

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MEKANİK BİLİM DALI**

**BURULMA YÜKÜNE MARUZ KALMIŞ CAM LİFİ TAKVİYELİ
FİLAMENT SARGI KOMPOZİT BORULARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Abdullah Recep ÖZCAN

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Fadıl SOYKÖK**



MANİSA-2018

**Abdullah
Recep
ÖZCAN**

**BURULMA YÜKÜNE MARUZ KALMIŞ CAM LİFİ TAKVİYELİ FİLAMENT SARGI
KOMPOZİT BORULARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

2018

TEZ ONAYI

Abdullah Recep ÖZCAN tarafından hazırlanan "Burulma Yüküne Maruz Kalmış Cam Lifi Takviyeli Filament Sargı Kompozit Boruların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" adlı tez çalışması 10/12/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği **Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman **Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Fadıl SOYKÖK**
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi **Dr. Öğr. Üyesi Recep Onur UZUN**
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi **Dr. Öğr. Üyesi Okan ÖZDEMİR**
Dokuz Eylül Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Abdullah Recep ÖZCAN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	7
2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	9
2.1.1. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler	9
2.1.1.1. Partikül Kompozit Malzemeler	10
2.1.1.2. Pul Kompozit Malzemeler	11
2.1.1.3. Fiber Kompozit Malzemeler	11
2.1.1.3.1. Cam Elyaf	12
2.1.1.3.2. Karbon Elyaf	14
2.1.1.3.3. Aramid Elyaf	14
2.1.2. Matris Türüne Göre Kompozit Malzemeler	16
2.1.2.1. Polimer Matrisli Kompozitler	16
2.1.2.1.1. Termoplastikler	18
2.1.2.1.2. Termosetler.....	18
2.1.2.2. Metal Matrisli Kompozitler	19
2.1.2.3. Seramik Matrisli Kompozitler	20
2.1.2.4. Karbon-Karbon Kompozitler	21
2.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	22
2.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	24
2.3.1. Filament Sargı Yöntemi.....	25
2.3.1.1. Polar Sargı.....	27
2.3.1.2. Helisel Sargı.....	28
2.3.1.3. Çevresel Sargı	28
2.3.2. Pre-preg Üretimi	29
2.4. Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Bulunması	29
2.5. Kompozit Malzemeler için Hata Teorileri	39
2.5.1. Maksimum Gerilme Hasar Teorisi	40
2.5.2. Maksimum Şekil Değişirme Hasar Teorisi	41
2.5.3. Tsai-Hill Hasar Teorisi	41
2.5.4. Tsai-Wu Hasar Teorisi.....	42
3. DENEYSEL KISIM	43
3.1. Giriş	43
3.2. Materyal ve Yöntemler.....	46
3.2.1. Kompozit Tüplerin Üretimi	46
3.2.2. Kompozit Tüplerin Burulma Testleri	48
3.2.3. Sayısal Analiz için Temel Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi ...	50
3.2.4. Silindirik Tüplerin Nümerik Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Analizi (FEA)	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	55
4.1. Burulma Yükleme Testi Sonuçları	55

4.2. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile Elde Edilen Nümerik Sonuçlar	60
4.3. Hasar Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi ve Hasar Modları	62
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	75



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ACP	Composite Post Processing (Kompozit Çözüm Sonrası İşlemcisi)
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CTP	Cam Takviyeli Plastik
E₁	Boyuna Elastisite Modülü
E₂	Enine Elastisite Modülü
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
FRP	Fiber Takviyeli Plastik
FW	Filament Sargı
G₁₂	Düzlem İçi Kayma Modülü
G_{rθ}	r-θ Düzlemindeki Kayma Modülü
HM	Yüksek Modül
HS	Yüksek Dayanım
k_T	Burulma Rijitliği
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
Nm	Newton Metre
PAN	Poliakrilonitril
PLC	Programlanabilir Akıllı Kontrol Cihazı
PMC	Polimer Matrisli Kompozitler
PRE-PREG	Önceden Epoksi Reçine Emdirilmiş Cam Fiber Elyaf Tabakası
PVC	Polivinil Klorür
S	Düzlem İçi Kayma Dayanımı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Sp.	Numune
T	Burulma Momenti (Tork)
X_c	Boyuna Basma Dayanımı
X_t	Boyuna Çekme Dayanımı
Y_c	Enine Basma Dayanımı
Y_t	Enine Çekme Dayanımı
Ø	Burulma Açısı
v₁₂	Major Poisson Oranı
v₂₁	Minor Poisson Oranı

ϵ_{Lt}	Boyuna Maksimum Elastik Çekme Birim Şekil Değişimi
ϵ_{Tt}	Enine Maksimum Elastik Çekme Birim Şekil Değişimi
°	Derece
[±30]_{FW}	30° Helis Açısına Sahip Filament Sargılı İnce Cidarlı Silindirik Numune
[±45]_{FW}	45° Helis Açısına Sahip Filament Sargılı İnce Cidarlı Silindirik Numune
[±60]_{FW}	60° Helis Açısına Sahip Filament Sargılı İnce Cidarlı Silindirik Numune
[±75]_{FW}	75° Helis Açısına Sahip Filament Sargılı İnce Cidarlı Silindirik Numune
[0, 90]_{PP}	0° ve 90° Oryantasyonlu Liflere Sahip Pre-preg Malzemedden Üretilmiş İnce Cidarlı Silindirik Numune

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Elyaf ve reçine kullanılarak kompozit malzeme oluşturulması.....	8
Şekil 2.2. Takviye şekline göre kompozit türleri	10
Şekil 2.3. Cam elyaf görünümü	13
Şekil 2.4. Çeşitli dokuma türlerine sahip karbon kumaşlar	14
Şekil 2.5. Aramid elyaf, karbon-aramid elyaf ve kompozit zırh.....	15
Şekil 2.6. Kompozit malzeme yapısı	16
Şekil 2.7. Fiber formları	22
Şekil 2.8. Uzay mekiğinde kompozit kullanımı.....	24
Şekil 2.9. Filament sargı yöntemiyle üretilmiş a) Açık silindir b) Basınçlı tüp .	26
Şekil 2.10. Filament sargı yöntemiyle üretilen ürünler.....	26
Şekil 2.11. Filament sargı makinesinin şematik görünümü	26
Şekil 2.12. Polar sargı modeli	28
Şekil 2.13. Helisel sargı modeli	28
Şekil 2.14. Çevresel sargı modeli.....	28
Şekil 2.15. Pre-preg bant üretimini gösteren şematik diyagram	29
Şekil 2.16. Kompozit bir yapıda ana malzeme doğrultuları.....	30
Şekil 2.17. Elyaf eksenine doğrultusunda (1 yönünde) yüklenen bir hacim elemanı	31
Şekil 2.18. Elyaf eksenine dik doğrultuda (2 yönünde) yüklenen bir hacim elemanı	32
Şekil 2.19. Üç simetri düzlemine sahip malzeme	35
Şekil 2.20. Ortotropik bir malzemeye x_1-x_2 ve x_1-x_3 simetri düzlemlerinde uygulanan σ_1 gerilmesi	35
Şekil 2.21. Fiber takviyeli enine izotropik bir kompozit malzeme	37
Şekil 2.22. Açılı bir laminadaki global ve lokal eksenler	38
Şekil 2.23. İnce bir ortotropik laminada iki boyutlu gerilme durumu	40
Şekil 3.1. Filament sargı makinesi	47
Şekil 3.2. Üretilen tüplerin geometrisinin şematik görünümü	48
Şekil 3.3. Burulma momenti (T)-burulma açısı (θ) diyagramı.....	48
Şekil 3.4. Burulma test cihazı ve numunenin özel bir aparat ile makineye monte edilmesi.....	49
Şekil 3.5. Silindirik kompozit tüp örneklerinin burulma deneylerinde kırılma hasarı.....	50
Şekil 3.6. Tek yönlü kompozit plakanın boyuna ve enine kayma özelliklerini belirlemek için yapılan V-çentikli (V-Notched Rail Shear Test) kayma testleri.....	51
Şekil 3.7. Boru geometrisinin sıfır kalınlıklı kabuk eleman olarak oluşturulması	52
Şekil 3.8. Borunun mesh görüntüsü	52
Şekil 3.9. Borunun katman görüntüsü.....	53
Şekil 3.10. Fiber yönlenmesi.....	53
Şekil 3.11. Sonlu Elemanlar Analizi için ANSYS geometrik tasarım modelleyicisinde tasarlanan kompozit tüp modelinin deforme olmuş görünümü	54
Şekil 4.1. Farklı sarım açılarına bağlı olarak elde edilen maksimum burulma yükü grafiği	56

Şekil 4.2. Burulma yükü altında kompozit tüplerin sarım açısının ve üretim yönteminin hasar anındaki maksimum burulma açısı üzerindeki etkileri.....	56
Şekil 4.3. Burulma yükü altında kompozit tüplerin sarım açısının ve üretim yönteminin burulma rijitliği üzerindeki etkileri	57
Şekil 4.4. Burulma deneylerinden elde edilen $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 45]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$, $[\pm 75]_{FW}$ ve $[0, 90]_{PP}$ numune tiplerine ait yük ve burulma açısı eğrileri.....	58
Şekil 4.5. $[\pm 30]_{FW}$ numune tipine ait deneysel ve nümerik (FEA) yolla elde edilen burulma momenti-burulma açısı eğrileri	60
Şekil 4.6. $[\pm 45]_{FW}$ numune tipine ait deneysel ve nümerik (FEA) yolla elde edilen burulma momenti-burulma açısı eğrileri	61
Şekil 4.7. $[\pm 60]_{FW}$ numune tipine ait deneysel ve nümerik (FEA) yolla elde edilen burulma momenti-burulma açısı eğrileri	61
Şekil 4.8. $[\pm 75]_{FW}$ numune tipine ait deneysel ve nümerik (FEA) yolla elde edilen burulma momenti-burulma açısı eğrileri	62
Şekil 4.9. $[0, 90]_{PP}$ numune tipine ait deneysel ve nümerik (FEA) yolla elde edilen burulma momenti-burulma açısı eğrileri	62
Şekil 4.10. Çeşitli tipteki numunelerin burulma hasarı meydana geldikten sonraki son görünüşleri ve hasar modları	63
Şekil 4.11. $[\pm 45]_{FW}$ örneğinin kırık yüzeyinden alınan 1000x büyütme SEM görüntüsü	64
Şekil 4.12. $[\pm 30]_{FW}$ örneğinin kırık yüzeyinden alınan 1000x büyütme SEM görüntüsü	65
Şekil 4.13. $[\pm 60]_{FW}$ örneğinin kırık yüzeyinden alınan 1000x büyütme SEM görüntüsü	65
Şekil 4.14. $[\pm 75]_{FW}$ örneğinin kırık yüzeyinden alınan 1000x büyütme SEM görüntüsü	66
Şekil 4.15. $[0, 90]_{PP}$ örneğinin kırık yüzeyinden alınan 1000x büyütme SEM görüntüsü	67

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. E-Cam ve S-Cam özelliklerinin karşılaştırılması	13
Tablo 2.2. Kevlar 29 ve Kevlar 49 fiberlerin özellikleri.....	15
Tablo 2.3. Termosetler ve termoplastikler arasındaki farklar	19
Tablo 2.4. Bazı termoset ve termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	19
Tablo 2.5. Kompozitlerde kullanılan bazı seramik elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri	21
Tablo 2.6. Kompozit malzemelerin uygulama alanları	23
Tablo 3.1. E-Cam elyaf epoksi kompozit laminanın temel malzeme özellikleri	51
Tablo 4.1. $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 45]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$, $[\pm 75]_{FW}$ ve $[0, 90]_{PP}$ numune tiplerine ait sonlu elemanlar analizi (FEA) ve deneysel test sonuçları.....	59



TEŞEKKÜR

Bu alıŐma Manisa Celal Bayar Üniuersitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından desteklenmiŐtir (Proje No. 2016-107). Öncelikle Üniuersite'mize bu kaynağı sağladığı için minnettarım. ÇalıŐmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Fadıl SOYKÖK'e de çok teşekkür ediyorum. Ayrıca bu çalışmanın mekanik testlerinin sürdürüldüğü laboratuvarlarda bize her türlü desteği sağlayan Dokuz Eylül Üniuersitesi Makine Müh. Bölümü Mekanik Anabilim Dalı öğretim üyeleri ve araştırma görevlilerine tek tek teŐekkürlerimi sunarım. Son olarak benim bu günlere gelmemde büyük emeği olan, beni sürekli destekleyen ve yanımda olan, maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme teŐekkürü bir borç bilirim.

Abdullah Recep ÖZCAN
Manisa, 2018



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Burulma Yüküne Maruz Kalmış Cam Lifi Takviyeli Filament Sargı Kompozit Boruların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Abdullah Recep ÖZCAN

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Fadıl SOYKÖK

Endüstride kullanımı, dayanım, hafiflik, yüksek elastisite modülü gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı hızlı bir artış trendinde olan silindirik kompozit içi boş millerin maruz kaldığı burulma yüküne karşı mekanik davranışlarının incelenmesi ve ayrıca en uygun sarım açısı ile üretim yönteminin saptanması amaçlanmıştır. $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 45]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$ ve $[\pm 75]_{FW}$ helis açılarında olan filament sargı yöntemiyle üretilmiş numuneler ve $[0, 90]_{PP}$ birbirine dik yönlerde liflerden oluşan pre-preg malzemedен sarım yöntemiyle üretilmiş olan eşdeğer boyutlu ince cidarlı cam fiber/epoksi numunelerin burulma yükü altındaki davranışları, öncelikle deneysel olarak incelenmiştir. Daha sonra, bu deneysel bulgular, ANSYS Programında Sonlu Elemanlar Analizi yöntemiyle elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılarak, oluşturulan sayısal modelin güvenilirliği saptanmıştır. Yapılan analizler sonucunda $[\pm 30]_{FW}$ ila $[\pm 60]_{FW}$ sarım açısı aralığında çalışmak tasarımcılar açısından oldukça uygun gözükmektedir. Bunun yanında, maksimum burulma rijitlikleri açısından bakılırsa $[\pm 45]_{FW}$ sarım açısında olan yapı, kullanıma uygunluk yönünden oldukça öne çıkmaktadır ki, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizlerinde görünen liflerin maruz kaldığı gerilme durumu da bu görüşü doğrular niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Filament sargı, Pre-preg sarım, Kompozitler, Mekanik özellikler, Sonlu elemanlar analizi (FEA)

2018, 75 sayfa

ABSTRACT

Master of Science Thesis

Investigation into the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Filament Winding Composite Pipes Exposed to Torsional Loading

Abdullah Recep ÖZCAN

Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK

When exposed to torsional loading, it is aimed to investigate the mechanical behaviors of the hollow cylindrical composite shafts of which industrial use is in a trend of rapid increase due to its high mechanical properties such as, strength, lightness, high modulus of elasticity and also to determine optimum production method and winding angle. Under the torsional load, the behavior of the equivalent sized thin-walled glass fiber/epoxy specimens produced by the filament winding method with the helix angles of $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 45]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$ and $[\pm 75]_{FW}$ and also produced by wrapping method using $[0, 90]_{PP}$ pre-preg material with the fibers in mutually perpendicular directions were first investigated experimentally. Afterwards, these experimental findings were compared with the numerical results obtained by Finite Element Analysis method in ANSYS Program and the reliability of the generated numerical model was assessed. As a result of the performed analyzes, it seems quite appropriate for designers to work in the range of $[\pm 30]_{FW}$ to $[\pm 60]_{FW}$ winding angles. Furthermore, if evaluated in terms of maximum torsional rigidity, the structure with $[\pm 45]_{FW}$ winding angle from the angle winding structure comes to the fore in terms of suitability for use, such that the state of stress which the fibers observed in the Scanning Electron Microscope (SEM) micrographs had been exposed to, confirms this conclusion.

Keywords: Filament winding, Pre-preg wrapping, Composites, Mechanical properties, Finite element analysis (FEA)

2018, 75 pages

1. GİRİŞ

Günümüzde bilim ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte geleneksel malzemeler ihtiyaçları karşılayamaz hale gelmiştir. Bu gelişmelere insanların ihtiyaçları da eklenmesiyle birlikte yüksek özelliklere sahip olan malzeme ihtiyacı artmıştır. Fakat yeryüzünde ana malzemelerin sınırlı ve ihtiyaçları karşılayamamasından dolayı, malzeme özellikleri teknolojinin gelişimine ayak uydurması zorlaşmıştır.

Bir yapının imalatında kullanılacak malzemelerde hafiflik, sağlamlık, esneklik, işlenebilirlik, çevre şartlarına ve aşınmaya karşı dayanıklılık gibi temel özelliklerle birlikte zamana bağlı olarak yorulma, eğilme, darbe ve kimyasal dayanım, çatlama gibi özelliklerin uygunluğu da aranmaktadır. Bu özelliklerin tamamını tek bir malzeme bulmak oldukça zordur. Mühendisler, bu ihtiyaçları karşılamak amacıyla yeni tür malzeme arayışına girmişlerdir. İki ya da daha fazla malzemenin uygun özelliklerini tek malzeme toplayarak veya yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi sonucu oluşturulan malzemelere kompozit malzemeler denir.

Hava ve uzay araçlarının yapımına başlanmasıyla birlikte mevcut malzemelerin özelliklerinden, bilimin gelişmesine bağlı olarak günümüzün ihtiyaçlarını karşılayacak hem ekonomik hem de teknik yönden daha uygun malzemeler imal edilmesi ile ilgili çalışmalar arttırılmıştır. Buna bağlı olarak hem ekonomik hem daha yüksek mukavemetli hem de çok hafif malzemeler imal edilmeye başlanmıştır. Kompozit malzemeler; otomotiv, uzay, uçak sanayi, basınçlı tanklar, makine ve tekne gövdeleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler düşük özgül ağırlıklara sahip olmalarından dolayı araçlarda yakıt ekonomisi ve yüksek hız gibi özellikler sağlamaktadır.

Havacılık ve uzay sanayi başta olmak üzere birçok alanda kullanımı hızla yaygınlaşmaya devam eden kompozit malzemelerin anizotropik yapısı gereği özellikle taşıyıcı olan kısımlarda maruz kaldığı çok eksenli gerilme durumlarının sayısal ve deneysel yöntemlerle araştırılması önem arz etmektedir. Araç gövdelerinde genellikle taşıyıcı olarak düşünülen içi boş silindirik malzemeler eğilme, burulma ve burkulma gibi farklı zorlanmaları aynı anda veya değişimli

olarak karşılayabilmektedir. Bu durumda testlerin belirtilen yükleme durumlarının, farklı zamanlarda sırayla uygulanması suretiyle gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Söz konusu çalışma genel itibariyle filament sargı metoduyla üretilmiş cam lifi takviyeli borularda burulma zorlanması ile meydana gelen hasarın daha sonraki mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi çerçevesinde olmuştur. Aşağıda bahsedilen gerçekleştirilmiş birçok çalışmada da bu tip malzemeler sayısal ve deneysel yöntemlerle araştırılmış olup çeşitli sonuçlara ulaşılmıştır.

P. S. Filho ve ark., tahrik mili olarak kullanılmak üzere $[\pm 22^\circ/\pm 45^\circ]$, $[\pm 89^\circ/\pm 45^\circ]$ ve $[\pm 45^\circ/\pm 45^\circ]$ 'de filament sargı yöntemiyle üretilen karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit silindirlerin burulma, radyal ve eksenel basınç altında mekanik davranışını analitik, sayısal ve deneysel yaklaşımlarla incelemiştir. Tahrik mili olarak kullanılacak kompozit silindirler kritik hız, kritik burkulma torku ve yük taşıma yeteneği gibi çeşitli ihtiyaçları karşılamalıdır. Mekanik analizler analitik ve sayısal yaklaşımlar kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları arasında iyi ilişki bulunmuştur. $[\pm 45^\circ/\pm 45^\circ]$ laminatın tork taşıma kapasitesi, yüksek kayma mukavemeti nedeniyle en iyi performansı sergilemiştir. Radyal basınç testlerinde, yalnızca $[\pm 45^\circ/\pm 45^\circ]$ laminat kritik yükün üstünde delaminasyona uğramayarak burkulmamıştır. $[\pm 89^\circ/\pm 45^\circ]$ laminat en iyi kritik burkulma tork davranışını sunmuştur. Eksenel basınç testlerinde, yapıların hiçbiri kırılmamış ve $[\pm 22^\circ/\pm 45^\circ]$ silindir, eksenel yöne daha yakın açılara sahip tabakalar nedeniyle en iyi davranışı göstermiştir. Yapılan deneyler sonucunda $[\pm 45^\circ/\pm 45^\circ]$ filament sargı kompozit silindir, tasarım için düşünülen parametrelere dayanılarak en iyi mekanik performans göstermiştir ayrıca, çelik esaslı bir tahrik mili ile karşılaştırıldığında %47 ağırlık tasarrufu sağlayarak tatmin edici genel davranış sunmuştur [1].

S.A. Mutasher ve ark., hibrit alüminyum/kompozit tahrik milinin statik burulma yeteneğini incelemek için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Hibrit mil filament sargı yöntemi kullanılarak, alüminyum boru üzerine cam ve karbon fiberlerin farklı sarım açılarında ve katman sayılarında sarılması suretiyle imal edilmiştir. Yaptıkları çalışmanın amacı uygulanan moment sonucunda milde oluşacak burulma açılarını ve oluşabilecek hata modlarını tespit etmektir. Yapılan deneyler sonucunda, hem cam hem de karbon fiberler için 45° 'de üretilen

numunenin statik tork kapasitesinin, 90°de üretilen numuneden daha büyük olduğunu göstermektedir. [+45/-45]_{3s} laminalar için, karbon fiberden üretilmiş hibrit milin maksimum statik burulma mukavemeti, cam elyaflara göre yaklaşık %36 daha yüksektir. Ayrıca, [+45/-45]_{6s} karbon fiber ile sarılmış bir alüminyum borunun tork kapasitesinin, sadece alüminyumdan oluşan boruya göre yaklaşık 14 kat daha yüksek olduğu saptanmıştır [2].

Shahanawaz Alam ve ark., kompozit malzemedan yapılmış tahrik mili ile çelikten yapılmış tahrik milinin yapısal ve titreşimsel davranışını incelemiştir. Tahrik milleri genel olarak, çelik alaşımından yapılmasından dolayı düşük yorulma direnci ve yüksek ağırlık gibi dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajlardan dolayı çelik tahrik milleri günümüzde yerini giderek kompozit malzemedan yapılmış tahrik millerine bırakmaktadır. Grafit, Kevlar, karbon, cam gibi kompozitlerden yapılmış miller, çelik millere kıyasla daha yüksek özgül mukavemet, düşük ağırlık, yüksek sönümlenme kapasitesi, daha uzun ömür, yüksek kritik hız ve daha büyük tork taşıma kapasitesi gibi avantajlara sahiptir. Çalışmada performans ve tasarımı optimize etmek amacıyla geleneksel malzeme çeliği SM45C, HS karbon epoksi, E-Cam epoksi, HM karbon epoksi kullanılmıştır. Tahrik mili, Creo 3.0 yazılımı kullanılarak modellenmiştir ve sonlu eleman analizi Ansys 14.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler sonucunda, toplam deformasyon, eşdeğer gerilme (von-Mises), maksimum kayma gerilmesi değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, HS kompozit tahrik mili uygulaması için diğer kompozit malzemelere kıyasla daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır [3].

Chowdhuri ve Hossain, yaygın olarak kullanılan iki parçadan oluşan araç tahrik mili yerine, tüm gereksinimleri karşılayabilecek tek parçadan oluşan kompozit bir tahrik milinin optimum tasarımı konusunda çalışmışlardır. Çalışmada grafit/epoksi ve cam/epoksi'den oluşan kompozit miller kullanılmıştır. Çalışmanın amacı en hafif, en ucuz, ve aşağıdaki yük gereksinimlerini sağlayan tahrik milini tasarlamaktır. Burada dikkate alınan temel şartlar burulma mukavemeti, burulma burkulması ve yüksek eğilme doğal frekansı değerleridir. Çalışmanın son bölümünde, Maksimum Gerilme Hata Teorisi kullanılarak önerilen tasarımın aşamalı hata analizi için Promal yazılımı ile elde edilen sonuçları göstermişlerdir. Yapılan farklı tasarımlar sonucunda, [0/90/0/45/90/45]_s istifleme sırası ile

cam/epoksi'den üretilen tahrik milinin tüm ihtiyaçları karşıladığı belirlenmiştir ayrıca olası bir başarısızlık durumunda mil tamamen hasara uğramayacağı için değiştirilebilir veya tamir edilebilir olacağı belirtilmiştir [4].

Filament sargılı boruların endüstriyel uygulamaları incelendiğinde ve şu ana kadar yapılan akademik çalışmalar da göz önüne alındığında daha çok iç basınca maruz elemanlar için tercih edilen bir üretim yöntemi olduğu, taşıyıcı eleman olarak kullanımının ise çok fazla yaygınlaşmadığı görmekteyiz. Oysa gerek hafifliği, gerekse özgül dayanımı açısından değerlendirilirse, taşıyıcı elemanlarda kullanılan geleneksel malzemelere nazaran daha üstün bir uygulama olanağı sunduğu anlaşılabilir. Bu açıdan filament sargılı kompozit boruların mekanik özelliklerinin daha kapsamlı bir şekilde incelenmesi muhtemel kullanım alanlarının yaygınlaşmasına imkân sağlayacaktır.

Aşağıda bahsedilen iç basınca maruz elemanlar için gerçekleştirilmiş birçok çalışmada bu tip malzemeler sayısal ve deneysel yöntemlerle araştırılmış olup çeşitli sonuçlara ulaşılmıştır.

Tarakçıoğlu ve arkadaşları alternatif iç basınç altında yüzey çatlağına sahip E-cam/epoksi malzemeden yapılmış $[\pm 55^\circ]_3$ filamentli kompozit boruların ASTM D-2992'ye göre yorulma davranışını incelemiştirlerdir. Yorulma testleri 250 bar PLC kontrollü servo hidrolik test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak CTP boruların arızası incelenmiş ve yorulma testi sonuçları (S-N) eğrileri ve delaminasyon hasar bölgesi alan çevrimi (A-N) eğrileri vasıtasıyla sunulmuştur [5].

Martins ve arkadaşları deneysel çalışmalarında filament sargılı kompozit tüplerde patlama basıncıyla iç basınç etkilerini araştırmışlardır. Abaqus programı ve alt program olarak Umat kullanılarak kademeli hata analizi gerçekleştirilmiştir. Dört tip ince cidarlı cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit borular değişik sarım açılarında üretilmiş ve kapalı uçlu yükleme koşulları için test edilmiştir. Astarlanmamış olan tüplerde kaçakların bulunmasının ardından PVC boru ile kaplanıp basınç ile patlatma hatalarının gözlemlenmesi için test edilmiştir. Bu testler özellikle yüksek basınca maruz sistemler için yapılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar bütün fiber sarım açılarında birbiriyle uyumlu sonuçlar vermiştir [6].

Martins ve arkadaşlarının bir çalışmasında filament sargı yöntemiyle üretilmiş kompozit tüplerin tasarımının önemli yönleri üç parametrik çalışmaya ayrılarak tartışılmıştır. İlk çalışma hidrostatik testteki sonsuz boruda gerçekleştirilebilen minimum uzunluğu göstermek için yapılmıştır. İkinci çalışma farklı şartlardaki iç basınç altındaki kompozit tüpün optimum sarım açısını bulmak için yapılmıştır. Son çalışmanın amacı ise çap ve kalınlığın tüp patlama testindeki etkisini görmek olmuştur. Kademeli hata analizi, Abaqus yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modellemelerin doğruluğu daha önceki testten elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak denetlenmiştir [7].

Çoklu sarım açısına sahip filament sargılı yapılarda filament katmanlarında oluşan deformasyon ve gerilmeleri Xing ve arkadaşları tespit etmiştir. Gerçekleştikleri çalışmada çok açılı sarıma sahip hibrit filament kalın silindirik boruların deformasyon ve gerilimi, aksenal yükler, iç ve dış basınç altında incelemiştir. Fiber katmanlardaki her bir yüzeysel taşıyıcı ara yüzeydeki deformasyon ve gerilmeler göz önüne alındığında, analitik analiz neticesinden boyuna ve yanal gerilmeler fiber yönünde, kayma gerilmesi ise fiber ara yüzeylerinde görülmüştür. Modellemede silindirik filament tekli sarım açısı, astarlı filament sargı kanalı ve sandviç boru ile tek yada çok çekirdekli katmanlar düşünülmüştür. Elde edilen analitik sonuçlar ile sonlu eleman metoduyla ulaşılan sayısal sonuçlar birbirine çok yakındır. Araştırmalar gösteriyor ki, malzeme dayanımı ve çalışma basıncı direnci filament sargı çoklu sarım açısı yöntemiyle arttırabilir [8].

A. Hocine ve arkadaşları, iç basınç yüklemesine tabi tutulan sırasıyla $[\pm 50^\circ]_3$, $[\pm 55^\circ]_3$ ve $[\pm 60^\circ]_3$ istifleme dizilerinde üretilen hidrojen depolama tanklarının deneysel ve analitik incelemesini yapmışlardır. Tank, bir metal astar üzerine kaplanmış karbon/epoksi malzemedен yapılmıştır. Teorik kısımda, laminat kompozit anizotropik elastik bir malzeme olarak kabul edilirken, astar kısmının ise elastoplastik malzeme olarak kabul edildiği bir analitik model önerilmiştir. Önerilen analitik model, statik yüklemeye tabi tutulmuş olan tankın 1750 barlık patlama basıncına ulaşmak için gereken kompozit tabakaların sayısının tahmin edilmesini ve silindirik yapıların hata sınırları açısından tasarlanması için güvenilir bir araçtır. $[\pm 55]_3$ istifleme dizisinde üretilen tanklar için patlama testi gerçekleştirilmiş ve 718

barlık basınçta bir hasar meydana gelmiştir. Deneysel bölümün amacı, prototip depolama tankını imal edip 700 bar hidrojen basıncında bir çalışma basıncı elde ederek teorik modelin sonuçlarını doğrulamaktır. Analitik çözümlerden hesaplanan gerilme ve yer değiştirmelerin, sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla iyi bir şekilde uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır [9].

Kompozit barların üretim yöntemi olan filament sarım yöntemi birçok farklı lif açısında malzemenin üretilmesine imkân tanımaktadır. Bu avantajlı durum ise biz araştırmacıları hangi sarım açısında ve hangi yükleme durumu için daha olumlu sonuçlar elde edebileceği konusunda çalışmalara sevk etmektedir. Bu çalışma kapsamında uygulanan yükleme durumu ise kompozit barların çalışma şartlarındaki karşılaşılabileceği dış yüklerden sadece biridir. İleride daha çeşitli test yöntemleri, geliştirilecek test aparatları ile uygulanabilir ve bu tip yüklemeler için de optimum tasarımlar geliştirilebilir.

Malzemenin sarım açılarında yapılan değişikliklerin, burulma momentinin her bir artışına karşılık gelen burulma açılarında oluşturduğu değişiklikler gözlemlenmiştir. Ayrıca yine her bir sarım açısında gerçekleşen maksimum uygulanabilir burulma momentleri saptanmıştır. Elde edilen veriler, sonlu elemanlar modeline dönüştürülen numuneler üzerine uygulanan yüklere karşılık burada elde edilen sonuçlar ile mukayese edilerek yorumlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

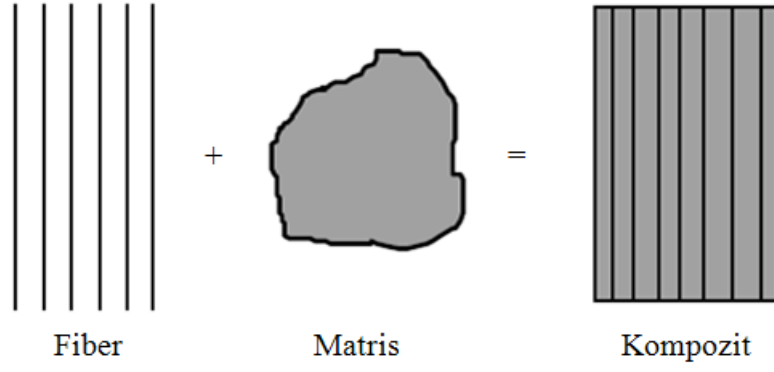
Malzemeler genellikle;

- Metaller,
- Seramikler,
- Organik malzemeler olarak üç ana gruba ayrılırlar.

Bu üç ana grubun yanında kompozitler, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar [10]. Başka bir deyişle, birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş farklı tür malzemelerden oluşan malzeme grubuna kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler takviye elemanı ve matris fazından oluşan çok fazlı malzeme sayılırlar [11].

Günümüzde binaların, köprülerin vb. yapıların yapımında yaygın olarak kullanılan kompozitlerden olan beton, kum ve çakıldan meydana gelen parçacıklı malzemenin çelik çubuklar ile desteklenmesiyle oluşur. İnsanlık tarihinin en eski yapı malzemesi olarak bilinen ve günümüzde hala çeşitli bölgelerde binaların yapımında kullanılan kerpiç, çamur (kil) ve samanın karıştırılması ile oluşturulur. Kerpice, saman ve bitkisel lifler takviye edilerek dayanımının artması sağlanır [12].

Kompozit malzemeler, mukavemet/yoğunluk oranının yüksek olması nedeniyle yaygın kullanım alanı bulmaktadır [13]. Kompozit malzemeler matris adı verilen bir ana bileşenle, yüksek mukavemete ve yüksek elastisite modülüne sahip olan takviye elemanı (elyaf, parçacık, vb.) olarak adlandırılan yapısal bileşenlerden oluşurlar (Şekil 2.1) [14]. Takviye elemanı olarak değişik yapılara sahip kısa ve uzun elyaflar, whiskerler, kırılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Takviye elemanının temel fonksiyonu, gelen yükü taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını artırmaktır. Matrisin fonksiyonu ise elyaflara yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için elyaf ve matrisi bir arada tutmak ve takviye elemanın yüzeylerini çevresel etkilere karşı korumaktır [10].



Şekil 2.1. Elyaf ve reçine kullanılarak kompozit malzeme oluşturulması [15]

Kompozit malzemelerde; genellikle bir bileşenle tek başına elde edilemeyen özelliklerin, diğer bileşenlerle birlikte en iyi özelliklerinin bir malzemede toplanması önemli avantaj oluşturur. Kompozit malzeme üretilmesi ile aşağıdaki bazı özellikler sağlanabilmektedir. Bunlar genel olarak şöyle sıralanabilir [10]:

- Yüksek mukavemet
- Yüksek rijitlik,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Mükemmel aşınma direnci,
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- İyi korozyon direnci,
- İyi ısı iletkenliği,
- Hafiflik,
- Estetik görünüm.

Bir kompozit yapıda yukarıdaki özelliklerin hepsi aynı zamanda oluşmasına ihtiyaç yoktur ve malzemenin uygulanacağı yerde hangi özelliklere ihtiyaç varsa ona göre matris ve takviye elemanı seçimi yapılır. Yukarıda belirtilen bu özellikler için gerekli koşullar; uygun matris, uygun takviye elemanı, üretim tekniği, matris ve takviye elemanının mukavemet özellikleri vb. diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılırsa istenilen özelliği elde etmek mümkündür. Uygun matris ve takviye elemanı seçiminin, sistemin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi büyüktür [10].

2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Yeni gelişen bir malzemeyi kompozit olarak adlandırmak için aşağıdaki özellikleri taşınmalıdır [10]:

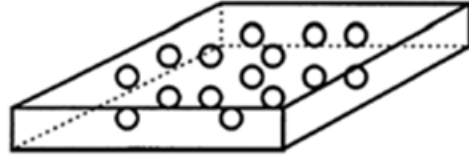
- İki yada daha fazla mekanik ve fiziksel özelliği ayrı olan malzemelerin birleştirilmesi ve farklı ara yüzeye sahip olmaları,
- Herhangi bir bileşenle tek başına elde edilemeyen mekanik özelliklerin gerçekleştirilmesi,
- Yeni uygun özellikler elde etmek amacıyla bir malzemenin farklı özellikteki bir malzeme içerisine kontrollü şekilde yerleştirilmesiyle kompozit bir malzeme elde edilmesi,
- Kompoziti oluşturan elemanların en iyi özelliklerinin bir arada toplanması, gereklidir.

Kompozit malzemeler takviye geometrisine göre (parçacık, pul ve fiber) veya matris türüne göre (polimer, metal, seramik ve karbon) sınıflandırılabilir. Sınıflandırma yaygın olarak, matris türüne göre yapılır [16, 17].

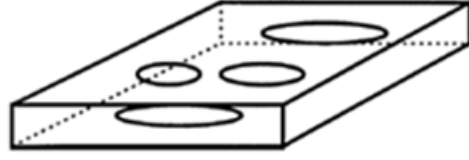
2.1.1. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit yapılarda takviye malzemesinin seçiminde; hafiflik, mukavemet, ekonomiklik, elektrik ve ısı iletkenliği vb. unsurlar etkilidir [18].

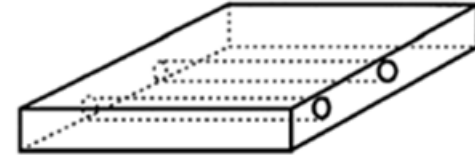
Takviye elemanına ve geometrisine göre kompozit malzemeler kendi arasında parçacık kompozitler, pul kompozitler ve fiber kompozitler olmak üzere 3 gruba ayrılabilir. Takviye geometrisine göre sınıflandırma Şekil 2.2’de görülmektedir.



Partikül kompozitler



Pul kompozitler



Fiber kompozitler

Şekil 2.2. Takviye şekline göre kompozit türleri [16]

2.1.1.1. Partikül Kompozit Malzemeler

Partikül kompozit malzemeler; tek veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemelerdir. En çok kullanılan parçacıklar, Al_2O_3 ve SiC'den oluşan seramiklerdir. Partikül kompozit malzemelerde yük, elyaf ve matris tarafından birlikte taşınır. Bu kompozitler; malzemenin mukavemetini arttırmaktan ziyade alışılmışın dışında yeni özellikler elde etmek için üretilmektedir [10].

Bu kompozitlerin başlıca bileşenleri mika, silis, cam küreler, kalsiyum karbonat ve diğer parçacıklardır. Genel olarak bu parçacıklar, malzemenin yük taşıma kapasitesine katkıda bulunmaz ve matris için bir takviye olmaktan çok dolgu maddesi gibi davranırlar [19].

Parçacık takviyeli kompozitlerde takviye elemanı, genelde küçük boyutlara sahip olan yapılardır. Takviye elemanları olarak kullanılan parçacıklar çeşitli geometrilere sahip olabilirler. Takviye malzemesinin boyutları, takviye malzeme özelliklerinin, kompozit malzemeye olan katkısını belirler. Yüksek mukavemet için parçacıklar her yönde hemen hemen aynı boyutta olmalıdır. Parçacık takviyeli bir kompozit yapıda takviye elemanın işlevsel olabilmesi için, parçacıklar matris boyunca küçük ve eşit olarak dağıtılmalıdır. Uzun boyutlara sahip takviye elemanı,

kompozit yapıda oluşan çatlakların büyümesini engeller. Bu nedenle lifler, matrisin kırılma dayanımını arttırmak için etkili takviyelerdir. Parçacıklı malzemeler, yaygın olarak yüksek sıcaklık performansını geliştirmek, sürtünmeyi azaltmak, aşınma dayanımını arttırmak, makinede işlenebilirliğini geliştirmek, yüzey sertliğini arttırmak amacıyla kullanılsa da, birçok durumda parçanın maliyetini azaltmak için kullanılırlar [20, 21].

2.1.1.2. Pul Kompozit Malzemeler

Pul kompozitler matrisler içindeki düz takviye elemanlarından oluşur. Pul malzemeleri cam, mika, alüminyum ve gümüşdür. Bu kompozitler, yüksek düzlem dışı eğilme modülü, yüksek mukavemet ve düşük maliyet gibi avantajlar sağlarken, yönlendirilmesi kolay olmadığından dolayı kullanılacakları malzemeler sınırlıdır [16].

2.1.1.3. Fiber Kompozit Malzemeler

Fiber kompozitler genellikle anizotropik özellikler gösterir ayrıca kısa (süreksiz) veya uzun (sürekli) fiber takviyeli matrislerden oluşur [16]. Fiber takviyeli kompozit malzemeler elyafların matris yapıda yer almasıyla oluşur. Elyaflar, boyları çaplarına göre çok büyük olan malzemelerdir. Kompozit bir yapıda liflerin matris içinde yerleşimi ve oranı kompozit yapının mukavemeti ve diğer özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olan unsurlardandır. Uzun elyafların matris içine birbirine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaf doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir [22].

Lifler, elyaf takviyeli kompozit yapıların temel bileşenleridir. Elyaflar kompozit bir bileşenin büyük bölümünü oluştururlar ve bileşene etki eden yükün büyük kısmını paylaşırlar. Kompozit bir yapıda, fiber tipinin uygun seçimi, fiber hacmi, fiber uzunluğu ve oryantasyonu aşağıdaki özellikleri etkilediği için çok önemlidir [19]:

- Yoğunluk
- Çekme mukavemeti ve modülü
- Basma mukavemeti ve modülü
- Yorulma direnci

- Elektriksel ve ısı iletkenlikler
- Maliyet

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, sadece elyafın özelliklerine değil, aynı zamanda uygulanan bir yükün matris fazıyla liflere aktarılmasına da bağlıdır. Yük iletimi için önemli olan husus, fiber ve matris fazları arasındaki ara yüzey bağının büyüklüğüdür. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise elyaflarla temas azalacaktır. Ayrıca nem emilimi elyaf ile matris arasındaki ara yüzey bağını olumsuz yönde etkileyen bir özelliktir [21, 22].

Kompozit malzeme üretiminde sağladıkları yüksek mukavemet ve hafiflik nedeniyle takviye malzemesi olarak çoğunlukla cam, karbon, boron gibi inorganik elyaflar veya aramid, naylon, polietilen gibi yüksek performanslı sentetik elyaflar tercih edilmektedir [18].

Elyaf takviyeli kompozitlerde takviye malzemesi olarak ilk sırayı ekonomik olması ve yüksek mukavemet gibi özelliklerinden dolayı cam elyaf almıştır. Matris malzemesi olarak plastik reçineler en fazla kullanılan türlerdir. Polyester, ekonomik olması sebebiyle plastik reçine olarak ilk sırayı almaktadır. Yüksek mukavemet, kimyasal ve çevresel koşullara dayanım sebebiyle epoksi reçineler uzay, havacılık, ev ve spor aletleri yapımına kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Grafit-epoksi ve Kevlar-epoksi kompozitler olarak bilinen ileri kompozitler, uzay ve havacılık endüstrisinin temel malzemelerini oluştururlar [23, 24].

2.1.1.3.1. Cam Elyaf

Cam elyafın esasını; silis-kum (SiO_2) meydana getirmekle beraber belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşur. Cam elyaflar, polimer matrisli kompozitler (PMC) için kullanılan takviye liflerinin en yaygın olanıdır. Cam elyaflar, matris içinde bulunan dokuma kumaş, kırılmış elyaflar, uzun sürekli elyaf ve kısa süreksiz elyaf biçiminde oluşan bir kompozittir (Şekil 2.3). Cam elyafların başlıca avantajları, düşük maliyet, yüksek gerilme mukavemeti, yüksek kimyasal direnç ve mükemmel izolasyon özellikleridir. Bu malzeme grubunun bazı sınırlamaları vardır. Yüksek mukavemete sahip olmalarına rağmen çok sert değildirler ve bazı uygulamalar için

gerekli olan sertliği göstermezler. Ayrıca düşük çekme modülü, hareket esnasındaki aşınmaya duyarlılık ve düşük yorulma direnci dezavantajları arasındadır [16, 19].



Şekil 2.3. Cam elyaf görünümü [25]

Fiber takviyeli plastik (FRP) endüstrisinde yaygın olarak kullanılan iki cam elyaf türü E-Cam ve S-Camdır. E-Camdaki “E” elektrikten gelir çünkü bu fiberler elektrik uygulamaları için tasarlanmıştır. Ancak dekorasyon ve yapısal uygulamalar gibi birçok farklı amaç için de kullanılmaktadır. S-Camdaki “S” yüksek silika içeriği anlamına gelmektedir. E-Cam ile karşılaştırıldığında S-Cam fiberler yüksek sıcaklıklarda daha yüksek mukavemet ve yorulma direncine sahiptir. S-Cam fiberler uzay uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. E-Cam ve S-Cam fiberlerin özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir [16, 19].

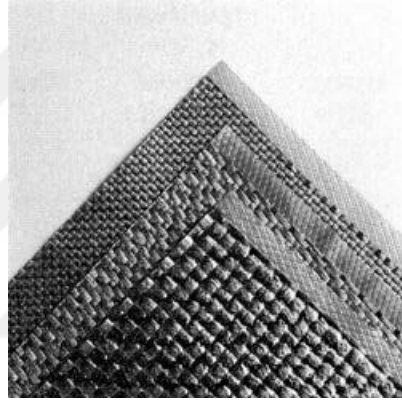
C-Cam, yüksek korozyon direnci gerektiren depolama tankı gibi kimyasal uygulamalarda kullanılır. İnşaat gibi yapısal uygulamalarda kullanılan R-Cam, düşük dielektrik sabitleri gerektiren uygulamalar için kullanılan D-Cam (dielektrik) ve yüzey görünümü iyileştirmekte kullanılan A-Cam (görünüş) gibi çeşitli cam elyaf türleride mevcuttur [16, 19].

Tablo 2.1. E-Cam ve S-Cam özelliklerinin karşılaştırılması [16]

Özellik	Birim (SI)	E-Cam	S-Cam
Özgöl ağırlık	-	2,54	2,49
Elastisite modülü	GPa	72,40	85,50
Maksimum çekme mukavemeti	MPa	3447	4585
Termal genişleme katsayısı	$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	5,04	5,58

2.1.1.3.2. Karbon Elyaf

Karbon, polimer matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan yüksek performanslı bir fiber malzemedir. Karbon elyafı, karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu anlaşıldıktan sonra üretilmeye başlanmıştır. Karbon elyaflar, PAN (Poliakrilonitril), rayon ve petrol yan ürünü olan zift gibi bazı organik maddelere yüksek basınç ve sıcaklıklarda ısı işlem uygulanarak üretilir. Karbon elyaflar diğer elyaf türlerine göre daha yüksek elastisite modülüne sahiptirler ve oda sıcaklığında, nemden veya çok çeşitli çözücülerden, asitlerden ve bazlardan etkilenmezler. Ayrıca 1500 °C'ye kadar olan sıcaklıklara dayanabilmektedir. Karbon elyaflar Şekil 2.4'te gösterildiği gibi uygulama koşullarına göre çeşitli dokuma türlerinde olabilir [21, 26].



Şekil 2.4. Çeşitli dokuma türlerine sahip karbon kumaşlar [15]

Karbon elyaflar çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaflar tamamen karbonlaşır ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde hemen hemen karbon elyafı ile grafit elyafı aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde çok yüksek mukavemet ve sertlik özellikleri gösterir. Karbon elyafının üretim maliyeti yüksek olduğu için yüksek mukavemet istenilen yerlerde, ileri kompozitler kullanılarak havacılık/uzay/savunma sanayinde, spor malzemelerinde ve değerli tıbbi malzemelerin uygulamalarında kullanılmaktadır [12].

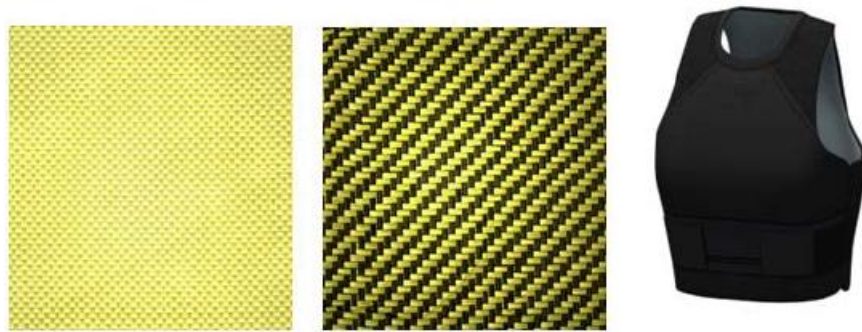
2.1.1.3.3. Aramid Elyaf

Aramid elyafları, hidrojen, oksijen ve azottan oluşmuş mevcut güçlendirici elyaflar arasında en düşük yoğunluk ve en yüksek çekme mukavemeti-ağırlık oranına sahip oldukça kristalli aromatik poliamid elyaflardır. Aramid elyafları ilk

olarak 1970'li yıllarda piyasaya sürülen yüksek mukavemetli ve yüksek modüllü malzemelerdir. Aramid fiberlerinin en yaygın iki tanesinin ticari adları Kevlar ve Nomex'dir. Kevlar'ın farklı mekanik davranışları olan Kevlar 29, Kevlar 49, Kevlar 149 olarak adlandırılan türleri vardır. Kevlar hafiflik, yüksek elastisite modülü, kimyasallara karşı dayanıklılık, yüksek ısı özellik, darbelere karşı direnç gibi özelliklerinden dolayı birçok deniz ve havacılık alanında kullanılmaktadır. Kevlar 29 ve Kevlar 49 fiberlerin her iki türü de benzer özgül mukavemetlere sahiptir. Ancak Kevlar 49 daha yüksek özgül rijitliğe sahiptir. Tablo 2.2'de Kevlar 29 ve Kevlar 49 fiberlerin özellikleri verilmiştir. Aramid elyaf lar mekanik olarak, diğer polimerik fiber malzemelerden daha yüksek olan uzunlamasına çekme mukavemetleri ve gerilme modülleri vardır ayrıca yüksek mekanik özelliklerini muhafaza ettikleri sıcaklık aralığı -200 °C ile 200 °C arasındadır. Kevlar 29 çoğunlukla balistik uygulamalar (kurşun geçirmez yelekler ve zırhlar), halat ve kablolarda kullanılır (Şekil 2.5). Uçak endüstrisinde yüksek performanslı uygulamalarda (füze kutuları) Kevlar 49 kullanılır. Aramid elyaf takviyeli kompozitlerin en büyük dezavantajları, düşük basınç dayanımları, güneş ışığında bozulmaları ve kesme veya işleme zorluklarıdır [16, 19, 21].

Tablo 2.2. Kevlar 29 ve Kevlar 49 fiberlerin özellikleri [16]

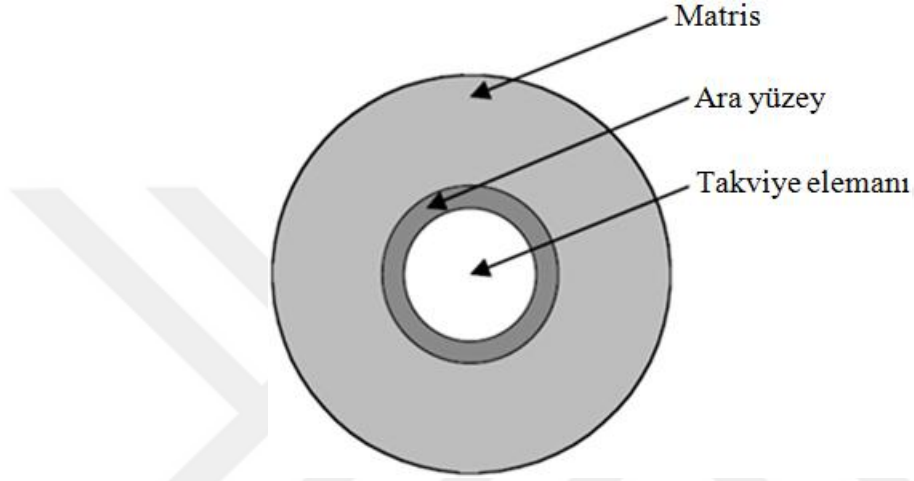
Özellik	Birim (SI)	Kevlar 29	Kevlar 49
Özgül ağırlık	-	1,44	1,48
Elastisite modülü	GPa	62,05	131
Maksimum çekme mukavemeti	MPa	3620	3620
Eksenel termal genişleme katsayısı	$\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	-2	-2



Şekil 2.5. Aramid elyaf, karbon-aramid elyaf ve kompozit zırh [13]

2.1.2. Matris Türüne Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerde çekirdek olarak takviye elemanı, takviye elemanının çevresinde yapının hacimsel olarak çoğunluğunu oluşturan matris malzeme, matris ve takviye elemanının yapışmasını sağlayan ara yüzey bulunmaktadır (Şekil 2.6). Matris ve takviye elemanın özellikleri uygulanacak yerin ihtiyacına göre kontrol edilebilir. Kompozit malzemelerin matris fazı metal, polimer, seramik veya karbon olabilir [16].



Şekil 2.6. Kompozit malzeme yapısı [16]

Kompozit yapının sıcaklığa, kimyasal etkileşime ve neme karşı direnci, öncelikli olarak matris tarafından belirlenir. Kompozit malzemenin özelliklerinin belirlenmesinde matris malzemesi belirleyici unsurdur. Matris seçimi, kimyasal, ısı, elektriksel, maliyet, performans ve üretim ihtiyaçlarına göre yapılır. Dışarıdan gelebilecek her türlü etkiye karşı ilk maruz kalan matris olması nedeniyle kompozit yapıda bariyer görevi görür. Bu nedenle kompozit bir yapıda elyafın istenilen performansı sergilemesi uygun matris seçimine bağlıdır [15, 18].

2.1.2.1 Polimer Matrisli Kompozitler

Günümüzde doğal malzemelerin günden güne azalmasından dolayı doğal malzemelere alternatif olan polimerler yaygın bir uygulama alanına sahiptirler. Polimerlerin üretim ve işleme kolaylığı, düşük maliyeti, yüksek mekanik davranışları, esnek yapıları ve düşük yoğunluğa sahip olmalarından dolayı birçok kompozit uygulamalarında yüksek miktarlarda kullanılır [27].

Kompozit malzemelerin büyük çoğunluğu polimer esaslı matrislerle üretilmektedir. Polimerlerin kullanım alanlarının günden güne çeşitlenerek artması dolayısıyla kullanımlarının gerektirdiği mekanik, ısı ve elektriksel özellikleri sağlayan polimerlerin geliştirilmesi ya da mevcut polimerlerin katkı maddeleri ile istenilen özelliklere getirilmesi önem kazanmış ve bu yönde yapılan çalışmalar artmıştır [27].

Bir polimer, güçlü kovalent bağlarla birleştirilen bir veya daha fazla tekrarlayan atom birimi içeren uzun zincirli bir molekül olarak tanımlanır. Genellikle plastik olarak adlandırılan polimer malzemeler, benzer kimyasal yapıya sahip çok sayıda polimer molekülünün bir araya getirilmesiyle oluşur [19].

Polimerler, metal ve seramiklere göre çok daha karmaşık yapıdaki malzemelerdir. Matris olarak kullanılan polimerler ucuz ve kolaylıkla çalışılabilir malzemelerdir. Polimerlerin dezavantajları, düşük elastisite modülüne ve düşük kullanım sıcaklığına sahip olmasıdır. Polimer matrisler genellikle sürekli fiberlerle kullanılır, termosetler ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılırlar [28].

Kullanımı en fazla olan ileri kompozitler, küçük çaplı fiberler (grafit, aramid, boron vb.) ile takviye edilmiş bir polimerden (epoksi, polyester, üretan vb.) oluşan polimer matrisli kompozitlerdir. Örneğin, grafit/epoksi kompozitler, çelikten yaklaşık 5 kat daha güçlüdür. Düşük maliyet, yüksek mukavemet ve kolay üretilmelerinden dolayı polimer matrisli kompozitler yaygın olarak kullanılmaktadır [16].

Endüstride polimer malzemelerin kullanımı metal malzemelere kıyasla oldukça fazladır. Polimerlerin ticari ve teknik bakımından önemli olmasının sebeplerinden bazıları aşağıda özetlenmiştir [10]:

- Plastiklerle birlikte karmaşık parça geometrilerinin kalıplanabilmesi,
- Metallere ve seramiklere göre daha düşük yoğunluğa sahip olması ve mukavemet/yoğunluk oranının daha yüksek olması,
- Yüksek korozyon direnci ve düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olması,
- Metallere göre üretim maliyetlerinin düşük olması,
- Polimer malzemelerin çalışma sıcaklıkları metallere göre daha düşük olmasından dolayı üretimleri için daha az enerjiye gerek duyulmasıdır.

Polimerlerin avantajlarına rağmen dezavantajları da vardır. Bunlar da şöyle özetlenebilir [10]:

- Metaller ve seramiklere göre daha düşük mukavemete sahip olması,
- Düşük elastisite modülüne sahip olması,
- Plastiklerin viskoelastik özellikler göstermesi ve dolayısıyla sınırlı yükleme şartlarına sahip olmasıdır.

2.1.2.1.1. Termoplastikler

Termoplastikler, oda sıcaklığında katı malzeme olarak adlandırılır. Termoplastik bir polimerde, tek tek moleküller kimyasal olarak birleştirilmezler. Bunlar, van der Waals bağları ve hidrojen bağları gibi zayıf ikincil bağlar veya moleküller arası kuvvetler tarafından yerinde tutulurlar. Isı uygulanarak, katı bir termoplastik polimerdeki bu ikincil bağlar geçici olarak koparılabilir ve moleküller birbirlerine göre hareket edebilir veya basınç uygulanırsa yeni bir yapıya dönüşebilirler. Soğuduğunda, moleküller yeni yapılarda dondurulabilir ve ikincil bağlar yenilenerek yeni bir katı şekil elde edilir. Böylece, bir termoplastik polimer, arzu edildiği kadar çok kez ısı ile yumuşatılabilir, eritilebilir, yeniden şekillendirilebilir veya kalıplanabilir [19].

2.1.2.1.2. Termosetler

Kompozit endüstrisinde genellikle matris malzemesi olarak polyester, epoksi reçine, fenolik reçine, poliüretan ve silikon gibi termoset reçineler kullanılmaktadır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve dayanımları artar. Termoplastikler yeniden şekillendirilebilir ve tekrar tekrar kullanılabilirken termosetler yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamaz ve geri dönüşümü olmayan matris malzemeleridir. Çoğu termoset matris sertleşmemeleri için dondurulmuş olarak depolanmak zorundadırlar [29]. Tablo 2.3'te termosetler ve termoplastikler arasındaki farklar ve Tablo 2.4'te bazı termoset ve termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.3. Termosetler ve termoplastikler arasındaki farklar [16]

Termoplastikler	Termosetler
<ul style="list-style-type: none">• Isı ve basınç altında yumuşar ve böylece kolay tamir edilir	<ul style="list-style-type: none">• Isıtmayla ayrıştırılmaz
<ul style="list-style-type: none">• Yüksek kopma şekil değiştirmeleri	<ul style="list-style-type: none">• Düşük kopma şekil değiştirmeleri
<ul style="list-style-type: none">• Belirsiz raf ömrü	<ul style="list-style-type: none">• Uzun süreli raf ömrü
<ul style="list-style-type: none">• Yeniden işlenebilirlik	<ul style="list-style-type: none">• Tekrar işlenemez
<ul style="list-style-type: none">• Kolay işlenebilme ve yapışkan olmama	<ul style="list-style-type: none">• Yapışkan
<ul style="list-style-type: none">• Kısa kür süresi	<ul style="list-style-type: none">• Uzun kür süresi
<ul style="list-style-type: none">• Yüksek üretim sıcaklığı ve viskozitenin üretimi zorlaştırması	<ul style="list-style-type: none">• Düşük üretim sıcaklığı
<ul style="list-style-type: none">• Mükemmel çözücü direnci	<ul style="list-style-type: none">• Düşük çözücü direnci

Tablo 2.4. Bazı termoset ve termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [10]

Malzeme özellikleri	Polietilen	Politetratken	Epoksi	Polyester	Fonelik
Yoğunluk (g/cm ³)	0,95	0,92	1,11	1,04-1,46	1,24-1,32
Elastisite modülü (MPa)	1000	22	7000	3400	4800
Çekme dayanımı (MPa)	30	14-34	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	10-1200	100-650	3-6	42	1,5-2,0
Isıl iletkenlik	0,48	0,33	0,19	0,19	0,15
Termal genişleme katsayısı (1/°C)	60-110	100-220	45-65	55-100	68

2.1.2.2. Metal Matrisli Kompozitler

Mevcut malzemelerin kullanım sıcaklığının üzerinde sıcaklıklarda kullanılacak, daha yüksek mukavemetlere ve çeşitli ihtiyaçları karşılayacak özelliklere sahip malzemelere duyulan ihtiyaç nedeniyle 1960'lı yılların başından itibaren metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler geliştirilmeye başlanmıştır. MMK'ler sürekli ve süreksiz lifler, partiküller veya whiskerlerle güçlendirilmiş metal alaşımları formunda olabilir. Bu takviyelerin eklenmesi MMK'lere üstün mekanik ve fiziksel özellikler kazandırır. MMK'ler yerlerine kullanıldıkları metal ve diğer yekpare malzemelere oranla önemli avantajlara sahiptir [17, 30]:

- Düşük yoğunluk,
- Yüksek mukavemet ve elastisite modülü,

- Yüksek tokluk ve darbe dayanımı,
- Yüksek yüzey sertliği ve yüzey çatlaklarına karşı düşük hassasiyet,
- Sıcaklık değişikliklerine veya ısıl şoka karşı düşük hassasiyet,
- Yüksek elektriksel ve ısıl iletkenlik.

Genellikle metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde alüminyum (Al), magnezyum (Mg), çinko (Zn), bakır (Cu), titanyum (Ti) ve nikel (Ni) gibi metaller ve alaşımları matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan iki metal matris düşük özgül ağırlığa sahip olan alüminyum ve titanyuma dayanmaktadır. Takviye malzemesi olarak, genellikle SiC partikülleri, bor ve Al₂O₃ lifleri, Borsic (SiC ile kaplanmış bor lifleri) ve TiB₂ kaplı karbon lifleri kullanılır [17].

Alüminyum kolayca temin edilebilen, kolayca işlenebilen, hafif, yüksek korozyon direnci gibi önemli özelliklere sahip bir malzemedir. Alüminyum alaşımları ise hafif, birçok üretim yöntemi ile kolayca ve ekonomik olarak üretilebilmesi, yüksek dayanım ve korozyon direncine sahip olduğu için çeşitli uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir [30].

2.1.2.3. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramikler, metal ve metal olmayan elemanlardan meydana gelen inorganik bileşikler olup doğada kayaların dış etkilere karşı parçalanması sonucu oluşan kaolen, kil vb. maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Bunlar farklı şekilde silikatlar, aluminatlar ile birlikte metal oksitlerinden oluşurlar [10].

Seramik malzemeler hem düşük yoğunlukları nedeniyle daha hafif, hem de yüksek oksidasyon dirençleri sebebiyle yüksek sıcaklıklarda kullanılmaya oldukça elverişli malzemelerdir. Bu sebeple yüksek sıcaklıklara dayanıklılık, hafiflik, yüksek kimyasal kararlılık, sertlik ve aşınmaya karşı direnç gibi önemli özellikleri nedeniyle günümüzde çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak seramik malzemelerin kırılabilir yapısından dolayı, yüksek sıcaklıklara dayanıklılık, düşük yoğunluk, kimyasal kararlılık ve aşınma direnci gibi pek çok önemli özelliğinin arka plana atılmasına sebep olmakta, savunma sanayi ve havacılık uygulamaları gibi büyük pazar paylarına sahip alanlarda kullanılmalarını sınırlamaktadır. Seramik kompozit

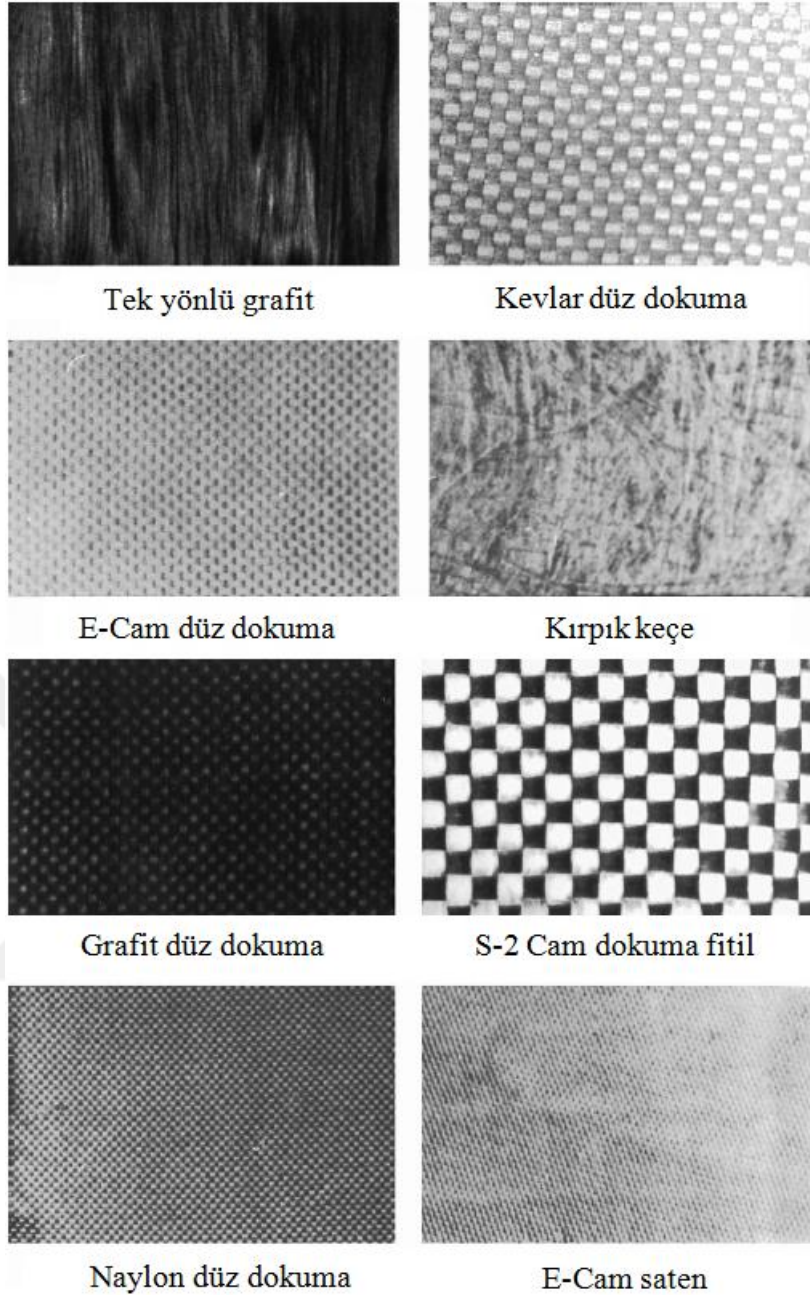
malzemeler, seramik elyafların matris yapıda yer almasıyla oluşur. Tablo 2.5'te kompozit malzemelerde kullanılan bazı seramik elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir [31].

Tablo 2.5. Kompozitlerde kullanılan bazı seramik elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri [10]

Malzeme cinsi	Yoğunluk (kg/m ³)	Elyaf çapı (µm)	Elastisite modülü (GPa)	Çekme dayanımı (GPa)
E-Cam	2500	12	70	1,5-2,0
S-Cam	2600	10	90	4,6
Karbon (PAN)	1800	7-10	400	2,0-2,8
Karbon (YD)	1700	7-10	200	3,0-3,5
Karbon (Mesa-faz)	1900	7-10	220	3,2
Boron	2600	140-160	400	3,4
Al ₂ O ₃ (FP)	3950	20	380	1,4-2,1
Al ₂ O ₃	3300	3	300	2,0
Al ₂ O ₃ /SiC	3100	10	206	1,7
Silisyum karbür	3200	1-50	480	7,0
SiC (Nicalon)	2250	12	200	2,5

2.1.2.4. Karbon-Karbon Kompozitler

Karbon-karbon kompozitler adından da anlaşılacağı gibi bir karbon matris içinde karbon fiberlerin kullanıldığı matristir. Yani hem takviye hem de matris karbondur. Bu malzemeler yeni ve pahalı olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu kompozit malzemelerin pahalı olmasının başlıca sebebi üretim aşamasında karmaşık işleme tekniklerinin gerekli olmasıdır. Bu kompozitler, 3315 °C'ye kadar çıkan yüksek sıcaklıktaki ortamlarda kullanılır. Ayrıca, karbon-karbon kompozitlerin düşük termal genleşme katsayıları ve yüksek termal iletkenlikleri vardır. En büyük dezavantajı, yüksek sıcaklıkta oksidasyona olan eğilimidir. Grafit fiberlerden 20 kat daha güçlü ve %30 daha hafiftir. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan fiberlerin çeşitli formları Şekil 2.7'de gösterilmiştir [16, 21].



Şekil 2.7. Fiber formları [16]

2.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

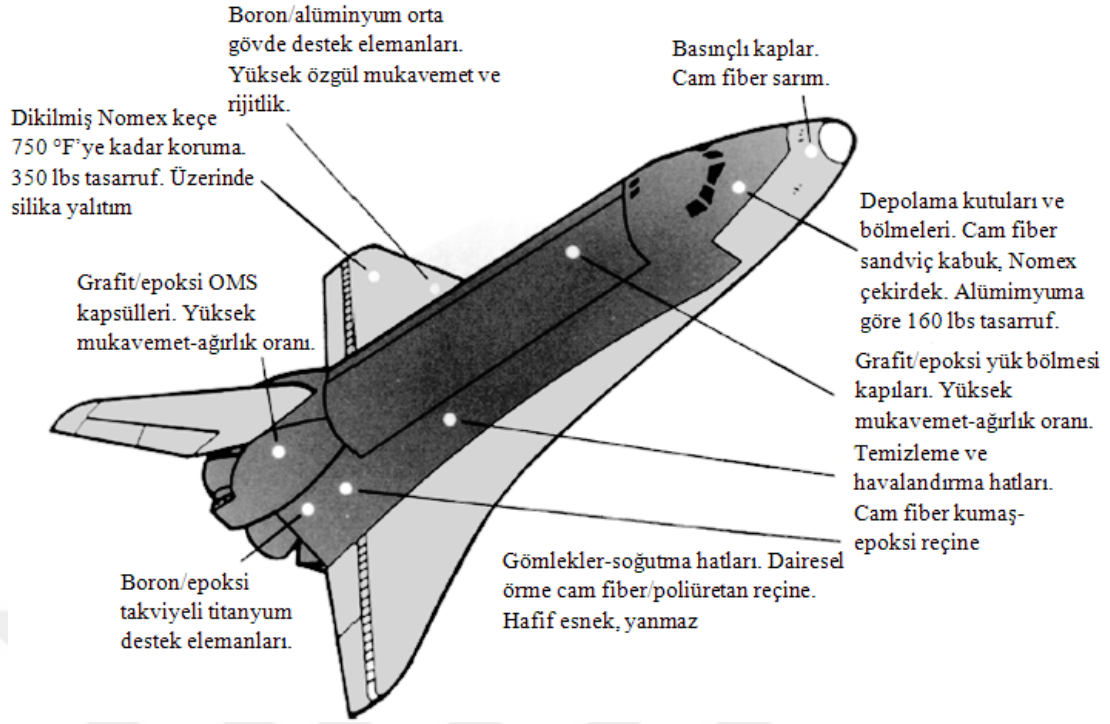
Kompozit malzemeler günümüzde gittikçe artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde tüm kompozit malzemelerin yaklaşık olarak %85'i cam takviyeli plastiktir. CTP (cam takviyeli plastik) malzemeler çoğunlukla tekne ve araba gövdeleri, spor araçları, paneller gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. CTP ve diğer kompozit malzeme türleri dayanıklı, hafif, kolay işlenebilir vb. özelliklerinden dolayı günümüzde yaygın olarak kullanılırlar. İçindeki plastik sayesinde kolaylıkla şekil verilebilen ve takviye elyaflar sayesinde son

derece sağlam, sert ve hafif olan bu malzeme türleri her geçen gün birçok uygulama alanında karşımıza çıkmaktadır [12].

Kompozit malzemeler endüstride yaygın olarak farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Büyük sıcaklık değişimleri sırasında boyutsal kararlılık ve yüksek özgül modül/mukavemet gibi özellikler kompozitlerin havacılık uygulamalarında tercih edilmelerini sağlar (Şekil 2.8). Kompozit endüstrisinde kullanılan farklı sektörlerden ürün örnekleri Tablo 2.6’da verilmiştir [16, 25].

Tablo 2.6. Kompozit malzemelerin uygulama alanları [16, 25]

Endüstri	Uygulama alanları
Havacılık/Uzay/Savunma	Uzay mekiği, radar koruyucusu, füzeler, uçak-helikopter gövdeleri ve kanatları, roket motorları, balistik koruyucu paneller, silah ve roket parçaları, sahil koruma botları, planörler
Ev aletleri ve iş ekipmanları	Buzdolapları, fırınlar, dikiş makinesi parçaları, paspaslar, hesap makineleri, bilgisayarlar, mutfak tezgahları
Yapı sektörü	Prefabrik binalar, yüzme havuzları, iç ve dış duvarlarda giydirme cephe panelleri, çatı kaplama levhaları, bina izolasyonu, duş tekneleri ve lavabolar
Spor malzemeleri	Olta kamışları, golf sopaları, tenis ve badminton raketleri, buz hokeyi sopaları, bisikletler
Tıbbi cihazlar	Yüz maskeleri, yapay organlar, x-ışını masaları
Korozyon dayanımlı ürünler	Boru ve bağlantı parçaları, endüstriyel tanklar, pompa gövdeleri, temiz ve atık su boruları
Elektrik/Elektronik	Sigorta ve panel kutuları, aydınlatma gövdeleri, elektrik ve aydınlatma direkleri, rüzgar jeneratörleri, kablo kanalları, doğalgaz kutuları
Denizcilik	Yelkenli ve motorlu tekneler, motor kapakları, şamandıralar, can kurtaran simitleri, kanolar, sörf tahtaları
Taşımacılık ve otomotiv	Karayolu işaretleri, araç tamponları ve çamurlukları, kaporta parçaları, araç yaprak yayları, şaftlar, araç kapıları ve gövde panelleri, traktör ve motosiklet parçaları, tren koltukları ve tutamakları, fren ve debriyaj balataları
Tarım ve gıda sektörü	Silolar, sulama boruları, yem tesisi gereçleri, gıda depolama tankları, çiftlik ekipmanları, pülverizatör



Şekil 2.8. Uzay mekiğinde kompozit kullanımı [16]

2.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Yıllardır mühendislerin temel amacı, gelişmiş kompozit üretim tekniklerini farklı yapılarla dahil ederek ağırlık ve maliyet tasarrufu sağlamaktır.

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemeler karşısında üstün mekanik özellikler sergilemesi son yıllarda üretim teknikleri üzerinde daha yoğun çalışmaların yapılmasına yol açmıştır. Fakat kompozit malzemelerin üretim maliyeti hala yüksektir. Yüksek teknolojilere ulaşabilmek ancak yüksek mekanik özellikleri olan malzemelerin bulunması ve üretilmesiyle mümkündür. Genellikle metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde matris olarak Al, Mg, Zn, Cu, ve Ni gibi malzemeler kullanılırken, takviye elemanı olarak silisyum karbür, boron, grafit, alüminyum oksit, tungsten, ve molibden gibi değişik süreklili, kılcal kristalli (whisker) veya parçacıklı elyaflar kullanılmaktadır. Yapılacak bir kompozit üretimi için uygulamada istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere göre takviye elemanı ve matris seçiminin yanında üretimi tekniği ve parametreleri çok önemlidir [10].

Plastik esaslı kompozit malzemeleri üretmek için çok değişik teknikler geliştirilmekle beraber kullanılan matris malzemelerine göre termoset reçineli ya da

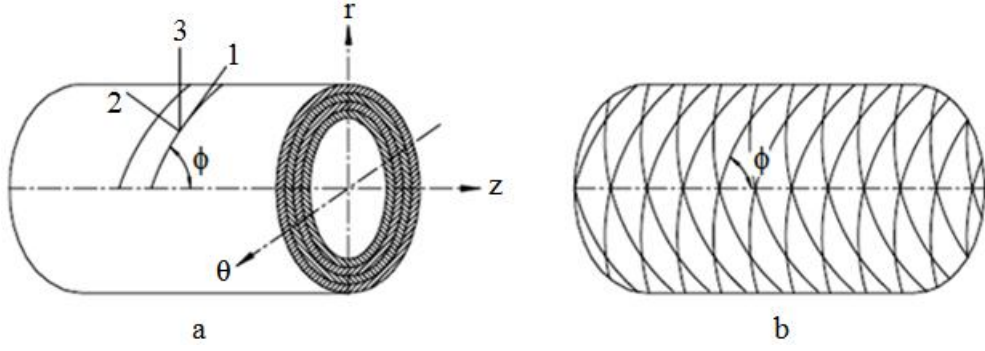
termoplastik reçineli olarak üretilmektedir. Bunlardan termoset ve termoplastik reçineli kompozitlerin üretim metotlarının başlıcaları şöyle özetlenebilir [10]:

- El yatırma yöntemi,
- Püskürtme yöntemi,
- Basma ve transfer kalıplama yöntemi,
- Soğuk presleme yöntemi,
- Filament sargı yöntemi,
- Tabakalı birleştirme veya torba kalıplama yöntemi,
- Enjeksiyon kalıplama yöntemi,
- Profil çekme yöntemi,
- Termo şekillendirme yöntemi.

2.3.1. Filament Sargı Yöntemi

Filament sargı yöntemi, kompozit malzemelerin üretim yöntemleri arasında en eski ve en çok kabul edilen yöntemlerden biridir. Yaygın olarak şaftlar, uzun pervaneler, boru hatları, basınçlı kaplar, yer altı depolama tankları, roket gövdesi, golf sopası, olta kamışı gibi silindirik parçalar üretilir. Maliyet ve gerekli performans seviyesine bağlı olarak çeşitli lifler ve reçineler kullanılabilir [32].

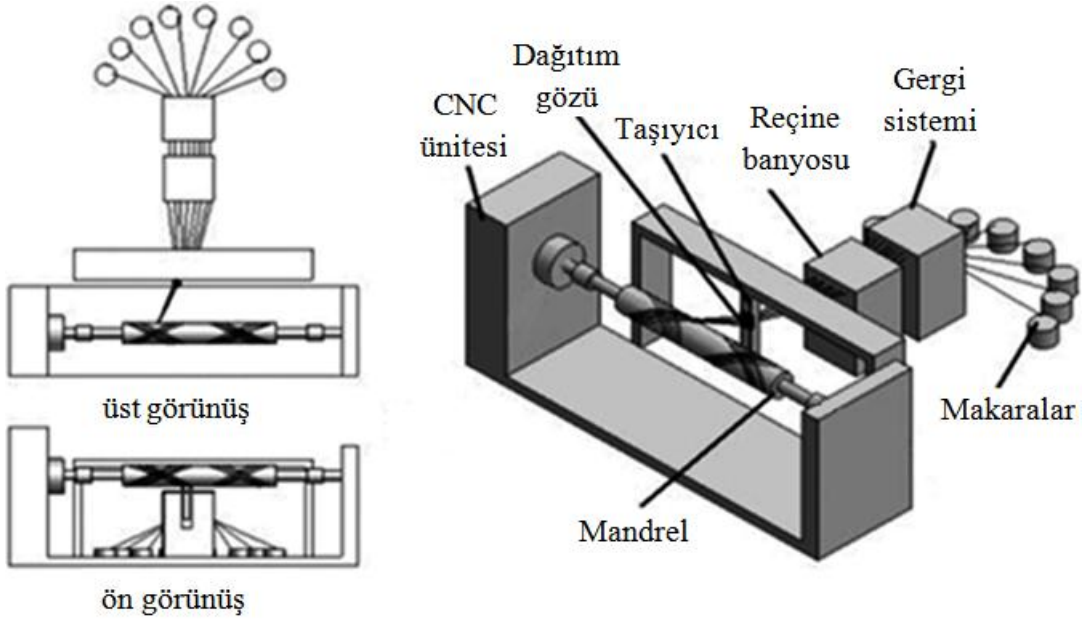
Filament sargı yöntemi, açık (silindir) veya kapalı uçlu yapıların (basınçlı kaplar veya tanklar) üretiminde kullanılan bir üretim yöntemidir (Şekil 2.9 ve 2.10). İşlem, filamentlerin gergin bir şekilde mandrel üzerine sarılmasıyla gerçekleşir. Filament sargı yönteminde ilk olarak fiberler bir reçine banyosu hattı boyunca çekilerek reçineyle ıslatılır. Daha sonra ıslatılan lifler bir makaradan çekilerek yatay olarak hareket eden bir taşıyıcı üzerinde dönen mandrel üzerine belirli açılarda sarılır (Şekil 2.11). İstenilen kalınlık veya tabaka sayısı elde edilinceye kadar liflerin sarımı devam etmektedir. Sarımı tamamlanan kompozit boru, sarım tezgahından alınarak kürlleme işlemi için kurutma odası adı verilen fırın içerisine yerleştirilir. Burada reçinenin, yerçekimi etkisiyle akması, dolayısıyla sarım ile elde edilen kompozit yapının bozulmaması için, boru fırın içerisinde düşük hızlarda kendi eksenine etrafında döndürülmektedir. Reçine tamamen kürlendiğinde, mandrel çıkarılır ve içi boş kompozit boru üretilmiş olur [12, 24, 33].



Şekil 2.9. Filament sargı yöntemiyle üretilmiş a) Açık silindir b) Basıncılı tüp [33]



Şekil 2.10. Filament sargı yöntemiyle üretilen ürünler [15]



Şekil 2.11. Filament sargı makinesinin şematik görünümü [34]

Filament sargı yöntemi, elyafların silindirik yüzey üzerinde hassas bir açıyla sarılması nedeniyle ticari önem kazanmıştır. Filament sargı yönteminin avantajlarından bazıları şunlardır [15, 35]:

- Malzeme sarımının hızlı ve ekonomik bir yöntem olması,
- Basınçlı kaplar ve yakıt tankları gibi düşük maliyetli ve yüksek performanslı parçaların yapımında kullanılabilen tek yöntem olması,
- Mandrele sarılan liflerin her katmanında farklı yönlerde sarım yapma imkânı sağlaması dolayısıyla değişik yüklemelerin yapı tarafından karşılanabilir olması,
- Termoset matrisli yapılar için işleminden sonra kütleme gerekli olsa bile büyük bir fırının maliyetinin benzer boyutlardaki bir otoklava göre daha düşük olması.

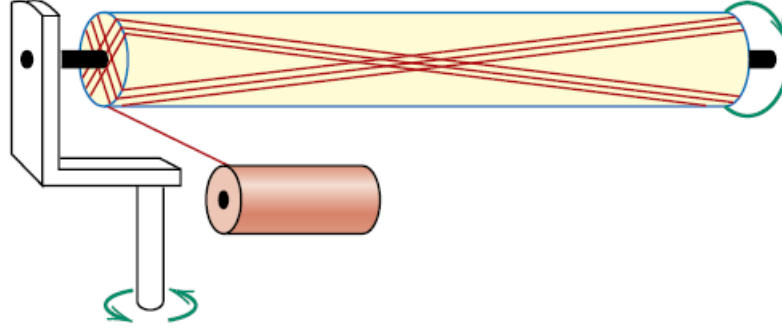
Filament sargı yönteminin dezavantajlarından bazıları şunlardır [15]:

- Kapalı ve dışbükey yapılar üretmekle sınırlıdır. Küvetler gibi açık yapıların yapılması için uygun değildir.
- Filament sargı işlemi sırasında düşük fiber açıları (0° ile 15° arasında) kolayca üretilemez.
- Filament sargı işlemi sırasında ulaşılabilen maksimum elyaf hacim oranı %60'tır.
- Filament sargı işlemi sırasında, laminatın kalınlığı boyunca homojen lif dağılımı ve reçine içeriği elde etmek zordur.

Filament sargı yöntemiyle sarılmış ürünler istenilen mekanik özelliklere bağlı olarak çevresel, helisel ve polar gibi sargı modellerinden biri kullanılarak üretilmektedir. Yapılan seçimler, parçanın şekline ve gerekli güçlendirme yönelimlerine dayanmaktadır [32].

2.3.1.1. Polar Sargı

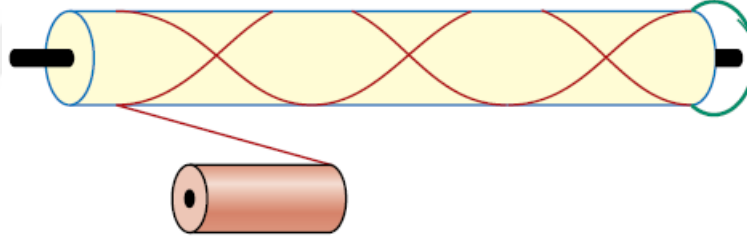
Polar sargı yönteminde, elyaflar kutuptan kutuba mandrel eksenine teğet olacak şekilde sarılır. Kolun her tam dönüşünden sonra mandrel de bir miktar dönerek sarım işlemine devam edilir. Diğer bir deyişle, elyaflar Şekil 2.12'de gösterildiği gibi mandrel kolu uzunlamasına ekseninde dönerken elyaflar kutuptan kutuba sarılır [36].



Şekil 2.12. Polar sargı modeli [21]

2.3.1.2. Helisel Sargı

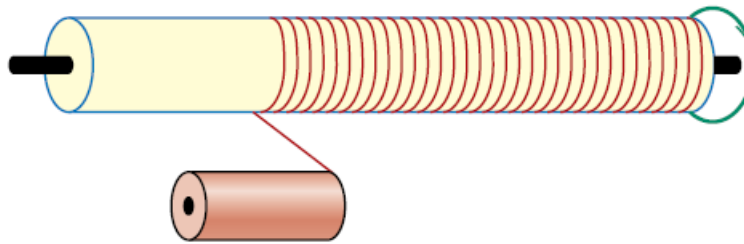
Helisel sargı yönteminde, mandrel sabit bir hızla dönerken, elyaflar pozitif ve negatif yönlerde dönüşümlü olarak mandrel yüzeyinde ileri geri hareketi yaparak sarım işlemi gerçekleştirilir. Arabanın hızı ve mandrelin dönüş hızı ayarlanarak, 0° ile 90° arasında sarım açısı elde edilebilir (Şekil 2.13). Helisel sarılmış kompozit boruların mekanik özellikleri sarım açısına bağlıdır [17, 36].



Şekil 2.13. Helisel sargı modeli [21]

2.3.1.3. Çevresel Sargı

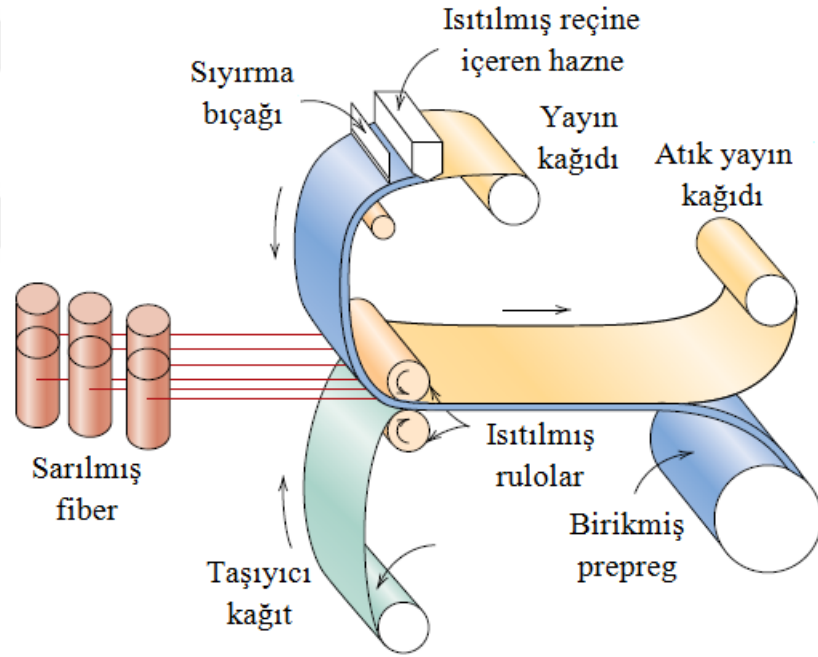
Çevresel sargı yöntemi özel bir helisel sargı biçimidir. Çevresel sargı yönteminde (Şekil 2.14) elyaf paralel hareket ederek mandrel üzerine 90° açıyla sarılır [36].



Şekil 2.14. Çevresel sargı modeli [21]

2.3.2. Pre-preg Üretimi

Pre-pregler, bir polimer matris içindeki fiberlerden oluşan kullanıma hazır bantlardır. Ayrıca, kompozit endüstrisinin sadece kısmen kürlenen bir polimer reçine ile emdirilmiş sürekli fiber takviye için bir terimdir. Bu malzeme, daha sonra herhangi bir reçine eklemek zorunda kalmadan, ürünü doğrudan kalıp haline getirip ve tam olarak sertleştirerek üreticiye bant şeklinde teslim edilir. 76-1270 mm arasında değişen genişlikleri mevcuttur. Pre-pregler, polimer matrisin termoset veya termoplastik olmasına bağlı olarak sırasıyla buzdolabında veya oda sıcaklığında saklanır. Muhtemelen yapısal uygulamalar için en yaygın kullanılan kompozit malzeme formlarından biridir. Bir kompozit yapı oluşturmak için çeşitli yönlerde elle veya mekanik olarak düzenlenebilir. Şekil 2.15'te pre-preg bant üretimi şematik olarak gösterilmiştir [16, 21].



Şekil 2.15. Pre-preg bant üretimini gösteren şematik diyagram [21]

2.4. Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Bulunması

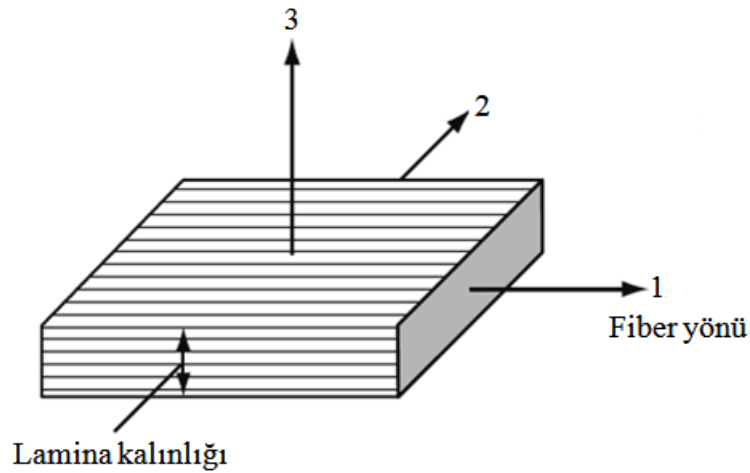
Kompozitlerin mekanik özellikleri, kompoziti oluşturan bileşenlerin özellikleri ve mikro yapısal şekilleri ile kesin olarak belirlenebilir. Kompozit için uygulanan üretim yöntemi, takviye elemanı türü ve özelliği, elyaf geometrisi ve doğrultusu, takviye elemanının hacim oranı ve en uygun malzemelerin seçimi ürünün dayanımı ve elastikliği üzerinde etkisi vardır [10].

Malzemelerin dış yüklere maruz kaldığı zaman tepki olarak gösterdiği davranışlar mekanik özellikleri hakkında bilgi verir. Malzemelerde dış kuvvetler sebebiyle gerilme ve şekil değiştirmeler meydana gelir. Malzemeler düşük yükler altında ilk olarak elastik şekil değiştirir. Daha sonra uygulanan dış yük malzemenin akma sınırını aşması durumunda malzemede plastik şekil değiştirme meydana gelir. Şekil değiştirmelere karşı gösterilen direnç elastisite modülü ile belirlenir [37].

Yapısal bir kompozit, basma mukavemeti, burulma mukavemeti ve sertlik gibi özellikler gereken uygulamalarda kullanılan çok katmanlı ve düşük yoğunluklu bir kompozittir. Bu kompozitlerin özellikleri sadece ana malzemelerin özelliklerine değil, aynı zamanda yapısal elemanların geometrik tasarımına da bağlıdır [21].

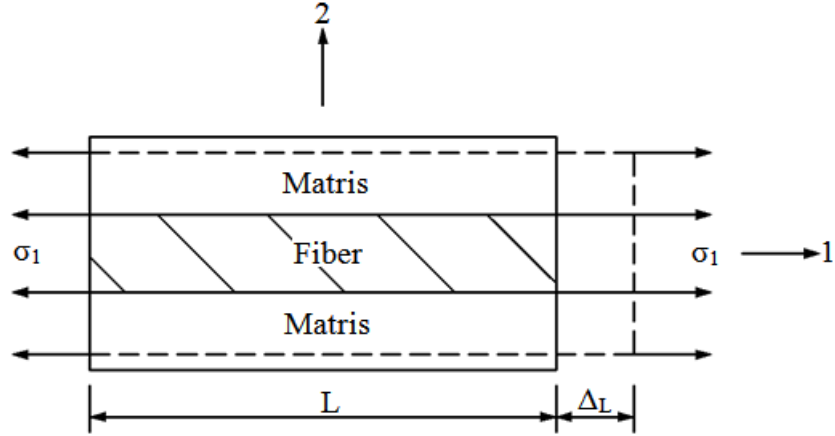
Bir laminer kompozit, birbirine bağlanmış iki boyutlu katmanlardan oluşur. Her katman, sürekli ve hizalanmış yüksek mukavemetli bir düzleme sahiptir. Bunun gibi çok katmanlı bir yapı laminat olarak adlandırılır [21].

Kompozit malzemeler mekaniğinden bilindiği üzere, fiber doğrultusunda olan elastisite modülü E_1 (Şekil 2.17) ve fibere dik doğrultuda olan elastisite modülü E_2 (Şekil 2.18) olarak adlandırılmaktadır. Kompozit bir yapı üzerindeki fibere göre yönler Şekil 2.16'da gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Kompozit bir yapıda ana malzeme doğrultuları [19]

Fiber doğrultusunda olan elastisite modülünün (E_1) bulunması;



Şekil 2.17. Elyaf eksenine doğrultusunda (1 yönünde) yüklenen bir hacim elemanı

$$P = \sigma_1 \cdot A, P = P_f + P_m \rightarrow P = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \quad (2.1)$$

$$\sigma_1 \cdot A = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \rightarrow \sigma_1 = \sigma_f \cdot \frac{A_f}{A} + \sigma_m \cdot \frac{A_m}{A} \quad (2.2)$$

$$V_f = \frac{A_f}{A}, V_m = \frac{A_m}{A} \quad (2.3)$$

$$\sigma_1 = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (2.5)$$

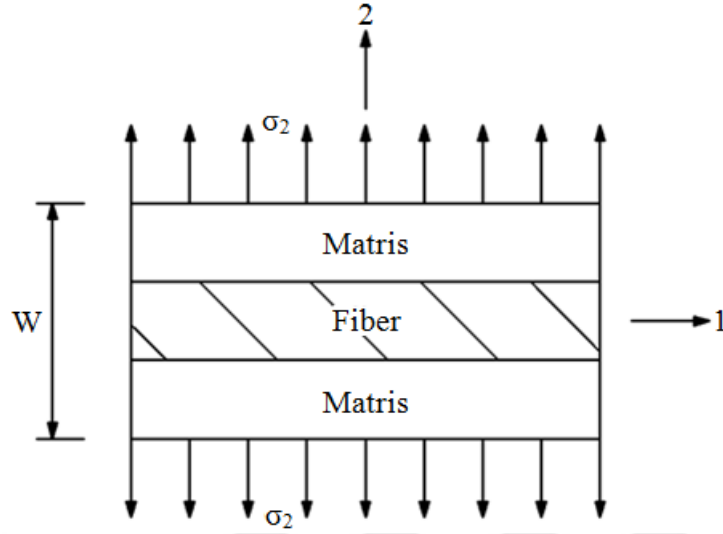
$$\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1, \sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_1, \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_1 \quad (2.6)$$

$$E_1 \cdot \varepsilon_1 = E_f \cdot \varepsilon_1 \cdot V_f + E_m \cdot \varepsilon_1 \cdot V_m \rightarrow E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (2.7)$$

$$V_f + V_m = 1 \rightarrow V_m = 1 - V_f \quad (2.8)$$

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) \quad (2.9)$$

Fibere dik doğrultuda olan elastisite modülünün (E_2) bulunması;



Şekil 2.18. Elyaf eksenine dik doğrultuda (2 yönünde) yüklenen bir hacim elemanı

$$\varepsilon_f = \frac{\Delta W_f}{W_f} \rightarrow \Delta W_f = W_f \cdot \varepsilon_f, \varepsilon_m = \frac{\Delta W_m}{W_m} \rightarrow \Delta W_m = W_m \cdot \varepsilon_m \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta W}{W} \rightarrow \Delta W = W \cdot \varepsilon_2 \quad (2.11)$$

$$\Delta W = \Delta W_f + \Delta W_m \rightarrow W \cdot \varepsilon_2 = W_f \cdot \varepsilon_f + W_m \cdot \varepsilon_m \quad (2.12)$$

$$V_f = \frac{W_f}{W}, V_m = \frac{W_m}{W} \quad (2.13)$$

$$W \cdot \varepsilon_2 = W \cdot V_f \cdot \varepsilon_f + W \cdot V_m \cdot \varepsilon_m \rightarrow \varepsilon_2 = V_f \cdot \varepsilon_f + V_m \cdot \varepsilon_m \quad (2.14)$$

$$\frac{\sigma_2}{E_2} = \frac{\sigma_2}{E_f} \cdot V_f + \frac{\sigma_2}{E_m} \cdot V_m \rightarrow \frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}, V_f + V_m = 1 \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1-V_f}{E_m} \rightarrow E_2 = \frac{E_f \cdot E_m}{(E_m \cdot V_f) + (E_f \cdot V_m)} \quad (2.16)$$

Burada,

A_f : Fiber kesit alanı, A_m : Matris kesit alanı

V_f : Fiber hacim oranı, V_m : Matris hacim oranı

ε_f : Fiberdeki şekil değiştirmeler, ε_m : Matristeki şekil değiştirmeler

W_f : Fiber kütle oranı, W_m : Matris kütle oranı

E_f : Fiberin elastisite modülü, E_m : Matrisin elastisite modülü

Kompozit bir yapının dayanımının belirlenmesi ve gerilme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle gerilme-şekil değiştirme (σ - ε) bağıntısının incelenmesi gerekmektedir [39]. Lineer elastik ve küçük deformasyonlara sahip bir cisim için bir noktadaki gerilme ve şekil değiştirmeler, Hooke kanunu olarak adlandırılan altı eş zamanlı lineer denklemlerle bağlantılıdır. Bir noktada, altı gerilme, altı şekil değiştirme ve üç yer değiştirme olmak üzere on beş bilinmeyen parametre mevcuttur. Buradaki E, G ve ν sırasıyla elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranını ifade etmektedir [16].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} & \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Bir kompozit için lineer ve elastik davranış varsayımı kabul edilebilir ancak genellikle izotropik olduğu varsayımı kabul edilemez. Bu durumda, anizotropik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme bağıntılarına Hooke kanunu uygulanır. En genel halde gerilme-şekil değiştirme bağıntısı Denklem (2.19)'da gösterilmiştir [16].

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Denklem (2.19)'da verilen matris rijitlik matrisi [C] olarak adlandırılır. Yukarıda belirtilen gerilme-şekil değiştirme bağıntısı benzer şekilde Denklem (2.20)'deki şekilde de yazılabilir [16].

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^6 C_{ij} \cdot \varepsilon_j, \quad i=1..6 \quad (2.20)$$

Denklem (2.19)'un tersinin alınmasıyla üç boyutlu bir cisim için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı Denklem (2.21)'de gösterilmiştir [16].

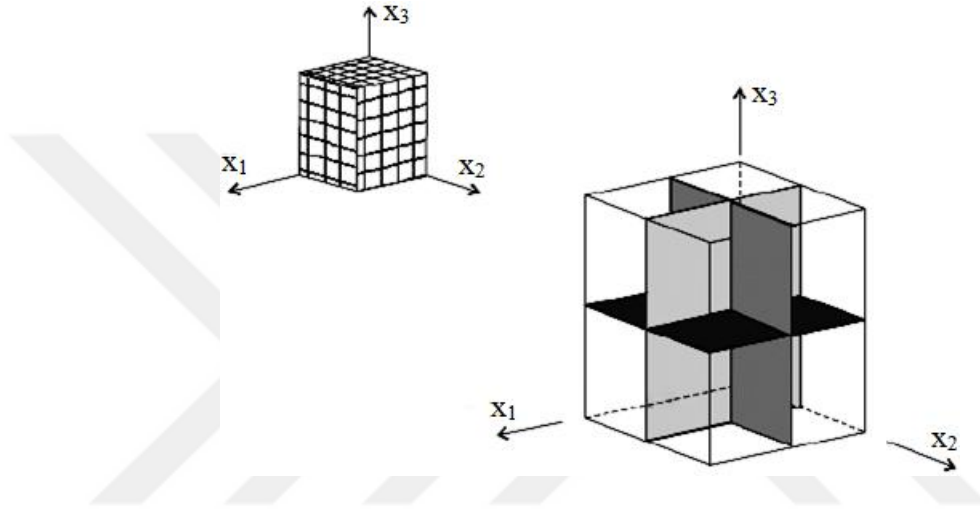
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Malzemenin izotropik olması durumu için verilmiş önceki gerilme-şekil değiştirme bağıntısı Denklem (2.17)'den faydalanarak esneklik matrisi [S] bulunabilir. Esneklik matrisi [S], rijitlik matrisinin [C] tersidir. Esneklik matrisinin mühendislik sabitleri türünden bileşenleri aşağıdaki gibi yazılır [16].

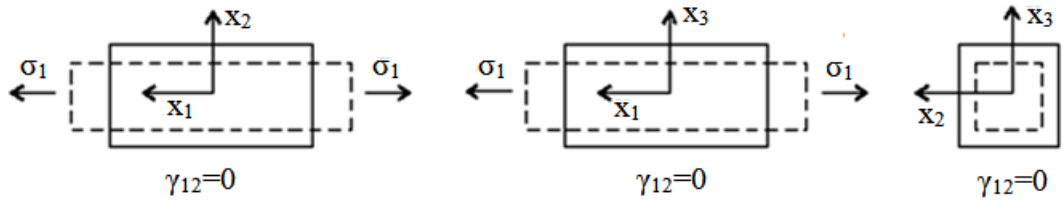
$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E} = S_{22} = S_{33} \\ S_{12} &= -\frac{\nu}{E} = S_{13} = S_{21} = S_{23} = S_{31} = S_{32} \\ S_{44} &= \frac{1}{G} = S_{55} = S_{66} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Yukarıdakiler dışında kalan S_{ij} 'ler sıfırdır.

Bir kompozit malzemede elyaflar tek yönlü sürekli veya iki yönlü takviyeli olarak düzenlenirse elyaf doğrultusunda yüksek dayanım ve rijitlik elde edilebilir. Bunun sonucunda tek yönlü doğrultuda yapılan elyaf diziliminde yüksek dayanım ve elastisite modülü, elyaf eksenine paralel doğrultuda elde edilecektir [10]. Bir kompozit malzeme liflerin yönlenmesine göre karşılıklı olarak bir birine dik üç simetri düzlemine sahip olduğunda ortotropik malzeme olarak adlandırılır (Şekil 2.19). Şekil 2.20’de ortotropik bir malzemeye x_1 - x_2 ve x_1 - x_3 simetri düzlemlerinde uygulanan σ_1 gerilmesi sonucunda oluşan şekil değişimleri gösterilmiştir [38].



Şekil 2.19. Üç simetri düzlemine sahip malzeme [38]



Şekil 2.20. Ortotropik bir malzemeye x_1 - x_2 ve x_1 - x_3 simetri düzlemlerinde uygulanan σ_1 gerilmesi [38]

Ortotropik malzemelere ait rijitlik matrisi $[C]$ Denklem (2.23)’te gösterilmiştir [16].

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Ortotropik malzemeler için rijitlik matrisinin [C] mühendislik sabitleri türünden bileşenleri Denklem (2.24)'teki gibi tanımlanmaktadır [16].

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{21}+\nu_{23}\nu_{31}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{21}+\nu_{23}\nu_{31}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\Delta = \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{32}-\nu_{13}\nu_{31}-2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3}$$

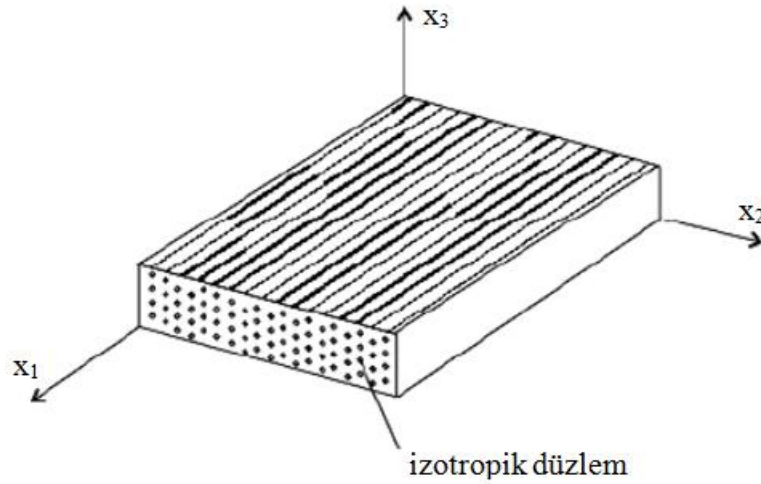
Ortotropik malzemelere ait esneklik matrisi [S] Denklem (2.25)'te gösterilmiştir [16].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Ortotropik malzemeler için esneklik matrisinin [S] mühendislik sabitleri türünden bileşenleri Denklem (2.26)'daki gibi yazılır [16].

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Enine izotropik malzemelerin birbirine dik üç simetri düzlemi vardır. Simetri düzlemlerinden bir tanesinde bile malzeme izotropik olarak davranırsa enine izotropik malzeme olarak kabul edilir. Şekil 2.21’de gösterilen malzemede tüm elyaflar x_1 yönünde hizalanmıştır. Bu durumda, liflere dik olan düzlemdeki malzeme (x_2 - x_3 düzlemi) izotropik olarak kabul edilir [38].



Şekil 2.21. Fiber takviyeli enine izotropik bir kompozit malzeme [38]

Enine izotropik malzemelere ait rijitlik matrisi $[C]$ Denklem (2.27)’de gösterilmiştir [16].

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22}-C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

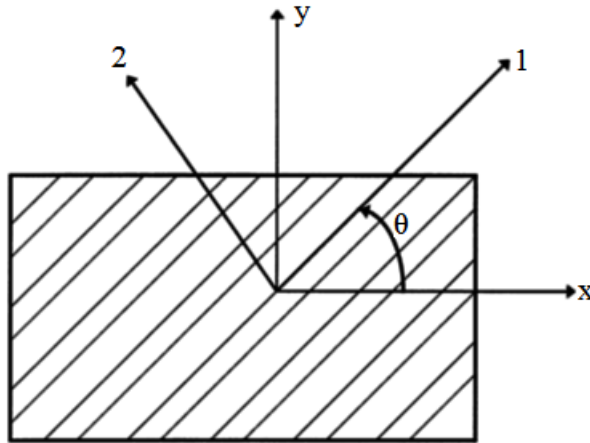
Enine izotropik malzemelere ait rijitlik matrisi [C] Denklem (2.28)'deki gibi yazılabilir [16].

$$C_{22} = C_{33}, C_{12} = C_{13}, C_{55} = C_{66}, C_{44} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2} \quad (2.28)$$

Enine izotropik malzemelere ait esneklik matrisi [S] Denklem (2.29)'da gösterilmiştir [16].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Laminatların yüksek rijitlik ve yüksek mukavemete sahip olması için laminaların açılı olarak yerleştirilmesi gerekir. Bu nedenle açılı yerleştirilmiş laminalar için gerilme-şekil değiştirme denkleminin yazılması gerekir [16].



Şekil 2.22. Açılı bir laminadaki global ve lokal eksenler [16]

Açılı bir laminanın koordinat sistemi global ve lokal eksenlerden oluşur ve Şekil 2.22’de gösterilmiştir. 1-2 koordinat sistemindeki eksenlere lokal eksenler denir. 1 yönü fiber yönünü, 2 yönü ise fibere dik olan yönü gösterir. x-y koordinat sistemindeki eksenler ise global eksenler olarak adlandırılır. İki eksen arasındaki açı θ ile gösterilir [16].

Açılı bir laminadaki global ve lokal gerilmelerin birbiriyle ilişkilendirilmesi dönüşüm matrisi $[T]$ aracılığıyla lamina açısı (θ) kullanılarak yapılır [16].

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Dönüşüm matrisi $[T]$ Denklem (2.31)’deki şekilde ifade edilmektedir [16].

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$c = \text{Cos}(\theta), s = \text{Sin}(\theta)$

Global ve lokal şekil değiştirmeler dönüşüm matrisi $[T]$ aracılığıyla Denklem (2.33)’teki şekilde ifade edilir [16].

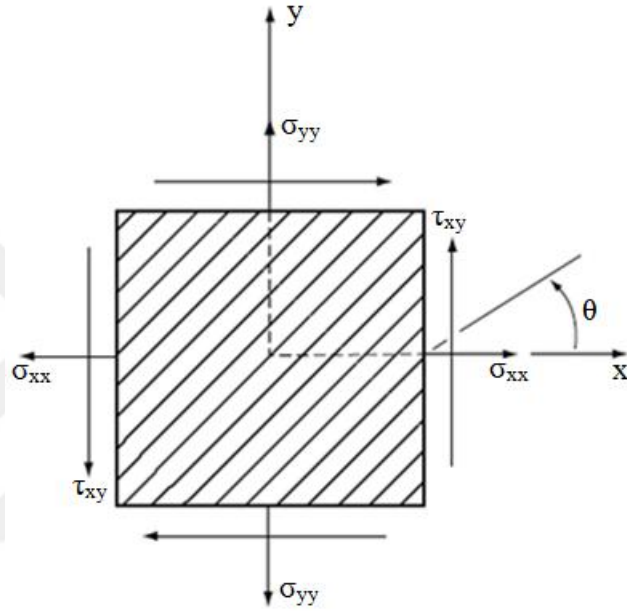
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

2.5. Kompozit Malzemeler için Hata Teorileri

Bir yapının ya da bir bileşenin tasarım analizi, uygulanan yüklere bağlı olarak oluşan gerilmelerin malzemenin mukavemeti ile karşılaştırılarak gerçekleştirilir. Kompozit yapıların gerilme analizlerinde hasar teorilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Düzlem gerilme koşullarında tek yönlü laminada (Şekil 2.23) hataları belirlemek için birçok teori öne sürülmüştür. Ortotropik kompozit yapılara ait en çok kullanılan hasar teorileri [19];

- Maksimum gerilme hasar teorisi,
- Maksimum şekil değiştirme hasar teorisi,
- Tsai-Hill hasar teorisi,
- Tsai-Wu hasar teorisi.



Şekil 2.23. İnce bir ortotropik laminada iki boyutlu gerilme durumu [19]

2.5.1. Maksimum Gerilme Hasar Teorisi

Maksimum gerilme hasar teorisine göre, laminanın asal eksenlerinin herhangi birinde oluşan gerilmeler laminanın mukavemet değerine eşit veya daha büyük olduğunda malzemede hasar oluşur. Buna göre Denklem (2.34)'te verilen şartlar ihlal edildiğinde lamina hasara uğrar [16, 19].

$$\begin{aligned}
 -S_{Lc} &< \sigma_{11} < S_{Lt}, \\
 -S_{Tc} &< \sigma_{22} < S_{Tt}, \\
 -S_{LTs} &< \tau_{12} < S_{LTs}.
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{11} &= \sigma_{xx} \cos^2 \theta, \\
 \sigma_{22} &= \sigma_{xx} \sin^2 \theta, \\
 \tau_{12} &= -\sigma_{xx} \sin \theta \cos \theta.
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

Burada,

S_{L1} : Fiber (1) yönündeki çekme dayanımı

S_{T1} : Fibere dik (2) yöndeki çekme dayanımı

S_{Lc} : Fiber (1) yönündeki basma dayanımı

S_{Tc} : Fibere dik (2) yöndeki basma dayanımı

S_{LTs} : 1-2 düzlemindeki kayma dayanımı

2.5.2. Maksimum Şekil Değişirme Hasar Teorisi

Maksimum şekil değişirme hasar teorisine göre, laminanın asal eksenlerinin herhangi birinde oluşan şekil değişimler laminanın mukavemet değerine eşit veya daha büyük olduğunda malzemede hasar oluşur. Buna göre Denklem (2.36)'da verilen şartlar ihlal edildiğinde lamina hasara uğrar [16, 19].

$$\begin{aligned} -\varepsilon_{Lc} < \varepsilon_{11} < \varepsilon_{Lt}, \\ -\varepsilon_{Tc} < \varepsilon_{22} < \varepsilon_{Tt}, \\ -\gamma_{LTs} < \gamma_{12} < \gamma_{LTs}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= S_{11}\sigma_{11} + S_{12}\sigma_{22} = \sigma_{xx}(S_{11}\cos^2\theta + S_{12}\sin^2\theta), \\ \varepsilon_{22} &= S_{12}\sigma_{11} + S_{22}\sigma_{22} = \sigma_{xx}(S_{12}\cos^2\theta + S_{22}\sin^2\theta), \\ \gamma_{12} &= S_{66}\tau_{22} = -\sigma_{xx}S_{66}\sin\theta\cos\theta, \\ S_{11} &= \frac{1}{E_{11}}, S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = -\frac{\nu_{21}}{E_{22}}, S_{22} = \frac{1}{E_{22}}, S_{66} = \frac{1}{G_{12}}. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Burada,

ε_{L1} : Fiber (1) yönündeki çekme şekil değişirmesi

ε_{T1} : Fibere dik (2) yöndeki çekme şekil değişirmesi

ε_{Lc} : Fiber (1) yönündeki basma şekil değişirmesi

ε_{Tc} : Fibere dik (2) yöndeki basma şekil değişirmesi

γ_{LTs} : 1-2 düzlemindeki kayma şekil değişirmesi

2.5.3. Tsai-Hill Hasar Teorisi

Tsai-Hill hasar teorisi, izotropik malzemeler için geliştirilmiş von-Mises teorisinin anizotropik malzemelere uyarlanmış şeklidir. Cisimdeki şekil değişirme iki parçadan ibarettir. Birincisi hacimdeki değişime bağlı olan dilatasyon enerjisi, ikincisi ise şekildeki değişime bağlı olan çarpılma (distorsiyon) enerjisidir. Bu

teoriye göre çarpılma enerjisi, hasar çarpılma enerjisinden büyük olduğunda malzemede hasarın meydana geldiği kabul edilir. Hasar mukavemetine bağlı mukavemet kriteri elemanları olan $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6$ aşağıdaki gibi bulunabilir [16, 40].

$$(G_2 + G_3)\sigma_{11}^2 + (G_1 + G_3)\sigma_{22}^2 + (G_1 + G_2)\sigma_{33}^2 - 2G_3\sigma_{11}\sigma_{22} - 2G_2\sigma_{11}\sigma_{33} - 2G_1\sigma_{22}\sigma_{33} + 2G_4\tau_{23}^2 + 2G_5\tau_{13}^2 + 2G_6\tau_{12}^2 < 1 \quad (2.38)$$

Burada,

$$G_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{S_{Tt}^2} - \frac{1}{S_{Lt}^2} \right), G_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{S_{Lt}^2} \right), G_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{S_{Lt}^2} \right), G_6 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{S_{LTs}^2} \right). \quad (2.39)$$

Tek yönlü laminanın düzlem gerilme halinde olduğu varsayıldığı için $\sigma_{33} = \tau_{31} = \tau_{23} = 0$ dır. Bu durumda Denklem (2.38) yeniden yazılırsa;

$$\frac{\sigma_{11}^2}{S_{Lt}^2} - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{S_{Lt}^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{S_{Tt}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{LTs}^2} < 1 \quad (2.40)$$

Bir laminadaki gerilmeler göz önüne alınarak laminanın hasara uğrayıp uğramayacağı Denklem (2.40)'da verilen bağıntı aracılığıyla belirlenebilir [16].

2.5.4. Tsai-Wu Hasar Teorisi

Tsai-Wu hasar teorisi kompozit malzemelerin gerilme analizlerinde en çok kullanılan teorilerden biridir. Düzlem gerilme koşulları altında, Tsai-Wu hasar teorisi, Denklem (2.41)'de verilen eşitliğin sağlandığı durumlarda ortotropik bir laminadaki hata durumunu tahmin eder [16, 19, 39].

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_6\tau_{12} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} = 1 \quad (2.41)$$

Burada,

$$F_1 = \frac{1}{S_{Lt}} - \frac{1}{S_{Lc}}, F_2 = \frac{1}{S_{Tt}} - \frac{1}{S_{Tc}}, F_6 = 0 \quad (2.42)$$

$$F_{11} = \frac{1}{S_{Lt}S_{Lc}}, F_{12} = -\frac{1}{2S_{Lt}^2}, F_{22} = \frac{1}{S_{Tt}S_{Tc}}, F_{66} = \frac{1}{S_{LTs}^2}.$$

3. DENEYSEL KISIM

3.1. Giriş

Mühendisler, çeşitli malzemelerden yararlanarak yapmış oldukları tasarımlarını uygulanabilir hale getirebilirler. Bazen bu tasarımlar uygulandığı bölgelerde çeşitli sebeplerden dolayı ihtiyaçları karşılayamaz ve başarısız olurlar. Bundan dolayı, yapılan tasarımların uygulanabilir olabilmesi için kullanacakları malzemeler ile ilgili tüm mekanik özellikleri bilmek zorundadırlar [41].

Malzemelerin sertlik, süneklik, tokluk ve mukavemet gibi temel mekanik özellikleri içyapılarına bağlıdır. Bu nedenle malzemelerin içyapısının ve özelliklerinin iyi bilinmesi gereklidir. Bu özelliklerin tespiti birtakım mekanik deneylerle yapılır. Herhangi bir amaç için seçilen bir malzemenin, çalışacağı yerde görevini yapıp yapamayacağını anlamak veya malzemenin özelliklerini belirlemek için yapılan çeşitli deneylere malzeme muayenesi denir. Bu amaçla malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi için tahribatlı ve tahribatsız muayene metotları kullanılarak deneylerin yapılması gerekir. Tahribatlı deneyler, uygulaması kolay ve sonuçlara hızlı ulaşmayı sağlayan ancak deney sonunda malzemede hasar meydana getiren deneylerdir. En çok kullanılan tahribatlı test metotları: çekme deneyi, basma deneyi, eğme deneyi, darbe deneyi, sertlik deneyi ve yorulma deneyidir. Bu deneylerin amacı, farklı yükleme durumları için malzemelerin özelliklerini tespit etmektir [37, 41].

Yüksek düzeylerdeki bileşik veya tekil olarak uygulanan basınç, gerilme ve burulma yüklerine karşı etkin bir şekilde dayanabilme yeteneği sebebiyle silindirik kompozit tüpler, uzay, havacılık ve deniz yapılarında geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Genellikle pre-preg sargı veya filament sarma teknolojisiyle üretilen kompozit tüpler, ağırlık tasarrufu ve yorulma dayanıklılığı gibi özellikleri açısından metalik muadillerine kıyasla üstün avantajlar sağlar ve ayrıca tüm sistemin toplam verimliliğini de önemli ölçüde artırır. Seri üretimdeki sıkıntılar ve yüksek üretim maliyeti nedeniyle, otomotiv endüstrisinde polimer matrisli kompozit tüplerin kullanımı, şu anda sadece uygulamada daha önceleri yüksek kaliteli çelikten (örn. SM45C çeliği) imal edilen yeni nesil tahrik millerinin üretimi ile sınırlıdır ancak kullanımının gelecekte daha fazla yapısal unsuru içerecek şekilde artması beklenmektedir.

Hassas bir şekilde kontrol edilebilen fiber hacim oranı ve tutarlı mekanik özellikler sunan pre-preg sargı işlemi, içi boş kompozit millerin üretiminde tercih edilen üretim yöntemlerinden biridir. Benzer şekilde, filament sargı yöntemi de nispeten yüksek üretim hızı, tasarım esnekliği ve üretim kolaylığı vb. sebeplerle içi boş millerin üretiminde oldukça yaygındır. Filament sargı yöntemi, lamba direkleri, yelkenli tekne direkleri ve basınçlı kaplar gibi bazı basit veya yüksek teknoloji ürünleri üretmek için uygundur. Helisel bir kaburgaya sahip filament sargılı ürünün izogrit yapısı, ince silindirik yapının burulma, burkulma ve eğilme yüklerine karşı dirençli olmasını sağlar ki bu da malzemenin havacılık uygulamaları için de kullanılabilir olmasını sağlar [42].

Kompozit tüpün mekanik davranışının amaçlanan kullanımına uygunluğunun test edilmesi büyük önem taşımaktadır. Statik veya dinamik burulma ve eğilme davranışı, istifleme yönü ve sarım açısı gibi malzeme özelliklerinin etkileri [43, 44, 45], kayma burkulması davranışı [46], ağırlık düşürme darbe dayanımı [47], kürlenmenin mekanik davranış üzerindeki etkisi [48] konuları araştırmacılar tarafından bugüne kadar incelenmiştir.

Malzeme tipi ve sarım açısı, içi boş millerin burulma rijitliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Badie ve ark. [43], karbon fiberlerin cam fiberlere kıyasla daha yüksek burulma rijitliğine yol açtığını bildirmişlerdir. Ayrıca, 45° filament sarım açısının uygulanması durumunda burulma rijitliğinin maksimum değere ulaştığını bulmuşlardır. Böylece Gireesh ve ark. [49] 45° fiber açısı oryantasyonu ile sarılmış kompozit tahrik mili üzerinde nümerik bir çalışma gerçekleştirmiş ve eşdeğer burulma mukavemetinin çeliğe kıyasla yaklaşık %72 oranında ağırlık tasarrufu sağladığını rapor etmişlerdir. Ebu Talib ve ark. [50] tarafından yapılan bir nümerik analiz çalışması da ayrıca en iyi istifleme sırasına sahip içi boş millerin, en kötü istifleme sırasına göre %46,07 daha yüksek mukavemet sağladığını öne sürerek, sarım açısının etkisini teyit etmektedirler.

Basit kompozit tüplerin yanı sıra, hem metalik hem de kompozit katmanlar ihtiva eden çeşitli biçimlerde hibrit tüpler de vardır. Lee ve ark.'ın [47] yaptığı bir çalışmaya göre, bu tür kombine bir yapı, burulma kuvvetini %160 oranında artırabilmekte ve ağırlıkça %75 oranında tasarruf sağlayabilmektedir. Ayrıca Mutasher [51], alüminyum-kompozit hibrit tüpü incelemek için analitik teknikler

kullanmış ve sonuç olarak burulma mukavemetinin, ağırlıkta önemli bir değişiklik olmaksızın kompozit tabakaların sayısının artırılması ile artabildiğini bildirmiştir. Diğer yandan, hibrit kompozit tüplerin eğilme momenti altındaki etkisi de araştırmacılar tarafından kanıtlanmıştır. Kim ve Lee [52] bir çalışmada, büyük LCD panelleri temizlemek için kullanılan basit çelik tabanlı fırça şaftına kıyasla, çelik/karbon epoksi şaftlarının yatak montaj yerinde daha küçük bir sapma ve eğim açısı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, Khalid ve ark. [44] hibrit alüminyum/kompozit şaftların en yüksek yorulma mukavemetini temin eden istifleme dizisini incelemişler ve en yüksek yorulma mukavemetinin $\pm 45^\circ$ lif oryantasyonunda olduğunu bulmuşlardır.

Kompozit borular, uygulamada çeşitli yükleme koşulları altında çalışacak şekilde tasarlanabilir. Özellikle ince cidarlı kompozit tüplerin aksel yüklenmesi durumunda, güvenli bir tasarım için burkulma analizi gereklidir. Yakın zamanda Almeida ve ark. [53] teorik ve deneysel olarak karbon/epoksi filament sargı silindirik tüplerin uç kısımlarına çember takviye ilave ederek, aksel basınç altında burkulma anı ve burkulma sonrası davranışlarını değerlendirmişlerdir. Beklendiği gibi, daha ince cidarlı $[\pm\alpha]$ tüplerde burkulma hasarını ve daha kalın tüplerde malzeme hasarını gözlemlenmiştir. Cagdas [54] aynı zamanda filament kompozitlerde aksel basınç üzerinde çalışmış, fakat silindirik yapı yerine konik geometri kullanmıştır. Mikro-Genetik Algoritmalar kullanarak ilk kat kırılma ve burkulma hasarlarının yanı sıra yapısal ağırlığın da en aza indirilmesini sağlamaya çalışmış ve böylece optimum sarım açıları belirlenmiş oldu.

Bu çalışma, beş farklı istifleme dizisine sahip içi boş silindirik ince cidarlı cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit tüpler üzerinde deneysel ve sayısal bir araştırma ortaya koymaktadır. Numune türlerinden, $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 45]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$, $[\pm 75]_{FW}$ olarak sarım açıları ile ifade edilenler filament sargı yöntemi ile üretilmiş, $[0, 90]_{PP}$ şeklinde gösterilen numune tipi ise pre-preg sarım metodu ile üretilmiştir. Tüm örnekler sabit açısal dönme hızında burulma yüküne maruz bırakılmıştır. Daha önce yayınlanmış olan ve bir kısmı yukarıdaki bölümde bahsedilen makaleler, filament sargılı kompozit tüplerin mekanik özellikleri ile ilgili bazı faydalı deneysel ve sayısal bilgiler vermektedirler. Buna rağmen, deneysel ve sayısal bulguları içeren şimdiki çalışmanın, filament sargı teknolojisi ve ilave olarak alternatif bir üretim

yöntemiyle üretilen kompozit boru yapılarının mevcut mekanik davranışı hakkındaki bilgi birikimine önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Filament sarım açısındaki her 15°'lik artışın başarısızlık yükü, başarısızlık modu, burulma rijitliği ve yük-yer değiştirme grafikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve bu sonuçlar pre-preg ile sarılmış boru şeklindeki yapılarınkiler ile karşılaştırılmıştır. Genellikle daha önce yayınlanmış makalelerin çoğunda ifade edilen durumun aksine, mevcut çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar ve bunları destekleyen sayısal çözümler, tasarımcıların sadece tek bir açıyı tercih etmek zorunda kalmadan, belirli bir sarım açısı aralığında çalışabilmelerinin oldukça uygun olduğunu kanıtlamıştır. Pre-preg sargı, üretiminin hızlı ve kolay olması açısından bir avantaj gibi görünse de, maalesef sonuçlar bu tip bir ürünün mekanik performans açısından beklentileri karşılamadığını göstermektedir.

3.2. Materyal ve Yöntemler

3.2.1. Kompozit Tüplerin Üretimi

Deneysel çalışmalarda kullanılan kompozit boruların üretimi için, endüstride çok çeşitli kullanım alanı olması ve kolay bir şekilde temin edilebilir olması açısından matris malzemesi olarak epoksi ve fiber malzemesi olarak da cam lifi tercih edilmiştir.

İnce cidarlı kompozit boru numunelerin $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ sarım açılarında üretimi, filament sargı makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Üretimin yapıldığı makineden alınan bir resim, Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu yöntemde rulolar halinde bulunan sürekli lifler makaralardan geçirilerek ilk olarak matris malzemesinin yani epoksinin bulunduğu havuzlara daldırılmaktadır. Daha sonra epoksi emdirilmiş cam lifleri mandrel adı verilen ve dış çapı, üretimi yapılacak kompozit borunun iç çapına sahip olan borular üzerine istenilen fiber yönlenme açılarında sarılmaktadır. Sarım işlemi, elyaf taşıyıcı başlığın aksenal hareketi ile gerçekleşir ve istenen sarım açısı, mandrel dönme hızı ve taşıyıcının doğrusal hareketini kontrol etmek suretiyle makine tarafından otomatik olarak ayarlanır. Üretilecek olan borunun kalınlığını, fiber taşıyıcının gelgit hareketinin tekrar sayısı ile ayarlamak mümkündür.

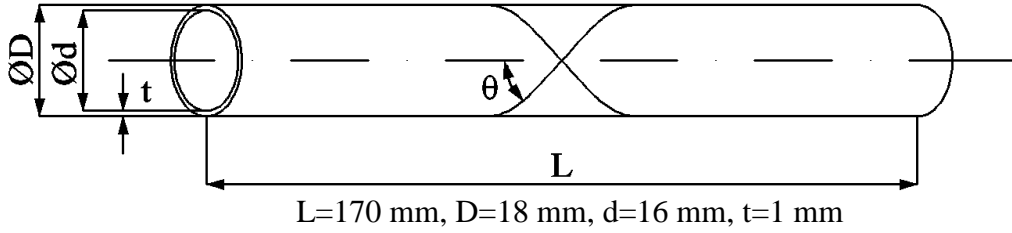


Şekil 3.1. Filament sargı makinesi

Filament sargı kompozit boruların üretimi, kompozit malzeme üretimi yapan ve endüstriye bu anlamda önemli hizmetleri olan “Fibermak Mühendislik Makina Kalıp Kompozit Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.” de yapılmıştır.

Her ne kadar örnek boyutlar standartlara göre belirtilmemiş veya kısıtlanmasa da, numune boyutları uygulamada en yaygın boyutlardan seçilmeye çalışılmıştır. Tüm kompozit tüp örneklerinin boyutları birbiriyle özdeş olup 170 mm uzunluğunda, 16 mm iç çapa ve 18 mm dış çapa sahip olacak şekilde belirlenmiştir.

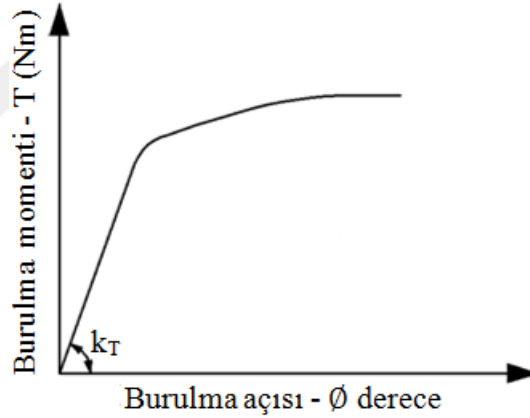
Sarım işlemi tamamlanan borular, sarım tezgâhından alınarak epoksi reçine matrisi kürlmek için kurutma odası adı verilen fırın içerisine yerleştirilir. Epoksi reçine tamamen kürlendiği zaman, mandrel kompozit tüpten çekilerek çıkarılır ve içi boş kompozit tüp veya boru üretilmiş olur. Daha sonra fırından çıkarılan tüpler, dış yüzey istenen yüzey kalitesine ulaşmak ve aynı zamanda boru çapını hassas bir şekilde ayarlamak için hassas taşlama işlemine tabi tutulur. Yapılan işlemler sonucunda tüplerin boyu 170 mm olacak şekilde kesilerek son halini almıştır. Üretilen tüplerin geometrisi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Üretilen tüplerin geometrisinin şematik görünümü

3.2.2. Kompozit Tüplerin Burulma Testleri

Kompozit tüpler üzerinde gerçekleştirilen burulma deneylerinin temel amacı, boruların maksimum burulma dayanımlarını karakterize etmek ve aynı zamanda karşılık gelen maksimum burulma açılarını ölçmektir. Testler sırasında, uygulanan burulma momenti adım adım artırılır ve numunelerin uç kısımlarındaki dönme açıları eş zamanlı olarak kaydedilir. Elde edilen verilere göre tork ve burulma açısı (T-Ø) eğrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan eğrilerin lineer kısmının eğimi, Denklem 3.1’de tanımlanan burulma rijitliği (k_T) değerini verir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Burulma momenti (T)-burulma açısı (Ø) diyagramı

$$k_T = \frac{T}{\phi} = \frac{G_{r\theta} \cdot I_p}{L} \quad (3.1)$$

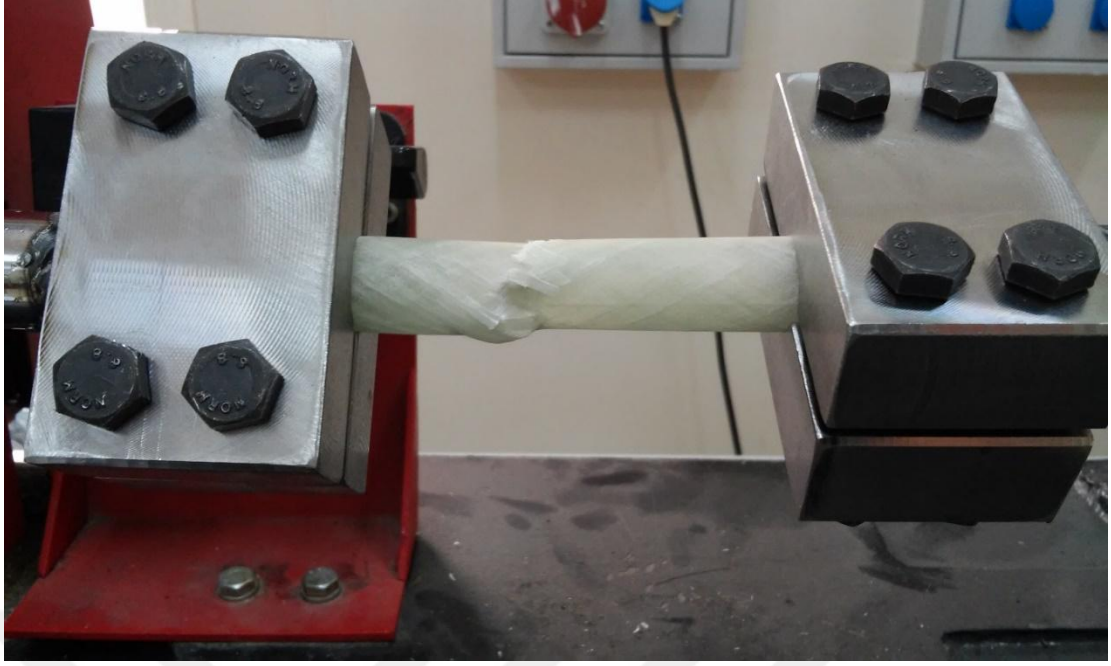
Burada, I_p boru kesitinin polar atalet momentini, L ölçü uzunluğunu ve $G_{r\theta}$ polar koordinatlarda kompozit malzemenin düzlem kayma modülünü sembolize etmektedir. Dairesel içi boş tüplerde burulma deneyleri yapılarak, bilinen bir tork (T) tarafından üretilen burulma açısı (Ø) kolayca ölçülebilir ve daha sonra kayma modülü ($G_{r\theta}$) değeri Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanabilir.

Burulma testleri, ASAHI burulma test cihazında ASTM D5448/D5448M-11'e [55] uygun olarak, özellikle içi boş silindirik çubukların testleri için geliştirilmiş özel bir aparat kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4). Burulma test cihazına standart bir donanım olarak dahil edilmeyen bu aparat, her biri iki tutucu çene içeren bir çift tutucu kalıp ve numuneyi içeriden destekleyerek ezilmesini önleyen ve aynı zamanda burulma momentini ileten bir çift lokma takım ucu-mil bileşiminden oluşur.



Şekil 3.4. Burulma test cihazı ve numunenin özel bir aparat ile makineye monte edilmesi

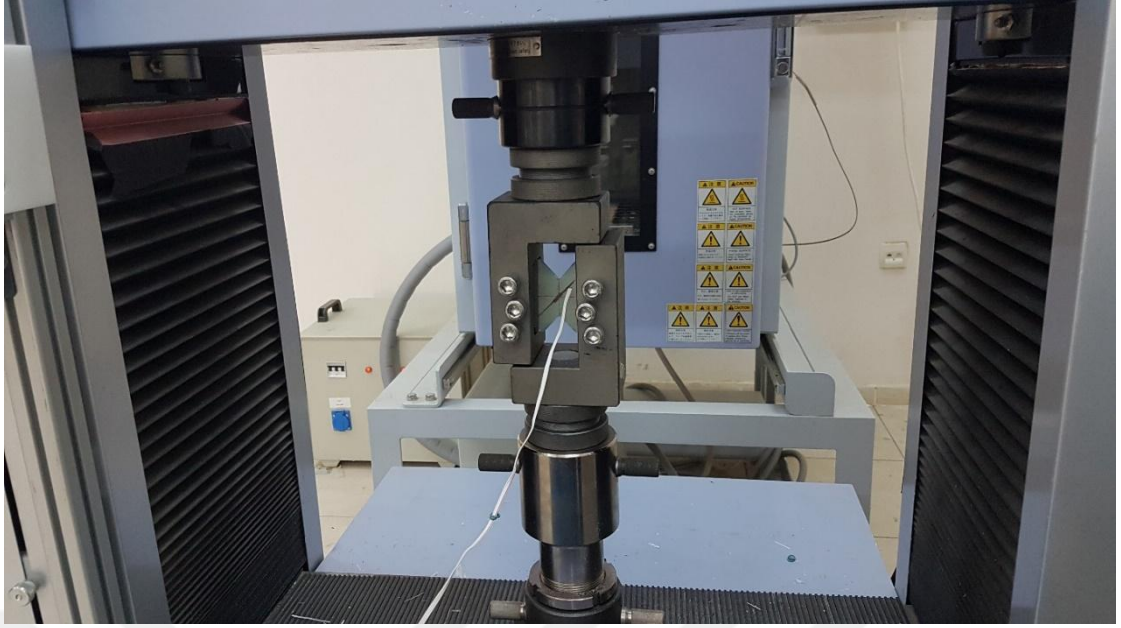
Burulma test cihazı tarafından uygulanan tork miktarı ve tutma çenesinin kendi eksenini etrafındaki dönme hızı, kontrol düğmeleri vasıtasıyla manuel olarak ayarlanabilir. Böylece, burulma momentindeki artış oranı tüm numuneler için 1 Nm/s olarak belirlenmiştir. Kompozit tüp numunelere uygulanan burulma momentleri kontrol panelinde yer alan moment göstergesi vasıtasıyla ve karşılık gelen burulma açıları açı ölçeği göstergesi vasıtasıyla (1 atma değeri = $0,3^\circ$) ölçülmüştür. Burulma momenti, kompozit tüp numunelerde kırılma hasarının aniden meydana geldiği noktaya kadar yükseltilmiş ve böylece maksimum hasar yükleri kaydedilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Silindirik kompozit tüp örneklerinin burulma deneylerinde kırılma hasarı

3.2.3. Sayısal Analiz için Temel Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Test edilen tüp örneklerini üretmek için kullanılan kompozit malzemenin temel mekanik özelliklerini elde etmek amacıyla, vakum infüzyon tekniği kullanılarak tek yönlü sekiz tabakalı bir cam elyaf epoksi plaka imal edilmiştir. Daha sonra plaka, aşağıda belirtilen standart test yöntemlerinde belirtilen boyutlarda kesilmiş ve bir dizi deneyler gerçekleştirilmiştir. ASTM D3039/D3039M'ye [56] göre gerçekleştirilen çekme deneyleri, ASTM D695'e [57] göre yapılan basma testleri ve ASTM D7078/D7078M'ye [58] göre yapılan kayma deneyleri (Şekil 3.6) ile elde edilen mekanik özellikler Tablo 3.1'de listelenmiştir.



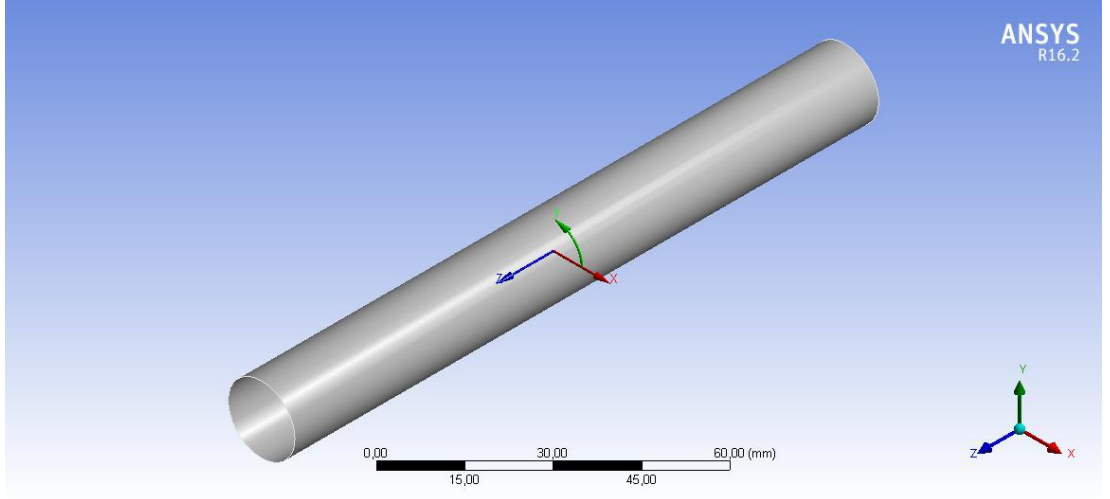
Şekil 3.6. Tek yönlü kompozit plakanın boyuna ve enine kayma özelliklerini belirlemek için yapılan V-çentikli (V-Notched Rail Shear Test) kayma testleri

Tablo 3.1. E-Cam elyaf epoksi kompozit laminanın temel malzeme özellikleri

Özellik	Sembol	Birim	Değer
Boyuna elastisite modülü	E_1	GPa	27,657
Enine elastisite modülü	E_2	GPa	12,888
Düzlem içi kayma modülü	G_{12}	GPa	7,485
Major poisson oranı	ν_{12}	-	0,2744
Minor poisson oranı	ν_{21}	-	0,1279
Boyuna çekme dayanımı	X_t	MPa	711,9
Enine çekme dayanımı	Y_t	MPa	80,9
Düzlem içi kayma dayanımı	S	MPa	61,2
Boyuna maksimum elastik çekme birim şekil değişimi	ϵ_{Lt}	-	0,002782
Enine maksimum elastik çekme birim şekil değişimi	ϵ_{Tt}	-	0,026118
Boyuna basma dayanımı	X_c	MPa	315,2
Enine basma dayanımı	Y_c	MPa	196,7

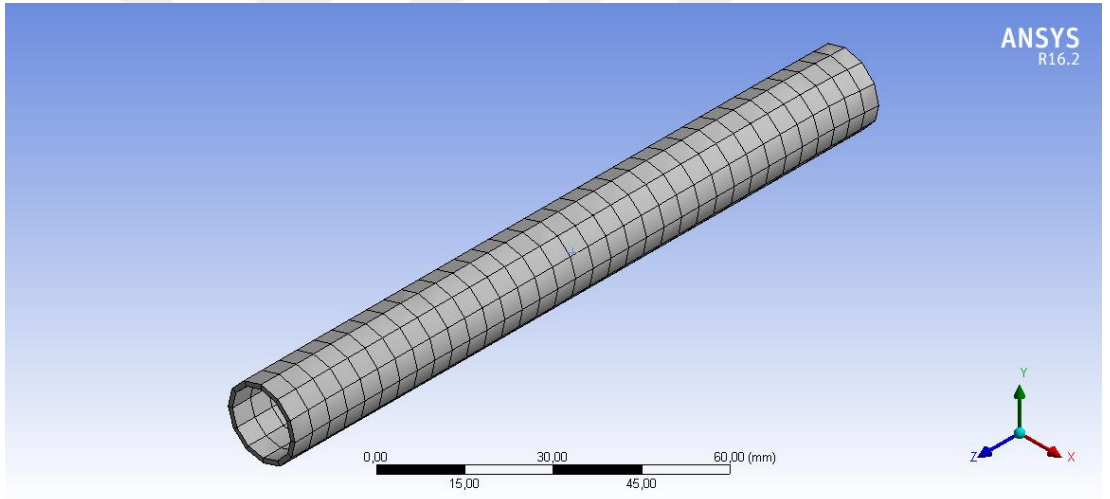
3.2.4. Silindirik Tüplerin Nümerik Modellemesi ve Sonlu Elemanlar Analizi (FEA)

Literatür çalışmaları dikkate alınarak yapılan bu çalışmada Ansys Workbench (16.2) programı kullanılarak boru tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ansys akış şemasının geometrik tasarım modelinde 16 mm çapında ve 140 mm uzunluğunda boru şeklinde sıfır kalınlığında bir yüzey gövde yapısı tasarlanmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Boru geometrisinin sıfır kalınlıklı kabuk eleman olarak oluşturulması

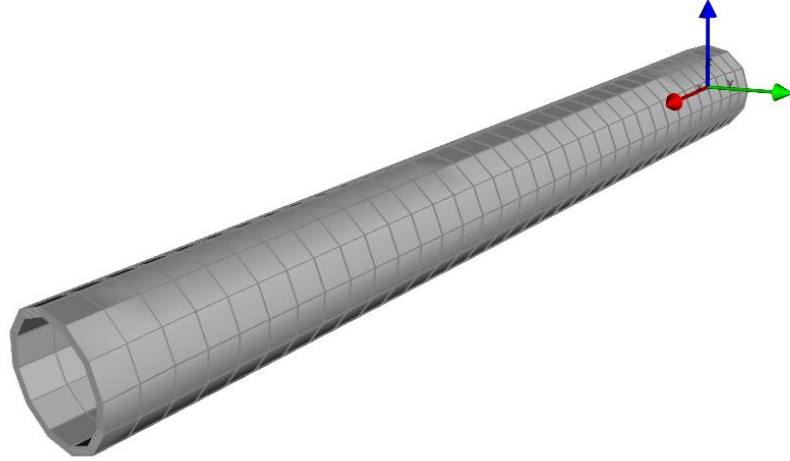
Yüzeysel geometrisi oluşturan boruya daha sonra model kısmında mesh atılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Borunun mesh görüntüsü

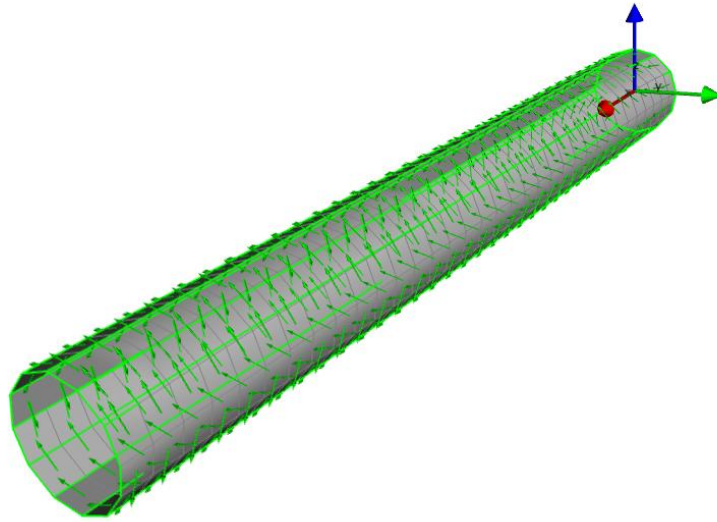
Nümerik analizde, Ansys malzeme kütüphanesi kullanılarak boru imalinde kullanılacak olan, E-Cam elyafı takviyeli epoksi malzemenin özellikleri multi-lineer plastik deformasyona uygun olarak tanımlanmıştır. Yüzey gövdesinde, malzeme özelliklerinin Tablo 3.1'e göre manuel olarak girildiği, 8 katmanlı epoksi E-Cam kompozit lamina, tüm gövde kalınlığı 1 mm ve boru kesitinin en dış çapı 18 mm olacak şekilde ölçülen gerçek numune ölçülerine uygun olarak sarılmıştır (Şekil 3.9). ACP (Pre) bölümünden katman sayısı ve her katmanın sarım açıları $+\alpha$ ve $-\alpha$ olarak (α , o anda analiz edilen kompozit tüp numunenin sarım açısı) tanımlanmıştır (Şekil 3.10).

ANSYS
R16.2



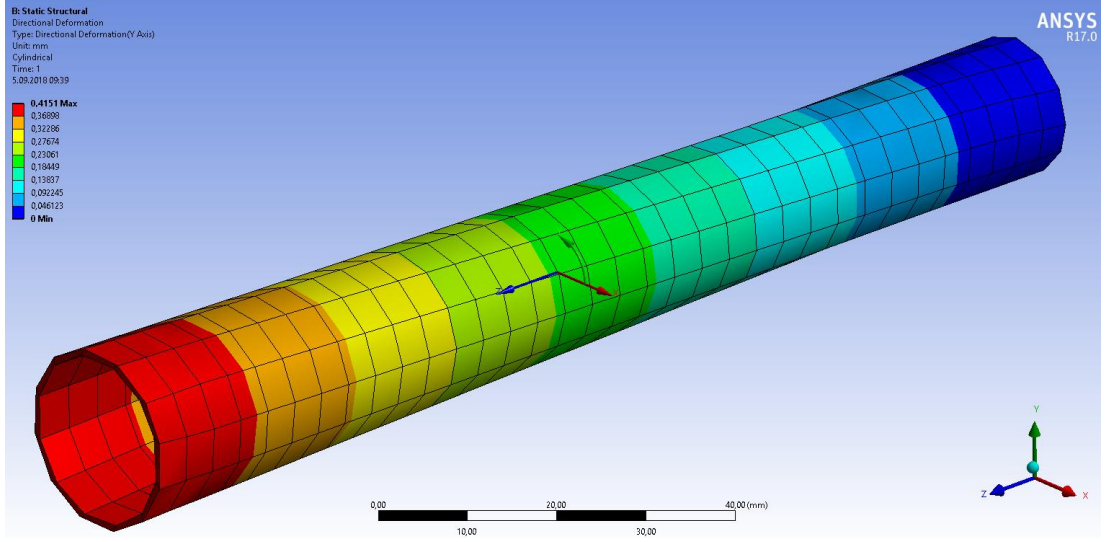
Şekil 3.9. Borunun katman görüntüsü

ANSYS
R16.2



Şekil 3.10. Fiber yönlendiği

Koordinat sistemini oluşturmak için silindirik bir rozet tercih edilmiştir (Şekil 3.11). Programın statik yapısal analiz kısmında, burulma yükü tüpün bir ucundan uygulanırken, tüpün diğer ucuna sabit destek kullanılarak tamamen sabitlenmiştir. Herhangi bir noktadaki eşdeğer gerilme ve birim şekil değiştirme (von-Mises), deformasyon ve hasar durumu dahil olmak üzere tüm çözüm verileri ANSYS yazılımının (ACP Composite Post Processing) kompozit analiz sonrası kısmı yardımıyla elde edilmiştir.



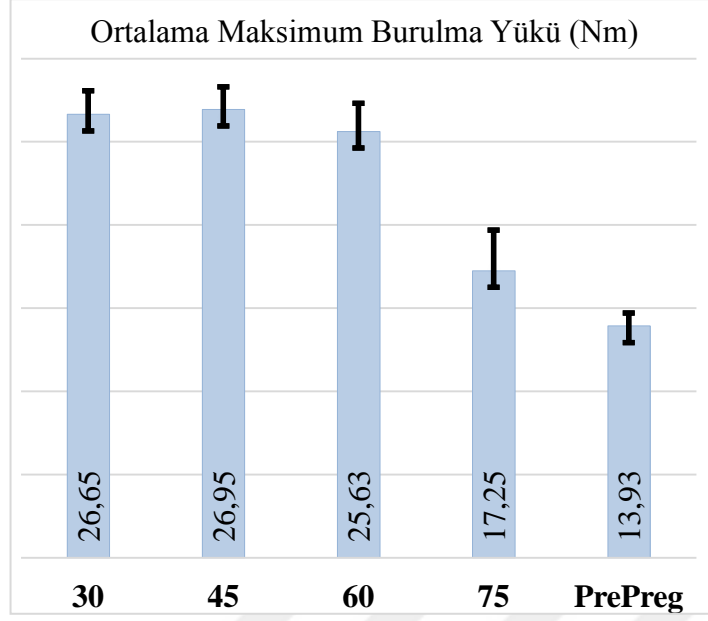
Şekil 3.11. Sonlu Elemanlar Analizi için ANSYS geometrik tasarım modelleyicisinde tasarlanan kompozit tüp modelinin deforme olmuş görünümü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Burulma Yükleme Testi Sonuçları

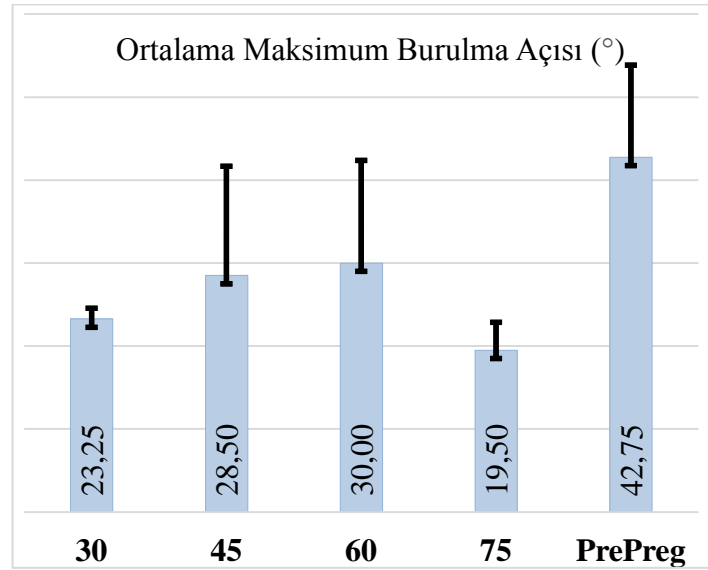
Bu çalışmanın ilk bölümünde, kompozit malzemelerden yapılmış içi boş silindirik millerin davranışları, bu tür elemanlarda en sık karşılaşılan gerilme kaynaklarından biri olan burulma yükleri altında deneysel olarak incelenmiştir. Maksimum hasar dirençleri, kopma sırasındaki burulma açıları ve ortalama burulma rijitlik değerleri, 30°, 45°, 60° ve 75° helis açılı filament sarımlı numuneler ve pre-preg sarılmış (0°, 90°) numuneler belirgin mekanik karakteristiklerin bulunması amacıyla bir uçta saf burulma yüklemesine tabi tutulurken diğer uçları ise sabit tutulmuştur. Bu arada, tork değerleri ve karşılık gelen burulma açıları eş zamanlı olarak kaydedilmiştir.

Şekil 4.1, farklı helis açılarında ve iki farklı yöntemle üretilen kompozit tüplerin burulma yükü altındaki en yüksek hasar yüklerinin ortalama deney sonuçlarını göstermektedir. Aynı çapa ve et kalınlığına sahip farklı helis açılı numunelerin hasar yükleri karşılaştırıldığında, en yüksek ortalama burulma yükü, 45° sarım açısına sahip olan numunelerde ölçüldüğü gözlenmiştir. Ancak $[\pm 30]_{FW}$ ve $[\pm 60]_{FW}$ 'lik numunelerin sonuçları göz önüne alındığında ortalamalarının $[\pm 45]_{FW}$ 'lik numunenin sonuçlarına çok yakın olduğu görülmektedir. Öyle ki, yaklaşık %5'lik bir farktan söz etmek mümkündür. Bu durum, uygulama koşullarına göre, sadece tek bir açı değerini tercih etmek zorunda kalmak yerine belirli bir sarım açısı aralığında çalışmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Diğer yandan, hem $[\pm 75]_{FW}$ helisel ve pre-preg sarılmış $[0, 90]_{PP}$ numunelerin ortalama hasar momentleri, bahsedilmiş olan ilk üç tipteki değerlerden önemli ölçüde daha düşüktür. Bu durum, yapısal kırılma hasarı açısının, çekme gerilmelerinin burulmada en etkili olduğu 45° ara yüzeyden kayma gerilmelerinin etkisi altında olan 90° ara yüzeye doğru yönünü değiştirmesi ile ilişkilendirilebilir. Yani, kayma gerilmesinin helisel olarak sarılmış takviye malzemesi üzerinde daha etkili hale gelmesi, elyaflarda kayma hasarının oluşmasını sağlar. Tablo 3.1 incelendiğinde, mevcut kompozit malzemenin kayma mukavemetinin, aksenal çekme mukavemetinden yaklaşık %91,4 oranında daha düşük olduğu görülebilir.



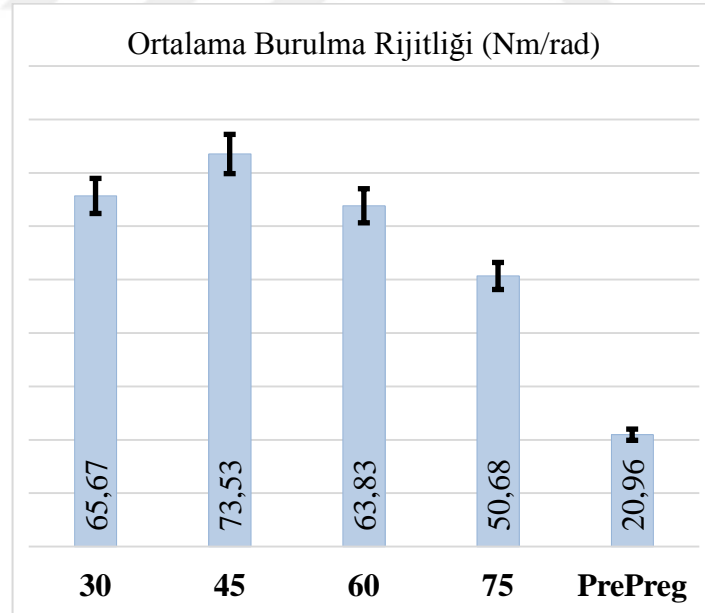
Şekil 4.1. Farklı sarım açlarına bağlı olarak elde edilen maksimum burulma yükü grafiği

Filament ve pre-preg sarılmış numunelerin hasar görene kadar ortalama burulma açlarına gelince, aralarındaki fark dikkat çekicidir (Şekil 4.2). Bu fark, maksimum ortalama dönme açısına sahip filament sargılı boru olan $[\pm 60]_{FW}$ tipindeki örnek ile karşılaştırıldığında %42,5 olarak hesaplanabilir. Pre-preg tüplerdeki 0° ve 90° fiberler arasındaki bağlar, açısız plastik deformasyonu maksimum seviyede taşıyabildiğinden, $42,75^\circ$ 'lik önemli bir dönme açısına kadar hasar oluşmamaktadır.



Şekil 4.2. Burulma yükü altında kompozit tüplerin sarım açısının ve üretim yönteminin hasar anındaki maksimum burulma açısı üzerindeki etkileri

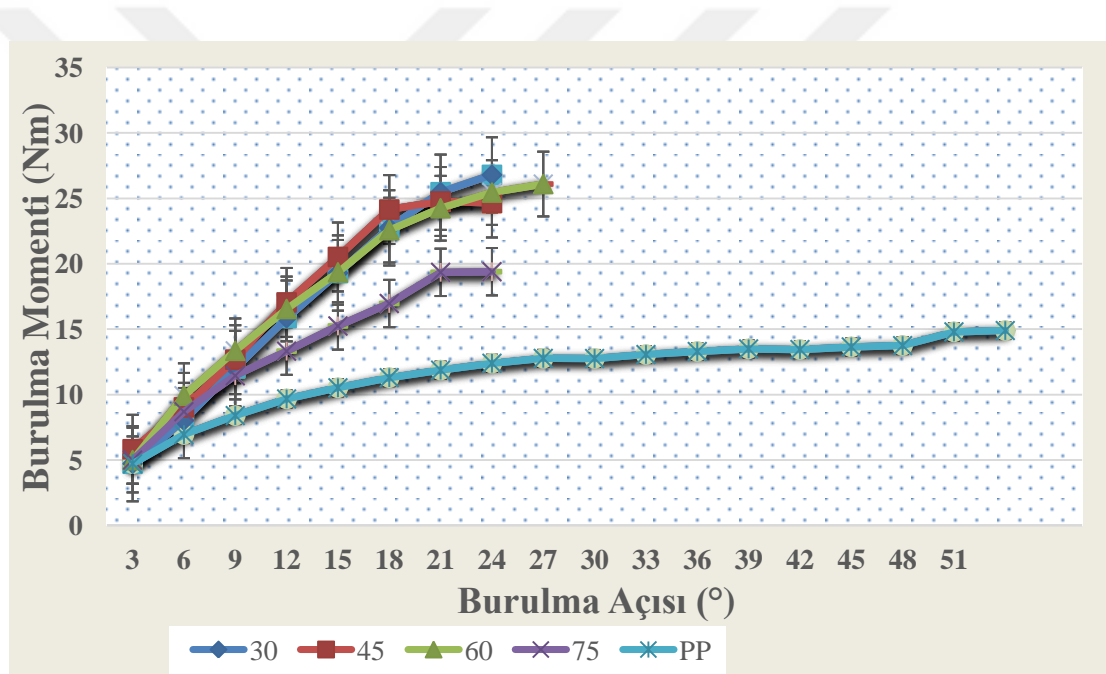
Güç iletimi sırasında burulmaya maruz kalan sistem bileşenlerinin mekanik davranışını belirleyen en önemli parametrelerden biri olan burulma rijitliği Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanabilir. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada Chen ve ark. [59], burulma rijitliğinin bir sistemin statik cevabında olduğu gibi dinamik davranışında da oldukça etkili olduğunu belirtmiştir. Yazarlar dört aşamalı bir helikopter iletim sisteminin dinamik bir modelini önermiş ve sistem titreşiminin diferansiyel denklemini türetmişlerdir. Üç giriş kolunun genlik tepkileri hesaplanmış ve sistemdeki giriş milinin burulma rijitliğinin artırılmasıyla bunların azaldığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, giriş milleri tasarlanırken daha yüksek burulma rijitliği olan miller önerilmiştir. Badie ve ark. [43] tarafından da bahsedildiği gibi, burulma rijitliği, tüplerde 45° helis açısında maksimum seviyesine ulaşır, ancak sarım açısı bu değerden uzaklaşırken yavaş yavaş azalır (Şekil 4.3). $[\pm 45]_{FW}$ tüpünden %71,5 daha düşük bir burulma rijitliğine sahip pre-preg sarımlı millere gelince, eşdeğer geometriye sahip numuneler arasında en düşük değere sahiptir. Pre-preg sarımlı $[0, 90]_{PP}$ miller üretim kolaylığı açısından avantajlı olsa da, çoğu durumda burulma gücü iletilirken oldukça düşük burulma rijitliğinin bir handikap olabileceği de akılda tutulmalıdır.



Şekil 4.3. Burulma yükü altında kompozit tüplerin sarım açısının ve üretim yönteminin burulma rijitliği üzerindeki etkileri

Tüm numune tiplerinin deneysel olarak elde edilen yüke karşı oluşan burulma açısı eğrileri toplu halde Şekil 4.4'te verilmiştir. Bu eğriler, her bir numune tipi için

test edilen tüm örneklerin verilerinin ortalaması alınarak Tablo 4.1'den türetilmiştir. $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 45]_{FW}$ ve $[\pm 60]_{FW}$ örnek tiplerinin nispeten daha yüksek burulma rijitlikleri nedeniyle en yüksek burulma dirençlerine sahip oldukları öncelikle dikkat çekmektedir. Öyle ki, her bir birim dönme açısı artışına karşılık burulma momentlerindeki artış diğer iki örnek tipine nazaran daha fazladır. Bu durum, dönen güç aktarma elemanlarında 30° ile 60° arasındaki sarım açısı değerlerinin tasarım etkinliği açısından kullanımının elverişli olduğunu göstermektedir. Ancak, güç iletme milinin burulmadaki rijitliği ikincil bir öneme sahip ise ve daha yüksek dönme açılarında bile hasar oluşmadan güç iletiminin devam edebilmesi arzu ediliyorsa, üretim kolaylığı açısından daha elverişli olan pre-preg sarılmış $[0, 90]_{PP}$ miller tercih edilebilir.



Şekil 4.4. Burulma deneylerinden elde edilen $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 45]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$, $[\pm 75]_{FW}$ ve $[0, 90]_{PP}$ numune tiplerine ait yük ve burulma açısı eğrileri

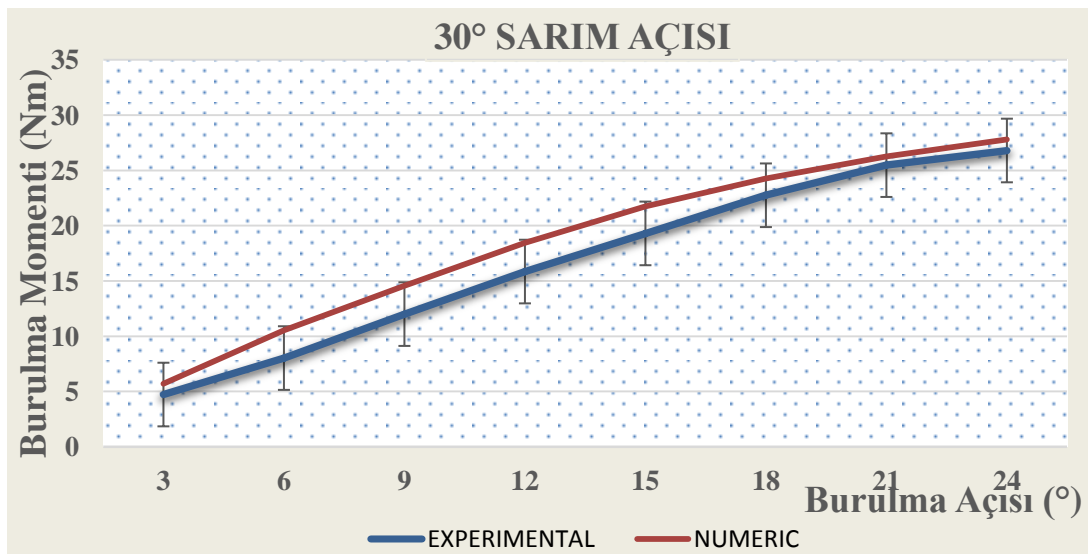
Tablo 4.1. $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 45]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$, $[\pm 75]_{FW}$ ve $[0, 90]_{PP}$ numune tiplerine ait sonlu elemanlar analizi (FEA) ve deneysel test sonuçları

Numune Tipi Numune No	$[\pm 30]_{FW}$					$[\pm 45]_{FW}$					$[\pm 60]_{FW}$					$[\pm 75]_{FW}$					$[0, 90]_{PP}$				
	Sp.1	Sp.2	Sp.3	Sp.4	FEA	Sp.1	Sp.2	Sp.3	Sp.4	FEA	Sp.1	Sp.2	Sp.3	Sp.4	FEA	Sp.1	Sp.2	Sp.3	Sp.4	FEA	Sp.1	Sp.2	Sp.3	Sp.4	FEA
Dönme Açısı (°)	Deneysel					Deneysel					Deneysel					Deneysel					Deneysel				
3	5,3	4,1	3,9	5,6	5,7	5,5	4,9	5,6	7,3	5,464	6,2	5	4,6	4,2	5,23	5,8	4,7	4,4	5,1	5	5	6,2	4,4	3,3	4,87
6	8,3	7,5	7,3	9	10,553	8,9	8	8,7	10,5	10,101	11,8	8,4	7,9	11,6	9,755	10,9	9,2	7,2	7,5	9,503	7,2	8,2	6,8	5,6	9,336
9	11,7	12,4	10,2	13,7	14,58	12	11,5	12,6	14,6	14,038	15,7	11,8	10,8	15,1	13,605	12,9	11,3	9	12,6	13,302	8,5	9,4	8,4	7,3	13,085
12	15,2	15,5	15,3	17,4	18,45	15	18,9	16,3	18	17,773	18,7	15,2	14,5	17,8	17,275	15	13,4	10,8	14,1	16,928	9,4	10,4	10,3	8,6	16,65
15	17,8	18,3	20,9	20,2	21,745	18	22,8	19,8	21,5	20,904	21,3	18,2	17,2	20,7	20,427	16,3	15,9	13	15,8	20,204	10,2	11,3	11,4	9,2	19,952
18	21,8	21,9	23,9	23,4	24,28	21	26,2	24,7	24,7	23,397	22,8	23,9	20,4	23,2	22,965	17,5	19,4	14		22,837	11	12,3	12,2	9,7	22,6
21	23,9	24,9	26,2	26,9	26,27	19	27,3	28		25,428	24,3	26	23	23,7	25,05	18,9	19,8			25,029	11,6	12,8	12,7	10,4	24,819
24	25,2	26,2		29	27,8	21		28,3		27,064		25,3	25,6		26,783	19,4				26,841	12,1	13,4	13,3	10,8	26,639
27												25,5	26,7		28,122						12,5	13,9	13,6	11,1	28,064
30																					13		13,8	11,5	
33																					13,4		14,1	11,7	
36																					13,8		14,2	11,9	
39																					14		14,4	12,1	
42																							14,5	12,4	
45																							14,6	12,7	
48																							14,7	12,8	
51																							14,8		

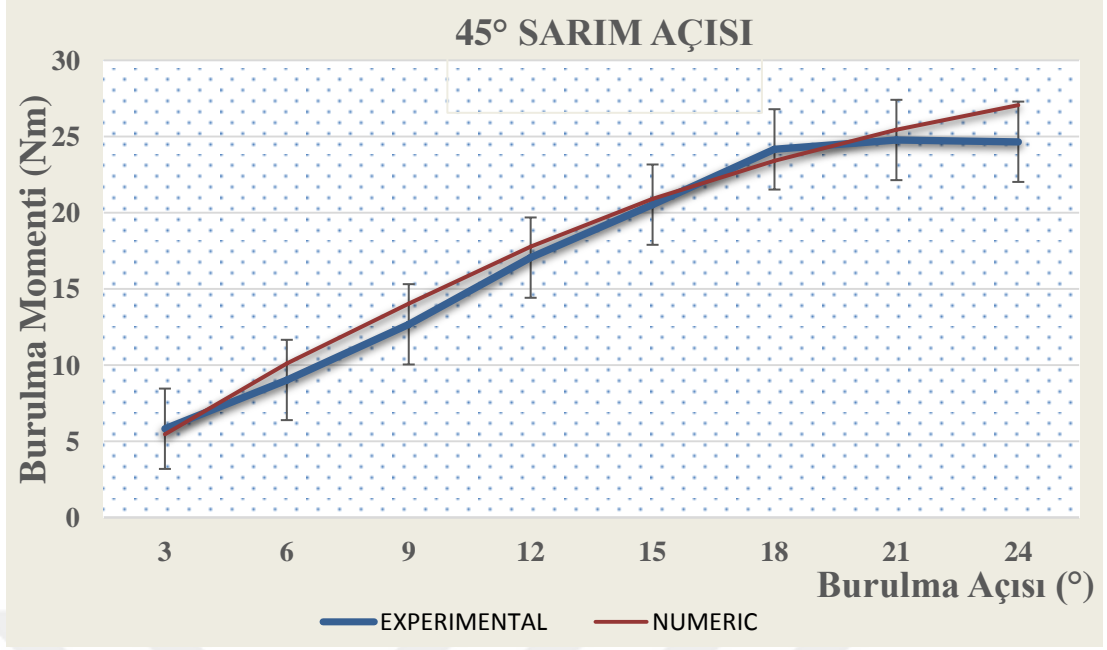
4.2. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile Elde Edilen Nümerik Sonuçlar

Ortalama deneysel bulguların eğrisi ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen eğriler Şekil 4.5-9'da her biri bir numune tipine ait olmak üzere birbiriyle karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi, tüm örnekler ilk yükleme anından itibaren multi-lineer plastik deformasyona uğramışlardır. Yani burulma momenti ve burulma açısı (T- θ) grafiklerindeki eğriler doğrusal değildir.

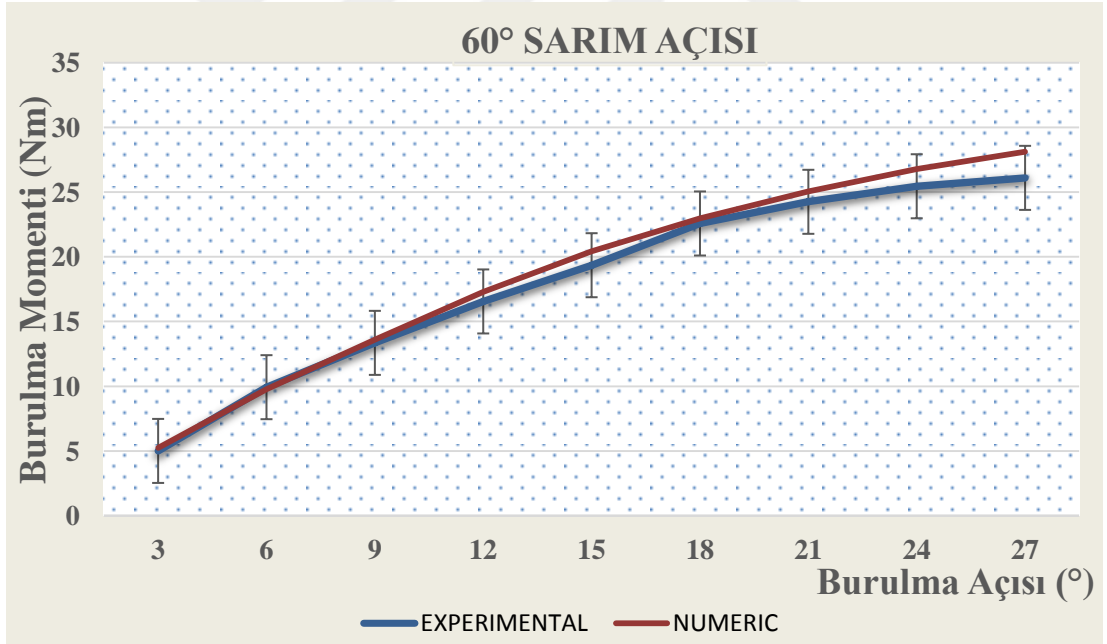
Hibrit cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit şaftların burulma davranışlarını inceleyen Sevkat ve ark. [60] doğrusal olmayan bir tork-dönme açısı eğrisi ortaya çıkarmıştır, ancak yazarlar tarafından geliştirilen elastik ortotropik kompozit sonlu eleman modeli bu davranışı yeterince temsil edememiştir. Oysa mevcut çalışma sırasında kabul edilen multi-lineer plastik deformasyona dayalı malzeme modellemesi, deneysel ve sayısal analizler arasındaki uyumluluğu sağlamıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında, sonlu elemanlar modelinin $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 45]_{FW}$ ve $[\pm 60]_{FW}$ örnek tipleri için deneysel uygulama ile gayet uyumlu olduğu sonucuna varılabilir (Şekil 4.5, 4.6, ve 4.7). Buna karşın, örneklerin $[\pm 75]_{FW}$ ve $[0, 90]_{PP}$ FEA sonuçları, sadece ilk yükleme aşamasında gerçek sonuçlarla tutarlıdır ve burulma momentinin daha yüksek kademelerinde gerçek sonuçlardan giderek daha fazla uzaklaşmaktadır (Şekil 4.8 ve 4.9). Bu durum, bazı öngörülemez plastik deformasyon mekanizmalarının, dönüş açısı arttıkça numuneler üzerinde etkili olmaya başladığını göstermektedir.



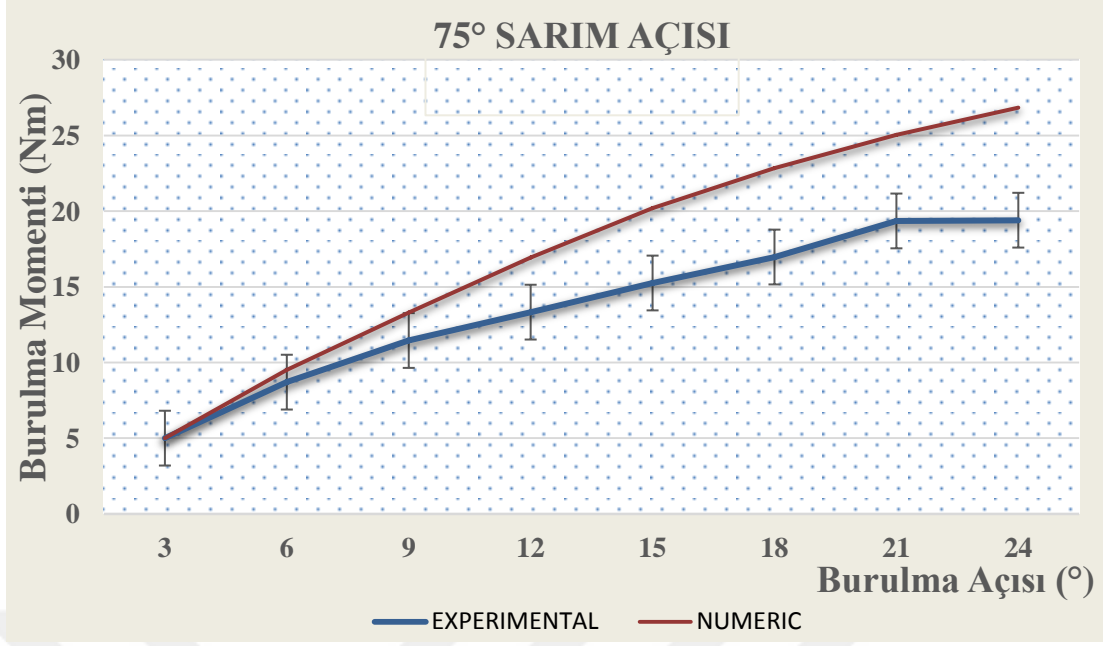
Şekil 4.5. $[\pm 30]_{FW}$ numune tipine ait deneysel ve nümerik (FEA) yolla elde edilen burulma momenti-burulma açısı eğrileri



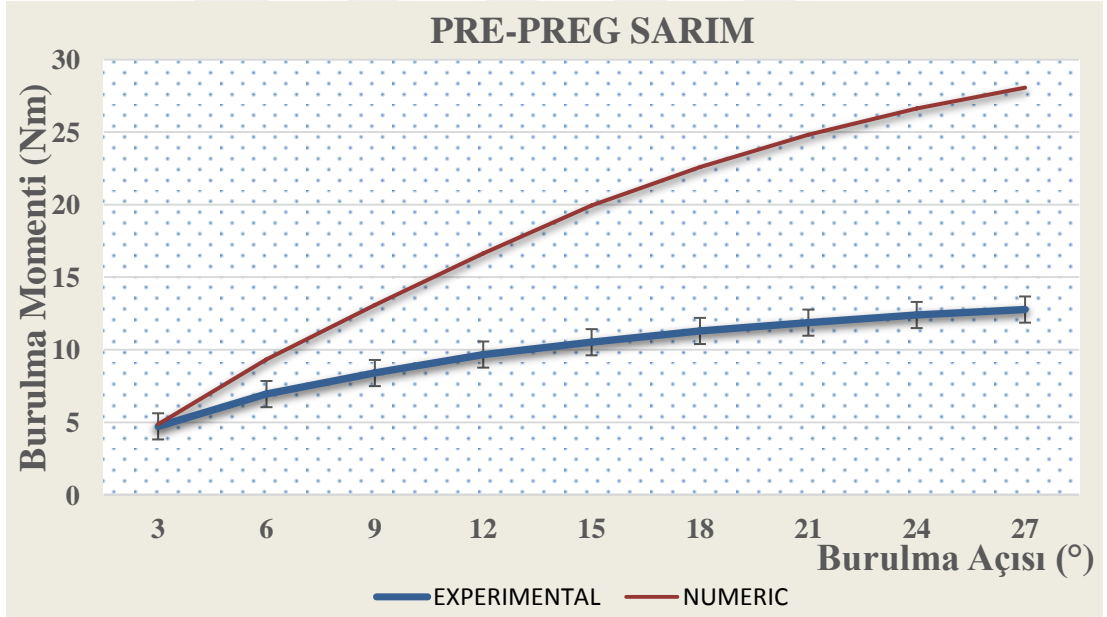
Şekil 4.6. [±45]_{FW} numune tipine ait deneysel ve nümerik (FEA) yolla elde edilen burulma momenti-burulma açısı eğrileri



Şekil 4.7. [±60]_{FW} numune tipine ait deneysel ve nümerik (FEA) yolla elde edilen burulma momenti-burulma açısı eğrileri



Şekil 4.8. $[\pm 75]_{FW}$ numune tipine ait deneysel ve nümerik (FEA) yolla elde edilen burulma momenti-burulma açısı eğrileri



Şekil 4.9. $[0, 90]_{PP}$ numune tipine ait deneysel ve nümerik (FEA) yolla elde edilen burulma momenti-burulma açısı eğrileri

4.3 Hasar Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi ve Hasar Modları

Test edilen tüm hasarlı numuneleri gösteren Şekil 4.10'da, kırık çatlaklarının, filament sargılı numunelerdeki sarmal doku ile tam olarak aynı istikamette yönlendiği, pre-preg yöntemiyle sarılmış numunenin ise tüp eksenine tamamen dikey

yönde ayrılarak hasara uğradığı fark edilmektedir. Bu durum, hasar modlarının filament sarım açısına ve aynı zamanda tüplerin imalat yöntemine de bağlı olduğu anlamına gelmektedir. Baskın hasar modu ile hasar başlangıcı ve ilerlemesinde etkili olan başlıca gerilme tipi helis açısına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle, fiberleri üzerinde en yüksek kayma gerilmesini taşıyan $[0, 90]_{PP}$ numuneleri en düşük burulma rijitliğine sahipken, en yüksek burulma rijitliği ise takviye cam fiberlerin taşıdığı çeki yükünün en yüksek değere ulaştığı $[\pm 45]_{FW}$ numunelerinde elde edilmektedir.

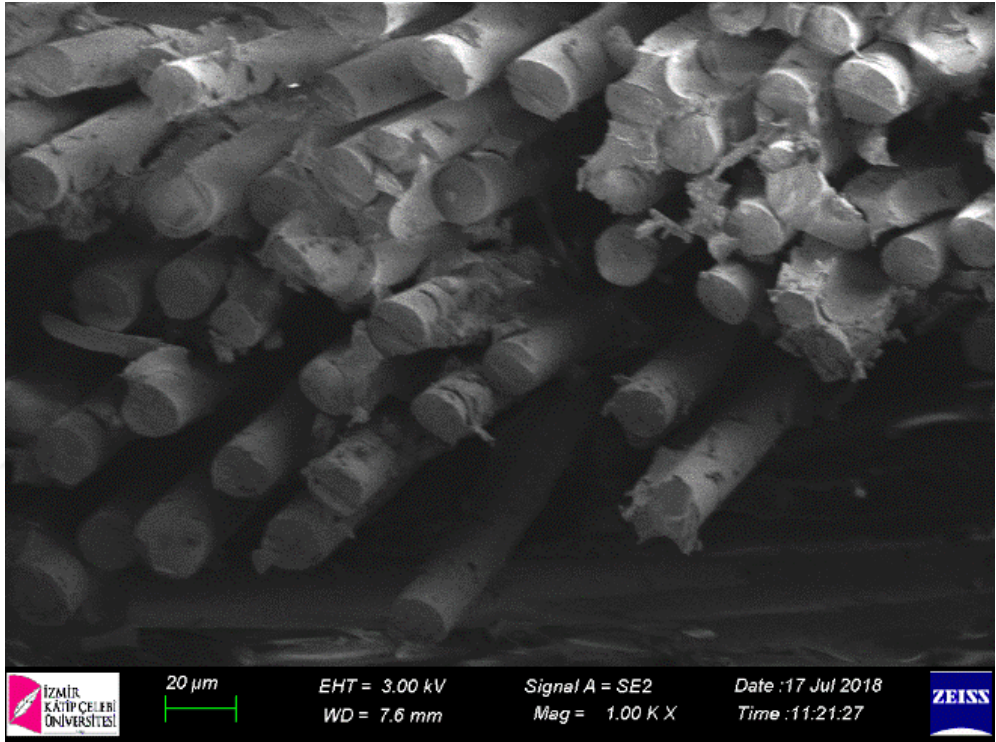


Şekil 4.10. Çeşitli tipteki numunelerin burulma hasarı meydana geldikten sonraki son görünümleri ve hasar modları

Şekil 4.11-15'te verilen SEM görüntülerinin, her bir örnek tipinin hasarından esas manada sorumlu olan gerilme tipi hakkında belirgin ipuçları içerdiği görülmüştür. Şekil 4.11 titizlikle incelendiğinde, cam elyaflarının kırılma yüzeyinin pürüzsüz ve lif eksenine dik bir yönde açılmal olarak konumlandığı anlaşılmaktadır. Böyle bir kırılma yüzeyine neden olan hasarın tipinin, saf çekme gerilimine maruz kalan kırılmal bir malzemeninki ile tamamen aynı olduğu söylenebilir. Bu görüntü,

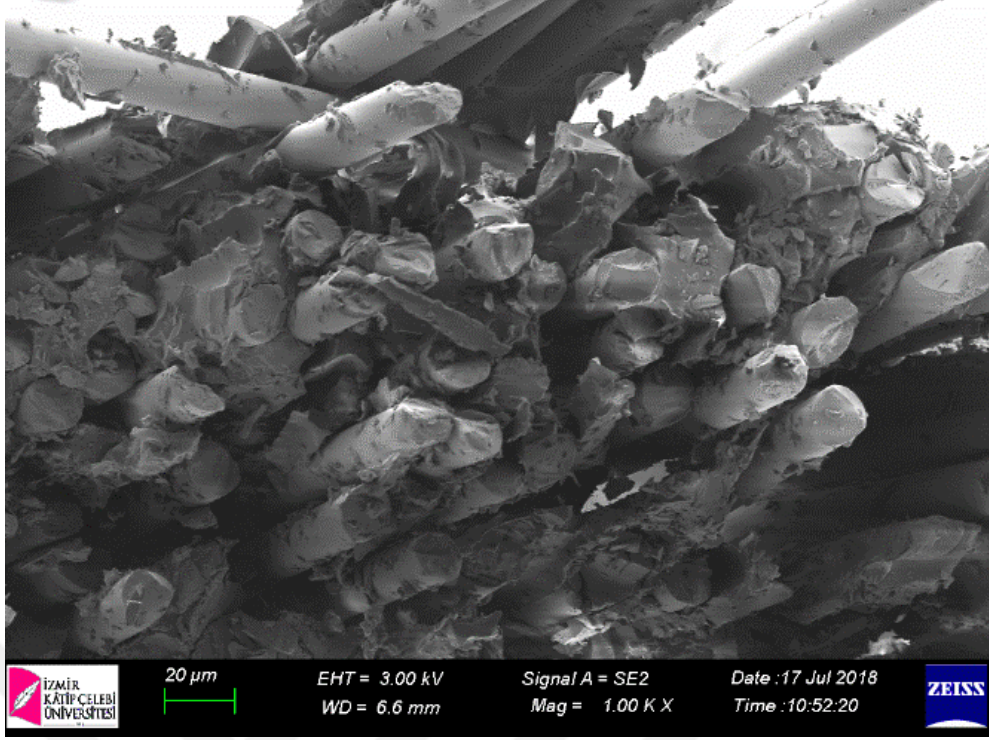
ince cidarlı silindirik kompozit malzemedeki 45° açılı liflerdeki gerilme oluşumunu açıkça göstermektedir.

[±45]_{FW} tipi numuneye ait hasarlı malzeme yüzeyi üzerinde dikkati çeken bir diğer husus da, diğer tip numunelerdeki lifler halen epoksi matrise gömülü halde iken, buradaki liflerin önemli bir kısmının hasar sırasında epoksi matristen dışarıya doğru çekilmiş olması durumudur. Çekme yükü altında, liflerin hasardan önceki uzamasının epoksi matristen çok daha fazla oluşu lifler ve matris arasında böyle bir ayrışmanın sebebi olarak kabul edilebilir.

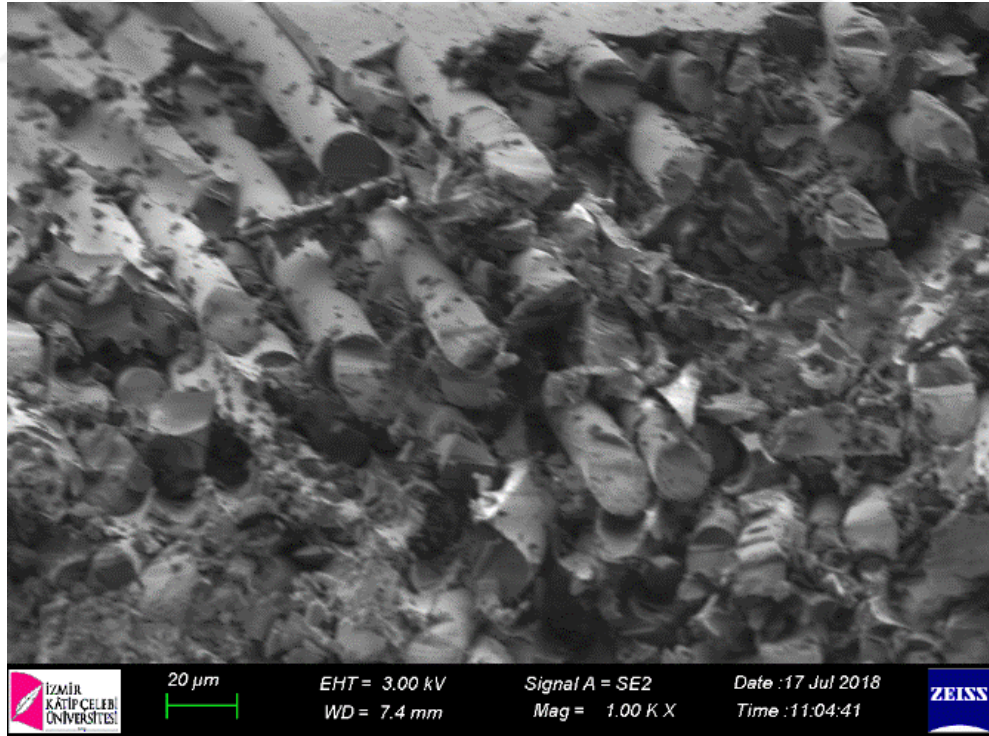


Şekil 4.11. [±45]_{FW} örneğinin kırık yüzeyinden alınan 1000x büyütme SEM görüntüsü

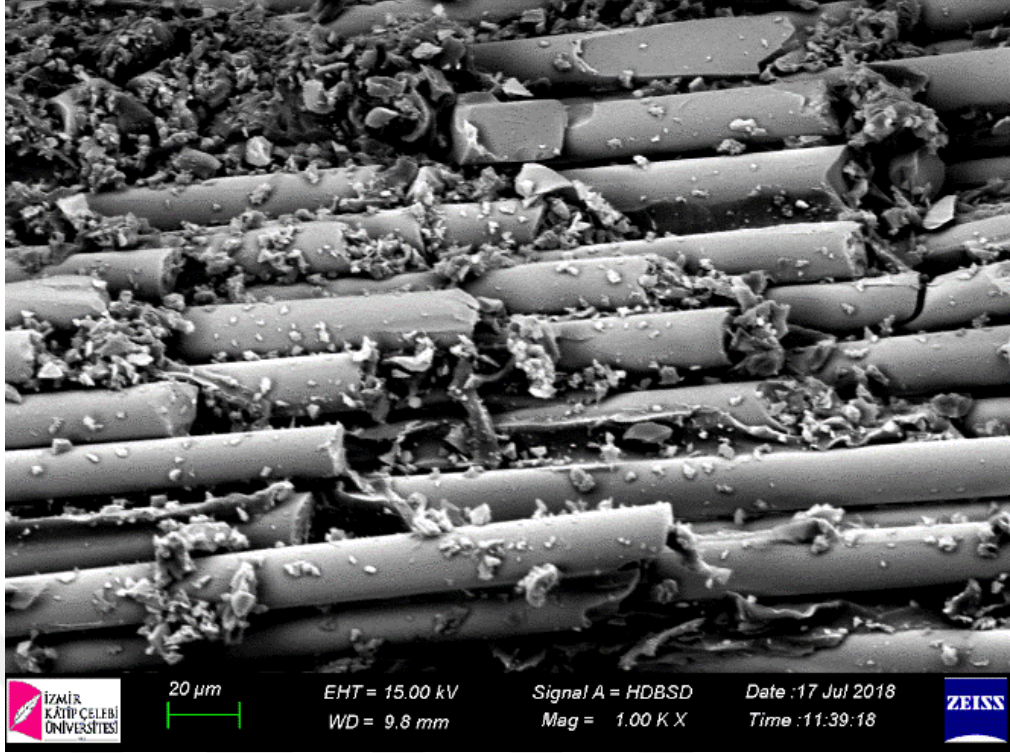
Diğer örneklerin hasar yüzeylerinin görüntülerine gelince, [±30]_{FW}, [±60]_{FW} ve [±75]_{FW} ile üretilen numunelerde, liflerin kırık yüzeyleri pürüzlü, düzensiz ve dar açıdır. Bu düzensiz kırık oluşumu, liflerin burulma anında bileşik gerilme durumuna maruz kaldığını göstermektedir.



Şekil 4.12. $[\pm 30]_{FW}$ örneğinin kırık yüzeyinden alınan 1000x büyütme SEM görüntüsü

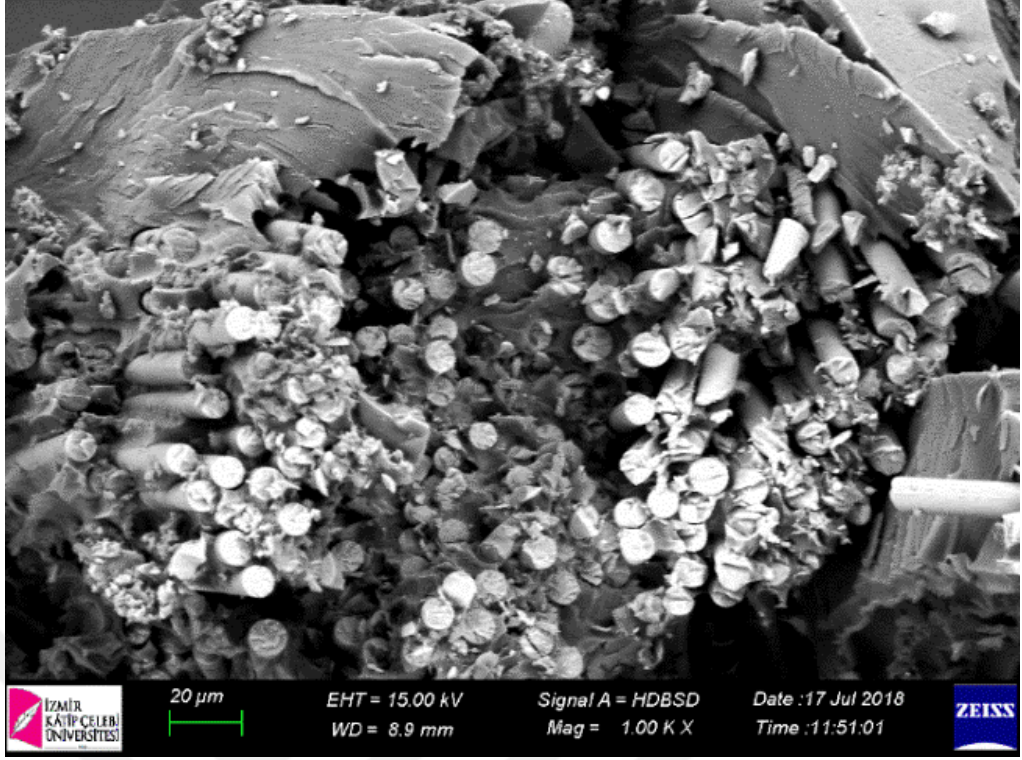


Şekil 4.13. $[\pm 60]_{FW}$ örneğinin kırık yüzeyinden alınan 1000x büyütme SEM görüntüsü



Şekil 4.14. $[\pm 75]_{FW}$ örneğinin kırık yüzeyinden alınan 1000x büyütme SEM görüntüsü

Şekil 4.15, burulma yükü altında saf kayma gerilmesine maruz kalan $[0, 90]_{PP}$ tipi kompozit yapının hasar durumunu göstermektedir. Yapının ayrışması sırasında, bazı liflerin parçacıklara ayrıldığı gözlemlenirken, bazılarının da kesme yükü tarafından doğrultularından saptırıldığı görülmüştür. Genel olarak, mevcut SEM görüntülerine dayanarak, tüm örnek tiplerinin mikroyapısında liflerde ve matris malzemede görülen hasar oluşumlarının, maruz kaldıkları gerilme türüne uygun olduğu sonucuna ulaşmak mümkündür.



Şekil 4.15. $[0, 90]_{PP}$ örneğinin kırık yüzeyinden alınan 1000x büyütme SEM görüntüsü

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Burulma yükü altında çalışan ince cidarlı içi boş silindirik cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit tüpler bu araştırmanın konusu olmuştur. Filament sargı ve pre-preg sarma metodu olmak üzere iki farklı üretim tekniğini uygulayarak, kompozit tüpler beş farklı fiber oryantasyonu ile üretilmiştir. Bu numuneler arasında, filament sargılı olanlar, boru eksenine göre helisel açığı temsil eden, $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 45]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$ ve $[\pm 75]_{FW}$ olarak gösterilmiştir. Benzer şekilde, 0° ve 90° fiber oryantasyonlu pre-preg sarımlı numuneler ise $[0, 90]_{PP}$ ile karakterize edilmiştir. Tüm numuneler, hasar oluşana kadar saf burulma momentine maruz bırakılarak test edilmiştir.

Her bir örnek tipinin deneysel bulgularının ortalama değerleri, tork ve burulma açısı (T- ϕ) eğrileri, maksimum burulma rijitliği (k_T), maksimum burulma momentleri ve maksimum burulma açıları yönlerinden birbiriyle karşılaştırılmıştır. Her bir numune tipi için sonlu eleman modelleri geliştirilerek deneysel verilerin doğrulanması için sayısal analizler yapılmıştır. Son olarak, hasarlı numunelerin kırık yüzeylerinin mikro boyutlu yapıları taramalı elektron mikroskobu SEM görüntüleri ile analiz edilmiştir. Özet olarak, elde edilen verilerin incelenmesinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Filament sargılı ince cidarlı tüpler arasında en yüksek ortalama burulma direnci $[\pm 45]_{FW}$ numunelerinde 73,53 Nm/rad olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, $[\pm 30]_{FW}$ numunelerinde ortalama burulma direnci 65,57 Nm/rad ve $[\pm 60]_{FW}$ numunelerinde ortalama burulma direnci 63,83 Nm/rad'dır. Buna göre, kompozit tüplerin tasarımında 30° ile 60° sarım açısı aralığında çalışmanın mümkün olduğu kanaatine varılmıştır.
- Pre-preg sarma tekniği ile üretilen tek örnek tipi olan $[0, 90]_{PP}$, 0° açıda olan lifler üzerlerinde oluşan aşırı kayma gerilmeleri nedeniyle minimum ortalama hasar direnci göstermişlerdir. Bununla birlikte, eksenel ve teğetsel yönde takviye edilmiş bu tip borular, filament sargılı tüplere kıyasla üstün açısal plastik deformasyon kapasitesi nedeniyle kopmadan önce maksimum ortalama dönme açısına olanak sağlamışlardır.
- Giriş bileşenlerinin tasarlanmasında özellikle yüksek burulma rijitliği olan boru tipi transmisyon milleri tavsiye edilmektedir. Sistem bileşenlerinin

mekanik davranışını belirleyen en önemli parametrelerden biri olan burulma rijitliğinin, tüplerde 45°'lik helis açısında maksimum seviyesine ulaştığı, ancak sarım açısının bu değerden uzaklaştıkça kademeli olarak azaldığı tespit edilmiştir.

- Geliştirilen sonlu elemanlar modeli $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 45]_{FW}$ ve $[\pm 60]_{FW}$ örnek tipleri için deneysel bulgularla oldukça uyumlu sonuçlar vermiştir. Buna karşın, bu sayısal modelin sonuçları, ilk yükleme fazı hariç olmak üzere, $[\pm 75]_{FW}$ ve $[0, 90]_{PP}$ numune tiplerinin sonuçları ile yeterince uyum içinde değildir.
- Numunelerin makro ölçekli deformasyon görüntülerinden anlaşılacağı üzere, burulma yükünün neden olduğu hasar modları, filament sarım açısına ve aynı zamanda tüplerin imalat yöntemine bağlıdır. Bu nedenle, filament sargı numunelerindeki hasar çatlağı sarmal doku ile tam olarak aynı istikamette iken, pre-preg sarımlı numune ise boru eksenine göre dik yöndedir.
- Numunelerin hasar yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri, her bir örnek tipinin hasarından başlıca sorumlu olan gerilme tipi hakkında belirgin ipuçları içermektedir. Öyle ki, $[\pm 45]_{FW}$ numunesinin mikrografisinde, cam elyafların kırılma yüzeyi pürüzsüz ve elyaf eksenine diktir ve bu kırık yapısı, saf gerilmeye maruz kalan rijit bir malzemeninkiyle oldukça benzerdir. $[\pm 30]_{FW}$, $[\pm 60]_{FW}$ ve $[\pm 75]_{FW}$ ile üretilen numune tiplerinin liflerinin kırılmış yüzeyleri, liflerin bileşik gerilme durumuna maruz kaldığını gösteren, düzensiz ve dar açılıdır. $[0, 90]_{PP}$ numunesinin mikrografisi, saf kayma gerilmesine maruz kalan kompozit yapının hasar durumunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Paulo, S.F., Jose', H.S.A.J., Sandro, C.A. Carbon/Epoxy Filament Wound Composite Drive Shafts Under Torsion and Compression. *Journal of Composite Materials*. 2017, 1-9.
- [2] Mutasher, S.A., Sapuan, S.M., Sahari, B.B., Hamouda A.M.S. Torsion Transmission Capacity of a Hybrid Aluminum/Composite Driveshaft. *Polymers & Polymer Composites*. 2006, 14(2), 1-10.
- [3] Shahanawaz A., Akshansh U., Abhin B. Evaluation of Structural and Vibrational Characteristic of Composite Drive Shaft For Automobile Using Fem. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 2016, 5(4), 702-712.
- [4] Chowdhuri, M.A.K., Hossain, R.A. Design Analysis of an Automotive Composite Drive Shaft, *International Journal of Engineering and Technology*. 2010, 2(2), 45-48.
- [5] Tarakcioglu, N., Samanci, A., Arikan, H., Akdemir, A. The Fatigue Behavior of ($\pm 55^\circ$)₃ Filament Wound GRP Pipes With a Surface Crack Under Internal Pressure. *Composite Structures*. 2007, 80, 207.
- [6] Martins, L.A.L., Fernando L.B., Theodoro A.N. Structural and Functional Failure Pressure of Filament Wound Composite Tubes. *Materials and Design*. 2012, 36, 779-787.
- [7] Martins, L.A.L., Bastian F.L., Netto, T.A. Reviewing Some Design Issues for Filament Wound Composite Tubes. *Materials and Design*. 2014, 55, 242-249.
- [8] Xing, J., Geng, P., Yang, T. Stress and Deformation of Multiple Winding Angle Hybrid Filament-Wound Thick Cylinder Under Axial Loading and Internal and External Pressure. *Composite Structures*. 2015, 131, 868-877.
- [9] Hocine, A., Chapelle, D., Boubakar, M.L., Benamar, A., Bezazi, A. Experimental and Analytical Investigation of the Cylindrical Part of a Metallic Vessel Reinforced by Filament Winding While Submitted to Internal Pressure *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2009, 86, 649-655.
- [10] Şahin, Y. Kompozit Malzemelere Giriş. Seçkin Yayınevi, Ankara, 2015, 31-263.
- [11] Onaran, K. Malzeme Bilimi. Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 2006, 362 s.
- [12] Arıcasoy, O., Kompozit Sektör Raporu. İstanbul Ticaret Odası Yayınları. 2006, 5-9.
- [13] Eryıldız, E., Eker, A.A., Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler ve Uygulama Alanları. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2015, 7(4), 5.

- [14] Kara, M. Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 2006, 8 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [15] Mazumdar, S.K. Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. CRC Press, Washington, 2002, 24-165.
- [16] Kaw, A.K. Kompozit Malzeme Mekaniği (B. Okutan Baba, R. Karakuzu, Çev.). Ankara, Efil Yayınevi, 2014, 18-153.
- [17] Karpuz, P. Mechanical Characterization of Filament Wound Composite Tubes by Internal Pressure Testing. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 2005, 5-6 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [18] Bulut, Y., Erdoğan, Ü.H. Selüloz Esaslı Doğal Liflerin Kompozit Üretiminde Takviye Materyali Olarak Kullanımı. Tekstil ve Mühendis Dergisi. 2011, 82, 27.
- [19] Mallick, P.K. Fiber-Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design. CRC Press, New York, 2007, 20-478.
- [20] Ersoy, M.S. Lif Takviyeli Polimerik Kompozit Malzeme Tasarımı. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Kahramanmaraş, 2005, 5 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [21] William D. Callister, JR. David G. Rethwisch. Materials Science and Engineering. John Wiley&Sons, Inc., New York, 2013, 638-666.
- [22] Yüce, İ. Dairesel Kompozit Tabakalarda Düşük Hızlı Darbe Hasarının İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 2007, 9 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [23] Güldü, İ., Dağhan, B., Kaya, S. Faturalı CTP Levhalarda Gerilme Konsantrasyonunun Araştırılması. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi. 2003, 5(2), 23.
- [24] Krishna, K.E., Narsaiah, J., Vijaysree K. Critical Analysis of Filament Wound Glass Epoxy Composite Under Various Boundary Conditions. International Journal of Scientific Research and Education. 2015, 3(7), 4134-4141.
- [25] Kut, T.A., "CTP Teknolojisi", Cam Elyaf Sanayii A.Ş. 2006, 10-93.
- [26] Çetin, M. Uzay Uygulamalarında Kullanılan Kompozit Sargılı Basınçlı Bir Tankın Yapısal Tasarımı ve Analizi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2014, 2 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [27] Şen, F., Palancıoğlu H., Aldaş, K. Polimerik Nanokompozitler ve Kullanım Alanları. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi. 2010, 7(1), 112-113.

- [28] Ekinci, V.Ş. Alümina Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik özelliklerinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara, 2007, 19s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [29] Kara, M. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarım Çtp Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya, 2012, 10s. (Doktora Tezi).
- [30] Kalemtaş, A. Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış. *Putech&Composites*. 2014, 22, 17-18.
- [31] Kalemtaş, A. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler. *Putech&Composites*. 2015, Nisan-Mayıs-Haziran, 20.
- [32] Frank C.S. A Filament-Wound Structure Technology Overview. *Materials Chemistry and Physics*. 1995, 42, 96-98.
- [33] Sayman, O., Ataş. C., Şen, F., Arman, Y. Kompozit Basınçlı Kaplar, Açık Silindirler ve Kapalı Silindirlerin Çevre Etkileri Altında Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi. İzmir, 2007, 4-5.
- [34] Reddy, P.S.K., Nagaraju, Ch., Krisna T.H. Optimum Design and Analysis of Filament Wound Composite Tubes in Pure and Combined Loading. *International Journal of Engineering Research&Technology (IJERT)*. 2012, 1(8), 4.
- [35] Özbay, B., Bekem, A., Ünal, A. 1.Ulusal Plastik Teknolojileri Sempozyumu "Plastikler, Polimer Kompozitler, Şekillendirme Teknolojileri". Elyaf Sarma Yöntemiyle Termoplastik Kompozit Üretimi. 15-16 Ekim, 2015, İstanbul, 82.
- [36] Abdalla, F.H., Mutasher, S.A., Khalid, Y.A., Sapuan, S.M., Hamouda A.M.S., Sahari, B.B., Hamdan, M.M. Design and Fabrication of Low Cost Filament Winding Machine. *Materials and Design*. 2007, 28, 235-236
- [37] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Metal Teknolojisi. "Tahribatlı Muayene 521MMI207", Ankara, 2011, 1 s.
- [38] László, P.K., George, S.S. *Mechanics of Composite Structures*. Cambridge University Press, Cambridge, 2003, 14-19 s.
- [39] Güllübahçe, M. Çok Cıvatalı Kompozit Bağlantıların Çevresel Aşınma Altındaki Performansları. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2013, 23-31 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [40] Dursun, T. Cıvata Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Ankara, 2006, 27 s. (Doktora Tezi)
- [41] Başbuğ, F. Mekanik Alın Birleştirilmiş Kompozit Plakaların Üç Nokta Eğilme Testleri ile Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi, Fen

Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 2012, 29 s. (Yüksek Lisans Tezi).

[42] Sorrentino, L., Marchetti, M., Bellini, C., Delfini, A., Del Sette F. Manufacture of High Performance Isogrid Structure by Robotic Filament Winding. *Composite Structures*. 2017, 164, 43-50.

[43] Badie, M.A., Mahdi, E., Hamouda, A.M.S. An Investigation into Hybrid Carbon/Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite Automotive Drive Shaft. *Materials and Design*. 2011, 32, 1485-1500.

[44] Khalid, Y.A., Mutasher, S.A., Sahari, B.B., Hamouda, A.M.S. Bending Fatigue Behavior of Hybrid Aluminum/Composite Drive Shafts. *Materials and Design*. 2007, 28(1), 329-334.

[45] Lee, D.G., Kim, J.W., Hwang, H.Y. Torsional Fatigue Characteristics of Aluminum Composite Co-Cured Shafts With Axial Compressive Preload. *Journal of Composite Materials*. 2004, 38, 737-756.

[46] Shokrieh, M.M., Hasani, A., Lessard, L.B. Shear Buckling of a Composite Drive Shaft Under Torsion. *Composite Structures*. 2004, 64(1), 63-69.

[47] Lee, D.G., Kim, H.S., Kim, J.W., Kim, J.K. Design and Manufacture of an Automotive Hybrid Aluminum/Composite Drive Shaft. *Composite Structures*. 2004, 63(1), 87-99.

[48] Kim, H.S., Park, S.W., Hwang, H.Y., Lee, D.G. Effect of the Smart Cure Cycle on the Performance of the Co-Cured Aluminum/Composite Hybrid Shaft. *Composite Structures*. 2006, 75(1-4), 276-288.

[49] Belawagi Gireesh, Sollapur Shrishai B, V.N Satwik, Finite Element and Experimental Investigation of Composite Torsion Shaft. *International Journal of Engineering Research and Application*. 2013, 3(2), 1510-1517.

[50] Abu Talib A., Ali, A., Badie, M., Azida Che Lah N., Golestaneh, A. Developing a Hybrid, Carbon/Glass Fiber-Reinforced, Epoxy Composite Automotive Drive Shaft. *Materials and Design*. 2010, 31(1), 514-521.

[51] Mutasher, S. Prediction of the Torsional Strength of the Hybrid Aluminum/Composite Drive Shaft. *Materials and Design*. 2009, 30(2), 215-220.

[52] Kim, H.S., Lee, D.G. Design and Manufacture of Stainless Steel/Carbon Epoxy Hybrid Shaft for Cleaning Large LCD Glass Panels. *Composite Structures*. 2007, 80, 279-289.

[53] Almeida, J.H.S., Tonatto, M.L.P., Ribeiro, M.L., Tita, V., Amico, S.C. Buckling and Post-Buckling of Filament Wound Composite Tubes Under Axial Compression: Linear, Nonlinear, Damage and Experimental Analyses. *Composites Part B: Engineering*. 2018, 149, 227-239.

- [54] Cagdas, I.U. Optimal Design of Filament Wound Truncated Cones Under Axial Compression. *Composite Structures*. 2017, 170, 250-260.
- [55] ASTM D5448/D5448M-11 Standard Test Method for Inplane Shear Properties of Hoop Wound Polymer Matrix Composite Cylinders.
- [56] ASTM D3039/D3039M-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- [57] ASTM D695-15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics.
- [58] ASTM D7078/D7078M-12 Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method.
- [59] Chen, Y., Zhu, R., Jin, G., Xiong, Y. Influence of Shaft Torsional Stiffness on Dynamic Response of Four-Stage Main Transmission System. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018, 1-12.
- [60] Sevkat, E., Tumer, H., Kelestemur, M.H., Dogan, S. Effect of Torsional Strain-Rate and Lay-Up Sequences on the Performance of Hybrid Composite Shafts. *Materials and Design*. 2014, 60, 310-319.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdullah Recep ÖZCAN

Doğum Yeri ve Yılı : İzmir, 1992

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : arecep_ozcan@hotmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Manisa Hasan Türek Anadolu Lisesi, 2010

Lisans : Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2014

Yüksek Lisans Bölümü, 2018 : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği

Mesleki Deneyim

Kuba Mimarlık&Mühendislik 2014-..... (halen)