 3.22) oluşturulur.

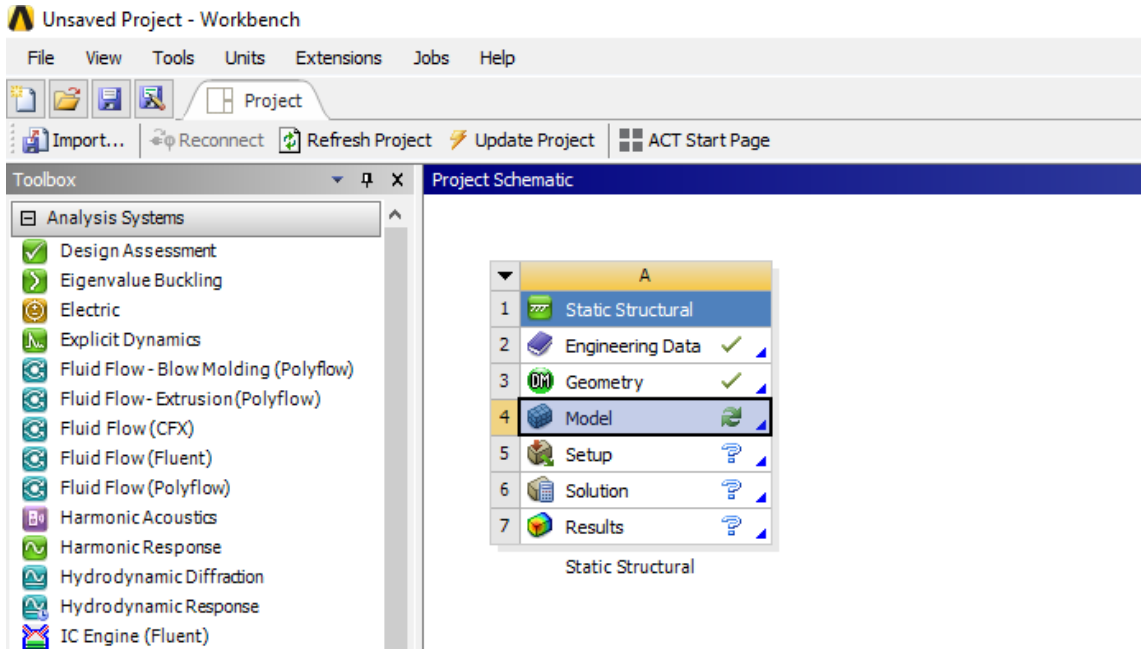


Şekil 3.21. Çekme numunesinin ANSYS’de modellenmesi



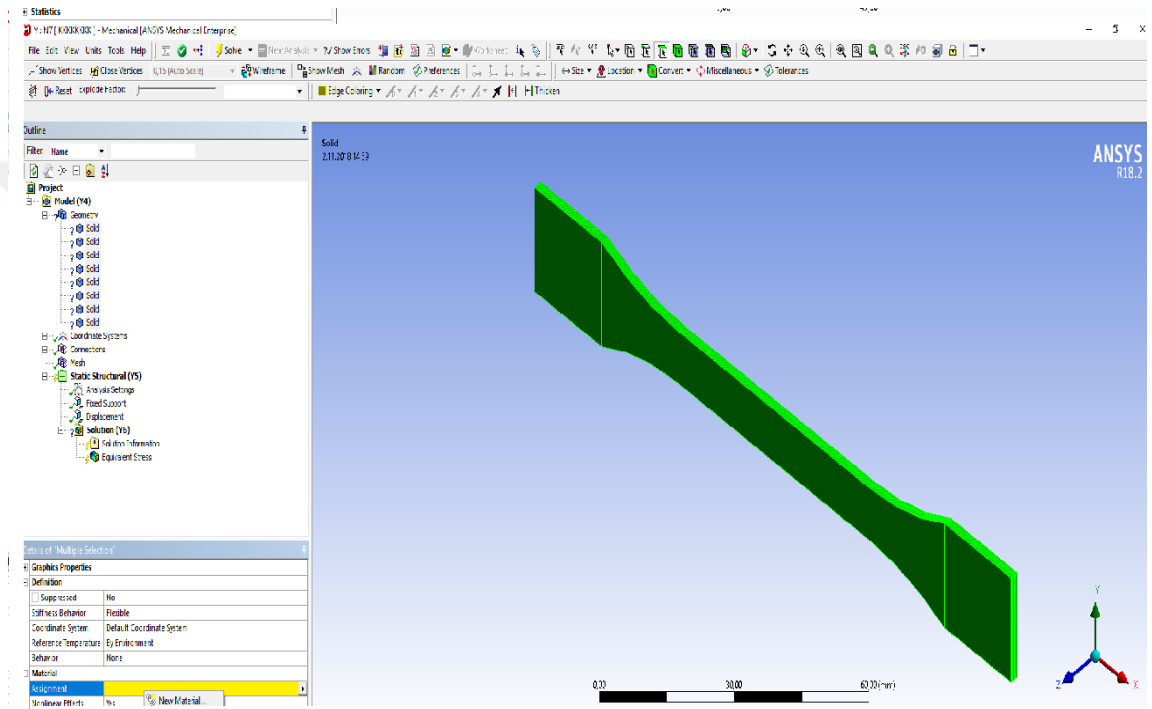
Şekil 3.22. Eğilme numunesinin ANSYS’de modellenmesi

- Oluşturulan geometrilere karbon ve cam elyaf özelliklerini atamak, ayrıca çekme ve üç nokta eğilme analizlerini yapmak için model kısmına çift tıklanır (Şekil 3.23).



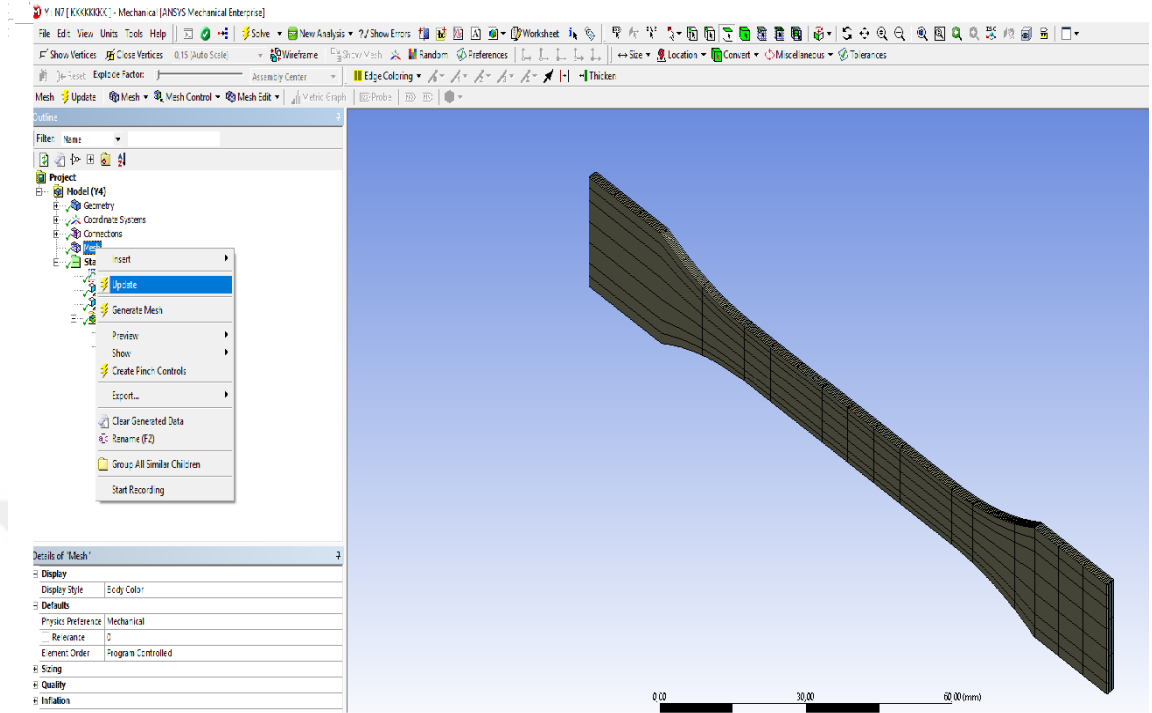
Şekil 3.23. Model oluşturulması

- Çekme numunesine malzeme özelliklerini atamak için, “Assignment” seçilir (Şekil 3.24).
- Katmanların belirlenmiş olan istifleme sıralarına göre karbon-cam, tamamen karbon ya da tamamen cam seçilerek malzeme özelliklerinin atanması tamamlanır. “Mesh” işlemi gerçekleştirilerek malzeme oluşturulur (Şekil 3.25).



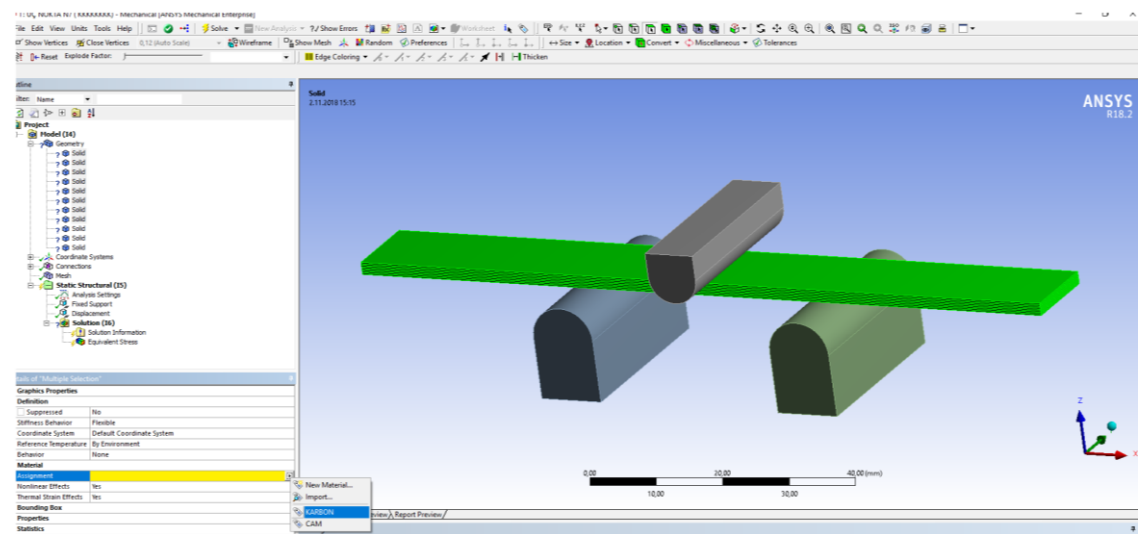
Şekil 3.24. Çekme numunesi için “Assignment” adımının gerçekleştirilmesi



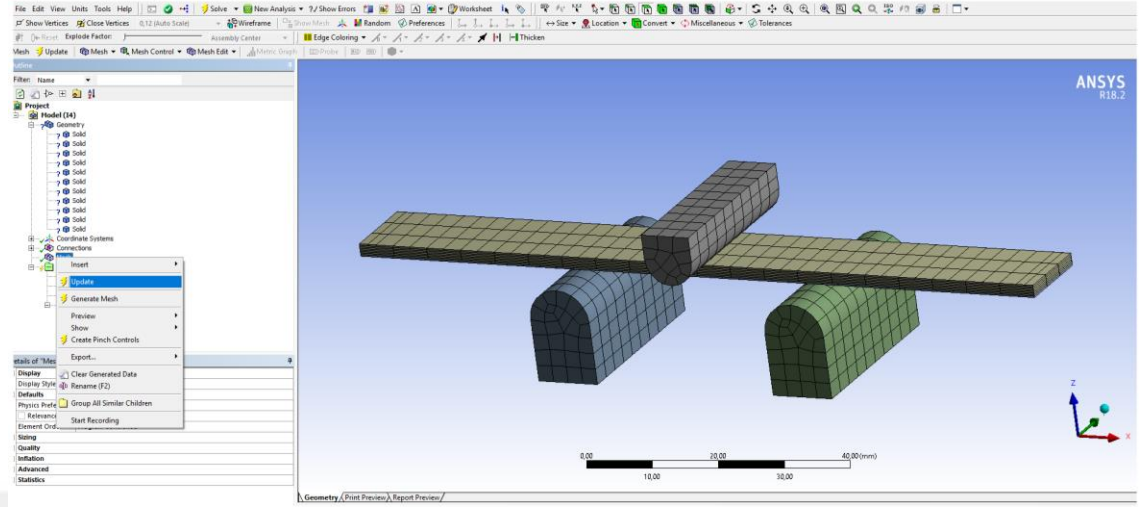


Şekil 3.25. Çekme numunesi için “Mesh” adımının gerçekleştirilmesi

- Aynı işlemler üç nokta eğme numunesi içinde yapılarak tamamlanır (Şekil 3.26, Şekil 3.27).

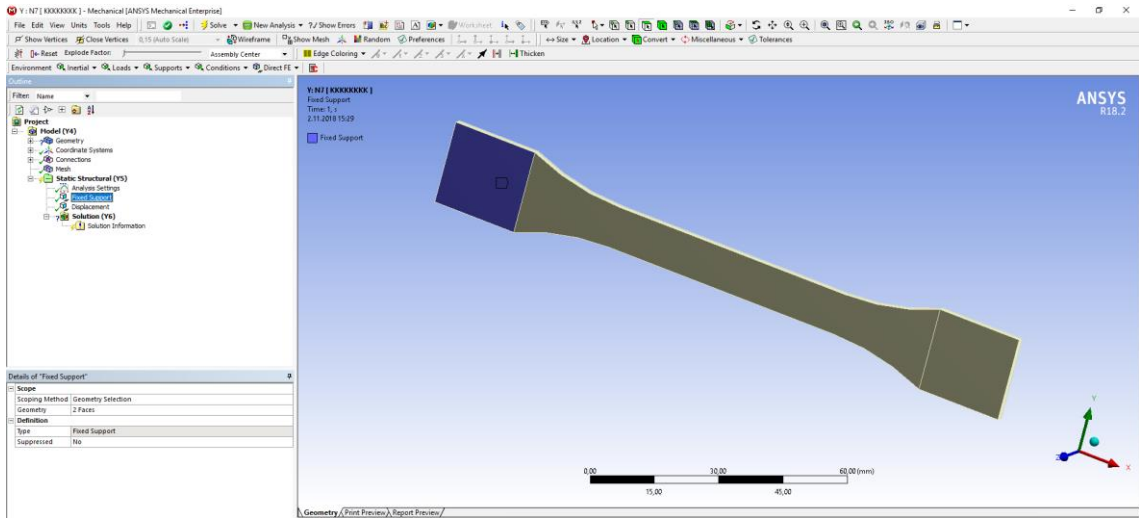


Şekil 3.26. Eğilme numunesi için “Assignment” adımının gerçekleştirilmesi

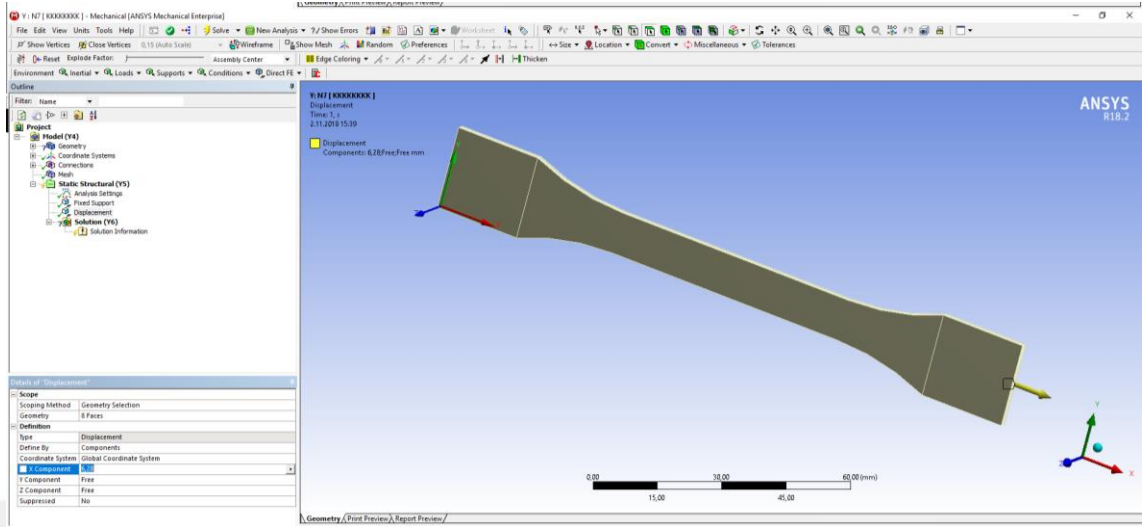


Şekil 3.27. Eğilme numunesi için “Mesh” adımının gerçekleştirilmesi

- Çekme numunesinin sabit kalacak kısımları yani deplasman hareketinin olmayacağı kısımları “fixed support” komutuyla seçilerek sabitlenir (Şekil 3.28).
- Çekme numunesinin hareket edecek kısmı “displacement” komutuyla seçilerek ne kadar deplasman hareketi yapacağı girilir (Şekil 3.29).

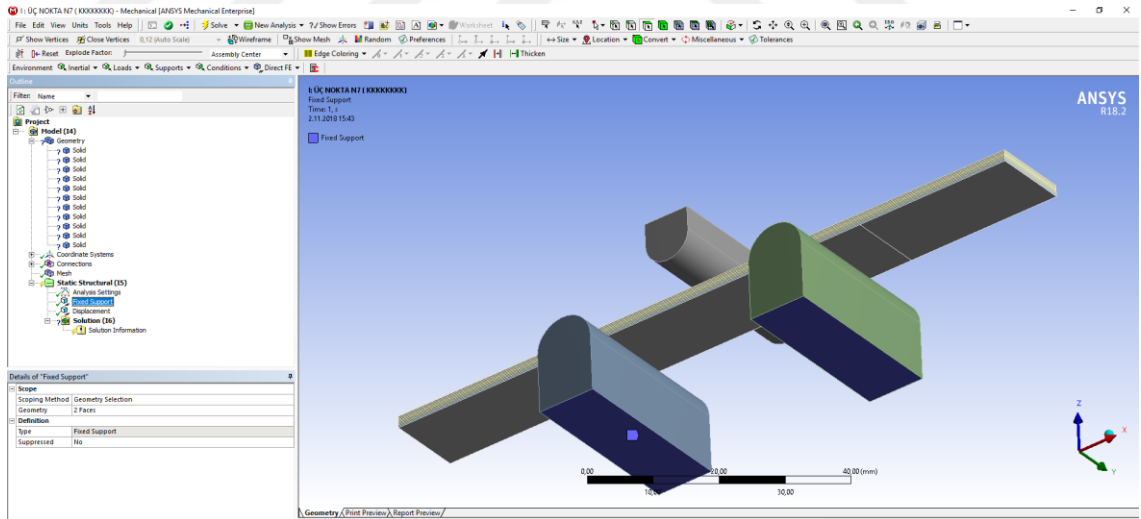


Şekil 3.28. Çekme numunesi için Fixed support adımı

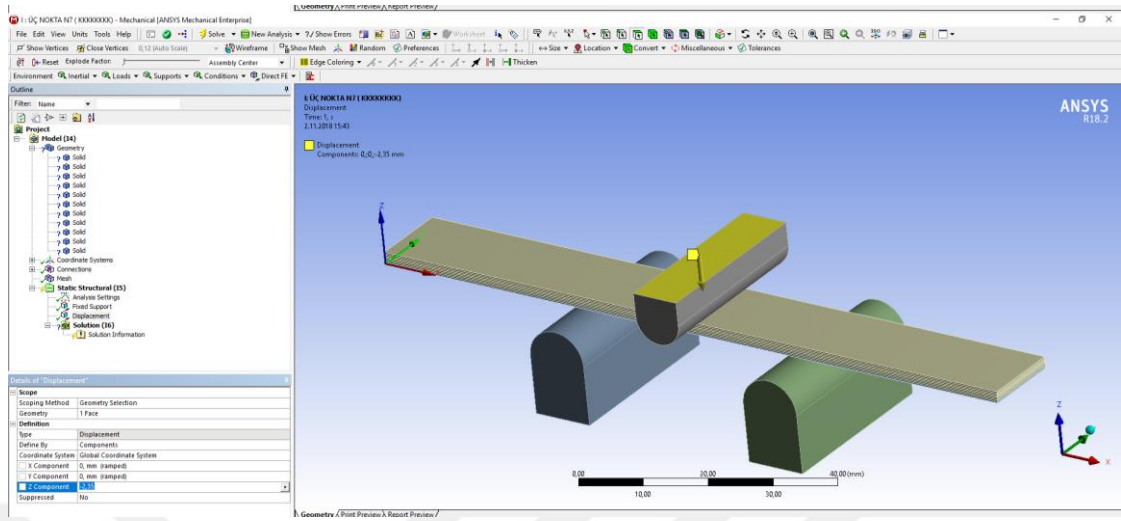


Şekil 3.29. Çekme numunesi için displacement adımı

- Aynı işlemler üç nokta eğilme analizi içinde gerçekleştirilir (Şekil 3.30, Şekil 3.31).



Şekil 3.30. Eğilme numunesi için Fixed support adımı



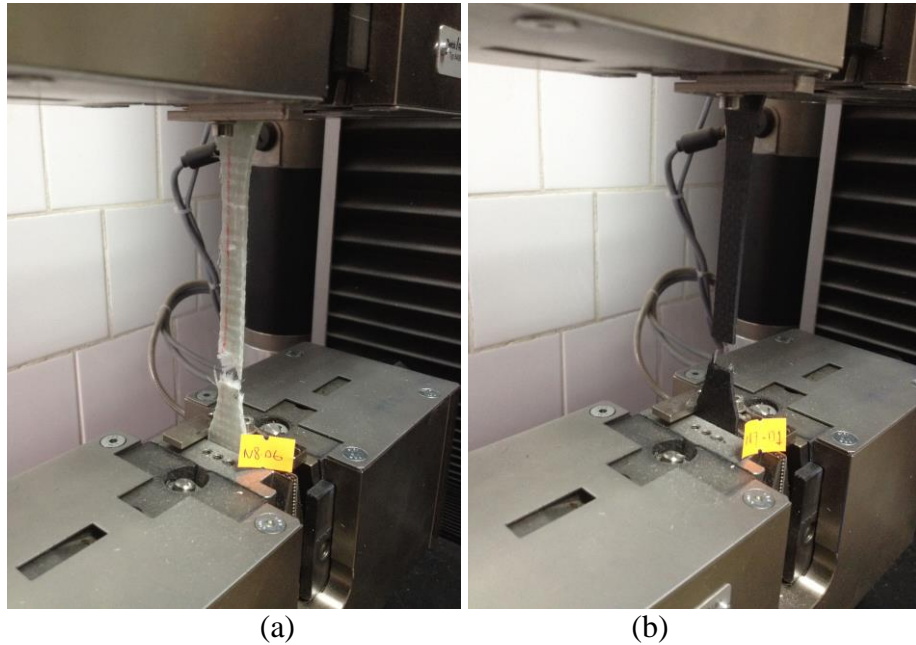
Şekil 3.31. Eğilme numunesi için displacement adımı

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

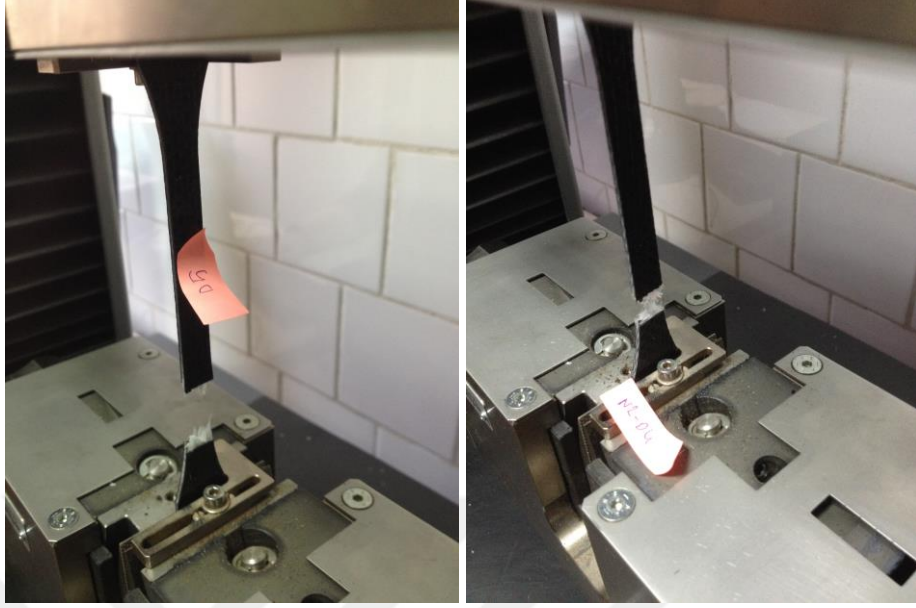
Bu bölümde, farklı istif şekillerine sahip kompozit malzemelerden elde edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları sunulmuştur. Sekiz tabakadan oluşan, farklı şekillerde istiflenmiş olan numunelere ait deney sonuçları, sekiz tabakanın da cam elyaf olduğu N7 numunesi ile sekiz tabakanın da karbon elyaf olduğu N8 numunesine ait deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. İlaveten numunelerin çekme ve eğilme dayanımları ANSYS paket programı ile belirlenmiş ve analizlerden elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

##### 4.1. Çekme Deneyi Sonuçları

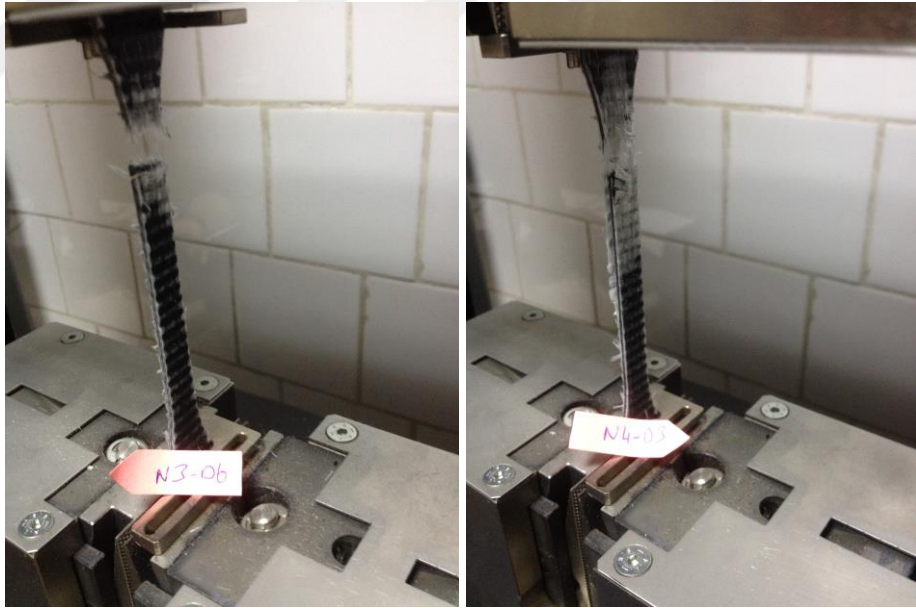
Çekme deneyi gerçekleştirilmiş numunelerin koptuktan sonraki halleri Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.1. (a) N8, (b) N7 numunelerinin çekme deneyi görüntüleri



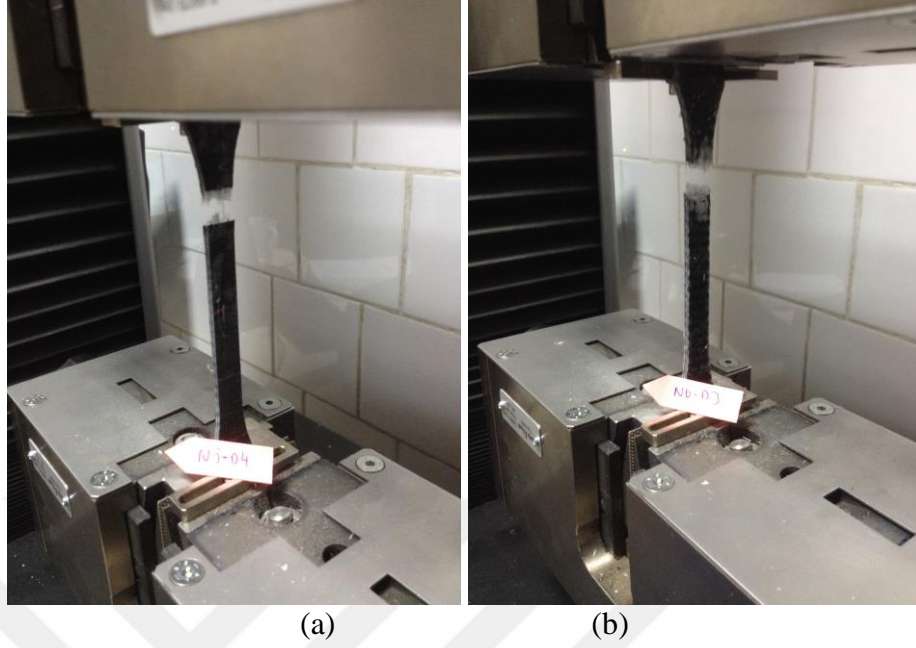
(a) (b)

**Şekil 4.2.** (a) N1, (b) N2 numunelerinin çekme deneyi görüntüleri

(a)

(b)

**Şekil 4.3.** (a) N3, (b) N4 numunelerinin çekme deneyi görüntüleri

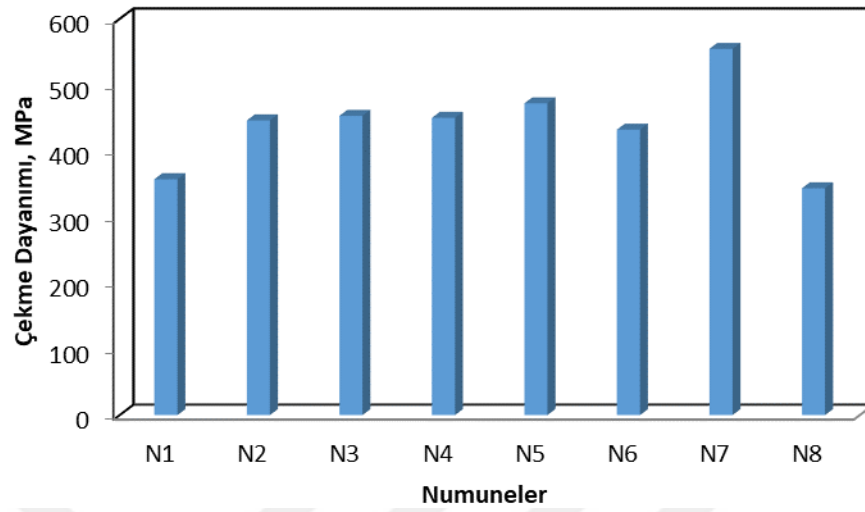


**Şekil 4.4.** (a) N5, (b) N6 numunelerinin çekme deneyi görüntüleri

Çekme deneyi sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. İstif düzenlerine göre çekme mukavemetlerinde meydana gelen değişim ise Şekil 4.5’te görülmektedir.

**Çizelge 4.1.** Çekme deneyi sonuçları

Numune Kodu	Çekme Dayanımı (MPa)	Standart Sapma (MPa)
N1	357,23	21,12
N2	446,34	14,04
N3	453,16	16,86
N4	450,26	18,11
N5	472,16	16,02
N6	432,38	25,03
N7	554,72	20,55
N8	343,56	19,64



**Şekil 4.5.** İstif düzenlerine göre çekme dayanımlarında meydana gelen değişim

Şekil 4.5 incelendiğinde, en yüksek çekme mukavemetini 554,72 MPa değeri ile sekiz tabaka karbon elyaftan oluşan numunenin gösterdiği, en düşük çekme mukavemetini 343,56 MPa değeri ile sekiz tabaka cam elyaftan oluşan numunenin gösterdiği görülmektedir. Sekiz tabaka karbon elyaftan oluşan kompozitin yüksek çekme mukavemetine sahip olmasının karbon elyafın yüksek elastisite modülüne sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Murugan *et al.* 2014).

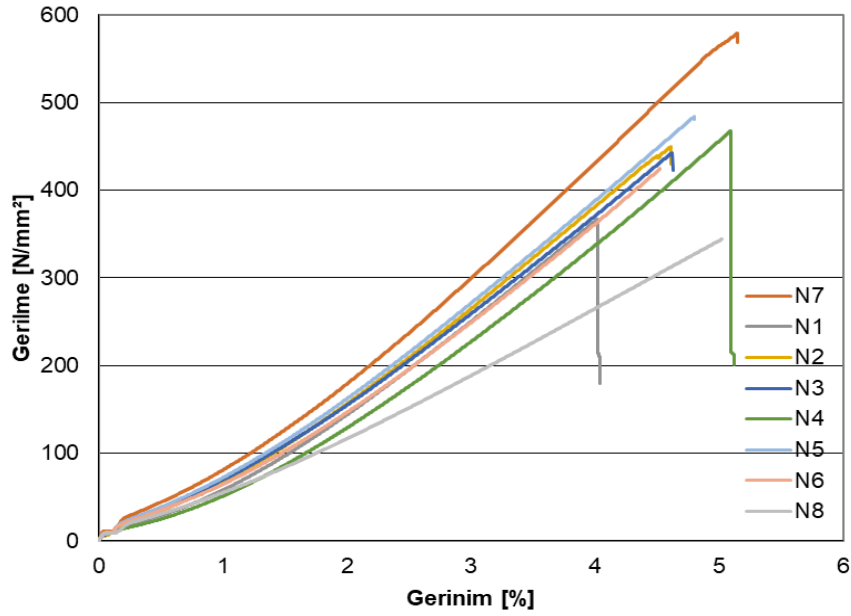
Diğer şekillerde istiflenmiş olan numunelerin çekme mukavemeti değerlerinin ise bu iki değer arasında kaldığı belirlenmiştir. İstif sırası farklı olan numunelerin çekme mukavemetleri incelendiğinde iki tarafı ve ortası karbon elyaf olan KCCKKCK (N5) numunesinin diğer numunelerden daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu, ortası cam elyaf iki kenarı karbon elyaf olan N1 numunesinin diğer numunelerden daha düşük çekme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür (Çizelge 4.1). Ortada cam elyaf bulunan kompozitlerin çekme mukavemetlerinin düşük olmasının, cam elyafın reçine geçirgenliğinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Daban 2016).

Eşit olarak yüklenmiş hibrit cam elyaf ve karbon elyaf kompozitlerin çekme mukavemetleri, cam ve karbon tabakaların farklı çekme mukavemetine sahip olmalarından dolayı birbirinden farklı değerler almaktadır (Murugan *et al.* 2014). Cam



elyafın nihai geriniminin karbon elyafın nihai geriniminden fazla olması, merkezde karbon elyaf, kenarlarda cam elyaf olması halinde karbon elyaflarda meydana gelebilecek kopmaları sınırlamaktadır. Buna bağlı olarak, karbon tabakaların merkezde olması durumunda kompozit daha fazla çekme mukavemetine sahip olabilmektedir (Pandya *et al.* 2011). Ayrıca cam elyafın çekme mukavemetinin düşük olması, merkezde cam elyaf bulunması halinde çekme mukavemetinin düşük olmasına yol açmıştır.

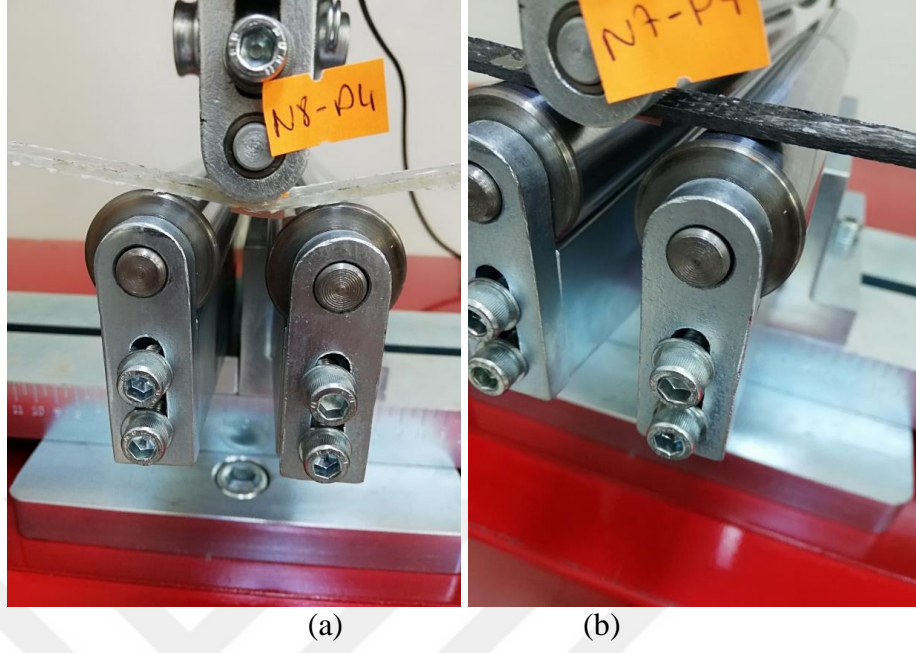
Çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-gerinim ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) eğrileri Şekil 4.6'da görülmektedir.



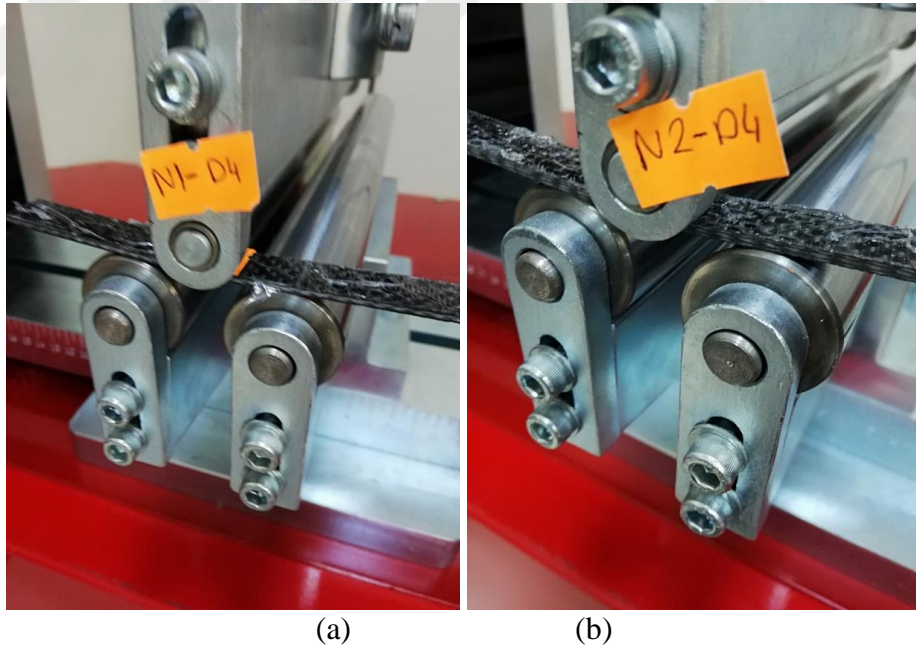
Şekil 4.6. Çekme deneyi sonucu elde edilen gerilme-gerinim eğrileri

#### 4.2. Üç Nokta Eğilme Deneyi Sonuçları

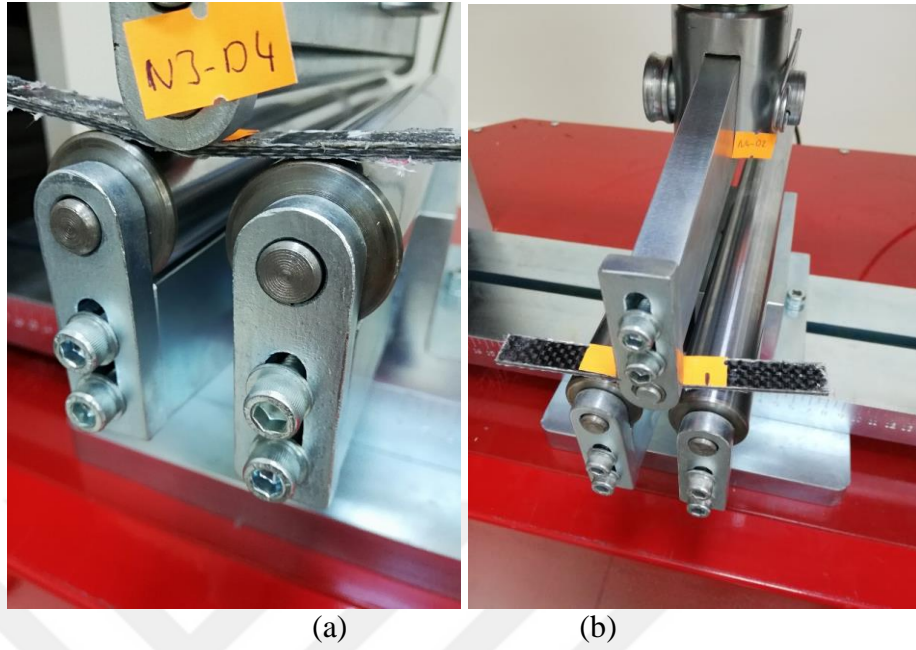
Üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilmiş numunelerin kırıldıktan sonraki halleri Şekil 4.7- 4.10'da görülmektedir.



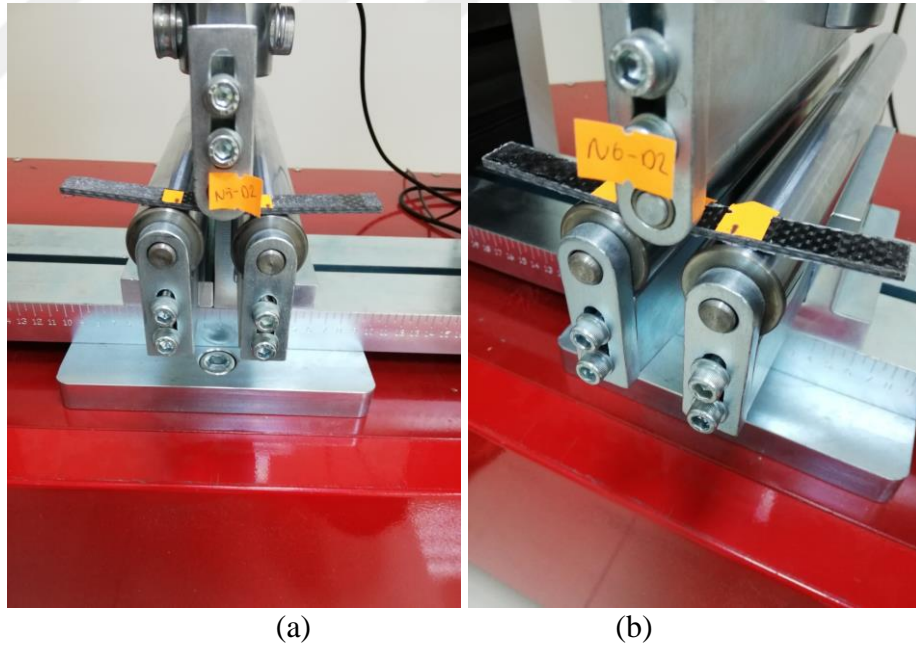
Şekil 4.7. (a) N8, (b) N7 numunelerinin eğilme deneyi görüntüleri



Şekil 4.8. (a) N1; (b) N2 numunelerinin eğilme deneyi görüntüleri



**Şekil 4.9.** (a) N3; (b) N4 numunelerinin eğilme deneyi görüntüleri



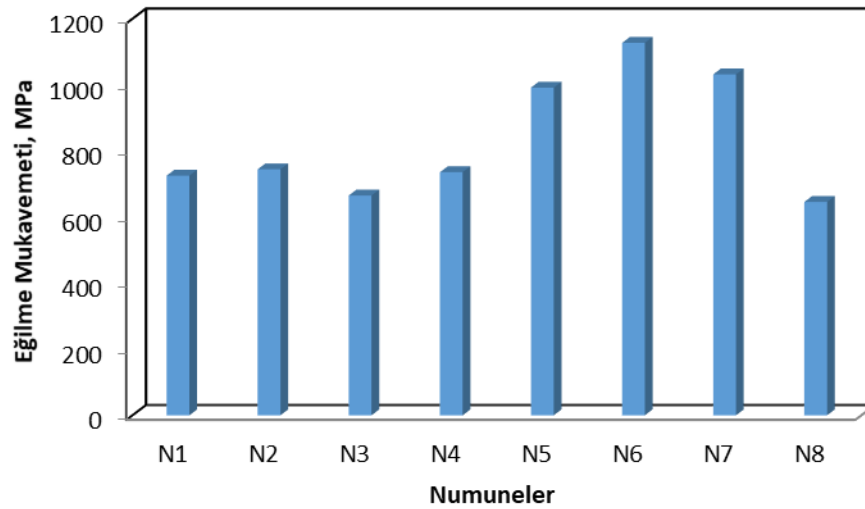
**Şekil 4.10.** (a) N5; (b) N6 numunelerinin eğilme deneyi görüntüleri

Üç nokta eğilme deneyi sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. İstif şekillerine göre eğilme mukavemetlerinde meydana gelen değişim ve eğilme deneyi sonucunda hesaplanan elastisite modülleri ise sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de görülmektedir.

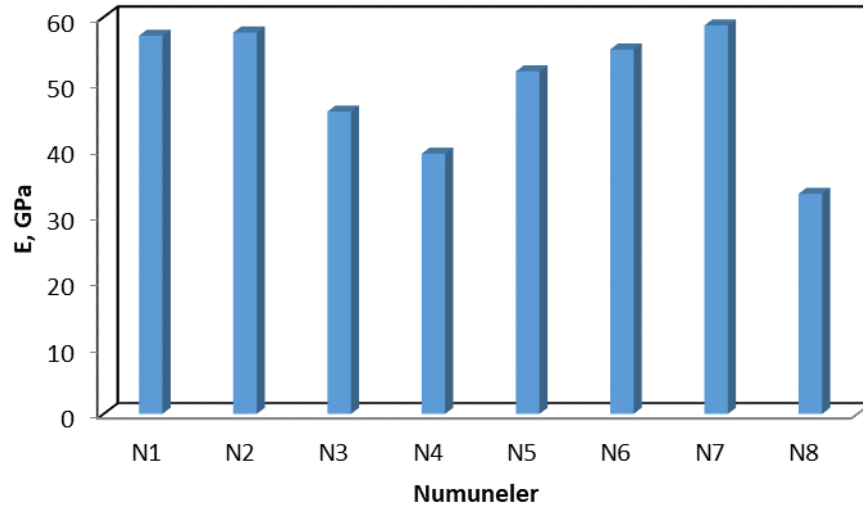
Şekil 4.11 incelendiğinde, en yüksek eğilme mukavemetini 1127,42 MPa değeri ile ortada ve iki kenarda cam elyafların yer aldığı N6 numunesinin gösterdiği, en düşük eğilme mukavemetini 645,92 MPa değeri ile cam elyafların yer aldığı numunenin gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.12'ye göre, en yüksek elastisite modülüne sahip numune 8 tabaka karbon elyaftan oluşan numune olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 4.2.** Eğilme deneyi sonuçları

Numune Kodu	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Standart Sapma (MPa)
N1	725,36	57,196	14,06
N2	744,54	57,672	21,51
N3	665,35	45,702	15,81
N4	735,86	39,355	19,03
N5	991,75	51,814	20,24
N6	1127,42	55,108	16,74
N7	1031,86	58,744	19,84
N8	645,92	33,277	17,37



**Şekil 4.11.** İstif şekillerine göre eğilme dayanımlarında meydana gelen değişim

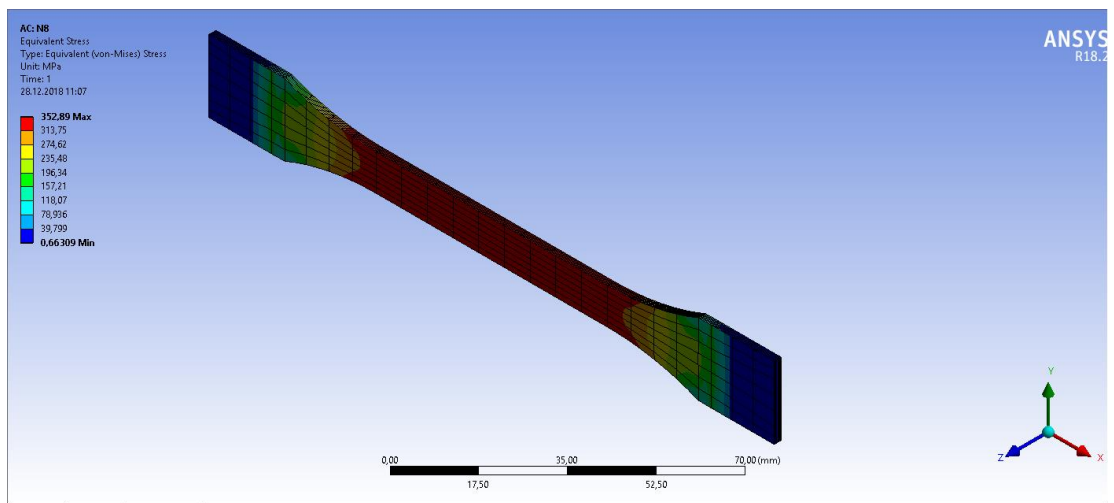


**Şekil 4.12.** İstif şekillerine göre elastisite modülleri

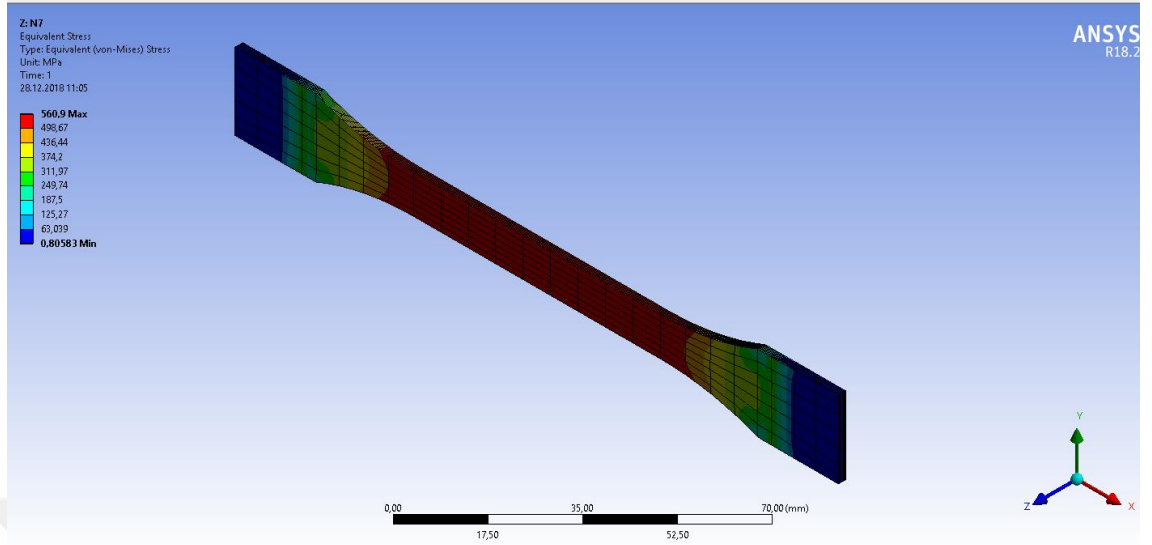
### 4.3. ANSYS Analiz Sonuçları

#### 4.3.1. Çekme analizleri

ANSYS ile gerçekleştirilen çekme deneyi analizleri, bire bir modellenen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olup, N8 ve N7 numunelerine ait analizler Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de görülmektedir.



**Şekil 4.13.** N8 numunesinin ANSYS'de modellenerek gerilme analizinin yapılması



**Şekil 4.14.** N7 numunesinin ANSYS’de modellenerek gerilme analizinin yapılması

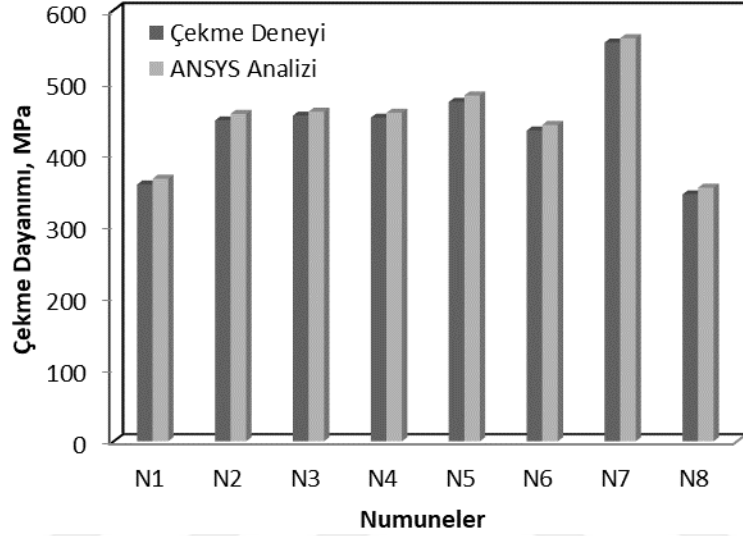
Numunelere ait verilerin girilmesi ile gerçekleştirilen ANSYS analizi sonucunda elde edilmiş olan çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.3’te görülmektedir.

**Çizelge 4.3.** ANSYS analizi ile elde edilen çekme dayanımı değerleri

Numune Kodu	Uzama (mm)	ANSYS’den bulunan Çekme Dayanımı (MPa)	Deney Sonuçları (MPa)
N1	3,45	365,31	357,23
N2	4,06	455,49	446,34
N3	4,14	458,59	453,16
N4	4,12	457,04	450,26
N5	4,16	481,17	472,16
N6	3,97	440,22	432,38
N7	4,91	560,9	554,72
N8	5,96	352,89	343,56

Şekil 4.15’de numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olan çekme deneyi sonucunda elde edilmiş olan çekme dayanımı değerleri ile ANSYS analizi sonucunda elde edilmiş olan çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 4.15 incelendiğinde deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının benzer olduğu söylenebilir. ANSYS analizi

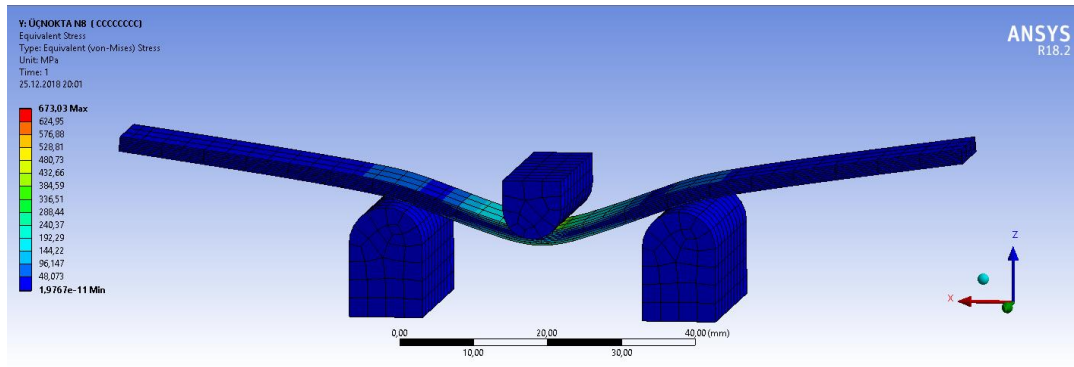
sonucunda elde edilmiş olan çekme dayanımları ile deneyler sonucunda elde edilen çekme dayanımları karşılaştırıldığında, ANSYS analizi ile belirlenen çekme dayanımlarının %1,11 ile %2,71 arasında değişen oranlarda daha yüksek olduğu görülmüştür.



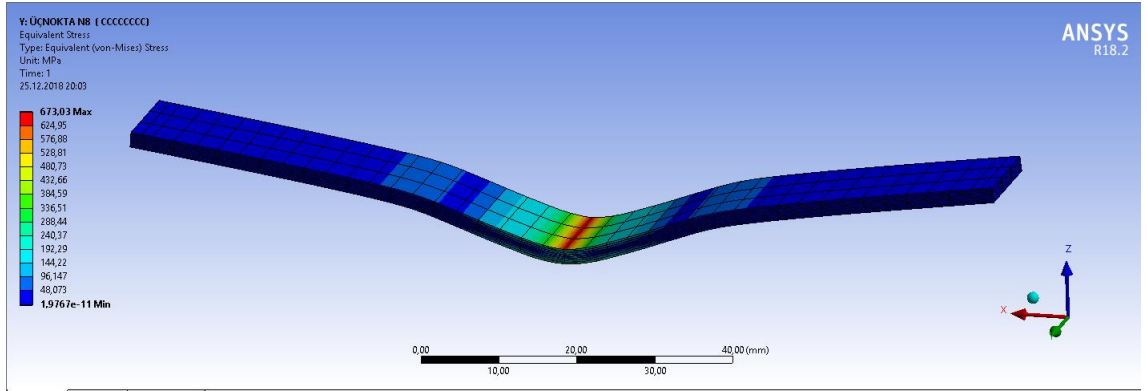
**Şekil 4.15.** Çekme deneyinden elde edilen çekme dayanımı değerleri ile ANSYS analizi sonucunda elde edilen çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması

#### 4.3.2. Eğilme analizleri

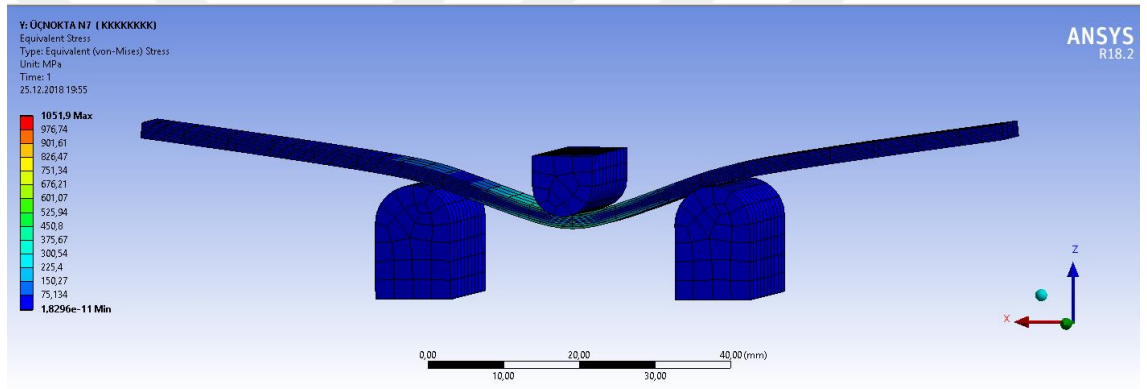
N8 ve N7 numuneleri için ANSYS ile gerçekleştirilen eğilme deneyi analizleri Şekil 4.16-Şekil 4.19'da görülmektedir.



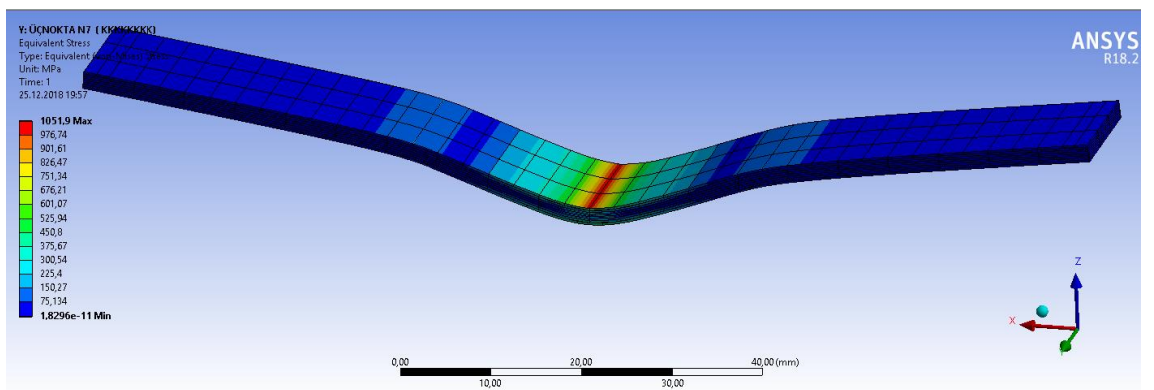
**Şekil 4.16.** N8 numunesinin ANSYS eğilme analizi (Yüklemeye yapılırken)



Şekil 4.17. N8 numunesinin ANSYS eğilme analizi



Şekil 4.18. N7 numunesinin ANSYS eğilme analizi (Yüklemeye yapılırken)



Şekil 4.19. N7 numunesinin ANSYS eğilme analizi

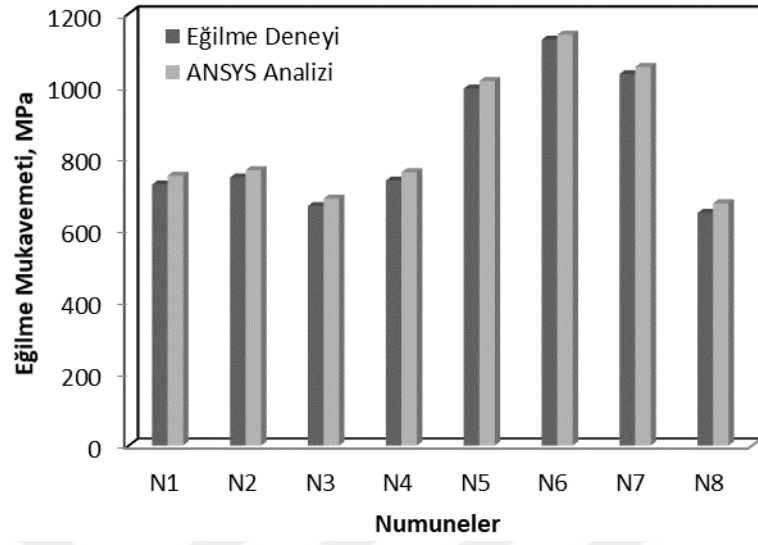
Numunelere ait verilerin girilmesi ile gerçekleştirilen ANSYS analizi sonucunda elde edilmiş olan eğilme mukavemeti değerleri Çizelge 4.4'te görülmektedir.



**Çizelge 4.4.** ANSYS analizi ile elde edilen eğilme mukavemeti değerleri

Numune Kodu	Sehim (mm)	Eğilme Mukavemetleri (MPa)	
		ANSYS'den bulunan	Deney
N1	2,95	749,47	725,36
N2	30,2	764,91	744,54
N3	3,54	685,76	665,35
N4	3,97	759,16	735,86
N5	3,52	1012,51	991,75
N6	4,98	1141,31	1127,42
N7	3,55	1051,91	1031,86
N8	3,72	673,03	645,92

Şekil 4.20'de numuneler üzerinde gerçekleştirilen eğilme deneyi sonucunda elde edilmiş olan eğilme dayanımı değerleri ile ANSYS analizi sonucunda elde edilmiş olan eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 4.20 incelendiğinde deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının büyük oranda örtüştüğü söylenebilir. ANSYS analizi sonucunda elde edilmiş olan eğilme dayanımları ile deneyler sonucunda elde edilen eğilme dayanımları karşılaştırıldığında, ANSYS analizi ile belirlenen eğilme dayanımlarının %1,23 ile %4,19 arasında değişen oranlarda daha yüksek olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.20.** Eğilme deneyinden elde edilen eğilme mukavemeti değerleri ile ANSYS analizinden elde edilen eğilme mukavemeti değerlerinin karşılaştırılması

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, karbon elyaf, cam elyaf ve epoksi reçine kullanılarak, farklı istif şekillerinde hazırlanmış olan ve her biri sekizer tabakadan oluşan numunelere çekme deneyi ve üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Çekme dayanımı ve eğilme dayanımı belirlenen numunelere ait veriler ile ANSYS paket programında analizler gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

-Çekme deneylerinde maksimum uzama değeri ve üç nokta eğilme deneylerinde maksimum sehimler ANSYS paket programında sınır şartları olarak girildiğinde deney verileri ve ANSYS verilerinin birbirlerine yakınlığı görülmektedir.

-Çekme deneyleri, en yüksek çekme dayanımını 554,72 MPa değeri ile sekiz tabaka karbon elyaftan oluşan numunenin gösterdiğini, en düşük çekme dayanımını 343,56 MPa değeri ile sekiz tabaka cam elyaftan oluşan numunenin gösterdiğini ortaya koymuştur. Diğer şekillerde istiflenmiş olan numunelerin çekme dayanımı değerleri, bu iki değerin arasında kalmıştır. İstif sırası farklı olan numunelerin çekme dayanımları incelendiğinde hibrit ve ortası karbon elyaf olan KCCKKCK (N5) numunesinin diğer numunelerden daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

-Üç nokta eğilme deneyleri, en yüksek eğilme dayanımını 1127,42 MPa değeri ile ortada ve iki kenarda cam elyafların yer aldığı N6 numunesinin gösterdiğini, en düşük eğilme dayanımını 645,92 MPa değeri ile cam elyafların yer aldığı numunenin gösterdiğini ortaya koymuştur.

- Eğilme deneyi sonucunda numunelerin elastisite modülleri belirlenmiştir. Buna göre, 8 tabaka karbon elyaftan oluşan numune diğer numunelerden daha yüksek elastisite modülüne sahiptir.

-ANSYS ile gerçekleştirilen çekme analizleri sonucunda bulunan çekme dayanımları, çekme deneyi ile bulunan çekme dayanımı ile benzer sonuçlar vermiştir. ANSYS analizi ile belirlenen çekme dayanımları, deney sonucunda elde edilen çekme dayanımlarından %1,11 ile %2,71 arasında değişen oranlarda daha yüksek çıkmıştır.

-ANSYS ile gerçekleştirilen eğilme analizleri sonucunda bulunan eğilme dayanımları, üç nokta eğilme deneyi ile bulunan eğilme dayanımı ile benzer sonuçlar ortaya vermiştir. ANSYS analizi ile belirlenen eğilme dayanımları, deney sonucunda elde edilen eğilme dayanımlarından %1,23 ile %4,19 arasında değişen oranlarda daha yüksek çıkmıştır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneyler sekiz farklı istif düzeninde oluşturulan karbon elyaf cam elyaf kompozitlerin çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve eğilme elastisite modülü değerlerinin istif düzenindeki değişikliklerle birlikte değişik değerler aldığını göstermiştir.

İlerleyen çalışmalarda bu kompozitlerin darbe dayanımlarının da araştırılması ile kompozit özelliklerinin daha iyi ortaya konacağı düşünülmektedir.

**KAYNAKLAR**

- Abu Talib, A.R., Ali, A., Badie, M.A., Lah, N.A.C., Golestaneh, A.F., 2010. Developing a hybrid, carbon/glass fiber-reinforced, epoxy composite automotive drive shaft. *Materials and Design*, 31, 514–521.
- Akbulut, M., Sonmez, F.O., 2008. “Optimum design of composite laminates for minimum thickness”, *Computers and Structures*, 86, 1974-1982.
- ASTM D 3039. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 2017.
- ASTM D 790. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2017.
- Banakar, P., Shivananda, H.K., 2012. Preparation and characterization of the carbon fiber reinforced epoxy resin composites. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSRJMCE)*, 1 (2), 15-18.
- Beşergil, B., 2016. Kompozitler Temel İlkeler Test Metotları. Gazi Kitabevi, 730 s, Ankara.
- Botelho, E.C., Figiel, L., Rezende, M.C., Lauke, B., 2003. Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites. *Composites Science and Technology*, 63, 1843–1855.
- Boumbimba, R.M., Froustey, C., Viot, P., Olive, J.M., Léonardi, F., Gerard, P., Inoubli, R., 2014. Preparation and mechanical characterisation of laminate composites made of glass fibre/epoxy resin filled with tri bloc copolymers. *Composite Structures*, 116, 414–422.
- Cao, S., Wu, Z., Wang, X., 2009. Tensile properties of CFRP and hybrid FRP composites at elevated temperatures. *Journal of Composite Materials*, 43 (04), 315-330.
- Daban, Y., 2016. Kompozit Plakalarda Farklı Tabaka Sayısı, Farklı Yapı ve İstifleme Sırasına Bağlı Optimum Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi. Y. Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- De Paiva, J.M.F., Mayer, S., Rezende, M.C., 2005. Evaluation of mechanical properties of four different carbon/ epoxy composites used in aeronautical field. *Materials Research*, 8 (1), 91-97.
- Demirel, A., 2007. Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu. Y. Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dong, C., Ranaweera-Jayawardena, H.A., Davies I. J., 2012. Flexural properties of hybrid composites reinforced by S-2 glass and T700S carbon fibres. *Composites Part B: Engineering*, 43 (2), 573-581.
- Durgun, İ., Vatansver, O., Ertan, R., Yavuz, N., 2013. Otomotiv sektöründe kullanılan kompozit parça imalat yöntemlerinin deneysel olarak karşılaştırılması. II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, İzmir.
- Fiore, V., Di Bella, G., Valenza, A., 2011. Glass–basalt/epoxy hybrid composites for marine applications. *Materials and Design*. 32, 2091–2099.
- Jones, R.M., 1999. *Mechanics of Composite Materials*. Taylor&Francis, 519 p, Philadelphia, PA.

- Kısa, M., Özen, M., Değrimenci, D., Demircan, G., Dirilmiş, M., 2017. Çevresel etkilere maruz kompozit malzemelerin aşınma davranışı. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 01, 54-59.
- Koyanagi, J., Yoneyama, S., Nemoto, A., Melo, J.D.D., 2010. Time and temperature dependence of carbon/epoxy interface strength. Composites Science and Technology, 70, 1395–1400.
- Ma, Y., Ueda, M., Yokozeki, T., Sugahara, T., Yang, Y., Hamada, H., 2017. A comparative study of the mechanical properties and failure behavior of carbon fiber/epoxy and carbon fiber/polyamide 6 unidirectional composites. Composite Structures, 160, 89–99.
- Murugan, R., Ramesh, R., Padmanabhan, K., 2014. Investigation on static and dynamic mechanical properties of epoxy based woven fabric glass/carbon hybrid composite laminates. 12th Global Congress On Manufacturing And Management, Procedia Engineering, 97, 459 – 468.
- Ochola, R.O., Marcus, K., Nurick, G.N., Franz, T., 2004. Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates. Composite Structures, 63, 455-467.
- Pandya K.S., Veeraj, Ch., Naik, N.K., 2011. Hybrid composites made of carbon and glass woven fabrics under quasi-static loading. Materials and Design, 32, 4094-4099.
- Pathak, A.K., Borah, M., Gupta, A., Yokozeki, T., Dhakate, S.R., 2016. Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites. Composites Science and Technology, 135, 28-38.
- Ray, B.C., 2006. Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites. Journal of Colloid and Interface Science, 298, 111–117.
- Saçak, M., 2004. Polimer Kimyası. Gazi Kitabevi, 525 s, Ankara.
- Saçak, M., 2012. Polimer Teknolojisi. Gazi Kitabevi, 461 s, Ankara.
- Sakin, R., 2017. RTM ile üretilen iki-yönlü cam-dokuma takviyeli kompozit levhalarda cam-keçe kullanımının mekanik anizotropi üzerine etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23 (8), 967-973.
- Sakin, R., Daban, Y., 2015. Rtm yöntemiyle üretilen cam/polyester kompozit plakalarda cam-dokuma tipi, istifleme sırası ve tabaka sayısının mekanik özelliklere etkisi. Uluslar Arası Katılımlı III. Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, Kuşadası.
- Schiffer, A., Tagarielli, V.L., 2015. Predictions of the interlaminar tensile failure of a carbon/epoxy composite laminate. Composite Structures, 133, 997–1008.
- Solmaz, M.Y., Gür, M., 2007. Tabakalı kompozit plakalarda takviye malzemesi ve oryantasyon açısının gerilme analizine etkisi. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 16-25.
- Sugie, T., Nakai, A., Hamada, H., 2009. Effect of CF-GF fibre hybrid on impact properties of multi-axial warp knitted fabric composite materials. Composites: Part, A, 40, 1982–1990.
- Şahin, Y., 2015. Kompozit Malzemelere Giriş. Seçkin Yayınevi, 440 s, Ankara.
- Türkmen, İ., Köksal, N.S., 2013. Cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit malzemelerde (CTP) elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi. C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 8 (2), 17-30.

Vasiliev, V.V., Morozov E.V., 2013. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structural Elements*. Elsevier, 818 p, USA.



## ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Ordu'da doğdu. Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2007 yılında bitirdi. 2007-2010 yılları arasında Isıtma sistemleri alanında özel sektörde yetkili mühendis olarak çalıştı. 2013 yılından beri Gümüşhane Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Mekatronik Programı'nda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.

