



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KARBON KOMPOZİT TÜPLERDE İÇ BASINÇ
ALTINDA YÜZEY ŞEKİL DEĞİŞTİRME
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

OKAN KILINÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Şubat – 2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

OKAN KILINÇ tarafından hazırlanan “ **Karbon Kompozit Tüplerde İç Basınç Altında Yüzey Şekil Değişirme Davranışlarının İncelenmesi**” adlı tez çalışması 15.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr Hüseyin ARIKAN

Danışman

Dr. Öğr.Üyesi Mehmet KAYRICI

Üye

Doç. Dr. Murat MAYDA

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Bilimsel araştırma projeleri tarafından 201331002 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Okan KILINÇ
15.02.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON KOMPOZİT TÜPLERDE İÇ BASINÇ ALTINDA YÜZEY ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Okan KILINÇ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

Şubat 2022, 95 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

Prof. Dr Hüseyin ARIKAN

Doç. Dr. Murat MAYDA

Kompozit malzemelerin kullanımının her geçen gün yaygınlaşması ile birlikte basınçlı kapların üretiminde de yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Basınçlı kapların hem hafif hem de dayanıklı olabilmesi için kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde ve dalgıç tüpleri ve denizaltı hava tüpleri gibi alanlarda kullanılan basınçlı kaplarda hafiflik ve dayanıklılık çok önemlidir. Uygulamalarda daha hafif ve daha çok dayanıma sahip basınçlı kaplar üretebilmek için çeşitli katkı maddeleri ile farklı üretimler yapılmaya çalışılmaktadır. Bu tezin amacı; filaman sarım tekniği ile üretilmiş farklı karbon nanotüp katkı oranlarına sahip karbon kompozit tüplerde iç basınç altında yüzey şekil değiştirme davranışlarının incelenmesi ve karbon nanotüp katkı oranlarının eksenel, radyal ve kayma gerilmelerine etkisinin araştırılmasıdır. Bu tez kapsamında plastik lineer kullanılarak farklı karbon nanotüp katkı oranlarında üçer adet numune üretilmiş ve bu numuneler iç basınç altında test edilerek, yüzey şekil değiştirme davranışları incelenmiştir. Karbon nanotüp oranının yüzey şekil değişimine etkisinin araştırılması amacıyla bu oranlar %0, %1 ve %3 olarak uygulanmıştır. Tüm numuneler filaman sarım tekniği ile $\pm 55^\circ$ sarım açılı olarak üretilmiştir. Çalışma da karbon nanotüp katkının yüzeydeki eksenel, radyal ve kayma gerilmelerine etkisi karşılaştırılacaktır. Yapılan deneysel çalışmalarda şekil değişimleri gözlemlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Çalışma sonucunda plastik liner kullanımının basınç dayanımına katkısı, sarım kolaylığı, rijitliği ve korozyon dayanımı sağladığı tespit edilmiştir, karbon nanotüp katkısının basınçlı kaplarda dayanımı arttırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karbon Nanotüp, Karbon Kompozit Tüp, Filaman Sarım, Plastik Liner

ABSTRACT

MS THESIS

**INVESTIGATION OF SURFACE SHIFT BEHAVIOR UNDER INTERNAL
PRESSURE IN CARBON COMPOSITE TUBES**

OKAN KILINÇ

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

Advisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet KAYRICI

2022, 95 Sayfa

Jury

Asst. Prof. Dr. Mehmet KAYRICI

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Assoc. Prof. Dr. Murat MAYDA

With the widespread use of composite materials, composite materials have started to be used in the production of pressure vessels. Composite materials are preferred for pressure vessels to be both light and durable. Lightness and durability are very important in pressure vessels used especially in the space and aviation industry and in areas such as diver boats. In applications, different productions are made with various additives in order to produce pressure vessels that are lighter and more durable. The aim of this thesis; The aim of this study is to investigate the surface deformation behavior of carbon composite tubes with different carbon nanotube additive ratios produced by filament winding technique and to investigate the effects of carbon nanotube additive ratios on axial, circumferential and shear stresses. Within the scope of this thesis, three samples with different carbon nanotube additive ratios were produced and these samples were tested under internal pressure and their surface shape changing behavior was investigated. In order to investigate the effect of carbon nanotube ratio on the surface shape change, these ratios were applied as 0%, 1% and 3%. All samples were produced with filament winding technique with a winding angle of $\pm 55^\circ$. In the study, the effect of carbon nanotube additive on the axial, circumferential and shear stresses on the surface will be compared. In experimental studies, changes in shape were observed and recorded. As a result of the study, it was determined that the carbon nanotube additive increased the strength.

Keywords: Carbon Nanotube, Carbon Composite Tube, Filament Winding, Plastic Liner

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, iki yıl boyunca değerli bilgilerini bizlerle paylaşan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam; Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI, çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Sefa Ceyhan'a ve çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli eşim Büşra KILINÇ ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Okan KILINÇ
KONYA – 2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER.....	x
ÇİZELGELER.....	xiii
KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kompozit Malzemeler.....	1
1.2. Kompozit Malzemelerin Yapısal Sınıflandırılması	2
1.2.1. Yapılarına göre sınıflandırma	2
1.2.1.1. Plastik kompozitler	2
1.2.1.2. Polimer kompozitler	3
1.2.1.3. Metal Matrisli Kompozitler	3
1.2.1.4. Seramik kompozitler	4
1.2.2. Yapılarını oluşturan bileşenlerin şekillerine göre sınıflandırma.....	4
1.2.2.1. Partikül	4
1.2.2.2. Lamel.....	4
1.2.2.3. Fiber.....	4
1.2.2.4. Dolgu	5
1.2.2.5. Tabaka	6
1.3. Kompozitlerin Temel Yapıları	6
1.3.1. Matris yapıları.....	6
1.3.2. Reçine yapıları	7
1.3.2.1. Epoksi reçine	7
1.3.2.2. Polyester	7
1.3.2.3. Üretan	7
1.3.2.4. Fenolik.....	8
1.3.3. Elyaf ve özellikleri.....	8
1.3.3.1. Cam elyaf.....	9
1.3.3.2. Karbon elyaf	10
1.3.3.3. Bor elyaf	10
1.3.3.4. Silisyum karbür	10
1.3.3.5. Alümina	11
1.3.3.6. Grafit elyaf.....	11
1.3.3.7. Aramid elyaf.....	11
1.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	13
1.4.1. Manuel dispersiyon yöntemi.....	13

1.4.2.	Sürekli kalıplama	13
1.4.2.1.	Devamlı kalıplama.....	14
1.4.2.2.	Profil çekme.....	14
1.4.3.	Sprey yöntemi	15
1.4.4.	Filaman sarma yöntemi.....	15
1.4.5.	Santrifüj döküm yöntemi	16
1.4.6.	Torbalama döküm yöntemi.....	16
1.5.	Lamine Kompozit Malzemeler	16
1.6.	Kompozit malzemelerin mekanik davranışları	17
1.6.1.	İzotropik tabakalı kompozitler.....	17
1.6.2.	Ortotropik tabakalı kompozitler.....	18
1.7.	Filaman Sarma Yöntemi	18
1.7.1.	Sarım yöntemleri.....	23
1.7.2.	Sarım çeşitleri	23
1.7.2.1.	Kutupsal.....	24
1.7.2.2.	Çevresel	24
1.7.2.3.	Helisel.....	25
1.7.3.	Filaman sarım makinesine ait elemanlar	25
1.7.4.	Uygulama alanları.....	27
1.7.4.1.	CNG tankları	27
2.	LİTTERATÜR TARAMASI	33
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1.	Karbon Elyaf	39
3.2.	Karbon Lifinin Özellikleri.....	39
3.3.	Reçine.....	41
3.4.	Karbon Nanotüpler (KNT).....	41
3.4.1.	Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri	43
3.4.2.	Karbon nanotüplerin elektriksel özellikleri	44
3.4.3.	Karbon nanotüplerin ısıl özellikleri.....	44
3.4.4.	Karbon nanotüplerin uygulama alanları	45
3.5.	Basınçlı Kapların Üretilmesi.....	46
3.6.	Deney Düzenegi	48
3.7.	İç Basınç Altında Yüzey Şekil Değişimlerinin İncelenmesi.....	51
3.8.	İnce Cidarlı Silindirik Basınçlı Kaplardaki Gerilmeler	51
3.8.1.	Tek eksenli gerilim durumu.....	53
3.8.2.	İzotropik gerilim durumu.....	53
3.8.3.	İki eksenli gerilim durumu.....	54
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	57
4.1.	Parametre 1, Karbon Nanosuz Basınçlı Kapların İç Basınç Altında Gerilim Deney Sonuçları.....	57

4.2. Parametre 2, Karbon Nanotüp Oranı %1 İç Basınç Yüzey Şekil Değişim	
Deney Sonuçları.....	64
4.3. Parametre 3, Karbon Nanotüp Oranı %3 İç Basınç Yüzey Şekil Değişim	
Deney Sonuçları.....	69
4.4. Deney Sonuçları ve Karşılaştırmalar	74
4.4.1. Numunelerin Eksenel Gerinimlerinin Karşılaştırılması	74
4.4.2. Numunelerin radyal gerinimlerinin karşılaştırılması.....	75
4.4.3. Numunelerin radyal gerinimlerinin karşılaştırılması.....	76
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ	81



ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Farklı fiber yönelimlerinin gösterimi (Vatangül, 2008)	5
Şekil 1.2. Elyaf dokuma çeşitleri (McCauley, 2022).....	9
Şekil 1.3. Elyaf yapılarının ve matris malzemelerinin gerilme ve uzamaları (Vatangül, 2008)	12
Şekil 1.4. Oluklu levha (Anonim, BİTÜM EMDİRİLMİŞ ONDÜLE LEVHA UYGULAMASI, 2018)	14
Şekil 1.5. Sprey yönteminde kullanılan ekipmanın şematize edilmiş görseli (Arıkan, 2012)	15
Şekil 1.6. Lamine kompozit malzemelerde elyaf yapılarının matris malzemesindeki durumu (Arıkan, 2012)	16
Şekil 1.7. Kompozit malzemelerde üç boyutlu gerilme sistemi (Anonim, Tensör, 2021)	18
Şekil 1.8. Filaman sarım makinesinin şematize edilmiş görseli (Atagün, 2017).....	20
Şekil 1.9. Filaman sarım makinesine ait tüm bileşenlerin dizilimi şematize edilmiş görseli (Atagün, 2017)	21
Şekil 1.10. Filament sarım makinesinin hareket eksenleri	22
Şekil 1.11. Kutupsal sarım yönteminin şematize edilmiş görseli	24
Şekil 1.12. Çevresel sarım yönteminin şematize edilmiş görseli	24
Şekil 1.13. Helisel sarım yönteminin şematize edilmiş görseli	25
Şekil 1.14. Filaman sarım makinesindeki üç farklı gergi düzeneği (Atagün, 2017) ..	26
Şekil 1.15. Örnek bir filaman sarım makinesi görseli (Atagün, 2017).....	27
Şekil 1.16. CNG tank tip 1 görseli.....	28
Şekil 1.17. CNG tank tip 2 görseli.....	28
Şekil 1.18. CNG tank tip 3 görseli.....	29
Şekil 1.19. CNG tank tip 4 görseli.....	29
Şekil 1.20. CNG tank tip 5 görseli.....	30
Şekil 1.21. Çelik tankın patlaması sonucu aracın görüntüsü (Atagün, 2017).....	31
Şekil 1.22. CNG tankının patlaması sonucunda araçta meydana gelen hasarı gösterir görsel (Atagün, 2017)	31
Şekil 1.23. CNG tanklarının çalışma ve patlama basınçlarını gösterir grafik (Atagün, 2017)	32
Şekil 3.1. Karbon elyaf ip 24K	40

Şekil 3.2. Grafin tabakası (Örs, 2009)	42
Şekil 3.3. Karbon nanotüp (Örs, 2009).....	42
Şekil 3.4. Kullanılan nanotüp, reçine ve sertleştirici ambalaj görüntüleri.....	46
Şekil 3.5. Sarım öncesi makineye bağlanmış basınçlı kabın (liner)görüntüsü	47
Şekil 3.6. Üretilen numunenin yüzey düzeltme işlemi	47
Şekil 3.7. CEA-06-062UR-120/P2 kodlu rozet şeması	49
Şekil 3.8. Deney düzeneği	50
Şekil 3.9. İnce cidarlı silindirik kap çevresel ve eksenel gerilmeler.....	51
Şekil 3.10. Tek eksenli gerilme şeması.....	53
Şekil 3.11: İzotropik gerilme şeması	53
Şekil 3.12. İki eksenli gerilme şeması	55
Şekil 4.1. Deney düzeneği	58
Şekil 4.2. Parametre 1 anlık sonuçların alındığı ekran görüntüsü	58
Şekil 4.3. Parametre 1 gerilme/gerinim grafiği.....	59
Şekil 4.4. Parametre 1 deney sonrası numune görüntüsü	60
Şekil 4.5. Parametre 1 deney sonrası numune görüntüsü 2	60
Şekil 4.6. Parametre 1 kesit görüntüsü 1	61
Şekil 4.7. Parametre 1 kesit görüntüsü 2	61
Şekil 4.8. Parametre 1 kesit mikroskop görüntüsü 1	62
Şekil 4.9. Parametre 1 kesit mikroskop görüntüsü 2	62
Şekil 4.10. Parametre 1 kesit mikroskop görüntüsü 3	63
Şekil 4.11. Parametre 1 kesit mikroskop görüntüsü 4	63
Şekil 4.12. Parametre 2 anlık sonuçların alındığı ekran görüntüsü	64
Şekil 4.13. Parametre 2 gerilme/gerinim grafiği.....	65
Şekil 4.14. Parametre 2 deney sonrası numune görüntüsü	66
Şekil 4.15. Parametre 2 deney sonrası numune görüntüsü 2	66
Şekil 4.16. Parametre 2 kesit görüntüsü 1	67
Şekil 4.17. Parametre 2 kesit görüntüsü 2	67
Şekil 4.18. Parametre 2 kesit mikroskop görüntüsü 1	68
Şekil 4.19. Parametre 2 kesit mikroskop görüntüsü 2	68
Şekil 4.20. Parametre 2 kesit mikroskop görüntüsü 3	69
Şekil 4.21. Parametre 2 kesit mikroskop görüntüsü 4	69
Şekil 4.22. Parametre 3 anlık sonuçların alındığı ekran görüntüsü	70
Şekil 4.23. Parametre 3 gerilme/gerinim grafiği.....	71

Şekil 4.24. Parametre 3 deney öncesi numune görüntüsü	71
Şekil 4.25. Parametre 3 kesit görüntüsü 1	72
Şekil 4.26. Parametre 3 kesit görüntüsü 2	72
Şekil 4.27. Parametre 3 kesit mikroskop görüntüsü 1	73
Şekil 4.28. Parametre 3 kesit mikroskop görüntüsü 2	73
Şekil 4.29. Parametre 3 kesit mikroskop görüntüsü 3	74
Şekil 4.30. Parametre 3 kesit mikroskop görüntüsü 4	74
Şekil 4.32. Numunelerin radyal gerinimleri	76
Şekil 4.33. Numunelerin kayma gerinimleri.....	76



ÇİZELGELER

Çizelge 3.1. 24 K tipi karbon elyaf ip teknik özellikleri	40
Çizelge 3.3. Sertleştirici H160 teknik özellikleri	41
Çizelge 3.4. Karbon nanotüplerin teknik özellikleri.....	45
Çizelge 3.5. Manuel yağ pompası teknik özellikleri	48
Çizelge 3.6. Genel amaçlı yapıştırıcı teknik özellikleri.....	49
Çizelge 4.1. Parametre çizelgeleri	57



KISALTMALAR

°C	Santigrat derece
Al	Alüminyum
O	Oksijen
g	Gram
cm	Santimetre
MPa	Mega Pascal
mm	milimetre
σ	Gerilme (MPa)
CNG	Sıvılaştırılmış doğalgaz
kg	kilogram



1. GİRİŞ

1.1. Kompozit Malzemeler

Teknolojik gelişimin en büyük engeli, malzeme biliminin teknolojik gelişmelere ayak uyduramaması olmuştur. Bir başka açıdan malzeme bilimi, teknolojik gelişmelerin temelidir. Malzeme bilimindeki ilerlemeler ve yeni keşifler, tarih boyunca her zaman teknolojik gelişmelere yol açmıştır.

Teknolojinin günümüzdeki önemi göz önüne alındığında, malzeme bilimi en azından teknolojik bir yenilik olarak önemlidir. Bundan dolayı malzeme biliminde kendi içinde farklı endüstrileri temsil edecek alt sektörler oluşturmaktadır. Bu alt sektörler örnek olarak metaller, metal olmayanlar, kimyasallar, organik ve inorganik maddeler, polimerler vb. verilebilir. Ancak kompozitler modern teknolojiye bu alt sektörlerin en önemlisidir. Kompozitler yeni bir malzeme bilimi olarak ilk defa II. Dünya Savaşı sırasında ortaya çıkmıştır. O zamandan beri kompozitler bir uygulama alanı olarak teknolojiye geniş kullanım alanı bulmuş ve bunlar havacılık, otomotiv ve tekstil gibi lokomotif endüstrisinde sıklıkla kullanılan ve bu kullanımlara uygun olarak sürekli gelişen malzemelerdir.

Genel olarak kompozitler, makro düzeyde farklı kimyasal ve farklı fiziksel özelliklere sahip ikiden fazla maddenin bir araya gelmesiyle oluşan en yüksek özelliklere sahip malzemelerdir. Kompozit malzemenin üretilen parçalar tasarlanırken parçanın hangi alanda kullanılacağı ve uygulamanın özel ihtiyaçlarının neler olduğunun bilinmesi gerekir. Planlama yapılırken hammadde özellikleri, çevre koşulları, üretim yöntemleri gibi faktörlerle birlikte maliyet de değerlendirilmelidir. Kompozit malzeme tasarımındaki en büyük zorluklardan biri, kompozit malzemenin izotropik özellikler göstermemesidir. Bu nedenle yapıyı üreten kişi, kompozit malzemenin her tarafına ne kadar yük bineceğini ve ne kadar dayanım gerekeceğini hesaplamalı ve buna göre liflerin konumunu yerine getirmelidir.

Matris malzemesi plastik deformasyona geçiş sırasında oluşabilecek çatlakların yayılmasını engeller ve kompozit malzemenin tahribatını engeller. Matris malzemesinin bir diğer amacı, lifli malzemeyi yük altında bir arada tutmak ve yükü lifler arasında eşit olarak dağıtmaktır. Böylece, lifli malzemelerin plastik deformasyonuna neden olan kuvvetler uygulandığında meydana gelebilecek bir çatlakın yayılma zamanını

uzayacaktır. Matris olarak çeşitli metal alaşımları kullanılabilir, reçine matrisleri daha sık kullanılır.

Üretilen bir malzemenin kompozit malzeme tanımına uygun olabilmesi için belirli özellikleri taşıması gerekir. Bunlar;

Çeşitli yöntemlerle üretilmelidir. (kemik, doğal olarak var olan ağaç vb. kompozit yapılar hariç)

İki veya daha fazla fiziksel veya kimyasal olarak farklı özellikteki malzemenin birleşimiyle oluşmalıdır.

Tek bir bileşenle elde edilemeyecek mekanik özelliklerin elde edilmesi gerekmektedir.

1.2. Kompozit Malzemelerin Yapısal Sınıflandırılması

Kompozitler, matris tipine ve yapısal bileşenlerinin şekline göre sınıflandırılması tavsiye edilir. Burada matris malzemeleri olarak Plastik kompozitler (polimer matrisli kompozitler), metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler örnek olarak gösterilebilir. Yapısal bileşenlerle ilgili olarak, örnekler arasında parçacıklı kompozitler, lamel kompozitler, sert kafes kompozitler ve katmanlı kompozitler yer alır.

1.2.1. Yapılarına göre sınıflandırma

1.2.1.1. Plastik kompozitler

Kompozit malzemenin bir parçası olan plastik türleri üç farklı gruba ayrılabilir.

- Termoplastik

Bu plastik türü ısı etkisiyle yumuşar ve üretim koşullarına göre kalıplandıktan sonra tekrar soğur ve eski sertliğini geri kazanır. Bu durumda termoplastik malzemenin mikro yapısında herhangi bir değişiklik olmaz. Genel olarak, kullanım sıcaklığı 5 – 50 °C'dir.

- Termoset

Termoset plastik, ısıtılardan sonra kalıplanır ve daha sonra soğutulur. Bu işlem sonucunda termoplastik malzemenin mikro yapısı değişir. Böyle bir kristalleşme durumunda tekrar eski yapısal duruma dönmek mümkün değildir.

- Elastomer

Elastomerler, uzayabilir yapıdadır. Uzayabilen yapılar elastik olarak gerilir sonra normal yapılarına geri dönebilirler. Lastik bu davranışa örnek gösterilebilir. Bazı kriterler bir polimerin elastomer olması için gereklidir. Bunlardan ilki elastomer yapı kristalleşmeye karşı direniş yani amorf yapıdadır. Bunun yanı sıra düşük gerilmeler altında büyük elastik uzama gösterirler. Bazı yapılar elastiklik özelliğini kaybetmeden boyunun 10 katına kadar çıkabilmektedir. Moleküler yapılar termosetlere çok bezemektedir. Lakin özellik açısından termosetlerden çok farklıdırlar. Elastomerler; sentetik lastikler olarak tanımlanabilir.

1.2.1.2. Polimer kompozitler

Alternatif olarak, matris malzemesi olarak termoplastik veya termoset plastik ve lifli malzeme olarak cam elyafı kullanılarak yapılır. Fiziksel ve mekanik özelliklerine göre cam elyaflar metal, asbest, sentetik elyaf ve pamuk ipliklerine oranla daha fazla tercih edilir. Ancak cam elyafı kompozitler yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olmasının yanı sıra oldukça kırılığandırlar.

Fiberglas kompozit malzemelerin yapısında bulunan plastik sayesinde şekil olarak istenilen şekil verilebilir. Burada matris malzemesi olarak ve doğru yönde termoset plastik kullanılırsa yüksek mekanik özellikler elde edilebilir. (Günaydın, 2010)

1.2.1.3. Metal Matrisli Kompozitler

Endüstride sık sık tercih edilen kompozit olan bu kompozitler elyaf olarak metal kullanılmaktadır. Genel olarak hafif ve yüksek mekanik dayanımı ile karşımıza çıkmaktadır. Özellikle deformasyona karşı dayanıklılık açısından güçlendirme işlemi amacıyla yoğun bir şekilde kullanılmakta ve yüksek verimle üretilmektedir.

1.2.1.4. Seramik kompozitler

Metalik veya metalik olmayan malzemelerin birleştirilmesiyle oluşturulan, yüksek sıcaklıklara dayanımı yüksek, sert ve kırılğan yapıya sahip seramik yapılı kompozit malzemeler. Diğer bir özelliği ise elektriksel olarak çok iyi yalıtılmış olmalarıdır. (şencan, 2015)

1.2.2. Yapılarını oluşturan bileşenlerin şekillerine göre sınıflandırma

1.2.2.1. Partikül

Bu tür kompozitlerin üretiminde, sertliği ve mukavemeti arttırmak için ince dağılmış bir dolgu maddesi eklenerek şekillendirilirler. Katı parçacıklar, yani parçacık kompozitleri, bir veya iki mikroskobik parçacıktan oluşan bir matris tarafından oluşturulan maddelerdir. İşte bilinmesi gereken durum şudur. Mikro veya makro partikül boyutları, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini farklı şekillerde etkiler. Parçacık takviyeli kompozitler, onları fiber veya pul kompozitlerden ayıran bazı karakteristik özelliklere sahiptir. Bu özellikler, matris yapısında parçacıkların tamamen rastgele dağılımlarının bir sonucu olarak kompozitin izotropik özellikler sergilememesi, düşük maliyetli ve yüksek rijitliğe sahip olması gerçeğinde yatmaktadır.

1.2.2.2. Lamel

Yüksek yük taşıma kapasitesine sahip ve ayrıca uzunlamasına kesitin büyük çapa oranına sahip kompozit malzemelerdir. Başka bir deyişle, malzeme küçük çaplı uzun bir malzeme haline getirilebilir. Buna rağmen taşıma kapasitesi yüksektir. Boyama kompozitlerinin matris yapısındaki ölçeklerin yoğunluğu düşük veya tersine yüksek olabilir.

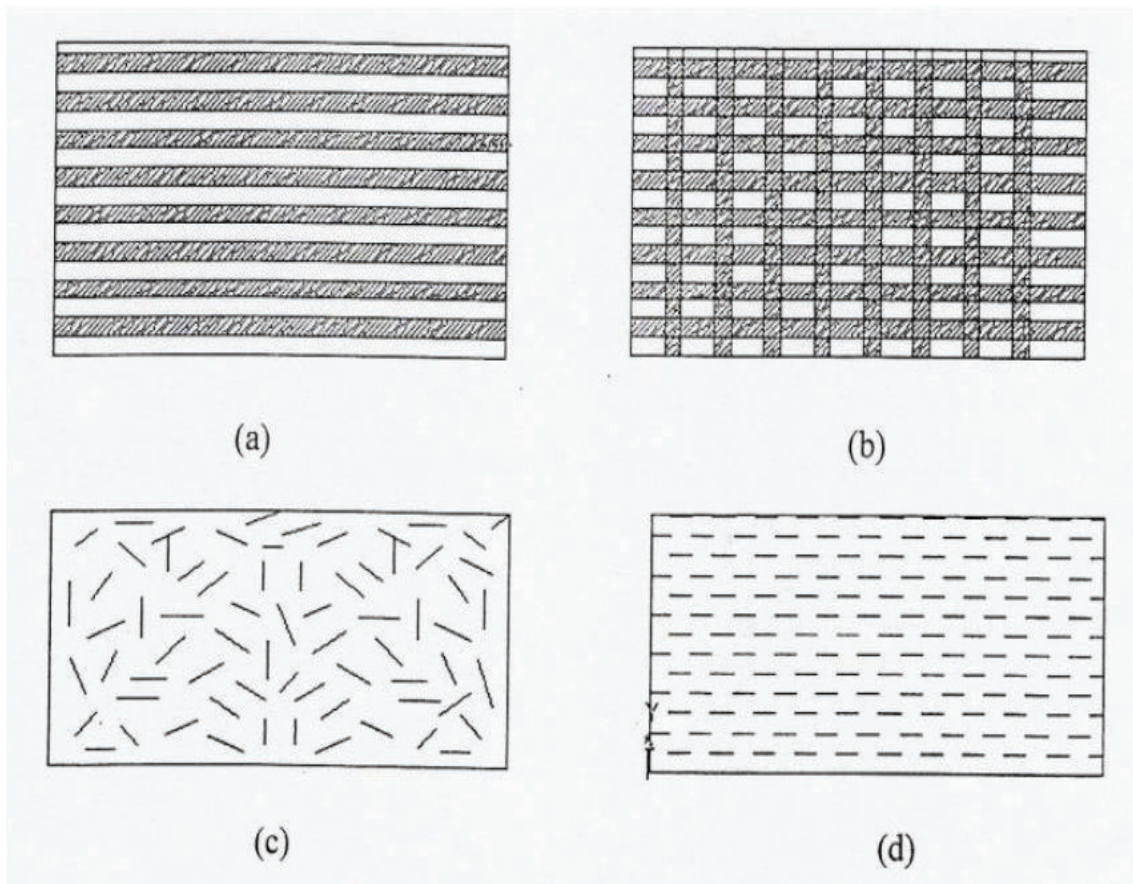
1.2.2.3. Fiber

Bunlar, kompozitlerin mekanik özelliklerinin birçoğunu iyileştiren ve malzemeye lif eklenerek üretilen kompozitlerdir. Mühendislerin imalatta kullandıkları malzemelerin birçoğu lifli bir yapıya sahiptir. Bu imalat yöntemi sayesinde malzemelerin dayanım ve rijitlik özellikleri ham haline göre çok daha yüksektir. Örneğin, karbon fiber

kompozitlerin çekme mukavemeti orijinal halinden daha düşüktür. Bu orana bakarsak, elli katı çekme mukavemetine ve üç katı rijitliğe sahiptir.

Lifli malzemelerin bu özelliklerinin belirlenmesi ile bunlara dayalı kompozitlerin üretimi başlamıştır. Modern teknolojiye büyük bir yere sahip olan bu malzemeler, ev eşyaları ve roket motorları gibi hem en alçak hem de en yüksek teknolojiye sahip yerlerde kullanılmaktadır.

Kompozit malzemeler arasında farklı fiber yönelimleri bulunmaktadır. Bu yönelimler ise Şekil 1.1'de ki görselden incelenebilir.



Şekil 1.1. Farklı fiber yönelimlerinin gösterimi (Vatangül, 2008)

1.2.2.4. Dolgu

Üç boyutlu sürekli yapıya sahip bir matris elemanının üç boyutlu malzeme dolgusu ile doldurulmasından oluşan malzemelere tam kompozit malzemeler denir. Bu durumda matris malzemesi farklı bir geometrik şekle sahip olabilir. Bu şekiller pürüzsüz petek, hücreli gözenekli veya süngerimsi olabilir.

1.2.2.5. Tabaka

Tabakalı kompozitler, farklı mekanik özelliklere sahip en az iki katmanın birleşiminden oluşur. Çok çeşitli kombinasyonlarda oluşturulmuş kompozitler oluşturulabilir. Burada kompozit malzemelerin tanımında da belirtildiği gibi, önceki malzemelerden her geçen gün daha mükemmel bir malzeme ortaya çıkmaktadır.

Örneğin, korozyon direnci zayıf olan metaller, korozyon direnci yüksek olan metaller veya plastiklerle kaplanır ve yumuşak metaller ile sert metaller, sertlik özelliği ve taşıma kapasitesi farklı açılarda bir araya getirilerek korozyon özellikleri iyileştirilebilir.

1.3. Kompozitlerin Temel Yapıları

1.3.1. Matris yapıları

Aslında kompozit malzemelerdeki matris yapısı üç farklı işlevi yerine getirir. İlk olarak, lifli malzemeleri bir arada tutmak için. İkinci olarak malzeme üzerindeki yükün lifli malzemelere aktarılması ve son olarak lifli malzemelerin olumsuz dış koşullardan korunmasıdır. Kural olarak, matris malzemesi başlangıçta düşük bir viskoziteye sahip olmalıdır. Ancak yük arttıkça lifli malzemeleri bir arada tutabilmesi için katılaşabilecek bir yapıya sahip olması gerekir.

Kompozit malzemelerde en büyük zorluk, mukavemeti yüksek olan liflerin görevlerini yerine getirebilmesi için matrisin yapısına düşmektedir. Örneğin, matris yapısı olmayan bir lifli yapıyı ele alırsak, malzemeye etkiyen kuvvet az miktarda lifli malzemeyi kaplayacaktır. Bununla birlikte, matris yapısının var olduğu varsayıldığında, malzemeye etkiyen kuvvet, lifli yapı boyunca eşit veya hemen hemen eşit olarak dağılacaktır.

Matris yapıları ve katı lifleri olan bir kompozit malzemenin kesme mukavemeti, lifli yapıların ve matrisin iyi yapışmasına ve matrisin kesme kuvvetlerine karşı direncine bağlı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca kompozit malzemenin yüksek mekanik özelliklere sahip olabilmesi için matrisin, lifli yapıya göre daha az güçlü ve esnek olması gerekir.

Lifli yapılar ile matris malzemeler arasındaki bağ kuvveti çok yüksek ise lifli yapılarda veya matris malzemelerde oluşabilecek bir çatlağın yön değiştirmeden yayılması olasıdır. Bu durumda, kompozit bir bütün olarak kırılğan bir malzeme olarak kabul edilir. (Yılmazoğlu, 2004)

1.3.2. Reçine yapıları

1.3.2.1. Epoksi reçine

Epoksi reçineler, Bisfenol-A ve Epiklorhidridin adı verilen kimyasallar, oda sıcaklığında veya fırına maruz kaldıktan sonra kürlenmiş bir madde olan bir katalizör ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan ürünlerin karıştırılmasıyla kürlenir. Bir süre 80-90 °C'de sertleştikten sonra yapı plastik bir görünüm kazanır. Epoksi reçinelerin önemli özellikleri arasında, yüksek elektrik direnci, ısı direnci ve kimyasal direnç ile sıvı veya katı formda bulunabilir. Ayrıca hava koşullarından etkilenmezler. Normal şartlarda yaklaşık iki yıl sorunsuz bir şekilde saklanabilirler.

1.3.2.2. Polyester

Katı, sıvı termoset ve termoplastik gibi çeşitleri vardır. Polyesterlerin özellikleri şu şekildedir,

- Serttir
- Kimyasallara ve hava koşullarına dirençlidir
- Sert türlerinin darbe dayanımları yüksektir

1.3.2.3. Üretan

Üretan reçineleri, normal koşullar altında bir izosiyanat ve bir polialkolün reaksiyonuyla oluşturulur. Elde edilen üretan reçinesi esnektir ve sert malzemeler yapmak için kullanılır. Üretan reçinelerinin yalıtım özellikleri kadar kimyasal direnci de yüksektir.

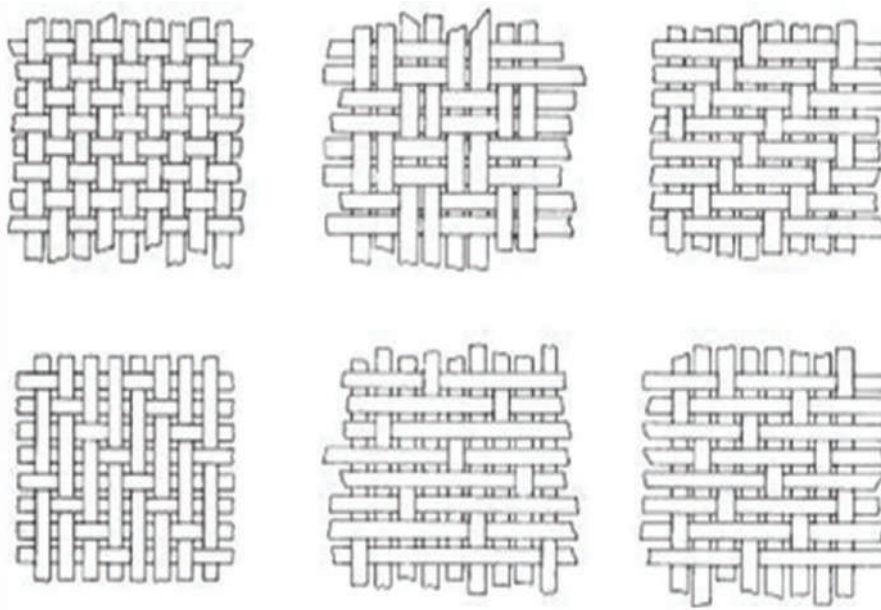
1.3.2.4. Fenolik

Bu reçineler, çeşitli hammadde türevlerinde kullanılır. Yerli üretimlerde ise fenollerin sıvı formda üretilmeleri mümkündür. (Yılmazoğlu, 2004)

1.3.3. Elyaf lar ve özellikleri

Matris malzemelerde bulunan lifli yapılar, kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Lifli yapılar, kompozitlere temel mekanik özellikleri kazandırır. Kompozitlerdeki lifli yapılar düşük yoğunluğa sahiptir. Bununla birlikte, düşük yoğunluklarına rağmen, yüksek bir esneklik ve rijitlik modülüne sahiptirler. Ayrıca kimyasal korozyona karşı oldukça dirençlidirler. Günümüzde kullanılan polimer kompozitlerde en önemli takviye elemanı elyaflardır. Modern kompozitlerin üretiminde lifli yapılar önemli bir yer tutmaktadır. Kompozit malzeme teknolojisinde kullanılan lifli yapılardan biri olan cam elyafı en eski elyaftır. Son yıllarda teknoloji ilerledikçe, kompozitler yapmak için kullanılan elyaf türleri de gelişmiştir. Günümüzde gelişen üretim teknikleri ile mekanik değerleri oldukça yüksek değerlere ulaşan elyaf türleri kullanılmaktadır. Elyaf ların yüksek mekanik değerlerinin olmasının üç temel nedeni bulunmaktadır. Bunlar;

- Mikro yapılarındaki tanecik yapılarının küçük olması nedeniyle küçük ölçekte üretilebilirler
- Boy/çap oranı arttıkça malzemeye etkiyen kuvvetin yükü matris malzemesi üzerinden istendiği gibi lifli yapılara aktarması mükemmelleşir.
- Yüksek elastik modüle sahiptirler.



Şekil 1.2. Elyaf dokuma çeşitleri (McCauley, 2022)

1.3.3.1. Cam elyaf

Fiberglas yapılar diğer ismi ile cam elyaflar birçok kompozit türünde kullanılmaktadır. Cam, benzersiz bir şekle sahip olmayan ve polimerik bir yapıya sahip amorf bir malzemedir. Moleküler yapısı silikon ve oksijen atomları içerir. Silikon metalik olmayan bir malzemedir.

Fiberglas yapıların özellikleri ise şu şekildedir; (Tekeli, 2007)

- Yüksek çekme mukavemeti
- Birim ağırlık başına mukavemet çeliğe göre daha yüksektir
- Isıl direnci düşük, yanmaz bir malzemedir. Fakat sıcaklığın yüksek olduğu değerlerde sertlik özelliklerini kaybederler
- Çeşitli kimyasalların neden olduğu korozyona karşı dirençlidir
- Fiberglasın nem emici özelliği yoktur. Bununla birlikte, cam elyafı kompozitlerinde, neme maruz kalma neeniyle matris malzemesi ve cam elyafında çözünme meydana gelebilir.
- Elektriği iletkenlikleri yoktur. Bu özelliğinden dolayı elektrik izolasyon malzemesi olarak da kullanılabilirler

1.3.3.2. Karbon elyaf

Karbon elyaf yüksek performanslı bir malzemedir. Polimer matrisli kompozitlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek özgül mukavemet ve özgül modüle sahiptir. Yüksek çekme modüllerini ve mukavemetlerini yüksek sıcaklık altında da korurlar. Aynı zamanda nem, çeşitli çözücüler, asit ve bazlardan etkilenmezler. Karbon elyafları içeren kompozit malzemeler yüksek mühendislik özellikleri gösterirler.

Karbon elyaf ile üretilmiş kompozitler, spor ve eğlence araçlarında, roket motor gövdelerinde ve basınçlı kaplarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra ticari ve asgari sabit kanatlı uçaklarda ve helikopterlerde de kullanılmaktadır.

Karbon elyaflar petrol türevlerinden üretilebilir. Bu zift esaslı elyaflar dayanım dışı amaçlarda kullanılır. Polyacrylonitril (PAN) takviye malzemesi olarak kullanılabilir. Bu elyaflar yüksek mukavemete sahip elyaftırlar. Tasarım malzemesi olarak karbon elyafların kullanılmaya başlaması ile çok yüksek mukavemete sahip türler üzerine yoğunlaşmaktadır. Grafit tabakalarında karbon atomları arasındaki kimyasal bağın çok güçlü olması nedeniyle, yüksek elastiklik modülü ve çekme dayanımına sahiptirler.

1.3.3.3. Bor elyaf

Bor lifleri yüksek çekme mukavemetine ve esneklik modülüne sahiptir. Çekme mukavemeti 2750 – 3500 MPa aralığındadır. Elastisite modülü 400 GPa dır. Bu değerler S-camı elyafların elastikiyetinden yaklaşık beş kat daha yüksektir. Uçak endüstrisinde mükemmel mekanik özelliklere sahip bor elyaflar kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda yüksek maliyeti nedeniyle bor fiber yerine karbon fiber kullanılmaya başlanmıştır. (Tekeli, 2007)

1.3.3.4. Silisyum karbür

Bor lifleri gibi, silisyum karbür lifleri de bir tungsten çekirdeğe sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda bor lifli yapılara göre daha iyi sonuç verir. Bu özelliği sayısal olarak açıklamak gerekirse, silisyum karbür yapılar yaklaşık 1370 °C ye kadar mukavemetlerinin

%30'unu kaybetmesine rağmen, bor lifli yapılar için bu kayıp 640 °C dir. Silisyum karbür elyaflar, jet motoru parçalarının imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.3.3.5. Alümina

Alümina, alüminyum oksittir. Kimyasal temsili Al_2O_3 'tür. Alümina liflerinin çekme mukavemeti yeterince yüksek olmasa da basınç mukavemetleri iyidir.

1.3.3.6. Grafit elyaf

Grafit, yani karbon fiber yapılar, 2268 g/cm³ yoğunluğa sahip kristal bir malzemedir. Grafit fiber yapılar, karbon fiber öncesi dönemde ortaya çıkmıştır ve günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu malzeme bir fırında 1000 – 3000 °C arasında ısıtılır ve bu ısının işlenmesine paralel olarak malzemeye bir çekme kuvveti uygulanır ve malzeme mukavemet ve sertlik kazanır. Petrol rafinasyonundan elde edilen reçine bazlı grafit lifler de vardır. Bu malzemeden yapılan lifler, genel olarak 2000 MPa'lık bir gerilme mukavemetine sahiptir. Ancak bu malzemeden yapılan yapıların mekanik özellikleri, Rayon ve PAN malzemeden yapılan lifli yapılara göre daha düşüktür. Ancak bu bazlı lifli yapının maliyet avantajı vardır.

Grafit liflerin en önemli özellikleri arasında yüksek mukavemet değerleri ve düşük yoğunluk bulunmaktadır. Grafit lif yapılarının aşınma dirençleri ve yorulmaya karşı gösterdikleri dirençler yüksektir. Gösterdikleri bu özelliklerinden dolayı genel olarak hava araçlarının üretimlerinde sıklıkla tercih edilmektedirler.

1.3.3.7. Aramid elyaf

Aramid kelimesi "aromatik poliamid" kelimelerinden gelmektedir. Buradaki poliamidler, uzun bir atomik zincire sahip polimerik malzemelerdir. Aramidin atomik yapısındaki karbon atomu sayısı altıdır ve bu karbon atomları birbirine hidrojen atomlarıyla bağlıdır.

Genel olarak, aramidin mekanik özellikleri, grafit lif yapılarında olduğu gibi lif yapısı yönünde iyidir, ancak lif yapının yönüne dik olduğunda zayıftır. Aramid elyaf yapıları hafiflik, yüksek çekme ve basınç dayanımı ve düşük maliyet gibi benzersiz özelliklere sahiptir.

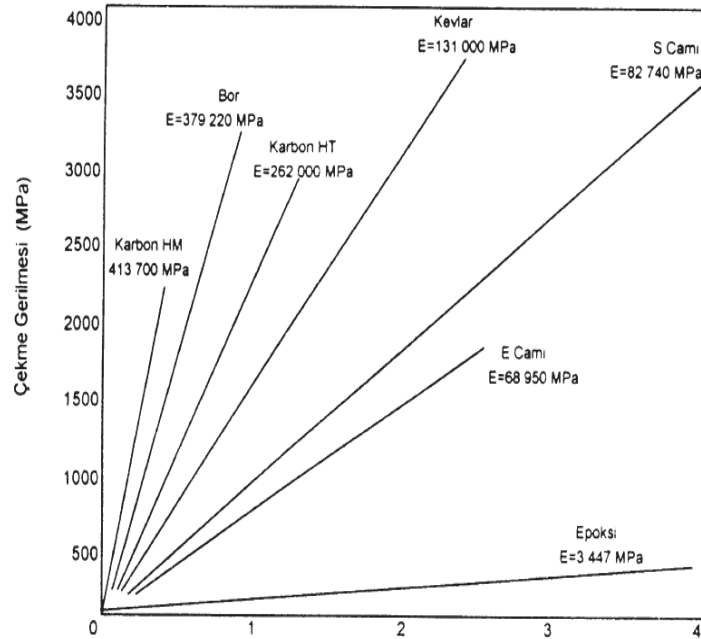
Bu özelliklere ek olarak, grafit fiber yapıya sahip malzemelerle karşılaştırıldığında, artan kırılabilirlik ve kırılabilirliğe karşı mükemmel bir dirence sahiptir. Bu nedenlerle kolayca tasarlanabilirler. Son olarak yağ, hava, su, doğalgaz, demir, toprak ve ateş gibi doğal kimyasallara karşı dayanıklıdırlar.

Temel olarak iki tür Aramid vardır. Kevlar-29 ve Kevlar-49 olarak adlandırılırlar. Her iki aramid türü de 2300 – 2400 MPa çekme mukavemetine ve %1,5 - %2,0 aralığında bir kopma uzamasına sahiptir.

Bununla birlikte, Kevlar-49'un elastisite modülü, Kevlar-29'un neredeyse iki katıdır. Aramid fiber yapıların yoğunluğu, cam ve grafit fiber yapıların yoğunluğundan daha düşüktür. Aramid epoksi kompozitin darbe direnci, grafit epoksi kompozitten 6 ila 8 kat, bor epoksi kompozitten ise 3 ila 5 kat daha iyidir.

Havacılık sektöründe özellikle uçak endüstrisinde kompozitlerin sıklıkla tercih edildiği bilinmektedir. Buna göre aramid-epoksi kompozit yapılar, düşük basınç dayanımı özelliklerinden dolayı grafit-epoksi kompozitlerle birlikte kullanılmaktadır.

Birçok yüksek değere sahip olan Aramid lif yapıları da tüm malzemelerde olduğu gibi olumsuz özelliklere sahiptir. Aramid lifleri zayıf nem emme özelliklerine sahiptir.



Şekil 1.3. Elyaf yapılarının ve matris malzemelerinin gerilme ve uzamaları (Vatangül, 2008)

1.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

1.4.1. Manuel dispersiyon yöntemi

Manuel dispersiyon üretiminde, malzemenin üretimi sırasında ihtiyaç duyulduğu kadar malzeme yerleştirilir. Bu yöntem, malzemenin şeklinin ve mukavemetinin kontrolünü sağlar. İstifleme aynı zamanda manuel bir saçılma yöntemidir. Manuel dispersiyon yöntemi, genellikle düşük bir üretkenliğe sahip olduğu durumlarda yaygın bir yöntemdir. Ayrıca oldukça ekonomik bir yöntemdir ve üretim üç kalem altında toplanmıştır. Birincisi kalıp yapma işlemi, ikincisi ise cam elyafı veya cam elyafının dökülmesi yani matris malzemesinin serilmesi, üçüncü ve son işlem ise polyeşterin veya reçinenin uygulanmasıdır.

Manuel dispersiyon yönteminde kullanılacak kalıp, üretilmesi planlanan ürünün planlanan özellikleri doğrultusunda seçilmesi gerekmektedir. Burada kalıp olarak kullanılacak malzemeler genel olarak alçı, ahşap, plastik vb. ürünler olabilir. Kalıp yaparken kalıbın yüzeylerinin pürüzsüz olmasına dikkat ediniz. Yüzeyde hava kabarcığı, delik, çatlak gibi yüzey kusurları bulunmamalıdır. Kullanımdan sonra kalıp, ortaya çıkan malzemeden kolayca ayrılmalıdır. Bu nedenle kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı bir madde sürülmelidir. Genellikle kalıp yüzeyine 2 – 3 kat uygulanır. Kural olarak, 0,3 – 0,5 mm'lik bir tabaka halinde uygulanmalıdır. (Arıkan, 2012)

Ortaya çıkan şekil bir ağ yüzeyi ile kaplanır ve ikinci adım için hazırdır. İkinci adımda, önceden kesilmiş cam veya fiberglas hazırlanır ve kesilen parçaları seperatör yüzeyinin kurumasını beklemeden kalıba yerleştirilir. Üçüncü adımda, kumaşa bir fırça ile polyeşter uygulanır. Bu aşamadan sonra malzemenin tanımlanan kalınlığa ulaşmasını sağlamak için ikinci ve üçüncü aşamalar tekrarlanır. Uygulanan tüm işlemlerden sonrasında ürünün belirli bir sertliğe ulaşmasını takiben ürün kalıptan çıkarılır.

1.4.2. Sürekli kalıplama

Sürekli kalıplama temel olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

- Devamlı kalıplama
- Profil kalıplama

1.4.2.1. Devamlı kalıplama

Bu yöntem, matris malzemesi olarak fiberglas liflerinin, keçe, kumaş veya yün formu kullanır. Bu malzemeler doğrudan reçine banyosundan geçirilir veya lifli bir malzeme ise polyester sprey ile reçine doğrudan üzerlerine püskürtülür.

Bu noktada matris malzemesinin etrafında ince bir selafon tabakası oluşur ve matris malzemesi bu selafonun içine bağlanır. Sandviç şekil alır almaz içindeki hava basınçlı metal bir silindir tarafından dışarı atılır.

İkinci aşamada sandviç malzeme dekorasyon için fırına gönderilir. Fırında ısıtım gören bir malzeme, jelleşme adı verilen hafif bir yumuşama durumuna ulaştığında, tasarım silindirleri adı verilen metal silindirler arasında geçiş yaparak son şeklini alır.

Fırından çıkan malzeme tekrar sertleşir sertleşmez tasarıma göre kesilir. Bu üretim yöntemi, çatı ve cephe kaplamalarında yaygın olarak kullanılan oluklu levhaların üretimine olanak sağlamaktadır.



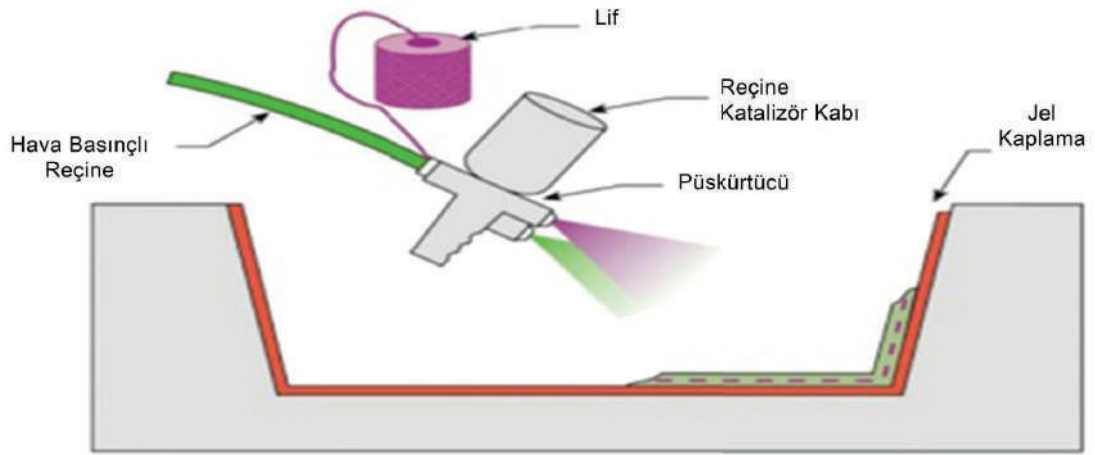
Şekil 1.4. Oluklu levha (Anonim, BİTÜM EMDİRİLMİŞ ONDÜLE LEVHA UYGULAMASI, 2018)

1.4.2.2. Profil çekme

Profil çekme yönteminde reçine edilmiş cam fitilleri, metal rulolardan geçirilirler. Daha sonra uygun kalıplarda üzerine basınç uygulanarak çubuk veya boru şeklinde şekillendirilirler. Şekillerin kalıcılığını sağlamak için çekme basma kafaları sıcak olarak son şekillendirme işlemi uygulanır. Kafaların sıcak olup olmaması işleme ve malzemeye göre değişiklik gösterebilir. (Arıkan, 2012)

1.4.3. Sprey yöntemi

Sprey ile imalat temelde lifli yapıya, polyester malzemenin elle ile değil de makine kullanılarak uygulanmasına dayanmaktadır. Bu yöntem ile makine gücü kullanıldığı için üretim kapasitesi daha fazla olmaktadır. Manuel yerleşim yönteminde olduğu gibi kalıp kenarlarında düzgün yüzeyler elde etmek mümkündür.



Şekil 1.5. Sprey yönteminde kullanılan ekipmanın şematize edilmiş görseli (Arıkan, 2012)

1.4.4. Filaman sarma yöntemi

Filaman sarma yöntemi mantık olarak çok basit temellere dayanmaktadır. Bu yöntemde bir veya birden fazla matris malzemesi reçine havuzundan geçirilir. Ardından en az bir noktadan sabitlenmiş kalıp üzerine istenilen açılarda çalışmaya uygun halde sarılır. Sarma işlemi ile genellikle dairesel forma sahip ürünler üretilir.

1.4.5. Santrifüj döküm yöntemi

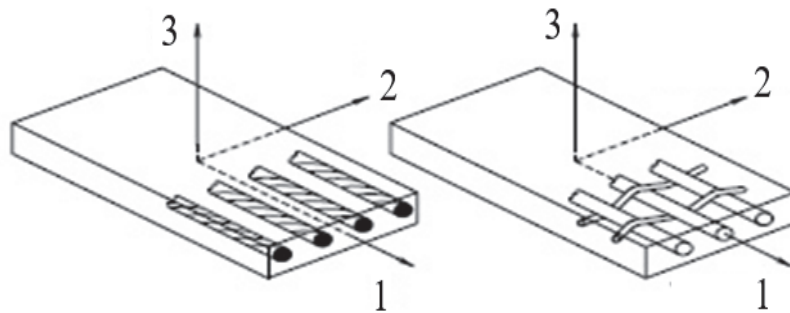
Santrifüj yönteminde üretim dönen kalıp kullanılarak yapılır. Bu yöntem filaman sarma yöntemi ile benzerlikler göstermektedir. Bu yöntem ile boru, silo ve dairesel kaplar üretilebilir.

1.4.6. Torbalama döküm yöntemi

Torbalama döküm ile üretim aslında üretim yöntemi değildir. Manuel dispersiyon ve püskürtme yöntemleri ile elde edilen malzemelerin yüzey kalitesini iyileştirmek için kullanılır. El yapımı ve püskürtülen ürünler kurutma aşamasında bir torbaya konularak iç havanın boşaltılıp ortamdaki uzaklaştırılmasının ardından hasarlı dış yüzeyler yenilenerek düzgün bir şekil elde etmek için kurutma işlemi tamamlanır.

1.5. Lamine Kompozit Malzemeler

Lamine kompozitler olarak da bilinen tabakalı kompozitler, katmanlı bir yapıdan oluşan kompozit malzemelerdir. Burada tabakalar, düz veya açılı bir yapıda lifli malzemelerdir, yani lifli yapılar bir matris malzemesi içindedir. Şekil 1.6'da görüldüğü gibi, lamine kompozit panellerin katmanlı yapısı gösterilmektedir. Biri liflerin yönüne paralel, diğeri liflerin yönüne dik olmak üzere iki klasik katman temsili vardır. Lifli malzemeli yapıda ana yük taşıyıcı veya takviye elemanı olarak elyaflar bulunur. Matris malzemeleri organik, seramik veya metalik olabilir. Matris malzemelerin yapıdaki amacı, lifli malzemeleri desteklemek ve korumak, tüm malzemeye etki eden yükleri dağıtmak ve lifler arasında yükleri aktarmaktır.



Şekil 1.6. Lamine kompozit malzemelerde elyaf yapılarının matris malzemesindeki durumu (Arıkan, 2012)

Lamine kompozitler, en az iki farklı malzemenin birbirine yapıştırılmasıyla oluşturulur. Buradaki amaç, lamine yapıların mekanik özelliklerini bir araya getirerek daha güçlü ve daha iyi mekanik özelliklere sahip bir malzeme oluşturmaktır.

1.6. Kompozit malzemelerin mekanik davranışları

Katmanlı kompozitler, en az iki katmanın birleşiminden oluşan eksiksiz bir yapıdır. Böyle bir yapının imalatında çalışma prensiplerine uygun olarak belirli bir kalınlık değeri elde etmek için çok katmanlı, düz veya farklı yönlendirilmiş lifli yapılar oluşturmak gerekir.

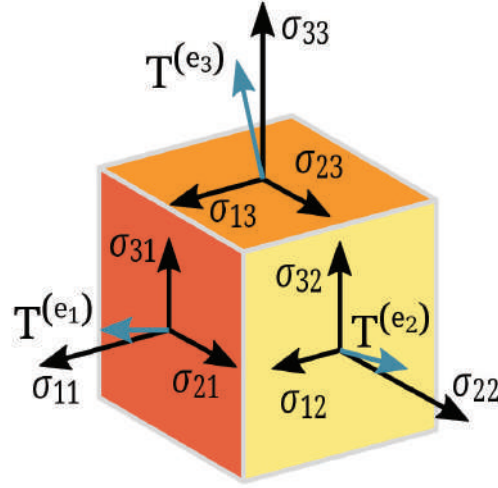
Uygulamalar sonucunda oluşan malzemenin lifli yapıları üç grupta test edilir.

1. Üretim izotropik ise lif yapıları rastgele kurulmalıdır
2. Ürün ortotropik ise lifli yapılar ortogonal olarak yönlendirilmelidir
3. Üretim ortotropik olacaksa lifli yapılar aynı doğrultuda olmalıdır

Tüm bu nedenlerle kompozit malzemenin mekanik özellikleri katmanlara, kullanılan liflerin ve matrisin mekanik özelliklerine, liflerin dizilişine ve imalat tekniğine bağlı olacaktır. Öte yandan, kompozit malzemedeki liflerin ve matrislerin oranları ve yönleri, malzemeye etki eden tüm kuvvetlerin oluşturduğu gerilmeye ve basınçlara bağlı uzama °Csinde büyük rol oynar.

1.6.1. İzotropik tabakalı kompozitler

Kompozit malzemenin katman yapılarındaki liflerin yönleri rastgele ise, bunlar mikro değil makro, yani bütün olarak kabul edilir. Böylece tüm malzemenin mekanik özellikleri de bu yönde iyileşir. Bu fikirden hareketle kompozit malzemenin tamamına etkiyen kuvvetin malzemedeki oluşturduğu basınçlar şeklindeki gibi olacaktır.



Şekil 1.7. Kompozit malzemelerde üç boyutlu gerilme sistemi (Anonim, Tensör, 2021)

1.6.2. Ortotropik tabakalı kompozitler

Lamine kompozit yapılarıdaki lifli yapılar tek yönlü veya çift yönlü takviye olarak ele alınırsa liflerin yönünde yüksek dirençli rijit bir yapı elde edilebilir. Bu mekanik özellikler elde edildiğinde, lifli yapıların yönünün yanı sıra lif içinde de büyük bir etkiye sahip olacaktır. Tüm bunların sonucunda, lifli yapıya dik tek yönlü lifli yapıların mukavemet değeri ve yüksek elastisite modülü karşılaştırıldığında, liflerin yönüne paralel bir yön elde edilir. İki taraflı bir yapıda, lifler hem eksene paralel hem de eksene dik olarak yerleştirilirken, kompozitlerde mukavemet ve elastisite modülü iki ortogonal yönde eşittir.

1.7. Filaman Sarma Yöntemi

Filament sarma yöntemi, konteyner ve bileşik mil gibi silindirik ve küresel parçaların imalatında kullanılan verimli bir yöntemdir. Bu yöntemin askeri ve sivil platformlarda kullanımı son zamanlarda artış göstermiştir. Sürekli sarım teknolojisi, otomasyon, seri üretim ve kompozit ürünlerin standardını sağlar. Boru, tank, basınçlı kap gibi sağlam ve hafif olması gereken ürünlerin seri üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

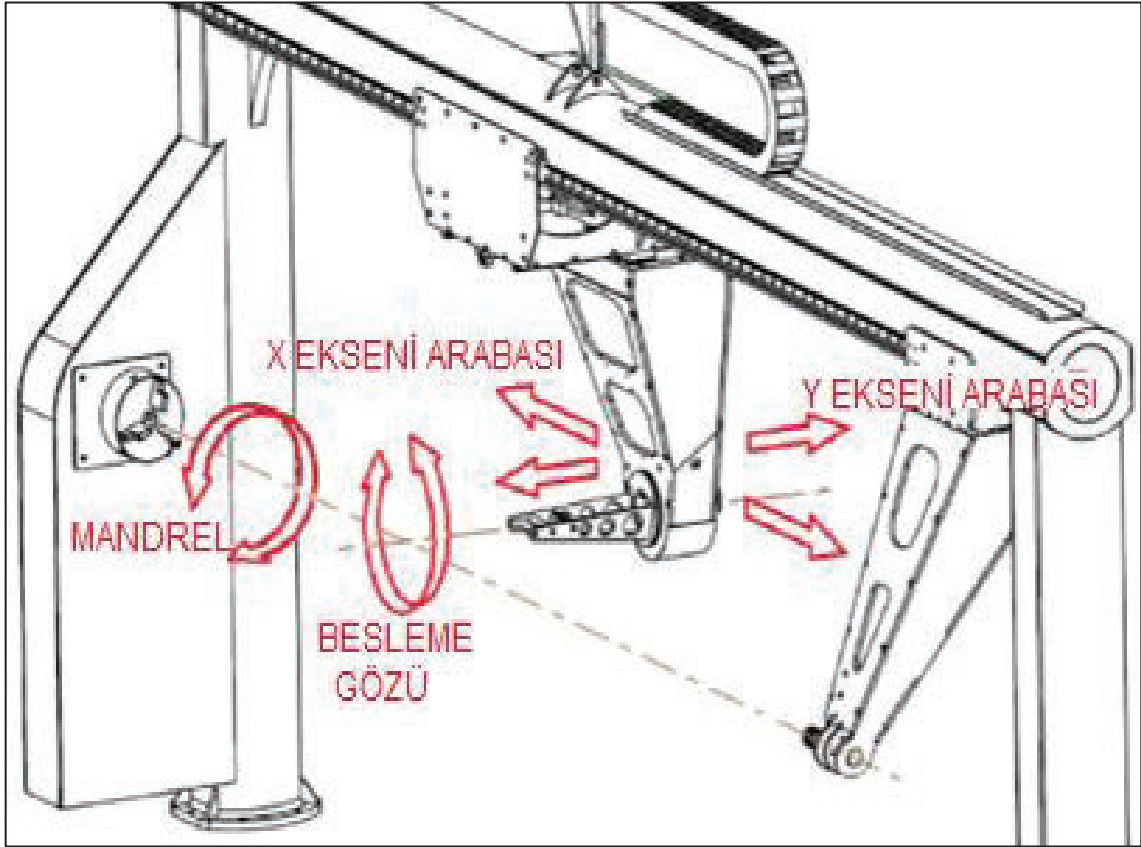
Çalışma prensibi, liflerin ilk olarak hız kontrolü sağlayan yapay bir konveyör bant ile silindire getirilmesidir. Reçine banyosuna girdikten sonra reçinenin içinden geçen lif silindir üzerinde belirli açılarda bükülmeye başlar.

Burada öncelikli olarak iki farklı lif kullanılabilir. Birincisi voltaj kabininden kuru elyaf bobini reçine banyosundan geçirip kaynak yaparak silindir üzerine belirli açılarda sarma şeklinde, ikincisi reçineli ve belirli açılarda doğrudan silindirin üzerine sarma şeklinde olabilir.

Sarım işlemi tamamlandıktan sonra silindir belirli bir süre belirli bir sıcaklıkta kürlenir. Bu işlem tamamlandıktan sonra sarılmış lif silindir şeklini alır. Günümüzde yaygınlaşmaya başlayan filament sarım tekniğinin başlıca uygulamaları şu şekildedir; (Atagün, 2017)

- Yüksek tork üreten araçların tork gücüne dayanıklı şaft üretimi
- Basınçlı kapların üretiminde
- Uçakların bazı gövde parçalarının üretiminde
- Havacılık endüstrisinde
- Bazı askeri malzemelerin üretiminde
- Çeşitli kimyasal malzemelerin depolanması için üretilen tanklar
- Mekanik olarak yüksek dayanım gerektiren boruların üretiminde
- Tekne veya yatlarda kullanılan bazı ekipmanların üretiminde

Şekil 1.8’de filaman sarım makinesinin şematize edilmiş görseli ve eksenlerin gösterimi yapılmıştır.

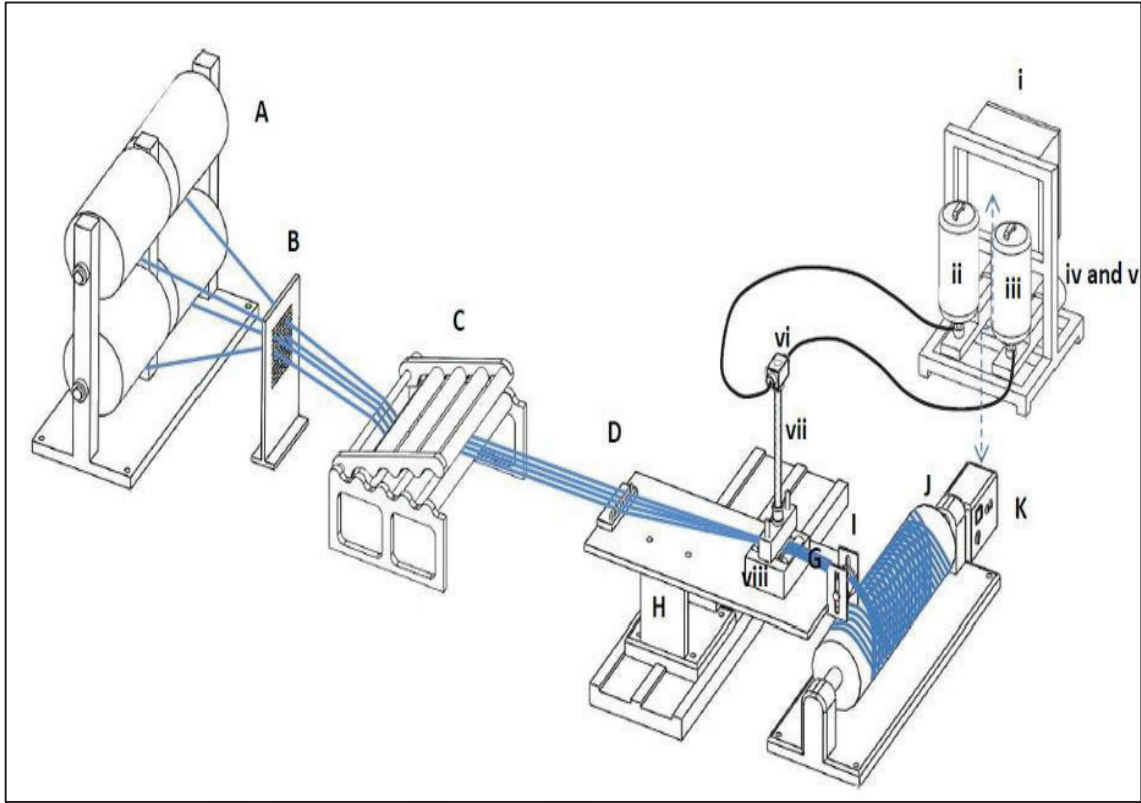


Şekil 1.8. Filaman sarım makinesinin şematize edilmiş görseli (Atagün, 2017)

Ultra yüksek basınçlı borular ve simetrik borulu elemanlar, tavlama işlemi ile üretilen endüstriyel ürünlerin başında gelmektedir. Bu tür yüksek basınçlı silindirlerin kullanımı ve önemi her geçen gün artmaktadır.

Bu boruların en önemli özellikleri yüksek basınç dayanımı ve hafifliğidir. Boruların mukavemetini artırmak için kullanılan en etkili yöntem, filament sarma yöntemi kullanılarak boru üzerine elyaf sarma üretimidir.

Şekil 1.9'da filaman sarım makinesine ait tüm bileşenlerin dizilimi şematize edilmiştir.



Şekil 1.9. Filaman sarım makinesine ait tüm bileşenlerin dizilimi şematize edilmiş görseli (Atagün, 2017)

Şekil 1.9’da A noktasında kompozit lift sargılı bobinler bulunmaktadır. B, C ve D noktalarında bu bobinlerden gelen liftlerin istenilen konuma gelip düz bir şekilde hareket etmesi için aparatlar bulunmaktadır. G noktasına kadar gelen liftler, G noktasında reçine banyosundan geçirilerek, J noktasında dönmekte olan kalıba sarılır. Bu sayede liftlerden belirlenen açıyla bir malzeme üretilmiş olur.

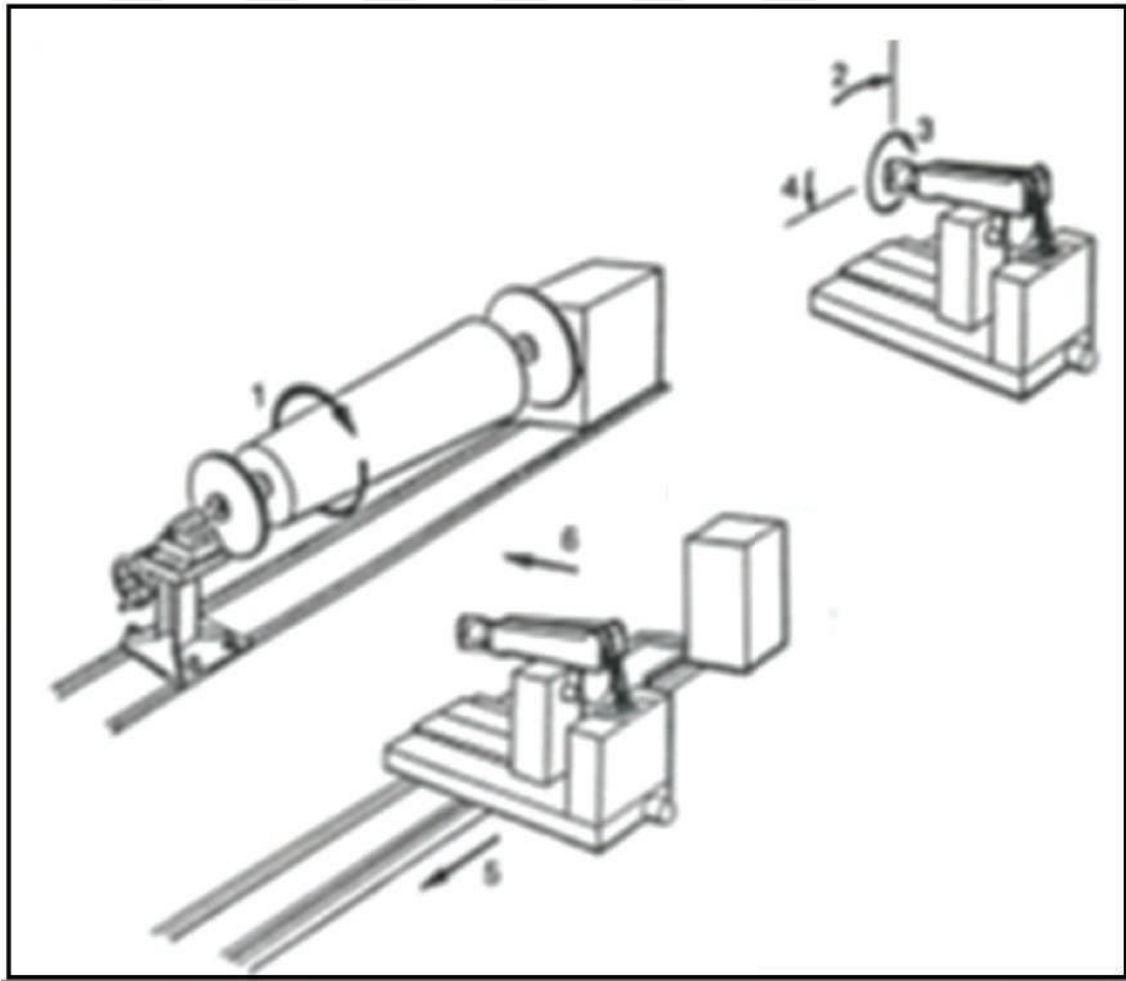
Filament sarım makinelerinin avantajları şu şekildedir;

- Üretim aşaması hızlı ve ekonomiktir. Belli bir hassasiyetle her üründen aynı kaliteyi görmek mümkündür.
- Reçine içeriği ve kullanımı kontrol edilerek daha iyi sonuçlar ve daha düşük maliyetler elde edilebilir.
- Silindire bağlı lifler doğrudan reçine banyosundan veya germe kabininden çıktığı için ürünün yapısal özellikleri çok iyidir.
- Fiber oryantasyonu için kesin çözümler sunar.
- Bu tekrarlanabilir bir işlemdir ve daha az işçilik gerektirdiğinden maliyet düşer.
- Büyük ve kalın kompozit ürünler üretmek için uygundur.

Filament sarım makinelerinin dezavantajları şu şekildedir;

- Bu üretim yöntemi dışbükey şekillerle sınırlıdır
- Bazı durumlarda, elyafın silindire uygulanma açısına bağlı olarak, elyaflar silindir boyunca düzgün şekilde hizalanmayabilir
- Büyük parçaların üretimine hazırlanmak için bir silindirin maliyeti yüksek olabilir.
- Malzemenin görünümü üretim sonucu oluşmadığı için görsel olarak reçineli kısımlar kaba bir görünüm oluşturmaktadır
- Ayrıca düşük viskoziteli reçine ürünlerinin yapısal özellikleri de düşüktür

Sarma makinesinin altı hareket eksenli vardır. Silindirin dönüşünü, kafayı üç eksen boyunca saran liflerin hareketini ve tutucunun boyuna ve aksenal hareketlerini mevcuttur.



Şekil 1.10. Filament sarım makinesinin hareket eksenleri

1.7.1. Sarım yöntemleri

Filament sarım makinesinde iki farklı sarım yöntemi vardır. Bunlar;

- Islak
- Kuru

Islak sarımda lifler önce reçine banyosundan geçer, daha sonra tek sıra halinde toplanır ve silindir üzerine sarılır. Ön reçine elyaflarında, reçine banyosuna gerek kalmadan doğrudan silindir üzerine damlatma yapılır. Silindir üzerinde kalan reçine miktarı aşağıdaki değişkenler kullanılarak hesaplanabilir;

- Sıyırıcı bıçaklardan elyafa olan mesafe
- Reçine viskozitesi
- Elyaf gerilimi
- Çoklu katmanlar
- Silindir çapı
- Silindir yüzeyine uygulanan yükün büyüklüğü

Ön reçine şeritlerinde reçine miktarı, düzgün reçine dağılımı ve elyaf genişliği daha doğru hesaplanabilir. Öte yandan reçinenin erimesi için kütleme gerekir, bu da ek olarak maliyetleri artırır.

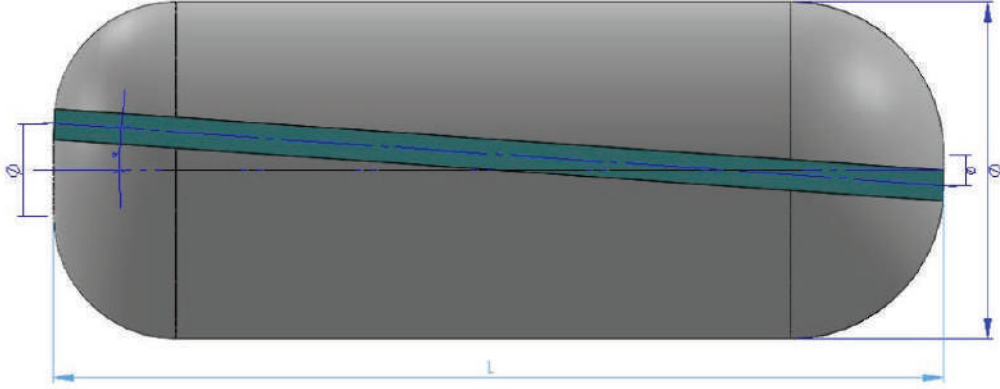
1.7.2. Sarım çeşitleri

Filament sarım makinesinde üç sarım yöntemi bulunmaktadır. Bunlar;

- Kutupsal
- Çevresel
- Helisel

1.7.2.1. Kutupsal

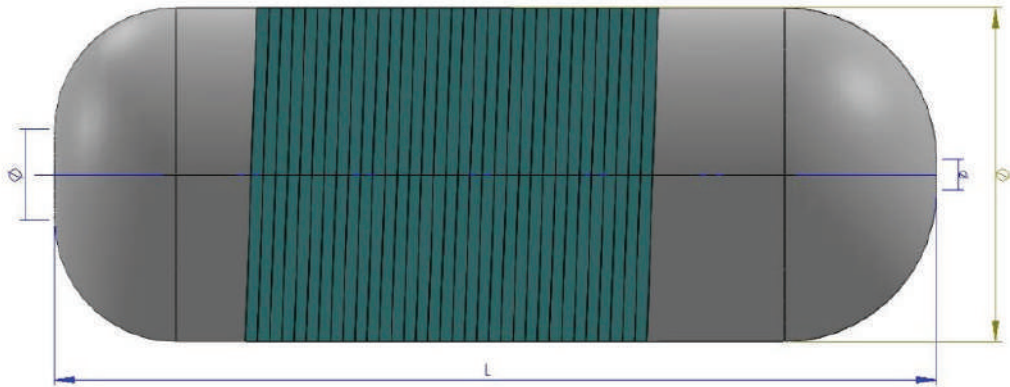
Uzunluk olarak kısa olan basınçlı tüplerin üretiminde kullanılan bir yöntemdir.



Şekil 1.11. Kutupsal sarım yönteminin şematize edilmiş görseli

1.7.2.2. Çevresel

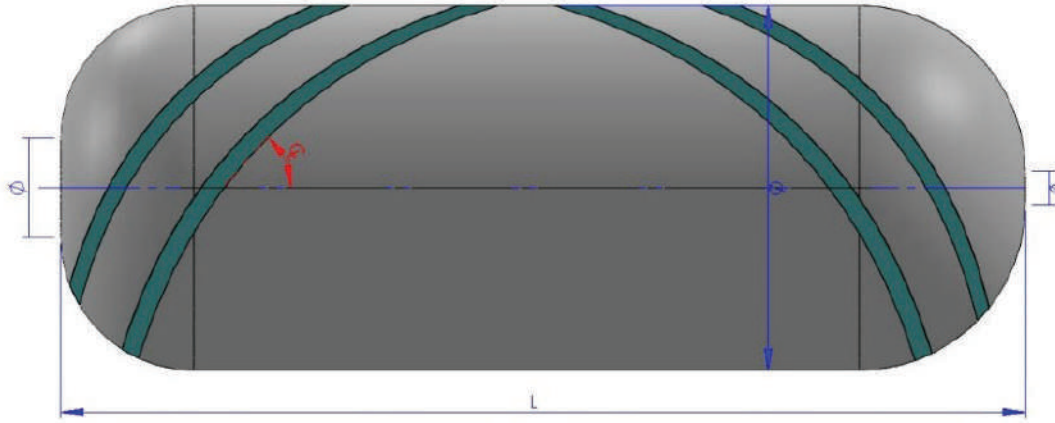
Elyaf silindire 90° lik açı ile sarılmaktadır. Genel olarak boruların ve çeşitli amaçlarla kullanılacak olan şaftların üretiminde bu yöntem tercih edilmektedir.



Şekil 1.12. Çevresel sarım yönteminin şematize edilmiş görseli

1.7.2.3. Helisel

Sarılmak istenen desenin şekline göre fiber malzemesi silindir üzerinde ilerleyeceği yön doğru olarak hesaplanması gerekmektedir.



Şekil 1.13. Helisel sarım yönteminin şematize edilmiş görseli

1.7.3. Filaman sarım makinesine ait elemanlar

- Silindir

Elyafın sarıldığı gömleğin adıdır. Liner denir. Metal veya plastik olabilir. Silindire bağlı olan elyafın bükülmesi sırasında hızı ve konumu bir servo motor tarafından kontrol edilir.

- Taşıyıcı

Gözün lifleri taşımalarını ve eksene paralel hareket etmesini sağlar.

- Denge tutucu

Fiber transfer pabucunun eksene dik olmasını sağlayan sistemdir. Bu eksen, basınçlı kap gibi öğelerin kenarlarında bükülmeye devam etmek için kullanılır.

- Fiber transfer pabucu

Reçine banyosundan gelen elyaf demetlerini toplayarak liner etrafına saran parçadır. Dairesel bir hareket yapar ve 360° serbestliğe sahiptir.

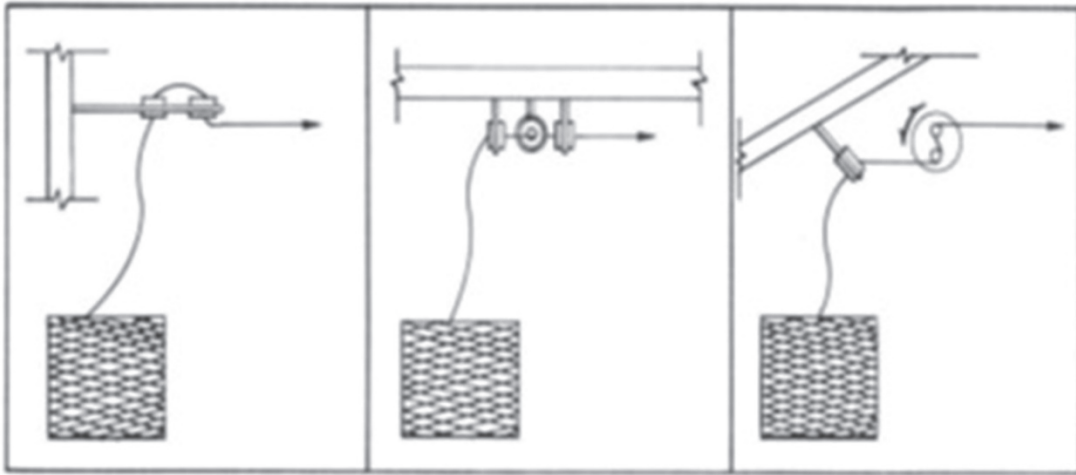
- Reçine banyosu

Bobinden gelen lif telleri, belirli bir oranda reçine ile doldurulmuş bir banyodan geçer. Böylece teller arasında bir bağ tabakası oluşur.

- Gerilim kabini

Fiber bobinlerin sargılarının boşaltıldığı yerdir. Elyaf lar makara üzerinde iken gerilim kontrolü yapılır.

Gerilim bobinlerinin temel görevi, fiber demetlerinin silindire sarılmasından önce gerginliğinin kontrol edilmesini amaçlamaktadır. Bu amaç için üç farklı gerilim kabini bulunmaktadır. Tek sıra kılavuz göz, ortada dönen kılavuz göz ve döner makas gibi gerdirme mekanizmaları sayesinde sarım tam olarak istenildiği gibi tamamlanır.



Şekil 1.14. Filaman sarım makinesindeki üç farklı gergi düzeneği (Atagün, 2017)

Reçine banyosu tasarımında bazı faktörler dikkate alınmalıdır. Bunlar,

- Reçine viskozitesi
- Silindir dönüş hızı
- Kullanılan silindir sayısı
- Reçine jel süresi
- Reçineyi ısıtma ihtiyacı



Şekil 1.15. Örnek bir filaman sarmak makinesi görseli (Atagün, 2017)

1.7.4. Uygulama alanları

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte filaman sarma yöntemi birçok uygulama alanına yayılmıştır. En yaygın uygulamalar CNG tankları ve kompozit şaftlardır. Düşük ağırlığı ve mekanik özelliklerinden dolayı klasik malzemelere göre birçok açıdan tercih edilir.

1.7.4.1. CNG tankları

CNG sıkıştırılmış doğal gazdır. Bir CNG kompresörü kullanılarak yüksek basınca sıkıştırılmış çeşitli boru basınçlarında bir doğal gaz şeklidir. CNG, araçlarda çeşitli büyüklük ve miktarlardaki silindirlere doldurulur. Borular çelik ve karbon fiber gibi malzemelerden yapılmıştır. Çelik boruların her bir litresi 1 kg, karbon fiber boruların her bir litresi 0,380 kg ağırlığındadır.

- Tip 1

Çelik veya alüminyumdan yapılır.



Şekil 1.16. CNG tank tip 1 görseli

- Tip 2

Karbon takviyeli cam ve çelik veya alüminyumdan yapılmıştır. Metal kılıf(liner) ve kompozit sargı aynı yüke maruz kalır.



Şekil 1.17. CNG tank tip 2 görseli

- Tip 3

Metal bir kılıf (genellikle alüminyum) etrafına sarılmış karbon fiber ile üretilmiştir. Karbon fiber sargı tamamen yüklenmiştir.



Şekil 1.18. CNG tank tip 3 görseli

- Tip 4

Liner olarak metal yerine termoplastik polimer malzemeler kullanılmaktadır. Karbon fiberlerin veya karbon-cam fiberlerin ortak kullanımı ile üretilir. Diğer basınçlı silindirlere göre daha hafiftir.



Şekil 1.19. CNG tank tip 4 görseli

- Tip 5

Bir liner kullanılmadan tamamen karbon fiber veya camdan yapılmıştır. Silindir üzerine sardıktan sonra metal liner malzemeden çıkarılır.



Şekil 1.20. CNG tank tip 5 görseli

CNG silindirler ilk kez 1982 yılında cam elyaf takviyeli kompozit malzeme ile takviye edilerek sarım yöntemiyle üretilmiştir. 1992 yılında karbon fiber CNG silindir üretimine başlanmıştır. Karbon fiber LNG tankları, fiberglas tanklardan daha iyi performans gösterir. Halihazırda birçok araçta hidrojen gazı depolamak için kullanılan CNG tankları, 1994 yılında 250 bar basınca dayanacak yapısal özelliklere sahiptir. 2000'li yıllarda basınç kapasitesi 300 bar'a çıkarıldı. Günümüzde maksimum 700 bar basınca sahip CNG tüpleri uygulamaya göre tasarlanmaktadır.

Tüm gaz tüpleri FMW SS 304 standartlarına uygun olmalıdır. Özellikle bir arabada gaz tüpleri kullanırken tüm kalite kontrolleri belirli koşullar altında gerçekleştirilmelidir. Kompozit kaplar, geleneksel malzemelerden yapılmış kaplardan daha az tehlikelidir. Tankta gerçekleştirilen burulmanın tipine ve şemasına bağlı olarak tankın patlayıcı özelliklerini belirlemek mümkündür. Şekil 1.16 ve 1.17'de iki farklı hasar modu gösterilmektedir. Burada çelik borunun patlaması sonucu araç hasar görmüşken, bir gaz tüpünün patlaması sonucu oluşan hasar sadece arabanın arkasında meydana gelmiştir. Şekil 1.17'de sürücünün hayatını tehdit eden kritik bir durum oluşmamıştır.

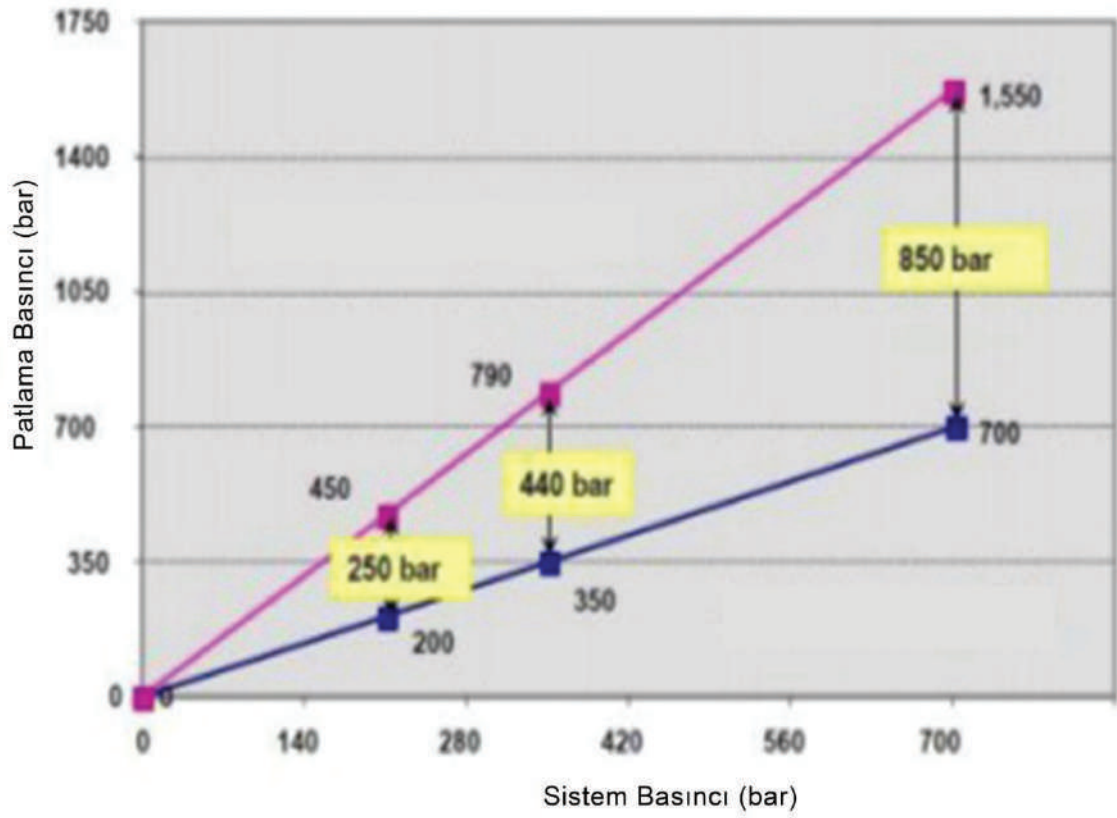


Şekil 1.21. Çelik tankın patlaması sonucu aracın görüntüsü (Atagün, 2017)



Şekil 1.22. CNG tankının patlaması sonucunda araçta meydana gelen hasarı gösterir görsel (Atagün, 2017)

Şekil 1.18'de görüldüğü üzere, günümüzde LNG tanklarında kullanılan basınç ve patlama basıncı aralıklarını gösteren bir basınç tablosu bulunmaktadır. Aşağıdaki basınç tablosuna göre maksimum çalışma basıncı 700 bar'dır.



Şekil 1.23. CNG tanklarının çalışma ve patlama basınçlarını gösterir grafik (Atagün, 2017)

2. LİTTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmada, Atagün ve arkadaşları; bir filaman sarma makinesinin detaylı tasarımını, kompozit basınçlı boruların tasarımını ve yapısal performanslarının sayısal analizini ele almışlardır. Boru kubbesinin geometrisi, yapının performansının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle özellikle tasarımda optimal kubbe geometrisine ulaşmak için süreklilik teoremi ve ağ analizi yöntemleri kullanılmıştır. Radar yarıçapına göre oluşturulan optimal kubbe geometrisi denklemler kullanılarak elde edilmiş ve elde edilen borunun geometrisi tamamlanmıştır. Çalışma sırasında elde edilen borunun geometrisi üzerinde çeşitli yapısal ve modelleme analizleri yapılarak boruların yapısal davranışı ve sınırları belirlenmiştir. Borular için önemli olan patlama basıncı değeri kubbe geometrisinin detaylandırma derecesi ile ilgili olduğundan, boruda yapısal deformasyonun kubbenin yanından (nervür) olmaması arzu edilir. Damlalığın ucundaki herhangi bir hasar, aşırı iç basınç altındaki tüpün roket gibi uçmasına neden olabilir. Bu nedenle tasarımlarda kompozit basınçlı boruların sınır yükünün üzerindeki değerlerde silindirik bölgenin dışına kıvrılması beklenmektedir. (Atagün, 2017)

Bu proje kapsamında kompozit malzemeler incelenmiştir. Kompozit kullanılarak bir malzeme yapılacaksa, reçine ve elyaf gibi her biri kendine özgü özelliklere sahip birçok değişken vardır. Ancak nihai ürün sadece bu iki değişkenin özelliklerine değil, aynı zamanda kompozitin nasıl üretildiğine de bağlıdır ve malzemenin nihai özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Bu çalışmada, kompozit yapmak için bir yöntem olarak filament büküm adı verilen bir elyaf büküm tekniği kullanılmıştır. Bu yöntem, güçlü ve hafif parçaların üretimine imkân verdiği için havacılıktan askeriye kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, fiber adsorpsiyon ile elde edilen kompozit malzemelerin kullanıldığı alanlardan biri olan basınçlı kap uygulamaları alanında araştırmalar yapılmıştır. Çeşitli yükler altında lifli üretim teknolojisi kullanılarak üretilen kompozit yapıya sahip yüksek basınçlı kapların modelleri incelenmiştir. (Pehlivan, 2017)

Bu çalışmada günümüzde birçok alanda kullanılan ve sıcaklık ve basınç değişimlerinde farklı performans gösteren basınçlı kaplar incelenmiştir. Basınçlı kaplar, özellikle yapıldıkları malzemenin cinsine bağlı olarak, fiziksel özellikler nedeniyle farklılık gösterir. Malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olan yapıların çeşitli yükler altındaki davranışı analiz edilirken, deney sonuçları iç basınç altında basınçlı kaplara

hidrostatik basınç testleri uygulanarak doğrulanmıştır. Basınçlı kaplar insan sağlığı ve güvenliğini etkileyebilecek potansiyel tehlikeler içerdiğinden kullanım öncesi oluşabilecek problemler belirlenmeli ve giderilmelidir. Bu, basınçlı kap tasarımının kapsamlı ve ayrıntılı bir analizini gerektirir ve sistemi etkileyebilecek tüm yükleri doğru bir şekilde tanımlar ve hesaplamalarda dikkate alınır. Bu nedenle, eksenel simetrik bir yüke maruz kalan silindirik bir basınçlı kap için teorik yaklaşımın çözümünü ve Solidworks yazılımındaki Von-Mises gerilme analizinden elde edilen yer değiştirmeleri ve basınçları karşılaştırmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde analiz yapılırken “COSMOXpress Analiz Sihirbazı” bilgisayar programı kullanılmıştır. (Mestan, 2010)

Akademik çalışmalarda; filamet sargı yöntemiyle üretilmiş silindirik boruların termal yük ve iç basınç altında düzlem gerilimlerine göre hasar analizler uygulanmış ve anti simetrik ve simetrik tabaka düzenlerinin dayanıma etkileri incelenmiştir. Çalışmalarda takviye malzemesi olarak cam elyaf, matris malzemesi olarak epoksi kullanılmıştır. Bu incelemeler sonucunda basınçlı kabın sıcaklık arttığında, patlama basıncının azaldığı gözlemlenmiştir. (Akçay 2005)

Bir başka çalışmada ise Çelik astarlı ve cam elyafı epoksi reçine malzemesi çevresel ve teğetsel kompozit malzeme sargılı basınçlı kap tasarımı yapılmıştır. Bu basınçlı kapların tasarımları yapılırken sıkıştırılmış doğalgaz depolama tankları referans alınmıştır. Farklı basınç değerlerinde kap cidarında oluşan eksenel ve çevresel gerilmeler incelenmiştir. Bunun yanında prototip ile reel hayattaki sonuçlar ve sanal ortamda ki analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. (J., 2009)

Bir diğer akademik çalışmada uydu tepki sisteminde kullanılacak bir tankın tasarımı yapılarak, sanal ortamda analizi gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım yapılırken, aynı hacimde ki metal tanklardan daha hafif olmasına istenmiştir. Tasarımda ki model alüminyum metal astara sarılmış kompozit tabakalardan oluşmaktadır. Kalın cidarlı silindirlerin kullanımından önce cidarda artık gerilme işlemine ofofretaj denir. Bu gerilmeler yüksek basınç altında ki işlerde birazını elimine etmektedir. Bu sayede basınçlı kapların basınç taşıma kapasiteleri artmaktadır. Otofretaj mekanik ve hidrolik olarak yapılabilir. Hidrolik ofofretaj mekanik ofofretaja göre daha maliyetlidir. Kompozit sargılı basınçlı kabı oluşturan parçaların gerilim, gerilim analizleri, sargı için en optimum açının tespit edilebilmesi, ofofretaj, titreşim ve model lifi analizleri alüminyum astarda gerçekleştirilecek hasar durumları ve yorulma analizleri yapılarak sayısal değerler tespit

edilmiştir. Bu hasarların belirlenmesinde Ta-sai-Wu, Hashin ve Tsai-Hill kriterleri kullanılmıştır. (ÇETİN, 2014).

Bir başka çalışmada çalışma esnasında zaman zaman çevresel gerilimlere maruz kalan silindirlere patlama basıncını tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada HY 225 sertleştiricisi ile CY 225 epoksi karıştırılmış ve oryantasyon açısı 55° olarak sarılmıştır. İçi boş ve sıcaklıkları farklı olarak su dolu kompozit silindirlere tekrarlı ve tek seferli darbeler yapılmıştır. Çalışmada darbe testi yanında statik basınç testi de yapılmıştır. Sonuç olarak darbe enerjisi ve sıcaklık yükseldikçe patlama basıncının azaldığı gözlemlenmiştir. Tekrar sayısı bu sonucu değiştirmemektedir. Çalışmada darbe uygulanmamış numunelerin sonlu elemanlar analizleri üzerine de çalışılmıştır. (Demir)

İncelenen başka çalışmada ince cidarlı basınçlı kaplarda iki farklı çelik için basınç altında gerilme analizleri değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar programı ile tasarımlar yapılmıştır. Üç boyutlu modeller iki farklı şekilde incelenmiştir. Kap üzerinde hasarlı olan bölgeler de maksimum gerilme kriterleri yardımıyla patlama basınçları bulunmuştur. Hasar sonuçları Von-Mises kriterleri ile değerlendirilmiştir. İnce cidarlı basınçlı kapların tasarımsal etkilerin önemi sonlu elemanlar analizinde gözlemlenmiştir. Patlama basıncının analitik sonuçlara göre analiz de daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. (ERUSLU, 2008)

Bir başka çalışma basınç altında filament sargılı boruların yorulma davranışlarını incelemeyi amaçlamıştır. Sargılı borular cam elyaf ve epoksiden $\pm 75^\circ$ helisel sargı yöntemiyle 4 tabakadan elde edilmiştir. Testler 0,42 Hz frekansta, R:0,05 gerilme oranında ve ASTM D-2992 standartında yapılmıştır. Sızıntı, parçalanma testleri sonucun ile hasar ilerlemesi ne bakılarak dayanım-zaman grafikleri oluşturulmuştur. (Gemi 2009).

Bir başka akademik çalışmada ise dikişsiz metal astarlı ve kompozit malzeme sargılı basınçlı kap tasarımı yapılmıştır. Bu tanklar tenüz ülkemizde imal edilmemektedir. Tasarlanan basınçlı kaplar alüminyum malzemedenden olacak şekilde metal astarlı, Kevlar-49 elyaf kumaşının astar üzerine kompozit sargı yapılarak oluşturulmuştur. Bu kompozit sargı ile 500 bar iç basınca dayanım amaçlanmıştır. Bu tankın stardartında servis basıncı 220 bar'dır. Tankın ön tasarım parametleri katman teorisi ve ağ analizi ile belirlenmiştir. Sonrasında sonlu eleman programları ile basınçlı tank sayısal biçimde modellenmiştir. Sargı açılarını kusursuz biçimde tanımlayabilmek için eleman koordinat sistemi

yönlendirilmiştir. Analizde Tsai-Wu kriterlerinde yararlanılmış ve elyaf hasar dayanımı hesaba katılmıştır. Analizler sonucu gerekli standartın elde edilebilmesi için 4,55 mm cidar kalınlığı olması, 1,8 mm teğetsel ve 0,9 mm helisel olmak üzere 2,6 kompozit malzeme kalınlığında elyaf düzenine sahip olması gerektiği değerlendirilmiştir. (E.)

Farklı bir çalışmada ise farklı tabaka düzenleri için kompozit basınçlı kapların dayanımları reelde ve sanal ortamda incelenmiştir. Bunun sonucunda basınçlı kabın hasara uğramasında en büyük etkenin ilk tabaka olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada grafit elyaf, ve epoksili basınçlı kaplar kullanılmıştır. Sonuç değerlerine bakıldığında analitik analizlerde ilk tabaka patlama basıncı, reelde olduğundan oldukça yüksektir. Reel deneylerde değer aşağıda kalmaktadır. Bunun sonucunda ilk tabaka hasar teorisinin tasarım için önemli bir teori olduğu belirlenmiştir. (W.)

İncelenen diğer bir çalışmada iç basınç altında metal astara sahip kompozit sargılı basınçlı tankın cidarında meydana gelen gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri farklı tabaka düzenlerin de hesaplamışlardır. Bu çalışma da aynı zamanda farklı kompozit malzemeler kullanılmıştır. Bunun yanında analitik çalışmalar, reel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Analizler de Tsai-Wu hasar kriterlerinden yararlanılmıştır. Analizlere göre helis sarım açısı düşürülürse patlama basıncı olumlu olarak etkilenmektedir. Reel çalışmalar ile analitik çalışmalar da ki patlama basınç değerleri benzemektedir. Analitik çalışmalarda basınçlı kabın silindirik kısmı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Reelde yapılan çalışmalarda kevlar 49 elyaf, epoksi ve karbon elyaf, epoksiden üretilen metal astarlı iki tane 6 litrelik prototip kullanılmıştır. (Lifshitz, 1995)

(Önder, 2009) akademik çalışmasında, cam elyaf, epoksi reçine ile anti-simetrik ve simetrik tabakalı ince cidarlı üretilen kompozitlerin farklı açılarda ki patlama basınçları incelenmiş bunun sonucunda en uygun açı değerlendirilmiştir. Yani kompozit borularda filament sargılı açılarının etkileri değerlendirilmiştir. S.G. Lekhnitskii teorisi sayısal çözüm yöntemi kapta oluşan hasar durumunun tespitinde kullanılmıştır. Aynı ısı altında farklı açılarının etkileri bu teori ile hesaplanmıştır. Hasar kontrolünde Tsai-Wu hasar kriteri kullanılmıştır. Bu çalışmada ki çıkan sonuçta helisel sargı yöntemi ile üretilen kompozit borularda en optimum sarım açısının ortalama 55° olduğu, tek açıda sargı yöntemiyle üretilen borularda ise ortalama 90° olduğu gözlemlenmiştir.

Bir başka çalışmada hidrotermal gerilmeler altında kalın ve ince cidarlara sahip çok tabakalı kompozit silindireler için gerilme analiz yöntemi geliştirilmiştir. Tabakalar farklı açılarda anti-simetrik ve simetrik olarak tasarlanmıştır. Analizler yapılırken düzlem gerilme durumu ve boru uçlarının açık veya kapalı olduğu sınır şartı değerlendirilmiştir. Isı yüklemeleri için parabolik ve üniform sıcaklık dağılımları tercih edilmiştir. Tüm integrasyon değerleri normal yönünde ki şekil değiştirmelerden ve radyal gerilmelerden elde edilmiştir. Bir cam elyaf, epoksi kompozit üzerinde hidrotermal özelliklerin yanında diğer mekanik özelliklerde bulunmuştur. Analiz sonucu elde edilen sonlu eleman çözümlerinin, analitik sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. (Sayman, 2011)

Gerçekleştirilen bir başka çalışmada plastik astarlı, ince cidara sahip, anti simetrik tabakalı basınç kabının, farklı sıcaklıklar altında tabakada meydana gelen ilk hasar ve en yüksek basınç için en uygun sarım açısı incelenmiştir. Kompozit basınç kabının silindirik bölgesi ele alınmıştır. Deneysel çalışmalarda ve SEM’de en uygun sarım açısı tespit edilmeye çalışılmıştır. Numune cam elyaf, epoksi malzeme ile üretilmiş, uçları kapatılarak statik basınç testlerine tabi tutulmuş, tes cihazı PLC kontrollü olarak uygulanmıştır. Çalışmada filament sargı yönetimiyle üretilmiş plastik astarlı numunenin farklı sıcaklık değerlerinde ve sarım açılarının da ki durumları incelenmiştir. Bu çalışmada Lekhnitskii teorisi kullanılmıştır. Bu teori kompozit basınçlı kaptaki meydana gelen ilk tabakada ki hasarı tespit etmek için geliştirilen sayısal çözüm metodudur. Bu yöntem ile aynı ısısal ve hava basıncı etkilerin sarım açılarının sonuçları değerlendirilmiştir. Analitik sonuçlar Tsai-Wu hasar kriterleri ve maksimum gerilme teorisinden edilmektedir. Çalışmalar sonucunda tabakalarda oluşan basınç değerleri karşılaştırılmıştır. Kompozit malzemenin mekanik ve termal özellikleri kullanılmıştır. Sonuçlar sonlu eleman analizleri programları ile karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar değerlendirilmiştir. Değerlendirilen sonuçlarda ısı etkisinin patlama basıncında fazla bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Helisel sargı yöntemi ile üretilen kaplarda basınç altında en uygun açının ortama 55° olduğu belirlenmiştir. (KARADOĞAN & YILDIRIM)

(Yıldırım 2012) çalışmasında, cisimlerin mukavemetini artırmak için malzeme içerisinde basınç oluşturarak veya malzeme seçimi ile mukavemet artış durumlarını incelemiştir. Temel amaç tasarlanmış ürün içerisinde basınç hücreleri meydana getirerek mukavemet artış durumunu değerlendirmektir. Çalışmada ince cidara sahip silindir şeklinde alüminyum tüpler içerisine basınçlı hava yerleştirilerek farklı mukavemet ve

gerilme testleri yapılmıştır. Bu çalışmalarda analitik hesaplamalar için sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Çıkarılan sonuçlar birbirleri ile mukayese edilmiştir. Sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra reel hayatta kullanılabileceğinin ispatı için gerçek modeller üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile çalışmalar ve analizler gerçekleştirilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Karbon Elyaf

Organik kökenli hammaddelere ısı enerjisi verilmesi ile karbon atomu hariç diğer atomları uzaklaşmaktadır. Bu sayede karbon atomlarından filamentler üretilmektedir. Kristalizasyona uğrayan filamentlerden ise yüksek dayanıma sahip lifler üretilmektedir. Bu lifler karbon elyaf olarak tanımlanır. Karbon lifleri genellikle poliakrilnitril liflerinden, katran tortusu, zift, polivinilden klorür ve bitkisel esaslı hammaddelerden elde edilmektedir. Elde edilen liflerin özellikleri üretimdeki işlem sıcaklığına, hammaddeye ve üretim proseslerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Farklı özellikteki liflerin kullanım alanları da farklıdır.

3.2. Karbon Lifinin Özellikleri

Karbon liflerde yoğunluk, üretimde kullanılan işlem sıcaklığına ve hammaddeye göre değişmektedir. Üretimde kullanılan hammadde yoğunlukları $1,6 \text{ g/cm}^3$ ile $2,2 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. Lif üretiminden sonra hammaddeye göre bir miktar yoğunluk artışı olmaktadır. Üretilen liflerdeki artış grafitizasyon sıcaklığına bağlı olarak artış göstermektedir.

Karbon liflerden üretilen kompozit malzemelerin, 1020 çelik malzemeye göre 0,25 kat daha hafif, 5 kat daha mukavemetli olduğu gözlenmiştir. 6061 alüminyum malzemeye göre ise 1,5 kat daha hafif ve 7 kat daha fazla mukavemete sahiptir.

Karbon lifler diğer özelliklerde olduğu gibi yorulmada da diğer metallere göre daha iyi özellik göstermektedir. Mukavemet, hafiflik, yorulma direnci özelliklerinin yanı sıra, korozyon direnci, yüksek ısı direnci ve elektriksel iletkenlik özellikleri de sıralanabilir. Katran esaslı karbon liflerin elektriksel iletkenliği bakır malzemesinin elektriksel iletkenliğine nazaran 3 kat daha iyidir. Aynı zamanda yüksek ısıda ısı direnci sahip oldukları için uçak frenlerinde ve roketlerde sıklıkla kullanılır.

Karbon liflerin özelliklerini etkileyen bir diğer husus ise kristalitlerin yerleşimleridir. Mikro yapıda bu yerleşimler incelendiğinde yatay veya dikey olabildiği gözlenmiştir. Kristalitler kurdeleye benzemektedir. Bu kristalitler eksene paralel olarak yerleşmiş, uzunluğu ve düzlüğü de lif özelliklerinde etki göstermektedir. Boeing, Airbus

gibi birçok uçak üreticisi, uzay endüstrisinde ise NASA, karbon lifleri sıklıkla kullanmaktadır. Bu liflerin üretimi Türkiye’de de yapılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan karbon lifinin teknik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir;

Çizelge 3.1. 24 K tipi karbon elyaf ip teknik özellikleri

Özellikler	Birim	Değer
Elyaf Tipi	Karbon	HT
Filament Sayısı		24000
Linear Yoğunluk	Dtex	1600
Sizing Oranı	%	1,5
Kopmadaki Uzama	%	1,5
Çekme Dayanımı	MPa	3950
Elastisite Modülü	GPa	238
Yoğunluk	g/cm ³	1,77
Çap	micron	7
Elektrik İletkenliği	ohm cm	1,6*10-3
Karbon Oranı	%	93
Bobin Ağırlığı	kg	4



Şekil 3.1. Karbon elyaf ip 24K

3.3. Reçine

Matris malzemesi olarak Hexion Marka LR160 epoksi reçine ve LH160 sertleştirici birlikte 4/1 oranında kullanılmaktadır. Aşağıdaki tablolarda matris malzemesiyle ilgili detaylı bilgi mevcuttur.

Çizelge 3.2. Reçine LH160 teknik özellikleri

Yoğunluk g/cm ³	1,13-1,17
Vizkosite mPas	700-900
Epoksi Eşdeğeri gr/eşdeğer	166-182
Epoksi Değeri eşdeğer/100gr	0,55-0,60
Refraktör İndeksi	1,5480-1,5530
Eğilme Mukavemeti (MPa)	110-140
Çekme Mukavemeti (MPa)	3.2-3.5
Basma Mukavemeti (MPa)	80-100
Poisson Oranı	0,36

Çizelge 3.3. Sertleştirici H160 teknik özellikleri

Yoğunluk (gr/cm ³)	0,96-1,00
Vizkosite (mPas)	10-50
Amin Değeri (mgr KOH/gr)	550-650
Refraktör İndeksi	1,5200-1,5210

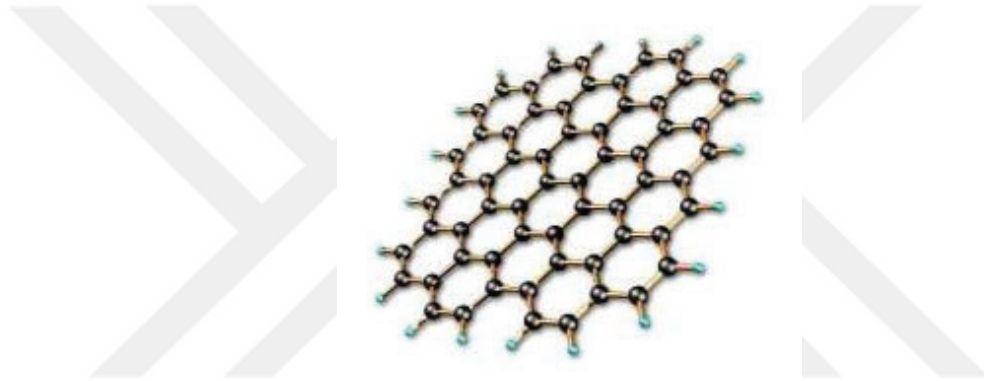
3.4. Karbon Nanotüpler (KNT)

1991 yılında keşfedilen nano boyuttaki karbon partiküller karbon nanotüpler olarak ifade edilir. Karbon nanotüpler karbon atomlarından oluşan bal peteği biçimindeki levhanın dairesel sarılması ile oluşmaktadır. Karbon atomları sadece altıgen geometri oluşturmaktadır ve birbirlerine sp² şeklinde bağlanırlar. Karbon nanotüpler max. bir kaç mikron uzunluğunda olabilmektedir.

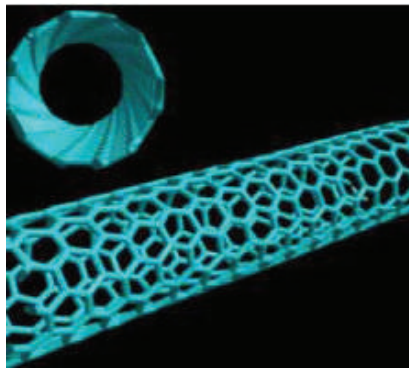
Karbon, grafit, elmas, fulleren gibi kristallerin, amorf formları ile malzemeler arasında önemli bir yere sahiptir. Karbon nanotüpler kimyasal bileşimleri ile grafitte

benzemektedir. Fakat izotropik yapıları ve ağ yapıları diğer karbon yapılardan ayıran en önemli özelliklerdir. (Celep,2007)

Tek bir grafit levhanın sarılmasından oluşan tüpler tek duvarlı karbon nanotüpler olarak adlandırılır. Eksenli olarak iç içe geçmiş çoklu karbon silindirler ise çoklu karbon nanotüpler olarak adlandırılır. Çoklu karbon nanotüpler, tek duvarlı nanotüplere göre daha çok mukavemet gösterir. Çok duvarlı karbon nanotüplerin üretimi, tek duvarlılara göre daha ekonomiktir. Silindir şeklinde karbonlar allotropdur ve sadece karbon atomundan oluşur. (Örs, 2009)



Şekil 3.2. Grafin tabakası (Örs, 2009)



Şekil 3.3. Karbon nanotüp (Örs, 2009)

Karbon nanotüplerin kümelenme olmadan polimer matris içerisinde düzgün dağılımı oldukça yüksek mukavemete sahip nano kompozitleri meydana getirir. Bu yapıda karbon nanotüpler ile polimer matris güçlü bir biçimde etkileşim gösterir. Karbon nanotüpler ile polimer matrisin etkileşimindeki zorluklar yüzünden karbon nanotüpler

kompozitlerde her zaman kullanılamamaktadır. Bu da karbon nanotüplerin avantajlarının kullanılmadığı anlamına gelmektedir. Karbon nanotüpün yüzeyinin kovalent bağlı ve bağımsız modifiyesi, karbon nanotüpün çözünürlüğünün ve ıslatılabilirliğinin geliştirilmesi için kullanılmaktadır. Kovalent bağımsız yaklaşım yüzey modifiyesini, polimer absorpsiyonunu içermektedir. Emülsiyon polimerizasyonla üretilen veya in-situ halka açılması polimerizasyonu ile üretilen polimerler burada kullanılan polimerlerin şeklindedir. Karbon nanotüpün bozuk olmayan mükemmel yapısı ve mekanik özelliklerinin değişmeden kalması kovalent bağımsız yaklaşımın bir avantajıdır. Karbon nanotüpler ile matris arasındaki etkileşimin zayıf olması, polimer matristen karbon nanotüp dolgusuna yük transferinin iyi olmamasına sebebiyet verir ve bu da kovalent bağımsız yaklaşımın en önemli dezavantajlarından biridir. (Chen, 2005).

İletken nanokompozitler karbon nanotüp içermesi ile yüksek elektriksel iletkenlik ve üstün mekanik özellikler gösterirler. En büyük dezavantajları ise, kompozit içerisindeki arayüzey etkileşimlerinin ve dağılımlarının yetersiz olması, kimyasal olarak aktif olmayan yüzeye sahip olmalarıdır. Bu dezavantajlar üretilen kompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerinin azalmasına sebebiyet vermektedir. Bazı akademik çalışmalarda karbon nanotüp katkısı ile mekanik özelliklerin düştüğü gözlemlenmiştir. Karbon nanotüpler içi boş yapılar oldukları için orantısız en-boy oranı, bükme, burulma, basınç altında mukavemet gösteremezler.

3.4.1. Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri

Düzlemsel bal peteği kafes yapısını oluşturan karbon atomlarının her biri komşu atomlarına güçlü bir kimyasal bağ ile bağlanırlar. Bu bağlanmalardan dolayı grafitin esneklik katsayısı fazladır. Çok duvarlı karbon nanotüpler en yüksek mukavemete sahip karbon nanotüplerdir. Bu yapılar çeliklere göre daha mukavemetli ve kuvvete karşı dirençlidir. Yapılan akademik çalışmalar daha küçük çaplı çok duvarlı karbon nanotüpün young modülü, grafitin young modülünden yüksektir. Küçük çaplı karbon nanotüpler grafit fiberlere göre, daha üstün mekanik özelliklere sahiptir. Yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve yüksek esneklik küçük çaplı karbon nanotüplerin en önemli özellikleridir.

Nanotüplerin kolay incelenememesi ve üretimin zor olması nedeniyle karbon nanotüplerin mekanik özelliklerinin deneysel çalışmalardan çok daha yüksek olduğu

düşünülmektedir. (Hancer, 2010). Nanotüpler bükme ve halka haline getirme gibi şekil değişiklikleri yapabilmektedir. Karbon nanotüplerin bükme işlemine tabi tutulması ile elastiklik modülleri artar. Bu malzemeler çeliklere kıyasla 1000 kat daha tok ve elmas kadar yüksek elastiklik modülüne sahip olurlar. Elastiklik modülü maksimum 1,4 TPa kadardır. Karbon nanotüpler belirli bir kuvvet kadar sıkıştırıldıkları zaman eski haline dönebilmektedir. Yüksek kuvvet altında sıkıştırıldıkları zaman bükülme kalıcı olmaktadır.

Karbon nanotüpler karbon atomları arasındaki gerilme direnci ve sp² bağı açısından en sert malzemelerdir. Karbon nanotüplerin elastiklik özellikleri yüksek olsa da, aşırı çekilme ile plastik bozulma görülür. Karbon nanotüpler elmas kadar yüksek mukavemete sahiptir. Çekme mukavemetleri 30 GPa'a kadar çıkabilmektedir. Çeliklere kıyasla 100 kat çekme mukavemetine ve 1/6 yoğunluğa sahiptir. Isıl dayanımlar 300°C'ye kadar çıkabilmektedir. (Hancer, 2010)

3.4.2. Karbon nanotüplerin elektriksel özellikleri

Grafitler elektriksel özellikleri nedeniyle metaller ile yarı iletkenler arasında yer almaktadır. Metalik nanotüpler çok iyi iletkenlerdir. Karbon nanotüplerin elektriksel özellikleri harici manyetik alanlar ile denetlenebilmektedir. Karbon nanotüplerin elektriksel özellikleri çaplarına bağlı olduğu için test etmek için yapılan deneyler zordur. Karbon nanotüpün simetrisi ile ilgili bilgilerin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra elektronik ve optik nano ölçeklerle ölçüm yapmak zor bir işlemdir. Yapılan deneysel çalışmalar nanotüplerin buldukları ortamdaki yönelimlerini tespit etmeyi amaçlamaktadır.

3.4.3. Karbon nanotüplerin ısısal özellikleri

Karbon nanotüpler mekanik ve elektronik özellikleri kadar ısısal özellikleri ile de ilgi çekmektedir. Küçük boyutlu oldukları için kuantum etkileri oldukça önemlidir. Kuantum etkilerinin kanıtı olarak düşük sıcaklık, ısısal iletkenlik, özgül ısı sıralanabilir. Karbon nanotüpte, atomların komşuları arasındaki etkileşimi, düşük sıcaklık ve özgül ısı hesaba katılarak foton sayısı saptanabilir. Akademik çalışmalara ve teorik tahminlere göre karbon nanotüplerin ısısal özellikleri, elmas ve grafitte nazaran daha yüksektir.

Ölçümler çok duvarlı karbon nanotüplerde 300 W/mK'nın, tek duvarlı karbon nanotüplerde ise 200-300 W/mK'nın üstünde olduğu gözlemlenmiştir.

3.4.4. Karbon nanotüplerin uygulama alanları

Elektronik, mekanik, ısııl açıdan önemli avantajları bulunan karbon nanotüplerin pek çok yerde kullanım imkânı bulunmaktadır. Karbon nanotüplerin en önemli kullanım alanları arasında karbon nanotüp katkılı kompozitler, tıp endüstrisi uygulamaları, hidrojen gibi gazların depolama ünitelerinin imalatı, elektronik parçaların imatları bulunmaktadır.

Karbon nanotüp polimer kompozitler, karbon nanotüp kompozitlerin en önemlisidir. Karbon nanotüp polimer kompozitler ile elektrik iletkenliği sağlayan malzemeler üretilebilmektedir. Üretilen malzemeye %5 oranında karbon nanotüp eklendiğinde malzemenin elektrik iletkenliği 0,01 ile 0,1 S olmaktadır. (Yağlıkcı, 2012)

Karbon nanotüpler aynı zamanda elektrokimyasal cihaz üretiminde kullanılmaktadır. Bunun en önemli sebebi gözeneklik sağladığı elektrokimyasal özelliktir. Bunların yanı sıra süper kapasitör ve elektrot yapımında karbon nanotüpler sıklıkla kullanılmaktadır. Hidrojen gazının depolanmasında da ön plana çıkan karbon nanotüpler geniş yüzey alanı sayesinde tercih edilmektedir. Tıp endüstrisinde ise hedefe ilaç taşıyıcı ajanlar, enzimatik biyosensörler olarak karbon nanotüpler kullanılmaktadır. Birçok alanda kullanıma sahip karbon nanotüpler elektronik cihazların yapımında da kullanılmaktadır. Mikrodalga jeneratörleri ve düz ekranlar bunlara örnek olarak verilebilir.

Bu çalışmamızda Multi(Çoğul) Duvarlı 10-20 nm %95 saflık °C li Karbon nanotüpler kullanılmıştır, kullanılan nanotüpe ait teknik özellikler çizelge 3.4'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.4. Karbon nanotüplerin teknik özellikleri

Saflık (%)	>%95 (karbon nanotüp) >%97 (karbon içeriği)
Dış Çap	10-20 nm
İç Çap	5-10 nm
Uzunluk	10-30 µm

Yüzey Alanı	>200 m ² /g
Renk	Siyah
Ash	Kütlece <0%1.5
Elektrik İletkenliği	>100 S/cm
Özkütle(Tap)	0.22 g/cm ³
Özkütle(True)	~2,1 g/cm ³

3.5. Basıncı Kapların Üretilmesi

Bu çalışmamızda karbon elyaf, epoksi ve karbon nanotüp takviyesi ile filaman sarım tekniği yaş sargı yöntemi ile $\pm 55^\circ$ sarım yapılarak farklı nanotüp takviye oranlarında kompozit tüpler üretilmiştir. Kompozit tüpü oluşturan karbon filament malzemesi 17 μm çapına sahip olup, matris malzemeleri olarak ise reçine LR160 Hexion, sertleştirici Hardener MGS LH160, Multi(Çoğul) Duvarlı Karbon nanotüpler 10-20 nm %95 kullanılmıştır.

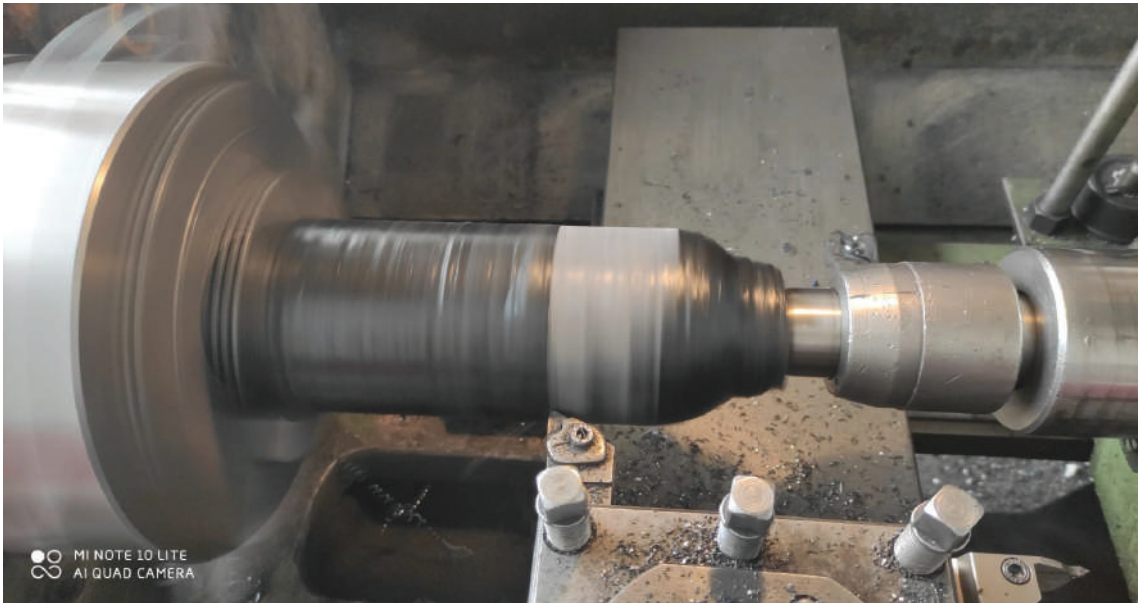


Şekil 3.4. Kullanılan nanotüp, reçine ve sertleştirici ambalaj görüntüleri



Şekil 3.5. Sarım öncesi makineye bağlanmış basınçlı kabın (liner) görüntüsü

Bu yöntem ve teknikte; reçine havuzundan geçirilen karbon elyaflar 72 mm çapında 30 cm uzunluğundaki plastik gömleklerin (liner) üzerine $\pm 55^\circ$ açı yapacak şekilde sarılmıştır. İstenilen dış çap olan 94,7 mm elde edilene kadar sarıma devam edilmiştir. Bu sarımlar ile farklı oranlarda karbon nanotüp takviyesine sahip üçer farklı parametreye sahip numuneler üretilmiştir. Bu numunelerin matris oranları çizelge 4.1’de verilmiştir. Üretilen numuneler dış çap 94 mm olacak şekilde universal torna vasıtasıyla yüzey düzeltme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.6. Üretilen numunenin yüzey düzeltme işlemi

Yüzey düzeltme işleminden sonra hazır hale gelen numunelere iç basınç testlerine dayanıklı olacak şekilde test düzeneği aparatları hazırlanmıştır. Test düzenek aparatlarını numuneleri bağlamak amacıyla universal torna ile dış çekme işlemi yapılmıştır, numunelere iç basınç test düzeneğine bağlantı yapılması için universal torna ile bağlantı ekipmanları üretilerek, her numunenin üretiminde kullanılan reçine karışımlarıyla sızdırmazlık sağlanması amacıyla dış dibine uygulanarak sabitleme yapılmıştır. Sabitleme sonrasında kürlenme süresi beklenerek test düzeneğine sızdırmaz teflon bant uygulanarak test düzenekleri kurulmuştur.

3.6. Deney Düzeneği

Deney düzeneği için kullanılan ekipmanlar şöyledir;

Hidrolik Pompa; İç Basınç altında yüzey şekil değişimlerinin incelenmesi amacıyla iç basınç oluşturmada Anca ACP-01 manuel yağ pompası kullanılmıştır. Yağ pompasına ait teknik özellikler çizelge 3.5 'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.5. Manuel yağ pompası teknik özellikleri

Model	Pompa Tipi	Gövde	Kullanılabilir Yağ Kapasitesi (lt)	Tank Yağ Kapasitesi	Yüksek Basınç Debişi (cm ³)	Yüksek Basınç Piston Çapı (mm)	Çalışma Boyu (mm)	Düşük Basınç Debisi (cm ³)	Düşük Basınç Piston Çapı (mm)	Maks. Kol Kuvveti	Bağlantı Tipi	Manometre	Çalışma Basıncı
AC P-01	Tek Etkili Çift Hızlı	Al	0,5	0,7	0,8	7	21	10,3	25	29	3/8"-NPT	Q63,1000Bar	700 Bar

Datalogger; çalışma da D4 Micro-Measurements marka 4 kanallı dijital veri toplayıcı kullanılmıştır. RJ-45 konektörler ile 8 Hz örnekleme hızı ve usb arayüzü ile 0,125 saniye hız aralıklarıyla veriler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir.

Straingeyçler; Bu çalışmada m-Bond 200 takımı Straingeyç sabitleme yapıştırıcı takımı kullanılmıştır. M-Bond 200 takımı oda sıcaklığında anında kürlenmiş siyanoakrilat gerinim ölçer yapıştırıcı ve katalizör sıcak çevre koşullarında en yaygın kullanılan genel amaçlı yapıştırıcı özellikleri çizelge 3.6'da belirtilmiştir.

Çizelge 3.6. Genel amaçlı yapıştırıcı teknik özellikleri

Maksimum Uzama (75 Fahrenheit °C 'de % olarak gerinim)	5
Alt Sıcaklık Limiti (Fahrenheit °C)	-25
Minimum Kurlenme Sıcaklığı (Fahrenheit °C)	70
Kap Ömrü	3 ay
Raf Ömrü	1 yıl
Üst Sıcaklık Limiti (Fahrenheit °C)	150

Rozet; Çalışmada gerinim ölçer olarak CEA-06-062UR-120/P2 kodlu rozet ürün kullanılmıştır.

P2 modeli önceden takılmış ana telli kabloların CEA serisi gerinim ölçerlere eklenmesidir. P2 modelinde kurulum sırasında lehimleme ihtiyacı bulunmamaktadır. Kabloları renk kodlu, düz ve üç iletkenlidir. Aynı zamanda 30 gauge (0,255mm) kalınlığında, vinil yalıtımlı çok telli ve kalaylı bakır lehimli üretilmiştir. Kabloların her iletkeni 0,1 ohm/ft (0,35 ohm/m) nominal dirence sahiptir. Rozetlerin sıcaklık sınırı -60° ila $+180^{\circ}$ F (-50° ila $+80^{\circ}$ C)'dir.



Şekil 3.7. CEA-06-062UR-120/P2 kodlu rozet şeması

Deney düzeneği ve 0,32 cm et kalınlığına ve 11.5 cm çapına sahip 38 cm boyunda bir ince cidarlı silindirik basınçlı kaptan oluşmaktadır. Bunun yanı sıra ince cidarlı basınçlı kabın basıncını yükseltmek için yardımcı bir sistem bulunmaktadır. Yardımcı sistem de kabın basıncını yükseltmek için hidrolik el pompası kullanılmaktadır.

Kap çerperinde iç basınç sebebiyle oluşacak gerinim değerlerini ölçmek için gerinim ölçerler kullanılmaktadır. Bu gerinim ölçerler kabın dış yüzeyine özel yapıştırıcılar ile yapıştırılmıştır. Eksenel ve çevresel yönlerde oluşacak gerilmeler 1. ve 3. gerinim ölçerler ile ölçülürken silindir cidarında oluşabilecek kayma gerilmesi 1.2. ve 3. gerinim ölçerlerden okunan değerler ile hesaplanacaktır.

Gerinim ölçerlerin verdikleri direnç değerleri de yardımcı bir düzenek ile okunacaktır. Ayrıca kap içerisindeki basıncı ölçmek ve düzenli basınç artışları yapmak için hidrolik el pompasına entegre bir manometre kullanılmıştır.

Deneyde iç basınç etkisinde bulunan ince cidarlı basınçlı kapların eksenel ve çevresel gerinim değerlerinin gerinim ölçerler kullanılarak belirlenmesi ve doğrulanması amaçlanmıştır. İçi yağ dolu numuneler manuel hidrolik yağ pompasına sızdırmaz bant kullanılarak bağlanmıştır. Her bir numune üzerine üçlü gerinim ölçerler yapıştırılmıştır. Deney esnasında direnç verileri 0,125 ms aralıklarla ölçülerek anlık olarak bilgisayar ortamına kaydedilmiştir.



Şekil 3.8. Deney düzeneği

3.7. İç Basınç Altında Yüzey Şekil Değişimlerinin İncelenmesi

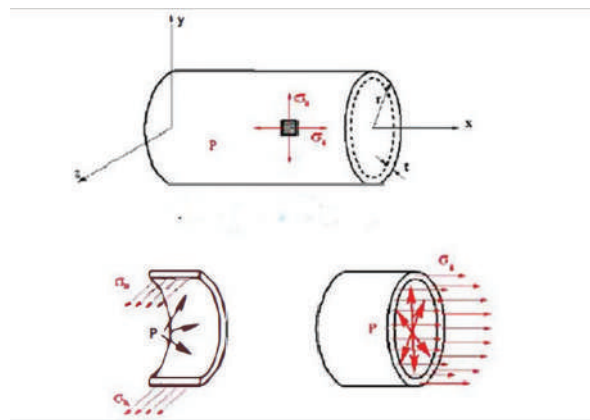
Malzemelerde meydana gelen yüzeydeki şekil değişikliklerini ölçmek için gerinim ölçerler kullanılır.

Gerinim ölçme işlemi için, gerinim ölçerler ölçüm yapılacak yüzeye özel yapıştırıcılar kullanılarak yapıştırılır. Gerinim analizinin yapılması için bu çalışmada üç gerinim değerinin okunması gereklidir. Özel durumlarda bir veya iki gerinim değeri de okunabilir.

3.8. İnce Cidarlı Silindirik Basınçlı Kaplardaki Gerilmeler

Küresel ve silindirik kaplar farklı endüstrilerde birçok alanda kullanılmaktadır. Bu kaplar genellikle basınçlı sıvı veya gaz taşımaktadır. Kapların içerisinde taşınan basınçlı sıvı veya gaz kap çeperinde her yönde bu basıncı ileterek çeperde gerilmeler oluşturmaktadır. Bu gerilmelerin büyüklüğü kabın geometrisine, boyutlarına ve iç basıncına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Silindirik basınçlı kaplar cidar kalınlığına göre, kalın cidarlı basınçlı kaplar ve ince cidarlı basınçlı kaplar şeklinde ikiye ayrılır. $r/t \geq 20$ oranı sağlandığında ince cidarlı silindirik basınçlı kap varsayımı geçerli olmaktadır. Bu varsayım orandaki “r” silindirin iç yarıçapı, “t” ise silindirin et kalınlığını ifade etmektedir.

Bu varsayımlara göre deneyde ince cidarlı silindirik kap kullanılmıştır. Bu sebepten, σ_n çevresel gerilme ve σ_a aksenal gerilmelerinin kalınlık boyunca, radyal yönde değişmedikleri kabul edilebilir.



Şekil 3.9. İnce cidarlı silindirik kap çevresel ve aksenal gerilmeler

İnce cidarlı silindirik basınçlı kaplar için aksenal ve çevresel doğrultudaki gerilim değerleri aşağıda verilen denklemlerden hesaplanabilir.

$$\sigma_n = \frac{Pr}{t} \quad \text{Çevresel gerilim (Pa)} \quad P = \text{Kap içerisindeki basınç (Pa)}$$

$$\sigma_a = \frac{Pr}{2t} \quad \text{Eksenel gerilim (Pa)} \quad r = \text{Silindirin iç yarıçapı (m)}$$

$$t = \text{Silindirin et kalınlığı (m)}$$

Deneyde kullanılan gerinim ölçer, dikdörtgen rozet şeklinde üç elemanlı bir gerinim ölçerdir. Bu rozetteki her bir eleman birbiri ile 45° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Birbirine dik olan iki eleman ince cidarlı kabın aksenal ve çevresel yönleri doğrultusunda yerleştirilerek yapıştırılmıştır. Aksenal uzama (ϵ_3) ve çevresel uzama (ϵ_1) aşağıdaki denklemlerden elde edilir.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_1 + \nu\epsilon_3) \quad \text{ve} \quad \sigma_3 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_3 + \nu\epsilon_1)$$

E: Malzeme esneklik modülü (Pa)

ν : Poisson oranı

σ_1 : Çevresel gerilme (Pa) ϵ_1 = Çevresel uzama

σ_3 : Eksenel gerilme (Pa) ϵ_3 = Eksenel uzama

Gerinim değerleri gerinim ölçerlerden gelen direnç değerlerinden aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \rightarrow k = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \rightarrow \epsilon = \frac{\Delta R/R}{k}$$

Bu formülde; R strain-gauge'in basınç verilmeden önceki direnci, ΔR basınç verildikten sonra strain-gauge'de oluşan direnç farkı, k değeri ise strain-gauge faktörünü ifade eder.

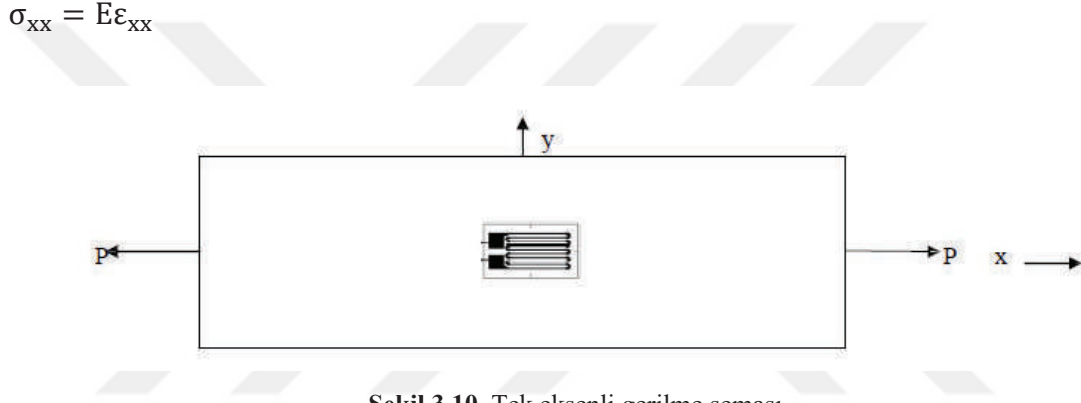
Strain-gauge faktörü (k), üretici şirketler tarafından belirlenmektedir. Genellikle gauge faktörü 2 olarak belirlenir fakat gauge'in uzunluğuna ve büyüklüğüne bağlı olarak 1,7 – 4 arasında değişebilir.

Aşağıdaki formül kullanılarak ise, gerinim ölçerlerden alınan voltaj değerleri kullanılarak gerinim değerleri hesaplanabilmektedir. Gerinim ölçerlerden okunan voltaj değerleri de Wheatstone köprüsü kurularak yardımcı bir düzenek ile okunur.

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{çıktı}}}{2.625}$$

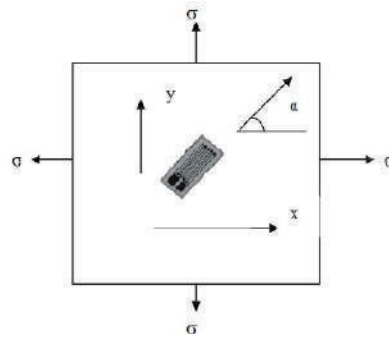
3.8.1. Tek eksenli gerilim durumu

Aşağıdaki şekilde de görüldüğü gibi sadece “x” yönünde gerilim bulunmaktadır. Bu yönde yerleştirilen gerinim ölçer ile bu yöndeki uzama elde edilir.



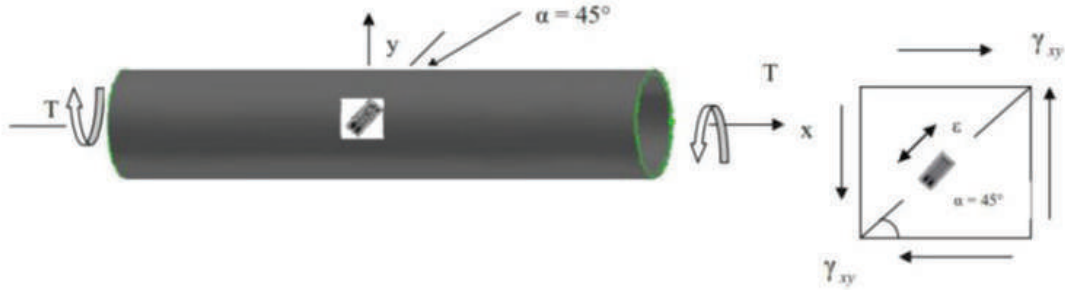
3.8.2. İzotropik gerilim durumu

Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi tek bir gerinim ölçer ile “x” yönündeki ve “y” yönündeki gerinim değerleri elde edilebilir. Bu durumda gerinim ölçer malzeme yüzeyine herhangi bir pozisyonda yerleştirilir. Gerinim değerlerinin elde edilmesi için aşağıdaki denklemler kullanılır.



$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{E \varepsilon}{1 - \nu}$$

-Sadece Burulma



Kayma gerilmesi elde edilmesi için, gerinim ölçer, asal gerilme yönlerinden biri doğrultusunda açılı bir biçimde yerleştirilir. Alınan değerler ile aşağıdaki denklemden maksimum kayma gerilmesi elde edilir.

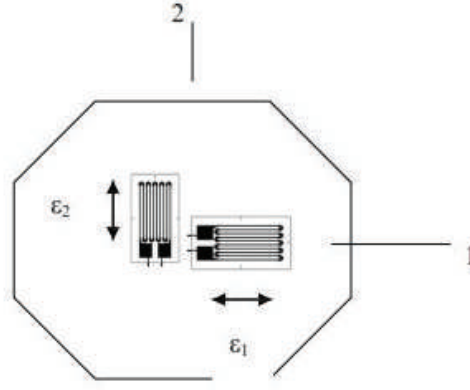
$$\tau_{xy} = \tau_{max} = G\gamma_{xy}$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon \quad (\varepsilon: \text{gerinim ölçerden okunan değer})$$

3.8.3. İki eksenli gerilim durumu

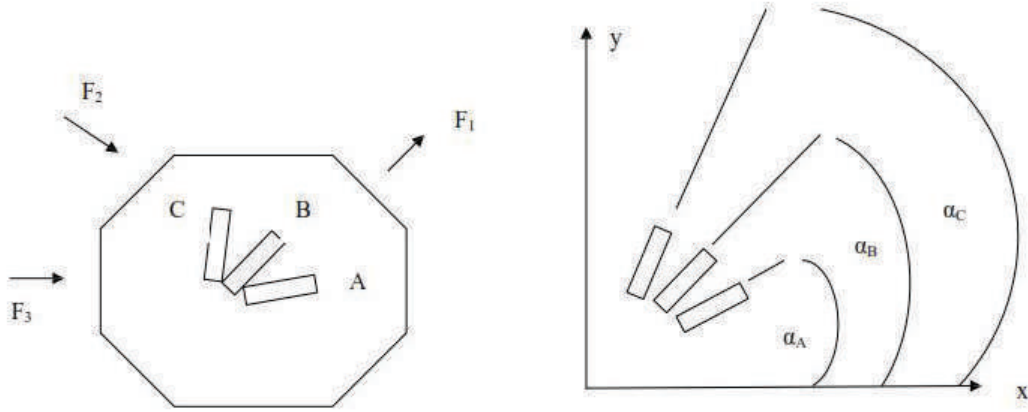
- a.) Eğer asal gerilme yönleri biliniyor ise, dikdörtgen rozet şeklinde iki elemanlı gerinim ölçer kullanılır. Bu gerinim ölçer malzeme üzerine yerleştirilerek, asal gerinim değerleri (ε_1 ve ε_2) okunabilir. Asal gerilme değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak elde edilebilir.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \quad \text{ve} \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)$$



Şekil 3.12. İki eksenli gerilme şeması

b.) Eğer asal gerilme yönleri bilinmiyorsa, dikdörtgen rozet şeklinde üç elemanlı gerinim ölçer kullanılmalıdır.



$$\begin{aligned}\varepsilon_A &= \varepsilon_{xx} \cos^2 \alpha_A + \varepsilon_{yy} \sin^2 \alpha_A + \gamma_{xy} \cos \alpha_A \sin \alpha_A \\ \varepsilon_B &= \varepsilon_{xx} \cos^2 \alpha_B + \varepsilon_{yy} \sin^2 \alpha_B + \gamma_{xy} \cos \alpha_B \sin \alpha_B \\ \varepsilon_C &= \varepsilon_{xx} \cos^2 \alpha_C + \varepsilon_{yy} \sin^2 \alpha_C + \gamma_{xy} \cos \alpha_C \sin \alpha_C\end{aligned}$$

Yukarıdaki denklemlerin birlikte çözümünden ε_{xx} , ε_{yy} ve γ_{xy} bulunabilir. Asal gerinim değerleri ve yönleri ise aşağıda verilen denklemler ile bulunabilir.

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + \frac{1}{2}\sqrt{2(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) + (\gamma_{xy})^2}$$

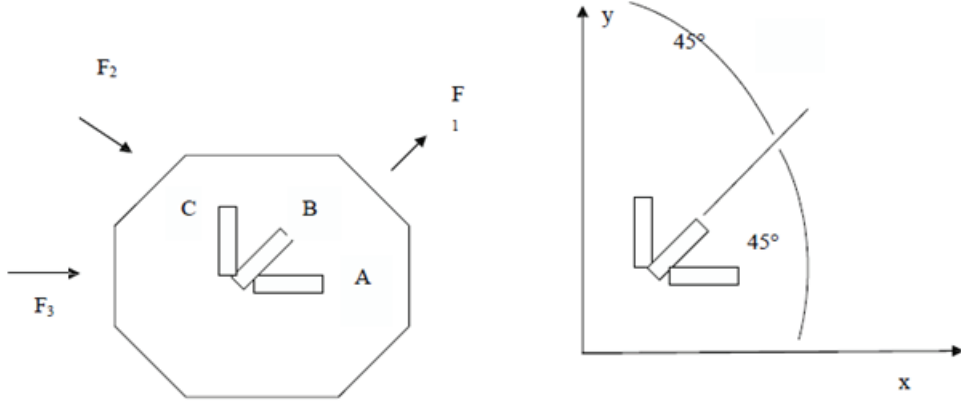
$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) - \frac{1}{2}\sqrt{2(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) + (\gamma_{xy})^2}$$

$$\tan 2\theta = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}$$

Maksimum (ϵ_1) ve minimum (ϵ_2) asal gerinimler denklem 11'in çözümünden elde edilebilir ve elde edilen sonuç asal gerinimlerin yönünü vermektedir. Asal gerinimler aşağıdaki denklemler kullanılarak bulunabilir.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_1 + \nu\epsilon_2) \quad \text{ve} \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_2 + \nu\epsilon_1)$$

Üç Elemanlı Dikdörtgen Rozet



$$\begin{array}{lll} \alpha_A = 0 & \cos\alpha_A = 1 & \sin\alpha_A = 0 \\ \alpha_B = 45^\circ & \cos\alpha_B = 0.707 & \sin\alpha_B = 0.707 \\ \alpha_C = 90^\circ & \cos\alpha_C = 0 & \sin\alpha_C = 1 \end{array}$$

Bu durumda;

$$\epsilon_A = \epsilon_{xx}, \quad \epsilon_B = \frac{1}{2}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \gamma_{xy}) \text{ ve } \epsilon_C = \epsilon_{yy}$$

$\epsilon_A, \epsilon_B, \epsilon_C$ gerinim değerleri ölçülerek $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ ve γ_{xy} değerleri bulunabilir. Denklemler kullanılarak asal gerinim değerleri ϵ_1 ve ϵ_2 hesaplanabilir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

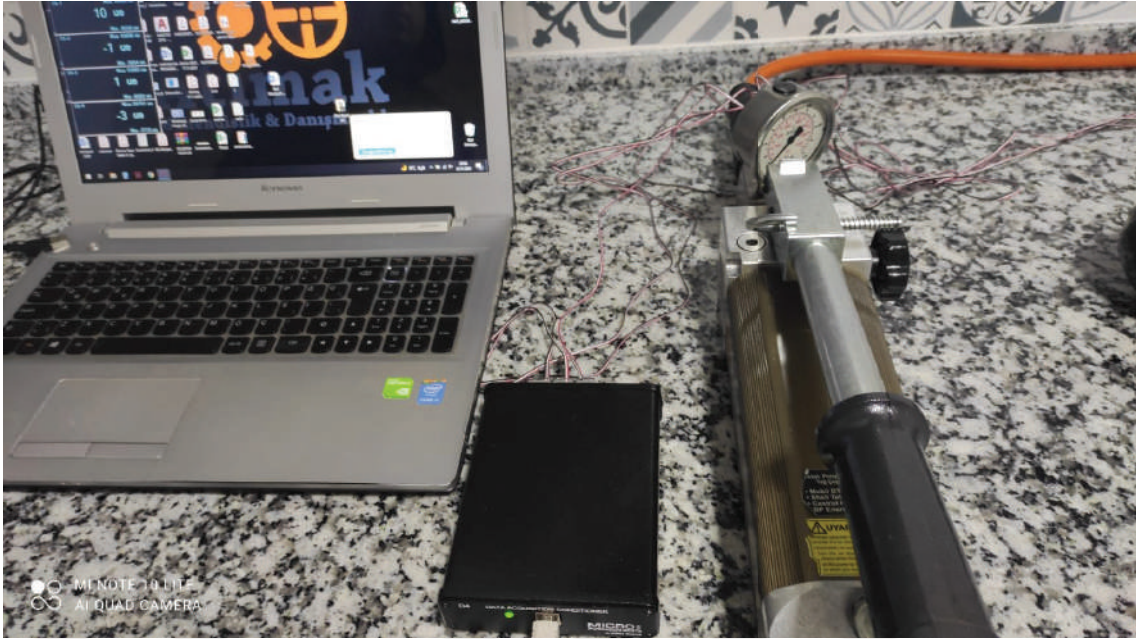
Kompozit silindirik basınçlı kapların üzerinde yapılan testlerle basınçlı kap tiplerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır bu amaçla iç basınç altında yüzey şekil değişimi testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada değişkenler kompozit reçinesindeki karbon nanotüplerdir. Çalışma kapsamındaki parametreler çizelge 4.1’de, gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Parametre çizelgeleri

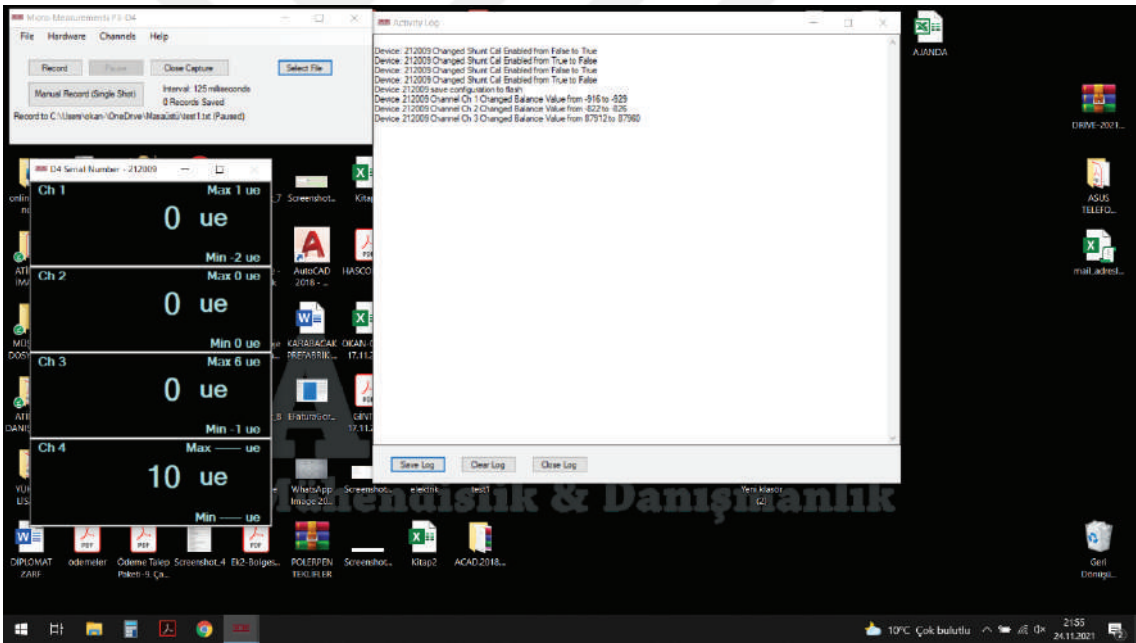
Parametre No	Karbon Nanotüp/Reçine Oranı
1	0
2	%1
3	%3

4.1. Parametre 1, Karbon Nanosuz Basınçlı Kapların İç Basınç Altında Gerilim Deney Sonuçları

Karbon nanosuz reçineli karbon elyaf sarımlı 3 adet basınçlı kap üretilmiş ve iç basınç altında yük stabil olarak uygulama sonucunda ortalama tüpler 45 bar değerinde patladılar. Deneylerin süresi ortalama 24 dakika sürmüştür her 0,125 saniyede veri toplama cihazıyla veriler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Deneylerin ilk 2-3 dakikalık zamanında iç basınç oluşması için manuel yağ pompası kendi düzeneğiyle havayı tahliye etmiştir. Numuneler iç basınç artışına bağlı gerilme sesleri izlenmiş ve yüzey değişimleri deneyler anında gözlemlenmiştir. Deney düzeneğinde manuel manometre olduğu için basınç değerleri manuel olarak takip edilmiş numunelerin patlama öncesindeki son değerleri kaydedilmiştir. Şekil 4.1. ve 4.2.

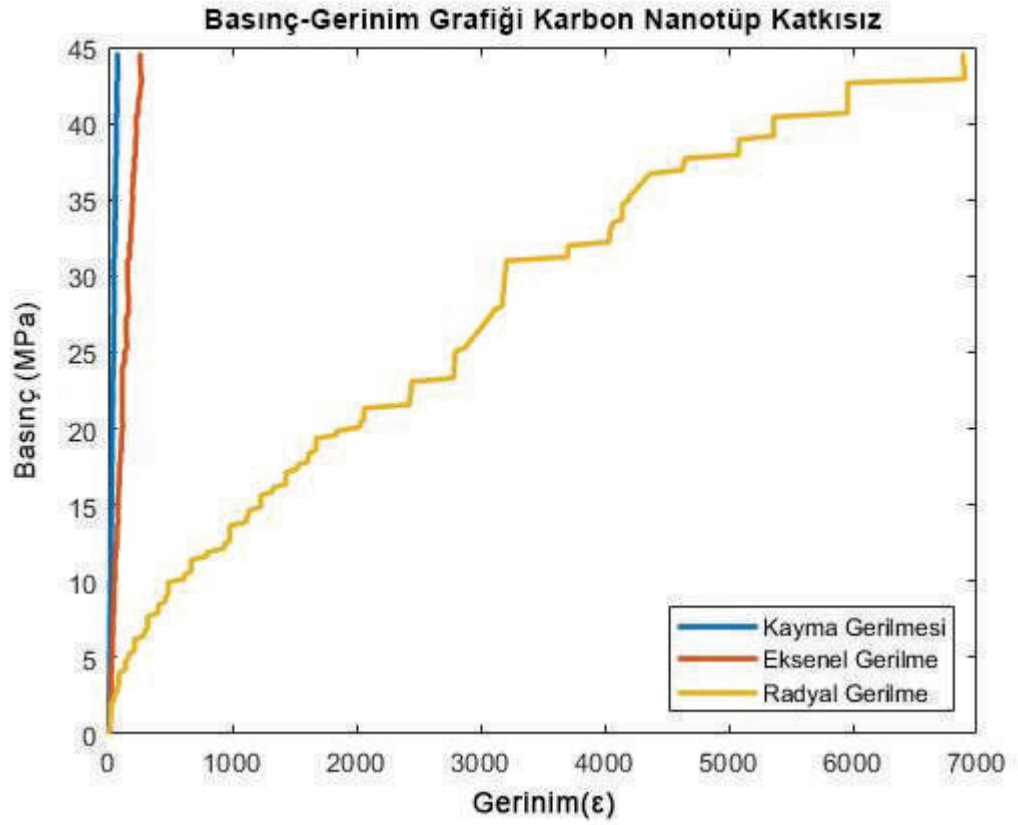


Şekil 4.1. Deney düzeneği



Şekil 4.2. Parametre 1 anlık sonuçların alındığı ekran görüntüsü

Şekil 4.3' de karbon nanotüp katkısız kompozit silindirik basınçlı kaba ait gerilme-gerinim oranı grafiği görülmektedir. Numunelerin maksimum basınç dayanımı 45 bar, bu dayanıma karşılık gelen ortalama aksenal uzama yönünde 0,258286, ortalama radyal uzama 0,075429, ortalama kayma gerilmesi 6,889905 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.3. Parametre 1 gerilme/gerinim grafiği

Parametre 1 deney sonuçları incelendiğinde kayma ve eksenel uzama sayısal değerlerinin birbirine yaklaşık, radyal gerilmesinin sayısal değerinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Numunelerin kesitlerdeki deformasyonların inceleyebilmek için otomatik testere ile iki parçaya ayrılmıştır. Kesit görüntüleri şekil 4.6 ve şekil 4.7’de bulunmaktadır.



Şekil 4.4. Parametre 1 deney sonrası numune görüntüsü



Şekil 4.5. Parametre 1 deney sonrası numune görüntüsü 2



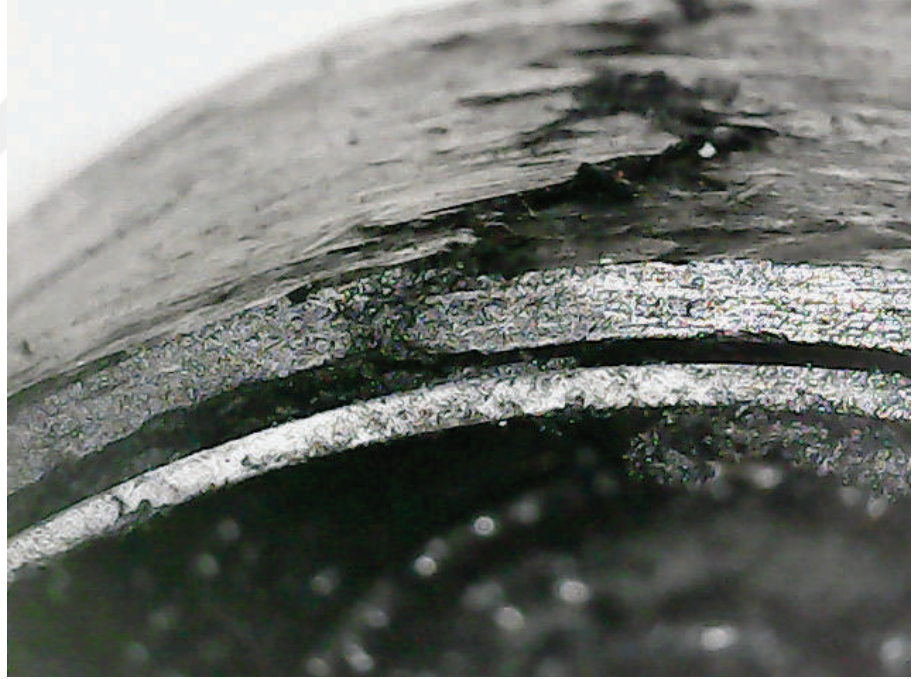
Şekil 4.6. Parametre 1 kesit görüntüsü 1



Şekil 4.7. Parametre 1 kesit görüntüsü 2



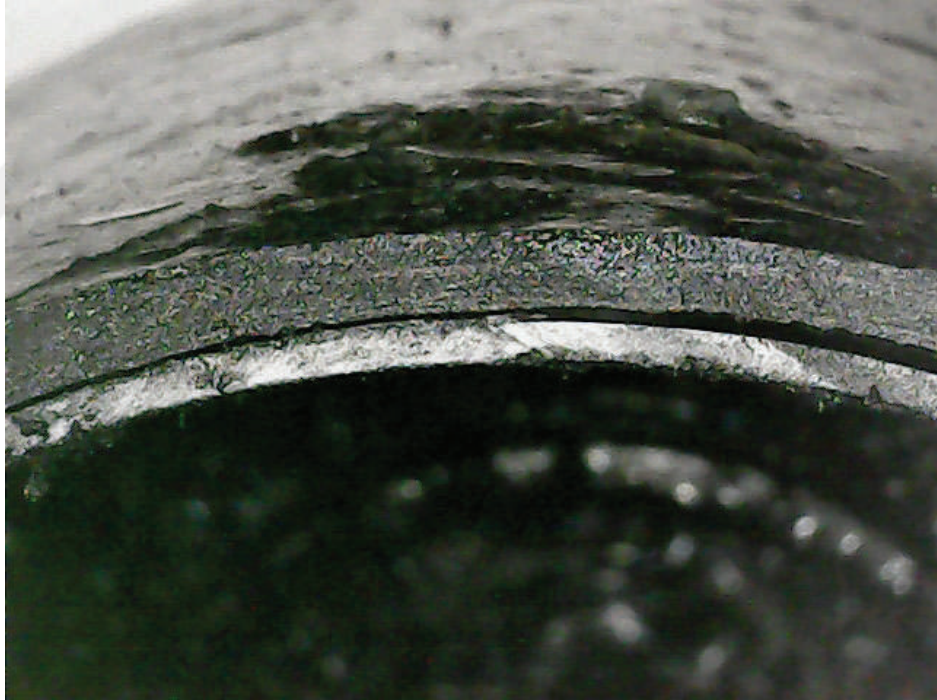
Şekil 4.8. Parametre 1 kesit mikroskop görüntüsü 1



Şekil 4.9. Parametre 1 kesit mikroskop görüntüsü 2



Şekil 4.10. Parametre 1 kesit mikroskop görüntüsü 3

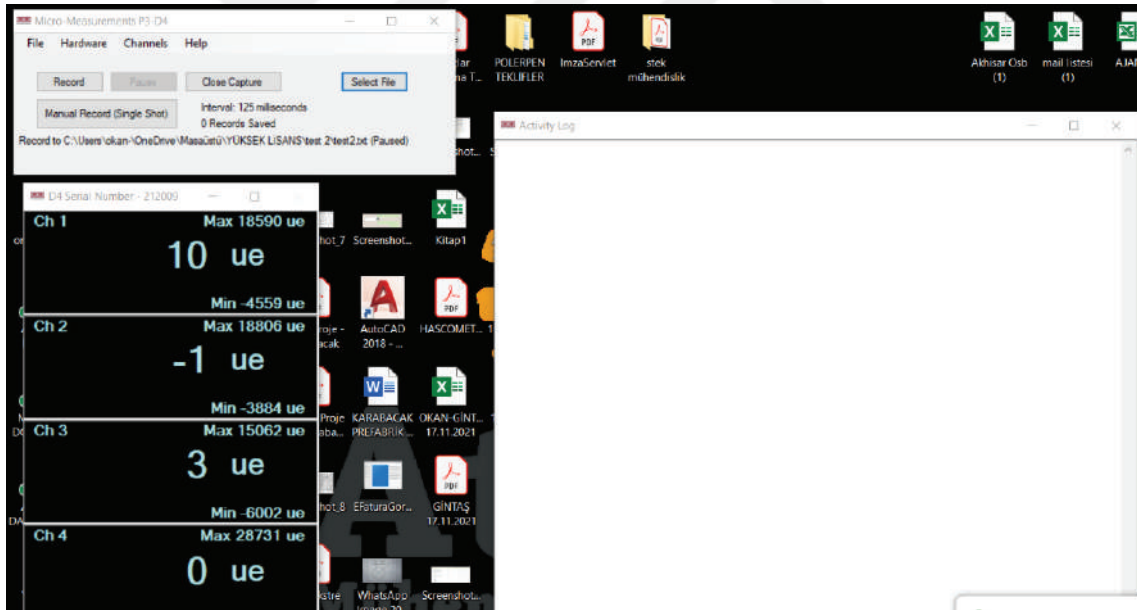


Şekil 4.11. Parametre 1 kesit mikroskop görüntüsü 4

4.2. Parametre 2, Karbon Nanotüp Oranı %1 İç Basınç Yüzey Şekil Değişim

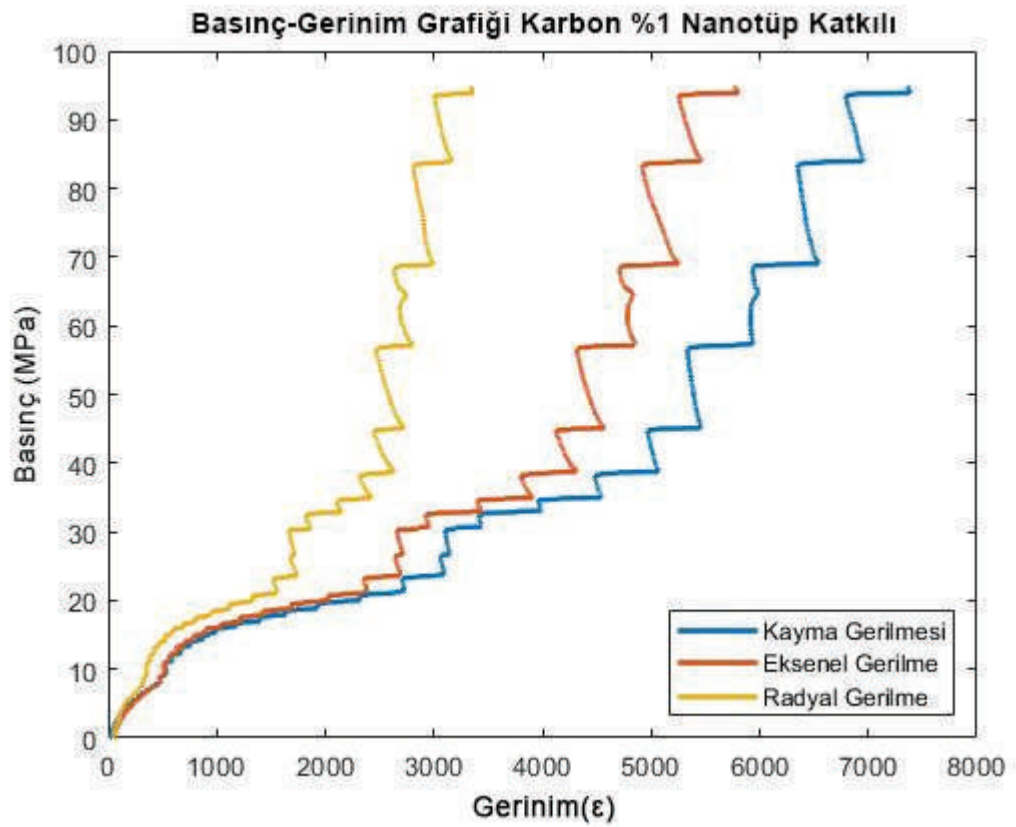
Deney Sonuçları

Parametre 2 numunelerinde basınç deneyinde yük stabil olarak uygulama sonucunda tüpler ortalama 95 bar değerine ulaşarak patlamıştır. Deney süreleri ortalama 38 dakika sürmüştür her 0,125 saniyede veri toplama cihazıyla veriler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Deneylerin ilk 2-3 dakikalık zamanında iç basınç oluşması için manuel yağ pompası kendi düzeneğiyle havayı tahliye etmiştir. Tüplerde iç basınç artışına bağlı gerilme sesleri izlenmiş ve yüzey değişimleri deney anında gözlemlenmiştir. Deney düzeneğinde manuel manometre olduğu için basınç değerleri manuel olarak takip edilmiş tüplerin patlama öncesindeki son değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 4.12. Parametre 2 anlık sonuçların alındığı ekran görüntüsü

Şekil 4.9.'da karbon nanotüp oranı %1 olan kompozit silindirik basınçlı kaba ait gerilme-gerinim oranı grafiği görülmektedir. Numunenin maksimum basınç dayanımı 95 bar, bu dayanıma karşılık gelen ortalama aksenal uzama yönünde 7,315875, ortalama kayma uzama 5,725125, ortalama radyal gerilmesi 3,299625 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.13. Parametre 2 gerilme/gerinim grafiği



Şekil 4.14. Parametre 2 deney sonrası numune görüntüsü



Şekil 4.15. Parametre 2 deney sonrası numune görüntüsü 2



Şekil 4.16. Parametre 2 kesit görüntüsü 1

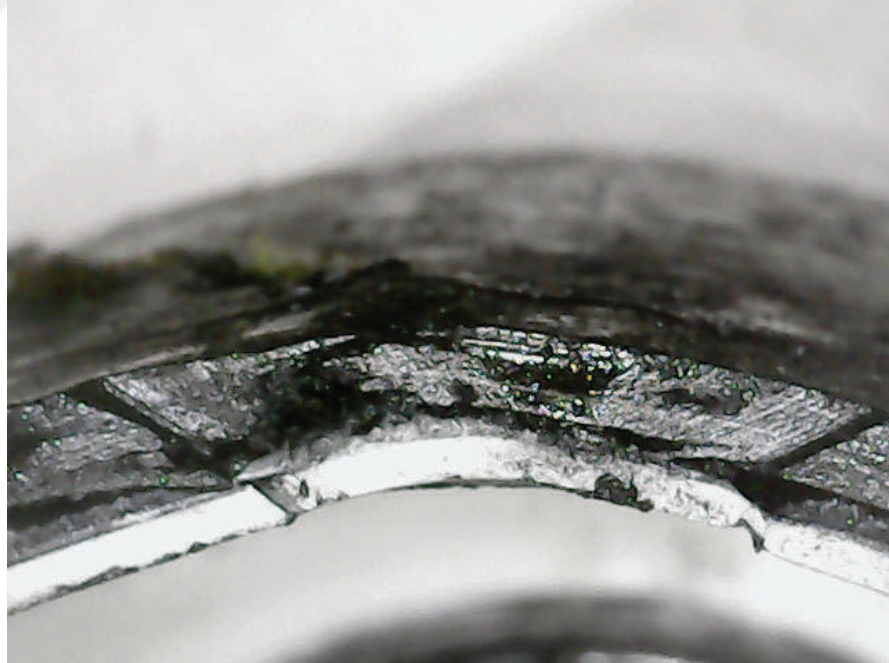


Şekil 4.17. Parametre 2 kesit görüntüsü 2

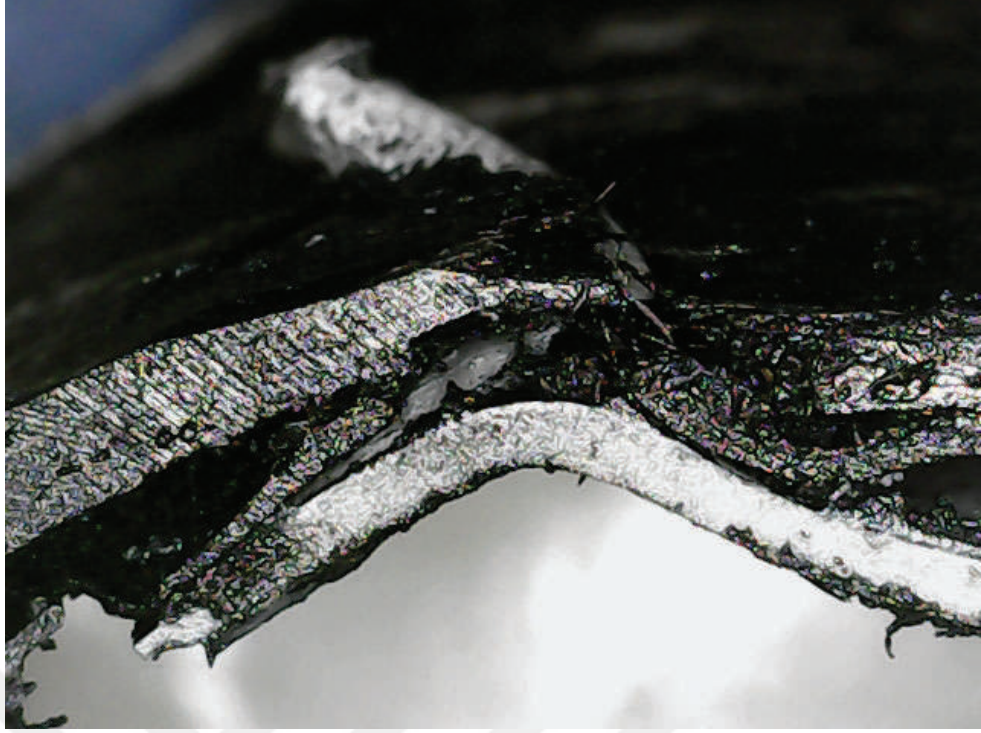
Parametre 2 deney sonuçları incelendiğinde aksenal ve kayma uzama değerlerinin yaklaşık, radyal gerilmesinin düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.18. Parametre 2 kesit mikroskop görüntüsü 1



Şekil 4.19. Parametre 2 kesit mikroskop görüntüsü 2



Şekil 4.20. Parametre 2 kesit mikroskop görüntüsü 3

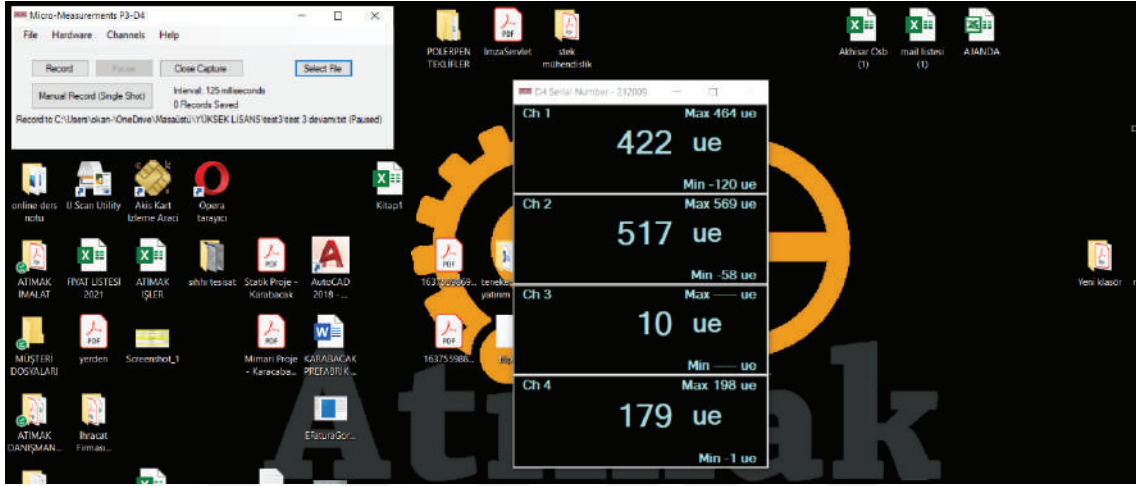


Şekil 4.21. Parametre 2 kesit mikroskop görüntüsü 4

4.3. Parametre 3, Karbon Nanotüp Oranı %3 İç Basınç Yüzey Şekil Değişim Deney Sonuçları

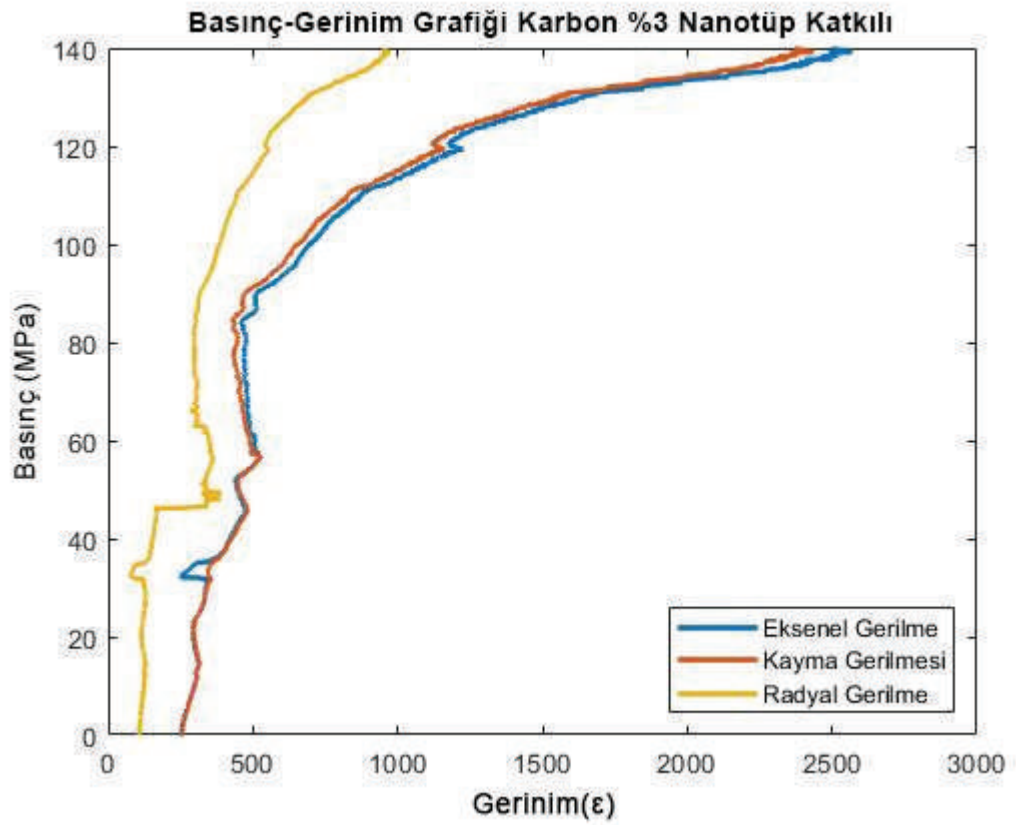
Parametre 3 basınç deneyin de yük stabil olarak uygulama sonucunda 140 bar değerine ulaşarak patlamıştır. Deney süresi 42 dakika sürmüştür her 0,125 sanayide veri

toplama cihazıyla veriler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Deneyin ilk 2-3 dakikalık zamanında iç basınç oluşması için manuel yağ pompası kendi düzeneğiyle havayı tahliye etmiştir. Numune iç basınç artışına bağlı gerilme sesleri izlenmiş ve yüzey değişimleri deney anında gözlemlenmiştir. Deney düzeneğinde manuel manometre olduğu için basınç değerleri manuel olarak takip edilmiş numunelerin patlama öncesindeki son değerleri kaydedilmiştir.



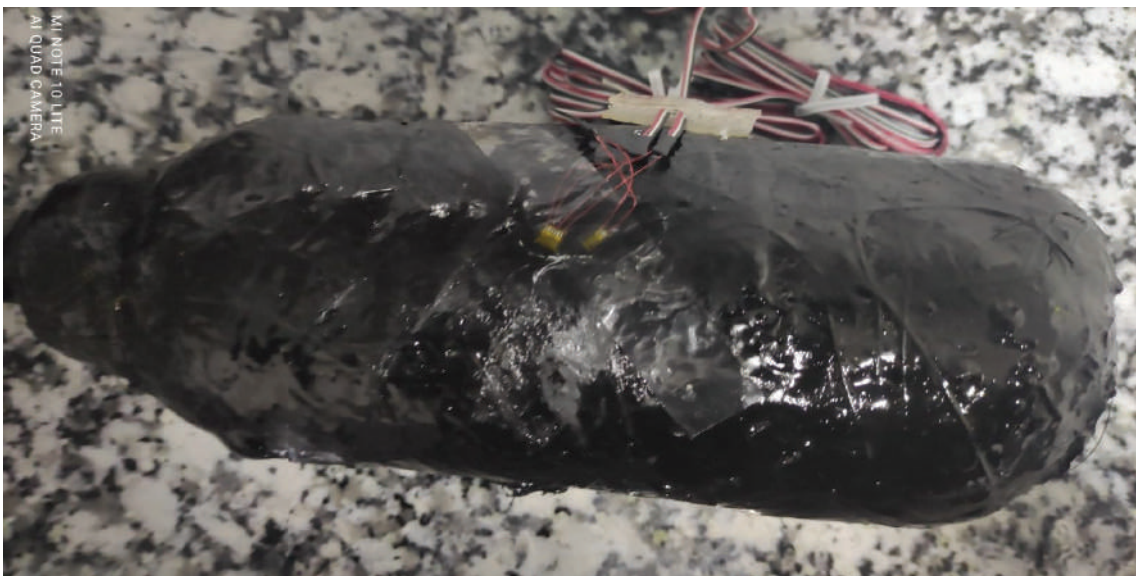
Şekil 4.22. Parametre 3 anlık sonuçların alındığı ekran görüntüsü

Şekil 4.15’de karbon nanotüp %3 oranlı kompozit silindirik basınçlı kaba ait gerilme-gerinim görülmektedir. Parametre 3’e sahip tüplerin ortalama maksimum basınç dayanımı 140 bar, bu dayanıma karşılık gelen ortalama aksel uzama yönünde 2,36775, ortalama kayma uzama 2,499, ortalama radyal gerilmesi 0,947625 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.23. Parametre 3 gerilme/gerininim grafiği

Parametre 3 deney sonuçları incelendiğinde eksenel ve kayma uzama değerlerinin yaklaşık, radyal gerilmesinin düşük olduğunu göstermektedir.



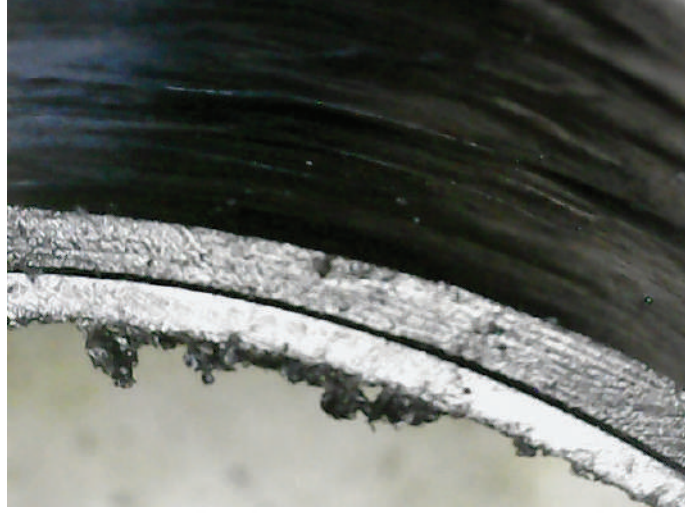
Şekil 4.24. Parametre 3 deney öncesi numune görüntüsü



Şekil 4.25. Parametre 3 kesit görüntüsü 1



Şekil 4.26. Parametre 3 kesit görüntüsü 2



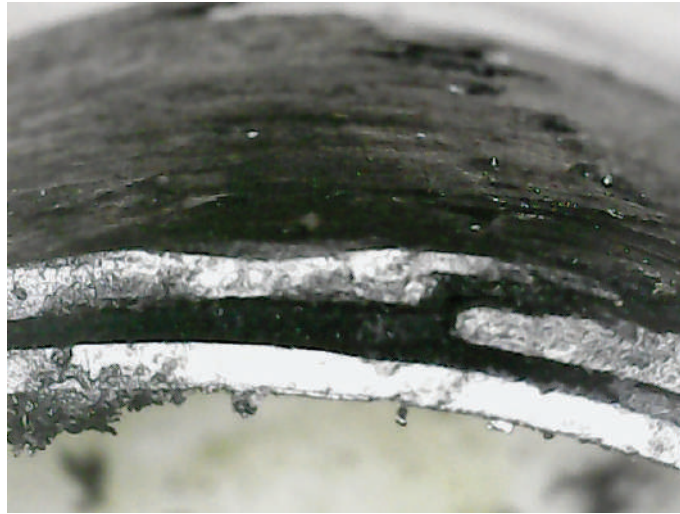
Şekil 4.27. Parametre 3 kesit mikroskop görüntüsü 1



Şekil 4.28. Parametre 3 kesit mikroskop görüntüsü 2



Şekil 4.29. Parametre 3 kesit mikroskop görüntüsü 3



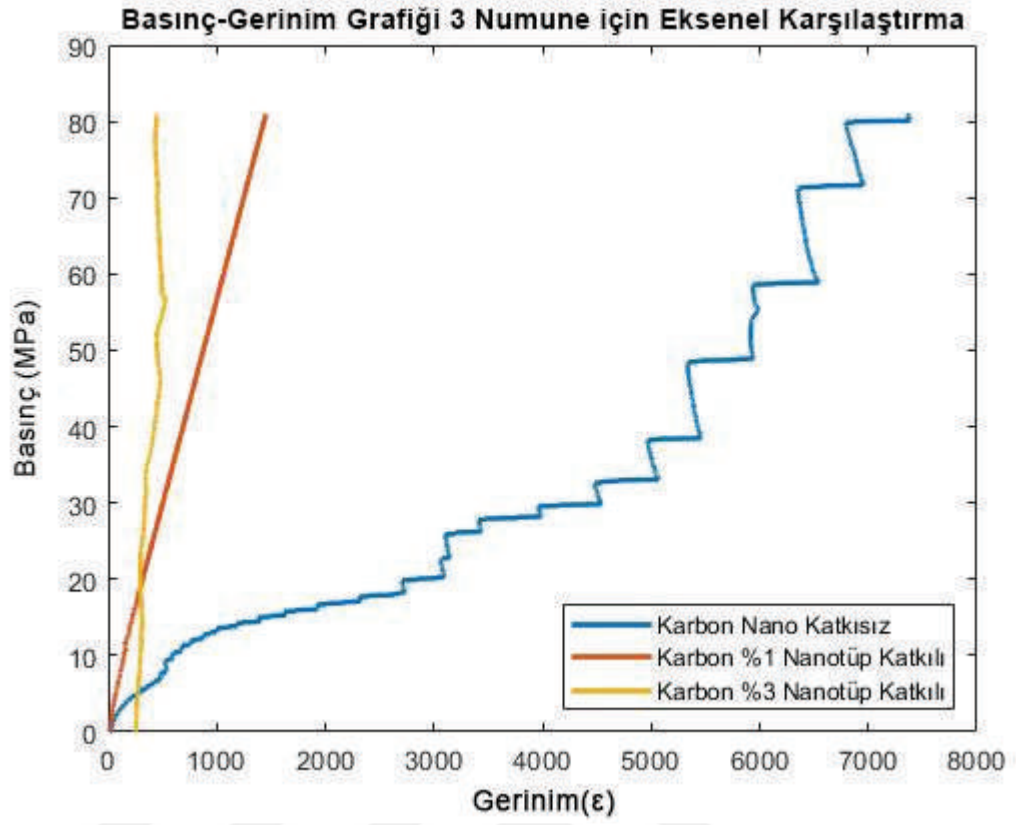
Şekil 4.30. Parametre 3 kesit mikroskop görüntüsü 4

4.4. Deney Sonuçları ve Karşılaştırmalar

Numunelerin çevresel, aksenal ve kayma gerilmeleri değerleri birbirleriyle de incelenmiştir.

4.4.1. Numunelerin Aksenal Gerinimlerinin Karşılaştırılması

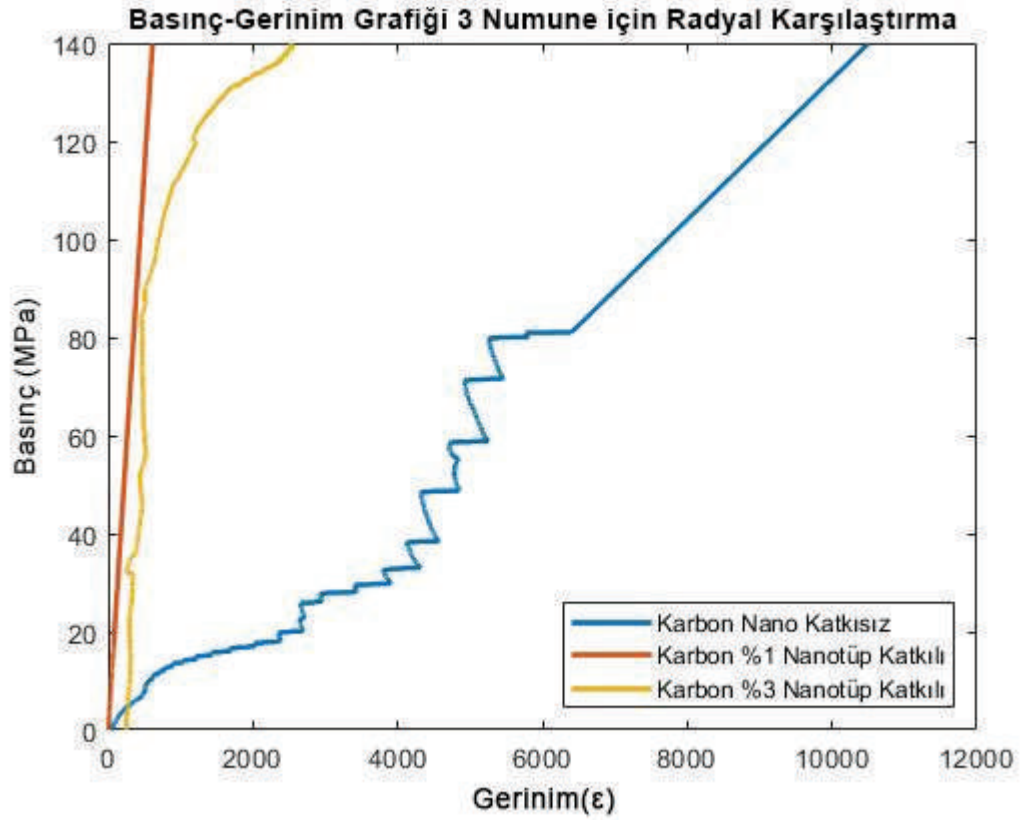
Parametrelerin aksenal gerinimleri şekil 4.16'da incelenmiştir.



Şekil 4.31. Numunelerin eksenel gerinimleri

4.4.2. Numunelerin radyal gerinimlerinin karşılaştırılması

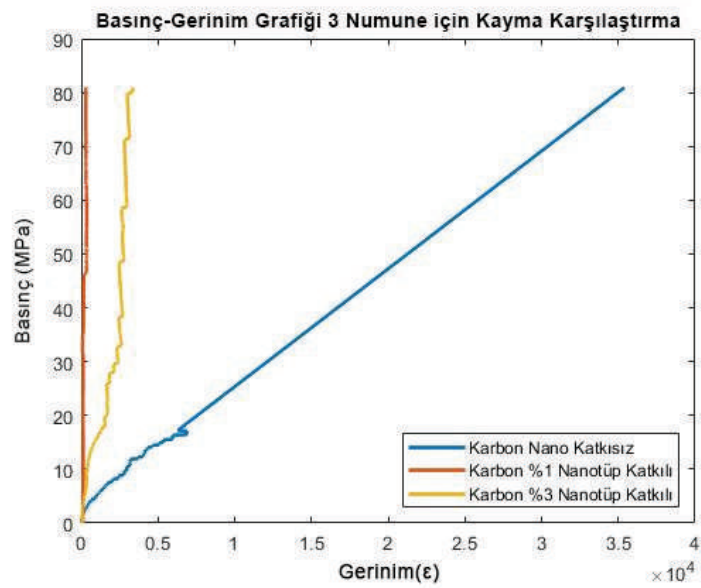
Radyal Gerilmeler şekil 4.17 'de incelenmiştir.



Şekil 4.32. Numunelerin radyal gerinimleri

4.4.3. Numunelerin radyal gerinimlerinin karşılaştırılması

Kayma Gerilmeleri 4.18’de incelenmiştir.



Şekil 4.33. Numunelerin kayma gerinimleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Karbon elyaf sarımlı basınçlı silindirik kompozit tank numunelerin iç basınç testlerin de karbon nanotüp katkılı kompozit malzemelerin ve oranlarının yüzey gerilmelerinde deplasmanda ciddi bir etkiye sahip olduğu gözlenmiş ve test sonuçlarıyla tespit edilmiştir.
- Deney değişkenlerini olan karbon nanotüp oranı arttığında kompozit numunelerde karbon nano katkısız kompozit tüplere oranla dayanım artmıştır. Bunun nedeni karbon nanotüplerin reçineye homojen bir şekilde karışmasıyla kompozit malzemeye yeni özellikler kazandırmasıdır.
- Karbon nanotüp ilavesiyle oransal olarak tüplerin patlama basınçları da artmıştır. Boş liner ile %3 katkılı kompozit tüp arasında ortalama 9,33 kat artış olmuştur. Burada karbon nanotüp genel olarak malzeme mukavemetini artırmış, çatlak oluşumu ve elyaf/matris ayrılmasını zorlaştırmaktadır.
- Çalışmada tankın uç kısımlarının sahip olduğu geometrilerde ve daha sonra ilave edilen kompozit boğaz kısmında malzemeye açılan dişlerin ve monte edilen bağlantı ve dolum aparatlarının olduğu bölgelerde hasar beklenmiştir. Fakat sızdırma ve yapıştırma elemanı olarak kullanılan epoksi olduğundan burada herhangi bir hasarla karşılaşılmamıştır. Yapılan çalışmada tüpün kritik bölgesinin ana gövdede aksenel yönde ayrılma hasarına uğradığı görülmüştür. Malzeme hasara uğrarken herhangi bir geometrik düzlemsel kayma göstermemiştir. Silindirik yapısını korumuştur. Bu da kullanım ve hasar esnasında çevreye olumsuz etkilerini önlemektedir.
- Sonuç olarak gerek alüminyum gerek plastik vb. liner kullanarak kompozit malzemelerden imal edilen tüp veya tankların çok daha dar hacimde çok daha

fazla (yaklaşık 20 katı) gaz depolayabileceği, ve ağırlık olarak çok daha hafif malzeme kullanıldığından ağırlık/ hacim/ basınç olarak ideal bir kombinasyon oluşturduğu sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- Anonim. (2018). *BİTÜM EMDİRİLMİŞ ONDÜLE LEVHA UYGULAMASI*. 2022 tarihinde Yapı Okulu: <https://yapiokulu.org/modules.php?action=detail&id=370> adresinden alındı
- Anonim. (2021). *Tensör*. 2022 tarihinde Wikipedia: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Tens%C3%B6r> adresinden alındı
- Arıkan, A. (2012). Delaminasyon İçeren Kompozit Malzemede Titreşim Analizi. *Bitirme Tezi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Atagün, C. (2017). Bir Filaman Sarım Makinenin Tasarımı ve Ürün Olarak Basınçlı Türlerin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İTÜ.
- ÇETİN, M. (2014, Temmuz). UZAY UYGULAMALARINDA KULLANILAN KOMPOZİT SARGILI. *UZAY UYGULAMALARINDA KULLANILAN KOMPOZİT SARGILI*. Türkiye.
- Demir, C. (tarih yok). FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns .
- E., K. (tarih yok).). Local Elections and the Turkish Voter:. K. E. içinde, *Looking for the Determinants of Party Choice*. *South European Society and Politics*, (s. 83-600).
- ERUSLU, S. (2008). İnce Cidarlı Basınçlı Tüplerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi.
- Günaydın, B. (2010). Kompozit Yama ile Onarılmış Yüey Çentikli Filaman Sarım Borularda Yorulma Davranışları . *Doktora Tezi*. Konya: Selçuk Üniversitesi.
- J., C. (2009). Large-Scale Pattern Growth of Graphene Films for Stretchable. K. S. Kim içinde, *Large-Scale Pattern Growth of Graphene Films for Stretchable* (s. cil 457 s.706-710). Nature,.
- KARADOĞAN, S., & YILDIRIM, A. (tarih yok). Seismicity Analysisi of Southeastern Anatolia with GIS Method. *Potentials and Problems of Natural Environment in Turkey and Romania Proceedings the 7th Turkey Romanian Geographical Academic Seminar Eds Atalay Ielenicz Balteanu and Efe 13 30 Inkilap Pu*.
- Lifshitz. (1995). The Classical Theory of Fields. *Bergama Press*.
- McCauley, M. (2022). *Weaving pattern*. 2022 tarihinde Pinterest: <https://www.pinterest.com.au/pin/473792823297363089/> adresinden alındı
- Mestan, F. (2010). Basınçlı Kapların Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: Hava Harp Okulu Komutanlığı.
- Önder, A. (2009). Composite structures. *Composite structures*.
- Pehlivan, A. (2017). Elyaf Sarma ile Üretilen Kompozit Yapıdaki Basınçlı Kapların Değişik Yüklemlerde Modellenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İTÜ.
- Sayman, O. (2011). Failure pressures of composite cylinders with a plastic liner J. *Reinforced Plastics Composites* 30.
- Şencan, C. (2015). Kompozit Plakalarda Delaminasyonun Yeri ve Şeklinin Serbest Titreşim Cevabına ve Burkulma Yüküne Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Tekeli, S. (2007). Örgülü Kompozit Malzemenin Ansys ve Abaqus ile Gerilme Analizleri ve Deneysel Kırılma Tokluğunun Hesaplanması. *Bitirme Tezi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Usta, M. (2011). Birbirinden Farklı Kalın Cidarlı Basınçlı Kaplarda Kaynaklı Bölgelerin TS 17020 Uygunluğunun Araştırılması . *Yüksek Lisans Tezi*. Tekirdağ: Namık Kemal Üniversitesi.

- Vatangül, E. (2008). Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Ansys 10 Programı ile Isıl Gerilme Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- W., P. (tarih yok). Measurement of crystalline Index in Nylons by DSC. *Journal of Polymer Science* (s. 2219-2331). içinde
- Yıldırım, F. (2012). İnce Cidarlı Basınçlı Kapların Yük Altındaki Mekanik Davranışlarının Deneysel ve Sayısal Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. Karabük: Karabük Üniversitesi.
- Yılmazoğlu, Ü. (2004). Kompozit Malzemelerin Elasto - Plastik Davranışlarının İncelenmesi. *Bitirme Projesi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Gemi, L., Tarakçioğlu, N., Akdemir, A., & Şahin, Ö. S. (2009). Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy (± 75) 2 filament-wound pipes under pure internal pressure. *Materials & Design*, 30(10), 4293-4298

