



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT
MALZEMELERİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİNDE
KULLANMAK ÜZERE MALZEME MODELLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

Hüseyin TURSUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran - 2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hüseyin Tursun tarafından hazırlanan “ **Fiber Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanmak Üzere Malzeme Modellerinin Geliştirilmesi** ” adlı tez çalışması **01 / 07 2019** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi M. Turan DEMİRCİ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman Savaş DURDURAN
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 181331003. nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Hüseyin TURSUN

Tarih:12.06.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİNDE KULLANMAK ÜZERE MALZEME MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Hüseyin TURSUN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

2019, 79 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI
Dr. Öğr. Üyesi M. Turan DEMİRCİ

İki boyutlu ortogonal twill dokuma kumaştan oluşan laminatın elastik analizi için iki farklı kumaş modeli sunulmuştur. Bunlar Cam Elyaf Kumaş / Epoksi ve Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi sistemleridir. Bu çalışmada Cam Elyaf Kumaş / Epoksi ile Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi 12 katmanlı olarak, vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelere Çekme Testi, Üç Nokta Eğme Testi ve Düşük Hızlı Darbe Testi yapılmıştır. Bu testlerle üretilen numunelerin farklı davranışları tespit edilmiştir. Sonlu Elemanlar Analizi malzeme özellikleri deney sonuçlarından malzemenin mekanik özelliğini tayin eden Elastikiyet Modülü, Poisson Oranı ve Kayma Modülü Hooke Kanununa göre hesaplanmış ve tek tek tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel değerler ANSYS 19.1 paket programında Sonlu Elemanlar Analizi ile elde edilen nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Üç Nokta Eğme deneyinde elde edilen deneysel sonuçlar ile ANSYS 19.1 programında modellenen Üç Nokta Eğme sistemi deneysel sonuçlara göre maksimum kuvvete karşılık gelen ilerleme miktarı olarak tanımlanarak eğme deneyi simüle edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ağırlık Düşürme Darbe Testi, Çekme Testi, Sonlu Elemanlar Analizi, Üç Nokta Eğme Testi, Malzeme Modelleme, Ortotropik Elastisite

ABSTRACT

MS THESIS

IMPROVEMENT OF RELIABLE MATERIAL MODELS OF FIBER REINFORCED POLIMER TYPE COMPOSITE MATERIALS TO BE USED IN FEA

Hüseyin TURSUN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

2019, 79 Pages

Jury

**Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI
Dr. Öğr. Üyesi M. Turan DEMİRCİ**

Two different fabric models are presented for elastic analysis of laminate consisting of two-dimensional orthogonal twill woven fabric. These are Glass Fiber Fabric / Epoxy and Carbon Fiber Fabric / Epoxy systems. In this study, Glass Fiber Fabric / Epoxy and Carbon Fiber Fabric / Epoxy were produced in 12 layers by the vacuum infusion method. Tensile Test, Three-Point Bending Test, and Low Velocity Impact Test were performed on the composite materials produced. The different behavior of the samples produced by these tests was determined. The obtained experimental values were compared with the numerical results obtained by Finite Element Analysis in ANSYS 19.1 package program. The material properties of the Finite Element Analysis were calculated according to the Elasticity Module, Poisson Ratio, and Shear Module Hooke Law which determined the mechanical property of the material and determined one by one. With the experimental results obtained in the Three-Point Bending experiment and the Three-Point Bending system modeled in ANSYS 19.1 program, the bending experiment was simulated by defining the amount of progression corresponding to the maximum force according to the experimental results.

Keywords: Drop-Weight Impact Test, Tensile Test, Finite Element Analysis, Three-Point Bending Test, Material Modeling, Orthotropic Elasticity

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tez çalışmamda yapılan üretimlerde ve testlerdeki katkılarından ve rehberliğinden dolayı danışman hocam **Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kayırcı**'ya teşekkür eder, öğrencisi olmaktan dolayı duyduğum mutluluğu ifade etmek isterim. Tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen Necmettin Erbakan Üniversitesi SACMF Dekanı **Prof. Dr. Hüseyin Arıkan**'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca her türlü destek ve imkan tanıyan **MPG Makina Prodüksiyon Grubu A.Ş.**'ye teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini üstümden hiç eksik etmeyen annem **Hanife** ve babam **Aşır Tursun**'a, kardeşlerim **Muhammet**, **Ayşe**, **Sümeyye** ve **Zeynep Nisa Tursun**'a her türlü katkı ve desteklerinden dolayı sevgili dostum **Mahmut Arıkan**'a çokça teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Bu çalışma, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Birimi tarafından desteklenen 1813310037'nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Hüseyin TURSUN
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
ÇİZELGELER VE ŞEKİLLER	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Mekanik Özelliklerle İlgili Çalışmalar	3
2.2. Kompozit Malzemelerde Yapılan Deneyler	4
2.3. Kompozitlerde Sonlu Elemanlar Analizi	5
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	10
3.1. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	11
3.1.1. Tüketici Kompozitleri	11
3.1.2. Endüstriyel Kompozitler	12
3.1.3. Gelişmiş Kompozitler	12
3.2. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları.....	13
3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	13
3.4. Dokuma Kumaş Takviyeler	15
3.4.1. Düz Dokuma Kumaş (Plain)	16
3.4.2. Twill Dokuma Kumaş (Twill).....	16
3.4.3. Saten Dokuma Kumaş (Satin).....	16
3.4.4. Sepet Tip Dokuma Kumaş (Basket).....	16
3.4.5. Leno Dokuma Kumaş	17
3.4.6. Taklit Leno Dokuma Kumaş.....	17
3.5. Elyaf Takviye Malzemeleri.....	17

3.5.1. Cam Elyaf	18
3.5.2. Karbon Elyaf	18
3.5.3. Kevlar (Aramid) Elyaf	19
3.6. Polimerik Reçineler.....	19
3.6.1. Polyester Reçineler	21
3.6.2. Vinilester Reçineler.....	21
3.6.3. Epoksi Reçineler	21
3.7. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	22
3.8. Vakum İnfüzyon Prosesi.....	23
4. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ.....	25
4.1. Mekanik Özellik Nedir?.....	25
4.2. Kompozit Laminatlarda Ortotropik Elastik Özelliklerin Hesaplanması..	25
5. KOMPOZİT MALZEMELERDE TEST METODLARI.....	28
5.1. Çekme Testi	28
5.2. Üç Nokta Eğme Testi.....	29
5.3. Ağırlık Düşürme ile Darbe Testi.....	31
6. SONLU ELEMANLAR METODU	32
6.1. Sonlu Elemanlar Analizi	33
6.2. Linear Statik Analiz	33
7. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
7.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri ..	35
7.2. Üretim Süreci Akış Diyagramı	36
7.3. Kompozit Malzeme Üretim Süreci	37
7.4. Numunelerin Boyutlandırılması.....	37
7.5. Deneye Hazırlık	40
7.6. Deney Süreci Akış Diyagramı	40
7.7. Çekme Deneyi.....	41
7.7.1. Çekme Deneyi Deforme Numuneler.....	42
7.8. Üç Nokta Eğme Deneyi	43

7.8.1. Üç Nokta Eğme Deneyi Deforme Numuneler	44
7.9. Düşük Hızlı Darbe Testi	45
7.9.1. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Deforme Numuneler.....	46
7.10. ANSYS Yazılımı İle Sonlu Elemanlar Analizi.....	47
7.10.1. Problem Tanımlama.....	47
7.10.2. Başlangıç Koşulları ve Kabuller	48
7.10.3. Malzeme Tanımlama.....	48
7.10.4. Üç Boyutlu Modellerin Oluşturulması.....	49
7.11. Mesh Oluşturma	49
7.12. Sınır Şartları	50
7.13. Analiz Çözümleme.....	50
7.14. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlar	50
7.14.1. Karbon Elyaf–Epoksi İçin Gerileme ve Birim Şekil Değiştirme....	51
7.14.2. Cam Elyaf–Epoksi İçin Gerileme ve Birim Şekil Değiştirme	52
8. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	54
8.1. Çekme Deneyi Sonuçları	54
8.2. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları	56
8.3. Düşük Hızda Darbe Deneyi Sonuçları	58
8.4. Üç Nokta Eğme Deneysel ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılma .	59
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
10. KAYNAKLAR	63
11. ÖZGEÇMİŞ.....	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

BDM : Bilgisayar Destekli Mühendislik

FRP : Elyaf Takviyeli Polimer

SEM : Sonlu Elemanlar Metodu

SEA : Sonlu Elemanlar Analizi

ASTM : Amerikan Test ve Malzeme Derneği

2D : 2 Boyutlu

3D : 3 Boyutlu

CFRP : Karbon Elyaf Takviyeli Poliester

GFRP : Cam Elyaf Takviyeli Poliester

E : Elastisite Modülü

u : Yer Değiştirme

ϵ : Birim Şekil Değiştirme

σ : Gerilme

VIP: Vakum İnfüzyon Prosesi

ÇİZELGELER VE ŞEKİLLER

Çizelge 3.1. Yaygın olarak kullanılan elyaf özellikleri (Pekbey, 2005)	17
Çizelge 4.1. Kompozit laminatın hesaplanan elastik özellikleri.....	27
Çizelge 7.1. Çalışmada kullanılan malzeme özellikleri	35
Çizelge 7.2. Test standartlarına göre numune boyutları;	38
Çizelge 7.3. Analizde kullanılan malzeme özellikleri	48
Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin kullanım alanları	11
Şekil 3.2. Boeing 787 Dreamliner (Hale, 2014).	12
Şekil 3.3. Kompozitlerin takviye malzemesine göre şematik sınıflandırması	14
Şekil 3.4. Kompozitlerin matris malzemesine göre şematik sınıflandırması.....	14
Şekil 3.5. Dokuma kumaş takviye elemanları ağ görünümleri	15
Şekil 3.6. Cam Elyaf, Karbon Elyaf ve Kevlar Elyafının görünümleri	18
Şekil 3.7. Polimerik Reçine(FiberGlast, 2019).....	20
Şekil 3.8. Takviye ve Matris malzemesine göre üretim yöntemleri	22
Şekil 3.9. Polimer matrisli kompozitler için üretim yöntemlerinin üretim hacmi – ürün performansı karşılaştırması (Daniel & Steven, 2001)	23
Şekil 3.10. Vakum infüzyon yöntemi şematik gösterimi (FiberGlast, 2019)	24
Şekil 4.1. Kumaş takviyeli laminantın temsili görünümü.....	26
Şekil 5.1. Gerilme–Birim şekil değiştirme grafiği.....	28
Şekil 5.2. Üç nokta eğme şematik gösterim.....	30
Şekil 5.3. Ağırlık düşürme darbe testi şematik gösterim	31
Şekil 6.1. Örnek, Bir dişli diş için sonlu elemanlar metodu modeli	32
Şekil 6.2. Örnek, Bir kiriş için yay bağıntısı.....	32
Şekil 7.1. Çekme testi cam elyaf-epoksi test numuneleri	38
Şekil 7.2. Çekme testi karbon elyaf-epoksi test numuneleri.....	38
Şekil 7.3. Eğme Testi Cam Elyaf-Epoksi Test Numuneleri	39
Şekil 7.4. Eğme Testi Karbon Elyaf-Epoksi Test Numuneleri	39
Şekil 7.5. Darbe Testi Cam Elyaf-Epoksi Test Numunesi.....	39
Şekil 7.6. Darbe Testi Karbon Elyaf-Epoksi Test Numunesi	39
Şekil 7.7. Çekme testinden bir görünüm.....	41
Şekil 7.8. Shimadzu AG- IS (100 kN) test cihazı	41

Şekil 7.9. Çekme testi karbon elyaf-epoksi test numuneleri deforme halleri	42
Şekil 7.10. Çekme testi cam elyaf-epoksi test numuneleri deforme halleri.....	42
Şekil 7.11. Üç nokta eğme testi şematik gösterim	43
Şekil 7.12. Üç nokta eğme testinden bir görünüm.....	43
Şekil 7.13. Üç nokta eğme testi karbon elyaf-epoksi test numuneleri deforme..	44
Şekil 7.14. Çekme testi karbon elyaf-epoksi test numuneleri deforme halleri ...	44
Şekil 7.15. PCB Quartz ICP Force Sensor.....	45
Şekil 7.17. Darbe testi cam elyaf-epoksi test numunesi deforme hali	46
Şekil 7.18. Darbe testi karbon elyaf-epoksi test numunesi deforme hali.....	46
Şekil 7.19. Proje Şeması ANSYS 19.1 Workbench.....	47
Şekil 7.20. Problemin Şematik Görünümü	48
Şekil 7.21. Problemin 3D Katı Modeli	49
Şekil 7.22. Sistemin Mesh Oluşturma İşlemi Sonrası Görünümü	49
Şekil 7.23. Proje Ağacı, Bağlantılar ve Sınır Şartları	50
Şekil 7.24. Karbon elyaf/epoksi için von-Mises gerilme sonucu	51
Şekil 7.25. Karbon elyaf/epoksi için şekil değiştirme sonucu	52
Şekil 7.26. Cam elyaf/epoksi için von-Mises gerilme sonucu.....	53
Şekil 7.27. Cam elyaf/epoksi için şekil değiştirme sonucu.....	53
Şekil 8.1. CFRP ve GFRP çekme deney numuneleri için Gerilme.....	54
Şekil 8.2. CFRP ve GFRP numuneler için Gerilme Grafiği	55
Şekil 8.3. CFRP ve GFRP numuneler için Birim Şekil Değiştirme Grafiği.....	55
Şekil 8.4. CFRP ve GFRP üç nokta eğme deney numuneleri için Gerilme.....	56
Şekil 8.5. CFRP ve GFRP üç nokta eğme deney numuneleri için Gerilme.....	57
Şekil 8.6. CFRP ve GFRP üç nokta eğme deney numuneleri için Birim Şekil ..	57
Şekil 8.7. Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi Darbe Deneyi Kuvvet-Zaman Grafiği	58
Şekil 8.8. Cam Elyaf Kumaş / Epoksi Darbe Deneyi Kuvvet-Zaman Grafiği....	58

1. GİRİŞ

Önemini günden güne artıran kompozit malzemeler eski çağlara bakıldığında yapı malzemesi olarak kullanıldığı karşımıza çıkmaktayken 1900'li yıllarda kimyasal bir devrimle günümüzde yaygın olarak kullanılan polyester, vinilester ve epoksi gibi matris fazları keşfedilmiş ve yeniden bilimsel araştırmalara konu olmuştur. 2. Dünya Savaşı sırasında askeri gereksinimlerden dolayı henüz üzerinde bilimsel çalışma yapılmama fırsatı konu olmadan Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) üretilmiştir. Son 50 yıl içerisinde bilimsel araştırmalar eşliğinde farklı sektörlere adapte edilen kompozit malzemeler, yolculuğunu savunma, havacılık ve uzay, deniz, otomotiv ve spor aletleri sektörlerinde sürdürmüş ve sürdürmeye devam etmektedir (Mar-Bal, 2019). Çağın malzemesi olarak nitelendirilen kompozit malzemeler, istenilen mekanik, termal, kimyasal veya elektriksel özelliği güçlendirme esnekliği sağlar. Hafifliğin ve yüksek dayanımların ön planda olduğu havacılık ve uzay sanayinde ve saldırı anında her türlü silah sistemine karşı koruma sağlayabilen zırh teknolojisinin öneme sahip olduğu savunma sanayinde en çok tercih edilen malzemeler arasına girmeyi başarmıştır (Standridge, 2014).

Bilgisayar teknolojisinin yakın geçmişinden bu yana mühendislik alanında problem çözme kabiliyetini artıran Bilgisayar Destekli Mühendislik (BDM) yazılımları, en karmaşık problemleri bile çok kısa sürelerde sonuçlandırılmasına olanak sağlamaktadır. Fiziksel bir problemi matematiksel denklemlerle ifade ederek problemi hesaplanabilir bir forma dönüştürmeyi temel alan Sonlu Elemanlar Metodunun (SEM) çok küçük belirsizliklerle gerçeğe yakın sonuçlar vermesi, problemin başlangıç koşullarını eksiksiz ve gerçeği yansıtır nitelikte tanımlanması ile yakından ilgilidir (Wikipedia, 2019). Fiziksel problemin kapsamında belirlenmesi gereken en önemli başlangıç koşulu ise sistemi oluşturan bileşenlerin malzeme özellikleridir. Geleneksel malzemelerin özelliklerinin SEM yazılımlarına tanımlanması izotropik davranışları nedeniyle oldukça kolaydır. Kompozit malzemeler genellikle ortotropik veya anizotropik davranış sergilemelerinden dolayı malzeme modellerinin oluşturulması oldukça zahmetlidir. Birden fazla farklı özellikte malzemenin bir araya gelerek yeni bir malzeme oluşturduğu durumlarda matris ve takviye malzemelerinin mekanik davranışları kadar üretilen yeni malzemenin de çalışma koşulları dikkate alındığında uygulanan yükler altındaki davranışını mühendislik yaklaşımı ile tahmin edilmesi gerekmektedir. Yapısal

mühendislik problemlerinde sıkça kullanılan SEM ile kompozit malzemelerin statik, dinamik veya termal yüklemeler altında davranışını tespit edebilmek için gerekli parametreler göz önünde bulundurularak düşük bir hata payı ile yakınsanmış malzeme modellerine ihtiyaç duyulmaktadır.

İki boyutlu ortogonal twill dokuma kumaştan oluşan laminantın elastik analizi için iki farklı kumaş modeli sunulmuştur. Bunlar Cam Elyaf Kumaş / Epoksi ve Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi sistemleridir. Bu çalışmada Cam Elyaf Kumaş / Epoksi ile Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi 12 katmanlı olarak, vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelere Çekme Testi, Üç Nokta Eğme Testi ve Darbe Testi yapılmıştır (ASTM D3039/D3039M, 2017), (ASTM D7264/D7264M, 2015), (ASTM D7136/D7136M, 2015). Bu testlerle üretilen numunelerin farklı davranışları tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel değerler ANSYS 19.1 paket programında Sonlu Elemanlar Analizi ile elde edilen nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonlu Elemanlar Analizi malzeme özellikleri deney sonuçlarından malzemenin mekanik özelliğini tayin eden Elastikiyet Modülü, Poisson Oranı ve Kayma Modülü Hook Kanununa göre hesaplanmış ve tek tek tespit edilmiştir. Üç Nokta Eğme deneyinde elde edilen deneysel sonuçlar ile ANSYS 19.1 programında modellenen Üç Nokta Eğme sistemi deneysel sonuçlara göre maksimum kuvvete karşılık gelen ilerleme miktarı olarak tanımlanarak eğme deneyi simüle edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde teorik ve deneysel çalışmalar incelendiğinde kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonunda çekme, basma, eğme ve darbe testlerine, malzeme modellerinin oluşturulması ve sonlu elemanlar analizi ile simülasyon gibi konulara sıklıkla yer verildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar aşağıda paylaşılmıştır.

2.1. Mekanik Özelliklerle İlgili Çalışmalar

Wonderly ve arkadaşları yaptıkları çalışmada karbon elyaf/vinilester kompozit ve cam elyaf vinilester kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırmışlardır. Çalışmada kullandıkları malzemeleri vakum infüzyon yöntemi ile üretmişlerdir. Enine - boyuna çekme ve basma testleri ile çentik ve balistik testler uygulayarak cam elyafı ve karbon elyaf takviyeli vinilester numuneleri deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan bu çalışma sonucu karbon elyaf kullanılan numunelerin çekme ve çentik test sonuçlarına göre üstün mekanik performans sergilediği ancak eşit kalınlıktaki cam fiberin de basma, balistik testler ve yorulma davranışlarında karbona göre daha üstün mekanik özellik gösterdiği gözlemlenmiştir (Cepus, Wonderly, Grenstedt, & Fernlund, 2005).

İsveç'te bir grup araştırmacının 3 boyutlu (3D) yeni bir kumaş dokuma teknolojisiyle üretilen karbon elyaf kumaş ile sıklıkla kullanılan 2 boyutlu (2D) laminalar mekanik özellikleri açısından kıyaslanmıştır. Yapılan bu çalışmada hazırlanan test numuneleri çekme, basma, düzlem dışı kayma ve eğilme testlerine maruz bırakıldıktan sonra sonuçlar incelendiğinde 3D dokuma ile hazırlanmış test numunelerinin geleneksel 2D laminalara göre düzlem içi özellikleri daha düşük fakat düzlem dışı özellikleri daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Stig & Hallström, 2009).

Delik açılmış dokuma cam elyaf takviyeli kompozit bir plakanın numune genişliği/delik çapı oranı ve kenar mesafesi/delik çapı oranının dokuma lamine kompozitlerin dayanma gücü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuç olarak dokuma cam elyaf ile güçlendirilmiş epoksi laminaların pim bağlantılarına sahip nihai yük kapasitelerinin, genişlik ve kenar mesafesi arttıkça arttığını gözlemişlerdir (Okutan & Karakuzu, 2001).

Bireysel zırh malzemesi olarak tasarlanan 4 farklı hibrit kompozit malzemenin balistik performanslarının incelendiği diğer bir çalışmada da farklı dokuma ve yön oryantasyonları ile Cam Elyaf-Aramid Elyaf-Karbon Elyaf takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Balistik testler uygulanan numunelerin performansları değerlendirildiğinde kalınlığı fazla olan Karbon Elyaf(45°)-Aramid Elyaf (Düz Kumaş)-Cam Elyaf(45°) yerine Karbon Elyaf (Twill Kumaş)-Aramid Elyaf (Düz Kumaş)-Cam Elyaf (Twill Kumaş) konfigürasyonlu numunenin daha başarılı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca Twill dokuma yapısına sahip kumaşların balistik direncinin daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır (Yanen & Solmaz, 2016).

Türkmen ve Köksal çalışmalarında, farklı katman sayısına sahip kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. El yatırması ile cam elyaftan ürettikleri kompozit malzemeleri deneysel olarak incelemişler çekme, üç nokta eğme, düşük darbe testine tabi tutmuşlardır. Sonuçları incelediklerinde ise katman kalınlığının artışına paralel olarak mekanik özelliklerinin de iyileştiğini gözlemlemiştir (Türkmen & Köksal, 2013).

2.2. Kompozit Malzemelerde Yapılan Deneyler

Ullah ve Ark. üç nokta eğme nedeniyle deformasyon ve kompozit laminatlardaki hasar davranışının incelendiği bir çalışmada dokuma bir CFRP malzeme için deneysel testler yapılmıştır. Ayrıca Abaqus ile sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Hasar başlama ve büyümenin, birleşik bölge elementlerinin ağ boyutuna duyarlı olduğunu göstermektedir. Alt ve üst katmanlardaki gerilmelerde orta katmanlar arasındaki kayma gerilmelerinin simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. (Ullah, Harland, Lucas, Price, & Silberschmidt, 2012).

Mujika ve Carbajal çalışmalarında; Tek yönlü kompozit tabakaların enine basınç dayanımını üç noktalı eğme ile ölçmek için yeni bir test konfigürasyonu önermişler ve çapraz katlı deney numuneleriyle bunu incelemişlerdir. Farklı kalınlıklara sahip çapraz katlı karbon / epoksi, hasara uğrayana kadar üç noktalı eğme ile test edilmiştir. Enine basma hasar bölgesinin, literatürde bulunan çalışmalarla iyi bir uyum sağladığı bulunmuştur. Çekme gerilmelerinin 90° laminelerde eğilme gerilmelerinden düşük olduğu 0° laminalarda maksimum çekme gerilmelerinin boyuna çekme gerilmelerinden düşük olduğu ancak maksimum çekme gerilmesinin çekme gerilmesine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir (Carbajal & Mujika, 2011).

Öndürücü ve Karacan çalışmalarında; Farklı darbe enerji değerleri ile farklı oryantasyonlar içeren cam elyaf / epoksi kompozitlerin darbe dayanımını deneysel olarak incelemişlerdir. Darbe deneyi için 8 ve 12 katmandan oluşan 150 mm x 100 mm ölçülerinde numuneler oluşturmuşlar ve 10 J, 20 J ve 30 J artan darbe enerjisi değerlerinde teste tabi tutmuşlardır. Elyaf oryantasyonu ve katman kalınlığının darbeye karşı davranışını inceledikleri çalışmalarında artan darbe enerjisine karşın çökme miktarının arttığı, 30J darbe enerjisi için çökmenin en fazla olduğu numunenin [0°/30°/60°/0°] elyaf dizilimine sahip numune olduğunu gözlemlemişlerdir (Öndürücü & Karacan, 2018) .

Esendemir ve Caner çalışmalarında, iki farklı katman kalınlığında 2 mm (8 katmanlı) ve 4 mm (16 katmanlı) olmak üzere cam elyaf / epoksi numuneler oluşturmuşlardır. İki farklı darbe enerjisinde (20 J ve 60 J) vakum infüzyon yöntemiyle hazırlanan numuneleri darbe testine tabi tutmuşlar ve sonuçları incelemişlerdir. 20 J darbe enerjisinde 8 katmanlı numunede delinme hasarı oluşmazken 60 J darbe enerjisinde delinme hasarı gözlenmiştir. 16 katmanlı numunelerde ise iki darbe enerjisi için de delinme hasarı gözlenmemiştir (Esendemir & Caner, 2017) .

2.3. Kompozitlerde Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), fiziksel katıların denge, hareket ve deformasyon problemlerini çözmek için geleneksel test yöntemlerinden daha etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, süreklilik mekaniği teorilerine dayanmaktadır. SEA yöntemlerinin geniş

uygulama alanı nedeniyle, farklı yük tipleri altında lamine kompozitler üzerindeki performansın sayısal analizi ile ilgili çok sayıda araştırma mevcuttur.

Ortasında dairesel bir delik bulunan dokuma karbon fiber kumaştan yapılan katmanlı kompozit plakaların ön bükülme ve burkulma sonrası davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiş ve çalışmalarının sonucunda, doğrusal burkulma sonrası deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu bulunmuştur (Erdem, Kaman, & Gur, 2019).

Enine statik yükleme altında merkezi dairesel delikli dikdörtgen izotropik, ortotropik ve lamine kompozit plakalarda gerilmelerin ve sapmanın dağılımı Sonlu Elemanlar Analiz yaklaşımıyla çözümlenmiştir (Jain & Mittal, 2008).

Meng, Le, Rizvi ve Grove elyaf yerleşiminin etkilerini araştırmak için lamine kompozitler üzerinde bir bükülme simülasyonu geliştirmişlerdir. FEA simülasyonunun sonuçları, çapraz kenarlı laminatta düzlemsel normal gerilmeleri ve serbest kenar bölgesinin yakınındaki açılı laminattaki düzlem içi kayma gerilmesini ortaya çıkardı. Bu enine normal gerilmeler geleneksel laminat teorisinde dikkate alınmamıştır (Meng, Le, Rizvi, & Grove, 2015).

Nunes, Pouzada ve Bernardo, anizotropik polimerik kompozit disklerde karmaşık eğilme yükleme durumlarına dayanarak davranışlarını incelemek için tahribatsız bir bükülme testi gerçekleştirmiştir. Kompozitlerin bükülme davranışının lif oryantasyonu, laminat istifleme, yüzey dalgalanması ve kalıplama sıcaklığı gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğu bulunmuştur. Sonlu elemanlar analizi yapmak için AIGOR kullanılmış ve deneysel ve simüle edilmiş bükülme sertliği değerleri arasında % 13'e kadar fark bulunmuştur (Nunes, Pouzada, & Bernardo, 2002).

Düşük hızlı darbe etkisi, lamine kompozitin davranışını anlamak için de önemli bir husustur. Düşme ağırlığı etkisi testi Farooq ve Myler tarafından 2014 ve 2016'da ABAQUS kullanılarak simüle edildi. Simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla çok küçük farklarla uyum sağladığını delik bölgedeki burkulma hasarı büyüdüğünden gerilmelerin belli bir oranda sabit kaldığı ancak hasar büyüdükçe gerilmelerin ani düştüğünü gözlemlemişlerdir (Farooq & Myler, 2015).

Pim bağlantılı tabakalı kompozit plakalarda fiber açısının hasar yüklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada 0° ile 90° açı arasında 15° lik açı artımıyla fiber yönelimine sahip numuneler seçilmiş sayısal ve deneysel olarak korelasyon yapılmıştır. Çalışmada deneysel ve sayısal olarak eksenel çekme yükü uygulanmıştır. Elyaf olarak karbon ve reçine olarak ise epoksi kullanılan bu çalışma Ansys APDL sonlu elemanlar analiz yazılımında sayısal olarak modellenmiştir. En büyük deneysel hasar yükü 749,91 N ile $[15^\circ]$ açı oryantasyonunda ve en düşük hasar ise 467,48 N ile de $[60^\circ]$ açı oryantasyonunda elde edilmiştir. Yapılan korelasyon çalışmasında sayısal çalışmanın deneysel çalışma göre uyumlu olduğu görülmüştür (Turan & Onur, 2010).

Çiçek ve Demirsoy, çalışmalarında dokuma kumaş cam elyaf takviyeli epoksi tabakalı zincir taşıyıcı pim bağlantı noktasının çeşitli yükler altındaki gerilme değerini deneysel olarak ve nümerik olarak da ANSYS paket programıyla incelemişlerdir. Karşılaştırma sonucunda deneysel ve nümerik sonuçlar birbirini destekler nitelikte olduğunu bulmuş ve taşıyıcı parçanın tasarımında yardımcı olabilecek gerilme değerleri elde edilmiştir (Çiçek & Demirsoy, 2005).

Arriaga ve ark. çalışmalarında iki farklı kompozit malzemenin kuvvet - yer değiştirme davranışını deneysel ve sayısal olarak ANSYS sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Sayısal çözümle deneysel çözüm birbirine yakın sonuçlar vermiştir. (Arriaga vd., 2007).

Gül M., dikdörtgen kompozit plakların sonlu elemanlar yöntemiyle statik analizi yaptığı çalışmasında bor / epoksi, cam / epoksi ve grafit / epoksi için farklı sınır şartlarında farklı yükler uygulanarak, plakalar boyunca oluşan gerilme, birim şekil değiştirme ve deformasyon analizlerini sonlu elemanlar tabanlı ANSYS 12 programı yardımıyla modellenerek statik analiz yapılmıştır. En az gerilme değerinin bor/epoksi malzemesi olduğunu tespit etmiştir (Gül, 2011).

Döküm karbon epoksi plaklarda ve millerde moment etkisini çekme kuvveti altında deneysel olarak inceledikleri bir çalışmada Kapti, Sayman ve ark. Tsai-Vu kabullerini kullanmışlardır. Analizleri aynı zamanda sonlu elemanlar metoduyla da çözüp, sayısal ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır (Kapti, Sayman, Ozen, & Benli, 2010).

Görücü yaptığı çalışmasında boğumlarla güçlendirilmiş kompozit boruların boğumlar arası mesafe ve filament sarma açısı parametrelerine göre farklı numuneler oluşturmuş ve eğilme davranışını dört nokta eğme testi ile incelemiştir. Aynı zamanda Abaqus sonlu elemanlar analizi paket programı ile de problemi modellemiştir. Simülasyon sonuçları deneylerle de karşılaştırılmış yapılan modelin verimliliği ortaya konmuştur. Sonuçlar güçlendirme boğumlarının lokalizasyonunda yapılan azaltımda ve borunun eğilme dayanımında belirgin bir artış olduğunu gözlemiştir. (Görücü, 2011).

Özben ve Arslan, fiberle güçlendirdiği termoplastik matrisli ve dikdörtgen deliğe sahip çelik kompozit plakayı sonlu elemanlar metodu kullanarak elastik gerilme, kalıcı deformasyon ve plastik şekil değiştirmeyi incelemişlerdir. Simetrik ve simetrik olmayan farklı katmanlı plakaları inceledikleri çalışmalarında plakaya yerleştirilmiş dikdörtgen deliğin etrafında gerilme ve şekil değiştirmenin maksimum olduğunu gözlemiştirlerdir (Özben & Arslan, 2010).

Reddy [18], Enine kayma birim şekil değiştirmeleri, dönmeleri ve atalet momentlerini dikkate alarak sonlu elemanlar metodu ile nonlinear dinamik analizi yaptığı plakada şekil değiştirme, gerilme ve eğilme momentlerinin değişimini farklı sınır değerlerinde ve yükleme durumunda incelemiştir (Reddy, 2008).

Belinha ve arkadaşı Galerkin formülasyonunu temel alarak anizotropik kompozit plakaların analizi yapmış ve Reissner- Mindlin plak teorisince şekil değiştirme ve birim şekil değiştirme denklemlerini bulmuştur. Bulduğu lineer olmayan bu denklem sistemlerini Newton-Rapson metoduyla çözmüşlerdir. Yapmış oldukları çözüm yöntemini sonlu elemanlar metodu ile de karşılaştırmışlardır. Galerkin formülasyonunda hesaplama maliyeti çok yüksek ve sınır şartlarının tanımlanması karmaşık olmasına rağmen etki alanı seçimi ve ağırlık işlevinin seçimi diğer yöntemlere göre daha hassastır.

Buna rağmen örnekler Galerkin formülasyonunun elasto-plastik gerilme analizleri için alternatif bir yöntem olduğunu göstermektedir (Belinha & Dinis, 2007).

Aagaah ve arkadaşları, yükler altında kompozit plakaların deformasyon davranışını incelemişler ve oluşan deformasyonları üçüncü dereceden kayma deformasyon teorisini kullanarak çözmüşlerdir. Sonlu elemanlar metodu ile de gerilme şekil değiştirme davranışlarını inceleyip sonuçları karşılaştırmışlardır (Rastgaar Aagaah, Mahinfalah, & Nakhaie Jazar, 2003).

Sayman, Özbay ve Akbulut çalışmalarında, simetrik ve simetrik olmayan plakaların elasto-plastik gerilme analizini yapmışlardır. Çalışmalarında sonlu elemanlar metodu kullanarak çok sayıda iterasyonla çözüm yapmışlardır (Sayman, Özbay, & Akbulut, 2001).

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, her bir kurucu malzemenin kompozit içindeki benzersiz kimliğini koruduğu ve kendi yapısal özelliklerine katkıda bulunduğu iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle elde edilen kompozit, bileşenlerinininkine kıyasla daha üstün özellikler elde edilir. Günlük yaşamımızda en çok bulunan kompozit malzemelerden biri betondur. Beton belirli miktarda kum ve agregadan yapılır. Uygulamaya bağlı olarak her malzemenin cinsi ve miktarı değiştirilerek betonun özellikleri ayarlanabilir.

Kompozitlerde kurucu malzemeler takviye ve matris olarak sınıflandırılır. Bu iki bileşen, kompozit malzemelerin malzeme özelliklerine farklı katkılarda bulunur. Matris, yükü elyaftan elyafa aktararak elyafın bağlanmasına yardımcı olur. Ayrıca, bu elyafları nem, kimyasal etki, aşınma ve darbe gibi çevresel etkilerin neden olduğu bozulmalardan da korur. Matris malzemesinin seçimi, kompozit malzemelerin tabakalar arası ve düzlem içi kesme kuvvetleri gibi kayma özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Öte yandan, donatı, yükü taşımaya yardımcı olur. Kullanılan donatı tipi, seçilen form ve donatı oryantasyon düzenlemesi, kompozit malzemelerin performansı üzerinde güçlü etkilere sahiptir. Karbon elyaf, cam elyaf ve aramid elyaf, elyaf takviyeli kompozitlerde en yaygın kullanılan takviye malzemeleridir.

Yüksek performansı nedeniyle, kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır ve zaman geçtikçe genişlemesi beklenmektedir. Fizik, kimya ve bilgisayar bilimi gibi farklı alanlarda kompozit malzemeler üzerinde yapılan önemli araştırmalar vardır. Ne yazık ki, uzun elyaflardan ve matrislerden yapılan kompozit malzemeler tamamen farklı mekanik özellikler ve farklı yönlerde harika anizotropik sergiler. Kompozit malzemelerin farklı yük tipleri altındaki mekanik davranışları, izotropik materyallerden daha karmaşıktır. Kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını daha iyi anlamak ve aynı zamanda kompozit malzemelerin tasarımını gerçekleştirmek için kapsamlı seçici bir çalışma gerekmektedir.

3.1. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler, nakliye, inşaat, korozyon direnci, denizcilik, altyapı, tüketici ürünleri, elektrik, havacılık, beyaz eşya ve iş ekipmanı gibi pazarlardaki yeni uygulamaların büyümesini tetiklemiştir. Kompozitler, üç geniş kategoriye giren binlerce ürünü üretmek için kullanılır. Bunlar; Tüketici Kompozitler, Endüstriyel Kompozitler ve Gelişmiş Kompozitlerdir.



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin kullanım alanları

3.1.1. Tüketici Kompozitleri

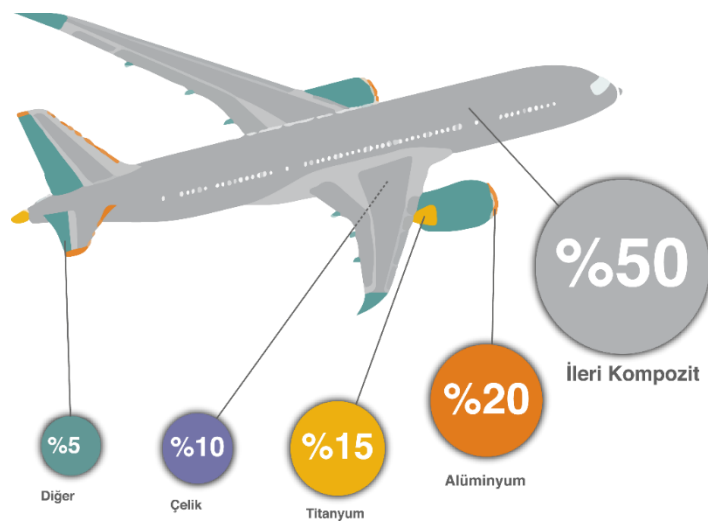
Kompozit endüstrisi, 1950'lerden bu yana tüketici ürünleri üretmektedir. Tipik olarak, tüketici kompozitleri, tekneler, eğlence araçları, banyo armatürleri ve spor malzemeleri gibi ürünleri içerir. Çoğu durumda, kozmetik kaplama kalıp içi bir kaplamadır. Tüketici ürünleri, kompozit piyasasının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. (CompositeLab, 2016).

3.1.2. Endüstriyel Kompozitler

Kompozitler, korozyon direnci ve performansın (olumsuz ortamlarda) kritik olduğu endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Genel olarak, korozyon direnci özelliklerini karşılamak için izofoalik veya vinilester gibi süper reçineler gerekir. Gerekli olan kimyasal direnç özelliklerine bağlı olarak başka özel reçineler de kullanılabilir. Cam elyaf hemen hemen her zaman takviye lifi olarak kullanılır. Endüstriyel kompozit ürünler arasında yeraltı depolama tankları, yıkayıcılar, borular, davlumbazlar, su arıtma bileşenleri ve basınçlı kaplar bulunur (CompositeLab, 2016).

3.1.3. Gelişmiş Kompozitler

Kompozit endüstrisinin bu sektörü, yüksek performanslı reçine sistemlerinin kullanımı ve yüksek mukavemetli, ultra sert elyaf takviyeli kullanımıyla karakterize edilir. Askeri ve ticari uçaklar dahil olmak üzere havacılık endüstrisi, ileri kompozitler için ana müşteridir. Gizli uçaklar ve İnsansız Hava Araçları (İHA), kompozitlerin radar şeffaflığından yararlanmaktadır. Patlama ve balistik koruma için de gelişmiş kompozitler kullanılır. Ek olarak, daha hafif ve daha güçlü hale getirmek için spor ekipmanlarında kullanılmak üzere uyarlanmıştır. Gelişmiş kompozitlerde çok sayıda egzotik reçineler ve lifler kullanılır. Ancak epoksi reçinesi ile aramid veya karbon lifleri en yaygın olanıdır (CompositeLab, 2016).



Şekil 3.2. Boeing 787 Dreamliner (Hale, 2014).

3.2. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Makro boyutta birleştirilen ve birbiri içerisinde çözünmeyen iki ya da daha fazla bileşen içeren malzemelere kompozit malzeme denir. Matris bileşeninin üstün özelliklerinden dolayı bileşenlerden daha iyi özelliklere sahip malzeme oluşturmak esastır. Makro ölçekli gözlemlendiğinde çoğunlukla ayırt edilebilen bir malzeme olmaları geleneksel malzemelerden ayrılan en temel özellikleridir. İki veya daha fazla malzemelerden oluşan alaşımlar homojen bir karışıma sahiplerken bu durum kompozit malzemelerde fiziksel ve kimyasal açıdan heterojendir.

Geleneksel malzemelere göre öne çıkan özelliklerini sıralayacak olursak;

- Korozyon dayanımı
- Düşük yoğunluk
- Düşük ısı iletkenlik
- Yorulma direnci
- Değişen termal iletkenlik
- Mukavemet
- Ses yalıtımı
- Kompleks geometrilerde bütünleşik üretim

Her ne kadar birçok açıdan avantajlı olsalar da bazı yönleriyle kompozit malzemeler dezavantajlıdır. Bunları sıralayacak olursak;

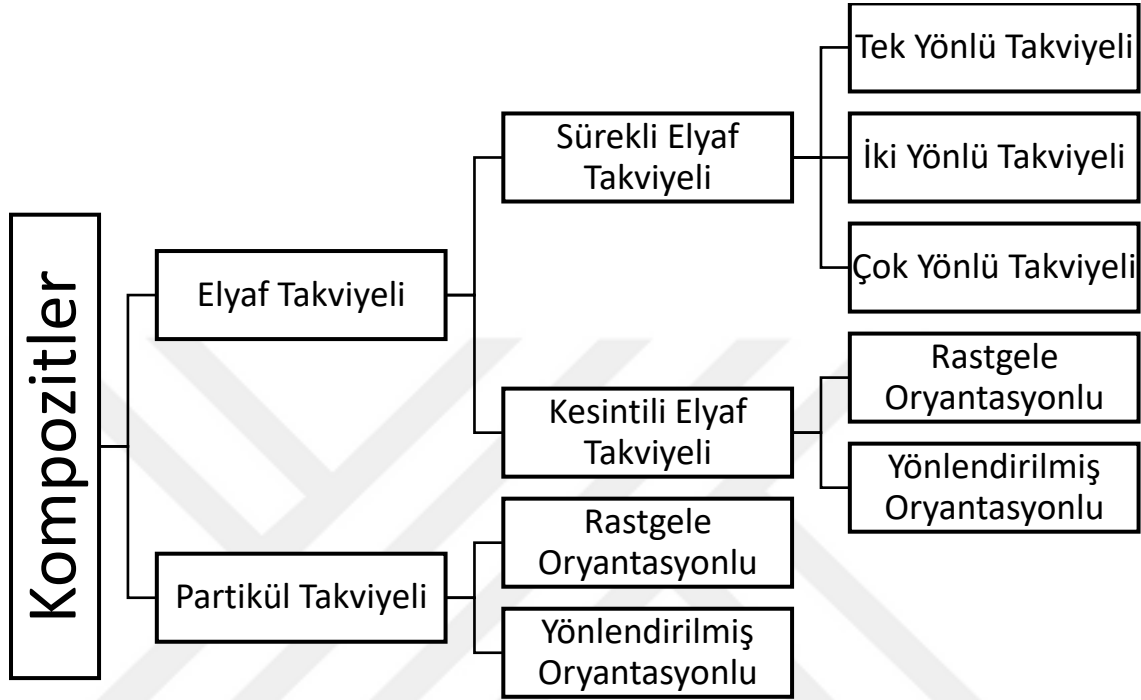
- Yüksek maliyetli ham maddeye sahip olmaları
- Üretim zorluğu
- Talaşlı imalat yöntemi açısından güç işlenebilmeleri
- Konvansiyonel malzemelere gibi geri dönüşüme sahip olmamaları
- Güç onarım problemi

3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

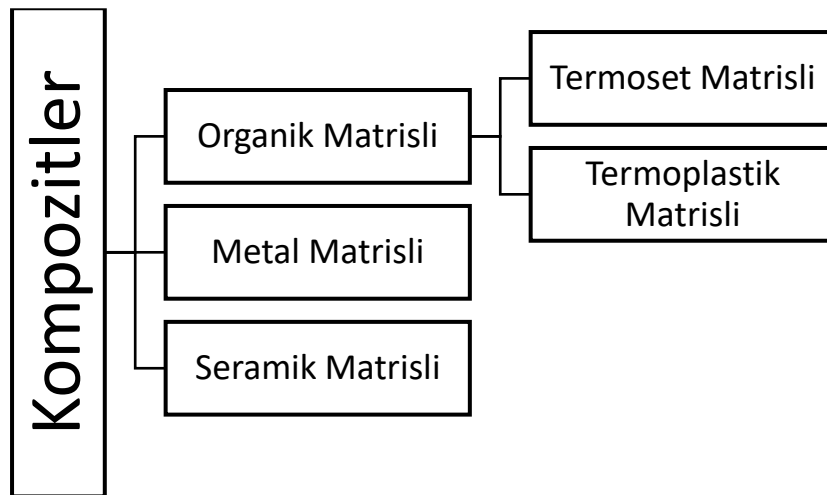
Neredeyse bir asırdır üzerinde çalışılan kompozit malzemelerin gün geçtikçe bilimsel çalışmalar eşliğinde yeni yönleri keşfedilmektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin sınırları zamanla değişmekte ve farklı biçimlerde kategorize edilmektedir. Sınıflandırma

takviye elemanına, takviye tipine, matris malzemesine veya takviye elemanının miktarına göre sınıflandırılabilirler.

En genel haliyle takviye ve matris malzemesine göre sınıflandırmak mümkündür.



Şekil 3.3. Kompozitlerin takviye malzemesine göre şematik sınıflandırması

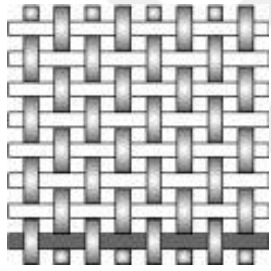


Şekil 3.4. Kompozitlerin matris malzemesine göre şematik sınıflandırması

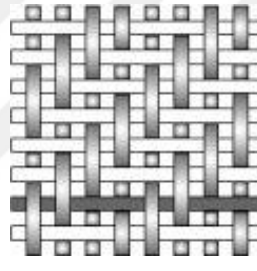
3.4. Dokuma Kumaş Takviyeler

Elyaf takviye elemanlarını dokuma teknolojisi kullanılarak kumaşlar elde edilerek oluşturulan yapılardır. Cam, karbon ve aramid ile oluşturulan kumaş takviye elemanları en çok kullanılanlar arasındadır. İki ve üç boyutlu dokuma kumaşlar olarak iki ana başlıkta toplamak mümkündür. Bu çalışmada cam ve karbon elyaflardan oluşan kabartma çizgili kumaşlar (twill) kullanılmıştır. Birden fazla fiber oryantasyonuna ihtiyaç duyulan uygulamalarda 0° - 90° elyaf oryantasyonlu kumaş uygun olacaktır.

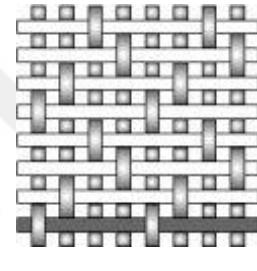
Dokuma kumaşlar çözgü ve atkı elyaflarının birbiriyle düzenli bir uyum içerisinde dizilimiyle oluşur. Kumaş mekanik kenetlenmeyi ve bütünlüğü sağlar. Aşağıda en yaygın kullanılan dokuma stilleri genel özellikleriyle birlikte açıklanmıştır (NetComposites, 2019).



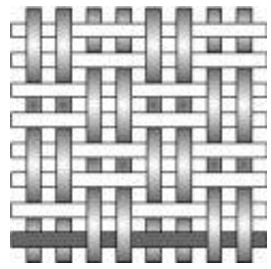
Düz Dokuma Kumaş



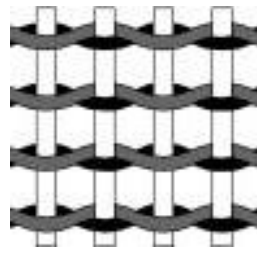
Twill Kumaş



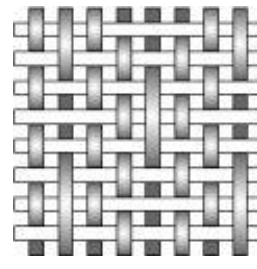
Saten Dokuma Kumaş



Sepet Tip Dokuma Kumaş



Leno Dokuma Kumaş



Taklit Leno Dokuma Kumaş

Şekil 3.5. Dokuma kumaş takviye elemanları ağ görünümleri (NetComposites, 2019)

3.4.1. Düz Dokuma Kumaş (Plain)

Her çözgü lifi dönüşümlü olarak her atkı lifi altından ve üstünden geçer. Bu durum da en zor dokuma şekline sahip olmasına neden olur. Kumaş, iyi bir stabilite ve makul gözeneklilik ile simetrikdir. Bununla birlikte, yüksek elyaf kıvrım seviyesi diğer dokuma stillerine kıyasla nispeten düşük mekanik özellikler verir (NetComposites, 2019).

3.4.2. Twill Dokuma Kumaş (Twill)

Bir veya daha fazla çözgü elyafı, düzenli olarak tekrarlanan bir şekilde iki veya daha fazla atkı elyafının üstünden ve altından geçirilerek örülür. Düz veya çapraz yönelimli olarak kumaşa görsellik verir. Daha az kıvrılmasından dolayı hem pürüzsüz bir yüzeye sahip olması hem de yüksek mekanik özelliklere sahip olmasını sağlar (NetComposites, 2019).

3.4.3. Saten Dokuma Kumaş (Satin)

Saten dokuma kumaşlar temel olarak çözgü ve atkıların daha az kesişecek şekilde twill kumaş (twill) dokumalarının farklı bir versiyonudur. Saten örgüler çok yassıdır, çok sıkı dokunabilmektedirler. Düşük kıvrım iyi mekanik özellikler verir. Bir yüzünde çoğunlukla çözgü yönünde elyaf bulundururken diğer yüzünde ise atkı yönünde elyaf bulundururlar. Asimetrik olmaları nedeniyle kumaşın iki yüzünde de farklı davranış sergilerler (NetComposites, 2019).

3.4.4. Sepet Tip Dokuma Kumaş (Basket)

Sepet tip dokuma temel olarak düz dokuma ile aynıdır, ancak iki veya daha fazla çözgü elyafının dönüşümlü olarak iki veya daha fazla atkı elyafıyla birleşmesi gerekir. İki atkı geçen iki çözgüden oluşan bir düzenleme 2x2 sepet olarak belirtilmiştir. Elyaf düzeninin simetrik olmasına gerek yoktur. Sepet örgüsü düz ve az kıvrımlıdır düz dokuma kumaşa göre daha güçlüdür, ancak stabilitesi daha düşüktür (NetComposites, 2019).

3.4.5. Leno Dokuma Kumaş

Leno dokuma, düşük elyaf sayımı olan 'açık' kumaşlarda stabiliteyi artırır. İçinde bitişik çözgü elyaflarının, her bir atkıyı etkin bir şekilde 'kilitleyen' bir sarmal çifti oluşturmak üzere ardışık atkı elyafları etrafında büküldüğü bir düz dokuma biçimidir. Leno dokumadaki kumaşlar normal olarak diğer dokuma stilleriyle birlikte kullanılır, çünkü eğer tek başlarına kullanılırsa açıklıkları nedeniyle etkili bir bileşen üretemezler (NetComposites, 2019).

3.4.6. Taklit Leno Dokuma Kumaş

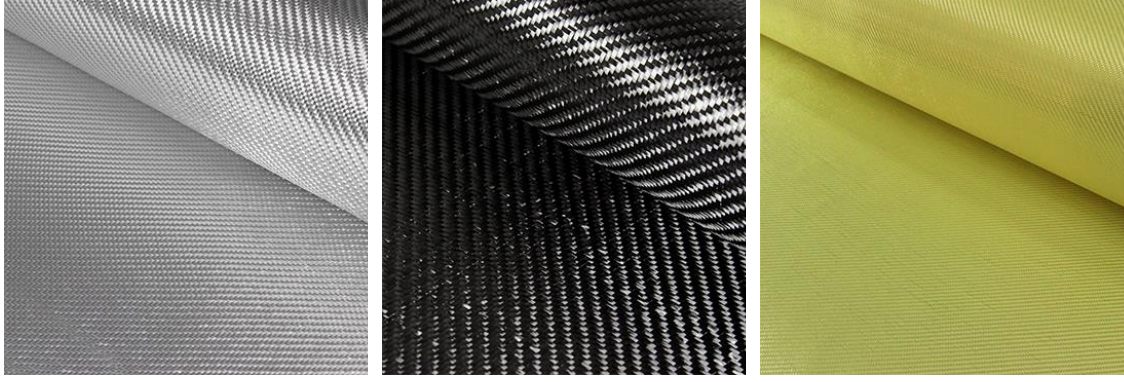
Düzenli aralıklarla fakat genellikle birkaç elyafın birbirinden ayrıldığı, ara sıra çözgü elyaflarının alternatif alttan geçmeli birbirinden saptığı ve bunun yerine her iki veya daha fazla elyafın birbirine geçtiği düz bir dokuma kombinasyonudur. Bu, atkı yönünde benzer sıklıkta olur. Kalınlığı, pürüzlü yüzeyi ve ek gözenekliliği arttırılmış bir kumaştır (NetComposites, 2019).

3.5. Elyaf Takviye Malzemeleri

Kompozit malzemeleri oluşturan bileşenlerden ana bileşen hükmünde olan elyaf takviye elemanları mekanik dayanımı artıran bir etkiye sahiplerdir. Reçinelere göre hacimsel olarak daha fazla yer işgal ederler. Kompozit malzemelerin karakteristiklerini (çekme, yorulma dayanımı, özgül ağırlığı, elektriksel ve termal iletkenlik vs.) doğrudan etkilemesiyle yüksek öneme sahiptirler. En yaygın elyaf malzemelerin bazı mekanik davranışları Çizelge 3.1'de verilmiştir (Pekbey, 2005).

Çizelge 3.1. Yaygın olarak kullanılan elyaf özellikleri (Pekbey, 2005)

Elyaf Tipi	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama (%)
E-glass	2,54	72,4	3450	4,8
S-glass	2,49	86,9	4300	5,0
Carbon	1,86	380	2700	0,7
Aramid (Kevlar-49)	1,45	131	3620	2,8
Boron	2,7	393	3100	0,8



a. Cam Elyaf

b. Karbon Elyaf

c. Kevlar Elyaf

Şekil 3.6. Cam Elyaf, Karbon Elyaf ve Kevlar Elyafın görünümleri (FiberGlast, 2019)

3.5.1. Cam Elyaf

Cam elyaf kompozit endüstrisinin temel malzemesidir. 1950'lerden bu yana birçok kompozit uygulamasında kullanılmıştır ve fiziksel özellikleri oldukça iyi anlaşılmıştır.

Cam elyaf hafiftir, orta derecede gerilme ve basınç dayanımı vardır ve hem hasara hem de döngüsel yüklenmeye karşı dayanıklıdır, ayrıca kullanımı kolaydır.

Cam elyaf, mevcut herhangi bir kompozit malzemeden en yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu temel olarak göreceli düşük maliyeti ve ılımlı fiziksel özellikleri nedeniyle.

Cam elyafın mukavemet özelliklerini en üst düzeye çıkarmak için, bir epoksi reçinesiyle kullanılmalıdır ve standart laminasyon teknikleri kullanılarak sertleştirilebilir (özel aletler veya yöntemler gerekmez). Otomobil, denizcilik ve havacılık endüstrisindeki uygulamalar için idealdir ve genellikle spor malzemeleri için kullanılır (FiberGlast, 2019).

3.5.2. Karbon Elyaf

Karbon elyaflar % 95'e kadar karbon içerir ve Elyaf Takviyeli Plastik endüstrisinde en yüksek çekme dayanımı sağlar. Bu, her iki ucu da kopana kadar çekmek için gereken güçtür. Aslında, endüstrideki en büyük basınç dayanımı ve bükülme veya eğilme dayanımına sahiptirler. Bu takviyeler, endüstrideki en yüksek mukavemet ve sertliği sağlar (diğer genel takviyelerden ve hatta çoğu geleneksel yapı malzemesinden

daha fazla). Karbon elyaf ayrıca arzu edilen şık, siyah kozmetik ürünleri sunar. Karbon elyaf genellikle diğer takviyelerden daha pahalıdır.

Karbonun mukavemet özelliklerini en üst düzeye çıkarmak için, bir epoksi reçinesiyle kullanılmalıdır ve standart laminasyon teknikleri kullanılarak sertleştirilebilir (özel aletler veya yöntemler gerekmez). Otomobil, denizcilik ve havacılık endüstrisindeki uygulamalar için idealdir ve genellikle spor malzemeleri için kullanılır (FiberGlast, 2019).

3.5.3. Kevlar (Aramid) Elyaf

Kevlar, Elyaf Takviyeli Plastik endüstrisinde kabul gören ilk yüksek mukavemetli sentetik elyaflardan biriydi. Kevlar hafiftir, mükemmel bir çekme mukavemeti vardır ve darbelere ve aşınmaya karşı oldukça dayanıklıdır. Yaygın uygulamalar arasında kayaklar ve kanolar gibi hafif tekne gövdeleri, uçak gövde panelleri ve basınçlı kaplar bulunur. Kevlar bir epoksi veya vinilester reçinesi ile kullanılmalıdır.

Kevları kesmek, zımparalamak ve işlemek zor olabilir ve basınç dayanımı gerektiren uygulamalar için uygun değildir.

Kevlari kesmek için ayrı bir makas çifti kullanın çünkü cam kumaşlar Kevlardan farklı bir kesim açısında makas kullanır. Hem cam hem de karbon kesmek için aynı makas çifti kullanılabilir (FiberGlast, 2019).

3.6. Polimerik Reçineler

Kompozit malzemeleri oluşturan matris malzemeler reçinelerdir. Termoplastik ve termoset olarak iki grupta değerlendirilirler. Termoplastik reçineler Van Der Waals bağı ile bağlanan moleküler hidrokarbonlardan oluşurlar. Bu bağlar, kovalent bağlara göre zayıf oldukları için termoplastikler kolaylıkla eriyebilmektedirler. Bunların yanı sıra sıcaklığın artmasıyla termoplastik reçinelerin viskoziteleri azalabilmektedir. Bu sebeple termoplastikler ısıtıldıklarında tekrar şekil verilebilirler.

Termosetlerde moleküller uzun hidrokarbon zincirlerinden oluşurlar ve kovalent bağ ile bağlıdır. Bu bağ yapısı termosetler ile termoplastikleri birbirlerinden ayıran en

önemli özellikleridir. Termosetler üç boyutlu özel katı yapıya sahip olup, termoplastiklere oranla daha dayanıklı, daha az sünek, daha rijit davranış gösterirler (Eskizeybek, 2012).

Epoksi termoset bir polimer olup Epoksid Monomerinin Poliamid sertleştiricilerle reaksiyonu ile meydana gelir. Epoksiler elyaf katkılı kompozit üretmenin yanında genel olarak kaplama ve yapıştırıcı olarak da kullanılabilir. Epoksi diğer polimerlerden farklı olarak, yüksek mekanik özelliklere ve çevresel etkilere karşı yüksek dirence sahiptirler. Epoksi reçinelerin çoğu güçlü kimyasala karşı dirençli ve çeşitli yüzeylere kolaylıkla bağlanabilmesinden dolayı önemli bir yapıştırıcı sınıfına girerler. Epoksi reçineler vakum infüzyon yöntemi kullanılarak kompozit malzeme üretim hacminde en çok tercih edilen reçine türüdür. Ek olarak, epoksi reçineler kurlenme sırasında düşük bir büzülme eğilimi gösterdiklerinden iç gerilme oluşumu düşük olmaktadır (Eskizeybek, 2012).



Şekil 3.7. Polimerik Reçine(FiberGlast, 2019)

3.6.1. Polyester Reçineler

Kompozit endüstrisinde en yaygın kullanılan reçine türüdür. Polyester reçineleri, tipik olarak metil etil keton peroksidi (MEKP) sertleştirmek için bir katalizör gerektirir.). Doğal olarak UV ışınlarına dayanıklıdır, genellikle kullanımı kolay, hızlı sertleşen, sıcaklığa dayanıklı ve katalizör varyasyonlarına tolerans gösterirler ve epoksi sistemlerinden daha ucuzdurlar. Polyester reçinenin kullanımı kolay olduğu için yüksek tiksotropik endekse sahiptir, temel olarak dikey yüzeylere yapışarak iyi bir iş çıkarırlar, böylece reçine parçalar ve kalıplar hazırlarken sıyrılmaz. Ayrıca kumaşları hızlı ve kolay bir şekilde ıslatırlar ve karıştırması kolaydır. Endüstrideki en yaygın reçine tipi olduğundan, yaygın kullanımların bir listesini daraltmak zor olabilir. Bununla birlikte, denizcilik endüstrisinde kullanılan, tekne gövdeleri ve diğer uygulamalar için kullanılan polyester reçineler, genel parça üretimi, otomotiv uygulamaları ve düşük maliyetli kalıplar için kullanılır. (FiberGlast, 2019b)

3.6.2. Vinilester Reçineler

Vinilester reçineleri genellikle polyester reçineler ve epoksi reçineler arasında olarak kabul edilir. Polyester reçineleri gibi, MEKP de sertleşmek için bir katalizör gerektirirler. Vinilester fiyatı, en çok fiziksel özellikleri ve kullanım özellikleri üzerinde polyester ve epoksi arasına düşer. Vinilester reçineleri aslında korozyon direnci, sıcaklık direnci ve tokluk açısından hem polyester hem de epoksi'yi aşmaktadır. Bu nedenle, tipik olarak yüksek dayanıklılık, termal stabilite ve aşırı yüksek korozyon direnci gerektiğinde kullanılırlar. Bu uygulamalar genellikle kimyasal depolama tankları inşa etmeyi ve onarmayı içerir. Giderek artan bir şekilde denizcilik endüstrisi, cam elyaf tekne gövdelerini üretmek ve onarmak için vinilesterlerin bu özellikleri kullanılmaktadır. Vinilester tekne gövdeleri, polyester reçineler kullanıldığında yaygın olarak görülen kabarma ve ozmotik problemlere karşı neredeyse geçirimsiz hale gelir (FiberGlast, 2019).

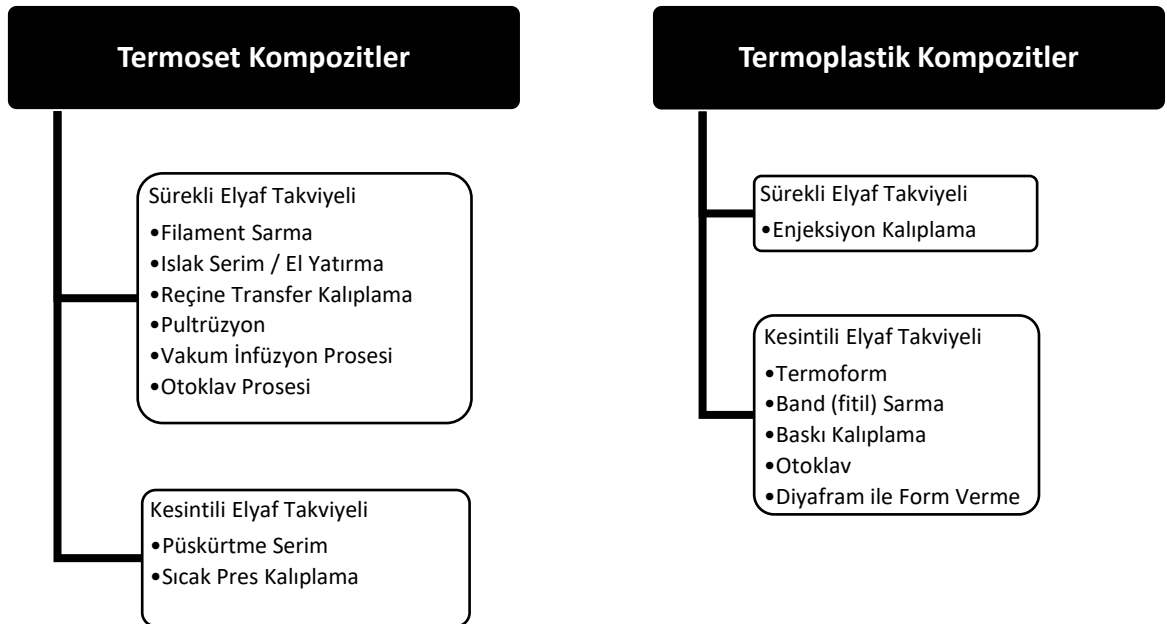
3.6.3. Epoksi Reçineler

Kompozit endüstrisinde yaygın olarak kullanılan üç reçine tipinden epoksi, en yüksek mukavemet özellikleri sunar. Epoksiler Polyester ve Vinilesterden farklıdır, çünkü sertleşmek için bir katalizör yerine sertleştirici gerektirirler.

Bu nedenle, epoksilere bazen çeşitli sertleştirici seçenekleri sunulur. Epoksi reçineleri de oldukça uzun raf ömrüne sahiptir. Epoksi reçineler, takviye kumaşları ile en güçlü bağı sunar ve mükemmel mukavemet özellikleri, en dayanıklı kalıpların yanı sıra en düşük ağırlıkta parçalarda kullanılmalara izin verir. Epoksi reçinesi, mükemmel mekanik mukavemeti ve sunduğu boyutsal stabilitenin yanı sıra düşük büzölmeli iyi kimyasal ve ısı direnci için seçilmiştir. Epoksi genellikle havacılık, yarış, askeri ve savunma uygulamalarında kullanılır (FiberGlast, 2019).

3.7. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

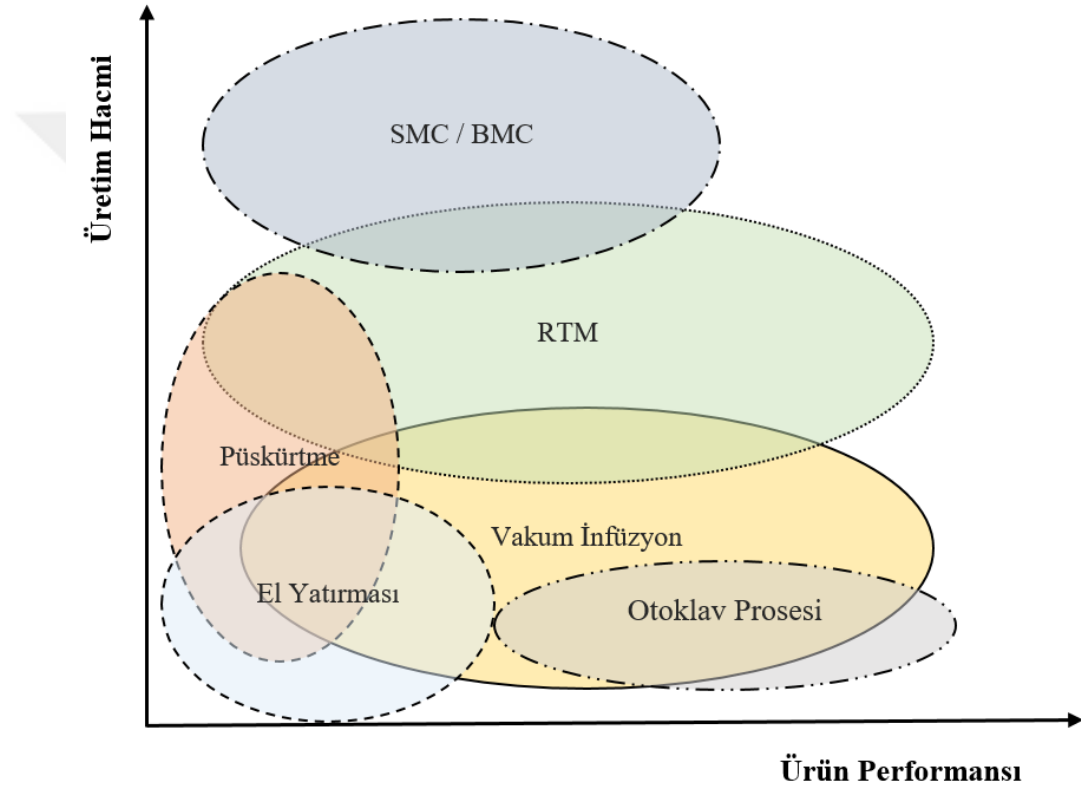
Kompozit malzemeler bir ya da daha fazla bileşenin bir araya gelmesiyle oluşan malzemelerdir. Bu birleşme işlemi takviye ve matris malzemesine göre üretim yöntemi açısından değişkenlik göstermektedir. Kullanılan elyaf, elyafın oryantasyonu, matris malzemesi olarak dahil edilen reçineler ve katmanlı sistemlerdeki katman sayısı gibi birçok değişkene bağlı olan kompozit malzemelerde aynı özelliklere sahip malzemeler üretmek oldukça zordur. Aynı takviye ve matris malzemesine, takviye malzeme oryantasyonuna ve katman sayısına sahip kompozit malzemeler farklı üretim metodları ile oluşturulduklarında özelliklerinde büyük farklılıklar gözlemlenmektedir. Şekil 3.8’de takviye ve matrise göre üretim metodları verilmiştir (İnce, 2014).



Şekil 3.8. Takviye ve Matris malzemesine göre üretim yöntemleri

Her üretim yöntemiyle performansı değişkenlik gösteren sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretim yöntemi seçilirken kullanılacağı yere ve amacına göre seçim yapılması istenilen malzemeyi oluşturan bileşenleri verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır.

Bu nedenle üretim yöntemine karar vermeden önce üretilecek parçanın miktarı ve boyutsal büyüklüğü, hammadde seçimi ve maliyet gibi önemli parametreler fazlasıyla birbiri ile ilişkili olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 3.9. Polimer matrisli kompozitler için üretim yöntemlerinin üretim hacmi – ürün performansı karşılaştırması (Daniel & Steven, 2001)

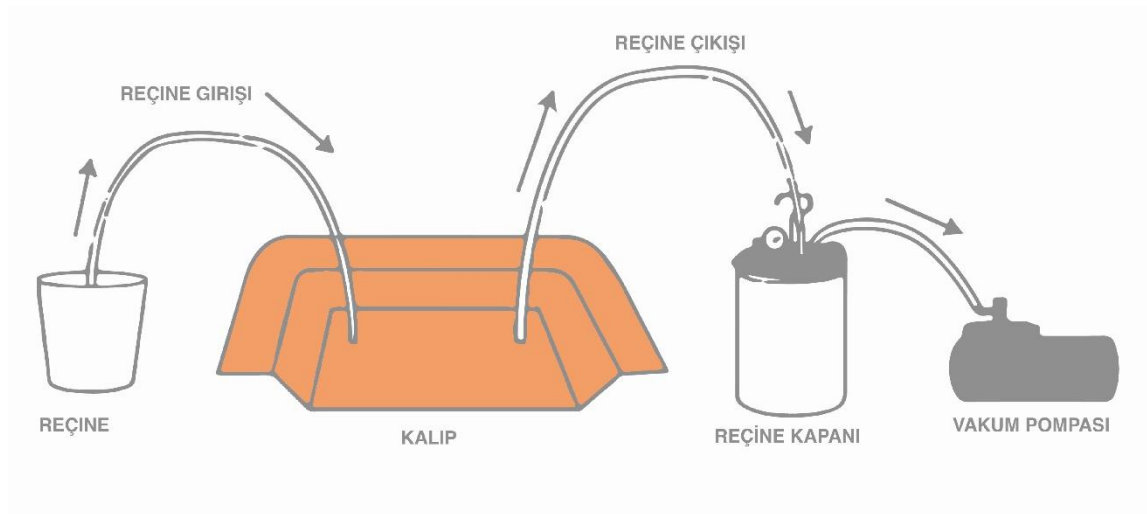
Bu çalışmada sürekli elyaf takviyeli termoset polimer kompozitler için en yaygın kullanılan üretim yöntemlerinden biri olan vakum infüzyon tercih edilmiştir.

3.8. Vakum İnfüzyon Prosesi

Vakum İnfüzyon Prosesi (VIP), yüksek kaliteli kompozit parçalar yapmak için uygun maliyetli bir prosestir.

VIP'in avantajları arasında yüksek kalite, daha iyi tutarlılık, daha yüksek elyaf içeriği (daha yüksek spesifik güç ve sertlik), iyi iç yüzey, daha hızlı döngü süresi ve daha düşük maliyet sayılabilir.

Vakumlu İnfüzyon Prosesi (VIP) reçineyi laminatın içine akıtmak için vakum kullanır. İlk adım, kumaş elyaflarını ve çekirdek malzemelerini kalıba yüklemek. Ayrıca kaburgalar, ek parçalar ve başka herhangi bir bileşen eklenebilir ve bu reçine olmadan yapılır. Daha sonra kuru malzeme bir vakum torbası veya bir karşı kalıp kullanılarak kapatılır. Boşluktaki havanın tümünü çıkarmak ve elyaf ve çekirdek malzemelerini birleştirmek için yüksek vakum pompası (-0,85 bar) kullanılır. Yine vakum altında reçine, kumaş elyaflarını ve çekirdeği ıslatmak için kalıp boşluğuna alınır. Vakum infüzyon işlemi kavram olarak çok basittir; bununla birlikte, ayrıntılı planlama ve işlem tasarımı gerektirir, böylece parçalarda kuru lekeler kalmayacak şekilde makul bir sürede işlem devam etmelidir. İnfüzyon hızı reçinenin viskozitesine, reçinenin akması gereken mesafeye, ortamın geçirgenliği ve vakum miktarına bağlıdır. Bu nedenle, malzeme seçimi, akış ortamı, reçine akış düzeni ve vakum bağlantı noktalarının konumu iyi parçaların yapımında kritik öneme sahiptir. Vakum infüzyon işleminin avantajı, çok yüksek lif içeriğine sahip bir laminat (ağırlıkça% 70'e kadar) oluşturmak, böylece asgari ağırlıkta çok yüksek mukavemet ve sert bir parça oluşturmaktır. Vakum İnfüzyonu aynı zamanda birçok lif ve çekirdek malzemeden oluşan karmaşık laminat için verimli bir üretim prosesidir. Böylece minimum ağırlıkta çok yüksek mukavemetli ve sert bir parça oluşur. (PerformanceCompositesInc, 2019).



Şekil 3.10. Vakum infüzyon yöntemi şematik gösterimi (FiberGlast, 2019)

4. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ

4.1. Mekanik Özellik Nedir?

Bir malzemenin mekanik özellikleri fiziksel kuvvetlere nasıl tepki vereceğini açıklar. Mekanik özellikler, her malzemeye özgü fiziksel özelliklerin bir sonucu olarak ortaya çıkar ve bir dizi standart mekanik test ile belirlenir.

Malzemelerin statik yükler altındaki davranışlarını tespit etmek için uygulanan testleri şu şekilde sıralayabiliriz;

- Çekme Testi
- Basma Testi
- Eğme Testi
- Darbe Testi
- Sertlik Testi

İzotropik malzeme her yönde aynı özelliklere sahiptir. Bir noktada sonsuz sayıda simetrik malzeme özelliği içerirler. Öte yandan, anizotropik malzeme, her yönde farklı özelliklere sahiptir. Dolayısıyla, simetrik malzeme özellik düzlemi yoktur (Mallick, 2007).

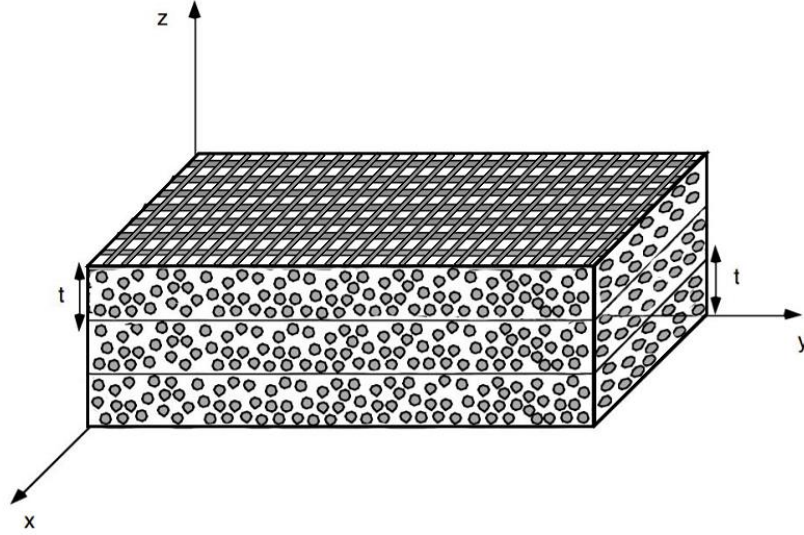
Elyaf takviyeli kompozitler genellikle üç yönde malzeme özellik simetrisi düzlemine sahiptir ve ortotropik malzemeler olarak sınıflandırılır.

4.2. Kompozit Laminatlarda Ortotropik Elastik Özelliklerin Hesaplanması

İzotropik malzemelerin elastik gerilme-şekil değiştirme özellikleri üç elastik sabit ile tanımlanmaktadır: Young elastikiyet modülü E , Poisson oranı ν ve kayma modülü, G .

İzotropik malzemeleri karakterize etmek için gereken bağımsız elastik sabitler iki tanedir. Bunlar; E ve ν .

Ortotropik malzemeler için bu sabitler dokuz tanedir. Bunlar; $E_x, E_y, E_z, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}$ ve ν_{yz} .



Şekil 4.1. Kumaş takviyeli laminantın temsili görünümü

Kumaş elyaflı kompozitler ortotropik malzeme sınıfına girerler. Lif yönleri x ve y ve kalınlık yönünü ise z olarak düşünelim. Elastik özelliklerin x ve y yönünde eşit olduğu varsayılabilir.

Elastisite modüllerinin hesaplanması;

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x}, E_y = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y}, E_z = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} \quad \text{Denklem 4.1}$$

Burada kumaş takviye malzemesi kullanıldığından dolayı $E_x = E_y$ ve $E_z = E_m$ olur. Burada E_m matrisin elastikiyet modülüdür.

Possion oranlarının hesaplanması;

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}, \nu_{yz} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_y}, \nu_{zy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}, \nu_{yz} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_y}, \nu_{zx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}, \nu_{xz} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x}$$

$$\text{Denklem 4.2}$$

Kayma modüllerinin hesaplanması;

$$G_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}}, \quad G_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{\gamma_{xz}}, \quad G_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{\gamma_{yz}} \quad \text{Denklem 4.3}$$

Ortotropik özelliklerin matris olarak gösterimi;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\nu_{xy}}{E_x} & \frac{-\nu_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & \frac{-\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{zx}}{E_z} & \frac{-\nu_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

Denklem 4.4

Bu denklemlerden yola çıkarak üretilen malzemelerin ortotropik elastik özellikleri hesaplanmış ve Çizelge 4.1. de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kompozit laminatın hesaplanan elastik özellikleri

Malzeme	[g/m ³]	V _f [%]	E _x = E _y [GPa]	E _z [GPa]	ν _{xz} = ν _{yz}	ν _{xy}	G _{xy} [GPa]	G _{xz} =G _{yz} [GPa]
Cam Kumaş / Epoksi	300	25	17,9	3,5	0,35	0,2	3,7	1,3
Karbon Kumaş / Epoksi	245	29,2	35,6	3,5	0,35	0,1	4,7	1,3

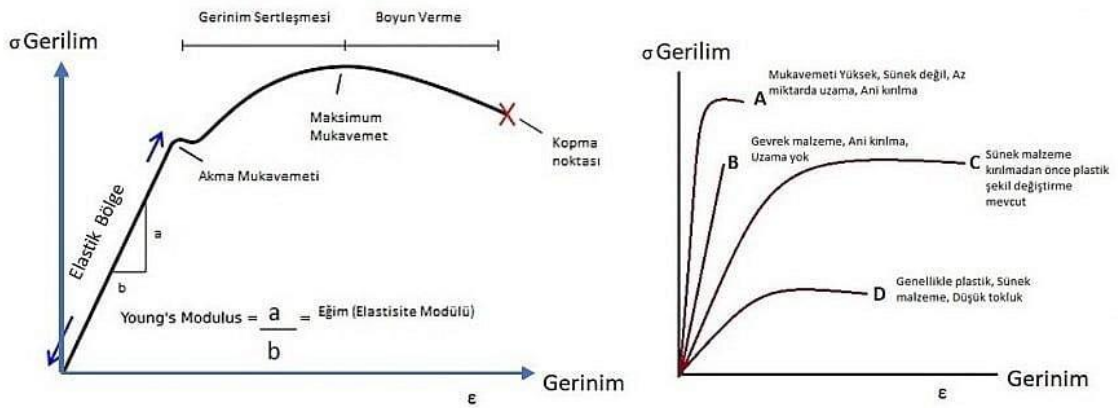
5. KOMPOZİT MALZEMELERDE TEST METODLARI

Kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını tespit etmek için bazı testler uygulanmaktadır. Bunun amacı üretilen yeni kompozit malzemenin istenilen davranışı sergileyip sergilemediğidir. Beklenen isterleri karşılayıncaya kadar malzemede iyileştirmeler yapılır ve test edilir. Bu bağlamda kalınlık, takviye / matris malzeme oranları ve oryantasyonları değiştirilerek yapılabilir.

Kompozit malzemelere uygulanan testler; çekme testi, üç nokta eğme testi, darbe testi gibi sıralamak mümkündür.

5.1. Çekme Testi

Çekme testi, malzemelerin elastik ve plastik davranışlarını belirlemek için sabit yük altında yapılır. Bu sebeple standartlara uygun ölçülerle kesilerek boyutlandırılmış deney numunesi çekme cihazına bağlanarak eksen yönünde uygulanacak şekilde kuvvete tabi tutulur. Birbirine göre dikey ekseninde zıt hareket eden üstte ve altta olmak üzere iki çeneden oluşan çekme cihazı temelde kuvvet ve ilerlemeyi kayıt altına alan bir yapıya sahiptir (ASTM D3039/D3039M, 2017).



Şekil 5.1. Gerilme–Birim şekil değiştirme grafiği

Şekil 5.1.'de çekme testi sonrasında kuvvet-uzama verilerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiği gösterilmiştir. Grafikte belirtilen elastik bölgede kuvvet ortadan kalkınca meydana gelen uzama da sıfırlanır. Bu durum akma noktasına kadar devam eder. Akma noktasından sonraki kısım ise plastik bölge olarak adlandırılır. Bu bölgede kalıcı

deformasyonlar meydana geldiği için kuvvet ortadan kalktığıında malzeme elastik bölgede olduğu gibi eski halini almaz. Gerilme birim şekil değiştirme grafiğinde malzemelerin özelliklerine göre gözlemlediğimiz akma noktası gevrekliği yüksek malzemelerde oluşmaz. Bu durumda grafikte yaklaşık lineer bir davranış gözlemleriz. Mukavemet bilgileri kullanarak, üç noktalı eğilme deneyi için gerekli hesaplamalar Denklem 5.1 ve Denklem 5.2 de verilen formülasyonlarla hesaplanır.

$$\sigma = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{Denklem 5.1}$$

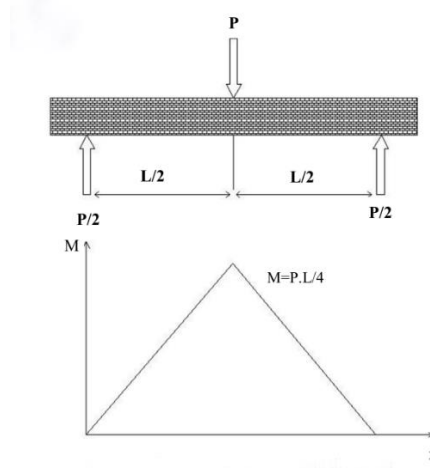
σ : Çekme dayanımı
 P_{max} : Uygulanan yük
A: Kesit alanı

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Denklem 5.2}$$

ε : Çekme dayanımı
 ΔL : Uygulanan yük
L: Kesit alanı

5.2. Üç Nokta Eğme Testi

Eğilme testlerinde en yaygın kullanılan deney yöntemi üç nokta eğme testidir. Bu deneyin temeli kiriş olarak kabul edilen malzeme ideal moment durumuna göre oluşan kayma gerilmesinin normal gerilmeye göre ihmal edilebilir olması istenmektedir. Bundan dolayı sabit kesit alana sahip olması ve uzunluk genişlik oranının en az 16 kat veya daha büyük olması istenmektedir (ASTM D7264/D7264M, 2015). Test için standartlarda belirtilen ölçülerde hazırlanan numuneler destekler üzerine konumlandırılır ve tam ortasından kuvvet uygulanır. Şematik gösterimi Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Üç nokta eğme şematik gösterim

Deneyde P kuvveti sürekli artırılır ve numune ortasında meydana gelen uzama değeri ölçülür. Bu işlem zamana bağlı gerçekleştiği için her kuvvet değerine tekabül eden bir uzama değeri vardır. Bu değerler yardımı ile deney sonucunda numunenin eğilmeye karşı direncinin göstergesi niteliğinde olan kuvvet uzama grafiği elde edilir. Ölçüm, malzeme için en yüksek moment ve uzamanın olduğu orta noktaya göre yapılır.

Mukavemet bilgileri kullanarak, üç noktalı eğilme deneyi için gerekli hesaplamalar Denklem 5.3 ve Denklem 5.4’de verilen formülasyonlarla hesaplanır.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad \text{Denklem 5.3}$$

σ : Gerinim

P : Uygulanan yük

L: Destek aralığı

b: Numune genişliği

h : Numune kalınlığı

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad \text{Denklem 5.4}$$

ε : Gerinim

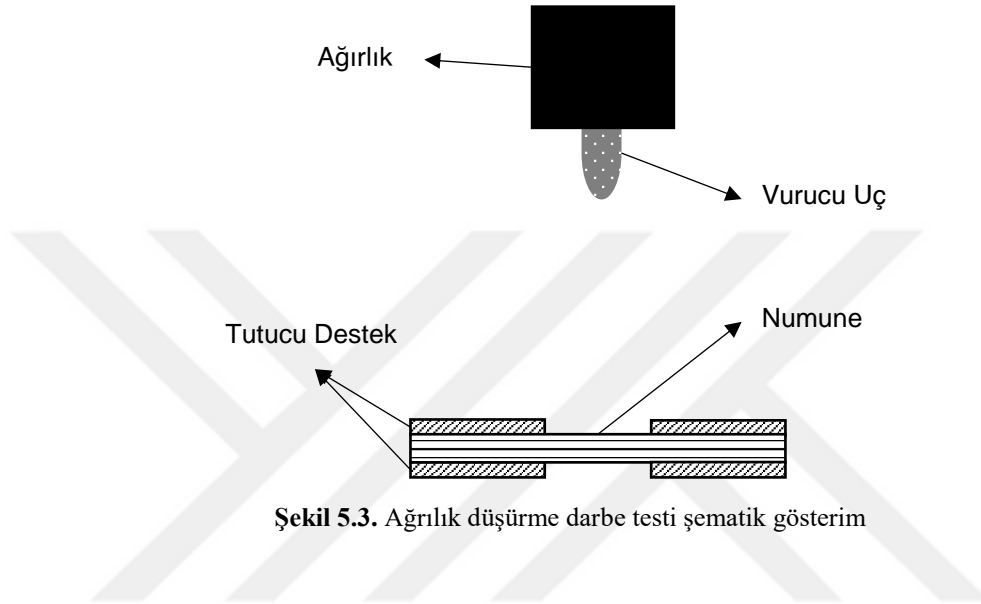
δ : Çökme miktarı

L: Span genişliği

h : Numune kalınlığı

5.3. Ağırlık Düşürme ile Darbe Testi

Yatay düzlemde sabitlenmiş bir numuneye düşey ekseninde belirli bir potansiyel kazandırılarak serbest bırakılmasıyla vurucu darbe ucu ile hasarlar oluşturularak numunenin enerji absorbe kapasitesi ölçülür. Düzeneğin şematik gösterimi aşağıda verilmiştir.

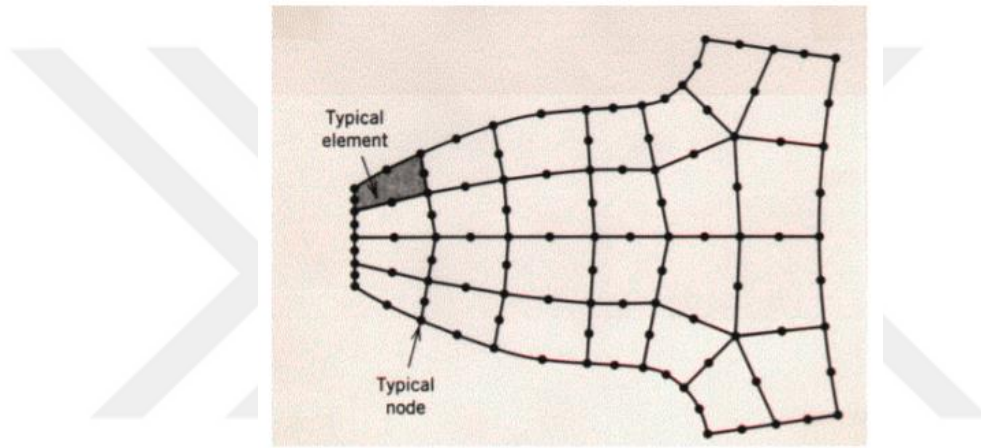


Şekil 5.3. Ağırlık düşürme darbe testi şematik gösterim

Numunenin deformasyonuna uğramasına izin verilmez, artık enerjinin bir kısmı ise geri döner. Vurucu ucun anlık çarpma hızı hareket denklemleri ya da algılayıcı sensör teknolojisiyle ölçülebilir. Sistem genel itibari ile zamana göre kuvvet detaylarını sunacak şekilde tasarlanır. Temelde potansiyel enerji kazandırılan vurucu uç zamana göre enerji dağılımını ölçebilecek yer değiştirme dönüştürücüsüne sahiptir. Ağırlık düşürme darbe testi ile daha karmaşık geometrilerin ve karmaşık malzeme sistemlerinin kolayca test edilebilmesi diğer darbe testlerine göre avantaj sağlamaktadır. Yarı küresel, düz veya sivri uç geometrisine sahip vurucu uç kullanılmaktadır. (ASTM D7136/D7136M, 2015)

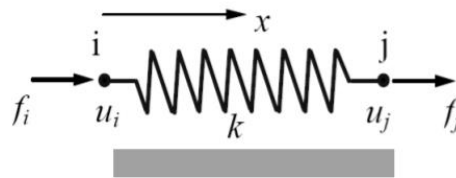
6. SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu Elemanlar Metodunu kimin bulduğunu tespit etmek, tekerleği kimin icat ettiğini bulmak kadar zordur. Günümüz dünyasında mühendisler fiziksel problemleri çözmek için problemin matematiksel modeline ihtiyaç duyarlar. Matematiksel model el hesabıyla kolayca hesaplanan denklemlerden oluştuğu gibi hesaplanması uzun süre alan karmaşık problemlerin denklem takımlarından da oluşabilir. Karmaşık problemleri hızlı çözüme kabiliyeti sunan sonlu elemanlar metodu problemi alt problemlere ayırarak çözüme ulaşılmasını hedefleyen bir yaklaşıma sahiptir (O. C. Zienkiewicz, 1995).



Şekil 6.1. Örnek, Bir dişli dişi için sonlu elemanlar metodu modeli

Problemi en iyi tanımlayacak şekilde sistem küçük parçalara ayrılır. (Şekil 6.1.) Her bir alt modele sisteme etki eden kuvvetler veya etkiler yansıtılır. Oluşan her bir alt sisteme ait diferansiyel denklemler çözülür ve sistemin davranışı simüle edilir.



Şekil 6.2. Örnek, Bir kiriş için yay bağlantısı

Şekilde görülen yay bağlantısı bir kirişi modellemek için kullanılabilir. Burada i noktası kirişin baş kısmını, j noktası ise son kısmını göstermek ile birlikte, k değeri ise sertlik kavramını yansıtmaktadır (Liu, 2003).

Burada kuvvet yer değiştirme ilişkisi denklemdedir. rnek olarak;

$$F = k \cdot \Delta u$$

F : kuvvet

$\Delta u = u_i - u_j$: yer değiştirme

$$f_i = -F = -k (u_j - u_i) = k \cdot u_i - k \cdot u_j$$

$$f_j = F = k (u_j - u_i) = - k \cdot u_i + k \cdot u_j$$

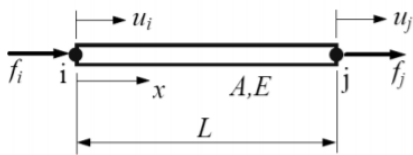
6.1. Sonlu Elemanlar Analizi

Kompozit malzemelerin her bir katmanı için sonlu elemanlar analiziyle gerilme-birim Şekil değiştirme değerlerini hesaplayarak değerlendirmek paket programlarla mümkündür.

İzotropik yapıya sahip tabakalı kompozitlerin analizi lineer davranış sergilediklerinden dolayı çok kısa sürelerde sonuç alınabilmektedir. Yapı ortotropik bir bileşime sahip olduğunda nonlineer davranış sergilediğinde analiz süresi sistemin birçok iterasyon ile çözüme kavuşmasından dolayı uzun zaman alabilmektedir. İztropik bir malzeme için mekanik özelliklerin en temel göstergeleri olan Elastikiyet Modülü (E), Poisson Oranı (ν) , Yoğunluk (ρ) , ekme Gerilmesi (σ) gibi değerlerin tanımlanması gerekir. Ortotropik malzeme için ise her eksen için farklı değerler tanımlanması gerekir.

6.2. Linear Statik Analiz

Basit bir kiriş eleman düşünelim.



L : Uzunluk

A : Kesit alanı

E: Elastisite modülü

u: Yer Değişirme

ε: Birim şekil değiştirme

σ: Gerilme

Mekanik biliminde birim şekil değiştirme ile yer değiştirme arasında bu şekilde bir bağlantı olduğu bilinir.

$$\varepsilon = \frac{du}{dx}$$

Bir A kesitindeki normal gerilme bağıntısı;

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Denklemler düzenlenirse;

$$F = \sigma A = E\varepsilon A = \frac{EA}{L} \Delta = k\Delta$$

K burada Sonlu Eleman Metodunda sertlik matrisi olarak konumlandırılır. Görüleceği üzere; malzemenin Elastikiyet Modülü (*E*) , Kesit Alanı (*A*) ve Uzunluğuna (*L*) bağlıdır.

7. MATERYAL VE YÖNTEM

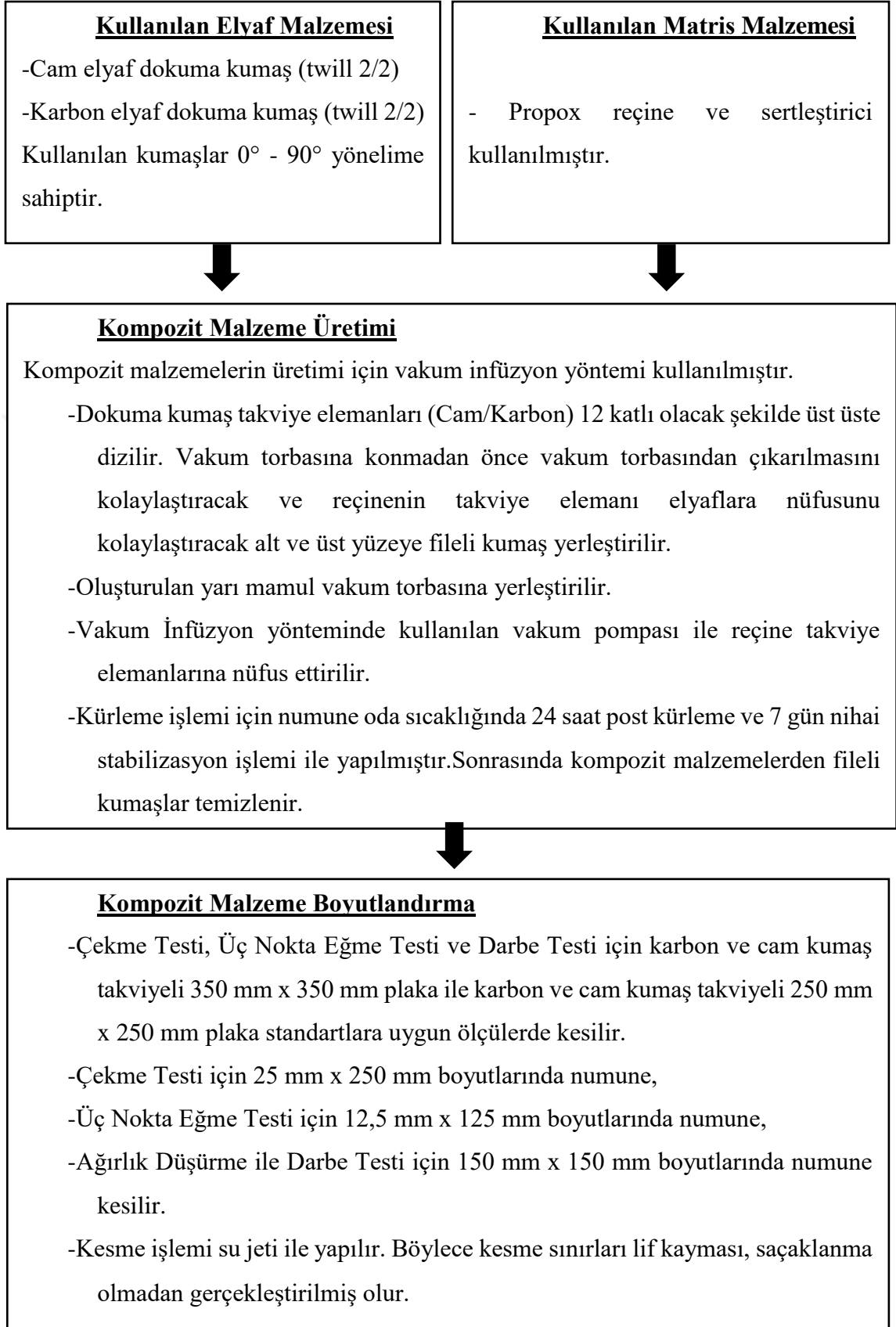
Çalışmada cam ve karbon elyaf twill kumaş takviyeli epoksi üretimi yapılmıştır. Bu çalışmada en çok kabul gören ve üretim hacmi – ürün performansı değerlendirmelerinde geniş bir yere sahip olan vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Üretilen kompozit malzemeler çekme, eğme ve darba testlerine tabi tutulmaları için ASTM standartlarına uygun ölçülerde numuneler oluşturulmuştur. Numune kesme işlemi su jeti yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Çekme testi için cam ve karbon olmak üzere 10 deney numunesi, eğme testi için cam ve karbon olmak üzere 10 deney numunesi ve darbe testi için cam ve karbon olmak üzere 4 deney numunesi hazırlanmıştır. Aşamalar akış diyagramında açık bir şekilde anlatılmıştır.

7.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Çizelge 7.1. Çalışmada kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme	Özellikler	Değer	Açıklama
Propox Reçine	Yoğunluk	1,05 - 1,15 g/cm ³	
	Eğilme Gerilmesi	100 MPa	
	Elastikiyet Modülü	3,2 - 3,5 GPa	
	Çekme Gerilmesi	70 MPa	
	Basma Gerilmesi	100 MPa	
	Parlama Noktası	180° C	
Karbon Elyaf	Çözücü	7,0 iplik/cm	Dokuma Kumaş Karbon Elyaf 245 gr/m ² TWILL 2/2
	Atkı	7,0 iplik/cm	
	Atkı-Çözücü Oranı	% 50 / % 50	
	Oryantasyon	0° - 90°	
Cam Elyaf	Çözücü	7,0 iplik/cm	Dokuma Kumaş Cam Elyaf 300 gr/m ² TWILL 2/2
	Atkı	7,0 iplik/cm	
	Atkı-Çözücü Oranı	% 50 / % 50	
	Oryantasyon	0° - 90°	

7.2. Üretim Süreci Akış Diyagramı



7.3. Kompozit Malzeme Üretim Süreci

Kompozit malzemelerin üretiminde vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. $0^{\circ}/90^{\circ}$ yönlü- iki eksenli cam ve karbon twill dokuma kumaşlar kullanılmıştır. 350 x 350 x 3 mm boyutlarında ve 250 x 250 x 3 mm boyutlarında 12 katmanlı olarak ikişer adet plaka üretilmiştir. Üretim sürecinde cam elyaf dokuma kumaş twill $0^{\circ}/90^{\circ}$ yönelimli ile karbon elyaf dokuma kumaş twill $0^{\circ}/90^{\circ}$ takviye elemanı olarak, Propox epoxy reçine kullanılmıştır.

Dokuma kumaş takviye elemanları (Cam/Karbon) 12 katlı olacak şekilde üst üste dizilir. Vakum torbasına konmadan önce vakum torbasından çıkarılmasını kolaylaştıracak ve reçinenin takviye elemanı elyaflara nüfusunu kolaylaştıracak alt ve üst yüzeye fileli kumaş yerleştirilir. Oluşturulan yarı mamul vakum torbasına yerleştirilir. Vakum İnfüzyon yönteminde kullanılan vakum pompası ile reçine takviye elemanlarına nüfus ettirilir. Kütleme işlemi için numune oda sıcaklığında 24 saat post kütleme ve 7 gün nihai stabilizasyon işlemi ile yapılmıştır. Sonrasında kompozit malzemelerden fileli kumaşlar temizlenir.

Üretilen cam elyaf/epoksi ve karbon/epoksi kompozit plakanın mekanik özellikleri bulunmuştur. İlk olarak kompozit plakaların imalatından önce elyaf malzemesi olarak kullanılan cam ve karbon elyaflar tartılmıştır. Matris malzemesinin ağırlığı, imalatı yapılan kompozit plakanın toplam ağırlığından elyaf malzemesinin ağırlığı çıkartılarak hesaplanmıştır.

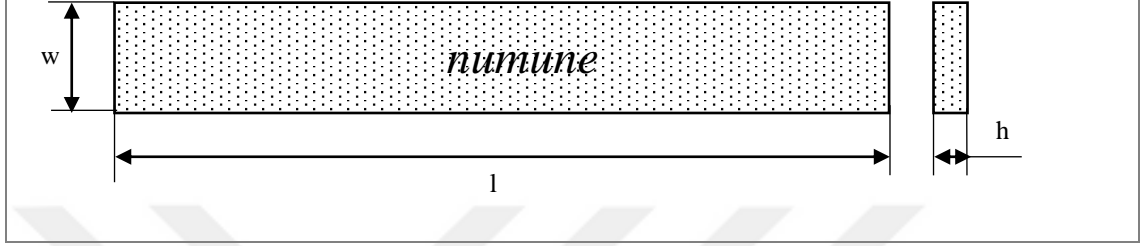
7.4. Numunelerin Boyutlandırılması

Çekme Testi, Üç Nokta Eğme Testi ve Darbe Testi için karbon ve cam kumaş takviyeli 350 mm x 350 mm plaka ile karbon ve cam kumaş takviyeli 250 mm x 250 mm plaka standartlara uygun ölçülerde kesilmiştir. Çekme Testi için 25 mm x 250 mm boyutlarında, Üç Nokta Eğme Testi için 12,5 mm x 125 mm boyutlarında, Ağırlık Düşürme ile Darbe Testi için 150 mm x 150 mm boyutlarında kesim işlemi yapılmıştır. Kesme işlemi Mustafa Yıldırım Lazer Metal ve Makine San. ve Tic. Ltd. Şti.'nde su jeti ile yapılmıştır.

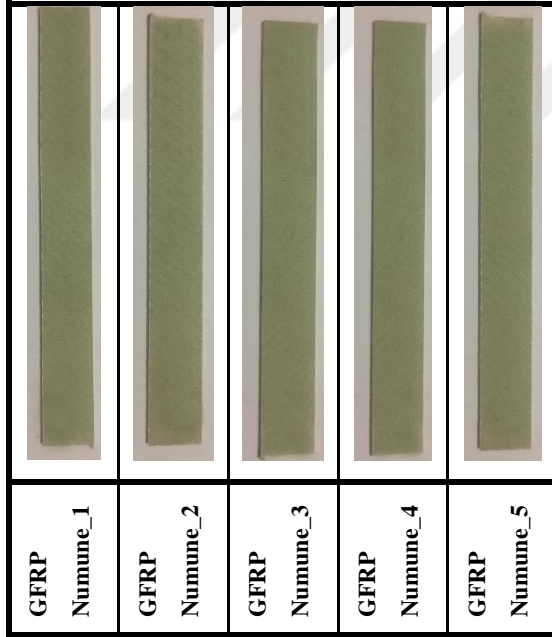
Çizelge 7.2. Test standartlarına göre numune boyutları;

Test Tipi	Test Standart	Numune Eni [w , mm]	Numune Boyu [l , mm]	Numune Kalınlığı [h , mm]
Çekme Testi	ASTM D3039	25	250	3
Üç Nokta Eğme Testi	ASTM D7264	12,7	125	3
Darbe Testi	ASTM D7136	150	150	3

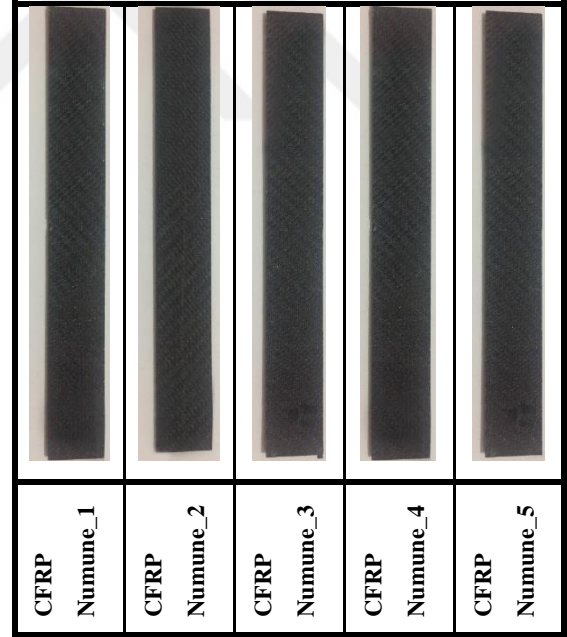
Test numunesi sematik gösterimi



Şekil 7.1 ve Şekil 7.2 de çekme testi için ASTM standardına göre hazırlanmış deney numuneleri verilmiştir.

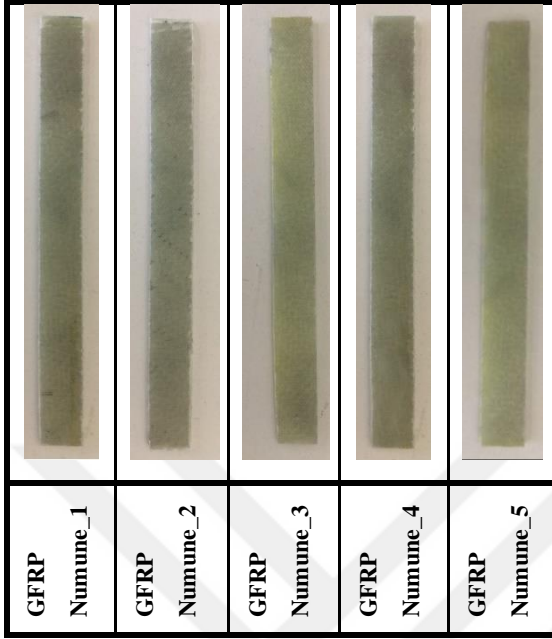


Şekil 7.1. Çekme testi cam elyaf-epoksi test numuneleri

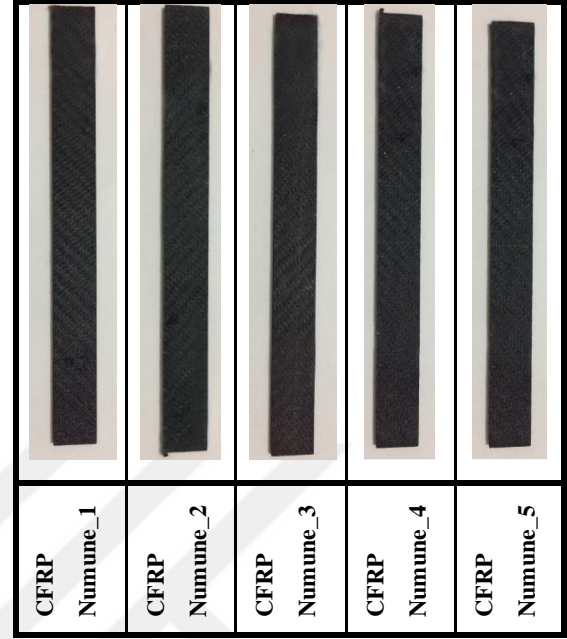


Şekil 7.2. Çekme testi karbon elyaf-epoksi test numuneleri

Şekil 7.3 ve Şekil 7.4 de üç nokta eğme testi için ASTM standardına göre hazırlanmış deney numuneleri verilmiştir.



Şekil 7.3. Eğme Testi Cam Elyaf-Epoksi Test Numuneleri



Şekil 7.4. Eğme Testi Karbon Elyaf-Epoksi Test Numuneleri

Şekil 7.5 ve Şekil 7.6 de ağırlık düşürme ile darbe testi için ASTM standardına göre hazırlanmış deney numuneleri verilmiştir.



Şekil 7.5. Darbe Testi Cam Elyaf-Epoksi Test Numunesi

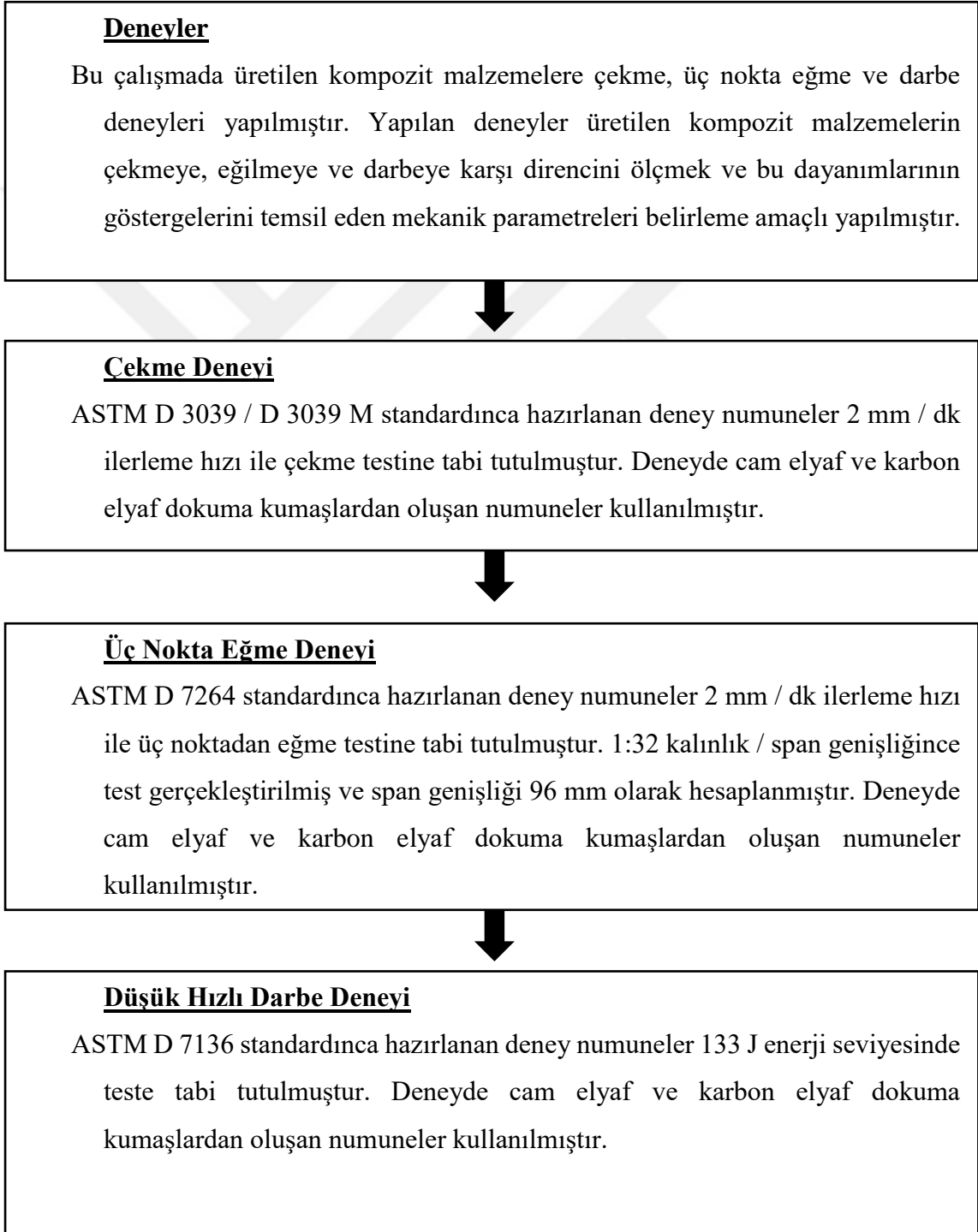


Şekil 7.6. Darbe Testi Karbon Elyaf-Epoksi Test Numunesi

7.5. Deneye Hazırlık

Çekme, üç nokta eğme ve darbe deneyleri için ASTM standartları dikkate alınmıştır. Çekme Deneyi için ASTM D3039, Üç Nokta Eğme Deneyi için ASTM D7264 ve Ağırlık Düşürme Darbe Deneyi için ASTM D7136 kullanılmıştır.

7.6. Deney Süreci Akış Diyagramı



7.7. Çekme Deneyi

Çekme deneyleri; Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Test Laboratuvarında bulunan Shimadzu AG- IS (100 kN) deney cihazı ve 2 mm / dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Bu deney cam elyaf twill kumaş takviyeli-epoksi ve karbon elyaf twill kumaş takviyeli-epoksiden oluşan 5'er adet test numunesi toplamda 10 test numunesi için gerçekleştirilmiştir.



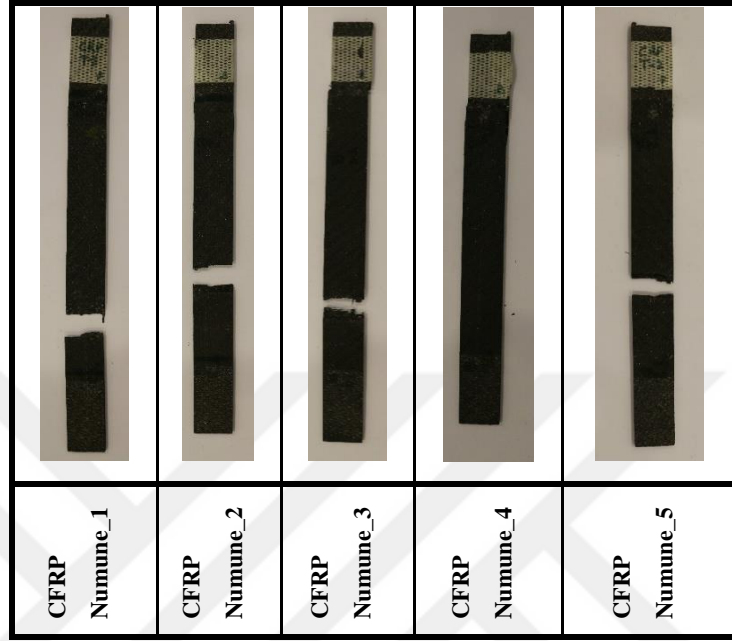
Şekil 7.7. Çekme testinden bir görünüm



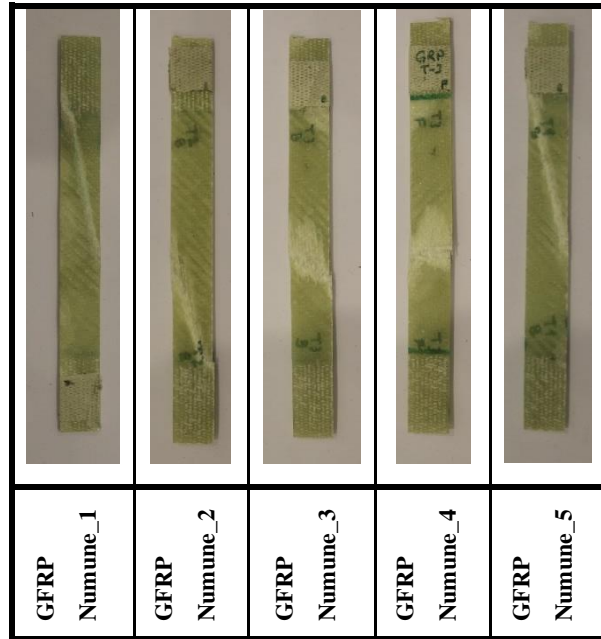
Şekil 7.8. Shimadzu AG- IS (100 kN) test cihazı

7.7.1. Çekme Deneyi Deforme Numuneler

Şekil 7.9 ve Şekil 7.10 da çekme testi sonrası deforme deney numuneleri görülmektedir.



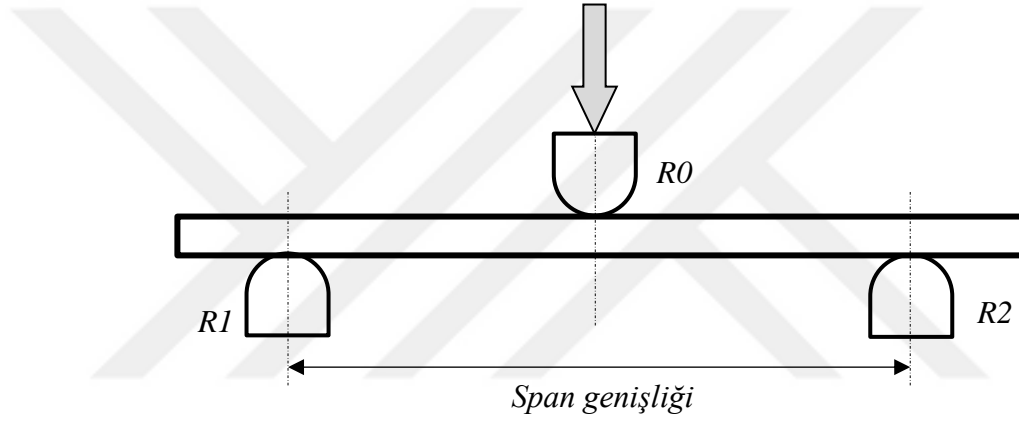
Şekil 7.9. Çekme testi karbon elyaf-epoksi test numuneleri deforme halleri



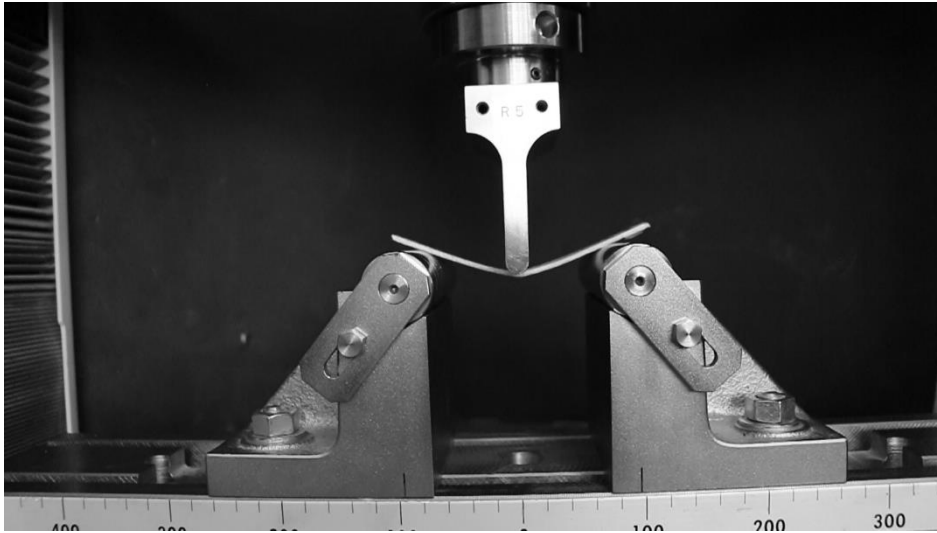
Şekil 7.10. Çekme testi cam elyaf-epoksi test numuneleri deforme halleri

7.8. Üç Nokta Eğme Deneyi

Üç nokta eğme deneyleri, ASTM 7264 standardına göre, Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Test Laboratuvarında bulunan Shimadzu AG- IS (100 kN) deney cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler 2 mm/dk deney hızında gerçekleştirilmiştir. Standartta belirtildiği üzere kalınlık / span genişliği oranı 1:32 olarak seçilmiştir. 3 mm numune kalınlığı için span genişliği 96 mm olarak hesaplanır. Yük radiusu (R_0) 5 mm, destek radiusu (R_1 , R_2) 15 mm alınmıştır. Bu deney cam elyaf twill kumaş / epoksi ve karbon elyaf twill kumaş / epoksiden oluşan 5'er adet test numunesi toplamda 10 test numunesi için gerçekleştirilmiştir.



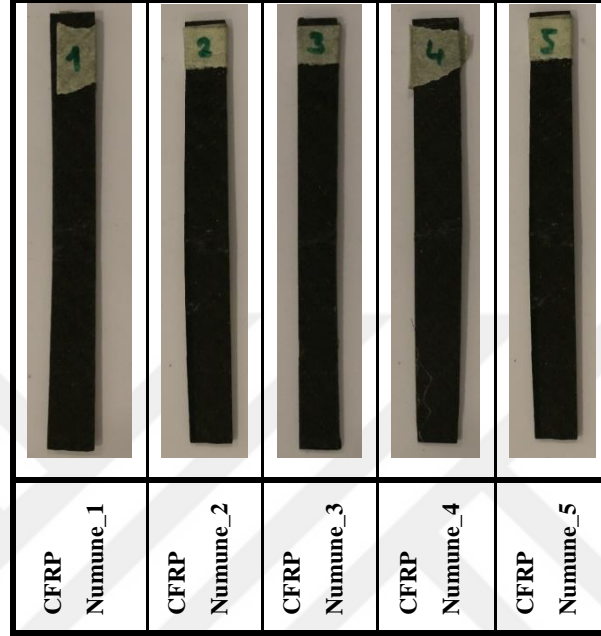
Şekil 7.11. Üç nokta eğme testi şematik gösterim



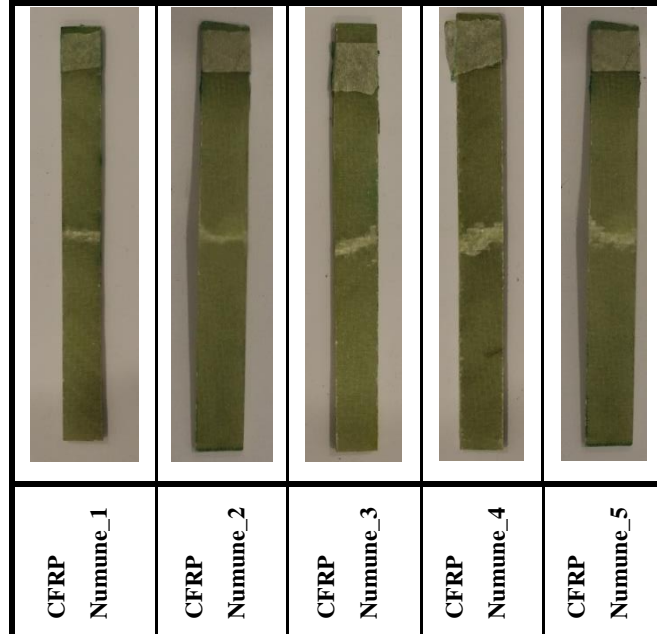
Şekil 7. 12. Üç nokta eğme testinden bir görünüm

7.8.1. Üç Nokta Eğme Deneyi Deforme Numuneler

Şekil 7.13 ve Şekil 7.14 da çekme testi sonrası deforme deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 7.13. Üç nokta eğme testi karbon elyaf-epoksi test numuneleri deforme halleri

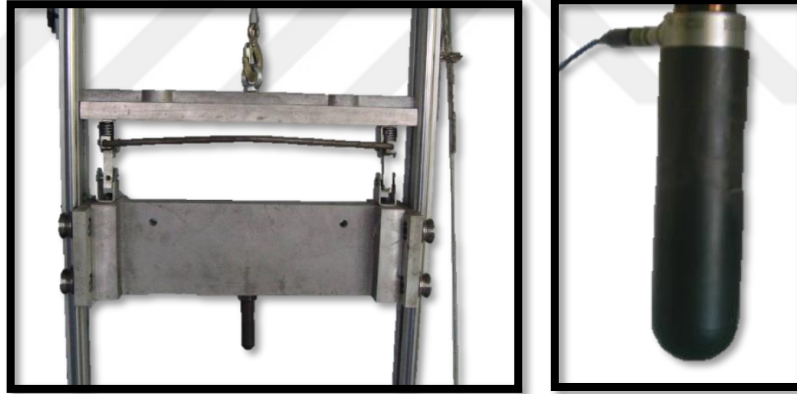


Şekil 7.14. Çekme testi karbon elyaf-epoksi test numuneleri deforme halleri

7.9. Düşük Hızlı Darbe Testi

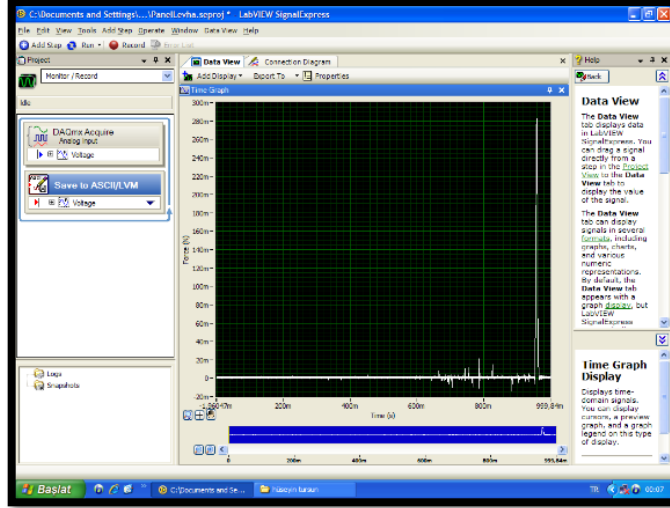
Düşük Hızlı Darbe Testleri; Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Test Laboratuvarında bulunan test düzeneği ile, düşen ağırlık sistemiyle çalışan darbe test cihazında 24 mm çapında yarı küresel darbe ucuyla, 133 J enerji seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Testlerde, (150×150) mm ölçülerinde hazırlanan darbe test numuneleri kullanılmıştır. Cam elyaf twill kumaş / epoksi ve karbon elyaf twill kumaş / epoksiden oluşan 4'er adet test numunesi toplamda 8 test numunesi için gerçekleştirilmiştir. Deneyde bazı numunelerden sensör verisi alınamaması nedeniyle sadece 1 'er adet numune değerlendirmeye alınmıştır.

Darbe yüklemesi için düşen ağırlık sistemi üzerinde toplam 17 kg ağırlık kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan kuvvet algılama CB Quartz ICP Force Sensor modelidir. 6 kN ölçme kapasitesi vardır.



Şekil 7.15. PCB Quartz ICP Force Sensor

NI Signal Express yazılımıyla zamana göre kuvvetin değişim grafiği elde edilmiştir. Yazılım sinyalin özelliklerini belirlemektedir. Örneğin; kaç saniye boyunca sinyal alınacağı, saniyede kaç veri alınacağı ayarlayabilmektedir.



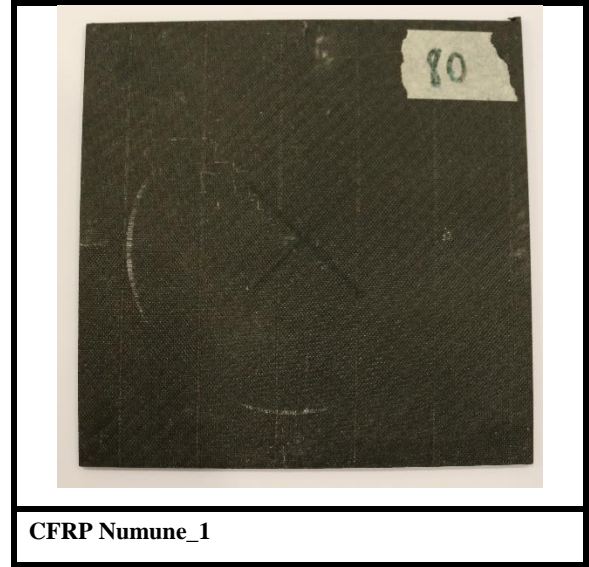
Şekil 7.16. NI Signal Express Yazılımı

7.9.1. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Deforme Numuneler

Şekil 7.7 ve Şekil 7.18 da darbe testi sonrası deforme deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 7.17. Darbe testi cam elyaf-epoksi test numunesi deforme hali



Şekil 7.18. Darbe testi karbon elyaf-epoksi test numunesi deforme hali

7.10. ANSYS Yazılımı İle Sonlu Elemanlar Analizi

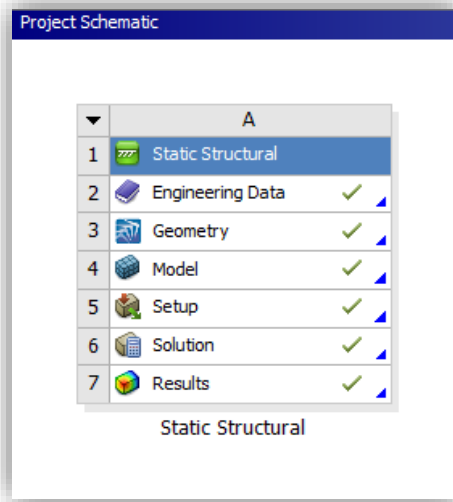
Sonlu elemanlar metodunu temel alan birçok ticari paket program mevcuttur. Bu çalışmada deneysel verilerle malzeme modelleri ANSYS 19.1 sonlu elemanlar paket programında tanımlanacak karşılaştırma yapmak için bir eğme deneyi modellenip analiz koşturulacaktır.

En temel haliyle ANSYS 19.1’de problem tanımlamanın adımlarını sıralayacak olursak,

- ▶ Malzeme Tanımlama
- ▶ 3D Model Oluşturma
- ▶ Mesh Oluşturma
- ▶ Sınır Şartlarının Tanımlanması
- ▶ Problem Çözümü
- ▶ Sonuçlar

7.10.1. Problem Tanımlama

Bu kısımda ise yapılan testler tespit edilen malzeme modelleri kullanılarak Üç Nokta Eğme Test düzeneği ANSYS 19.1 paket programı ile tanımlanıp eğme deney numunesi üzerinde oluşan eğilme dirençleri tespit edilecektir. Bulunan sonuçlar deneysel çalışma ile karşılaştırılacaktır. Problemin 3D katı modelini oluşturmak için Space Claim modelleme programı kullanılmıştır.

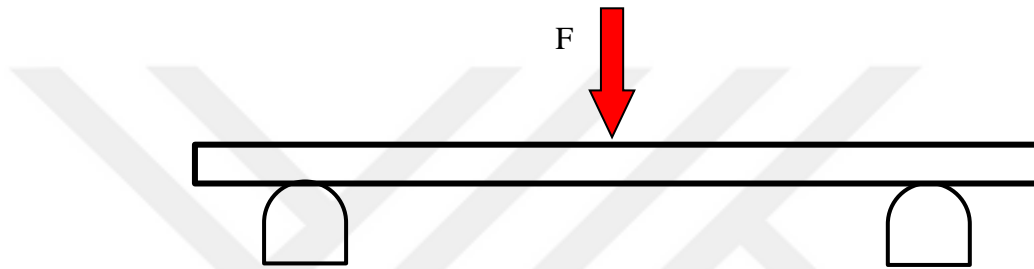


Şekil 7.19. Proje Şeması ANSYS 19.1 Workbench

7.10.2. Başlangıç Koşulları ve Kabuller

Bu çalışmada incelemeler makro boyutta yapılmıştır. Malzemeler uzayda tanımlanırken üç eksen yönünde (x, y, z) tanımlanırlar. Kompozit malzemelerde malzeme yapısına göre malzemenin davranışı her yönde aynı ise izotropik, iki yönde aynı ise ortotropik, her yönde farklı ise anizotropik olur. Burada numune ortotropik olarak kabul edilmiştir.

F kuvvetinin konumundan karbon elyaf kumaş için 5 mm ilerleme cam elyaf kumaş için 5 mm ilerleme verilmiştir.



Şekil 7.20. Problemin Şematik Görünümü

7.10.3. Malzeme Tanımlama

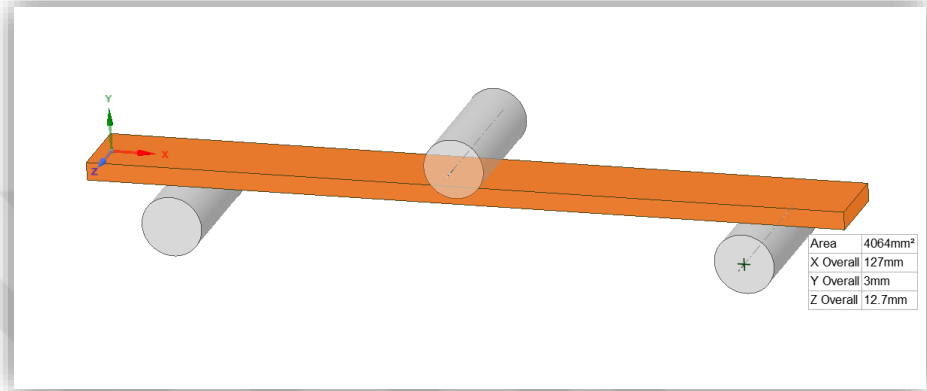
Malzeme tanımlama kısmında analiz edilecek malzemelerin davranışları Çizelge 7.3’de verildiği gibi tanımlanmıştır. Çizelge 7.3’de verilen malzeme sabitleri çekme testi ile belirlenen kuvvet-deplasman verileri kullanılarak türetilmiştir.

Çizelge 7.3. Analizde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme	[g/m ³]	V _f [%]	E _x =E _y [GPa]	E _z [GPa]	ν _{xz} =ν _{yz}	ν _{xy}	G _{xy} [GPa]	G _{xz} =G _{yz} [GPa]
Cam Kumaş / Epoksi	300	25	17,9	3,5	0,35	0,2	3,7	1,3
Karbon Kumaş / Epoksi	245	29,2	35,6	3,5	0,35	0,1	4,7	1,3

7.10.4. Üç Boyutlu Modellerin Oluşturulması

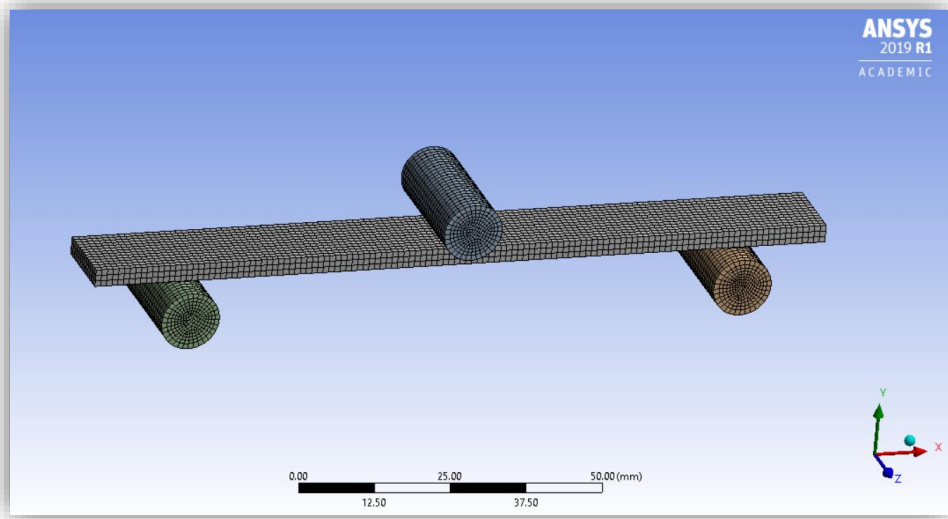
Üç Nokta Eğme düzeneği 3D katı modeli SpaceClaim modelleme programı ile yapılmıştır. Model mesnet destekler, yükleyici destek ve numuneden oluşmaktadır. Destek çapları 10 mm alınmıştır. Numune ölçüleri ise deney numunesi ile aynı olacak şekilde oluşturulmuştur. Span genişliği 96 mm alınmıştır.



Şekil 7.21. Problemin 3D Katı Modeli

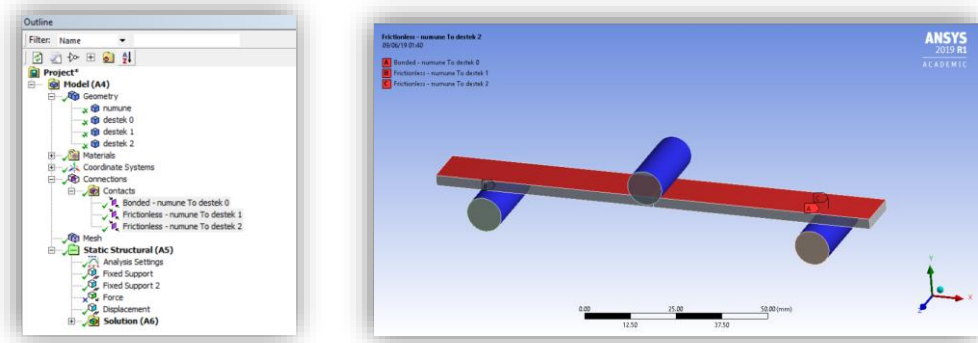
7.11. Mesh Oluşturma

Analiz modelinde 8239 düğüm ve 1482 eleman bulunmaktadır. Sistemi en iyi temsil edecek eleman yapısı kullanılarak sistem sonlu elemanlara ayrılmıştır.



Şekil 7.22. Sistemin Mesh Oluşturma İşlemi Sonrası Görünümü

7.12. Sınır Şartları



Şekil 7.23. Proje Ağacı, Bağlantılar ve Sınır Şartları

Numunenin alt kısmına yerleştirilen destek yüzeyleri ile numunenin alt yüzeyi sürtünmesiz temas olarak tanımlanmıştır. Numunenin üst kısmında numuneye kuvveti ileten destek ile numunenin üst yüzeyi arasına ayrılmaz temas ilişkisi verilmiştir.

Alt destekler sabit olarak tanımlanmıştır. Üst destek ise karbon elyaf kumaş – epoksi malzemede 5 mm, cam elyaf kumaş – epoksi malzemede ise 5 mm ilerleme verilmiştir.

7.13. Analiz Çözümleme

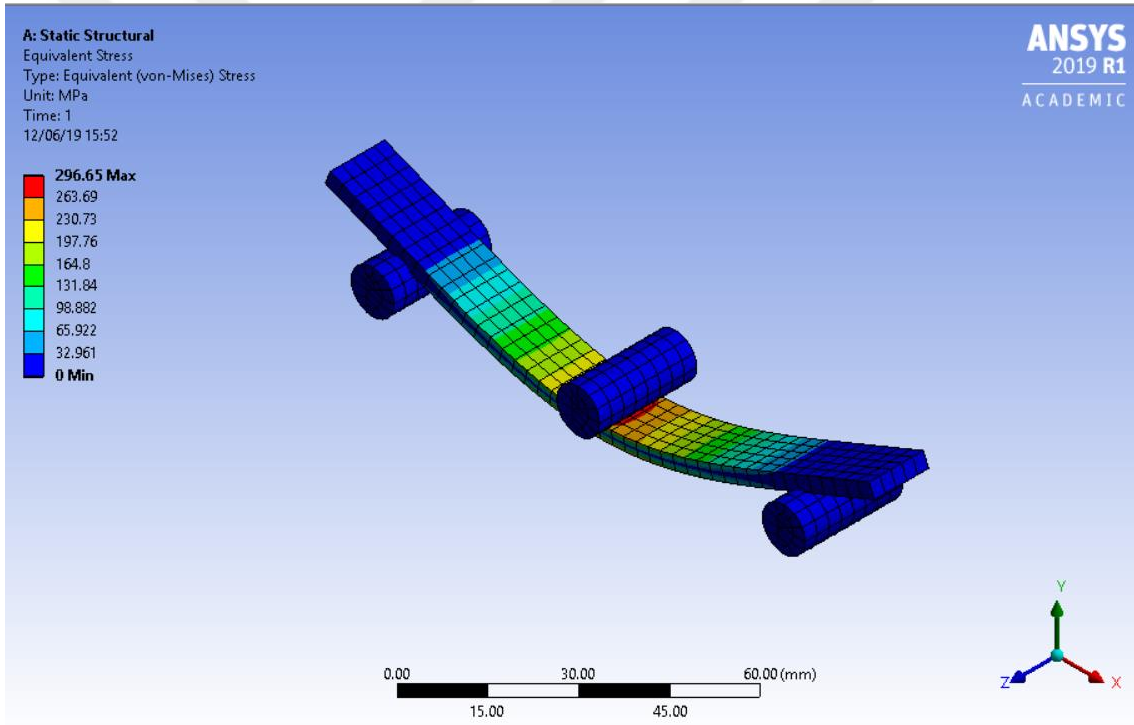
Bu kısımda analiz koşturulur ve sonuçlar alınır.

7.14. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Karbon elyaf kumaş – epoksi ve cam elyaf kumaş/epoksi için von-Mises gerilme ve birim şekil değiştirme kriterine göre sonuçlar elde edilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar değerlendirildikten sonra deneysel yöntemler elde edilen eğme sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

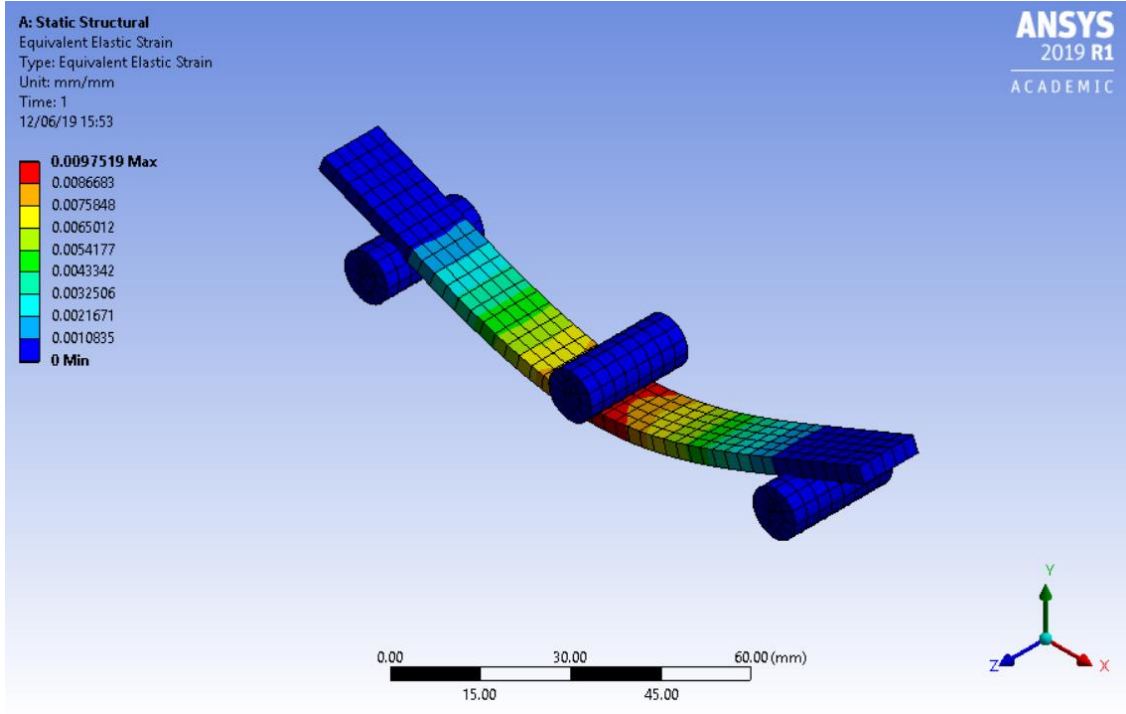
7.14.1. Karbon Elyaf–Epoksi İçin Gerileme ve Birim Şekil Değişirme Sonuçları

Karbon Elyaf Kumaş-Epoksi gerilme sonucu Şekil 7.24’de verilmiştir. Üç nokta eğme deney sistemi göz önüne alındığında numunenin alt ve üst katmanlarda maksimum zorlanmaya maruz kalması üst katmanda basma, alt katmanda ise çekme gerilmelerinin maksimum oluşması deneysel çalışma sonrasında hasar bölgesinin buralarda oluşması yapılmış olan simülasyonu doğrular niteliktedir. Destek kısımlarında da yine deney sisteminde olduğu gibi herhangi bir kuvvete maruz kalmamış ve gerilme oluşmamıştır. Üç nokta eğme sistemi ile Karbon Elyaf Kumaş-Epoksi numune için Şekil 7.24 de verilen maksimum gerilme değeri 296,6 MPa olduğu görülmektedir.



Şekil 7.24. Karbon elyaf/epoksi için von-Mises gerilme sonucu

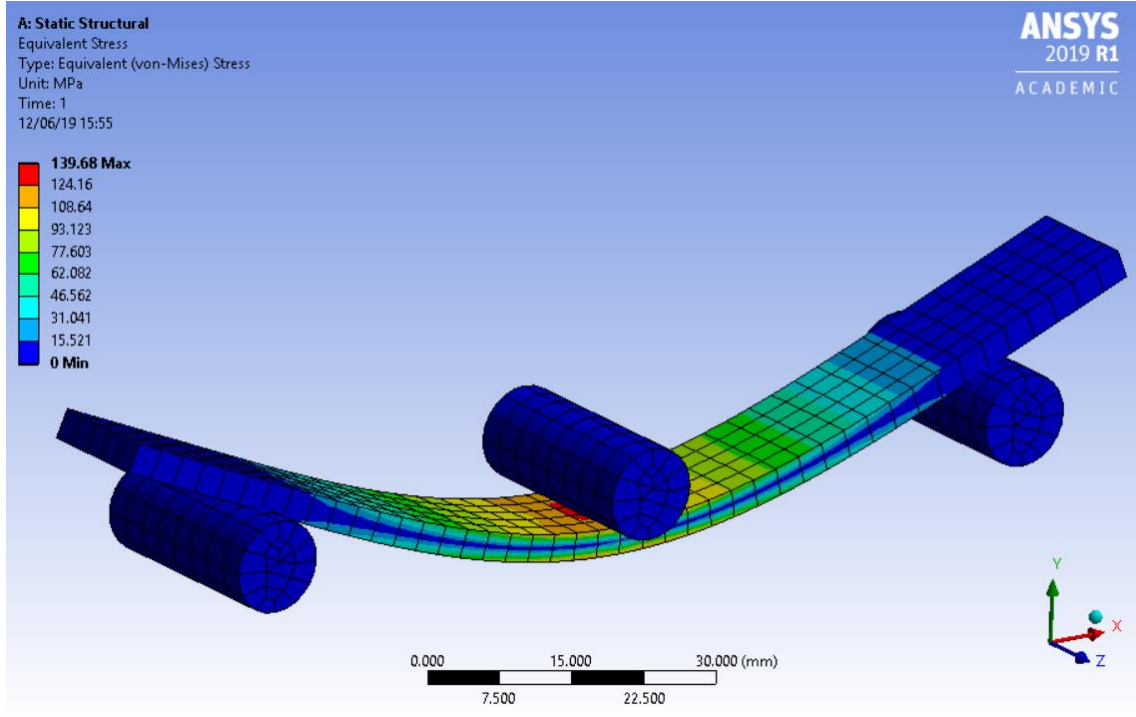
Üç nokta eğme sistemi ile Karbon Elyaf Kumaş-Epoksi numune için Şekil 7.25’de verilen maksimum şekil değışirme değeri 0,00975 mm / mm olduğu görülmektedir.



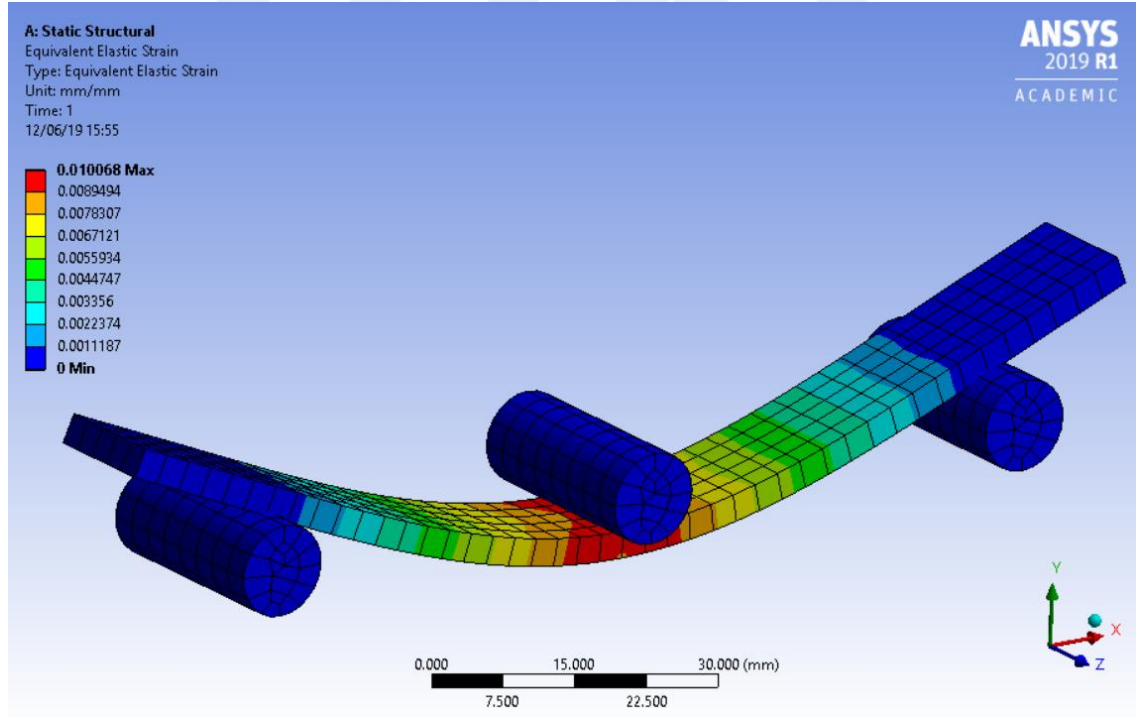
Şekil 7.25. Karbon elyaf/epoksi için şekil değıştirme sonucu

7.14.2. Cam Elyaf–Epoksi İçin Gerileme ve Birim Şekil Değıştirme Sonuçları

Cam Elyaf Kumaş-Epoksi gerilme sonucu Şekil 7.26’da verilmiştir. Üç nokta eğme deney sistemi göz önüne alındığında numunenin alt ve üst katmanlarda maksimum zorlanmaya maruz kalması üst katmanda basma, alt katmanda ise çekme gerilmelerinin maksimum oluşması deneysel çalışma sonrasında hasar bölgesinin buralarda oluşması yapılmış olan simülasyonu doğrular niteliktedir. Destek kısımlarında da yine deney sisteminde olduğu gibi herhangi bir kuvvete maruz kalmamış ve gerilme oluşmamıştır. Üç nokta eğme sistemi ile Cam Elyaf Kumaş-Epoksi numune için Şekil 7.26’da verilen maksimum gerilme değeri 139,68 MPa olduğu görülmektedir.



Şekil 7.26. Cam elyaf/epoksi için von-Mises gerilme sonucu



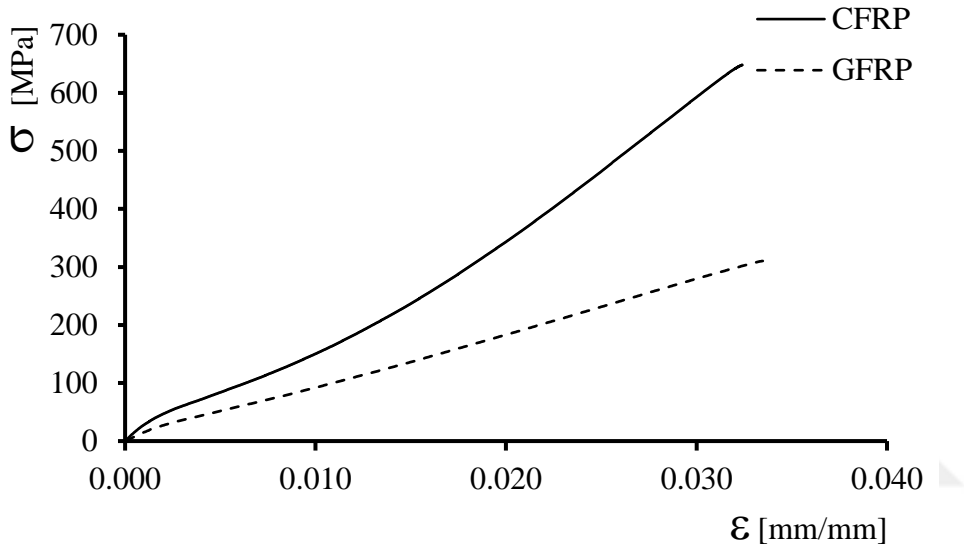
Şekil 7.27. Cam elyaf/epoksi için şekil değiştirme sonucu

Üç nokta eğme sistemi ile Cam Elyaf Kumaş-Epoksi numune için Şekil 7.27’de verilen maksimum şekil değiştirme değeri 0,010 mm / mm olarak görülmektedir.

8. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

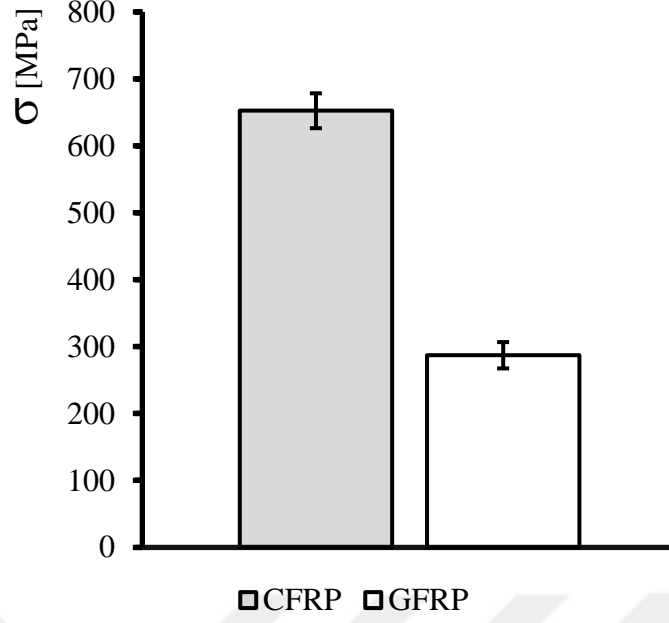
8.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Cam Elyaf Kumaş / Epoksi ile Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi 12 katmanlı olarak, vakum infüzyon yöntemiyle üretilen 5'er adet çekme deney numunelerinin ortalamalarından elde edilen Gerilme – Birim Şekil Değişirme grafikleri Şekil 8.1'de paylaşılmıştır.



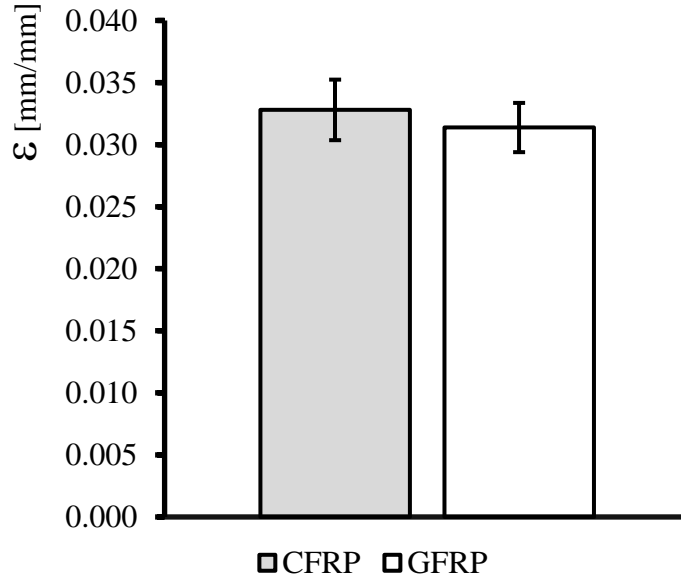
Şekil 8.1. CFRP ve GFRP çekme deney numuneleri için Gerilme-Birim Şekil Değişirme Grafiği

Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama çekme gerilmesi 310 MPa, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama çekme gerilmesi 644 MPa oluşmuştur. Cam ve Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama birim şekil değişirme değerleri 0.032 mm/mm civarında oluşmuştur. Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde daha düşük olması gereken birim şekil değişirme değerinin Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numune göre yaklaşık aynı değerlerde oluşması numunelerin üretimi sırasındaki ortam koşullarından olduğu düşünülmektedir. Maksimum gerilme ve birim şekil değişirme değerleri irdelendiğinde Cam Elyaf Kumaş / Epoksi ile Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerin literatürde benzer yapılarla kıyasla daha üstün performans gösterdiği görülmektedir.



Şekil 8.2. CFRP ve GFRP numuneler için Gerilme Grafiği

Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama çekme gerilmesi 310 MPa, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama çekme gerilmesi 644 MPa oluşmuştur. GFRP numunelerin gerilme değerleri iki kat daha fazla olduğu görülmektedir.

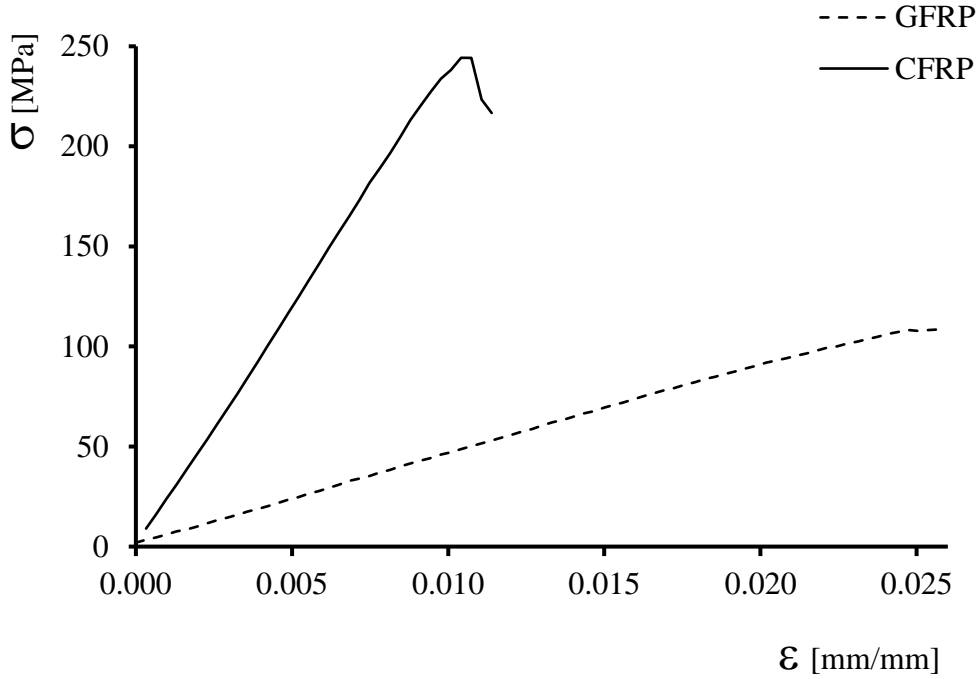


Şekil 8.3. CFRP ve GFRP numuneler için Birim Şekil Değişirme Grafiği

Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama birim şekil değişirme değeri Şekil 8.3'de görüldüğü gibi 0,031 mm/mm, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama birim şekil değişirme değeri Şekil 8.3'de görüldüğü gibi 0,033 mm/mm 'dir.

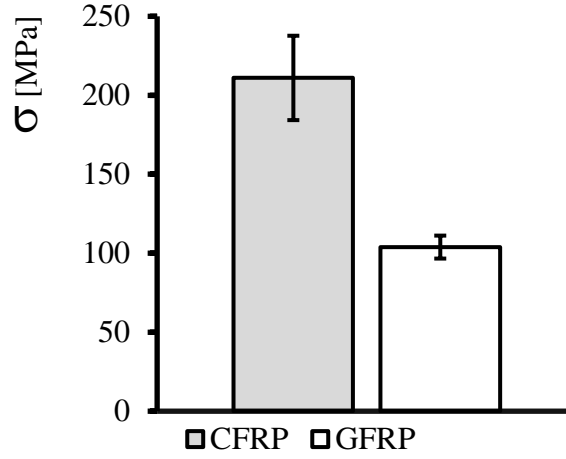
8.2. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Cam Elyaf Kumaş / Epoksi ile Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi 12 katmanlı olarak, vakum infüzyon yöntemiyle üretilen 5'er adet üç nokta eğme deney numunelerinin ortalamalarından elde edilen Gerilme – Birim Şekil Değişirme grafikleri Şekil 8.4'de paylaşılmıştır.



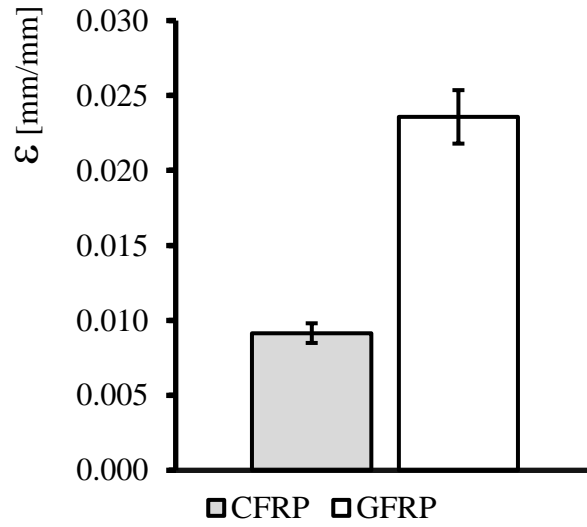
Şekil 8.4. CFRP ve GFRP üç nokta eğme deney numuneleri için Gerilme-Birim Şekil Değişirme Grafiği

Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama eğme gerilmesi 108 MPa, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama gerilme 244 MPa oluşmuştur. Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama birim şekil değişirme değeri Şekil 8.4'de görüldüğü gibi 0,025 mm/mm, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama birim şekil değişirme değeri Şekil 8.4'de görüldüğü gibi 0,01 mm/mm 'dir.



Şekil 8.5. CFRP ve GFRP üç nokta eğme deney numuneleri için Gerilme Grafiği

Şekil 8.5’de de görüldüğü gibi Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama eğme gerilmesi 108 MPa, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama gerilme 244 MPa oluşmuştur.

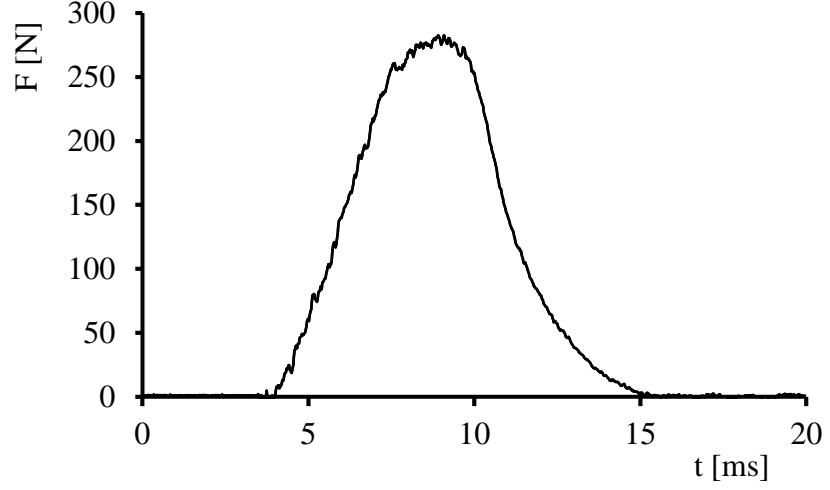


Şekil 8.6. CFRP ve GFRP üç nokta eğme deney numuneleri için Birim Şekil Değiştirme Grafiği

Şekil 8.6’de de görüldüğü gibi Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde birim şekil değiştirme değeri 0,024 mm/mm, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde birim şekil değiştirme değeri 0,009 mm/mm olarak bulunmuştur. Grafikler incelendiğinde CFRP numunelerin GFRP numunelere göre daha yüksek eğme dayanımına sahipken birim şekil değiştirme grafikleri göz önüne alındığında CFRP numunelerin daha az birim şekil değiştirme değerlerini aldığını görüyoruz.

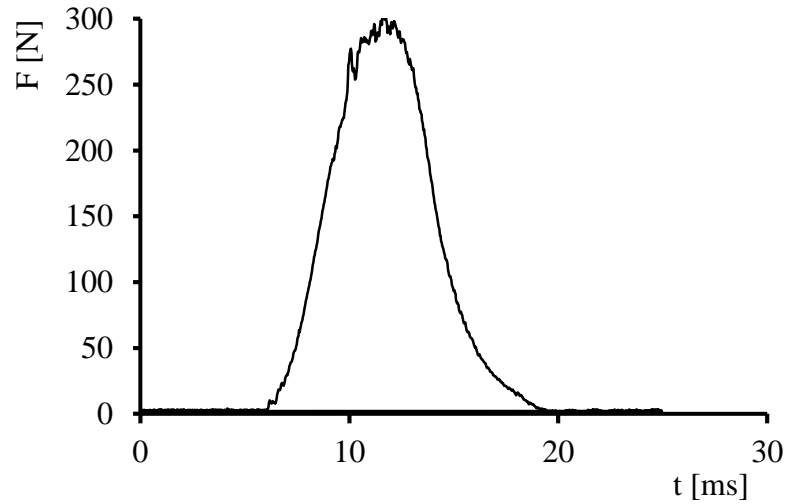
8.3. Düşük Hızda Darbe Deneyi Sonuçları

Darbe deneyi 133 J 'lük enerji seviyesinde CFRP ve GFRP numuneler için yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 8.7. Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi Darbe Deneyi Kuvvet-Zaman Grafiği

Karbon elyaf takviyeli epoksi deney numunesi için darbe deneyi sonuçları şekil 8.7. de verilmiştir. Tahribat 11 ms içinde gerçekleşmiştir. Maksimum tahribat kuvveti 284 N olarak ölçülmüştür.



Şekil 8.8. Cam Elyaf Kumaş / Epoksi Darbe Deneyi Kuvvet-Zaman Grafiği

Cam elyaf takviyeli epoksi deney numunesi için darbe deneyi sonuçları şekil 8.8. de verilmiştir. Tahribat 14 ms içinde gerçekleşmiştir. Maksimum tahribat kuvveti 298 N olarak ölçülmüştür.

8.4. Üç Nokta Eğme Deneysel ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada Cam Elyaf Kumaş / Epoksi ve Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numuneler çekme testine tabi tutularak malzeme modelleri oluşturulmuş ve bu bağlamda malzemelerin Elastisite Modülü (E) ve Poisson Oranları (ν) tespit edilmiştir. Bunun yanında numunelere üç nokta eğme testi yapılmış ve numunelerin eğme gerilme – birim şekil değiştirme davranışları belirlenmiştir.

Ayrıca üç nokta eğme deney sistemi CAD modeli oluşturulmuş ve deneyin simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon ANSYS 19.1 paket programında gerçekleştirilmiştir. Çekme testinden elde edilen malzeme özellikleri analiz modeline uygulanmış, deney sistemindeki destek noktaları tanımlanmış ve son olarak deneyde gerçekleşen maksimum deplasman değerleri verilerek analiz koşturulmuştur.

Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi için deneysel gerilme değeri 244 MPa sayısal gerilme değeri ise 296,6 MPa olarak bulunmuştur. Deneysel birim şekil değiştirme 0,01 mm/mm ve sayısal birim şekil değiştirme ise 0,00975 mm/mm olarak bulunmuştur. Cam Elyaf Kumaş / Epoksi için deneysel gerilme değeri 108 MPa sayısal gerilme değeri ise 139,68 MPa olarak bulunmuştur. Deneysel birim şekil değiştirme 0,025 mm/mm ve sayısal birim şekil değiştirme ise 0,010 mm / mm olarak bulunmuştur.

Gerilme sonuçları deneysel ve sayısal olarak karşılaştırıldığında CFRP numunelerin sayısal gerilme değerleri deneysel gerilme değerlerine oranla %21 daha yüksek olduğu tespit edilmiş, GFRP numunelerin sayısal gerilme değerleri deneysel gerilme değerlerine oranla %29 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlara oranla ortalama %25 sapma olduğu tespit edilmiştir. Sapmanın sebebi konvansiyonel malzemelere göre kompozitlerin üretim parametrelerinin daha kompleks olması ve buna bağlı olarak üretim esnasında oluşan ürünlerin birbirlerine oranla farklı özellikler sergilemesinden dolayı olduğu düşünülmektedir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada tekstil tipi kompozit malzemeler olan cam ve karbon elyaf kumaştan epoksi reçine ile imal edilen 12 tabakalı kompozit laminatın mekanik özellikleri incelenmiştir ve malzeme sabitleri tespit edilerek sonlu elemanlar metodu ile sadece üç nokta eğme deney sistemine göre deneysel sonuçlar ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Cam elyaf/ epoksi malzemenin çekme deney sonuçlarında çekme yönünde malzeme orta tabakalarında meydana gelen delaminasyon alt ve üst tabakalarda ayrışmaya neden olmuş malzeme boyun bölgesi tabir edilen orta bölgeden delaminasyon ile hasara uğramıştır. Bazı numunelerde 45° kayma meydana gelmesi ve dış yüzeylerdeki kompozit malzemenin hasarından dolayı tahribat gerçekleşmiştir.
- Karbon plakada ise kopma delaminasyonsuz gerçekleşmiş ve ilk kopma olayı orta tabakadaki plakalarda gerçekleşmiştir. Hasar düzlemi 90° 'dir.
- Bu durumda karbon kompozit malzemeler cam kompozit malzemelere zaten daha dayanıklı olduğundan çekme dayanımları yüksek ve cam malzemeye göre maksimum gerilme-birim şekil değiştirme değerleri göz önüne alınarak karşılaştırma yapıldığında karbon malzemenin cam malzemeye göre %150 daha fazla olduğu diyagramlarda görülmektedir.
- ASTM standartlarına göre hazırlanan cam ve karbon elyaf/epoksi eğme numunelerinin su jeti ile kesilmiş kenar kesitleri incelendiğinde çözgü ve atkı ipliklerinin kıvrıldığı alanlarda maksimum $5-7^{\circ}$ lik çözgü sıklığına bağlı olarak yönlenme farkları gözlemlenmiştir. Bu farklardan oluşan kayma gerilmesi etkisiyle gerek çekme numunelerinin gerekse eğilme numunelerinde çekme gerilmesinin maksimum olduğu bölgede daha kolay hasar başlangıcı gözlemlenmiştir. Bu da eğme bölgesindeki mekanik özellikleri olumsuz etkilediği görülmüştür.

- Her iki numunede de eğme deneyinin özelliği olarak hasar başlangıcı çekme gerilmesinin maksimum olduğu en dış tabakada gerçekleşmiş ve her iki numune tipinde de delaminasyon gözlemlenmiştir.
- Atkı ve çözgü yönünde Elastikiyet Modülü yaklaşık eşit olarak bulunmuştur. 3. yönünde ise matris malzeme Elastikiyet Modülü bulunmuştur.
- Hacimsel elyaf konsatrasyonu Cam elyaf / Epoksi için %25, Karbon elyaf için %29,2 olarak hesaplanmıştır. Daha kesin sonuçlar için ASTM 3171'e göre yakma ve nitrik asit ile çözme yoluyla yapılabilir.
- Karbon elyaf / epoksi 133 J 'de incelendiğinde herhangi bir çökme hasarına rastlanmamasına rağmen malzemenin vurucu yüzeyinde geometrik dıştan darbe noktasına doğru yüzeysel zigzag şekillinde hasarlar oluşmuştur. Darbe enerjisi artırıldığında çatlak oluşumunun belirginleşeceği ve doğrusal çatlak formuna döneceği öngörülmektedir. Aynı darbe enerjisinde Cam elyaf / Epoksi numunedeki çatlakların atkı yönünde ilerlediği ve doğrusal olarak yönlendiği ve darbe noktasında lif kopması meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Ancak bu lif kopmaları atkı çözgü ipliklerinin kıvrıldığı alanlarda daha da belirginleşmiştir.
- 133 J darbe enerjisinde CFRP numunede 284 N tahribat kuvveti ile 11 ms'de GFRP numunede ise 294 N tahribat kuvveti ile 14 ms de gerçekleşmiştir.
- Gerek eğme gerekse darbe numuneleri her iki modelde de incelendiğinde malzemelerdeki en büyük basma ve çekme gerilmelerinin oluştuğu en alt ve en üst tabakalarda yükleme şekline göre tek yönlü kumaş katmanlarının kullanılmasının uygun olacağı önerilebilir.
- Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama çekme gerilmesi 310 MPa, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama çekme gerilmesi 644 MPa oluşmuştur.

- Cam Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama birim şekil değıştirme değeri 0,031 mm/mm, Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi numunelerde ortalama birim şekil değıştirme değeri 0,033 mm/mm olarak bulunmuştur.
- Karbon Elyaf Kumaş / Epoksi için deneysel gerilme değeri 244 MPa sayısal gerilme değeri ise 296,6 MPa olarak bulunmuştur. Deneysel birim şekil değıştirme 0,01 mm/mm ve sayısal birim şekil değıştirme ise 0,00975 mm/mm olarak bulunmuştur. Cam Elyaf Kumaş / Epoksi için deneysel gerilme değeri 108 MPa sayısal gerilme değeri ise 139,68 MPa olarak bulunmuştur. Deneysel birim şekil değıştirme 0,025 mm/mm ve sayısal birim şekil değıştirme ise 0,010 mm / mm olarak bulunmuştur.
- Gerilme sonuçları deneysel ve sayısal olarak karşılaştırıldığında CFRP numunelerin sayısal gerilme değeri deneysel gerilme değeri oranla %21 daha yüksek olduğu tespit edilmiş, GFRP numunelerin sayısal gerilme değeri deneysel gerilme değeri oranla %29 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlara oranla ortalama %25 sapma olduğu tespit edilmiştir. Sapmanın sebebi konvansiyonel malzemelere göre kompozitlerin üretim parametrelerinin daha kompleks olması ve buna bağlı olarak üretim esnasında oluşan ürünlerin birbirlerine oranla farklı özellikler sergilemesinden dolayı olduğu düşünülmektedir.
- Malzeme modeli geliştirilen CFRP ve GFRP kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için ASTM standartlarına göre Çekme, Üç Nokta Eğme ve Darbe Testleri yapılmış ve test sonuçları eşliğinde mekanik davranışları tespit edilmiştir. Malzeme modellerinin numune davranışını tam olarak yansıtabilmesi açısından bu testler numunenin enine yönünde de testler yapılarak zenginleştirilebilir.

10. KAYNAKLAR

- Arriaga, A., Lazkano, J. M., Pagaldai, R., Zaldua, A. M., Hernandez, R., Atxurra, R., & Chrysostomou, A. (2007).** Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS. *Polymer Testing*, 26(3), 284–305. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.10.012>
- ASTM D3039/D3039M, A. S. for T. and M. (2017).** Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Tarihinde adresinden erişildi www.astm.org
- ASTM D7136/D7136M, A. S. for T. and M. (2015).** Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. <https://doi.org/10.1520/D7136>
- ASTM D7264/D7264M, A. S. for T. and M. (2015).** Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- Belinha, J., & Dinis, L. M. J. S. (2007).** Nonlinear analysis of plates and laminates using the element free Galerkin method. *Composite Structures*, 78(3), 337–350. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.10.007>
- Carbajal, N., & Mujika, F. (2011).** Determination of transverse compressive strength of long fibre composites by three-point bending of [90 m /0 n] cross-ply laminated strips. *Polymer Testing*, 30(5), 578–584. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.04.012>
- Cepus, E., Wonderly, C., Grenestedt, J., & Fernlund, G. (2005).** Comparison of mechanical properties of glass fiber / vinyl ester and carbon fiber / vinyl ester composites. 36, 417–426. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.01.004>
- Çiçek, Ö., & Demirsoy, M. (2005).** Stress analysis of pin-loaded woven-glass fiber reinforced epoxy laminate conveying chain components. *Composite Structures*, 69(4), 470–481. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.08.004>
- CompositeLab. (2016).** Composite Industry Overview. Tarihinde 02 Mart 2019, adresinden erişildi American Composites Manufacturers Association (ACME) website: <http://compositeslab.com/composites-101/composites-industry-overview/>
- Daniel, B. M., & Steven, L. D. (2001).** ASM Handbooks Volume 21: Composites.
- Erdem, S., Kaman, M. O., & Gur, M. (2019).** Post-buckling behavior of carbon fiber epoxy composite plates. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(4), 1723–1730. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0324-z>
- Esendemir, Ü., & Caner, A. Y. (2017).** Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 0(0), 10. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.72732>

- Eskizeybek, V. (2012).** Yüzeilerine Kimyasal Olarak Karbon Nanotüpler Bağlanmış Örgü Cam Fiber/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi Ve Tabakalar Arası Kırılma Davranışının İncelenmesi. 5.
- Farooq, U., & Myler, P. (2015).** Finite element simulation of buckling-induced failure of carbon fibre-reinforced laminated composite panels embedded with damage zones. *Acta Astronautica*, 115, 314–329.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.05.039>
- FiberGlast. (2019a).** About Reinforcements. Tarihinde 12 Ocak 2019, adresinden erişildi FiberGlastCorp. website: https://www.fibreglast.com/product/about-reinforcements/Learning_Center
- FiberGlast. (2019b).** About Resins. Tarihinde 02 Mart 2019, adresinden erişildi FiberGlastCorp. website: <https://www.fibreglast.com/product/about-resins>
- FiberGlast. (2019c).** Vacuum Infusion Complete Guide. Tarihinde 05 Mart 2019, adresinden erişildi FiberGlastCorp. website: https://www.fibreglast.com/product/vacuum-infusion-Guide/Learning_Center
- Görücü, Ü. (2011).** Elyaf takviyeli boğumla kuvvetlendirilmiş kompozit boruların sonlu elemanlar yöntemi ile geometrik optimizasyonu.
- Gül, M. (2011).** Dikdörtgen Kompozit Plakaların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Statik Analizi.
- Hale, J. (2014).** Boeing 787 from the ground up. *Aero*, 9.
- İnce, E. (2014).** Amfibi zırhlı araçlar için kompozit-alüminyum denge plakası,tasarımı, sonlu elemanlar analizi ve üretimi. 561–565.
- Jain, N. K., & Mittal, N. D. (2008).** Finite element analysis for stress concentration and deflection in isotropic , orthotropic and laminated composite plates with central circular hole under transverse static loading. 498, 115–124.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.04.078>
- Kapti, S., Sayman, O., Ozen, M., & Benli, S. (2010).** Experimental and numerical failure analysis of carbon/epoxy laminated composite joints under different conditions. *Materials and Design*, C. 31, ss. 4933–4942.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.018>
- Liu, Y. (2003).** Introduction to the Finite Element Method.
<https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2474816>
- Mallick, P. K. (2007).** Fibre-reinforced composites: materials, manufacturing and design. *İçinde Composites (C. 20)*. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(89\)90651-4](https://doi.org/10.1016/0010-4361(89)90651-4)
- Mar-Bal. (2019).** History Of Composites. Tarihinde 12 Ocak 2019, adresinden erişildi <https://www.mar-bal.com> website: <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>

- Meng, M., Le, H. R., Rizvi, M. J., & Grove, S. M. (2015).** 3D FEA modelling of laminated composites in bending and their failure mechanisms. *Composite Structures*, 119, 693–708. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.048>
- NetComposites. (2019).** Woven Fabrics. Tarihinde adresinden erişildi Net Composite Ltd. website: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/reinforcements/woven-fabrics/>
- Nunes, J. P., Pouzada, A. S., & Bernardo, C. A. (2002).** The use of a three-point support flexural test to predict the stiffness of anisotropic composite plates in bending. *Polymer Testing*, 21(1), 27–33. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(01\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00040-X)
- O. C. Zienkiewicz. (1995).** Origins, milestones and directions of the finite element method – a personal view. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2(1), 1–48.
- Okutan, B., & Karakuzu, R. (2001).** A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate. 61, 1491–1497.
- Öndürücü, A., & Karacan, A. (2018).** Tabakalı Cam Elyaf/Epoksi Kompozitlerin Darbe Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(3), 435–447. <https://doi.org/10.21923/jesd.363292>
- Özben, T., & Arslan, N. (2010).** FEM analysis of laminated composite plate with rectangular hole and various elastic modulus under transverse loads. *Applied Mathematical Modelling*, 34(7), 1746–1762. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.09.020>
- Pekbey, Y. (2005).** Buckling Of Economical Composite Bars.
- PerformanceCompositesInc. (2019).** Vacuum Infusion Process (VIP) Guide. Tarihinde adresinden erişildi performance composites inc. website: <http://www.performancecomposites.com/about-composites-technical-info/125-resin-vacuum-infusion.html>
- Rastgaar Aagaah, M., Mahinfalah, M., & Nakhaie Jazar, G. (2003).** Linear static analysis and finite element modeling for laminated composite plates using third order shear deformation theory. *Composite Structures*, 62(1), 27–39. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00081-3](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00081-3)
- Reddy, J. N. (2008).** Geometrically nonlinear transient analysis of laminated composite plates. *AIAA Journal*, 21(4), 621–629. <https://doi.org/10.2514/3.8122>
- Sayman, O., Özbay, M., & Akbulut, H. (2001).** Elastic-plastic stress analysis of metal matrix laminated plates under in-plane and transverse loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 20(5), 417–430. <https://doi.org/10.1177/073168401772678733>
- Standridge, M. (2014).** Aerospace Manufacturing and Design. Tarihinde 24 Şubat 2019,

adresinden erişildi www.aerospacemanufacturinganddesign.com website:
<https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/amd0814-materials-aerospace-manufacturing/>

- Stig, F., & Hallström, S. (2009).** Assessment of the mechanical properties of a new 3D woven fibre composite material. *Composites Science and Technology*, 69(11–12), 1686–1692. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2008.04.047>
- Turan, K., & Onur, M. (2010).** Effect of Fiber Orientation Angle on the Failure Mode of Pin Jointed Laminated Composite Plates. *Pamukka*, 16(2), 213–220.
- Türkmen, İ., & Köksal, N. S. (2013).** Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde (CTP) Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin Ve Darbe Dayanımının İncelenmesi. *Journal of Science*, 8(2), 17–30.
- Ullah, H., Harland, A. R., Lucas, T., Price, D., & Silberschmidt, V. V. (2012).** Finite-element modelling of bending of CFRP laminates: Multiple delaminations. *Computational Materials Science*, 52(1), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.02.005>
- Wikipedia. (2019).** Finite Element Method. Tarihinde adresinden erişildi Wikipedia the Free Encyclopedia website: https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method
- Yanen, C., & Solmaz, M. Y. (2016).** Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Üretimi Ve Balistik Performanslarının İncelenmesi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2016(2), 351–362. Tarihinde adresinden erişildi www.tubiad.org

11. ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hüseyin Tursun
Uyruğu : TC
Doğum Yeri ve Tarihi : Meram / 11.08.1991
Telefon : -
Faks : -
e-mail : huseyintrsn@yandex.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Selçuklu Lisesi	2009
Üniversite	: Kırıkkale Üniversitesi	2014
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi	DevamEdiyor
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

<u>Yıl</u>	<u>Kurum</u>	<u>Görevi</u>
2014	Saka LPG Ltd. Şti.	Makina Mühendisi
2017	AYD Yedek Parça A.Ş.	Araştırma Geliştirme Müh.
2018	Simulmed Simülasyon Ltd. Şti.	Kurucu, Proje Müdürü
2019	MPG Makine Prodüksiyon Grubu A.Ş.	Mekanik Tasarım ve İş Geliştirme Müh.

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

-İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

Hobiler : Doğa Kampı, Resim, Fotoğrafçılık