

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİBER TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT TÜPLERİN BURULMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Said OKUTAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

AĞUSTOS 2022

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİBER TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT TÜPLERİN BURULMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Said OKUTAN

Y195002090

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kenan GENEL

AĞUSTOS 2022

Mustafa Said OKUTAN tarafından hazırlanan “FİBER TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT TÜPLERİN BURULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 25.08.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “FİBER TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT TÜPLERİN BURULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim. (25/08/2022).

(imza)

Mustafa Said OKUTAN

Aileme,

TEŞEKKÜR

Bismillah, Yüksek lisans tez çalışmamın nihayete ermesini bana nasip ettiği için yuce Rabbime sonsuz Őükürler olsun. Tez çalışmam süresince çok kıymetli desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen sayın danışman hocam Prof. Dr. Kenan GENEL'e teŐekkürlerimi sunarım.

Kompozit üretimi ve laboratuvar olanakları konusunda yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi M. İskender ÖZSOY'a, burulma deneylerinin gerçekleştirilmesinde yardımlarından dolayı değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi M. Faruk YAREN'e ve bağlantı elemanlarının imalatı konusunda destekleri için OKUTAN MAKİNA'ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini her zaman hissettiğim kıymetli anneme, babama ve kardeşlerime teŐekkürlerimi sunarım.

Mustafa Said OKUTAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	7
2.1. Kompozit Malzemeler	7
2.1.1.1. Parçacık takviyeli kompozitler.....	8
2.1.1.2. Pul takviyeli kompozitler	9
2.1.1.3. Yapısal kompozitler	9
2.1.1.4. Fiber(elyaf) takviyeli kompozitler	10
2.1.1.5. Metal matrisli kompozitler (MMK)	12
2.1.1.6. Seramik matrisli kompozitler (SMK)	13
2.1.1.7. Plastik (polimer) matrisli kompozitler (PMK).....	13
2.1.2. Kompozit üretim yöntemleri	15
2.1.2.1. El yatırma yöntemi	15
2.1.2.2. Fiber sarım yöntemi	16
2.2. Kompozit Malzemelerin Mekanığı	17
2.2.1.1. Tsai-Wu hasar teorisi	26
2.2.1.2. Hashin hasar teorisi	27
3.KOMPOZİT TÜPLERİN BURULMA ZORLANMASI ALTINDAKİ DAVRANIŞI	29
3.1. Moment İletme (Burulma Dayanımı).....	30
3.2. Kritik Burulma Burkulması.....	30
3.3. Doğal Eğilme Frekansı	31
3.4. Kompozit Tüp Tasarımı	31
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
4.1. Deneysel Çalışmalar	34
4.1.1. Deney malzemeleri	34
4.1.1.1. Alüminyum (6063-T5) boru.....	34
4.1.1.2. Cam fiber.....	34
4.1.1.3. Epoksi reçine	35
4.1.2. Malzeme karakterizasyonu için deney numunelerinin hazırlanması	35
4.1.2.1. Alüminyum tüpe ait çekme deneyi numunelerinin hazırlanması.....	35

4.1.2.2. Kompozit malzemeye ait çekme, basma ve kayma deney numunelerinin hazırlanması	36
4.1.2.3. Burulma deney numunelerinin hazırlanması.....	39
4.1.3. Burulma deney düzeneği.....	44
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	47
5.1. Alüminyum Tüpe Ait Çekme Deneyi Sonuçları	47
5.2. Fiber Takviyeli Kompozit Numunelerin Çekme, Basma ve Kayma Deneyi Sonuçları.....	48
5.3. Burulma Deneyi Sonuçları	51
5.3.1. Deliksiz alüminyum tüpün burulma deneyi sonuçları.....	51
5.3.2. Delikli alüminyum tüpün burulma deneyi sonuçları.....	53
5.3.3. Delikli hibrit kompozit tüplerin burulma deneyi sonuçları	54
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
6.1. Genel Sonuçlar	65
6.2. Öneriler.....	66
KAYNAKLAR.....	67
EKLER.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	75

KISALTMALAR

ASTM : American Society for Testing and Materials

HB : Brinell Sertliği

MMK : Metal Matrisli Kompozit

PMK : Plastik Matrisli Kompozit

SMK : Seramik Matrisli Kompozit

SİMGELER

E	: Elastisite modülü [GPa]
G	: Kayma modülü [GPa]
σ	: Normal gerilme [MPa]
ε	: Birim şekil değişimi
τ	: Kayma gerilmesi [MPa]
γ	: Kayma birim şekil değişimi
X^T	: Fiber yönünde maksimum çekme mukavemeti [MPa]
Y^T	: Fiber yönünde maksimum basma mukavemeti [MPa]
X^C	: Fibere dik (enine) yönde maksimum çekme mukavemeti [MPa]
Y^C	: Fibere dik (enine) yönde maksimum basma mukavemeti [MPa]
S	: Maksimum kayma mukavemeti [MPa]

TABLULAR

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. E-Cam ve S-Cam özelliklerinin karşılaştırılması. [2]	11
Tablo 2.2. Tipik bir epoksi malzemenin oda sıcaklığındaki özellikleri. [2].....	14
Tablo 3.1. Tipik E-Cam Mekanik özellikleri. [31].....	31
Tablo 4.1. Deney numune standartları.	38
Tablo 4.2. Kompozit deney numune kombinasyonları.	43
Tablo 5.1. Üretilen kompozite ait mekanik özellikler.	51
Tablo 5.2. Deneyler sonucu elde edilen sonuçlar.....	61

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Parçacık, pul ve fiber takviye şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.2. (a) tabakalı yapı şematik (b) sandviç yapı şematik gösterimi. [30].....	10
Şekil 2.3. Cam fiber üretim aşamaları. [2].....	12
Şekil 2.4. El yatırma yöntemi şematik gösterimi. [31].....	16
Şekil 2.5. Fiber sarım yöntemi. [32].....	17
Şekil 2.6. Eksen takımı. [2].....	20
Şekil 2.7. Deformasyon öncesi ve sonrası lamina kesiti. [34].....	22
Şekil 3.1. Fiberlerin kompozit tüpteki yönelimi ve analitik çözüm yapısının şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.2. Fiber sarım açısının modüller üzerindeki etkisi.....	32
Şekil 4.1. Alüminyum boruların sertliklerinin Webster ölçüm aleti ile ölçülmesi. ...	34
Şekil 4.2. Kompozit üretiminde kullanılan cam fiber iplik.	35
Şekil 4.3. Çekme deneyinin yapıldığı cihaz.....	36
Şekil 4.4. Alüminyum tüpten çıkartılan deney numunesi.....	36
Şekil 4.5. El yatırma yöntemi ile hazırlanmış levhalar.....	37
Şekil 4.6. (a) fiber yönünde çekme numunesi, (b) fibere dik yönde çekme numunesi, (c) fiber yönünde basma numunesi.	38
Şekil 4.7. (a) kayma numunesi, (b) fibere dik yönde basma numunesi.....	39
Şekil 4.8. MTS cihazında çekme deneyi.....	39
Şekil 4.9. Fiber sarım makinesinde numune üretimi.	40
Şekil 4.10. Alçı kalıp hazırlanması.	41
Şekil 4.11. Alçı kalıbın alüminyum tüp içine yerleştirilmesi.	42
Şekil 4.12. İçeriden takviye edilmiş kompozit tüpler.	42
Şekil 4.13. Kurlenme sonrası deney numuneleri.	43
Şekil 4.14. Burulma deney düzeneği.	44
Şekil 4.15. Numunelere pim deliklerinin açılması.....	45
Şekil 4.16. Deney numunelerinin montaj öncesi hali.	45
Şekil 4.17. Burulma numunesi teknik resim görüntüsü.....	45
Şekil 4.18. Burulma numune örneği.	46
Şekil 5.1. Alüminyum tüpe ait numunenin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.....	47
Şekil 5.2. Deney sonrası numunenin görüntüsü.	47
Şekil 5.3. Fiber yönünde çekme uygulanan numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.....	48
Şekil 5.4. Fibere dik yönde çekme uygulanan numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.....	48
Şekil 5.5. Fiber yönünde basma uygulanan numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.....	49
Şekil 5.6. Fiber dik yönde basma uygulanan numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.....	49
Şekil 5.7. Kayma deneyine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.....	50

Şekil 5.8. Fiber takviyeli kompozitlerin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri a)kayma (45^0) deneyi, b) fiber yönünde çekme deneyi, c) fibere dik çekme deneyi, d) fiber yönünde basma deneyi, e) fibere dik yönde basma deneyi.	50
Şekil 5.9. (a) Alüminyum tüpün statik tork-dönme açısı grafiği (b) deney sonrası burkulmuş tüpe ait kesit görünümü.	52
Şekil 5.10. Alüminyum tüp üzerinde gerilmelerin yönlenmesi.	53
Şekil 5.11. Delikli alüminyum tüpe ait moment-açı eğrisi ve numunede oluşan deformasyon.	54
Şekil 5.12. M8 delik delinmiş alüminyum tüpün deney sonrası hali.	54
Şekil 5.13. Delikli kompozit tüplerin burulma deney sonuçları.	55
Şekil 5.14. 90 derece katmanların dizilim etkisi.	57
Şekil 5.15. Tüplerde hasarların ilerlemesi.	58
Şekil 5.16. Katmanlar arası açı farkının etkisi.	59
Şekil 5.17. $[(\pm 45)_2/90/A1]$ ve $[\pm 45/90/\pm 45/A1]$ dizilimleri için hasar ilerlemesi.	60
Şekil 5.18. Numunelere ait maksimum moment değerleri.	62
Şekil 5.19. Test edilen numunelerin rijitliklerinin dizilim /katman sayısı kombinasyonları için değişimi.	63
Şekil 5.20. Numunelerin enerji değerlerinin katman dizilimi ile değişimi.	64
Şekil 5.21. Test edilen numunelerin rijitlik, spesifik moment ve spesifik enerjinin alüminyum için ve farklı dizilim /katman sayısı kombinasyonları için değişimi.	64
Şekil A.1. 10 tabakalı kompozit yapının şematik gösterimi.	74

FİBER TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT TÜPLERİN BURULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bilindiği gibi fiber takviyeli kompozitler, birçok mühendislik uygulamasının yanı sıra moment aktaran ekipmanlar için de ilgi çekici bir alandır. Bu çalışma kapsamında, içeriden ve dışarıdan takviye edilmiş dairesel alüminyum tüplerin (6063-T5), burulma zorlanması altındaki deformasyon davranışı, katman diziliminin ve fiber sarım açısının mekanik özelliklere olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Alüminyum tüpler fiber sarım yöntemi kullanılarak cam fiberle takviye edilmiştir.

Öncelikle alüminyum borunun burulma yükü altında deformasyonu, ardından delikli hibrit kompozit boruya ek olarak delikli alüminyum borunun hasar başlangıcı ve ilerlemesi incelenmiştir. Deney sonuçlarından, tüpün 45 derecelik ekseninde burkularak deformasyona uğradığı ve burkulma neticesinde cidarda içeriye ve dışarıya yönelmenin meydana geldiği anlaşılmıştır.

Tüp yapıya içten ve dıştan cam fiber ve epoksi kullanılarak yapılan takviyenin moment iletimini ve rijitliği artırdığı görülmüştür. Test sonuçları, 45 derece yönelime sahip fiberlerin moment aktarımına en yüksek katkıyı sağladığını, 90 derece yönelimli katmanın ise diğer katmanların bütünlüğünün korunmasında katkı sağladığını ortaya koymuştur.

90 derece katmanların iletilen moment değerine kısmen ve rijitliği ise kayda değer oranda artırdığı belirlenmiş, ayrıca yapıda bulunduğu konuma bağlı olarak bu özelliklerde farklılıklara yol açabildiği tespit edilmiştir. $[(\pm 45)_2/90/A1]$ diziliminin rijitlik açısından en iyi sonucu verdiği, bunun yanında $[\pm 45/90/\pm 45A1]$ dizilimine sahip yapının ise iletilen moment ve enerji açısından en iyi sonucu verdiği anlaşılmıştır. Ayrıca $[90_2/\pm 45/A1]$ dizilimine sahip yapının katmanlar arası açı farkının etkisinden dolayı $[90/\pm 45/90/A1]$ yapısından daha yüksek moment taşıma kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Alüminyum tüpün takviye edilmesiyle spesifik moment değerinde 1.5 kat, spesifik enerji değerinde de 2.0 kat artış sağlanmıştır.

INVESTIGATION OF TORSIONAL BEHAVIOUR OF THE FIBER REINFORCED HYBRID COMPOSITE TUBES

SUMMARY

It is known that fiber reinforced composites are an area of interest for moment transmitting equipment as well as in many engineering applications. In this study, the deformation behavior of circular aluminum tubes (6063-T5), which are reinforced internally and externally, under torsional load, the effect of stacking sequence, and fiber orientation angle on mechanical properties were experimentally investigated. Aluminum tubes are reinforced with glass fiber using the fiber winding method.

First, the deformation of the aluminum tube under torsional load, then the damage initiation and progression of the holed aluminum tube, in addition to holed hybrid composite tube, were investigated. From the test results, it was understood that the aluminum tube was deformed by buckling in the 45-degree axis, and as a result of the buckling, the inward and outward orientation of the wall occurred.

It has been observed that internal and external reinforcement of the tube structure using glass fiber and epoxy increases torque transmission and rigidity. Test results revealed that the fibers with a 45-degree orientation provide the highest contribution to torque transmission, while the layer with a 90-degree orientation contributes to maintaining the integrity of the other layers.

It has been determined that 90-degree layers partially increase the transmitted torque value and increase the stiffness significantly, and it has also been determined that these properties can cause differences depending on the stacking sequence. It was understood that the $[(\pm 45)_2/90/Al]$ sequence gave the best results in terms of stiffness, while the structure with the $[\pm 45/90/\pm 45Al]$ sequence gave the best results in terms of transmitted torque and energy. Moreover, it has been determined that the structure with the $[90_2/\pm 45/Al]$ sequence has a higher moment carrying capacity than the $[90/\pm 45/90/Al]$ structure due to the effect of the angle difference between the layers. With the reinforcement of the aluminum tube, the specific moment value increased a maximum of 1.5 times, and the specific energy value increased a maximum of 2.0 times.

1. GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet ve özgül rijitlik yanı sıra titreşim sönümlenme özelliği göstermesi nedeniyle, birçok mühendislik uygulamalarında olduğu gibi, tork aktaran tüp yapıların (içi boş millerin) imalatında da yaygınlaşmıştır. Metal malzemelerin kullanıldığı (genelde çelik) şaftlarda yüksek yoğunluktan dolayı, gerek parçanın yeterince hafif üretilmemesi ve gerekse yekpare bir şaft üretimi için istenen doğal eğilme frekansının elde edilmesindeki zorluklar, kompozit tüplere (KT) olan ilgiyi arttırmıştır.

Literatür incelendiğinde, kompozit şaftlarla ilgili ilk uygulama 1985 yılında Dana Co. tarafından Ford Econoline van modeli için geliştirilmesine rağmen maliyet açısından metal şaftlara göre dezavantajlı olması yaygın şekilde kullanımına imkan vermemiştir. Fakat otomotiv ve havacılık sektörünün araçları hafifletme arayışı kompozit şaftlara olan ilgiyi günümüze kadar sürdürmüştür [1].

Bilindiği üzere şaftlar sadece tork iletiminde kullanılmakta ve genelde parça ağırlığının azaltılması amacıyla içleri boşaltılarak tercih edilmektedirler. Tork ileten dairesel kesitli tüp geometrili (içi boş şaft) parçaların tasarımında aşağıdaki temel kriterler dikkate alınmaktadır:

- İletilebilecek tork kapasitesi
- Burulmadaki kritik burkulma momenti
- Eğilme doğal frekansı [2]

Buna göre öngörülen bir parça büyüklüğü için parçanın boyu, ortalama çapı (D), cidar kalınlığı (t), imal edildiği malzemenin yoğunluk ve elastiklik modülü tasarıma ait değişkenleri oluşturmaktadır. Dolayısıyla hedeflenen bir tork kapasitesi için sözü edilen diğer iki şartın sağlanma mecburiyeti söz konusudur. Büyük çaplı, aşırı ince cidarlı yani D/t oranı büyük olan tüpün, özellikle de düşük elastiklik modülüne sahip malzemelerden imal edilmesi halinde burkulma hasarının öne çıkması muhtemeldir. Orta ağırlıktaki taşıtlar için Kim ve ark. 3500 Nm'lik tork kapasitesinin sağlanması

ve doğal eğilme frekansının 150 Hz'in üzerinde kalması gerektiğini belirtmişlerdir [3].

Uygulamada cam ve karbon fiberin ve bunların oluşturduğu tek tür veya farklı dizilimde her iki fiberin bir araya getirildiği kombinasyonlardan yararlanılmıştır. Ancak kompozitin metaller kadar sünek olmaması, bu malzemedeki üretilen tüplerin yapısal olarak tokluk değerlerini sınırlamakta, anlık yüklemelere duyarlı davranmasına yol açabilmektedir. Ayrıca yukarıda şaft tasarımı için özetlenen kriterlerin karşılanabilmesi için uygun fiber yönelmesi ve dizilimi ve/veya sayısının belirlenmesi zorunlu olmaktadır. Bu sebeple uygulamadaki farklı seviyedeki performans talepleri kompozit tüp imalatının aynı matriste farklı fiberlerin tek başına veya hibrit olarak kullanılmasına neden olmuştur [4-8].

Badie ve ark. karbon ve cam fiber kullanarak yaptıkları çalışmada fiber sarım açısının ve katman diziliminin burulma mukavemeti, burkulma, doğal eğilme frekansı, yorulma ömrü ve hata modları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 0 derecenin doğal frekans, 45 derecenin tork iletimi ve 90 derecenin burkulma için maksimum değerleri verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca 45 dereceli sarımların burulma yorulması açısından daha iyi sonuç verdiğini gözlemlenmiştir. Diğer taraftan parçanın farklı katman dizilimine göre tasarlanmış olması yukarıda belirtilen özelliklerin belirli ölçüde iyileşmesine imkân sunmaktadır [4]. Tariq ve ark. karbon, cam ve aramid fiberleri kullandıkları çalışmalarında, sadece karbon fiberin kullanıldığı yapının en yüksek tork taşıma kapasitesine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanında karbon fiberle elde edilen hibrit yapılarda benzer performanslar için cam fiberin maliyet açısından, aramid fiberin ise ağırlık açısından avantaj sağlayabileceğini rapor etmişler ve kimyasal açıdan cam-karbonun en az bozulma sergilediğini belirtmişlerdir [5]. Soykok ve ark., farklı fiber yönelimlerine sahip kompozit tüplerin burulma zorlanması altında oluşan hasarlanmalarını inceledikleri çalışmalarında çatlak oluşumunun ve ilerlemesinin fiber sarım yönüyle aynı yönde olduğunu raporlamışlardır. Ek olarak hasar bölgelerinin taramalı elektron mikroskopuyla incelenmesi sonucunda 45 derece yönelime sahip fiberlerde kırılma yüzeylerinin diğer açılara göre daha pürüzsüz olduğu görülmüştür. Bu durum 45 derece yönelimdeki fiberlerin, fiber ekseninde saf çekme ve basma zorlanması altında kalmasının bir sonucu olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca burulma rijitliği açısından en iyi sonucu 45 derece verirken, 30 ve 60 derecelerin de bu değerlerin %5 oranında

altında kaldığı vurgulanmıştır [7]. Fiber yönlenme açısının ve katman diziliminin etkisini incelendiği bir diğer çalışmada Abu Talib ve ark. fiber sarım açısı 0'dan 90'a doğru arttıkça doğal eğilme frekansının düştüğünü görmüşlerdir. Ayrıca en iyi ve en kötü dizilim arasında kritik burkulma değeri açısından %46'lık bir fark bulunduğunu belirtmişlerdir. Bunun dışında hangi özeliğin geliştirilmesi isteniyorsa buna göre farklı dizilim kombinasyonlarının tasarlanabileceği anlaşılmıştır [8]. Yine benzer bir diğer çalışmada katman diziliminin ve fiber açısının kompozit şaftların burkulmasını önemli ölçüde etkilediğini vurgulanmıştır [9].

Genel olarak kompozit tüpün performansını etkileyen başlıca parametreler fiber sarım açısı, katman kalınlığı ve katman sayısı olarak sıralanabilir. Mekanik davranışı etkileyen bir diğer faktör dizilim sırasıyla ilgilidir. Komşu katmanların sarım açıları arasındaki fark parça kesitinde gerilme dağılımında sürekliliğin bozulmasına, yani ani değişimlere yol açmakta, dolayısıyla parçanın yük taşıma kabiliyetine doğrudan etkilemektedir.

Örneğin, değişken burulma yükü altında çalıştırılan $[90_2/-45/+45]_6$ yapının, 45 derece açılı katmanlar arasında 90 derecelik fark bulunmakta ve bu nedenle delaminasyon eğilimi yükselmektedir. Dizilimi $[90/-45/90/+45]_6$ olan ve tüm katmanlar arasında 45 derecelik farkın bulunduğu yapının yorulma ömrü diğerine ($[90_2/-45/+45]_6$) göre yaklaşık üç kat daha yüksek olduğu vurgulanmıştır [10].

Bu çalışmaların dışında, tüp yapıda hem metal hem de kompozitin birlikte kullanıldığı hibrit kombinasyonlar da bulunmaktadır [11-20]. Metal ve fiber kompozitlerin kullanımındaki en büyük beklenti metallerin sahip olduğu yüksek tokluk ve sünekliğin, fiberlerin yüksek mukavemet özellikleriyle birleştirilmesi fikrinden hareketle farklı uygulamalar için ortaya çıkmıştır. Metal-kompozit hibrit yapı olarak çalışmalarda ağırlıklı olarak alüminyum alaşımının kullanıldığı ve genellikle fiber takviyesinin tüpün dışına yapılmak suretiyle performansın iyileştirilmeye çalışıldığı anlaşılmaktadır. Ancak bu çalışmaların bir kısmı eğme zorlanması için gerçekleştirilmiştir [11,12].

Mutasher ve ark. alüminyum tüp üzerine cam ve karbon fiber sarım yaparak yapmış oldukları çalışmada literatürdeki diğer çalışmaların aksine katman diziliminin tork kapasitesi ve dönme açısı üzerinde etkisinin olmadığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca numunelerin hasarlanma durumu için ilk olarak alüminyum tüpün ortasından akmaya

başladığını, sonrasında fiber sarım yönünde çatlak ilerlemesinin meydana geldiğini ve nihayetinde kompozit ve alüminyum arasında delaminasyonun oluştuğunu raporlamışlardır [13].

Cho Hyun ve Lee alüminyum tüp yüzeyine karbon fiber kompozitin sarıldığı hibrit tüpün titreşim sönümlene kabiliyetinin, takviyesiz alüminyum tüpe göre kıyaslamasını yaptıkları çalışmada, sönümlene özelliğinde ciddi oranda iyileşme sağlandığı ve fiber sarım açısının 0 dereceden 45 dereceye artmasıyla burulma yorulma ömrünün belirgin bir şekilde arttığını rapor etmişlerdir [15].

Her ne kadar karbon fiberin alüminyum tüpün dışına sarıldığı uygulamalar bulunsa da karbon fiber kompozitin dış ortam etkisinden korunması amacıyla kompozitin tüpün içerisine ikame edildiği birkaç çalışmaya da rastlamak mümkündür [17-19].

Lee ve ark. dış yüzeye gelebilecek darbelerden kaynaklanan hasarların önüne geçmek amacıyla karbon fiber (epoksi prepreg-0 ve 90 dereceli) takviyesini alüminyum tüp içerisine yapmış ve böylece geleneksel çelik şaftlara göre önemli ölçüde ağırlıktan kazançla (%75) birlikte geleneksel iki parçalı çelik şaftlara göre tork iletim kapasitesinde %160 oranında artış sağlamışlardır [18]. Metal-hibrit kompozitlerde en büyük sorun yüklemeye altında kompozit ile metal ara yüzeyindeki dayanımın yetersiz kalması nedeniyle ayrılmalara (delaminasyon) meydana gelmesidir [11,12,16].

Son on yıl içerisinde kompozit şaftlarla alakalı ülkemizde de birçok tez çalışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar incelendiği zaman yukarıda özetlenen literatürün paralelinde sonuçların elde edildiği görülmüştür [20-27].

Bu çalışmalardan, Tümer'in yapmış olduğu çalışmada karbon ve cam fiberleri alüminyum tüp üzerine sararak ürettiği numunelerle; alüminyum-kompozit ara yüzeyinin ve katman diziliminin burulma mukavemetine etkisini araştırmıştır. Ayrıca üretilen numuneler farklı enerji seviyelerinde darbe testleri uygulanmıştır. Alüminyum tüp üzerine zımpara ve tırtıl gibi yapışma yüzeyini artırıcı uygulamalar yapılarak hibrit tüpler üretilmiştir. Yapılan statik test sonuçlarına göre bu yüzey işlemlerinin maksimum tork üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı ancak dönme açısını bir miktar artırdığı görülmüştür [22].

Analitik çözümler ve sonlu eleman yönteminin birlikte kullanıldığı çalışmalarda Tataroğlu ve Ok bu iki yöntemle bulunan sonuçların uyum içerisinde olduğunu raporlamışlardır [23,24].

Ancak kompozitten imal edilen şaftların burulmasını etkileyen çok sayıda değişkenin bulunması, bazı temel yaklaşımların dışında kabul görmüş genel bir tasarım sistematığı ortaya konmamıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, birbiri içinde çözünmeyen iki ya da daha fazla malzemenin makroskobik boyutta birleşiminden oluşan malzemelerdir. Kompozitler kendisini oluşturan bileşenlerin iyi özelliklerini birleştirmek amacıyla oluşturulmaktadır. Ancak bazı özelliklerdeki iyileşmenin yanında bazılarının da kötüleşebileceği unutulmamalıdır. Günümüzde yüksek mukavemete sahip fiberlerin -sürekli ya da süreksiz- daha düşük mekanik özelliklere sahip matris malzemeleriyle birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Matris takviye olarak kullanılan fiberlerin düzenini sağlarken, fiberler üretilen parçaların maruz kaldığı yükü taşımaktadır. Ayrıca matris malzemeleri fiberlerin düzenini ve geometrisini de korumaktadır. Bunun sonucu olarak üretilen kompozitin mekanik özellikleri matris malzemesinden daha üstünken, fiber malzemesinden daha zayıftır [28]. Kompozit malzemelerin üretiminde hedeflenen özelliklerden bazıları şu şekildedir:

- Yüksek mukavemet
- Yorulma dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Korozyon dayanımı
- Rijitlik
- Ağırlık
- Estetik görünüm
- Isı iletkenliği
- Elektrik iletkenliği
- Sıcaklık özelliklerinde iyileşme

Üretilen kompozitlerin bu özelliklerden birini ya da daha fazlasını sağlaması beklenmektedir. Ancak bu özelliklerin hepsinin aynı anda iyileşmesi mümkün değildir [29].

Kompozit malzemeler ilk insanların kil ve samanı karıştırarak oluşturduğu kerpiç yapılardan günümüze kadar uzanan bir tarihe sahiptir. M.Ö. 1500lü yıllarda Mısırlıların kullandığı bambu takviyeli çamurlar buna örnek olarak verilebilir [2]. Ayrıca Moğol yaylarında basma zorlanmasına maruz kalan bölümlerin boynuzdan yapıldığı diğer parçaların ise ahşap ve sığır tendonunun yapıştırılmasıyla üretildiği görülmüştür. Benzer şekilde Şam kılıcı ve Japon süvari kılıçlarının üretiminde de kompozitlerden faydalandığı bilinmektedir [28]. Bunlara ek olarak kompozit malzemeler ağaç, kemik vb. şekilde doğada da karşımıza çıkmaktadır.

Kompozit malzemeler ayrı bir malzeme grubu olarak polimer teknolojisinin de gelişmesiyle 20. yüzyılın ortalarından itibaren mühendislik çalışmalarına uygun olacak şekilde üreilmeye başlamıştır [30]. Cam fiberden üretilen ilk uygulamalar, kompozit teknolojisinin gelişmesiyle karbon, aramid ve boron gibi yeni fiber türleri ile daha da genişlemiştir. Buna ek olarak metallerin ve seramiklerin de matris malzemesi olarak kullanılması kompozit malzemeleri mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez hale getirmiştir.

2.1.1. Kompozitlerin sınıflandırılması

Kompozit malzemeler matris türüne veya takviye biçimine göre sınıflandırılabilirler.

Takviye biçimine göre,

- Parçacık takviyeli kompozitler
- Pul takviyeli kompozitler
- Fiber takviyeli kompozitler
- Yapısal kompozitler olarak dört grubu ayrılmaktadır.

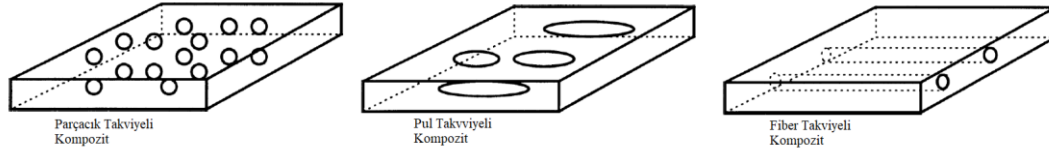
Kompozitler Matris türüne göre ise üç grupta incelenmektedirler;

- Metal matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler
- Plastik matrisli kompozitler

2.1.1.1. Parçacık takviyeli kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitlerde alaşım ve seramik gibi matrislerin içerisinde parçacıklar yer almaktadır. Parçacık takviyeli kompozitler gelişmiş mukavemet,

iyileştirilmiş çalışma sıcaklığı vs. gibi avantajlar sunmaktadır. Parçacıklar yapı içerisinde rastgele dağıldığı için izotropik özellik göstermektedirler. Tipik örnekleri kauçuk içinde alüminyum parçaları, çökeltme sertleşmesi uygulanmış alüminyum alaşımları ve betonarme yapımında kullanılan çakıl, kum ve çimento olarak verilebilir. Takviyelerin kompozit içindeki şematik halleri Şekil 2.1’de verilmiştir.



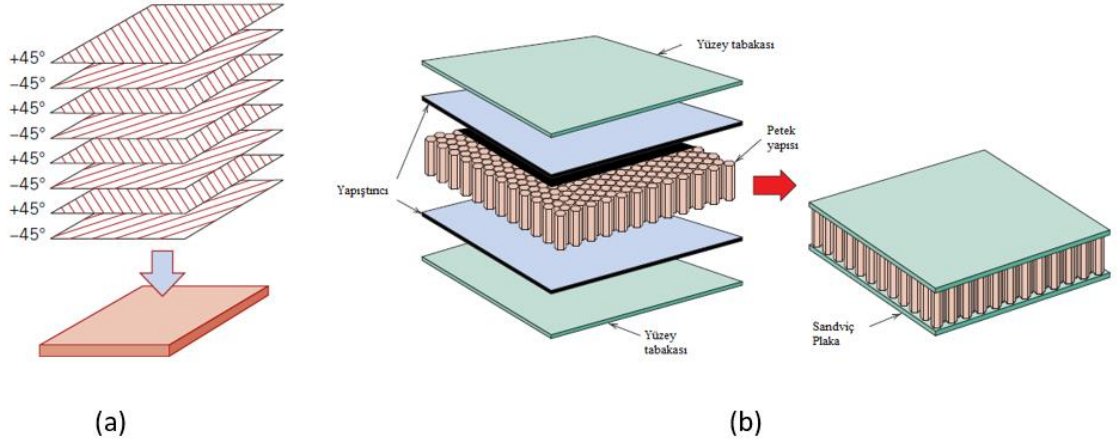
Şekil 2.1. Parçacık, pul ve fiber takviye şematik gösterimi.[2]

2.1.1.2. Pul takviyeli kompozitler

Pul (iri parçacık) takviyeli kompozitler ise matris içerine düz takviyelerin eklenmesi ile oluşturulmaktadır. Pul malzemelere cam, mika, alüminyum ve gümüş örnek verilebilir. Bu kompozitler yüksek mukavemet ve düşük maliyet gibi avantajlar sağlarken kolayca yönlendirmenin mümkün olmaması ve kullanılacak takviye malzeme çeşidinin sınırlı olması dezavantaj sağlamaktadır [2,29].

2.1.1.3. Yapısal kompozitler

Yapısal kompozitler, tabakalı kompozitler ve sandviç paneller olarak ikiye ayrılabilir. Aynı ya da farklı özelliklerdeki tabakaların üst üste veya yan yana getirilmesiyle oluşturulan tabakalı kompozitler Şekil 2.2a, tasarlanan tabakaların yapısına bağlı olarak istenen özelliklerinin elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Sandviç paneller ise hafif ancak yüksek rijitlik ve dayanıma sahip kiriş veya panellerin tasarımında kullanılan yapısal kompozitlerdir. Bir sandviç panel Şekil 2.2b’de görüleceği üzere kalın bir ara dolgu tabaka ve buna yapışan iki dış tabakadan oluşmaktadır [30].



Şekil 2.2. (a) tabakalı yapı şematik (b) sandviç yapı şematik gösterimi. [30]

2.1.1.4. Fiber (elyaf) takviyeli kompozitler

Fiber kompozitler kısa(süreksiz) ve uzun(sürekli) fiber takviyelerin kullanılmasıyla üretilmektedirler. Bu kompozitlerde matris kuvveti elyaflara iletmekte ve kuvvet tamamıyla elyaflar tarafında taşınmaktadır. Elyaflar genellikle yönlendirilmiş olarak kullanıldığı için anizotropik özellik göstermektedirler.

Teknolojik olarak en önemli kompozitlerdir. Fiber takviyeli kompozitler düşük ağırlık ve bunun yanında yüksek dayanım (ölgül dayanım) ve/veya yüksek elastik modülü (ölgün elastiklik modülü) elde etmek amacıyla tasarlanmaktadır.

Başlıca fiber malzemeleri şu şekildedir;

- Cam
- Karbon,
- Bor
- Aramid(kevlar)
- Silisyum karbür
- Doğal fiberler (keten, kenevir vs.)

Cam Fiber

Cam fiberler; kum, kireçtaşı ve diğer asidik bileşiklerin karışımından üretilen amorf bir madde olan dökme camdan işlenir. Plastik matrisli kompozitlerde kullanılan en yaygın fiber türüdür. Yüksek mukavemet, düşük maliyet, yüksek kimyasal direnç ve iyi yalıtım sağladığı önemli avantajlardandır bunun yanında karbon gibi fiberlere

nazaran düşük elastiklik modülü, yüksek özgül ağırlığı ve düşük yorulma dayanımı dezavantajlarını oluşturmaktadır.

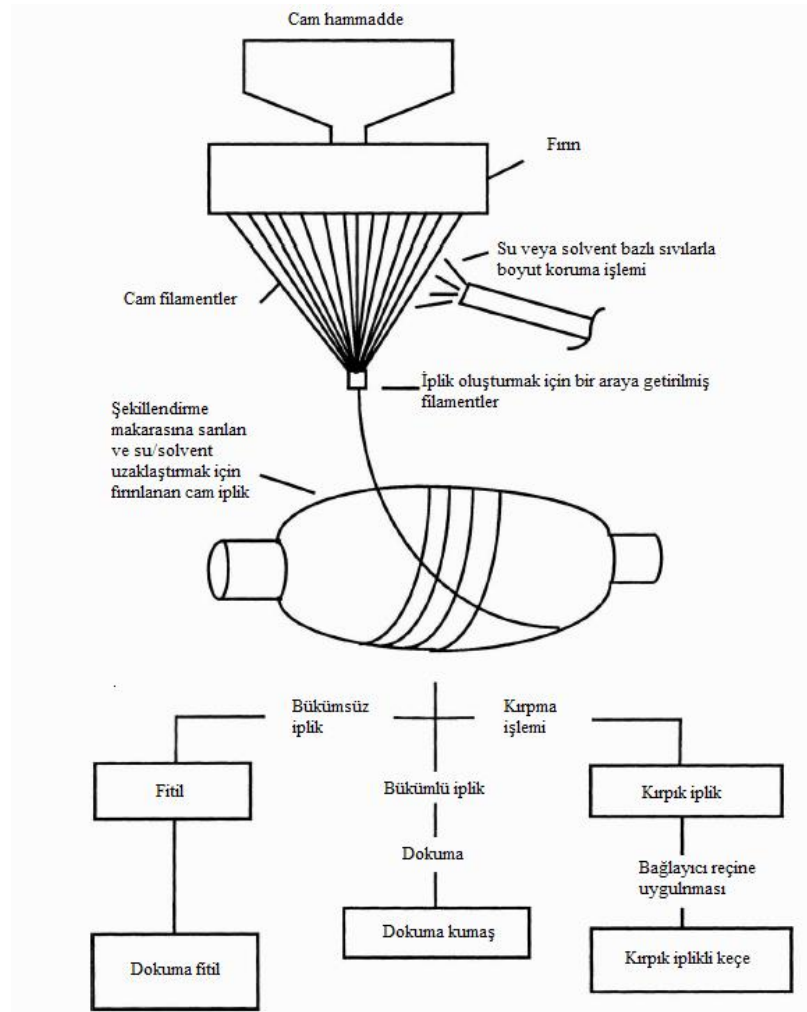
Cam fiberler E-Cam, S-Cam, C-Cam ve D-Cam vs. şeklinde sınıflandırılmaktadırlar. Tüm bu cam çeşitleri benzer sertlik değerlerine sahip olmasına rağmen farklı mukavemet değerlerine ve çevresel bozulmalara karşı farklı dirençlere sahiptirler. E-Cam (electrical- elektrik) yüksek çekme mukavemetinin ve iyi kimyasal direncin istendiği durumlarda tercih edilir. Bu tercih mekanik özellikleri, korozyon direnci ve düşük maliyetinden kaynaklanmaktadır. S-Cam(strength-mukavemet) en yüksek mukavemet özelliğine sahip cam fiber türüdür ancak E-Cam'a göre 4 kata kadar pahalı olması uygulama alanlarını sınırlandırmıştır. Bundan dolayı düşük maliyetli karbon fiberler S-Cam yerine tercih edilmektedir. C-Cam (corrosion-korozyon) korozyon dayanımının ön plana çıktığı uygulamalarda kullanılmaktadır. D-Cam (dielectric-dielektrik) yüksek voltajlı seramik izolatörlerin takviyesi gibi elektrik uygulamaları için kullanılmaktadır.

Sadece fiberin mukavemetinin ölçüldüğü testlerde E-Cam için 3.5 GPa, S-Cam için 4.8 GPa maksimum dayanım değerleri elde edilse de kompozit yapılarda bu değerlerin elde edilmesi mümkün olmamaktadır. E-Cam ve S-Cam malzeme özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 2.1'de görülmektedir [31].

Tablo 2.1. E-Cam ve S-Cam özelliklerinin karşılaştırılması. [2]

Özellik	Birim	E-Cam	S-Cam
Özgül Ağırlık	-	2,54	2,49
Young Modülü	GPa	72,4	85,5
Maksimum Çekme Mukavemeti	MPa	3447	4585
Termal Genleşme Katsayısı	$\mu/m^{\circ}C$	5,04	5,58

Cam fiber üretimi Şekil 2.3'te görüldüğü gibi bir eriyikten yapılmaktadır. Eriyik kum, kireçtaşı ve alümina içeren bir karışımdan oluşmaktadır. Çeşitli işlemler uygulanarak son uygulama haline getirilmektedir.



Şekil 2.3. Cam fiber üretim aşamaları. [2]

Cam fiber uygulamaları otomotiv ve gemi gövde üretimlerinde, plastik boru imalatında, saklama kapları gibi endüstriyel pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv uygulamalarında araçların hafiflemesiyle karbon emisyonunun azaltılmak istenmesinde dolayı bu alanda yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir.

2.1.1.5. Metal matrisli kompozitler (MMK)

Bu kompozitlerde matris malzemesi olarak metaller kullanılmaktadır. Kullanılan matris örnekleri alüminyum, magnezyum ve titanyum, fiberler ise karbon ve silisyum karbürdür. Metal matrisli kompozitler ağırlıklı olarak çelik ve alüminyum gibi metallerden daha yüksek dayanım elde etmek için kullanılmaktadır. MMK'ler plastik matrisli kompozitlere göre daha pahalıdır ve bu nedenle kullanım alanları sınırlıdır. Ancak son zamanlarda otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin, otomotiv sektöründe bazı motor parçaları, alüminyum oksit

veya karbon fiberle dayanımı artırılmış alüminyum alaşımı matrinden imal edilmektedir. Bu metal matrisli kompozit parçalar hafiftir bunun yanında aşınma ve ısıl çarpımalara karşı dirençlidir.

Bazı süper alaşımların (Ni- ve Co- bazlı) yüksek sıcaklıktaki sürünme ve kopma özellikleri, tungsten gibi refrakter metal fiberle takviye edilmesiyle artırılabilir. Bunun sonucunda yüksek sıcaklıkta mükemmel oksidasyon direnci ve darbe dayanımı da elde edilebilir.

2.1.1.6. Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Seramiklerin matris olarak kullanılmasıyla kompozit malzemeler 1300 °C'ye kadar kullanılabilir. Bu tür kompozit malzemelerin en gelişmişleri SiC veya Al₂O₃ fiberle takviye edilmiş, SiC ve Si₃N₄ seramikleri gösterilebilir. Karbon fiberlerinde kullanabildiği bu tür matrislerde (cam, seramik, MgO, Al₂O₃, SiC) liflerin rolü farklıdır. Mekanik özellikleri bakımından matrinden çok farklı olmayan fiberin buradaki görevi daha çok malzeme tokluğunun artırılmasına katkı sağlamaktır. Seramik matrisli kompozitlerin başlıca avantajları; yüksek çalışma sıcaklıkları, kimyasal durgunluk ve düşük yoğunluktur [2,33].

2.1.1.7. Plastik (polimer) matrisli kompozitler (PMK)

Matris olarak polimer reçinelerin, takviye olarak fiberlerin kullanıldığı kompozitlerdir. Bu malzemelerin oda sıcaklığındaki üstün özelliklerine ek olarak üretiminin kolay olması ve düşük maliyeti nedeniyle, en çok kullanılan kompozit malzeme çeşididir. Bunların yanında düşük çalışma sıcaklığı, termal ve nem genleşme katsayılarının yüksekliği ve belirli yönde düşük elastiklik özellikler göstermeleri dezavantajlarından bir kaçıdır.

En yaygın kullanılan ve en ucuz plastik matris reçineleri polyester ve vinil esterdir. Bu malzemeler yaygın olarak cam fiberlerle kullanılmaktadır. Bunun yanında epoksiler daha pahalı olup ticari ve havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Epoksiler, vinil esterler ve polyesterlere göre daha iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Bunlara ek olarak fenolik, akrilik, üretan ve polyamid kompozit üretiminde kullanılan diğer polimer malzemelere örnek olarak verilebilir.

Plastik matris olarak genelde şu üç tip malzeme kullanılmaktadır;

-Termosetler

-Termoplastikler

-Elastomerler

Termoset plastikler çözünmez ve kürlendikten sonra eritilemezler bunun sebebi kovalent bağlara sahip olması ve rijit bir şekilde bağlanmasıdır. Termoplastikler van der Waals bağlarına sahip oldukları için yüksek sıcaklık ve basınç altında şekillendirilebilmektedirler. Epoksi, polyesterler, fenolik bileşikler ve poliamid termosetlere örnek olarak verilebilir; polietilen, polistiren, polieter-eter-keton ve polifenilen sülfür termoplastiklere örnektir.

Epoksi

Epoksi reçineler en yaygın olarak kullanılan plastik matris malzemesidir. Bunun başlıca sebepleri yüksek mekanik özellikler, yüksek korozyon direnci ve çok yönlü olarak kullanılabilmesidir. Epoksi reçineler diğerlerine kıyasla daha az büzülür (hacimce %1,2-4) böylece yapıştırıcı olarak kullanıldıklarında mükemmel bağ özellikleri sağlamaktadırlar. Epoksi malzemeler diğer plastik reçine malzemelerine kıyasla nem ve ısıdan daha az etkilenen şekilde formüle edilebilmektedirler. Epoksi reçineler kullanılan hızlandırıcı çeşidine göre bağlı olarak 5 ila 150 °C arasında kürlendirme işlemi uygulanarak kullanım imkânı sağlamaktadır.

Epoksi reçineler diğer reçinelere göre daha pahalı olmasına rağmen yukarıda bahsedilen avantajlar sayesinde özellikle havacılık sektöründe geniş kullanım alanına sahiptir. Buna ek olarak fiber sarım yöntemiyle üretilen parçalar yanı sıra, otomotiv sanayi ve birçok endüstriyel uygulamada yer bulmaktadırlar. Ayrıca epoksi reçineler kısa süreli ve prototip kalıpların, damgalama kalıplarının, desenlerin ve aletlerin imalatı için döküm bileşikleri olarak kullanılmaktadır [31]. Tipik bir epoksi malzemenin malzeme özellikler Tablo 2.2’de görülmektedir.

Tablo 2.2. Tipik bir epoksi malzemenin oda sıcaklığındaki özellikleri. [2]

Özellik	Birim	Değer
Özgül Ağırlık	-	1,24
Young Modülü	GPa	3,792
Maksimum Çekme Mukavemeti	MPa	82,74

2.1.2. Kompozit üretim yöntemleri

Kompozit malzeme üretim yöntem seçimi matris ve fiber tipine, parça geometrisine, reçine kürlenme prosesine ve maliyet etkinliğine bağlı olarak tespit edilmektedir. Çoğu zaman üretim yöntemi seçimi kompozit tasarımının ilk adımını oluşturmaktadır. Üretim yöntemlerinin yapısal tasarımlarda sahip olduğu kısıtlar bu durumu bir zorunluluk haline getirmektedir. Başlıca üretim yöntemleri şu şekildedir;

- El yatırma yöntemi
- Püskürtme Yöntemi
- Fiber sarma yöntemi
- Otoklav yöntemi
- Reçine transfer yöntemi
- Pultrüzyon yöntemi
- Hazır Kalıplama yöntemi

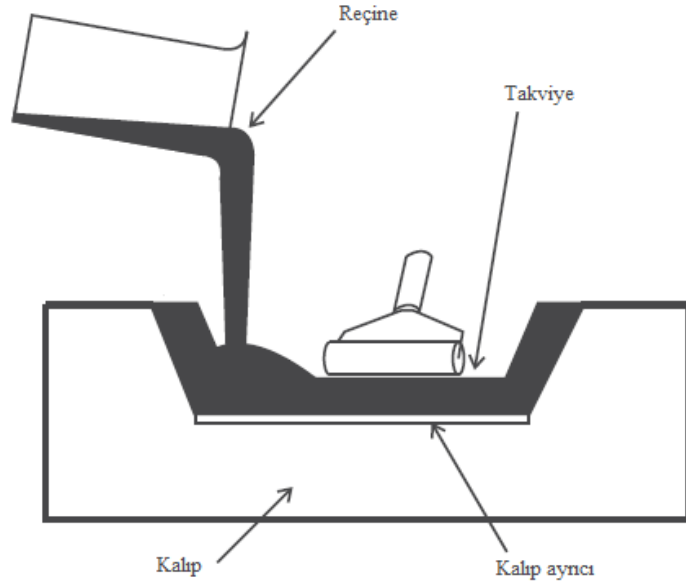
2.1.2.1. El yatırma yöntemi

Islak yatırma olarak da adlandırılan elle yatırma tekniği, en basit ve en yaygın kullanılan üretim yöntemidir. Temel olarak takviye malzemelerinin kuru olarak kalıba elle yerleştirilmesi ve reçinenin uygulanmasıdır. Daha sonra homojen olarak reçinenin dağılması ve fiberlerin ıslanması için çeşitli el aletleri ile hava cepleri çıkartılmakta ve bu durum istenilen kalınlığa ulaşılan kadar devam etmektedir. Üretilen yapı daha sonra kürlenir. El yatırma yöntemi temel olarak dört aşamadan meydana gelmektedir;

- Kalıp hazırlama
- Kalıp ayırıcı jel kaplama
- Takviye ve matrisin yerleştirilmesi
- Kürlenme

Şekil 2.4'te el yatırma yöntemi şematik olarak gösterilmiştir. Düşük üretim maliyeti, parça boyutu ve tasarım esnekliği ve yatırım maliyetlerinin diğer yöntemlere kıyasla oldukça düşük olması başlıca avantajlarıdır. Dezavantajları ise üretim işleminin işçi

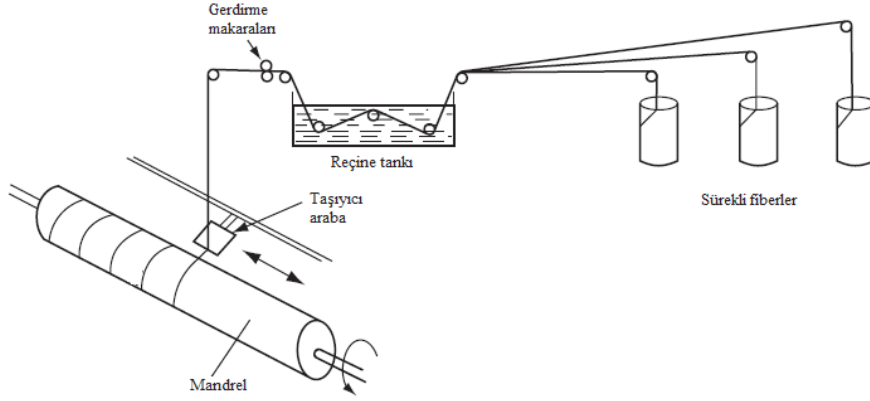
kabiliyetine fazlaca bağılı olması, açık kalıplamadan kaynaklı stiren yayılımı ve yüzey pürüzlülüğüdür.



Şekil 2.4. El yatırma yöntemi şematik gösterimi. [31]

2.1.2.2. Fiber sarım yöntemi

Fiber sarım yönteminde, sürekli fiber kalıbı oluşturan mandrel üzerine istenilen açılarla sarılır. Borular, silindirik ve küresel yapılar bu yöntem kullanılarak üretilmektedir. Bu üretim yöntemi fitil gibi sürekli fiberler kullanılarak kalıp yüzeyi kaplanana kadar ya da istenilen katman kalınlığı elde edilene kadar sarım yapılmasıyla gerçekleştirilir. Fiberler kuru ya da ıslak olarak sarılabilmektedir. Islak yöntemde fiber Şekil 2.5'te görüldüğü gibi bir reçine haznesinde ıslatılmaktadır. Fiber sarım yöntemi, üretim esnasında fiber açılarının parçada meydana gelmesi tahmin edilen zorlanma doğrultuları ile çakıştırılmasıyla yüksek dayanımlı parçaların üretimine olanak sağlamaktadır [31].



Şekil 2.5. Fiber sarım yöntemi. [32]

Avantajlar:

- Özelliklerin yüksek hassasiyetle kontrol edilebilmesi
- Zorlanma yönlerine uygun olarak tasarımların geliştirilebilmesi
- İşçilikten kaynaklı hataların az olması
- Prosesin otomasyona uygun olması
- Kullanılan reçine ve fiber çeşitliliğinin geniş olması

Dezavantajlar:

- Belirli geometrideki (silindirik-küresel) parçaların üretimine olanak sağlaması
- Yüksek maliyetli tesis yatırımı gerektirmesi [33]

2.2. Kompozit Malzemelerin Mekanığı

Kompozit malzemeler mikro ve makro mekanik olarak iki başlık altında incelenmektedir. Kompozitlerin mikro mekanığı fiber ve hacim oranları dikkate alınarak gerekli hesaplamaların yapılmasıdır. Makro mekanikte ise tek bir tabaka veya çok tabakalı kompozitlerin mukavemet davranışları hesaplanmaktadır. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için kompozit malzemelerin gerilme-şekil değiştirme bağıntısının incelenmesi gerekmektedir.

Üç boyutlu bir cisim için genelleştirilmiş Hooke kanunu aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte C_{ij} rijitlik matrisidir. Anizotropik malzemeler için geçerli olan bu ilişki tek yönlü fiber için incelendiği zaman farklılık göstermektedir. Tek yönlü fiberlerle takviye edilmiş kompozit tabakalarda tüm fiberler birbirine paralel olarak kabul edilirse, bu tür malzemelerin ortotropik malzeme olduğu kabul edilebilir. Ortotropik malzemelerde birbirlerine dik doğrultuda üç eksenle simetrik malzeme özelliği mevcut olduğu için yukarıda verilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte $[C]$ rijitlik matrisidir. Rijitlik matrisinin elemanları mühendislik sabitleri kullanılarak şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$C_{11} = \frac{1-v_{23}v_{32}}{\Delta E_2 E_3}, C_{12} = \frac{v_{12}+v_{32}v_{13}}{\Delta E_1 E_2}, C_{13} = \frac{v_{13}+v_{12}v_{23}}{\Delta E_1 E_2}$$

$$C_{22} = \frac{1-v_{13}v_{31}}{\Delta E_1 E_3}, C_{23} = \frac{v_{23}+v_{21}v_{13}}{\Delta E_1 E_2}, C_{33} = \frac{1-v_{12}v_{21}}{\Delta E_1 E_2} \quad (2.3)$$

$$C_{44} = G_{23}, C_{55} = G_{13}, C_{66} = G_{12}$$

$$\Delta = (1 - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32} - 2v_{21}v_{32}v_{13})/E_1 E_2 E_3$$

Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi $[C]$ rijitlik matrisinin tersi olan $[S]$ esneklik matrisi kullanılarak da hesaplanabilmektedir. Ortotropik malzemeler için $[S]$ esneklik matrisi aşağıdaki gibidir:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

İnce cidarlı ortotropik kompozit levhalarda düzlem dışı kuvvet uygulanmıyorsa, levhanın düzlem gerilme altında olduğu kabul edilebilir. Bu durumda:

$$\sigma_3 = 0, \tau_{31} = 0, \tau_{23} = 0 \quad (2.5)$$

Düzlem gerilme hali için Hooke kanunu aşağıdaki şekilde düzenlenebilir:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}, S_{22} = \frac{1}{E_2}, S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

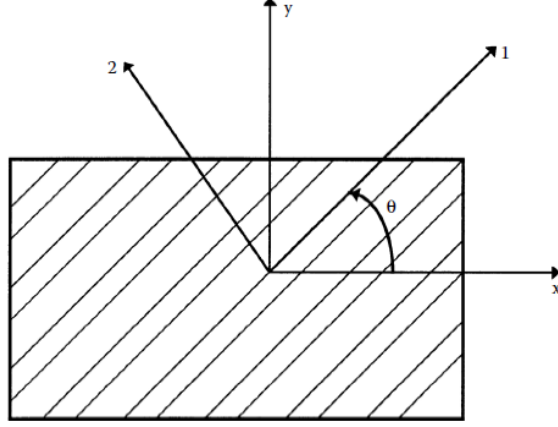
[S] esneklik matrisinin tersi alınarak gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki şekilde de yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{21}\nu_{12}}, Q_{12} = -\frac{E_2\nu_{12}}{1 - \nu_{21}\nu_{12}}, Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}}, Q_{66} = G_{12}$$

Burada [Q] indirgenmiş rijitlik matrisidir. İndirgenmiş rijitlik matrisi [Q] ile rijitlik matrisinin [C] elemanlarının aynı olmadığı unutulmamalıdır.

Kompozit malzemelerin mekanik davranışları incelenirken global ve lokal eksen olmak üzere iki eksen takımı kullanılmaktadır. Bu sayede fiber yönünde veya parçanın bütününde meydana gelen gerilme-şekil değıştirme değeri hesaplanabilmektedir. Eksen takımları şekilde görüldüğü üzere. Lokal eksenler 1 ve 2 yönü, fiber yönünü ve fibere dik yönü tanımlamada kullanılmaktadır. Global eksenler ise x ve y yönleridir.



Şekil 2.6. Eksen takımı. [2]

Açılı bir tabakada gerilemeler için x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi arasındaki ilişki dönüşüm matrisi ile şu şekilde yapılmaktadır:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

[T] dönüşüm matrisi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix}, c = \cos(\theta), s = \sin(\theta) \quad (2.9)$$

Birim şekil değışimi için de koordinat dönüşümü aşağıdaki şekildedir:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Böylece denklemler kullanılarak global eksen için gerilme-şekil değışimi bağıntısı şu şekilde düzenlenebilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Burada [R] Reuter matrisidir ve

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

şeklinde tanımlanır.

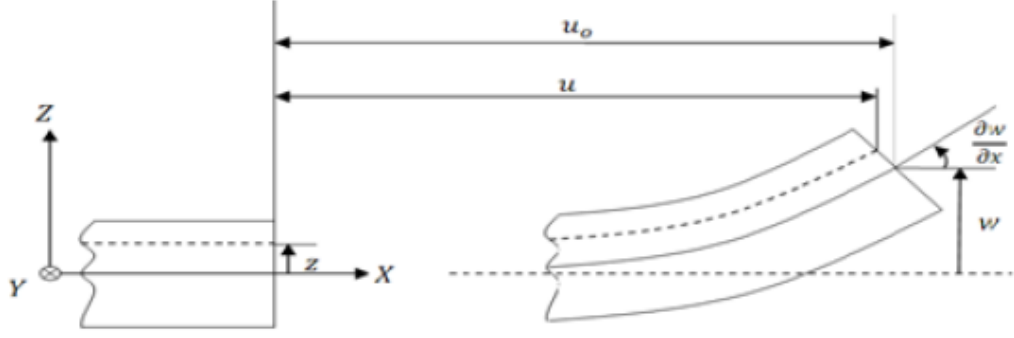
Üstteki ifadedeki matris çarpımları gerçekleştirilerek aşağıdaki ilişki elde edilmektedir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Burada $[\bar{Q}_{ij}]$ dönüştürülmüş indirgenmiş rijitlik matrisi $[Q_{ij}]$ nin elamanları olup aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır. [2,33]

$$\begin{aligned} [\bar{Q}_{11}] &= Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \\ [\bar{Q}_{12}] &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(c^4 + s^4) \\ [\bar{Q}_{22}] &= Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \\ [\bar{Q}_{16}] &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c \\ [\bar{Q}_{26}] &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})cs^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})sc^3 \\ [\bar{Q}_{66}] &= (Q_{11} + Q_{12} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{66}(s^4 + c^4) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Şekil 2.7'de kesiti verilen bir kompozit plaka için şekil değişimi-yer değiştirme ilişkisi aşağıda verilen şekilde ifade edilmektedir.



Şekil 2.7. Deformasyon öncesi ve sonrası lamina kesiti. [34]

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}\end{aligned}\quad (2.15)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y \partial x}$$

Şekil değiştirme-yer değiştirme eşitlikleri matris formatında yazılırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y \partial x} \end{Bmatrix}\quad (2.16)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}\quad (2.17)$$

Bu denklemlerde eşitliğin sağında bulunan ilk ifade orta düzlemin şekil değiştirmelerine, ikinci ifade ise orta düzlemin eğriliklerine karşılık gelmektedir. Denklem 2.17, denklem 2.13'te yerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Katmanlı bir kompozit için her bir katmanın kalınlığı t_k olarak kabul edilirse toplam kalınlık aşağıdaki gibidir:

$$h = \sum_{k=1}^n t_k \quad (2.19)$$

Her bir tabakada meydana gelen global gerilmelerin integrasyonu tabaka kalınlığı boyunca xy düzlemindeki birim boya düşen bileşke kuvvetleri ve momentleri vermektedir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz$$

Kalınlık boyunca katmanlar dikkate alındığında bu ifadeler aşağıdaki şekilde yazılabilirler:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k dz$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k dz \quad (2.21)$$

Denklem 2.18, denklem 2.21'de yerine konulmasıyla kuvvet ve moment bileşenleri için aşağıdaki ifadeler ortaya çıkar.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} &= \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \\ &+ \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} &= \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \\ &+ \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz \right\} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Denklem 2.22 ve 2.23'te verilen integrallerin çözülmesiyle denklemler:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

haline gelmektedir.

Burada; [A] uzama-kısalma matrisi, [B] bağlantı matrisi ve [D] ise eğilme rijitlik matrisleri olarak adlandırılmaktadırlar.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k - h_{k-1}) \quad (2.26)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (2.27)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (2.28)$$

Tabakalı kompozit yapının düzlem mühendislik sabitlerinin hesaplanmasında A matrisi kullanılmaktadır. Simetrik dizilime sahip yapılar için B matrisi 0'dır. Kompozitin boyuna, enine elastiklik modülleri ve kayma modülü aşağıdaki ifadeler ile hesaplanmaktadır:

$$\begin{aligned}
 E_x &\equiv \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x^0} = \frac{\frac{N_x}{h}}{A_{11}^* N_x} = \frac{1}{hA_{11}^*} \\
 E_y &\equiv \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y^0} = \frac{\frac{N_y}{h}}{A_{22}^* N_y} = \frac{1}{hA_{22}^*} \\
 G_{xy} &\equiv \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}^0} = \frac{\frac{N_{xy}}{h}}{A_{66}^* N_{xy}} = \frac{1}{hA_{66}^*}
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Burada $[A^*]$, $[A]$ matrisinin tersi, h ise toplam laminat kalınlığıdır.

2.2.1. Kompozit malzemelerde hasar kriterleri

Tabakalı kompozit malzemeler ortotropik malzeme özelliği gösterdiği için elastik ve mukavemet özellikleri lokal eksenler olan 1,2 ve 3 eksenleri için tanımlanmaktadır. Hasarlanmanın incelendiği durumlarda asal gerilmeler (global eksen) ve maksimum kayma gerilmeleri değil lokal eksenlerdeki gerilmeler dikkate alınmaktadır. Bundan dolayı çok katmanlı kompozit için mukavemet tek bir katmanın mukavemeti ile alakalıdır.

Tek yönlü bir katman için fibere paralel ve fibere dik olmak üzere iki malzeme eksenine sahiptir. Yani tek yönlü bir katman için iki malzeme ekseninde çekme ve basma için dört tane mukavemet parametresi mevcuttur. Buna ek olarak tek yönlü katman için bir de kayma mukavemeti değeri mevcuttur. Bunlar:

σ_1^T = fiber yönünde maksimum çekme mukavemeti (1 yönü)

σ_1^C = fiber yönünde maksimum basma mukavemeti (1 yönü)

σ_2^T = fibere dik (enine) maksimum çekme mukavemeti (2 yönü)

σ_2^C = fibere dik (enine) maksimum basma mukavemeti (2 yönü)

τ_{12} = maksimum kayma mukavemeti (1-2 düzlemi)

Rijitlik parametrelerinin aksine mukavemet parametreleri açılı katman için direkt olarak dönüştürülemez. Hasar teorileri, ilk olarak lokal eksenlerdeki gerilmelerin bulunması ve sonrasında yukarıdaki beş mukavemet parametresi kullanılarak hasara uğrayıp uğramadığını bulmaya dayanmaktadır. Hasarın türü yüklemeye, fiber yönlenmesine ve parça geometrisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Kompozit malzemelerde hasar belirli bir sıraya göre oluşmaktadır. Malzemeye, geometriye, fiber yönlenme açılarına ve uygulanan zorlanma türüne bağlı olarak öncelikle mukavemet açısından zayıf tabakaların matrisinde çatlak oluşumu ve ilerlemesinin meydana gelmesiyle kırılma oluşur. Bu durumda matris yük taşıyamaz ve tüm yüklemeye fiberler tarafından taşınır. Uygulanan yüklemenin artmasına bağlı olarak yapıda fiber hasarlanmaları meydana gelir. Başlıca hasar teorileri şu şekilde sıralanabilir:

- Maksimum gerilme hasar teorisi
- Maksimum şekil değiştirme hasar teorisi
- Tsai-Hill hasar teorisi
- Tsai-Wu hasar teorisi
- Hashin hasar teorisi

2.2.1.1. Tsai-Wu hasar teorisi

Bu hasar teorisi kompozit malzemelerin gerilme analizlerinde en yaygın kullanılan teoridir. Ortotropik tabakada, düzlem gerilme hali şartları için Tsai-Wu hasar teorisi gereğince aşağıda verilen denklem 2.30'un sağlanması durumunda hasar oluşumu beklenmez, denklem 1'e eşit olması ya da aşması durumunda ise hasarın gerçekleşeceği kabul edilir.

$$F_{ij}\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j < 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (2.30)$$

$$\left[\left(\frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C} \right) \sigma_2 + \left(\frac{1}{Z^T} - \frac{1}{Z^C} \right) \sigma_3 + \frac{\sigma_1^2}{X^T X^C} + \frac{\sigma_2^2}{Y^T Y^C} + \frac{\sigma_3^2}{Z^T Z^C} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{13}^2} + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 \right] < 1 \quad (2.31)$$

$$F_{12}^2 = \frac{1}{X^T X^C} \frac{1}{Y^C Y^T} \quad (2.32)$$

$$F_{23}^2 = \frac{1}{Y^C Y^T} \frac{1}{Z^C Z^T}$$

$$F_{13}^2 = \frac{1}{X^T X^C} \frac{1}{Z^C Z^T}$$

X, Y, Z:1,2 ve 3 yönündeki dayanım değerleri

S: Maksimum kayma dayanımı

2.2.1.2. Hashin hasar teorisi

Hashin hasar teorisi Abaqus Cae yazılımı içerisinde hazır olarak kullanıcıya sunulduğu için hasar analizi ile ilgili çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu teori dört durum için hasar başlangıç durumu ele alınmıştır:

-Fiberin çekme yükü altında kopması

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (2.33)$$

-Fiberin basma yükü altında burkulması ve bükülmesi

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^C} \right)^2 \quad (2.34)$$

-Matrisin çekme yükü altında çatlaması

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (2.35)$$

-Matrisin basma yükü altında çatlaması

$$F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}}{S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (2.36)$$

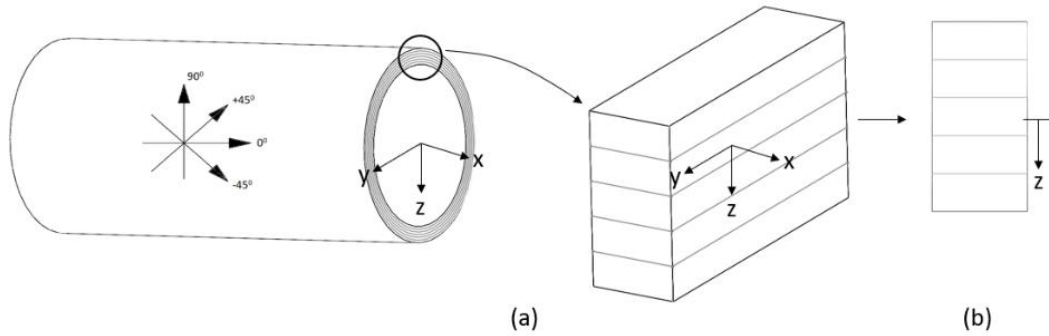
Burada, X^T fiber yönündeki maksimum çekme mukavemeti, X^C fiber yönündeki maksimum basma mukavemeti, Y^T fibere dik yöndeki maksimum çekme mukavemeti, Y^C fibere dik yöndeki maksimum basma mukavemeti, S^L düzlem içi maksimum kayma mukavemeti, S^T katmanlar arası maksimum kayma mukavemeti ve α kayma/çekme katkı faktörüdür. [2,33,40]

3. KOMPOZİT TÜPLERİN BURULMA ZORLANMASI ALTINDAKİ DAVRANIŞI

Kompozit yapılar izotropik homojen malzemelere benzemedikleri için tabaka rijitliği fiber, matris veya fiber-matris ara yüzeyinde seçilecek noktaya bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bu farklılıklar modellemeyi karmaşık hale getirdiği için ortalama özelliklere göre ve tabakanın homojen olduğu kabulüyle çözümler yapılmaktadır.

Kompozit tüpler içi boş bir silindir olduğu varsayılırsa klasik laminasyon yaklaşımına göre silindirin içindeki bir eleman, düz bir levha formunda kabul edilmektedir [2]. Şematik hali Şekil 3.1’de verilen kompozit tüp için düzlem gerilme hali kabulü ile z eksenini ihmal edilerek x-y ekseninde çözümler gerçekleştirilmektedir. Kompozit şaft üzerinde açılarının yönlenmesi Şekil 3.1a’daki gibidir.

Çalışma kapsamında yapılan analitik çözümler literatürde bulunan diğer çalışmalar ile doğrulanmıştır [24,34].



Şekil 3.1. Fiberlerin kompozit tüpteki yönelimi ve analitik çözüm yapısının şematik gösterimi.

Kompozit şaftların tasarımında tork iletme kapasitesi, kritik burkulma momenti ve frekans değeri temel tasarım kriterlerini oluşturmaktadır.

3.1. Moment İletme (Burulma Dayanımı)

Burulma zorlanması altında, kabul edilen düz birim eleman üzerinde sıfırdan farklı yük sadece N_{xy} kesme kuvvetidir. Birim genişlik başına düşen N_{xy} kesme kuvveti:

$$N_{xy} = (\tau_{xy})_{ortalama} t \quad (4.1)$$

ifadesi ile tanımlanabilir.

Uygulanan tork ve N_{xy} kesme kuvveti arasında dönüşüm yapmak için aşağıdaki ifadelerden yararlanılmaktadır:

Tork= (kayma gerilmesi) x (alan) x (moment kolu)

$$\begin{aligned} T &= (\tau_{xy})_{ortalama} t \pi (r_o^2 - r_i^2) r_m \\ t &= r_o - r_i \\ r_m &= \frac{r_o + r_i}{2} \\ N_{xy} &= \frac{T}{2\pi r_m^2} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Burada, t cidar kalınlığı, r_o iç yarıçap, r_i dış yarıçap ve r_m ortalama yarıçaptır.

3.2. Kritik Burulma Burkulması

Kompozit shaftlar uzun, ince ve boşluklu yapılar olarak tasarlandığı için burulma zorlanması altında burkulabilirler. Ortotropik ince cidarlı tüpler için burkulma ifadesi şöyledir:

$$T_{cr} = (2\pi r_m^2 h) (0.272) (E_x E_y^3)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{h}{r_m}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.3)$$

Bu ifadede r_m ortalama yarıçapı h ise toplam laminat kalınlığını göstermektedir.

3.3. Doğal Eğilme Frekansı

Kompozit şaftlar çalışma şartlarında rezonansa girmemesi için doğal eğilme frekansı önemli bir tasarım kriteri olarak göz önüne alınmalıdır. Ortotropik ince cidarlı tüpler için birinci frekans modu aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_x I}{m L^4}} \quad (4.4)$$

Bu ifadede m birim uzunluk başına ağırlığı, I atalet momentini, L şaft uzunluğunu göstermektedir.

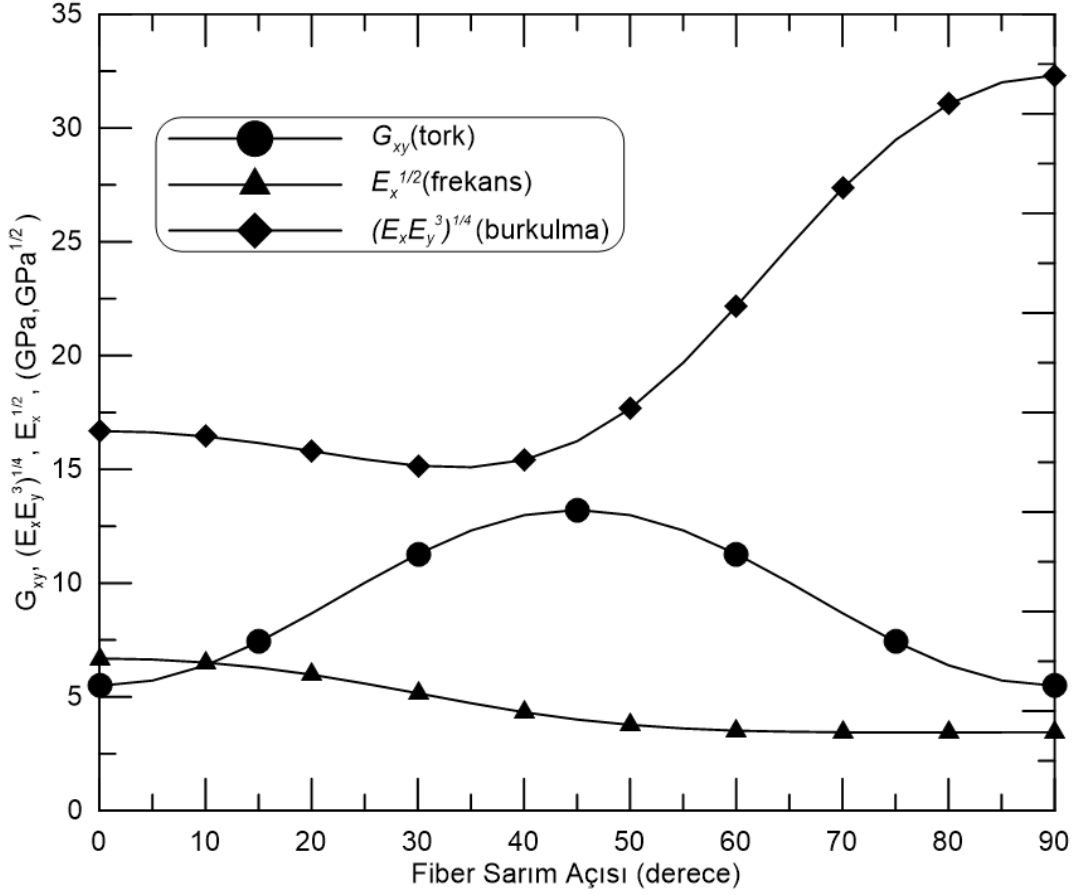
Denklem 4.3 ve 4.4 dikkate alındığında parça geometrisinden bağımsız olarak kritik burkulmayı $(E_x E_y^3)^{\frac{1}{4}}$, doğal frekansı ise $\sqrt{E_x}$ ifadesinin ve tork taşıma kapasitesini G_{xy} kayma modülünün etkilediği görülmektedir.

3.4. Kompozit Tüp Tasarımı

Daha önce verilen matematiksel yaklaşımlardan hareketle fiber açılarının tüp tasarımı üzerindeki etkisini incelemek için tabaka kalınlığı 0.25 mm olan ve 0 ila 90 derece arasında açı değeri beşer artacak şekilde ($[0]_{10}$, $[\pm 5]_{10}$, ... $[90]_{10}$) on tabakadan oluşan yapıların modül değerleri bölüm 2’de ayrıntılı olarak verilen denklemler kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 3.2’de verilen grafik oluşturulmuştur. Hesaplamalarda kullanılan cam fiber malzeme özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Tipik E-Cam Mekanik özellikleri. [31]

E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	G_{12} [GPa]	ν_{12}	ρ [g/cm ³]
45,0	12,00	5,50	0,19	2,076



Şekil 3.2. Fiber sarım açısının modüller üzerindeki etkisi.

Grafikte, eğrilerin fiber sarım açısıyla değişimi incelendiğinde, sonuçların literatürle de örtüştüğü, tüpün (i) tork taşıma kapasitesini 45 derecenin, (ii) eğilme doğal frekansını 0 derecenin ve (iii) kritik burkulma momentini de 90 derecenin maksimum yaptığı sonucuna ulaşılmış ve tek bir yönelime sahip fiberin kullanımı ile söz konusu üç kriterin sağlanmasının mümkün olmadığı anlaşılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Literatür incelemeleri ve yapılan analitik çalışmalar göz önüne alınarak tez çalışmasının amacı ve kapsamı aşağıda özetlenmiştir.

Kompozit şaft tasarımında 45 derecelik yönelime sahip tabaka sayının ağırlıkta olmasının elde edilecek tork iletme kapasitesinin maksimize edilmesi açısından önemli olduğu tespit edilmiştir. 0 derece ve 90 derecelik fiber yönelimlerinin ise diğer davranışlar (doğal frekans, kritik burkulma m.) için önemli olduğu anlaşılmıştır. Her ne kadar analitik hesaplamalarda (klasik laminasyon yaklaşımında) kullanılan uzama-kısalma rijitlik matrisi ([A] modüllerin hesaplandığı) bakımından katman diziliminin önemi yok gibi bir sonuç çıkartılsa da dizilim sırasının kompozitlerin hasarlanmasında farklılıklara yol açtığı görülmüştür. Ayrıca katmanlar arası sarım açısı farkının da kompozit kesit içerisinde mümkün mertebe homojen gerilme dağılımının sağlanabilmesi için önemli bir diğer konuyu oluşturduğu anlaşılmıştır.

Alüminyum-kompozit hibrit şaft çalışmalarında alüminyum tüp içine ya da dışına yapılan kompozit takviyenin tork iletme kapasitesini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Bu çalışmalarda fiber takviyenin ağırlıklı olarak alüminyum tüpün dışına ve az sayıdaki çalışmada ise alüminyum tüpün içine yapıldığı görülmüştür.

Ancak kompozit tüplerde yükleme durumu, hasarlanma koşulları ve fiber sarım açısı, katman dizilimi, katman kalınlığı gibi parça performansına etkiyen çok sayıda değişkenin bulunmasından dolayı genel bir tasarım sistematığının ortaya konulamadığı tespit edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında alüminyum tüpün hem içine hem de dışına kompozit takviyesi yapılmasının tork iletimine olan etkisi üzerinde durulmuştur. Ayrıca hem alüminyum tüp hem de kompozit tüp için radyal yöndeki rijitliği birinci derecede etkilediği sonucuna varılan 90 derece sarımların katman dizilimindeki optimum yeri tespit edilmeye çalışılmıştır. Üretilen hibrit kompozit tüplerin mekanik davranışlarının karşılaştırılmasında burulma deneyinden faydalanılmıştır. Alüminyum tüpün burulma zorlanması altındaki deformasyonu deneylerle

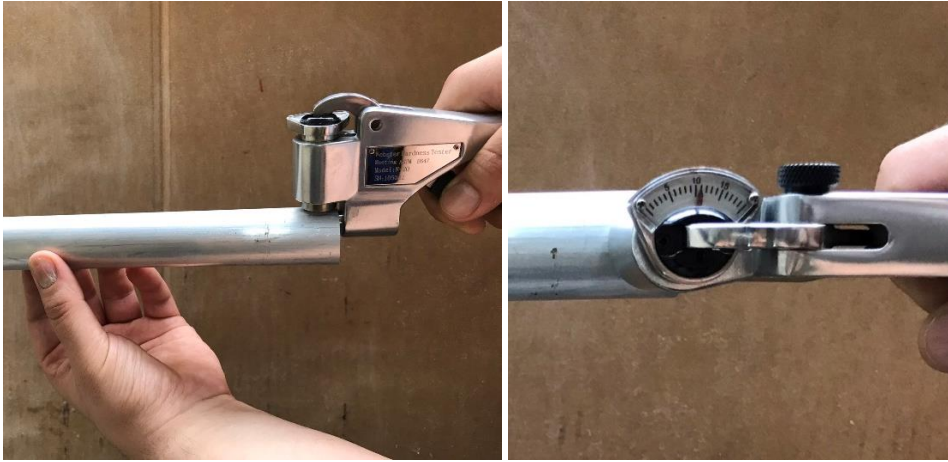
incelenmiş ve tüpe dışarıdan yapılan takviyeye ek olarak içeriden yapılacak bir takviyenin rijitlik üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

4.1. Deneysel Çalışmalar

4.1.1. Deneysel Malzemeleri

4.1.1.1. Alüminyum (6063-T5) boru

Yapılan deneylerde çapı 32 mm, cidar kalınlığı 1 mm olan 6063-T5 alüminyum borular kullanılmıştır. Temin edilen malzemelerden numuneler kesilmiş ve Webster sertlik ölçüm aleti kullanılarak sertlik değerleri ölçülmüştür (Şekil 4.1). Sertliğin mekanik davranışlara etkisi göz önüne alınarak 60-65 HB aralığındaki borular kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Alüminyum boruların sertliklerinin Webster ölçüm aleti ile ölçülmesi.

4.1.1.2. Cam fiber

Alüminyum tüpün içeriden ve dışardan takviyesinde cam fiber malzeme kullanılmıştır. Kullanılan cam fiber Şişecam firmasının ürettiği FWR6 1200 text fiberlerdir. Fibere ait fotoğraf Şekil 4.2 de verilmiştir.



Şekil 4.2. Kompozit üretiminde kullanılan cam fiber iplik.

4.1.1.3. Epoksi reçine

Fiber takviye işleminde ticari ismi MGS Laminasyon L160/H160 epoksi seti kullanılmıştır. Üretimde epoksi ve sertleştirici karışım oranı %25 olarak kullanılmıştır.

4.1.2. Malzeme karakterizasyonu için deney numunelerinin hazırlanması

4.1.2.1. Alüminyum tüpe ait çekme deneyi numunelerinin hazırlanması

Deneylerde kullanılacak alüminyum tüpün mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme deneyi yapılmıştır. Deneyler Instron marka çekme makinasında 0.1 mm/s hızda gerçekleştirilmiştir. Testlerin yapıldığı deney cihazı Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Çekme deneyinin yapıldığı cihaz.

ASTM-E8/E8M-09 standardına uygun olarak alüminyum borulardan çekme numuneleri hazırlanarak deneyler bu numuneler üzerinde yapılmıştır. Deney numunesi Şekil 4.4'te görülmektedir. Çekme numunesinin oval kesitine uygun sıkıştırma aparatları kullanılarak numunenin deney sırasında kaymasının önüne geçilmiştir.



Şekil 4.4. Alüminyum tüpten çıkartılan deney numunesi.

4.1.2.2. Kompozit malzemeye ait çekme, basma ve kayma deney numunelerinin hazırlanması


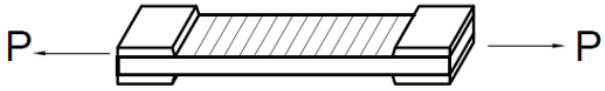

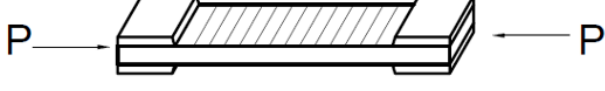

Cam fiberlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme, basma ve kayma numuneleri hazırlanmıştır. Cam fiberlerden el yatırması yöntemi kullanılarak levhalar hazırlanmış ve levhalar bir gün oda sıcaklığında bekletilerek kürlenme işlemi tamamlanmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. El yatırma yöntemi ile hazırlanmış levhalar.

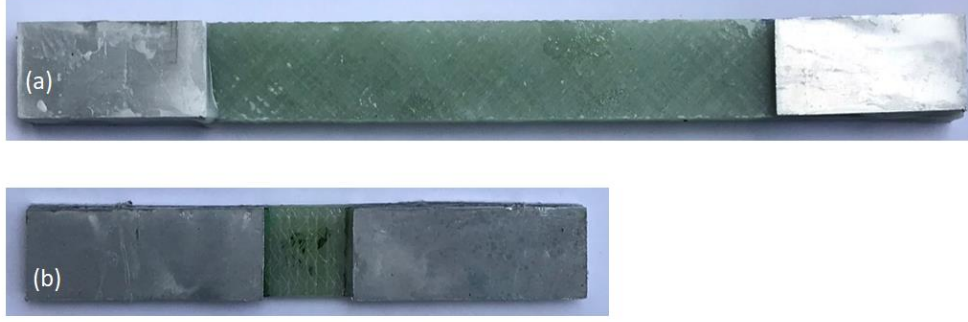
Hazırlanan levhalardan su jeti kullanılarak ASTM standartlarına uygun olarak çekme, basma ve kayma deney numuneleri kesilmiştir. Çekme deneyi için ASTM D3039, basma deneyi için ASTM D3410 ve kayma deneyi için ASTM D3518 standartları kullanılmıştır. Kesilen numunelere, cihaz çenelerinin tuttuğu kısımlarda ezilme olmaması için numunelerin uç taraflarına alüminyum plakalar yapıştırılmıştır. Deney numunelerinin standartları ve o numune ile belirlenen özellikler Tablo 4.1'dedir. Numunelere ait görseller Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deney numune standartları.

ASTM	Numune Geometrisi	Özellikler	Sembol
D 3039		Fiber yönündeki modül, poisson oranı ve maksimum çekme dayanımı	E_1 ν_{12} χ^T
D 3039		Fibere dik (enine) yöndeki modül, poisson oranı ve maksimum çekme dayanımı	E_2 ν_{21} γ^T
D 3518		Fiber yönündeki maksimum basma dayanımı	χ^C
D 3518		Fibere dik (enine) yönündeki maksimum basma dayanımı	γ^C
D 3410		Kayma modülü ve maksimum kayma dayanımı	G_{12} S



Şekil 4.6. (a) fiber yönünde çekme numunesi, (b) fibere dik yönde çekme numunesi, (c) fiber yönünde basma numunesi.



Şekil 4.7. (a) kayma numunesi, (b) fibere dik yönde basma numunesi.

Deneyle MTS cihazında çekme numuneleri için 2mm/dk hızda, basma numuneleri içinse 1.5mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir. (Şekil 4.8)



Şekil 4.8. MTS cihazında çekme deneyi.

4.1.2.3. Burulma deney numunelerinin hazırlanması

Alüminyum tüpün içine ve dışına kompozit takviyesi yapmak için fiber sarım yöntemi kullanılmıştır (Şekil 4.9). Fiber hacim oranı %60 olacak şekilde sarımlar yapılarak 24 saat oda şartlarında bekletildikten sonra 40 °C sıcaklıkta 120 dakika fırınlanarak kürlenme işlemi gerçekleştirilmiştir. Katman kalınlıklarının farklılıkları dikkate alınarak fiber epoksi karışım oranlarında farklılık oluşmamasına özen

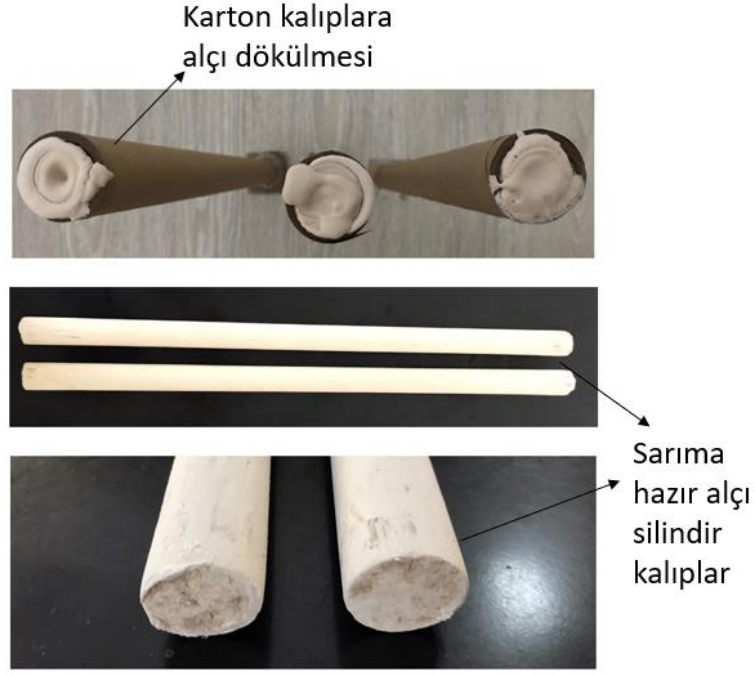
gösterilmiştir. ± 45 derece sarımlar için katman kalınlığı 0.69 mm iken, 90 derece sarımlar içinse 0.45 mm'dir



Şekil 4.9. Fiber sarım makinesinde numune üretimi.

Alüminyum tüp dışına kompozit takviyenin fiber sarım yöntemiyle uygulanmış örnekleri literatürde çokça bulunmaktadır, ancak tüp içine takviyenin fiber sarım yöntemiyle yapılan bir örneğine rastlanmamıştır.

Tüp içerisine takviyenin gerçekleştirilmesinde bozulabilir alçı kalıplardan yararlanılmıştır. İç çapı 30 mm olarak tedarik edilen kâğıt borular kalıp olarak kullanılmış (Şekil 4.10), kartonpiyer alçıdan hazırlanan karışım kalıp içerisine dökülerek alçı kalıp elde edilmiş, zımpara işlemi uygulanarak son ölçü verilmiştir.

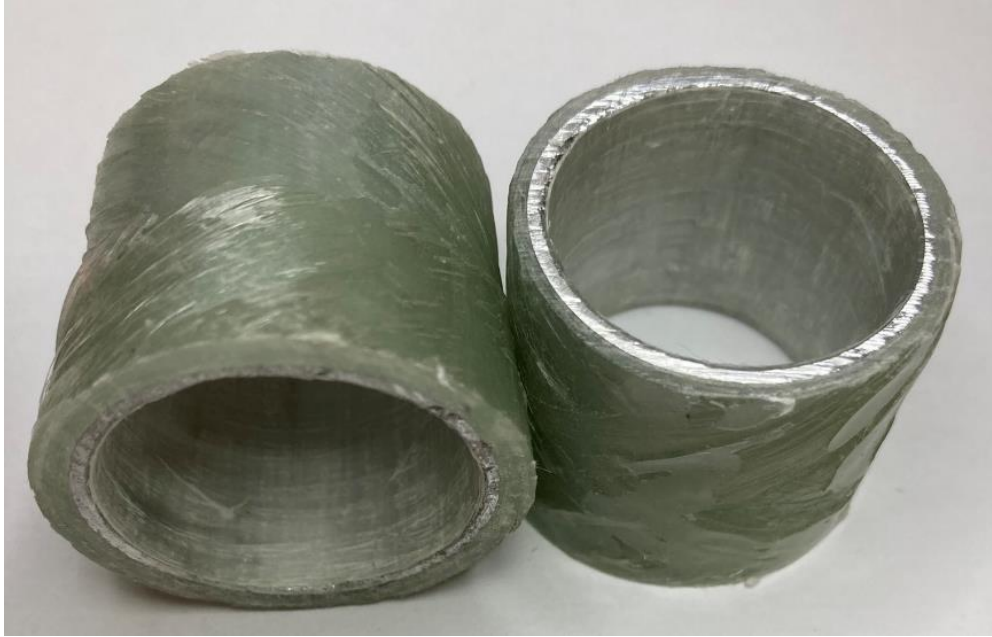


Şekil 4.10. Alçı kalıp hazırlanması.

Hazırlanan alçı boruların üzeri plastik bantla kaplanarak kalıp ayırıcı sürülmüş ve fiber sarım makinesine bağlanmıştır. Sarımı tamamlanan alçı borular makineden sökülerek ıslak halde daha önce dışına sarım yapılan alüminyum borunun içine yerleştirilmiş ve böylece iki takviyenin beraber kürlenmesi sağlanmıştır (Şekil 4.11). Kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra alçı kalıp bozularak numune üretimi tamamlanmıştır. İçeriden takviye edilmiş numunelerden elde edilmiş parça görüntüleri Şekil 4.12’dedir. Kürlenme sonrası kompozit tüp örnekleri Şekil 4.13 verilmiştir.



Şekil 4.11. Alçı kalıbın alüminyum tüp içine yerleştirilmesi.



Şekil 4.12. İçeriden takviye edilmiş kompozit tüpler.



Şekil 4.13. Kürlenme sonrası deney numuneleri.

Yapılacak deneyler için 8 farklı kombinasyona sahip kompozit numunelere karar verilmiştir (Tablo 4.1). Kombinasyonlara karar verilmesinde literatür ve yapılan analitik hesaplamalar dikkate alınmıştır.

Tablo 4.2. Kompozit deney numune kombinasyonları.

Katman Dizilimleri	
$[(\pm 45)_2/A1]$	$[\pm 45/90/\pm 45/A1]$
$[90/(\pm 45)_2/A1]$	$[(\pm 45)_3/A1]$
$[(\pm 45)_2/A1/90]$	$[(90)_2/\pm 45/A1]$
$[(\pm 45)_2/90/A1]$	$[90/\pm 45/90/A1]$

4.1.3. Burulma deney düzeneği

Burulma deneyleri üniversitemiz bünyesinde bulunan MTS 809 Eksenel/Tork test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan alüminyum boruların çapı 32 mm'dir, numune boyunun belirlenmesinde net bir standart ölçü bulunmadığı için literatürdeki çalışmalar incelenerek 170 mm numune uzunluğuna karar verilmiştir. Üretilen numunelerin çap ölçüleri MTS cihazının kapasitesinin üzerinde olduğu için numunelerin cihaza bağlanmasında dört ayaklı torna aynaları kullanılmıştır (Şekil 4.14). Deneyler 0.2 0/s hızda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.14. Burulma deney düzeneği.

Numuneler üzerinde pim delikleri açılarak (Şekil 4.15) M6 cıvatalar borulara eklenmiş ve bu pimler sayesinde test sırasında numunelerin kayması engellenmiştir. Ayrıca ayna çenelerinin sıkıştırması esnasında özellikle saf alüminyum tüplerin testlerinde deformasyonu engellemek amacıyla numunelerin uç tarafları polietilen silindir parçaları ile takviye edilmiştir (Şekil 4.16).

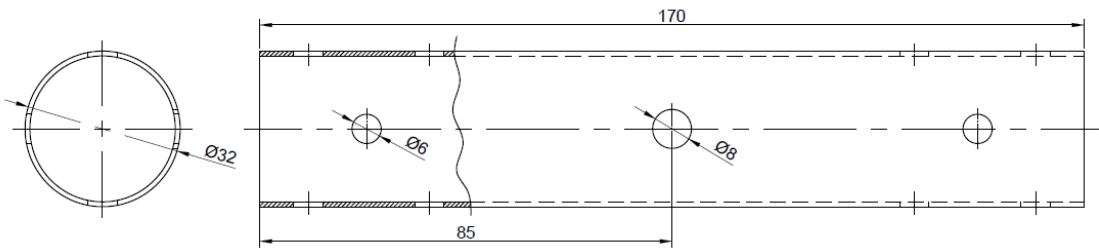


Şekil 4.15. Numunelere pim deliklerinin açılması.



Şekil 4.16. Deney numunelerinin montaj öncesi hali.

Numuneye ait teknik resim Şekil 4.17’de, numune örneği ise Şekil 4.18’de görülmektedir.



Şekil 4.17. Burulma numunesi teknik resim görüntüsü.



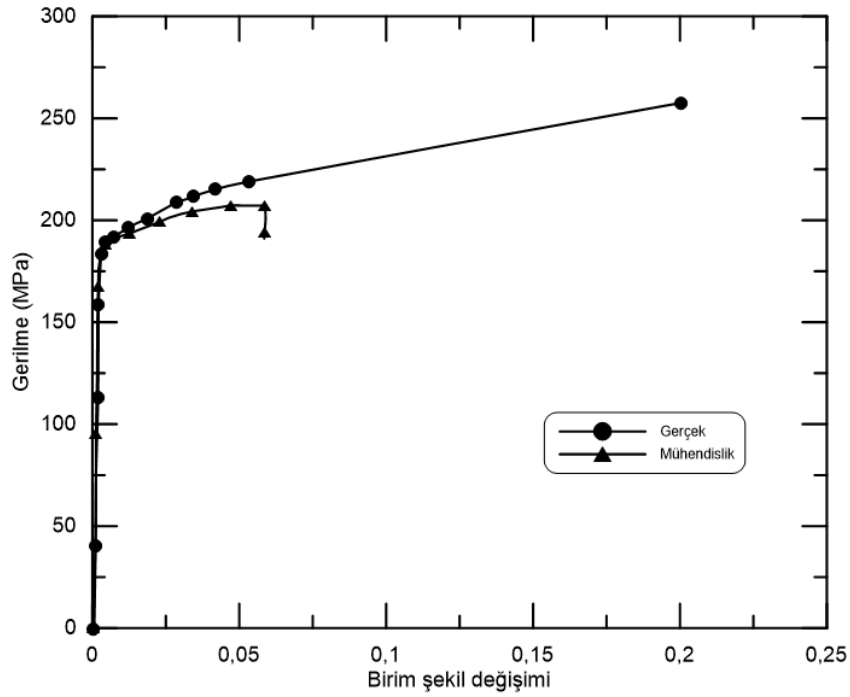
Şekil 4.18. Burulma numune örneği.

Numunelerin kaymasını engellemek için açılan deliklerin çentik etkisinden dolayı oluşturabileceği muhtemel problemlerin önüne geçmek için bütün numunelerin ortasına M8 delikler açılarak hasarın orta noktadan başlaması sağlanmış ve hasarın ilerlemesi tespit edilmeye çalışılmıştır.

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Alüminyum Tüpe Ait Çekme Deneyi Sonuçları

Tez çalışması kapsamında yapılan tüm deneyler üçer defa tekrarlanmıştır. 32 mm çaplı alüminyum tüpe ait çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değişim eğrisi ve numunelerin deney sonrası görünümü Şekil 5.1 ve 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Alüminyum tüpe ait numunenin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.

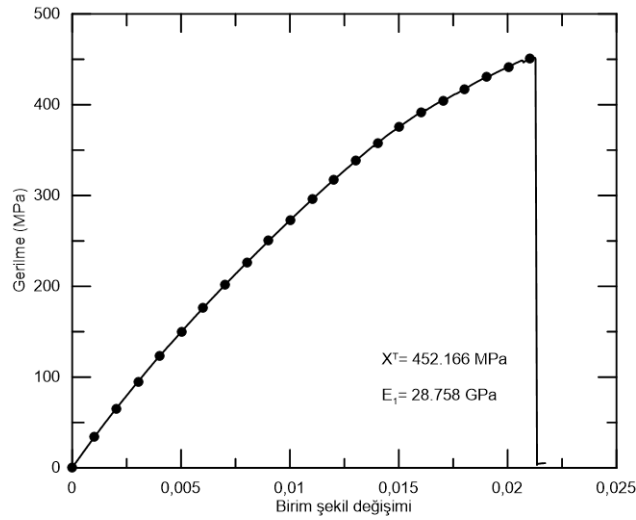


Şekil 5.2. Deney sonrası numunenin görüntüsü.

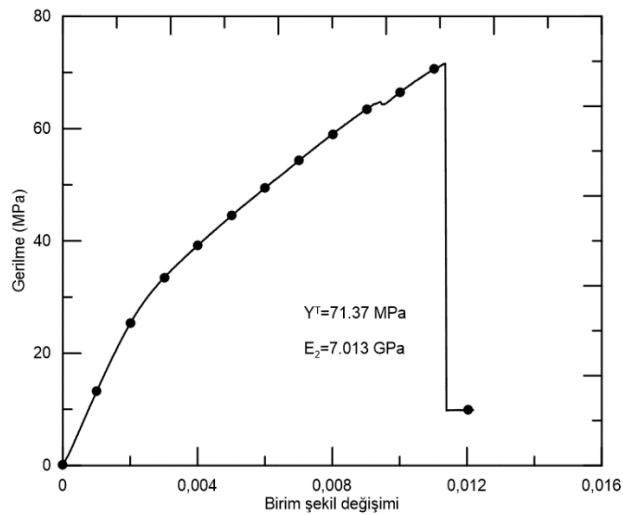
Alüminyum için elde edilen çekme eğrisinden, hesaplanan malzeme büyüklüklerinin literatürle [35] uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

5.2. Fiber Takviyeli Kompozit Numunelerin Çekme, Basma ve Kayma Deneyi Sonuçları

Fiber kompozitlere uygulanan çekme deneyi sonuçları Şekil 5.3'te ve Şekil 5.4'te verilmiştir.

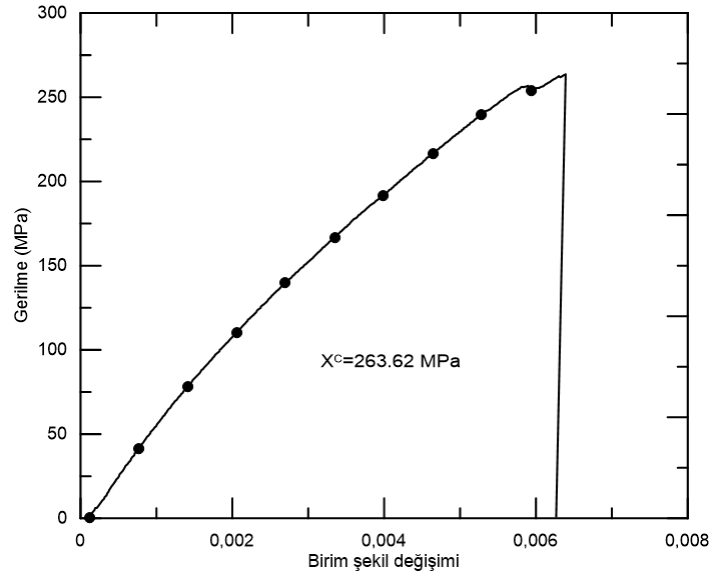


Şekil 5.3. Fiber yönünde çekme uygulanan numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.

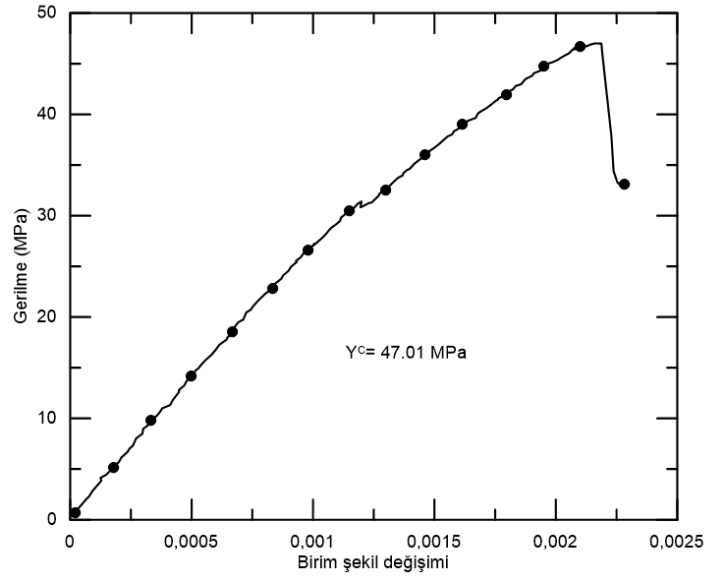


Şekil 5.4. Fibere dik yönde çekme uygulanan numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.

Fiber kompozitlere uygulanan basma deneyi sonuçları Şekil 5.5'te ve Şekil 5.6'da verilmiştir.

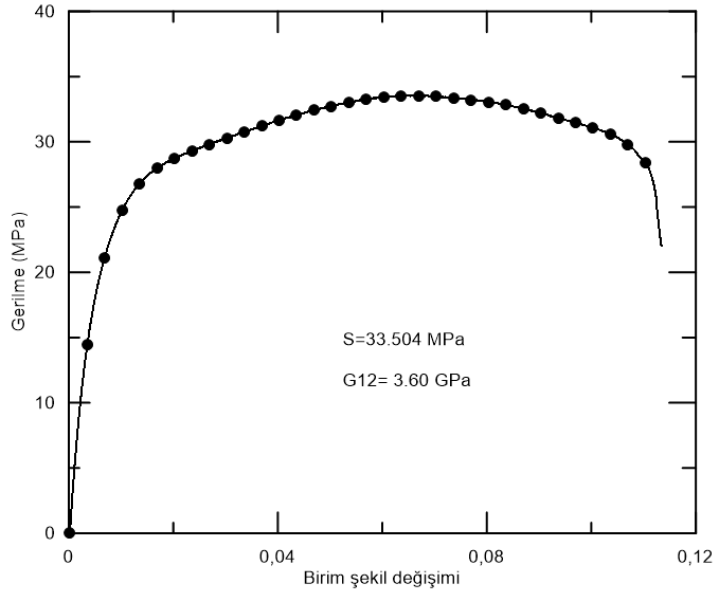


Şekil 5.5. Fiber yönünde basma uygulanan numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.



Şekil 5.6. Fiber dik yönde basma uygulanan numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.

Fiber kompozitlere uygulanan kayma deneyi sonucu Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Kayma deneyine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.

Çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası deney numunelerinin görüntüleri Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8. Fiber takviyeli kompozitlerin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri a)kayma (45^0) deneyi, b) fiber yönünde çekme deneyi, c) fibere dik çekme deneyi, d) fiber yönünde basma deneyi, e) fibere dik yönde basma deneyi.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.1’de verilmiştir. Tabloda listelenen verilerin literatürde verilen değerlerle (örneğin: E1 değeri için 21-45 GPa aralığında değerler mevcut) büyük ölçüde örtüşmektedir [7,8,36]. Mekanik değerlerdeki bu değişimlerin kütleme işlem pratiği ve en önemlisi kullanılan elyafın özelliklerinden kaynaklanabileceği dikkate alındığında söz konusu sapmanın kabul edilebilir aralıkta olduğu anlaşılmıştır. Tabloda X^T ve X^C fiber yönündeki, Y^T ve Y^C fibere dik yöndeki sırasıyla çekme ve basma mukavemetini, S ise kayma mukavemetini vermektedir.

Tablo 5.1. Üretilen kompozite ait mekanik özellikler.

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{12}	G_{12} (GPa)	X^T (MPa)	Y^T (MPa)	X^C (MPa)	Y^C (MPa)	S(MPa)
28,758	7,013	0,19	3,60	452,16	71,37	263,62	47,01	33,504

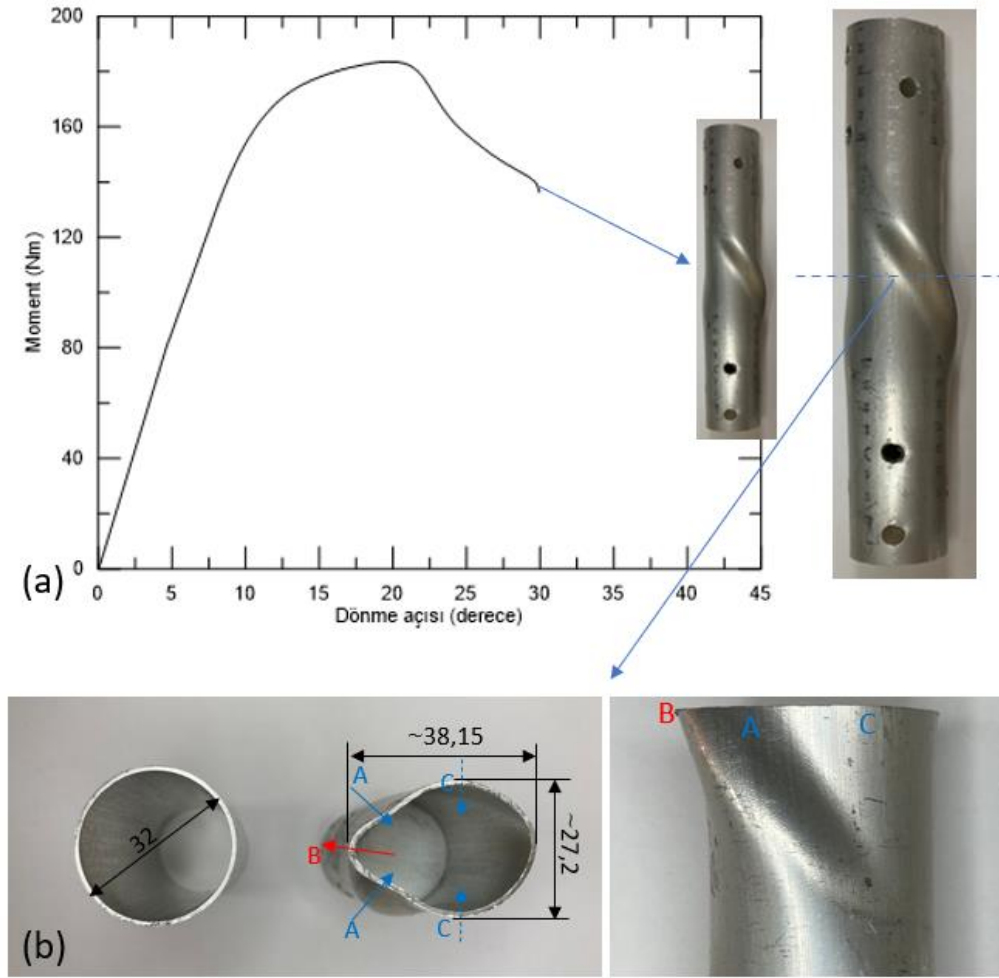
5.3. Burulma Deneyi Sonuçları

5.3.1. Deliksiz alüminyum tüpün burulma deneyi sonuçları

Alüminyum tüpün burulma zorlanması altındaki davranışını incelemek amacıyla burulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9a’da 32 mm çapında cidar kalınlığı 1 mm olan alüminyum tüpün tork-dönme açısı grafiğinden, başlangıçta torkun dönme açısıyla doğrusal olarak arttığı, daha sonra cidarda oluşan burkulmaya bağlı olarak artan dönme açısı ile döndürme momentinin azalan hızla yükseldiği görülmektedir. Maksimum moment değerine ulaştıktan hemen sonra cidarda oluşan aşırı burulma deformasyonu ile momentte hızla düşme meydana gelmekte ve yapı moment iletemez hale gelmektedir.

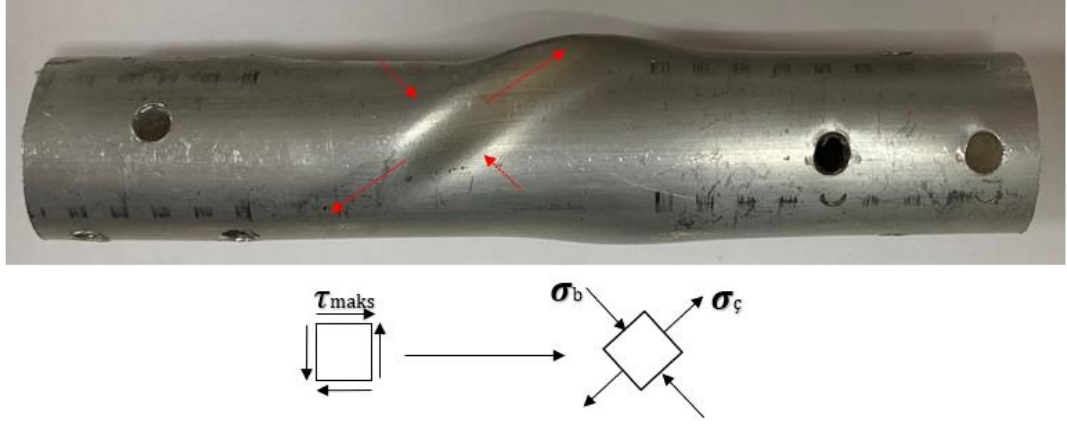
Bu tür davranış cidarda oluşan burkulmayla doğrudan ilişkili olarak meydana geldiği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [17,18]. Ancak cidarda meydana gelen deformasyonun deneysel olarak yeterince incelenmediği dikkat çekmektedir. Söz konusu şekilde cidarda burkulma esnasında A bölgelerinde içeriye hareket olurken, B bölgesinde dışa doğru hareket gelişmekte ve böylece parça çapının yatay ekseninde 38 mm’yi aşan bir deformasyon görülmektedir (Şekil 5.9b). Diğer taraftan, tüpün C bölgelerinde içeriye doğru hareketin bir sonucu olarak daralma meydana gelmektedir. Parça üzerinde yapılan ölçümlerden burkulma bölgesindeki cidarın tüp

çapının yüzde 19'u kadar dışarı, yüzde 15'i kadar da içeri doğru yönelmiş olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.9b).



Şekil 5.9. (a) Alüminyum tüpün statik tork-dönme açısı grafiği (b) deney sonrası burkulmuş tüpe ait kesit görünümü.

Tüpün cidarında meydana gelen bu durum 45 derecelik düzlemde maksimum kayma gerilmesinin çekme ve basma gerilmesi olarak davranmasıdır. Şekil 5.10'da da görüleceği üzere birim eleman üzerindeki gerilmelerin yönleri ile tüpte meydana gelen deformasyon yönelmesi paralellik göstermektedir.



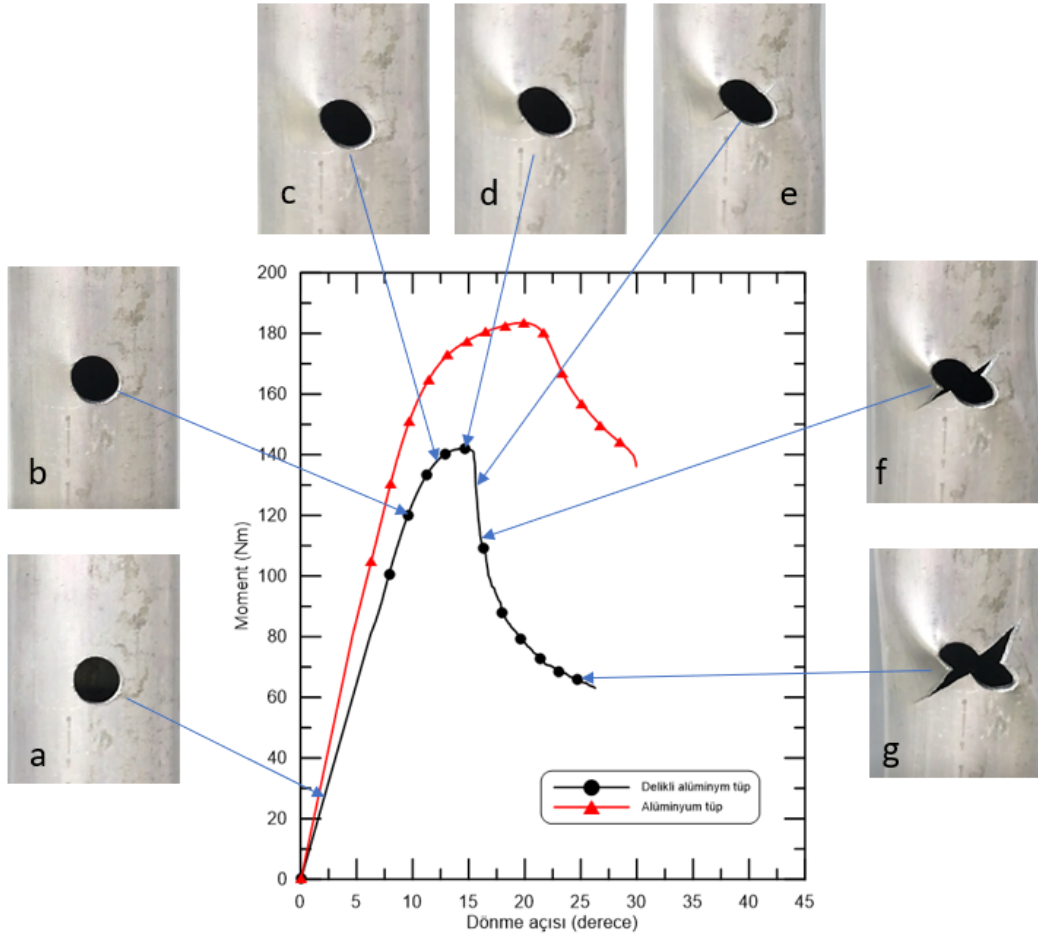
Şekil 5.10. Alüminyum tüp üzerinde gerilmelerin yönlendiği.

5.3.2. Delikli alüminyum tüpün burulma deneyi sonuçları

Cidar kalınlığı boyunca kusurun tanımlanması açısından seçilen 8 mm çaplı deliğin parçanın burulma davranışına olan etkisi Şekil 5.11’de görülmektedir. Yapılan deneylerden, beklendiği üzere, hasar başlangıç noktasının delik cidarı olduğu görülmüştür. Literatür incelendiğinde delik çevresinde oluşan gerilme yığılması değerinin en az 2 mertebesinde olduğu tespit edilmiştir [37].

Şekil 11a-c’de verilen görüntülerde de görüleceği üzere, deliksiz tüpe benzer şekilde cidarda burkulma meydana gelirken, çentik etkisiyle, Şekil 5.11.d ‘de deliğe 45 derece eksende çatlak başlamış ve çatlak bu eksen üzerinde ilerleyerek tüpte yırtılma meydana gelmiştir (Şekil 5.11.e-g). Yırtılma ve burkulma deformasyonlarındaki yönlendirmelerin 45 derecelik eksendeki gerilmelerin etkisinin bir sonucu olduğu anlaşılmıştır. Literatürde delik çevresinde oluşan yorulma hasarlarının incelendiği çalışmalarda da çatlak başlangıcının ve ilerlemesinin tüpte oluşan yırtılma hasarı ile paralel olduğu tespit edilmiştir [38,39].

Şekil 5.12’de deney sonrası tüpün görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.11. Delikli alüminyum tüpe ait moment-açı eğrisi ve numunede oluşan deformasyon.

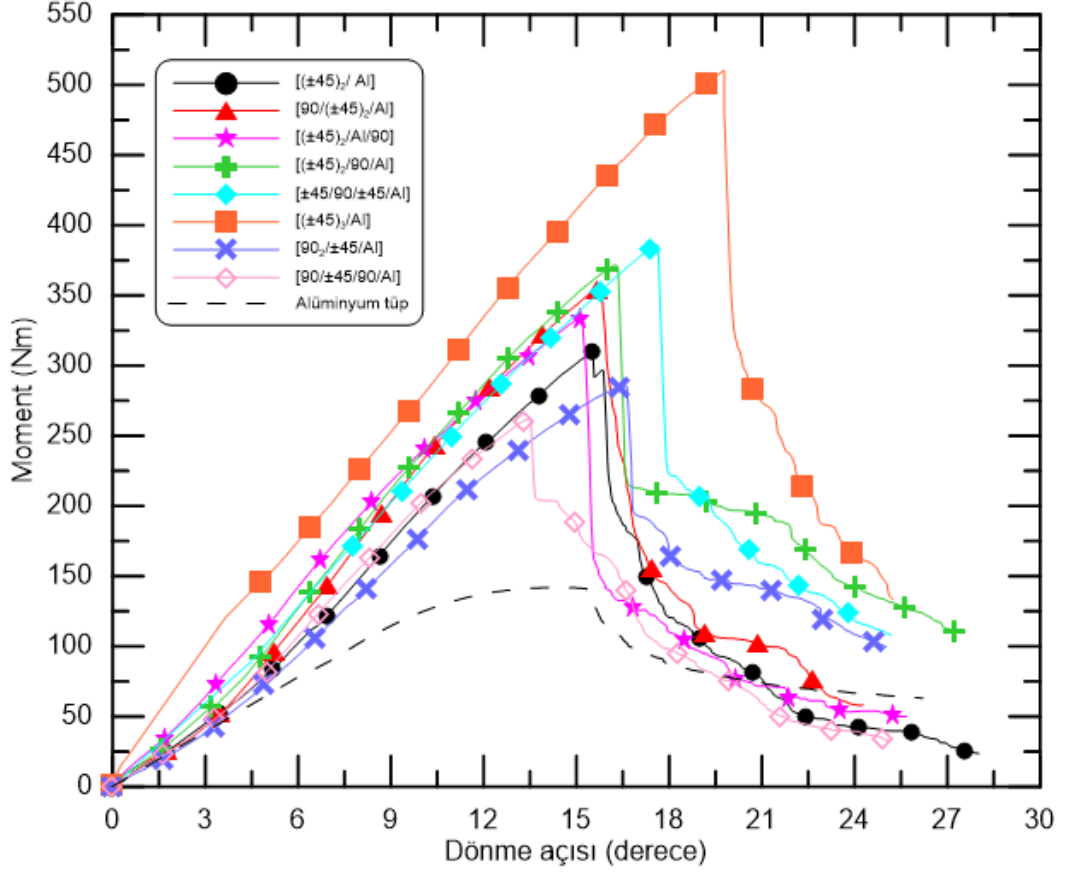


Şekil 5.12. M8 delik delinmiş alüminyum tüpün deney sonrası hali.

5.3.3. Delikli hibrit kompozit tüplerin burulma deneyi sonuçları

Alüminyum tüpün içine ve dışına takviye yapılarak üretilen kompozit tüplerin burulma deney sonuçları Şekil 5.13'te verilmiştir. Grafik incelendiği zaman 45 derecenin tork taşımada en fazla katkıyı verdiği açıkça görülmektedir. Bu açı değeri için artan katman sayısı ile tork taşıma kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuç literatür verileri [4,14] ile örtüşmektedir. Diğer taraftan 90 derece sarım, tork

taşıma kapasitesini 45 derece kadar artırmasa da bulunduğu konuma bağlı olarak yani dizilim sırasına bağlı olarak ilginç neticeler vermektedir.



Şekil 5.13. Delikli kompozit tüplerin burulma deney sonuçları.

(Not: Deney tekrar sayısı üç olmasına rağmen, karışıklığa yol açmaması için davranışı temsil eden eğriler kullanılmıştır.)

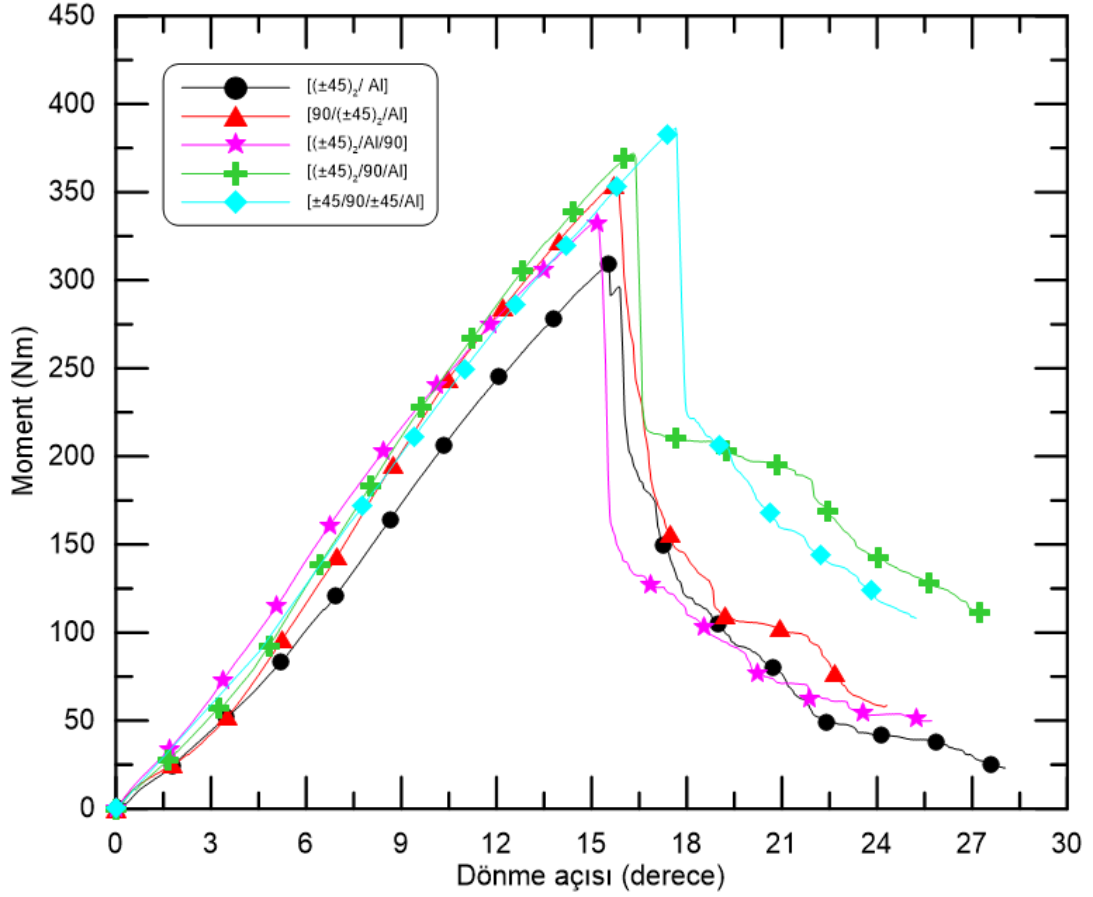
Şekil 5.14'te verilen, 90 derece sarımların etkisinin araştırıldığı kombinasyonlar $[(\pm 45)_2/Al]$, $[90/(\pm 45)_2/Al]$, $[(\pm 45)_2/90/Al]$, $[\pm 45/90/\pm 45/Al]$ ve $[(\pm 45)_2/Al/90]$ incelendiğinde, alüminyum tüpün içine yapılan takviyenin moment iletimi esnasında cidarın içeriye olan hareketini engellediği ve dolayısıyla rijitliğin artmasını sağladığı görülmüştür. İçeriye yapılan takviye, parçanın moment iletim kapasitesine kısmen negatif yönde etki etmektedir. 90 derece sarımın metal tüpün, içine değil de dışına taşınması durumunda $[(\pm 45)_2/90/Al]$ ise, momentin ve rijitliğin içeriden yapılan 90 derece takviyeye göre daha fazla arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun önceki kısımda irdelenen alüminyum tüpün burulma zorlanması altındaki deformasyon davranışı ile ilgili olduğu söylenebilir. Dışarıya olan yönelmenin içeriye nispeten daha fazla olması, tüp üzerine takviye edilen 90 derecenin mekanik özelliklere (moment iletimi,

rijitlik) etkisini daha belirgin hale getirmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda 90 derece takviyenin iletilen moment ve dönme açısını artırdığı örnekler mevcutsa da bu durum yazarlar tarafından önemli görülmemiş ve üretim kaynaklı problemlerin sonucu olarak oluşabileceği raporlanmıştır [13,14]. Benzer şekilde $[(\pm 45)_2/90/Al]$ dizilimi, $[90/(\pm 45)_2/Al]$ dizilimine göre de daha iyi sonuçlar vermiştir, literatürdeki çalışmada alüminyum kompozit hibrit şaftlarda hasarın ilk olarak alüminyum tüpte meydana geldiği belirtilmiştir [13]. Söz konusu bu iki dizilim incelendiğinde 90 derece takviyenin alüminyum tüpün dışına yapıldığı durumda, tüpün hasarlanmasının geciktiği ve böylece iletilen moment değerinin ve rijitliğin arttığı düşünülmektedir.

Öte yandan 90 derecenin en dışta olduğu ($[90/(\pm 45)_2/Al]$) durum, tüpün içerisine yapılan 90 derece takviye ($[(\pm 45)_2/Al/90]$) ile karşılaştırılınca dışa yapılacak 90 derecelik bir takviyenin moment taşıma kabiliyetini daha çok etkilediği görülmüştür. Bunun, muhtemelen şekil değişiminin en fazla olduğu, momentin en yüksek oranda iletildiği dış cidarlardaki hasarlanmanın, 90 derece sarımlı tabakanın altta yer alan kompozit tabakanın bütünlüğünün korunmasına yaptığı katkıdan kaynaklandığı söylenebilir. Literatürde kompozit kirişlerin eğilme davranışının incelendiği çalışmada en dışa yapılan 90 derece takviyenin, yapının bütünlüğünü koruyarak mukavemet özelliklerini artırdığı belirtilmiştir [35].

Bilindiği gibi, kayma şekil değişiminin en fazla olduğu, momentin en yüksek oranda iletildiği dış cidarda hasar oluşumu öncelikli olarak meydana gelmektedir. Yüzeydeki 90 sarımlı tabakanın, momente önemli etkisi olmasa da altta yer alan kompozit tabakanın bütünlüğünün korunmasına yaptığı katkı hasarlanmayı geciktirmekte bu da iletilen moment değerini iyileştirmektedir.

$[\pm 45/90/\pm 45Al]$ kombinasyonu daha ilginç davranış göstermektedir. Bu numunenin gerek çok da düşük olmayan rijitlikle birlikte, gerekse daha yüksek momente sahip olması oldukça dikkat çekicidir. Bu davranışa ait irdeleme, hasar oluşumunun incelendiği takip eden kısımda verilmiştir.

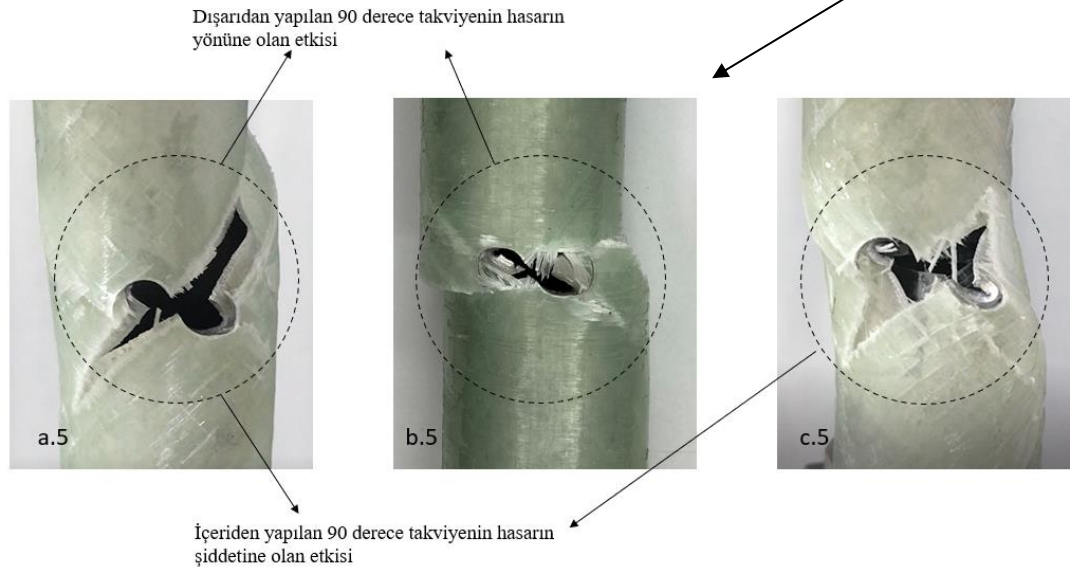
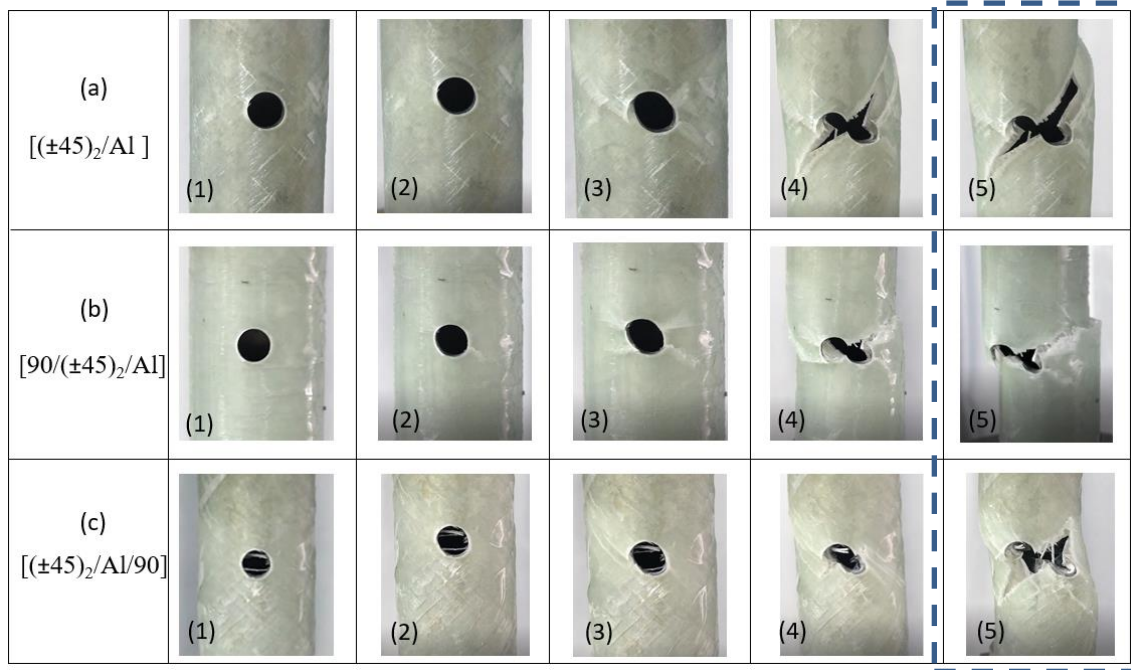


Şekil 5.14. 90 derece katmanların dizilim etkisi.

Şekil 5.15'te numunelerin hasar oluşumu safhaları yaklaşık olarak aynı dönme açısı için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hasar başlangıcı ve ilerleme safhası özellikle 4. ve 5. safhalara ait görüntülerden hasarın katman dizilimiyle irtibatlı olduğunu göstermektedir. Şekil 5.15a'da görüleceği üzere, hasar çatlakın oluşumuna takiben 45 derece sarım boyunca ilerleyerek metal tüp ve kompozit arasında delaminasyon sonucu meydana gelmiştir. Delaminasyon oluşumunda metal tüp ile kompozit yapının kayma modülü değeri arasındaki farklılıkların etkili olduğu (Alüminyum tüp kayma modülü 25,3 GPa, ±45 derece cam fiber kayma modülü 8,35 GPa ve 90 derece için 3,6 GPa'dır) düşünülmektedir. Literatürde [13,16] incelenen çalışmalarda da metal tüp ve kompozit arasında benzer şekilde delaminasyon meydana geldiği görülmüştür.

Şekil 5.15b'de görüleceği üzere 45 derecelerin üzerine sarılan 90 derece Şekil 5.15a.5'te meydana gelen hasarı yavaşlatmış ve hasar ilerleme açısını düşürmüştür. Tüpün içine yerleştirilen 90 derece takviyenin etkisinde ise alüminyum tüpün

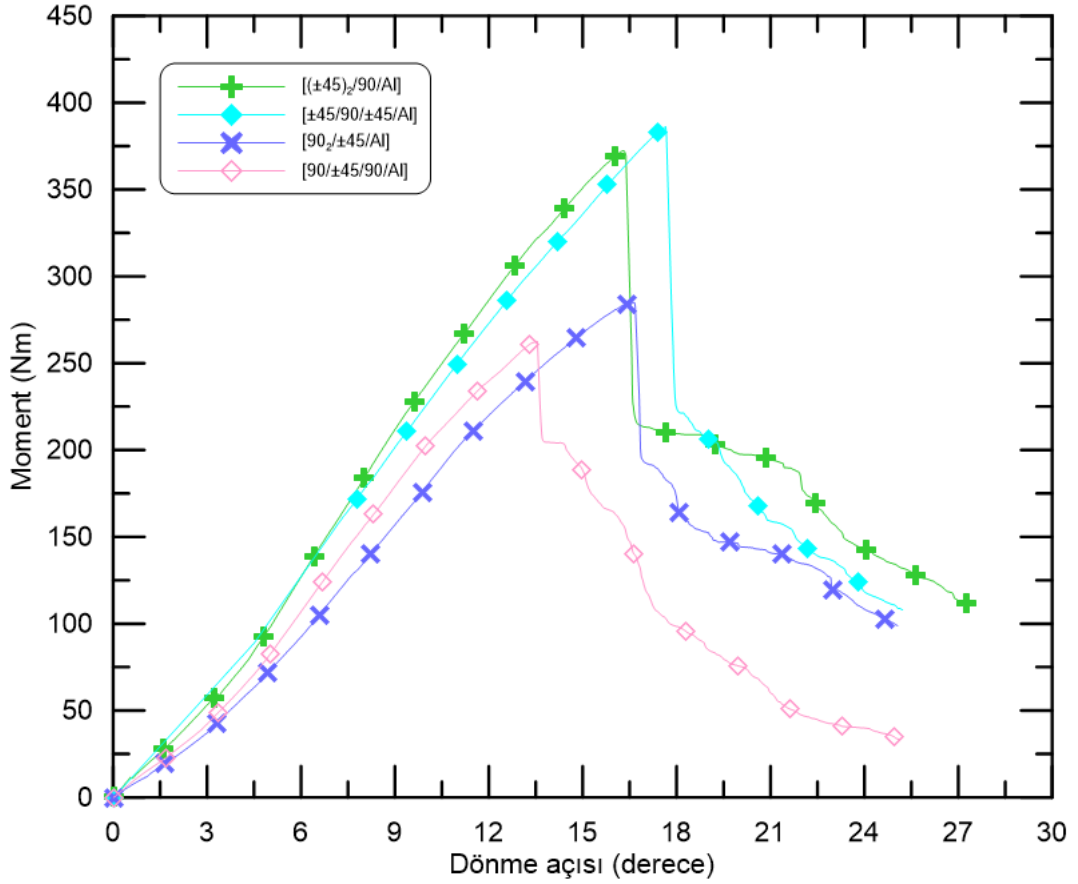
içerisine olan hareket engellendiği için Şekil 5.15a.5'e nazaran alüminyum tüp açıklığının ve delaminasyonun daha az olduğu bir hasar oluşmuştur.



Şekil 5.15. Tüplerde hasarların ilerlemesi.

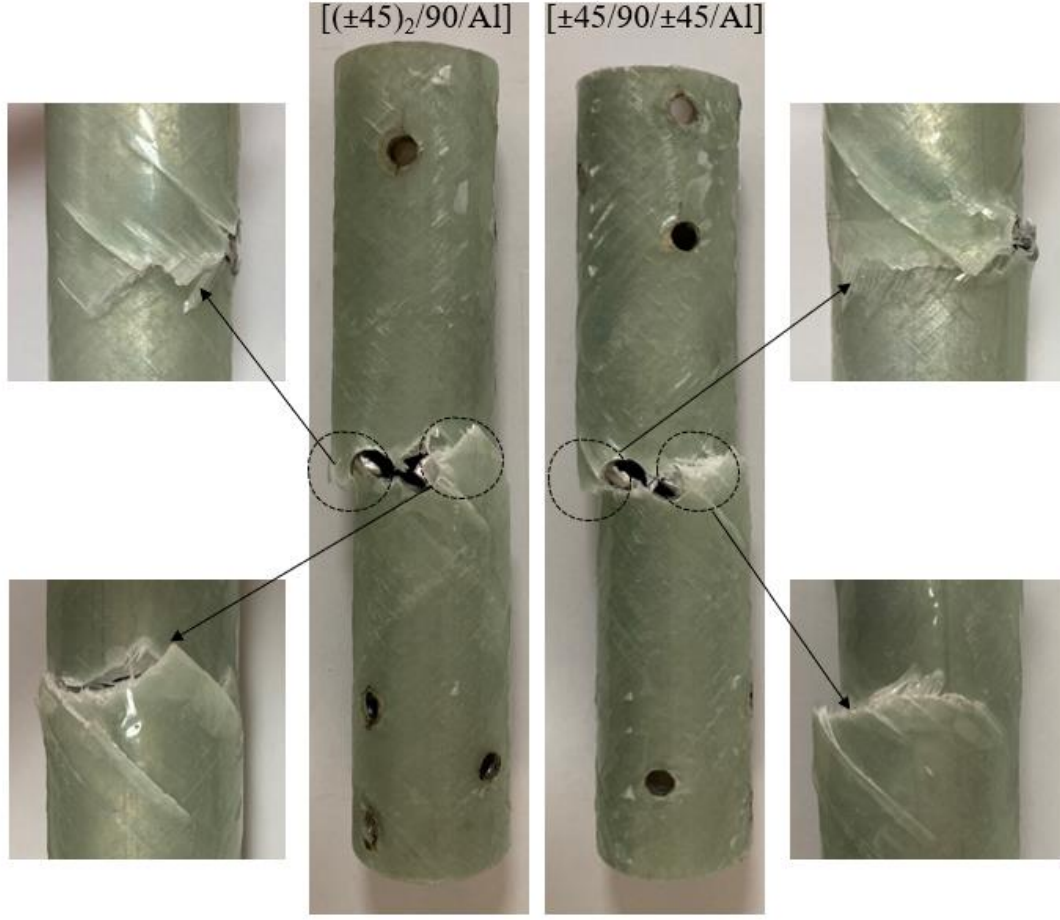
Kompozit malzemelerin mekanik davranışında katmanlar arası açı farkının yapıda oluşturduğu gerilme farklılıklarının (artan açı farkıyla) kompozitin yük taşıma kabiliyetini olumsuz yönde etkilediği özellikle çevrimsel yüklemelerde çatlak başlangıç safhası açısından kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır [10]. Bu durum [90₂/±45/Al] ve [90/±45/90/Al] kombinasyonları incelendiğinde katmanlar arası açı farkının yük taşıma kabiliyetine olan etkisini açıkça göstermektedir (Şekil 5.16). Söz

konusu ilk dizilimde birinci ve ikinci katman arasında açı farkı 0 derece iken ikinci ve üçüncü katman arasındaki açı farkı 45 derecedir. İkinci dizilimde ise birinci, ikinci ve üçüncü katmanlar arasında 45'şer derecelik açı farkları olması mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 5.16. Katmanlar arası açı farkının etkisi.

Ancak $[\pm 45/90/\pm 45/Al]$ ve $[(\pm 45)_2/90/Al]$ iki kombinasyon göz önüne alındığında ikinci kombinasyonun katmanlar arası açı değişimi ilkinde göre daha iyi olmasına rağmen (açı farkları birinci ve ikinci katman arasında 0, ikinci ve üçüncü katman arasında 45 derecedir) ilk kombinasyonun yük taşıma kabiliyetinin daha iyi çıktığı yapılan deneyler sonucunda gözlemlenmiştir. Buradaki farklılığın sebebi 45 derece sarımların arasına yerleştirilen 90 derecelik katmanın çatlak başlangıcının ardından hasarın ilerlemesini ve yönünü değiştirerek kompozitin dayanımını artırdığı tespit edilmiştir (Şekil 5.17).



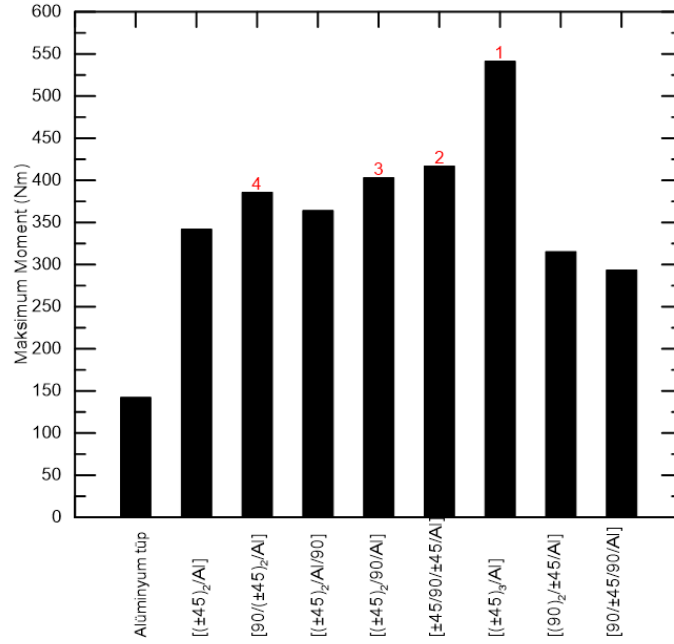
Şekil 5.17. $[(\pm 45)_2/90/Al]$ ve $[(\pm 45/90/\pm 45/Al]$ dizilimleri için hasar ilerlemesi.

Alüminyum hibrit kompozit tüplerin burulma deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri Tablo 5.2’de listelenmiştir.

Tablo 5.2. Deneyler sonucu elde edilen sonuçlar.

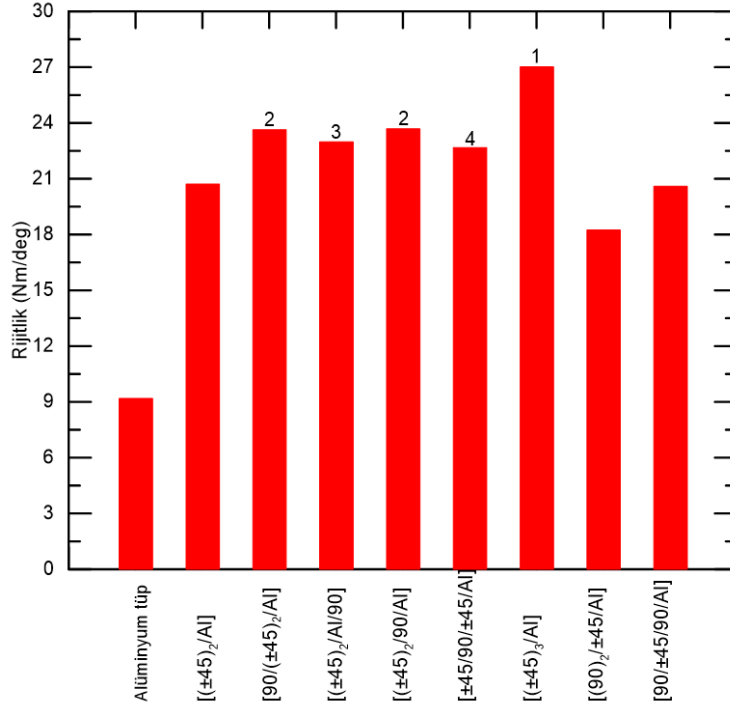
Katman Dizilimi	Maksimum Moment (Nm)	Enerji(kJ)	Ağırlık (gr)	Dönme açısı(derece)	Rijitlik (Nm/derece)	Maks. Moment/Ağırlık (Nm/gr)	Enerji/Ağırlık (kJ/gr)	Rijitlik/Ağırlık
[(±45) ₂ /Al]	309,41	131,03	86,8	15,52	19,92	3,56	1,51	0,229
[90/(±45) ₂ /Al]	353,92	153,18	94,9	15,68	22,57	3,72	1,61	0,237
[(±45) ₂ /Al/90]	333,55	151,12	91,9	15,09	22,09	3,62	1,64	0,24
[(±45) ₂ /90/Al]	372,35	173,36	93,9	16,29	22,85	3,96	1,84	0,243
[±45/90/±45/Al]	386,31	196,85	96,2	17,63	21,9	4,01	2,04	0,227
[(±45) ₃ /Al]	509,7	310,31	105,7	19,8	25,74	4,82	2,93	0,243
[(90) ₂ /±45/Al]	284,96	136,25	84	16,62	17,14	3,39	1,62	0,204
[90/±45/90/Al]	262,71	99,21	84	13,5	19,45	3,12	1,18	0,231
Alüminyum Tüp	141,92	62,06	42,8	14,45	9,82	3,31	1,45	0,229

Tablo incelendiğinde en yüksek moment taşıma değerine ve rijitliğe sahip yapının $[(\pm 45)_3/Al]$ olduğu görülmektedir. İkinci en yüksek değere sahip yapı ise $[\pm 45/90/\pm 45/Al]$ dizilimidir. Ayrıca deney numunelerine ait spesifik rijitlik değerleri incelendiğinde 90 derece sarımların olduğu kombinasyonların $[(\pm 45)_3/Al]$ dizilimiyle hemen hemen aynı sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Numunelere ait maksimum momentlerin katman dizilimleriyle değişimi Şekil 5.18’de verilmiştir.



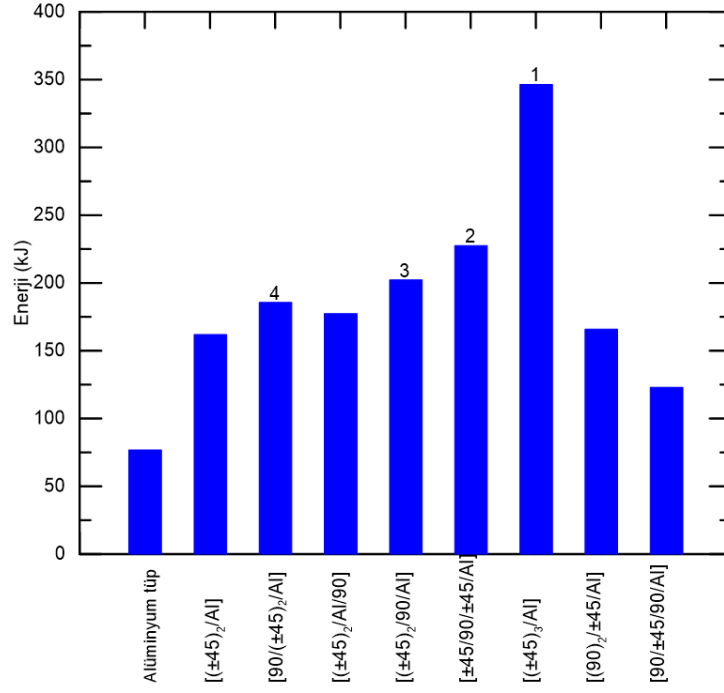
Şekil 5.18. Numunelere ait maksimum moment değerleri.

Katman diziliminin rijitlik değerine (Nm/derece) etkisi açısından sonuçlar irdelendiğinde $[(\pm 45)_2/90/Al]$, $[90/(\pm 45)_2/Al]$ dizilimlerinin hemen hemen aynı değere sahip olduğu ve rijitliğe en yüksek katkıyı verdiği tespit edilmiştir. Bu yapılarından sonra ise alüminyum tüpün içine 90 derece sarımın olduğu yapı görülmektedir (Şekil 5.19). Buradan hareketle kompozit şaft tasarımında hasarın meydana gelmesinin beklendiği kısımların (tüpün içi-dışı ve hibrit şaftlarda alüminyum tüpün dışı) 90 derece ile takviye edilmesinin rijitliği önemli ölçüde etkileyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Rijitlik açısından beklendiği üzere en düşük değerler 90 derece katman sayısının fazla olduğu iki dizilimde görülmüştür.

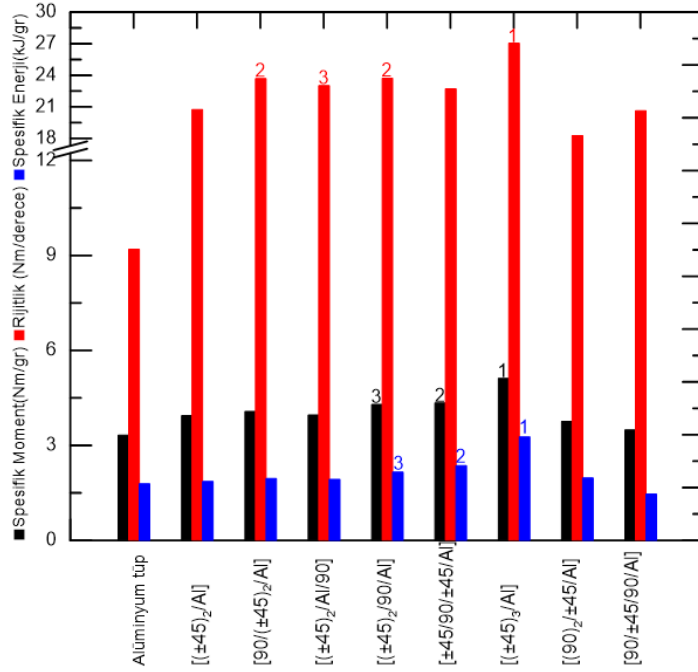


Şekil 5.19. Test edilen numunelerin rijitliklerinin dizilim /katman sayısı kombinasyonları için değişimi.

Moment-açı eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilen enerji değerleri irdelendiğinde rijitliğe benzer şekilde en yüksek sonuçların [(±45)₃/Al] kombinasyonunda olduğu görülmüştür. İkinci en yüksek değere sahip yapının [±45/90/±45Al] olduğu görülmüştür. Bu yapı için hasarlanma durumunun incelendiği bölümde de belirtildiği üzere ara katmandaki 90 derece hasarın yönünü değiştirerek hasarı yavaşlatmış, böylece dönme açısı diğer yapılara göre [(±45)₂/Al], [90/(±45)₂/Al], [(±45)₂/90/Al], ve [(±45)₂/Al/90]) %8-15 aralığında artırmıştır. Numunelere ait enerji değerlerinin katman dizilimleriyle değişimi Şekil 5.20’de verilmiştir. Yapılara ait rijitlik, spesifik moment ve spesifik enerji-dizilim grafikleri Şekil 5.21’de verilmiştir Söz konusu bu üç özellik bakımından grafik incelendiğinde en iyi sonuçları [(±45)₃/Al] yapısının verdiği görülmüştür. [±45/90/±45Al] ve [(±45)₂/90/Al] yapıları spesifik moment ve spesifik enerji açısından diğerlerinden daha iyi sonuçlar verirken, sadece [±45/90/±45Al] diziliminin rijitlik açısından [90/(±45)₂/Al] yapısının gerisinde kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.20. Numunelerin enerji değerlerinin katman dizilimi ile değişimi.



Şekil 5.21. Test edilen numunelerin rijitlik, spesifik moment ve spesifik enerjinin alüminyum için ve farklı dizilim /katman sayısı kombinasyonları için değişimi.

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Genel Sonuçlar

1) Alüminyum tüplerin burulma zorlanması altında 45 derecelik ekseninde cidarda burkulmaya takiben parçanın yük taşıma kabiliyetini kaybettiği belirlenmiştir. Parça üzerinde yapılan ölçümlerden burkulma bölgesindeki cidarın tüp çapının yüzde 25'i kadar dışarı, yüzde 15'i kadar da içeri doğru yönelmiş olduğu tespit edilmiştir.

2) 8 mm çaplı delik bulunan alüminyum tüpte hasar daha düşük momentler altında, oluşum itibariyle, deliksiz tüptekine benzer şekilde 45 derecelik ekseninde cidar burkulması ve hemen sonrasında yırtılmanın meydana geldiği görülmüştür. Kompozit takviyesi yük taşıma kapasitesini 3.6 kat artırmıştır.

3) Moment iletimi üzerinde en etkili sarım açısının 45 derece olduğu görülmüş ve bu açı değeri için artan katman sayısı ile moment iletim kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir. Ancak yapıya 90 derece yönelime sahip katmanların eklenmesi durumunda, dizilim sırasının önemli olduğu görülmüştür. Örneğin $[(\pm 45)_2/90/AI]$ dizilimine sahip yapının taşıdığı moment ve rijitlik değerinin $[90/(\pm 45)_2/AI]$ dizilimine sahip yapıdan daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

4) Alüminyum tüpün içine ve dışına yapılan takviyelerin rijitlik değerini olumlu etkilediği anlaşılmıştır.

5) Kompozitlerin hasarlanmasında katmanlar arası açı farkının ve katman diziliminin etkili olduğu tespit edilmiştir. Örneğin $[\pm 45/90/\pm 45AI]$ dizilimi için ara katmandaki 90 derecenin hasarın ilerleme yönünü değiştirdiği ve bunun sonucu olarak mekanik değerlerde iyileşmelerin meydana geldiği tespit edilmiştir.

6) Kompozit shaft tasarımında 45 derece yönelime sahip katman sayısının ağırlıkta olması gerektiği anlaşılmıştır. Buna ek olarak en iç ve en dış katmanın 90 derece yönelime sahip katmanlardan seçilmesinin olumlu sonuçlar vereceği görülmüştür. Ayrıca katmanlar arası açı farkının önemli olduğu fakat farklı açılara sahip katmanların hasar ilerlemesini yavaşlatma veya hasarın ilerleme yönüne olan etkisinin de göz ardı edilmemesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

6.2. Öneriler

1) Kompozit şaft tasarımında 45 derecenin tork taşıma ve rijitlik üzerindeki etkisi tartışma olmaksızın kabul edilebilirken, 90 derece için henüz böyle bir sonuca ulaşamamıştır, katman diziliminin etkisiyle, 90 derecenin mekanik özellikler üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için daha geniş bir deney seti ile sonlu eleman yönteminden de faydalanılarak araştırma yapılabilir.

2) Üzerinde çentik etkisinin bulunmadığı deney numuneleri üzerinde benzer bir çalışma yapılabilir

KAYNAKLAR

- [1] Rastogi N. (2004) Design of composite driveshafts for automotive applications. *SAE, Technical Paper Series*, 2004-01-0485
- [2] Kaw, A. (2006). *Mechanics of Composite Materials* (2nd ed.). Taylor and Francis Group, CRC Press
- [3] Kim, H. S., Kim B. C., Lim T. S., Lee D.G. (2004). Foreign objects impact damage characteristics of aluminum/composite hybrid drive shaft, *Compos Struct*, 66:377–89
- [4] Badie, M. A., Mahdi E., Hamouda A. M. S. (2011). An investigation into hybrid carbon/glass fiber reinforced epoxy composite automotive drive shaft, *Mater Des.*; 32:1485–500.
- [5] Tariq, M., Nisar, S., Shah, A., Akbar, S., Khan, M.A., Khan S.Z. (2018). Effect of hybrid reinforcement on the performance of filament wound hollow shaft, *Composite Structures*, 184:378-387
- [6] Zhang, G., Zhou, Z., Ding, G., Xie, C., Zhang, J., Hu, Y. (2015). Static property analyses based on finite element method and torsion tests on carbon fibre composite motor drive shaft, *Materials Research Innovations*, 19:sup5, S5-713-S5-717
- [7] Soykok, I.F., Ozcan, A.R., Tas, H. (2019). Evaluation of the failure responses of filament wound and pre-preg wrapped glass fiber/epoxy composite tubes under quasi-static torsional loading, *Mater. Res. Express* 6 (2019) 055307
- [8] Abu Talib, A.R.b, Ali, A., Badie, M.A., Azida, Che Lah N, Golestaneh, A.F. (2010). Developing a hybrid, carbon/glass fiber-reinforced, epoxy composite automotive drive shaft, *Mater Des*, 31:514–21.
- [9] Shokrieh, MM, Hasani, A., Lessard, LB. (2004). Shear buckling of a composite drive shaft under torsion, *Composite Structure*, 64:63 9.
- [10] Watanabe, T., Satomura, K., Kimoto, N., Nakamura, T., Kim, T.S., Hosoi, A., Kawada, H. (2016). Effects of stacking sequence on torsional fatigue properties of CFRP pipes, *Transactions of the JSME*, Vol.82, No.839
- [11] Khalid, Y. A., Mutasher, S.A., Sahari, B.B. and Hamouda, A.M.S. (2007). Bending fatigue behavior of hybrid aluminum/composite drive shafts, *Materials and Design*, 28 329–34
- [12] Mutasher, S.A., Sahari B.B., Hamouda, A.M.S., Sapuan, S.M. (2007). Experimental Study of Bending Fatigue Characteristics of a Hybrid Aluminum/Composite Drive Shaft, *Journal of Composite Materials*, 0021-9983/07/18 2267–22

- [13] Mutasher, S.A., Sahari, B.B., Hamouda, A.M.S., Sapuan S.M. (2007). Static and dynamic characteristics of a hybrid aluminium/composite drive shaft, *J. Materials: Design and Applications*, Proc. IMechE Vol. 221 Part L
- [14] Mutasher, S.A. (2009). Prediction of the torsional strength of the hybrid aluminum/composite drive shaft, *Mater Des.*, 30:215–20
- [15] Cho, D.H., Lee, D.G. (1998). Manufacturing of Co-Cured Composite Aluminum Shafts with Compression during Co-Curing Operation to Reduce Residual Thermal Stresses, *Journal of Composite Materials*, 32: 1221
- [16] Lee, D.G., Kim, J.W., Hwang, H.Y. (2004). Torsional Fatigue Characteristics of Aluminum–Composite Co-cured Shafts with Axial Compressive Preload, *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, No. 9/2004
- [17] Kim, H.S., Lee, D.G. (2005). Optimal design of the press fit joint for a hybrid aluminum/composite drive shaft, *Composite Structures* 70 (2005) 33–47
- [18] Lee, D.G., Kim, H.S., Kim, J. W., Kim, K.J. (2004). Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft, *Composite Structures* 63 (2004) 87–99
- [19] Kim, H.S., Park, S.W., Hwang, H.Y., Lee, D.G. (2006). Effect of the smart cure cycle on the performance of the co-cured aluminum/composite hybrid shaft, *Composite Structures* 75 (2006) 276–288
- [20] Pınar, HE. (2011). *Hibrit Kompozit Kardan Şaftı Tasarım ve Üretimi* [Yüksek Lisans Tezi]. Ege Üniversitesi
- [21] Akkurt, T. (2013). *Ağır Ticari Araçlarda Kardan Şaftına Etkiyen Tork Değerlerinin Araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi
- [22] Tümer, H. (2013). *Karbon ve Cam Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Şaftların Burulma Mukavemeti* [Yüksek Lisans Tezi]. Erciyes Üniversitesi
- [23] Tataroğlu, S. (2015). *Manufacture and Testing of a Composite Driveshaft for Automotive Applications* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi
- [24] Ok, E. (2015). *Otomotiv Uygulamaları için Kompozit Bir Şaftın Analizi ve Optimizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi
- [25] Yıldırım, H. (2016) *Değişik Yüklemelere Maruz Kompozit Millerin Mekanik Davranışlarının Araştırılması* [Doktora Tezi]. Fırat Üniversitesi
- [26] Kahraman, İ. (2017). *Cam, Bazalt ve Karbon Fiber Esaslı Hibrit Kardan Milinin Filament Sarma Tekniği İle Üretimi ve Matematiksel Optimizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. Anadolu Üniversitesi
- [27] Altın, B. (2021). *Düşük CO₂ Salınımı Çerçevesinde Otomobillerde Kompozit Şaft Tasarımı ve İmalatı* [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi
- [28] Gay, D. (2015). *Composite Materials, Design and Applications* (3rd ed.). Taylor and Francis Group, CRC Press
- [29] Aran, A. (1990). *Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler Ders Notları*, İTÜ, Makine Fakültesi
- [30] Callister, W.D. (2008). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (7th ed.). John Wiley & Sons

- [31] Barbero, E.J. (2018). *Introduction to Composite Materials Desing*(3rd ed.). Taylor and Francis Group,CRC Press.
- [32] Mallick, P.K. (2017). *Processing of Polymer Matrix Composites*, Taylor and Francis Group
- [33] Ekşi, S. (2013). *Dairesel Kesitli Kompozit Tüp Kirişlerin Eğme ve Burkulma Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi
- [34] Chomtid, T. (2011). *Analysis of Laminated Tubular Structure Under Torsion* [Yüksek Lisans Tezi]. The University of Texas Arlington
- [35] Ayhan A.O., Genel, K., Ekşi S. (2012). Simulation of nonlinear behavior and geometric sensitivities for tubular beams with fixed supports. *Thin-Walled Structures*, 51:1-9
- [36] Sevkat E., Tumer H., Kelestemur M.H., Dogan, S. (2014). Effect of torsional strain-rate and lay-up sequences on the performance of hybrid composite shafts. *Materials and Desing*, 60:310-319
- [37] Budynas, R.G.,Nisbett, J.K.(2015). *Mechanical Engineering Design* (10th ed.), Mc GrawHill
- [38] Fatemi, A., Gates, N., Soice, D.F., Phan, N. (2014). Fatigue crack growth behaviour of tubular aluminium specimens with a circular hole under axial and torsional loadings. *Engineering Fracture Mechanics*,123:137-147
- [39] Chaves, V., Beretta G., Balbin, J.A., Navarro, A. (2019). Fatigue life and crack growth direction in 7075-T6 aluminium alloy specimens with a circular hole under biaxial loading. *International Journal of Fatigue*,125:222-236
- [40] Ryatt, J. (2016). *Prediction of the onset of damage in uni-directional lamainates under transverse impact loading using finite element analysis* [Yüksek Lisans Tezi]. University of Washington

EKLER

EK A. MATLAB Hesaplama Örneği

EKA

```
%[0]10 yapı için gerilme, gerinim ve modül hesapları
%Cam fiber malzeme özellikleri
E1c=45e9; E2c=12e9; nu12c=0.19; G12c=5.5e9;
nu21c=nu12c*E2c/E1c;
%Kompozit tüp için dönüştürülmüş indirgenmiş rijitlik matrisinin
%hesaplanması
Q11=E1c/(1-nu21c*nu12c);
Q12=(nu12c*E2c)/(1-nu21c*nu12c);
Q22=E2c/(1-nu21c*nu12c);
Q66=G12c;
Q_C=[Q11 Q12 0;Q12 Q22 0;0 0 Q66];

% 0 derece tabaka için;
c1=cosd(0);
s1=sind(0);
T1=[c1^2 s1^2 2*s1*c1;s1^2 c1^2 -2*s1*c1;-s1*c1 s1*c1 c1^2-s1^2];

Q_11=(Q11*c1^4)+2*(Q12+2*Q66)*s1^2*c1^2+(Q22*s1^4);
Q_12=(Q11+Q22-4*Q66)*s1^2*c1^2+Q12*(s1^4+c1^4);
Q_22=(Q11*s1^4)+2*(Q12+2*Q66)*s1^2*c1^2+Q22*c1^4;
Q_16=(Q11-Q12-2*Q66)*s1*c1^3+(Q12-Q22+2*Q66)*s1^3*c1;
Q_26=(Q11-Q12-2*Q66)*s1^3*c1+(Q12-Q22+2*Q66)*s1*c1^3;
Q_66=(Q11+Q22-2*Q12-2*Q66)*s1^2*c1^2+Q66*(s1^4+c1^4);
Q_0=[Q_11 Q_12 Q_16;Q_12 Q_22 Q_26;Q_16 Q_26 Q_66];

t=0.25e-3;

% tabakaların orta noktaları;
z1=-4.5*t; z2=-3.5*t; z3=-2.5*t-3; z4=-1.5*t z5=-0.5*t; z6=0.5*t;
z7=1.5*t;
z8=2.5*t; z9=3.5*t z10=4.5*t;

% tabakaların üst noktaları;
h0=-5*t; h1=-4*t; h2=-3*t; h3=-2*t h4=-t; h5=0; h6=t; h7=2*t;
h8=3*t; h9=4*t; h10=5*t;

T=; % uygulanan tork ... Nm
rd=; ri=; rort=(rd+ri)/2;
```

%Uzama-kısalma, Bağlantı ve Eğilme rijitlik matrisleri

```
A=Q_0*t+Q_0*t+Q_0*t+Q_0*t+Q_0*t+Q_0*t+Q_0*t+Q_0*t+Q_0*t+Q_0*t;
B=0.5*Q_0*(h1^2-h0^2)+0.5*Q_0*(h2^2-h1^2)+0.5*Q_0*(h3^2-
h2^2)+0.5*Q_0*(h4^2-h3^2)+0.5*Q_0*(h5^2-h4^2)+0.5*Q_0*(h6^2-
h5^2)+0.5*Q_0*(h7^2-h6^2)+0.5*Q_0*(h8^2-h7^2)+0.5*Q_0*(h9^2-
h8^2)+0.5*Q_0*(h10^2-h9^2);
D=Q_0*(t*z1^2+t^3/12)+Q_0*(t*z2^2+t^3/12)+Q_0*(t*z3^2+t^3/12)+Q_0*(t
*z4^2+t^3/12)+Q_0*(t*z5^2+t^3/12)+Q_0*(t*z6^2+t^3/12)+Q_0*(t*z7^2+t^
3/12)+Q_0*(t*z8^2+t^3/12)+Q_0*(t*z9^2+t^3/12)+Q_0*(t*z10^2+t^3/12);
```

```
ABD=[A(1,1) A(1,2) A(1,3) B(1,1) B(1,2) B(1,3)
      A(1,2) A(2,2) A(2,3) B(1,2) B(2,2) B(2,3)
      A(1,3) A(2,3) A(3,3) B(1,3) B(2,3) B(3,3)
      B(1,1) B(1,2) B(1,3) D(1,1) D(1,2) D(1,3)
      B(1,2) B(2,2) B(2,3) D(1,2) D(2,2) D(2,3)
      B(1,3) B(2,3) B(3,3) D(1,3) D(2,3) D(3,3)];
```

```
Nxy=T/(2*pi*rort^2); %birimi N/m
```

```
N=[0 0 Nxy 0 0 0]';
```

```
X=inv(ABD);
```

```
%sekilegrilik=[epsilonx0 epsilony0 toxy0 kappax kappay kappaxy]'
```

```
sekilegrilik=X*N;
```

```
epsilonx=sekilegrilik(1,1);
```

```
epsilony=sekilegrilik(2,1);
```

```
gamaxy=sekilegrilik(3,1);
```

```
kappax=sekilegrilik(4,1);
```

```
kappay=sekilegrilik(5,1);
```

```
kappaxy=sekilegrilik(6,1);
```

```
Z=[epsilonx epsilony gamaxy]';
```

```
W=[kappax kappay kappaxy]';
```

```
%1
```

```
strain_kat1_alt=Z+(h10)*W;
```

```
stress_kat1_alt=Q_0*strain_kat1_alt;
```

```
strain_kat1_ust=Z+(h9)*W;
```

```
strain_kat1_ust_lokal=T1*strain_kat1_ust;
```

```
stress_kat1_ust=Q_0*strain_kat1_ust
```

```
stress_kat1_ust_lokal=T1*stress_kat1_ust
```

```
%2
```

```

strain_kat2_alt=Z+(h9)*W;
stress_kat2_alt=Q_0*strain_kat2_alt;

strain_kat2_ust=Z+(h8)*W;
strain_kat2_ust_lokal=T1*strain_kat2_ust;
stress_kat2_ust=Q_0*strain_kat2_ust
stress_kat2_ust_lokal=T1*stress_kat2_ust

```

```

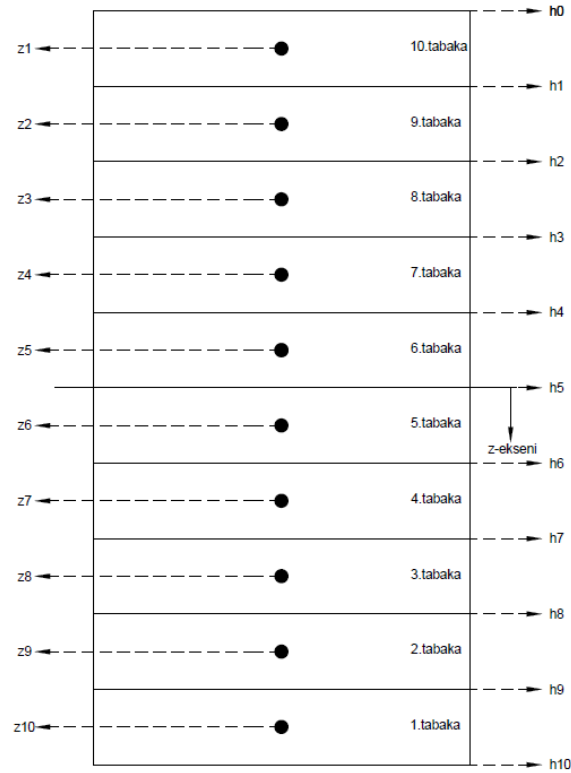
%Modüllerin hesaplanması
h=10*t ; %toplam laminat kalınlığı
Aters=inv(A);

```

```

Ex=1/(h*Aters(1,1))
Ey=1/(h*Aters(2,2))
Gxy=1/(h*Aters(3,3))

```



Şekil A.1. 10 tabakalı kompozit yapının şematik gösterimi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mustafa Said OKUTAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** : Devam ediyor, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Tasarım ve İmalat Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2020-Halen Sakarya Üniversitesinde, Araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Okutan MS., Genel K. (2021,18-20, Kasım). Investigation of Torsional Performance of Carbon Fiber Composite Driveshaft with Different Stacking Sequence and Fiber Orientation. *International Conference on Engineering Technologies*, Konya, Turkey