

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARAMİD ELYAF VE CAM ELYAF İLE OLUŞTURULAN KOMPOZİT
BORULARIN İÇ BASINÇ ALTINDAKİ
HASAR GERİLME DAVRANIŞI**

ÖMER FARUK ÇİÇEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2019

Tezin Başlığı: Aramid Elyaf ve Cam Elyaf ile Oluşturulan Kompozit Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Gerilme Davranışı

Tezi Hazırlayan: Ömer Faruk ÇİÇEK

Sınav Tarihi: 02.07.2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yaşar AYAZ

.....

İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. M. Burhan KARAKOÇ

.....

İnönü Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Şerif ÇİTİL

.....

Adıyaman Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Aramid Elyaf ve Cam Elyaf ile Oluşturulan Kompozit Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Gerilme Davranışı" başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmada tarafımda yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içerisinde hem de kaynakça bölümünde yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ömer Faruk ÇİÇEK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ARAMİD ELYAF VE CAM ELYAF İLE OLUŞTURULAN KOMPOZİT BORULARIN İÇ BASINÇ ALTINDAKİ HASAR GERİLME DAVRANIŞI

Ömer Faruk ÇİÇEK

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

96 + xii sayfa

2019

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yaşar AYAZ

Bu çalışmada, $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip cam elyaf tabakalar arasına yerleştirilen aramid elyaf ile oluşturulan kompozit boruların iç basınç altındaki gerilme ve hasar davranışı incelenmiştir. Bu doğrultuda cam elyaf ve aramid elyaf kullanılarak hazırlanan 4 farklı kompozit malzeme ile toplamda 12 adet kompozit boru üretilmiştir. Kompozit malzemelerden ilki 4 tabaka cam elyafıdır. İkinci ve üçüncü kompozit malzeme ise 3 tabaka cam elyaf ve 1 tabaka aramid elyaftan oluşmaktadır. Dördüncü kompozit malzeme ise içte 2 tabaka aramid elyaf, dıştaki 2 tabaka ise cam elyafıdır. Bu malzemeler ile üretilen kompozit borulara iç basınç uygulanmış ve hasar durumları incelenmiştir. İnceleme sonucunda 2 tabaka cam elyaf ve 2 tabaka aramid elyaftan oluşan kompozit borunun en yüksek hasar basıncına sahip olduğu gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Kompozit borular, Cam elyaf, Aramid elyaf, İç basınç

ABSTRACT

Master of Science Thesis

TENSILE DAMAGE BEHAVIOR UNDER INTERNAL PRESSURE OF COMPOSITE PIPES FORMED WITH ARAMID FIBER AND GLASS FIBER

Ömer Faruk ÇİÇEK

İnönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

96 + xii pages

2019

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Yaşar AYAZ

In this study, it is aimed to investigate the stress and damage behavior of composite pipes formed by aramid fibers placed between glass fiber layers with a winding angle of $\pm 55^\circ$ under internal pressure. A total of 12 composite pipes were produced with 4 different composite materials prepared using glass fiber and aramid fiber. The first composite material is 4 layers of glass fiber. The second and third composite materials consist of 3 layers of glass fiber and 1 layer of aramid fiber. The fourth composite material consist of intermediate 2 layers aramid fiber and the outer 2 layers are glass fiber. Composite pipes produced with these materials were subjected to internal pressure, and damage conditions were examined. As a result of the investigation, it was observed that composite pipe composed of 2 layers of glass fiber and 2 layers of aramid fiber had the highest damage pressure.

KEYWORDS: Composite pipes, Glass fiber, Aramid fiber, Internal pressure

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, yardımını üzerimden eksik etmeyen ve süreç boyunca olumlu/olumsuz önerileriyle bana yol gösteren kıymetli danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Yaşar AYAZ'a;

Deney çalışmaları sırasında değerli vaktini ve yardımlarını benden esirgemeyen Adıyaman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Dr. Öğretim Üyesi Şerif ÇİTİL'e, İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Yusuf Eren ERDOĞDU'ya, tez yazımı ile ilgili her türlü desteği vermekten kaçınmayan değerli arkadaşım Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Ahmet Özcan'a, mesai arkadaşlarım olan Malatya Büyükşehir Belediyesi personelleri Mesut DURAN ve Furkan ÖZTEMİZ'e;

Çalışmalarım sırasında bana maddi ve manevi her türlü desteği veren aileme, özellikle gece gündüz benimle birlikte çalışmalarımın her noktasında çok büyük emeği bulunan değerli eşim Merve Zeynep MEMUR ÇİÇEK'e teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	3
1.1.1. Matris Malzeme Cinsine Göre Sınıflandırma Çeşitleri	3
1.1.1.1. Metal Matris Kompozitler.....	3
1.1.1.2. Seramik Matris Kompozitler.....	3
1.1.1.3. Polimer Matris Kompozitler	4
1.1.2. Takviye Elemanlarının Şekil Veya Yerleştirilme Biçimine Göre Sınıflandırılması.....	4
1.1.2.1. Elyaf (Fiber) Takviyeli Kompozitler (Tek Tabaka Kompozitler)	4
1.1.2.2. Parçacıklı Kompozitler	4
1.1.2.3. Tabakalı Kompozitler	4
1.2. Cam Elyaf	5
1.3. Aramid Elyaf.....	10
1.4. Kompozit Üretim Yöntemleri	14
1.4.1. Sprey Kalıplama/Püskürtme Yöntemi (Spray Lay-up).....	14
1.4.2. Elle Tabakalama Yöntemi (Hand Lay-up/Wet Lay-up)	16
1.4.3. İplik Sarma ile Tabakalama Yöntemi (Filament Winding)	17
1.4.4. Vakumlu Paketleme Yöntemi (Vacuum Bagging)	19
1.4.5. Otoklav Pişirme Yöntemi	20
1.4.6. Reçine Transfer Kalıplama (Reçine Enjeksiyonu) Metodu	21
1.4.7. Hazır Kalıplama Metodu (SMC, BMC).....	22
1.4.8. Sıcak Presleme Metodu.....	23

2.	KAYNAK ARAŞTIRMASI	25
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
3.1.	Kapsam ve İçerik	38
3.2.	Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.....	44
3.3.	Kompozit Borularda Gerilme Analizi.....	48
3.4.	Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	51
3.4.1.	Kompozit Malzemelerde Çekme Deneyi Test Metodu	53
3.4.2.	Kompozit Malzemelerde Kayma Deneyi Test Metodu	58
3.5.	Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	60
3.6.	Deney Düzeneği ve Yardımcı Elemanlar	63
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	69
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	88
6.	KAYNAKÇA.....	90
	ÖZGEÇMİŞ	96

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Si-O	Silisyum Oksit
SiO ₂	Silisyum Dioksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
Fe ₂ O ₃	Demir III Oksit
CaO	Kalsiyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
Na ₂ O	Sodyum Oksit
K ₂ O	Potasyum Oksit
Ba ₂ O ₃	Baryum Oksit
E	Elastisite Modülü
σ	Normal Gerilme
G	Kayma Modülü
U	Şekil Değiştirme Enerjisi
τ	Kayma Gerilmesi
ν	Poisson Oranı
ε	Normal Şekil Değiştirme

Kısaltmalar	Açıklama
CTP	Cam Takviyeli Plastik
CNT	Karbon Nano tüp
PVC	Polivinil Klorür

CAD	ComputerAided Design
FEA	Finite Element Analyses
FRP	Fibre Reinforced Polymer (Elyaf Takviyeli Polimer)
UV	Ultra Violet
FEM	Finite Element Method
SMC	Sheet Moulding Composites
BMC	Bulk Moulding Composites



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Airbus A-320	2
Şekil 1.2.	Falcon 10 jeti	3
Şekil 1.3.	Cam elyaf üretimi (Phillips,1989).	6
Şekil 1.4.	Püskürtme yöntemi ile reçine hazırlanması(a), (b)	15
Şekil 1.5.	Elle tabakalama yöntemi ile reçine hazırlanması (a), (b), (c)	17
Şekil 1.6.	İplik sarma ile tabakalama yöntemi şeması (a), (b)	18
Şekil 1.7.	Vakumlu paketleme yöntemi şeması (a), (b)	19
Şekil 1.8.	Sıcak presleme üretim prosesi	23
Şekil 2.1.	Boyutsuz radyal mesafeye bağlı gerilmelerin dağılımı	30
Şekil 2.2.	Boyutsuz radyal mesafeye karşı radyal doğrultudaki gerilme.....	31
Şekil 2.3.	Ani malzeme bozunumuyla bağlantılıboşaltma ve yeniden yükleme grafiği	31
Şekil 3.1.	Kompozit boru ölçüleri	38
Şekil 3.2.	Kompozit borulara ait tabaka numaralandırma sistemi	39
Şekil 3.3.	Numune gruplarına ait detaylar	39
Şekil 3.4.	C-C-C-C numuneleri.....	41
Şekil 3.5.	C-A-C-C numuneleri	42
Şekil 3.6.	C-C-A-C numuneleri	43
Şekil 3.7.	C-A-A-C numuneleri	44
Şekil 3.8.	Malzeme tabakasına ait koordinat eksenleri	47
Şekil 3.9.	Boru cidar gerilmeleri	49
Şekil 3.10.	Boru cidarı üzerindeki gerilmeler	51
Şekil 3.11.	Tek yönlü kompozit malzemelerin mukavemet yön gösterimi ..	52
Şekil 3.12.	Yalnızca 4 tabaka cam elyaftan oluşan kompozit plaka (C-C-C-C)	54
Şekil 3.13.	3 tabaka cam elyaf ve 1 tabaka aramid elyaftan oluşan kompozit plaka (C-A-C-C)	54
Şekil 3.14.	2 tabaka cam elyaf ve 2 tabaka aramid elyaftan oluşan kompozit plaka (C-A-A-C)	55
Şekil 3.15.	Sadece 4 tabaka aramid elyaftan oluşan kompozit plaka (A-A-A-A).....	55

Şekil 3.16.	Boyuna çekme deneyi için hazırlanan numune ölçüleri	56
Şekil 3.17.	Çekme deneyi için hazırlanan numuneye ait ölçüler	56
Şekil 3.18.	x ve y yönlerinde hazırlanan çekme deneyi numuneleri.....	57
Şekil 3.19.	Çekme deneylerinin yapıldığı test cihazı.....	58
Şekil 3.20.	Kayma deneyi için hazırlanan numune ölçüleri (a), (b)	59
Şekil 3.21.	4 gruba ait kayma deneyi numuneleri.....	60
Şekil 3.22.	Cam elyaf ve aramid elyaf birleşimli kompozit borular (a), (b), (c), (d)	63
Şekil 3.23.	Deney düzeneği.....	64
Şekil 3.24.	Ölçümler için kullanılan manometre	64
Şekil 3.25.	Çelik başlıklar	65
Şekil 3.26.	Çelik başlık çizimi	65
Şekil 3.27.	CNC torna tezgahı	66
Şekil 3.28.	Hafif kokulu akrilik yapıştırıcı DP810	67
Şekil 4.1.	x yönlü çekme deneyi numunelerinin kopma sonrası görünümleri.....	69
Şekil 4.2.	y yönlü çekme deneyi numunelerinin kopma sonrası görünümleri.....	69
Şekil 4.3.	y yönlü çekme deneyi numunelerinin kopma sonrası görünümleri.....	70
Şekil 4.4.	İçsel basınç uygulamaya hazır hale getirilen numuneler	76
Şekil 4.5.	C-C-C-C numunesine ait hasar durumu.....	78
Şekil 4.6.	C-A-C-C numunesine ait en yüksek basınç değeri	79
Şekil 4.7.	C-A-C-C numunesine ait hasar durumu	80
Şekil 4.8.	C-C-A-C numunesine ait en yüksek basınç değeri.....	81
Şekil 4.9.	C-C-A-C numunesine ait hasar durumu	81
Şekil 4.10.	C-A-A-C numunesine ait en yüksek basınç değeri.....	83
Şekil 4.11.	C-A-A-C numunesine ait hasar durumu	83

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Cam elyaf türleri ve özellikleri.....	7
Çizelge 1.2.	Cam elyaf türlerinin kompozisyonları.....	8
Çizelge 1.3.	Cam elyaf türlerinin % ağırlık bileşenleri	9
Çizelge 1.4.	Kompozit ve metallerin mekanik özellikleri	9
Çizelge 1.5.	Karbon elyafların mekanik özellikleri.....	10
Çizelge 1.6.	Elyaf ve matrislerin gerilme-uzama grafiği.....	11
Çizelge 1.7.	Bazı aramid elyafların mekanik özellikleri	12
Çizelge 1.8.	Kevlar 49'un sıcaklık-genleşme grafiği	13
Çizelge 1.9.	Elyaf çeşitleri arasındaki sınıflandırma	13
Çizelge 3.1.	Numune geometrisi ve ASTM test sınıfları.....	53
Çizelge 3.2.	DP 810 Teknik Özellikler.....	67
Çizelge4.1.	x yönlü C-C-C-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	71
Çizelge4.2.	x yönlü C-A-C-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	71
Çizelge4.3.	x yönlü C-A-A-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	72
Çizelge4.4.	x yönlü A-A-A-A numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	72
Çizelge4.5.	y yönlü C-C-C-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	73
Çizelge4.6.	y yönlü C-A-C-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	73
Çizelge4.7.	y yönlü C-A-A-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	74
Çizelge 4.8.	y yönlü A-A-A-A numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	74
Çizelge 4.9.	Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri	75
Çizelge 4.10.	Deneylerde elde edilen hasar basıncı değerleri	84
Çizelge 4.11.	Kompozit borulara ait hasar basıncı grafiği	84

1. GİRİŞ

En az 2 farklı malzemenin makro seviyede birleştirilmesiyle oluşan yeni malzemelere kompozit malzemeler denir. Bunun amacı tek başına mevcut olmayan bazı özellikleri, malzemeleri farklı şekillerde birleştirmek suretiyle ortaya çıkarmaktır (Anonim, 2019a). Kompozit aslında karışım anlamına gelse de çözünen ve çözen bileşenlerden oluşmaz. Bileşenler arasında atom alışverişi bulunmamaktadır. Kompozit malzeme bileşenleri kimyasal olarak birbirlerini etkilemezler. Karışım nanometre seviyesindeki partiküller düzeyinde olur ise bunlara nano kompozitler denir.

Kompozitler genel olarak matris denilen bir ana malzeme ve takviye elemanı denilen bir mukavemet malzemesinden oluşur. Takviye malzemesi kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önlemekte rol almakta ve malzemenin kopmasını geciktirmektedir (Anonim, 2019a).

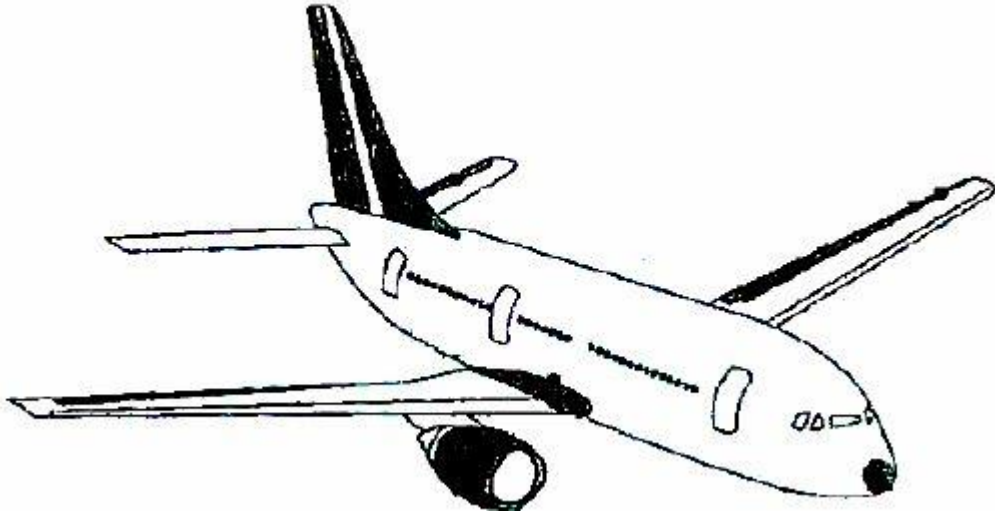
İnsanoğlu, ilk çağlardan beri kırılğan malzemelerin içerisine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak kırılğanlık özelliğini gidermeye çalışmıştır. Bu konuya en iyi örnek olarak kerpiç malzemesini verebiliriz. Kerpiç üretimi için, killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler kerpicing mukavemetini artırmaktadır. Özellikleri ve lif yönleri farklı olan ağaç levhalar üst üste eklenerek yapılan ok yayları kompozit malzemelere bir başka örnek olarak verilebilir. Hidrolik bağlayıcılar ve elyaf malzeme kullanılarak yapay taş plakaların üretim yöntemi hakkında 19. yy başlarında alınmış patentlere rastlanılmıştır. İnce levha yapımında ilk kez kullanılan çimento ve asbest kompozitleri yıllarca kullanılmış ve hala kullanılmaktadır. Öte yandan, günümüzde kompozitlerin donatılmasında yaygın olarak kullanılan liflerle ilgili uygulamanın yeni olmadığı araştırmalardan anlaşılmaktadır (Anonim, 2019a). Üretimi M.Ö. 1600 yıllarında eski Mısır'a kadar uzanmakta olan cam lifleri, 18. hanedan devrinden kalan farklı renkte cam liflerinden elde edilen çeşitli eşyalardan anlaşılmaktadır.

Cam liflerinin sanayide kullanımı 1877 yılında başlamıştır. Liflerle takviye edilmiş sentetik reçineler 1950'li yıllardan sonra endüstride kullanılmaya başlamıştır. Bu malzemenin en tanınmış grubunu cam elyaf takviyeli polyester oluşturmaktadır. Ülkemizde fiber-glass diye bilinen bu malzemeler, 1960'lı

yıllardan sonra sıvı tankları, çatı levhaları, küçük boy deniz tekneleri gibi elemanların üretiminde kullanılmaktadır. Ülkemizde üretimi yapılmış olan ilk yerli otomobil Anadol'un kaportası da bu malzemedendir(Anonim, 2019a).

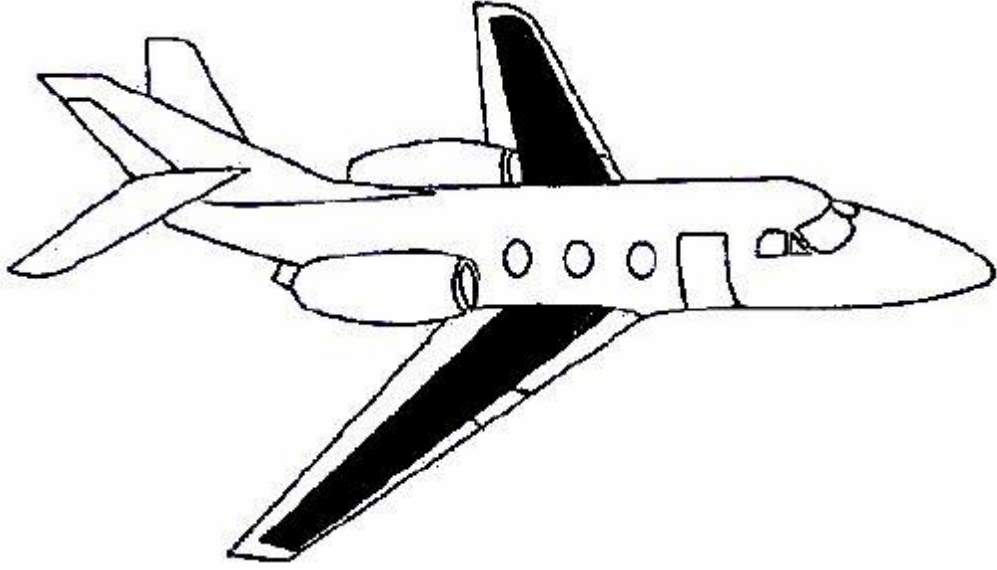
Günümüzde havacılık, gemicilik ve enerji gibi birçok sektörde çok farklı kompozit malzemeler ve ürünler geliştirilmiştir. Örneğin inşaatta kullanılan betonarme sistemler de demir ve betonun bir araya gelmesiyle oluşan kompozit malzemelerdir. İnşaat çeliğinin çekme, betonun ise basınç dayanımından faydalanarak bir araya gelen bu iki malzeme inşaat sektörü için vazgeçilmez bir hale gelen ender kompozitlerden biridir.

Kompozit malzemelerin yüksek kullanım alanlarından biri de havacılık sektörüdür. Şekil 1.1'de görülen Airbus A-320 uçağında siyah renkle belirtilen bölgelerde kompozit malzemeler kullanılmıştır (Dursun, 2006). Söz konusu uçak türünde toplamda 4,5 ton kompozit malzeme kullanılmış olup, uçak olması gerekenden 1,1 ton daha hafif hale getirilmiştir. Toplam yapısal ağırlığın %21,5'ini kompozit malzemeler oluşturmaktadır.



Şekil 1.1. Airbus A-320 (Dursun, 2006)

Kanatların karbon/epoksi malzeme kullanılan Falcon 10 jeti Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Karbon/epoksi malzeme sayesinde uçakta yaklaşık %20 oranında hafiflik sağlanmıştır (Dursun, 2006).



Şekil 1.2. Falcon 10 jeti (Dursun, 2006)

Kompozit malzemelerin oluşum seçenekleri çok fazladır. Bu yüzden sınıflandırılmaları oldukça zordur. Biz ise çalışmamızda 4 tabaka cam elyaf ile üretilen silindirik kompozit boru ve aramid elyaf ile çeşitli şekillerde güçlendirilmiş cam elyaf kompozit boru arasındaki gerilme farklılıklarını inceleyeceğiz.

1.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

1.1.1. Matris Malzeme Cinsine Göre Sınıflandırma Çeşitleri

1.1.1.1. Metal Matris Kompozitler

Bu malzemelerin ana yapısını metaller oluşturur ve genellikle takviye malzemesi için seramik kullanılır. Seramiklerin elastisite modülünün yüksek olması ve metallerin şekil değiştirme özelliklerinin iyi olması sebebiyle iki malzeme bir araya getirilerek aşınmaya dayanıklı, kırılma tokluğu ve basma gerilmesi yüksek malzemeler elde edilmektedir. Bu kompozitler malzemeler genelde otomotiv, havacılık ve savunma sektöründe çokça tercih edilmektedir (Anonim, 2019a).

1.1.1.2. Seramik Matris Kompozitler

Seramik çok sert ve kırılgan bir malzemedir. Yüksek sıcaklığa dayanıklı ve düşük yoğunluğa sahiptirler. Seramik matrikse eklenen karbon, seramik ve cam

fiberler yüksek sıcaklığa olan dayanımı artırmak için geliştirilmektedir. Seramik malzemeler, seramik fiberler ile desteklendiği takdirde mukavemetleri artmaktadır. Alümina ve zirkonya esaslı seramik kompozitler üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde, bu malzemelerin roket başlığı, uzay araçları gibi parçaların üretiminin dışında insan vücudu üzerinde bio malzeme olarak da kullanımı gerçekleştirilmiştir (Anonim, 2019a).

1.1.1.3. Polimer Matris Kompozitler

Sürekli fiber takviyeli olarak kullanılan polimer matrisler termoset ve termoplastikler olarak iki sınıfa ayrılır. Bunların en önemlileri, sürekli fiberlerle takviye edilmiş polyester ve epoksi reçine matrisli olanlarıdır. Bu malzemeler için kullanılan başlıca takviye malzemeleri, cam fiber, kevlar fiber, bor fiber ve karbon fiberlerdir. Başlıca kullanım alanları denizcilik uygulamaları, hafif olduğundan dolayı otomotiv, spor malzemeleri ve otomotiv iç dekorasyonu gibi alanlardır (Anonim, 2019a).

1.1.2. Takviye Elemanlarının Şekil Veya Yerleştirilme Biçimine Göre Sınıflandırılması

1.1.2.1. Elyaf (Fiber) Takviyeli Kompozitler (Tek Tabaka Kompozitler)

Bu kompozit çeşidi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içerisindeki yerleşim şekli kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içerisinde birbirine paralel şekilde yerleştirilmesi ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanır. Elyaflara dik doğrultuda ise düşük mukavemet elde edilir (Anonim, 2019a).

1.1.2.2. Parçacıklı Kompozitler

Bir matris malzeme içinde bir başka malzemenin küçük parçalar halinde bulunması ile meydana gelir. Homojen yapıya sahiptirler. Birbiri içerisindeki karışım oranına bağlı olarak mukavemetin derecesi belirlenir.

1.1.2.3. Tabakalı Kompozitler

En eski kullanım alanına sahip olan kompozitlerdir. Farklı matris özelliklerine sahip malzemelerin üst üste gelmesi ile oluşur. Genellikle ısıya ve

neme dayanıklı olurlar. Metallere göre daha hafif ve daha dayanıklı olmaları sebebiyle tercih edilirler. Uçaklarda, kanat ve kuyruk bölümlerinde kaplama malzemesi olarak çok geniş bir kullanım alanları vardır (Anonim, 2019a).

Bunların hepsinin dışında kalan ve doğada kendiliğinden kompozit halde bulunan birçok malzeme vardır. Bunlara örnek olarak ahşap ve kemik verilebilir.

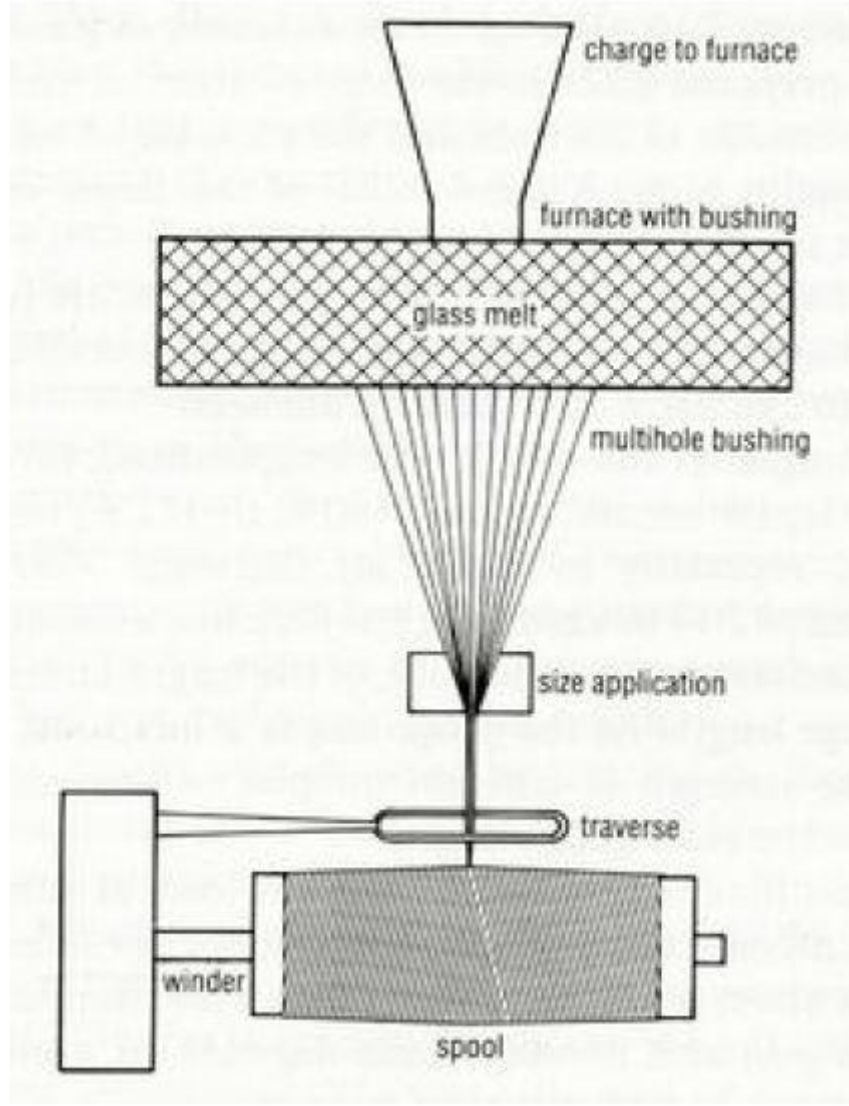
Kompozit malzeme, teknolojinin gelişmesi ile beraber sanayi, teknoloji, askeri vb. alanlarda sürekli artarak kullanılmaya devam etmektedir. Örneğin prefabrik yapılar, konteyner, otomobil kaportaları, cam sileceği, uçak ve helikopter gövde parçaları, kurşungeçirmez panel imalatı ve sayamadığımız birçok malzeme kompozitler sayesinde üretilmektedir.

1.2. Cam Elyaf

Tarihte cam elyafı ilk defa Mısırlılar ve Fenikeliler tarafından kullanılmıştır. O tarihlerde cam lifleri, cam çubukları ısıtıldıktan sonra yumuşatılıp akıtılması sonucunda elde ediliyordu. Kullanım alanı ise takviye amaçlıydı. Çanak, çömlek, gibi ürünlerin sağlamlaştırılmasını sağlıyordu. Bugün kullanılan cam elyafı 1930-1940 yılları arasında geliştirilmiştir (Demircioğlu, 2006).

Cam elyafı koleminat, silika, soda, alüminyum oksit gibi cam üretim malzemelerinden meydana gelmektedir. Elyaf takviyeli kompozitler arasında cam elyaf en bilinen ve yaygın olanıdır. Cam elyafı özel olarak üretilmiş ve altında küçük deliklerin olduğu bir ocaktan eritilmiş camın gönderilir ve ince lifler meydana gelir. Bu ince lifler soğutulur ve sonunda kompozit malzeme ham maddesi oluşur (Arıcasoy, 2006). Özellikle cam elyafı ile matris arası yapışma mukavemetini arttıran silan bazlı ve elyaf üzerinde ince film meydana getiren kimyasal malzemelerin kullanım sahaları oldukça artmıştır.

Cam elyaflar işlem sırasında mukavemetlerinin %50'sini kaybetmelerine rağmen birçok elyaftan daha yüksek dayanıklılık özelliğine sahiptir. Elyaf kumaşları genellikle cam elyafının lifleri ile üretilmekte olup, üretim işlemleri sırasında değişik kimyasalların eklenmesi ve bazı özel üretim yöntemleri ile farklı türde cam elyafı üretilmektedir (Arıcasoy, 2006).



Şekil 1.3. Cam elyaf üretimi (Phillips,1989) (Arıcasoy, 2006).

Cam elyaf üretiminde büyük bir ısıtma tankında bulunan cam değerli madenden yapılmış bir elekten geçirilerek, Şekil 1.3'de görüldüğü gibi V biçiminde aşağıya doğru püskürtme yapan basınçlı hava veya buhar jeti arasından yaklaşık 1 mm kalınlığındaki iplikler haline dönüştürülür. Uygulanan ısı ve reçineyle birlikte yapışkan hale gelen 20 - 25 cm uzunluğundaki bu cam iplikler, dönen bir makara üzerine sarılır (Anonim, 2019b). Malzeme yeterli yoğunluğa ulaştıktan sonra reçine katılaşana kadar fırınlanır ve pamuk formuna getirilir. Üretilen bu cam pamuğu ses ve ısıya karşı oldukça yalıtkan bir özellik gösterir. Cam elyafı, sürekli iplik ve bükümlü halat olmak üzere iki ayrı yöntemle üretilir. İplik çapının değişkenlik göstermesinin öneminden ötürü üretilecek cam, eriyen camın elekten akış hızına göre ayarlanan sabit bir hızla ve ısıtma tankına küçük

çakıl taneleri biçiminde doldurulur. Bükümlü halat biçimine getirmek için eriyik cam, dönen bir silindir yüzeyine püskürtülerek 25-30 cm uzunluğunda iplikler haline getirilir ve istenen inceliğe ulaştıktan sonra bir makaraya sarılır. Daha sonra kullanılış amacına göre ya yüzeyine reçine uygulanıp tabakalar haline getirilerek yalıtkan malzeme haline getirilir, ya da yün ipliği gibi çekilerek dokuma ipliğine dönüştürülür. Sürekli cam ipliği elde etmek için küçük delikleri bulunan bir elekten geçirilip koyu renkli bir tabaka halinde bir araya getirilen cam eriyiği, dönen bir makara etrafına sarılır. Bu sarılan iplik yaklaşık 0,005 mm kalınlığındadır (Anonim, 2019b).

Farklı kimyasal bileşimlerden oluşan cam elyaf tipleri ve özellikleri Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Cam elyaf türleri ve özellikleri (Demircioğlu, 2006)

A-Camı	Yüksek alkali oranı - Düşük maliyet
C-Camı	Kimyasal dayanım
E-Camı	Elektriksel özellikler
L-Camı	Radyasyona karşı kurşun içerir
M-Camı	Yüksek elastik modül
S-2 Camı	Yüksek çekme dayanımı
W-2 Camı	Paneller için yarı şeffaf
AR-Camı	Alkali dayanım
R-Camı	Yüksek çekme dayanımı

Silan bazlı kaplama maddesinin bir kısmı Si-O bağları aracılığıyla cam ile reaksiyona girer ve silan üzerindeki organikler reçine ile uyumluluk sağlarlar. Bu elyaflar karbon kadar rijit ve hafif olmadığı gibi, maliyetleri de oldukça ucuzdur. Cam elyaf türlerinin kompozisyon oranları Çizelge 1.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.2. Cam elyaf türlerinin kompozisyonları (Demircioğlu, 2006)

	A	C	E	R	S
SiO ₂	72,0	64,6	52,4	60,0	64,4
Al ₂ O ₃	1,5	4,1	14,4	25,0	25,0
CaO	10,0	13,4	17,2	9,0	-
MgO	2,5	3,3	4,6	6,0	10,3
Na ₂ O, K ₂ O	14,2	9,6	0,8	-	0,3
B ₂ O ₃	-	4,7	10,6	-	-
BaO	-	0,9	-	-	-

E tipi cam elyaf kompozit malzemelerin takviyelendirilmesi için kullanılan başlıca malzemelerdendir. E tipi cam elyaf (E-cam) nem, ısı, kimyasal direnci ve yüksek çekme dayanımı sayesinde çokça tercih edilmektedir. Düşük termal genleşme değerine sahip olan E-camı yüksek elektriksel özellikler gösterir. E-cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin dayanımı ve esneklik modülleri, uzunluk/çap oranına, lif oryantasyonuna ve fiber hacim oranına bağlıdır.

Cam elyafının kullanım alanlarına göre farklı şekillerde elyaf sarma şekilleri bulunmakta olup, bir demet içerisindeki lif adedi ve elyafın çapı farklı olabilir. Cam elyafı biçimlendirildikten sonra yıpranmaya karşı mukavemetinin artması için birtakım kimyasallarla kaplama işlemi gerçekleştirilir. Kaplama malzemesi olarak kolayca kaldırılabilen ve suda çözülebilen polimerler kullanılmaktadır (Anonim, 2019c). Elyaf ile reçinenin birbiriyle tam anlamıyla yapışması gerekmektedir. Aksi taktirde malzemelerin yapışmamasından dolayı takviye malzemesi ve matris, kompozit malzemenin mukavemetini ve sertliğini düşürür. Bunun önüne geçilmesi adına cam elyaf yüzeyi kimyasal malzemelerle kaplanır.

Cam elyafların ağırlık olarak %50'den fazlası silisyum dioksitten (SiO₂) oluşmaktadır (Öztürk, 2015). Ancak bazı cam elyaf türleri sodyum, kalsiyum, demir, bor ve alüminyum gibi elementlerin oksitlerinden meydana gelmektedir. Cam elyaf türleri arasında en yaygın olarak kullanılan E-cam, C-cam ve S-cam için % olarak ağırlık bileşenleri Çizelge 1.3'de verilmiştir.

Çizelge 1.3. Cam elyaf türlerinin % ağırlık bileşenleri (Öztürk, 2015)

Bileşen	E-cam (%)	C-cam (%)	S-cam(%)
SiO ₂	52,4	64,4	64,4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	14,4	4,1	25,0
CaO	17,2	13,4	-
MgO	4,6	3,3	10,3
Na ₂ O, K ₂ O	0,8	9,6	0,3
Ba ₂ O ₃	10,6	4,7	-

Cam elyafların çekme mukavemetleri çelikten daha yüksek olmasına rağmen, ısıl dayanımları çelikten daha düşüktür. Karbon elyaf, E-cam, S-cam, alüminyum, çelik ve titanyuma ait yoğunluk, elastiklik modülü ve çekme mukavemeti değerleri Çizelge 1.4’de verilmiştir.

Çizelge 1.4. Kompozit ve metallerin mekanik özellikleri (Öztürk, 2015)

	Epoksi/S -cam elyaf	Epoksi/E -cam elyaf	Epoksi/ Karbon elyaf	Alüminyum (7075T6)	Titanyum (6Al-4V)	Çelik (4130)
Çekme Mukavemeti [N/mm ²]	1751	1103	1482	572	1103	1300
Elastiklik Modülü [GPa]	59	52	145	69	114	207
Yoğunluk [g/cm ³]	1,99	1,99	1,55	2,76	4,43	8,01

Karbon elyaflar tokluk, sürünme, yüksek darbe dayanımı ve düşük yoğunluk gibi özellikleri ile bilinirler. Bu malzemeler matris olarak çoğunlukla epoksi reçinelerle kullanıldığı gibi, magnezyum ve alüminyum gibi metal matrislerle de kullanılmaktadır. Karbon elyaflara ait mekanik özellikler Çizelge 1.5’de verilmiştir.

Çizelge 1.5. Karbon elyafların mekanik özellikleri (Öztürk, 2015)

Ürün Kodu	Çekme Mukavemeti [N/mm ²]	Elastiklik Modülü [GPa]	Yoğunluk [g/cm ³]
T300 3K	3650	231	1,76
T650/35 3K	4550	241	1,77
Thornel P25	1400	160	1,90
Thornel P75	930	320	1,70

1.3. Aramid Elyaf

Aramid ilk organik elyaf türü ve bir nylon türevidir. Diğer nylon ve elyaf çeşitlerine göre daha yüksek mukavemet ve modüle sahiptir. Elyafar arasında en kuvvetli ve sıcaklığa karşı en dayanıklı yapıya sahiptir. Aramid polimerlerin oluşumunda molekül zincir yapısındaki bağların %85'i aromatik halkalardan meydana gelmektedir (Anonim, 2019d). Meta Aramid ve Para Aramid olmak üzere 2 şekilde sınıflandırılan aramidlerin en yaygın kullanılan türü Para Aramidlerdir.

Aramid Elyafın Özellikleri;

1. Aramid lifleri çok güçlü ve yüksek mukavemete sahiptirler
2. Young Modülü: 130-179 GPa'dır (Karbon Elyaf: 300 GPa ve Cam Elyaf: 81 GPa)
3. Yüksek sıcaklığa karşı çok dayanıklı ve erime noktası yoktur (500 °C'nin üzerinde bozulma başlar)
4. Aşınma ve kesmeye karşı çok dirençlidirler
5. Yüksek mukavemetleri sebebiyle delinmemesi istenilen ürünlerin yapımında kullanılırlar
6. Ultraviyole ışınları, tuz ve aside maruz kaldıklarında yapısı bozulur
7. Kumaş ve lif halinde iken kesme, katlanma ve işlenme zorluğu vardır
8. Yapısı nem tutmaya müsaittir

Aramidin kimyasal yapısı 'Poli Para Fenilenterepitelamid'dir. Yukarıda bahsi geçen meta aramidler yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı olduklarından dolayı, koruyucu giysi, ısı ve elektrik malzemeleri gibi alanlarda kullanılırlar. Diğer bir

tür olan para aramidler ise üstün mekanik özellikleri nedeniyle çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Para aramidlerin otomobil lastikleri içerisinde bulunan çelik tellerin yerine başka bir malzemenin kullanılmasının istenmesi sonucu Dupont isimli birisi tarafından keşfedildiği ortaya atılmıştır. Bu malzeme ilk para aramid lifine verilen ve ismi tescilli olan Kevlar şeklinde bilinir. Bundan sonra Dünya'da bulunan ikinci para aramid kaşifi ise Japon Teijin'dir.

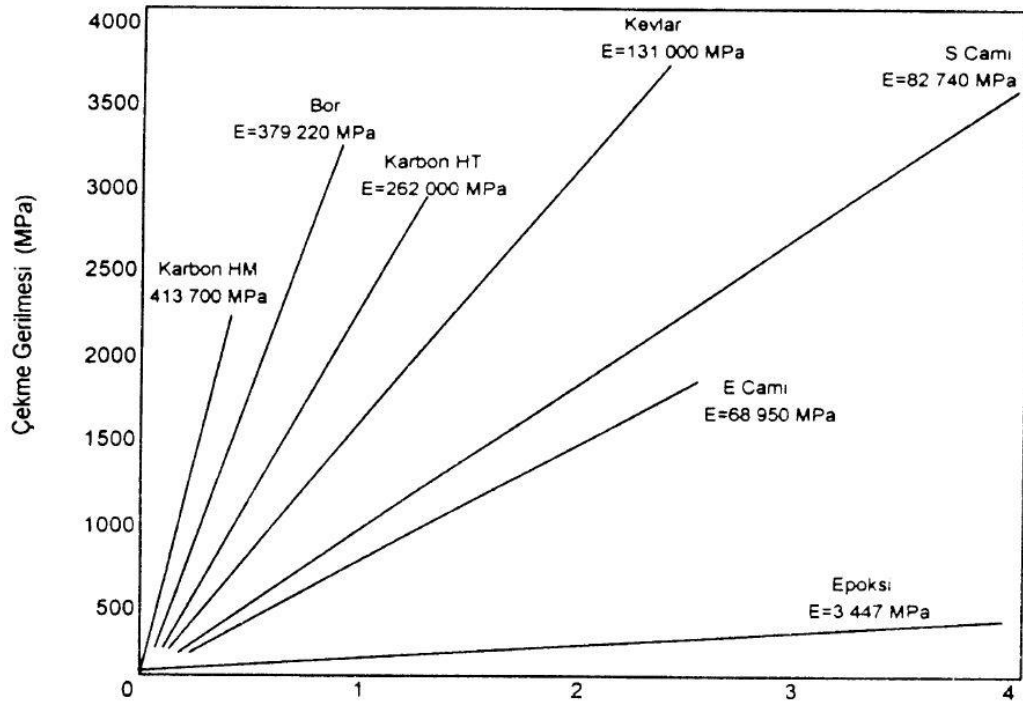
Piyasada farklı alanlarda kullanılmak üzere üretilen para aramid türevlerinin en yaygın olanları;

1. Kevlar 29 (Dupont)
2. Technora (Teijin)
3. Kevlar 49 (Dupont)
4. Twaron (Teijin)

şeklindedir.

Bu türlerin Gerilme-Uzama grafiği ile ilgili bilgi Çizelge1.6'de gösterilmiştir (Anonim, 2019e).

Çizelge 1.6. Elyaf ve matrislerin gerilme-uzama grafiği (Anonim, 2019e)



Aramid elyaflar hafif ve rijit olmalarının yanı sıra cam elyaftan sonra en ucuz elyaf türlerinden biridir. Sıklıkla kevlar olarak adlandırılırlar. Basma mukavemetleri ve nem tutma özellikleri çok düşüktür. Dolayısıyla karbon elyafların yüksek basma mukavemetleri sayesinde bir araya gelerek oluşturdukları kompozit malzemeler havacılık sektöründe önemli yer tutmaktadır.

Bazı aramid elyafların mekanik özellikleri Çizelge 1.7’de verilmiştir.

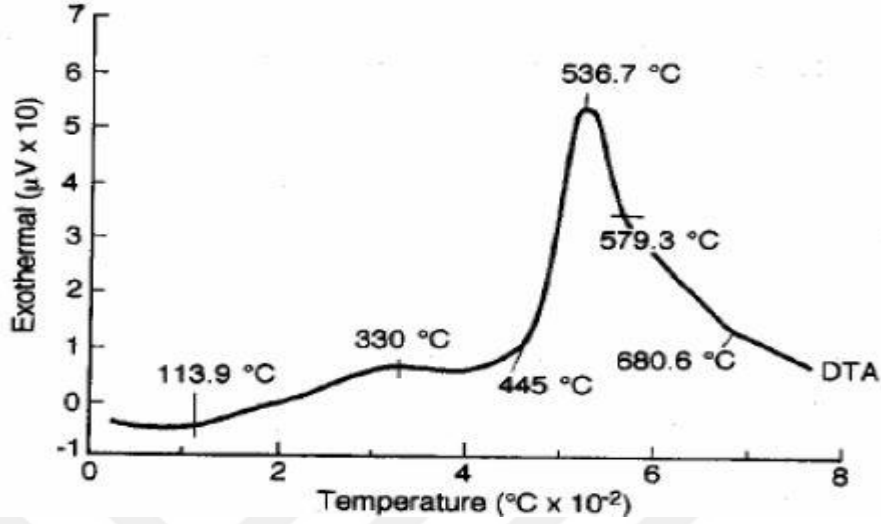
Çizelge 1.7. Bazı aramid elyafların mekanik özellikleri (Öztürk, 2015)

	Çekme Mukavemeti [N/mm²]	Elastiklik Modülü [GPa]	Uzama [%]	Yoğunluk [g/cm³]
Kevlar 29	2920	70	3,6	1,44
Kevlar 49	3000	112	2,4	1,44
Kevlar 149	3450	179	2	1,47

Bu 4 elyaf çeşidinden ilk ikisi kurşun geçirmez malzemelerin üretiminde kullanılırken, son ikisi ise çok çeşitli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Bu yüzden ilk 2 ve son 2 elyaf arasında çok büyük farklılıklar vardır. Son 2 elyafın yaygın kullanım alanlarından bir tanesi Gemi Mühendisliğidir.

Aramidler yüksek ergime sıcaklıklarına (>530°C) ve nispeten yüksek termal kararlılığa sahiplerdir. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) 375°C'den yüksek olup, 640°C civarında ise mukavemetini tamamen kaybederler. Artan sıcaklık ile birlikte negatif termal genleşme oluştururlar. Kevlar 49'a ait sıcaklık-genleşme grafiği Çizelge 1.8'de verilmiştir.

Çizelge 1.8. Kevlar 49'un sıcaklık-genleşme grafiği (Anonim, 2019f)



Kevlar 100, Kevlar 119, Kevlar129, Kevlar 149, Kevlar 159, Kevlar XP ve Heracron şeklinde birçok çeşitli alanlarda kullanılmak üzere geliştirilen ve üretilen para aramid türleri de mevcuttur. Para aramid kullanılan kompozitlerde en çok tercih edilen matrisler epoksi, vinilester ve fenolik reçinelerdir.

Elyafar genel olarak çekme mukavemeti yüksek olan malzemelerdir ancak aramid elyafar, cam elyafara oranla daha düşük yoğunluklara sahip olmak ile birlikte daha yüksek çekme mukavemetine sahiptirler. Dolayısıyla belli başlı elyaf çeşitlerinin yoğunluk, çekme dayanımı ve elastisite modüllerine göre sınıflandırılması Çizelge 1.9 'da gösterilmiştir.

Çizelge 1.9. Elyaf çeşitleri arasındaki sınıflandırma (Arıcasoy, 2006)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
E-Cam	2.55	2000	80
S-Cam	2.49	4750	89
Alüminyum	3.28	1950	297
Karbon	2.00	2900	525
Kevlar 29	1.44	2860	64
Kevlar 49	1.44	3750	136

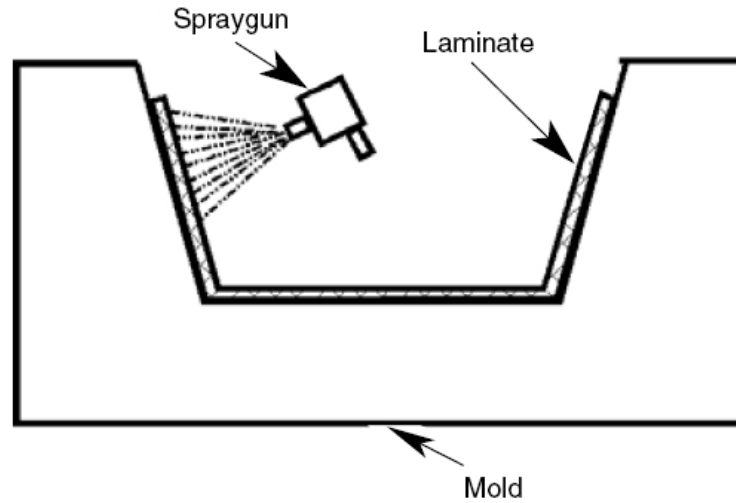
Deneylerde kullanılan aramid çeşidi Kevlar 49 (Dupont) olup, muadili para-aramid liflerinden dokunmuş, hafifliğin çok önemli olduğu, yüksek performanslı kompozit parça imalatında kullanılan, kaplamasız aramid fiber kumaştır. Diğer türlere göre sahip olduğu ekonomik fiyatı ile yüksek çekme mukavemeti göstermektedir. 300 gr/m² yoğunluğu olup, yüksek darbe, aşınma, kırılma ve yüksek sıcaklıklara çok dayanıklıdır. Kuru halde UV dayanımı düşüktür, uzun vadede neme karşı hassastır. Bu sebeple kuru ve karanlık ortamlarda muhafaza edilmelidir.

1.4. Kompozit Üretim Yöntemleri

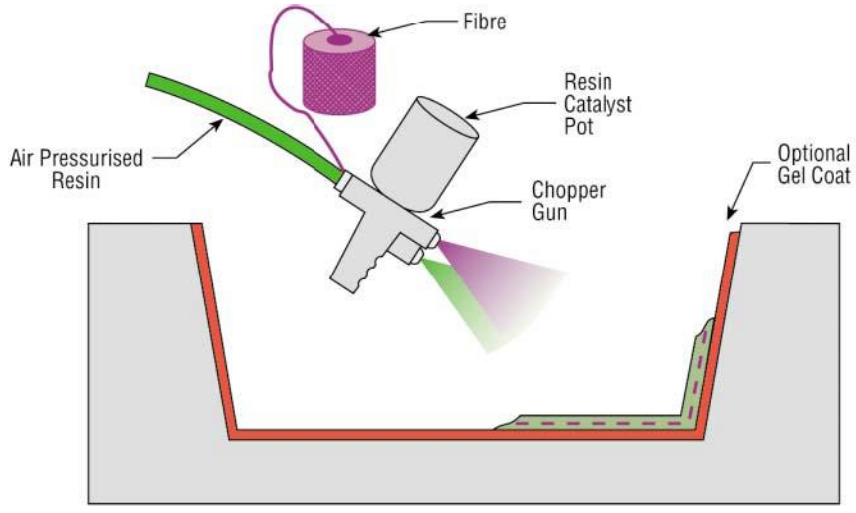
Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan reçine ve takviye malzemesinin dışında ek olarak, kompozit üretim yöntemleri de bir kompozit malzemenin kesin özelliklerini belirlemede mühim rol alır (Anonim, 2019g).

1.4.1. Sprey Kalıplama/Püskürtme Yöntemi (Spray Lay-up)

Bu yöntemde reçine olarak genellikle polyester ve takviye malzemesi olarak ise demetler şeklindeki lifler kullanılır. Püskürtme yöntemi ile reçine hazırlanmasına yönelik üretim prosesi Şekil 1.4'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 1.4. Püskürtme yöntemi ile reçine hazırlanması(a), (b) (Anonim, 2019g)

Püskürtme Yönteminde İşlem Basamakları;

1. Kalıp yüzeyi kalıp ayırıcı malzeme ile kaplanır.
2. Kalıp yüzeyine jel kaplama uygulanır ve sertleşmesi beklenir.
3. Fiberler el tabancasında kıyılır ve katalizör/sertleştirici ile karıştırılan bu fiberler bir kalıba püskürtülerek üretim gerçekleştirilir.
4. Belirli bir kalınlığa ulaşıldıktan sonra malzemeye genellikle ortam koşullarında kürleme uygulanır.

Püskürtme yönteminin avantajları ve dezavantajları şu şekildedir;

Avantaj;

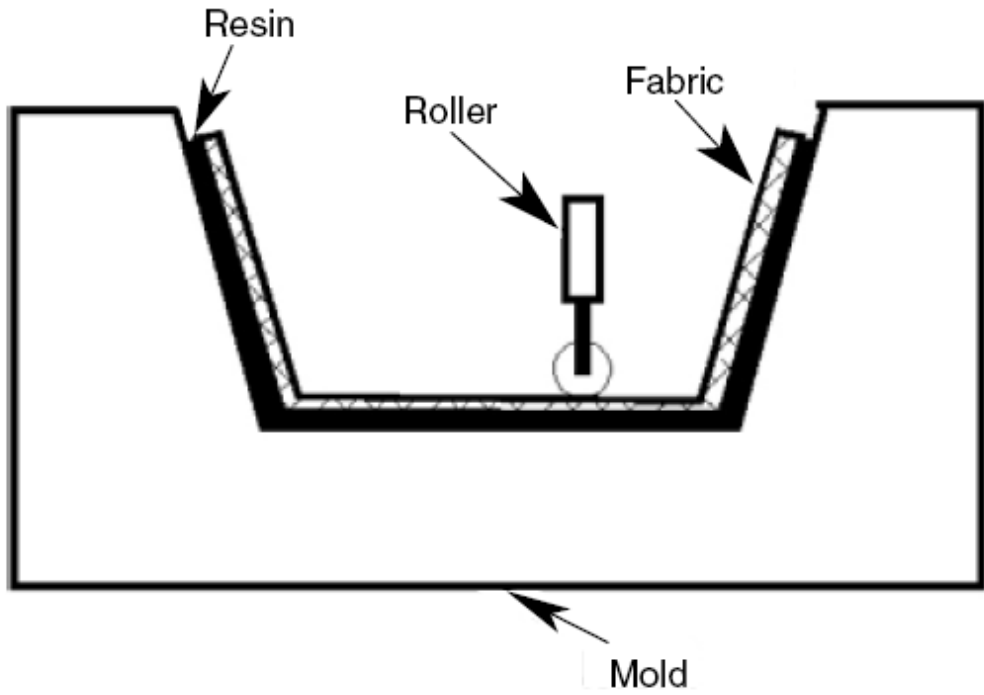
1. Düşük maliyetli ve kısa sürede üretim imkanı
2. Uygulama kolaylığı
3. Karmaşık yapıli kompozitlerin üretilmesine uygun

Dezavantaj;

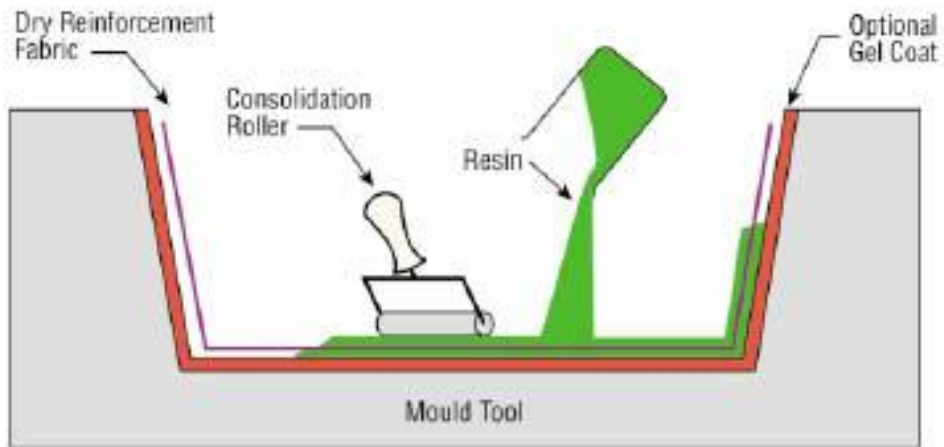
1. Reçine oranı yüksek ürün elde edilmesi
2. Sağlık açısından zararlı olan yüksek styrene içeriği
3. Düşük viskozitesi sebebiyle püskürtme esnasında giysilere daha kolay nüfuz etmesi
4. Kısa liflerden ötürü sınırlı mekanik özellikler

1.4.2 Elle Tabakalama Yöntemi (Hand Lay-up/Wet Lay-up)

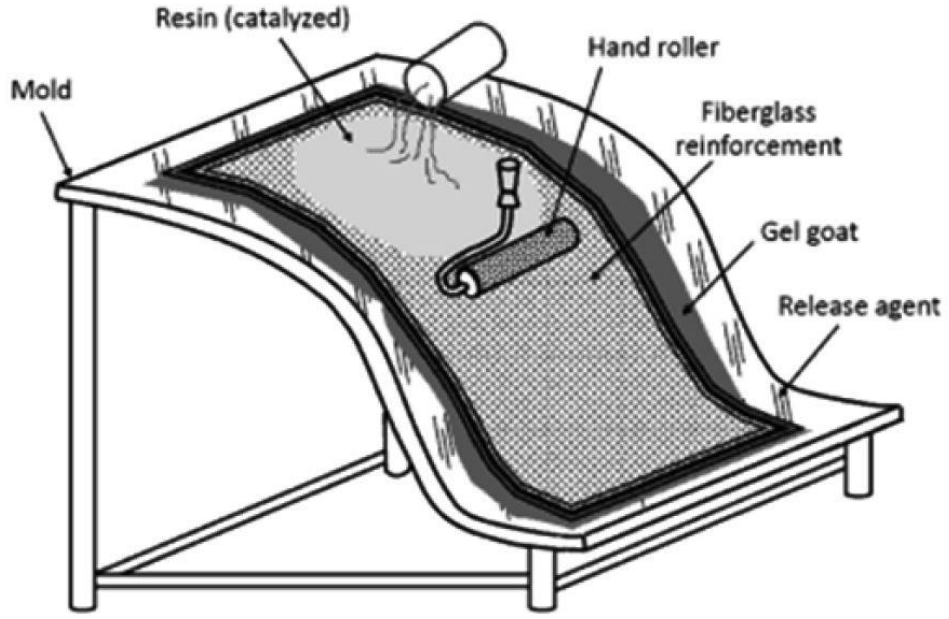
Bu yöntemde, elyaf (kumaş) bir kalıba yerleştirilir ve reçine bir fırça veya rulo ile kumaşa emdirilir. Sonrasında reçine emdirilen kumaş farklı sıcaklık ve farklı basınçlar altında pişmeye/kurumaya bırakılır. Reçineler her elyaf tabakaya ayrı ayrı emdirilebildiği gibi elyaf özelliklerine bağlı olarak tüm katmanlara tek seferde de emdirilebilir. Elle tabakalama yöntemine ait üretim şeması Şekil 1.5'te gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

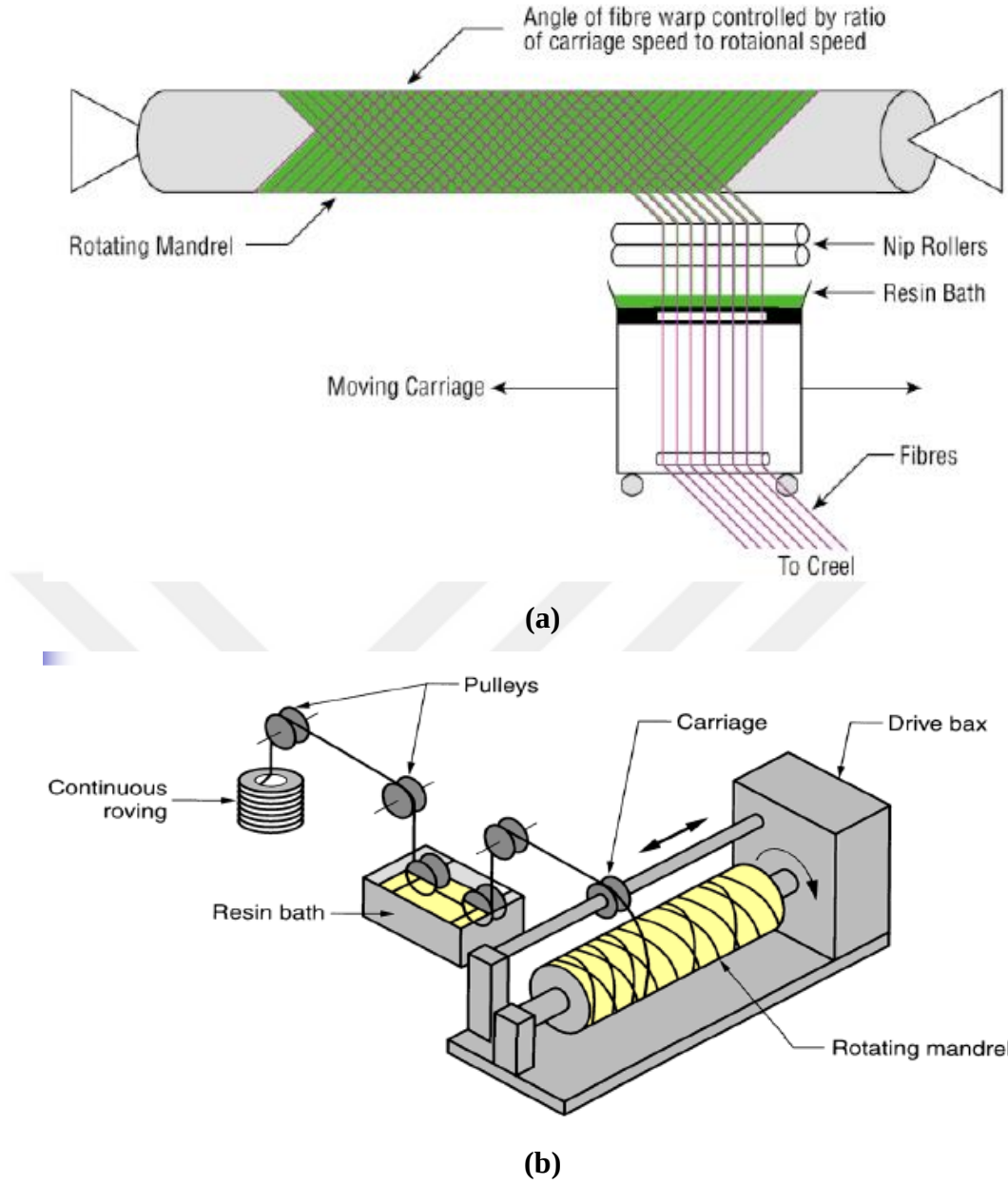
Şekil 1.5. Elle tabakalama yöntemi ile reçine hazırlanması (a), (b), (c) (Anonim, 2019g)

Bu yöntem ile üretim yapabilmek için vinylester, epoksi, polyester ve phenolic gibi termoset reçineler kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak da cam, karbon ve aramid gibi piyasada bilinirliği ve kullanımı yüksek olan elyaflar kullanılabilir. Fakat bu yöntemle ağır aramid elyaflara reçine emdirilmesi oldukça zordur.

1.4.3. İplik Sarma ile Tabakalama Yöntemi (Filament Winding)

Elyaf (iplik) sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine sürülmesinden sonrası dönen bir makaradan geçirilerek kalıp üzerine sarılmasıdır. Bu yöntem ile genelde tank, boru vb. içi boş malzemelerin üretimi yapılmaktadır. Bu yönteme ait işlem basamakları şu şekildedir (Anonim, 2019g);

1. Makaraya sarılı olan lifler reçine banyosundan geçer.
2. Reçine emdirilmiş olan lifler hareketli bir mekanizma vasıtasıyla sabit bir hızda kendi eksenini etrafında dönen mandrele istenen oryantasyonda (açıda) sarılır.
3. İstenilen kalınlığa ya da tabaka sayısına ulaşıldıktan sonra işlem sonlanır.
4. Son olarak kürtleme işlemi yapılır.

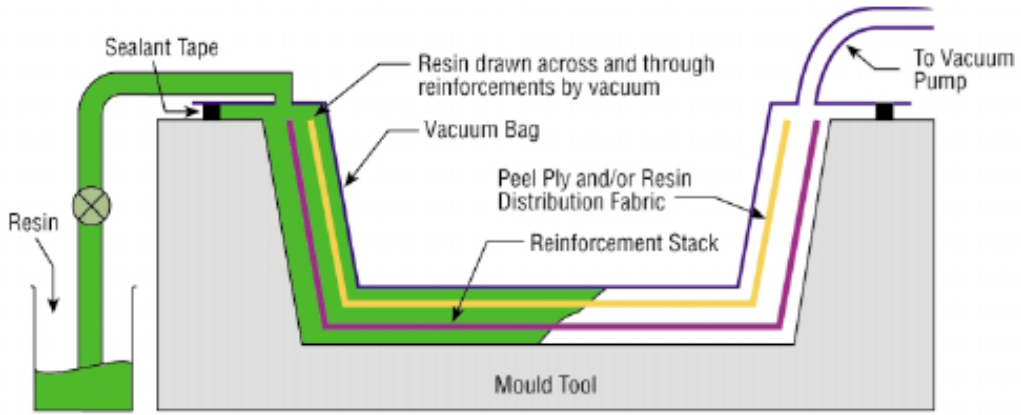
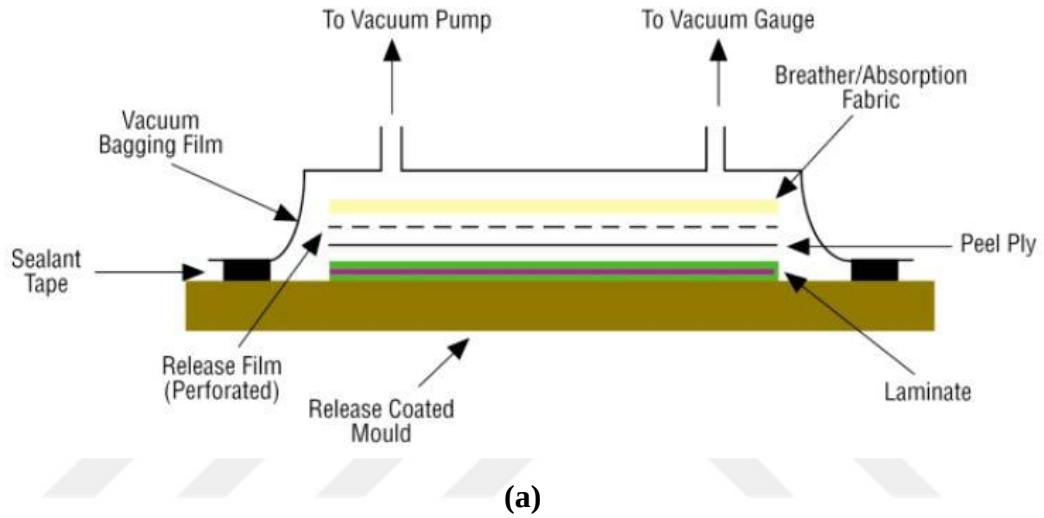


Şekil 1.6. İplik sarma ile tabakalama yöntemi şeması (a), (b) (Anonim, 2019g)

Bu yöntem ile üretim yapabilmek için epoksi, polyester, vinylester, phenolic gibi reçine türlerinden herhangi birisi kullanılabilir. Bir makaraya sarılı olan lifler ise takviye malzemesi olarak kullanılır. Kumaş şeklindeki elyaflar kullanılmaz. İplik sarma ile tabakalama yöntemine ait üretim şeması Şekil 1.6'da gösterilmiştir.

1.4.4. Vakumlu Paketleme Yöntemi (Vacuum Bagging)

Bu yöntem elle tabakalama yönteminin devamı niteliğinde olup, tek fark elle reçine sürülmüş tabakalı malzeme daha sonra vakumlu ortama dahil edilmektedir. Bu metot özellikle fenolik ve epoksi reçine kullanımı için idealdir. Çünkü; vakum, vinilester ve polyester işlemlerinde yüksek oranda styrenenin reçineden çıkarılmasına neden olabilir. Bu da polimerleşme için engel olacak bir etkidir (Anonim, 2019g). Vakumlu paketleme yöntemi Şekil 1.7'de görülmektedir.



Şekil 1.7. Vakumlu paketleme yöntemi şeması (a), (b) (Anonim, 2019g)

Bu yöntemin işlem basamakları:

1. Kalıp ayırıcıdan sonra bir zemine yerleştirilen kumaşa bir rulo veya fırça yardımı ile reçine/sertleştirici karışımı sürülür.
2. Laminenin üzerine üzerinde delikleri bulunan ayırıcı özellikte bir film koyulur.
3. Bu filmin üzerine hava dolaşımını ve fazla reçineyi tutmayı sağlayan bir kumaş serilir.
4. Plastik bir vakum filmi ve çift taraflı yapışkan sızdırmazlık macunları yardımıyla, reçine emdirilen kumaş dış ortamdan tamamen izole edilir.
5. Bir vakum pompası ile vakumlama yapılır.
6. Malzeme pişmeye bırakılır ve işlem tamamlanır.

1.4.5. Otoklav Pişirme Yöntemi

Bu yöntemde üretimi yapılacak malzeme için önce laminasyon programına uygun bir şekilde tabakalama (genelde prepreg kullanılır), ve vakum torbalaması gerçekleştirilir. Daha sonra hazırlanan ürün bir otoklav fırınının içine konularak belirli sıcaklık ve basınç altında pişmeye ve katılaşmaya bırakılır. Otoklav fırınların özelliği iç basıncı ve sıcaklığı kontrol edilebilir olmasıdır. Malzemenin pişmesi ve katılaşması belli bir kür çevrimine (cure cycle) göre tamamlanır. Kür çevriminin süresini, kullanılan reçine tipi (reçine ve sertleştirici), üretilecek malzeme kalınlığı ve malzeme geometrisi gibi faktörler etkiler. Otoklav fırınların içindeki basınç iki şekilde oluşturulabilir;

1. Vakumlu torbalama metodundaki gibi malzemeye iç vakum uygulayarak
2. Otoklav fırın içerisinde dış basınç oluşturarak

Otoklav fırını içerisinde dış basınç oluşturmak için tankın içerisine dışarıdan azot veya hava gazı gönderilir. Fırın içerisinde oluşan yüksek sıcaklıklar nedeniyle ortaya çıkabilecek bir tutuşma veya yanmaya karşı genellikle azot gazı tercih edilir. Bu şekilde iç ve dış basınç oluşturarak istenilen basınç değerlerine ulaşılabilir (Anonim, 2019g).

Fırın içerisinde sıcaklık oluşturmak için ise tank içerisinde "fişek ısıtıcılar/rezistanslar" kullanılır. Bunun dışında tank içerisine gönderilen hava

veya azot gazı da önceden ısıtılmış bir şekilde gönderilebilir. Fırın içerisindeki basınç ve sıcaklık otomatik olarak kontrol edilmektedir (Anonim, 2019g).

Önceden reçine emdirilmiş karbon, cam ya da aramid elyaflara pre-impregnated, yani prepreg denir. Prepreg elyaflar genellikle otoklav yöntemi ile üretilse de fırınlama veya vakum torbalama yöntemiyle de üretimi mümkündür. Bu tip kumaşlarla yapılan üretim diğer üretim yöntemlerine göre hem daha pratiktir hem de ürünlerin standart bir kalitede çıkmasını sağlamaktadır. Üretim sırasında pratik olması, ek olarak herhangi bir reçine ve sertleştirici kullanımına gereksinimi ortadan kaldırır ve reçine emdirilmemiş elyafa göre kalıp yüzeyine, birbiri üstüne yapışması ve fiberlerin ayrılmamasından dolayı serim işlemi de daha kolay gerçekleşmektedir. Ayrıca kürleşme süresi de el yatırması, vakum infüzyon ve vakum torbalama yöntemlerine göre daha kısadır.

Prepreg'le üretimin avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da vardır. Öncelikle kendisi de üretim yöntemleri de diğerlerine göre oldukça pahalıdır. Otoklav yönteminde sıcaklık, kürleşme grafiğine uygun olarak 120-180°C civarında ayarlanıp aynı zamanda da 3-7 MPa basınç altında gerçekleştirilir. Deney numuneleri 110°C'den 150°C'ye kadar geniş kürleme aralıklarından 125°C'de 30 dk, 140°C'de 20 dk, 150°C'de 15 dk kürleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Fırınla üretimde ise yine kürleşme sıcaklığı, uygun sıcaklıklara ayarlanmalıdır. Bu tip otoklav ve fırınlar oldukça pahalı endüstriyel ürünlerdir.

Prepreglerin saklama koşulları da üretici için büyük bir zorluktur. Oda şartlarında 4-6 haftaya kadar saklanabilen çeşitleri olsa da genel olarak -20°C civarında dondurucuda saklanma koşulları vardır. Ayrıca dondurucudan çıkarıldıktan sonra kullanılmaları gerekmektedir. Özetle prepreg malzemeler, özel saklama koşullarında tutulurlar ve belirli bir raf ömürleri vardır. Üretim sırasında ayrıca bir reçine emdirme işlemine gerek duyulmaz. Prepregler tek yönlü bant, örgülü kumaş veya bükülmüş iplik şeklinde üretilmektedir. Özellikle epoksi prepregler endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Termoset ve termoplastik prepregler mevcuttur.

1.4.6. Reçine Transfer Kalıplama (Reçine Enjeksiyonu) Metodu

Bu kompozit üretim yönteminde elle tabakalama yöntemine göre uzun ömürlü ve daha hızlı üretim yapılmaktadır. Bu yöntemde iki parçalı kalıp

kullanılmaktadır ve kompozit malzemeden oluşmaktadır (Anonim, 2019c). RTM yöntemi genellikle her iki yüzeyinin de pürüzsüz olması istenen kompozitler için kullanılır. Takviye malzemesi kumaş, keçe veya bu ikisinin birleşimidir. Takviye malzemesi önceden kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyaf lar matris içerisinde geç ayrış an reçinelerle kaplanır ve kalıp içerisinde kayması önlenir. Reçine basınçlı bir şekilde kalıp içerisine gönderilir. Matris enjeksiyonu en fazla 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda gerçekleştirilir. Daha sonra içerideki hava boşaltılması ve reçinenin elyaf la daha iyi birleşmesi için vakum kullanılır. Elyaf ın kalıba yerleştirilmesi uzun süreli bir işçilik gerektirebilir. Kalıp kapalı olduğundan dolayı gözenekli ürünler ve karmaşık parçalar üretilebilir. F1 arabalar ve Concorde uçaklarında bazı kompozit parçalar bu şekilde hazırlanmaktadır.

1.4.7. Hazır Kalıplama Metodu (SMC, BMC)

Bu yöntem cam elyaf, reçine, katkı malzemeleri içeren ve hazır kalıplama birleşimleri olarak adlandırılan (SMC, BMC) sıcak pres kalıplarla hazırlanmasıdır. Yöntem sayesinde karmaşık şekilli ve farklı et kalınlığına sahip ürünler üretilebilmektedir. Ayrıca ürün yüzeylerine farklı şekiller verebilme imkanı da tanınmaktadır. Bu yöntemin kalıpları metal olduğundan dolayı diğer yöntemlere oranla daha maliyetlidir. Ayrıca kalıplama bileşimlerinin buzdolabında saklanması gerekliliğinden dolayı dezavantajlıdır. Büyük parçaların üretimi için pahalı preslere ihtiyaç duyulmaktadır. İki tür hazır kalıplama yöntemi kullanılmaktadır (Anonim, 2019c);

1. Hazır kalıplama pestili / SMC (sheet moulding composites)
2. Hazır kalıplama hamuru / BMC (bulk moduling composites)

SMC: Takviye malzemesi olarak bir lif ve bir reçinenin önceden biraraya getirilmesi ile oluşan pestil şeklindeki malzemedir. Sürekli lifler 25-50 mm aralığında kırpılmış ve kompozitin toplam ağırlığının %25-30'unu oluşturmaktadır. Genelde 3mm kalınlığında üretimi yapılmaktadır (Anonim, 2019c).

BMC: Bu da SMC'ye benzer şekilde takviye malzemesi olan lif ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi sonucu meydana gelen hamur şeklindeki malzemedir (Anonim, 2019c).

Hazır kalıplama yönteminin avantajları;

- Kolayca kaplanabilme ve boyanabilme
- Geri dönüşüme uygun olma
- Düzgün yüzeye sahip olma
- Montaj kolaylığı
- Yangına dayanıklı
- Soğuğa karşı kırılma olmama
- Çok geniş tasarım çeşitliliğine sahip olma

Bu yöntem RTM'ye benzemekle birlikte, elyaf ve reçine karışımının kalıp dışarısında gerçekleşmiş ve basınç uygulanarak boş kalıp içerisine enjekte edilmesi yönüyle farklılık göstermektedir. Bu yöntemde sadece düşük viskoziteli reçineler kullanılabilir ve diğer yöntemlere oranla çok daha hızlıdır. Bu yöntemle, çocuk oyuncaklarından uçak parçalarına kadar çok çeşitli alanlarda kompozit malzemeler üretilmektedir.

1.4.8. Sıcak Presleme Metodu

Bu yöntemle üretim yapabilmek için plaka şekline getirilen elyaf malzeme istenilen ölçülerde kesilir. Daha sonra reçine emdirilerek prepreg haline getirilir. Hazırlanan prepregler istenilen ölçülere göre tekrar kesilir ve pres makinasına alınır. İstenilen kompozitin özelliklerine göre belirli süre, sıcaklık ve basınçta bekletilir. Presten çıkan malzemeler istenilen özelliklere sahiptir. Bu yöntemle ait üretim prosesi Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Sıcak presleme üretim prosesi

Deneylerde kullanılan tabakalı kompozitler sıcak presleme yönteminde bahsedilen usullere uygun bir şekilde üretilmiştir. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan prepreg malzemenin kullanımı ve teknik özellikleri;

- Otoklav, vakum torbalama ve sıcak prese uygun
- Uygulanan basınç aralığı 10-15 bar
- Reçine Oranı: %35-%40
- Prepreg Raf Ömrü: Oda sıcaklığında (23°C) 9 ay / -18°C'de 36 ay
- Camsı geçiş sıcaklığı 125°C'dir.

Deneylerde kullanılan kompozit malzemeler 120°C'de ve 1 saat kadar bekletilerek hazırlanmıştır. Bu süre zarfında malzemeler üzerinde uygulanan basınç 10-15 bar aralığında değişmektedir.

Reçine verme işlemi önceden gerçekleşmiş olduğu için kuru kalma yada fazla reçine emme gibi durumlar söz konusu değildir. Bu durum da üründe herhangi bir mukavemet kaybı olmaksızın standart ürünler elde edilmesini sağlar. Kullanılan prepreg çeşidine bağlı olarak reçine/elyaf oranı %35-%50 arasında değişim göstermektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Uçak sanayinde elyaf destekli kompozitler çok sıkça kullanılmaktadır. Bu alanda kullanılan elyaf, karbon aramid ve camdır. Matris malzemesi olarak 120-170°C sıcaklıkları arasında polimerleşen epoksiler kullanılmaktadır. Şahin (2011), E-camı/epoksi malzemeden filaman sarım metoduyla imal edilen CTP (cam takviyeli plastik) boruların farklı basınç değerleri altındaki hasar ve yorulma davranışını incelemiştir. Buna bağlı olarak kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri üzerinde değerlendirmeler yapmıştır. Yorulma deneyleri için PLC kontrollü hidrolik iç basınç yorulma deney seti hazırlayıp, hasarlı ve hasarsız numunelere ASTM-D 2992 standardına uygun olarak $R=0.05$ ve 0.42 Hz frekansta yorulma testi uygulamıştır. Bu işlemlerin ışığında ilk sızıntı, yoğun sızıntı ve son hasarın olduğu çevrim sayılarını kayıt altına almıştır. Taşyürek (2014), E-camı/epoksi ve filaman sarım metodu ile üretilen kompozit boruları karbon nano tüplerle takviye etmiş ve bunların iç basınç altındaki yorulma davranışını incelemiştir. Deneyde %0.5 ve %1 olmak üzere 2 farklı oranda nano malzeme takviyesi kullanmıştır. Bunlara uygulanan iç basınç sonucunda ortaya çıkan yorulma davranışı ile hiçbir malzeme takviyesi yapılmamış CTP borular arasında kıyaslama yapmıştır. Ayrıca yüzey çatlaklı ve yüzey çatlaksız borulara uygulanan iç basınç sonucundaki farklılıkları gözlemlemiştir. Karbon nano tüp uygulanan borulardaki basınç değerleri uygulanmayanlara göre %10 daha yüksek çıkmıştır. Malzemelerin yorulma davranışını %1 CNT takviyesi ile 5 kata kadar artırdığını gözlemlemiştir.

E-camı fiber takviyeli kompozitler kategorisinde değerlendirilmektedir. Moleküler yapısı Kalsiyum Oksit/Alümina-Borasilkat esaslıdır. Diğer fiber malzemelere göre daha ucuzdur. Bu yüzden kullanımı daha çok tercih edilmektedir ve basınca karşı oldukça dayanıklıdır. Ellyin ve Martens (2001), filaman sarımla üretilen CTP borulara iki eksenli yorulma deneyi uygulamışlardır. Farklı teğetsel/eksenel yükleme durumlarında malzemenin davranışını incelemişlerdir. Yükleme oranının değişimi ile statik ve alternatif yükleme durumlarında sızıntı başlangıcı ve yorulma olayı arasındaki bağıntıyı gözlemlemişler. ASTM D2992 standardına göre bu deneyleri 0.42 Hz frekansta ve $R=0.05$ gerilme oranında gerçekleştirmişlerdir.

Rafiee ve Elasmi (2017), araştırmalarında içsel hidrostatik basınca maruz kalan kompozit boruların yaşam sürelerini tahmin edebilmek için çalışmışlardır. Yorulma kaybını değerlendirmek için sertlikteki azalmaya bağlı olarak ilerici hasar modeli tekniğini kullanmışlardır. Modelleme prosedürü 3 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; gerilme analizi, hasar değerlendirme ve mekanik özelliklerdeki azalmadır. Kompozit boruların öngörülen yorulma sürelerindeki modelin uygulanabilirliği, literatürdeki uygun deneysel veriler kullanılarak doğrulanır.

Günümüzde yağ endüstrisinde hasar görmüş boruları tamir etmek ve güçlendirmek için polimerik matriks kompozitlerin kullanımı yaygınlaşmıştır (Rohem vd., 2016). Bu yüzden hasar görmüş boruların tamiri için yeni gelişmiş kompozit yapraksı materyallerin performansını doğrulamak esastır. Çalışmalarında boruların tamiri için yeni kompozit yapraklarının etkililiğini incelemişlerdir.

Kitching ve Hose (1995), her biri dik açığa sahip ancak farklı şekillerde bükülmüş 5 ayrı kompozit borunun eğilme düzlemine bağlı iken, eğilme düzlemi dışında ve iç basınç altında uygulanmış olan her bir yükleme durumunda gerilme dağılımlarını ölçmüşlerdir. Gerilmeyi lineer rejime göre sınırlandırmış ve %0.2nin altına indirmişlerdir. Cam elyaf doğranmış mat tabaka ile bir PVC kaplama içeren düz teğet boruya polyester reçine emdirmişlerdir. Sonuçları mevcut bilinen ve sonlu eleman analizleri kullanılan teorik tahminler ile kıyaslamışlardır. Borular düşük içsel çaplara sahiptir ve eşdeğer eğilme yarıçapı 250 mm'dir.

Casari vd. (2006), kalın filaman sarım kompozit tüplerde artan gerilmeyi tanımlamak için bir metot kullanmışlardır. Bu çalışmada dikkate alınan 3 materyal ıslak sarılı elyaf camı epoksi kompozit tüpler, R-camı ve 3 ayrı sarım açılı (35°,55°ve 85°) T700 karbon fiberdir. Çalışmanın amacı iç basıncı ölçmek ve katı mekaniğinin klasik eşitliklerine bağlı olarak bir artan gerilme modelinden tahmin sonuçlarını kıyaslamaktır.

Elyaf takviyeli kompozitler, her biri değişik yönde dizilmiş tabakacıkların birleştirilmesiyle meydana gelmiştir. Bu kompozit malzemenin mukavemeti ve rijitliği değişik yönlerde takviyelendirilmiştir. Tabakalı elyaf takviyeli kompozitlerin mukavemeti inşa edilecek elemanların ihtiyacına göre dizayn edilir.

Sayman, helisel olarak cam elyafla takviye edilmiş polyester boruların gerilme durumundaki davranışlarını incelemiştir. Kompleks gerilme hallerinde optimum helis açılarını ve kompozit malzemelerin gerilme üzerindeki etkilerini gözlemlemiştir. Kompozit malzemelerin kullanıldığı boruların gerilme durumunda maksimum distorsyon enerjisi teorisine uyduğu sonucuna varmıştır (Sayman, 1975). Farklı helis açılarında üretilen ince cidarlı kompozit boruların farklı yükleme durumunda farklı gerilme sonuçlarına ulaştığını fark etmiştir.

Zhao ve arkadaşları, birçok tabakalı kompozit silindirin lokal katmanlarını dikkate alarak gerilme analizini incelemiştir. Sonuçlar gerilme dağılımının kompozit silindirdeki katman ayrılmasına bağlı olduğunu işaret etmiştir (Zhao vd., 2000). Ayrıca kompozit tabakalardaki bütün gerilmelerin iç taraftaki metal silindirden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Kompozit malzemeler onları daha klasik mühendislik malzemelerinden farklı kılacak birçok karakteristiğe sahiptir. Çoğu mühendislik malzemeleri homojen ve izotropdur. Yapılar ile sıcaklık bağımlı izotropik malzeme özellikleri, bir sıcaklık değişimine maruz bırakıldığında homojen değildir. Kompozit malzemeler hem heterojendir ve hem de anizotropiktir. Bazı kompozit malzemeler örneğin, yaprak şekilli cam fiberli yapı, üç tabakaya sahiptir ve bunların her biri homojen ve izotropiktir.

Kruijer vd. (2006), çalışmalarında bir çelik katkılı termoplastik borunun zamana bağlı davranışını analiz etmişlerdir. Kompozit boruların bu yeni çeşidi termoplastik bantların 2 tabakasının üzerine sarılı yüksek yoğunluklu polietilenden oluşmuştur. Bu termoplastik bantlar yüksek dayanıklılığa sahip çelik tellerle takviye edilmiştir. Her ne kadar çelik teller yükün büyük bir kısmını karşılasa da bir lineer elastik malzeme davranışı sergiler. Gerçek viskoelastik deformasyonların kuvvetlendirilmiş tabakaların açılarının küçük varyasyonlarına karşı çok hassas olduğunu gözlemlemiştir.

Knox vd. (2000), boru çalışma sistemlerinin eksenel ve eğilme yüklemesine maruz kalan yapıştırıcı ile kuvvetlendirilmiş polimer kompozit boruların davranışlarını incelemiştir. Polimer kompozit boruları belirli açılarla yapıştırmış, çeşitli yüklemeler uygulayarak uzun vadede performansını ve hasar toleranslarını araştırmışlardır.

Görücü (2011), kompozit boruları güçlendirme boruları ile takviye ederek eğilme dayanımlarının geliştirilmesi üzerinde çalışmıştır. Boruları farklı helisel açılara ve farklı boğumlar arası mesafeye sahip olacak şekilde ve karbon fiberlerin epoksi reçine içinde emdirilerek elyaf sarma yöntemiyle dizayn ederek test etmiştir. Bu borular 20, 30, 45 derece sarma açılara ve 60, 90, 180 mm boğumlar arası mesafeye sahiptir. Elde edilen borulara dört noktadan eğme kuvveti uygulanmıştır. Bu tasarımı Abacus programı üzerinde modelleyerek sonuçlarını gerçek deneyler ile kıyaslamıştır. Güçlendirme boğumlarının eğilme dayanımını artırmada belirgin bir etkisi olduğunu tespit etmiştir.

Bayraktar (2014), değişik geometriye ve et kalınlığına sahip kompozit boruların gerilme ve deformasyon değerlerinin nasıl incelenmesi gerektiğini anlatmaktadır. Dayanım/Rijitlik değerini ölçebilmek adına dışarıdan borunun dış çeperine belirli bir kuvvetin kalite standartlarındaki süreler boyunca sabit bir şekilde tutulmasıyla kontrol edileceğini göstermiştir. Uluslararası standartlara göre en çok teste tabi tutulan SN değerleri 2.500 N/m^2 , 5.000 N/m^2 ve 10.000 N/m^2 'dir. Böyle bir test cihazının CAD ortamında nasıl tasarlandığını ve FEA sonlu elemanlar analizi yöntemi ile mekanik tasarımın daha iyi bir seviyeye nasıl gelebileceğini anlatmıştır.

Öztürk (2015), cam elyaf kumaş, aramid elyaf kumaş, karbon elyaf kumaş takviyeleri ve poliüre matris malzemesi kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin mekanik davranışları üzerinde çalışmıştır. Numuneler üzerinde çekme testleri gerçekleştirmiştir. Çekme testleri ISO 527 standardına göre ve 5 mm/dk hız ile yapılmıştır. Kompozit malzemelerin iç yapısının incelenmesi için tarayıcı elektron mikroskobu ile örnekler alınmıştır. Alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen deneyler neticesinde, karbon elyaf, cam elyaf ve aramid elyaf kumaş takviyeli numuneler arasında en yüksek kopma uzaması ve en yüksek çekme mukavemetine sahip malzeme aramid elyaf takviyeli numune olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, en yüksek elastiklik modülüne sahip malzemenin ise karbon elyaf takviyeli numune olduğu gözlenmiştir.

Parashar ve Mertiny (2012) çalışmalarında, elyaf takviyeli polimer (FRP) boru kesitlerinde yapışkanlı olarak bağlanmış çözelti kum zorluklarını incelemişlerdir. FRP malzemeleri, boru sistemlerinde 40 yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır. FRP'nin daha yüksek spesifik mekanik özellikleri ve korozyon

direnci metalik boru tesisatlarının yerini alması için potansiyel bir aday yapmaktadır. FRP yapılarının bir diğer avantajı, çok sayıda tasarım değişkenidir. FRP yapılarıyla ilgili avantajlara rağmen, bunların kısmen kompozit alt bileşenlere katılmak için yetersiz yöntemlerden dolayı uygulama alanları sınırlıdır. Yapışkanla birleştirilmiş noktalar birçok uygulama alanı için caziptir, çünkü çan ve pim gibi kompleks geometrili boru uçları konfigürasyonları gerektirmezler. Bu çalışmada, yapışkan bağlama yöntemi ile çeşitli FRP boru bağlantı tekniklerine ilişkin kapsamlı bir inceleme sunulmuş ve farklı yükleme koşulları için hasar mekanizmaları incelenmiştir.

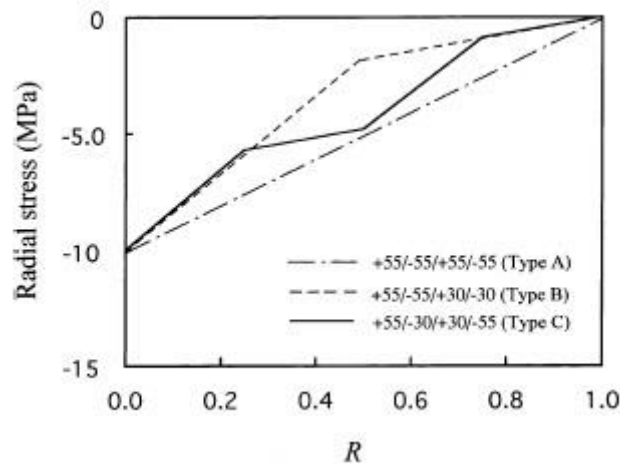
Peck ve arkadaşları çalışmalarında FRP kompozit boruyu elyaf takviyeli UV kür vinilesterinin çeşitli katmanları ile birleştirmişlerdir. Kompozit boruların 12 tanesi 8 katmanlı kaynak ile birleştirilmiştir. Her konfigürasyonda tam olarak bir kat E-cam dokuma kumaş kullanılmıştır. Birleştirilen borular santimetrekaşeye 80 mili-watt'lık UV lambalar ile iyileştirilmiştir (Peck vd., 2007). Sertleştirilmiş boru bağlantılarının mekanik özellikleri basitçe desteklenmiş dört noktalı bükülme testi ve içsel basınç testine tabii tutularak değerlendirilmiştir. İçsel basınç derecesindeki nokta kalınlığının etkisi, nihai bükülme yükü ve UV sertleştirici vinilesterlerin az sertleşmesinde eklem kalınlığının rolünü belirlemek için sertlik deneyi yapılmıştır. Bunun sonucunda derz kalınlığı ve iç basınç derecesi arasında doğrudan bir korelasyon gözlemlenmiştir. 5 katmanlı ve 3 katmanlı derzlerin her biri patlama sonucunda 8 katmanlı derzden daha iyi performans göstermiştir.

Filaman sarım teknolojisine göre üretilen kompozit borular, farklı seviyeli kat açıları nedeniyle anizotropik bir davranış sergilemektedir. Kompozit borular, içerisinden akan sıcak sıvı nedeniyle termomekanik yüklemeye maruz kalmaktadır. Bakaiyan ve arkadaşları, üç boyutlu anizotropik elastikiyete dayalı olarak, boruların iç basınç altında ısı gerilmeleri ve deformasyonlarını bir sıcaklık gradyanı için incelemişlerdir. Sıcaklık alanının termoelastisite denklemlerindeki etkisini temel bir yasa ile değerlendirmişlerdir. Farklı tabakalı ve farklı açılı boru tasarımları için gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon dağılımları, bu yasa kullanarak incelenmiştir (Bakaiyan vd., 2009).

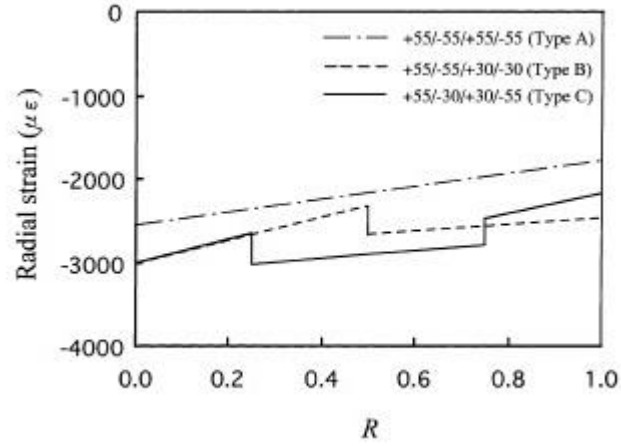
Deniz ve arkadaşları, yaptıkları çalışma ile deniz suyunun ve darbe yükünün cam epoksi kompozit boruların iç basınç altında yorulma ömürleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Borular filaman sarım tekniğine göre

üretmişlerdir. Hazırlanan borular 3, 6 ve 9 ay boyunca deniz suyuna daldırılmışlar. 5, 7.5 ve 10 J değerinde üç farklı darbe testi gerçekleştirildikten sonra numuneler üzerinde yorulma testleri yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında numunelerin yorulma ömrünün hem darbe enerjisine hem de deniz suyunun daldırma süresine göre değiştiğini gözlemlemişlerdir. Darbeye uğramış numunenin yorulma ömrünün, darbe hasarına uğramamış numunenin yorulma ömründen daha kısa olduğu belirlenmiştir. Darbe hasarına uğrayan numunelerde 3 aya kadar yorulma ömrünün arttığı ve genellikle maksimum değere ulaştığı görülmüştür (Deniz vd., 2013). Daha sonra deniz suyuna daldırma süresinin artışıyla birlikte azalmıştır. Yorulma testlerinde terleme, sızıntı ve patlama gibi yorgunluk hasarı tipleri gözlenmiştir.

Xia ve arkadaşları çok katmanlı filaman yara yapılarından kompozit borular oluşturmuşlardır. Boruların her bir tabakasının anizotropik olduğu kabul edilmiştir. 3 boyutlu anizotropik elastisite temeline dayanarak, iç basınç altında boruların gerilmeleri ve deformasyonları için tam esnek bir çözüm sunulmuştur (Xia vd., 2001). Dahası verilen 3 açılı kat boru tasarımları için ayrıntılı gerilme ve gerinim dağılımları bu teori kullanılarak araştırılmıştır. Farklı eğime sahip kat boruları olan silindirik basınçlı kaplar için her katmanda uygulanan kasnak ile eksenel gerilme oranının farklı olduğunu izlemişlerdir.

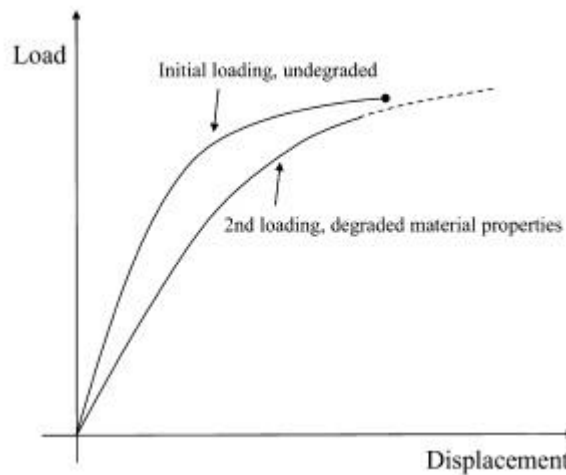


Şekil 2.1. Boyutsuz radyal mesafeye bağlı gerilmelerin dağılımı (Xia vd., 2001)



Şekil 2.2. Boyutsuz radyal mesafeye karşı radyal doğrultudaki gerilme (Xia vd., 2001)

Yang ve Hayman (2015) yaptıkları çalışmada, basitçe desteklenen tek eksenli düzlem içi sıkıştırma uygulanan lamineli kompozit malzemeden dikdörtgen plakaların nihai gücünü tahmin etmek için etkili, yarı analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntem, birinci dereceden makaslama deformasyon teorisi ile birleştirilmiş eğilme teorisine dayanmaktadır. Başarısız katın tamamına veya başarısız katın etkilenen bölgelerine uygulanan ani malzeme bozulmasının olduğu yerde iki bozunma modeli geliştirmişlerdir. Ayrıca, iki farklı tip düzlemde yer değiştirme alanlarının incelenmesi ve bunların mukavemet tahminleri üzerindeki etkisi bazı vakalar için önemli bulunmuştur.



Şekil 2.3. Ani malzeme bozunumuyla bağlantılı boşaltma ve yeniden yükleme grafiği (Yang vd., 2015)

Uyaner ve Güvensoy (2011) çalışmalarında, düşük hızlı darbeye maruz bırakılan cam elyaf filaman sarım kompozit boruların davranışlarını araştırmıştır. Filaman sarım ve darbe olayını sonlu elemanlar yöntemi vasıtasıyla araştırmış ve bilgisayar ortamında da analiz etmişlerdir. Bilgisayar ortamında değerlendirme yapabilmek için ANSYS ticari yazılımını kullanmışlardır. Üretilen borular, 6,35 kg ağırlığa sahip darbe kütlesi ile 2, 2.5 ve 3 m/s'lik darbe hızlarıyla darbeye maruz bırakılmıştır. Deney sonucunda darbe sırasındaki kuvvet-zaman grafiği, darbe enerjisi-yutulmuş enerji değişimi, hız-zaman grafiklerini değerlendirmişlerdir.

Cam takviyeli plastik kompozit borular, korozyona karşı, olumsuz hava koşulları ve UV ışınlarına karşı dayanım, seri üretim imkanı ve uzun ömürlü olması yönünden diğer boru çeşitlerine göre çok daha üstündür. Dolayısıyla petrol ve doğalgaz hatlarında çok fazla tercih edilmektedirler. Bu kadar yaygın olarak kullanılan CTP boruların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için birçok test geliştirilmiştir. CTP boruların teğetsel gerilme dayanımı için hidrolik basınç testi ve ASTM 2290 standardına göre halka çekme deneyi gerçekleştirilmektedir. Kara ve Uyaner çalışmalarında (2017), filaman sarım yöntemiyle 6, 8 ve 10 tabaka halinde üretilen cam elyaf kompozit boruların teğetsel gerilme dayanımını bu iki yöntem ile belirlemişlerdir. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler kıyaslanmış ve her iki test ile gerçekleştirilen patlatma esnasında oluşan hasar durumu da değerlendirilmiştir.

Endüstriyel atıkların uzaklaştırılmasında, petrol ve doğalgaz hatlarında, kimyasal madde iletiminde yaygın olarak kullanılan filaman sarım kompozit borular, kullanım esnasında matris çatlakları ve elyaf kopması gibi gözle tespit edilmesi mümkün olmayan birçok hasara maruz kalmaktadır. Dolayısıyla bu hasarlar sonucunda boruda mukavemet kaybı ve yorulma ömründe düşüş gözlenmektedir. Gemi (2014) çalışmasında, tüm bu etkenleri dikkate alarak cam-karbon-cam sıralamasına göre hibrit kompozit borular üretmiştir. Daha sonra CTP boruları basınç sınıflarına ayırmış ve teğetsel ön gerilmeleri sırasıyla 3, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 ve 48 MPa olacak şekilde düzenlemiştir. Bu ön gerilmeler altında çalışan boruların üzerine 20J enerji ile düşük hızlı darbe uygulanarak ön hasar oluşturulmuştur. Bu esnada oluşan hasar ve boruların dinamik davranışı incelenmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda darbe ön hasarının, 24 MPa ön gerilme değerinden daha yüksek gerilme değerleri altında çalışan boruların

boruların yorulma davranışına etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Daha sonra darbe hasarlı hibrit borular statik iç basınca maruz bırakılmış, patlama mukavemetleri belirlenmiş ve oluşan hasarlar incelenmiştir. Darbe hasarlı ve darbe hasarı bulunmayan boruların yorulma davranışlarının incelenmesi amacıyla $R=0.05$ gerilme oranı ve $f=0.42$ Hz frekansta yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Arıkan'ın bu çalışması (2007) ile filaman sarım CTP borular üzerine farklı açılarla açılan yüzey çentiklerinin, statik iç basınç altında boruda oluşturduğu hasar davranışı incelenmiştir. Deney numuneleri $\pm 55^\circ$ sarım açılı ve altı adet tabakadan oluşan E-cam/epoksi CTP borulardır. Numunelere 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° açılarında eliptik yüzey çentikleri açılarak hasara uğrayıncaya kadar deneye tabi tutulmuşlardır. Statik iç basınç altında farklı yüzey çentiği açılarına sahip numuneler arasındaki farklılıklar gözlemlenmiştir. En yüksek patlama basıncı değeri 90° çentik açısına sahip numunede gözlemlenmiştir.

Şekercioğlu ve Meran (2004), çalışmalarında 3 farklı yapışmanın (çelik, bronz ve alüminyum) yapışma mukavemeti üzerine etkisini deneysel çalışmalarla araştırmıştır. Yapışkanla bağlanmış silindirik bileşenlerin mukavemeti; çap temizliği, montaj türü, yapışkan türü, çalışma sıcaklığı, yükleme tipi, yüzey pürüzlülüğü gibi çeşitli faktörlerden etkilenmiştir. Deneyler hem statik hem de dinamik yükleme koşulları için gerçekleştirilmiş olup, en yüksek mafsallık mukavemeti bronz yapışmada elde edilirken, en düşük mukavemet alüminyum yapışmada elde edilmiştir.

Cheng ve Li (2008), birleştirilmiş kopma mukavemetini arttırmak için, yapışkanla bağlanmış akıllı bileşik boru bağlantı sistemi, elektromekanik bağlantı piezoelektrik tabakalarını bağlantı kuplörü ile birleştirerek geliştirmişlerdir. Entegre piezoelektrik seramik tabakaların, yapışkan katman bağlama hattındaki gerilme konsantrasyonunu bükülme veya eksenel gerilme yükleri altında akıllıca azaltabileceğini doğrulamışlardır. Piezoelektrik parçacık / fiber takviyeli polimer kompozit, piezoelektrik maddenin kırılma özelliğini yenmek için yapışkanla bağlanmış akıllı kompozit boru bağlantı sistemlerini oluşturmak, seramik tabakalar ve ortak yapımı kolaylaştırmak için kullanmışlardır. Burulma, pratikte egemen yükleme koşullarından biri olduğu için, torsiyon yüklemesine maruz bırakılan yeni geliştirilen akıllı boru bağlantı sisteminin davranışı, entegre

piezoelektrik takviyeli polimer kompozit tabakanın eklem performansına etkisini değerlendirmek için ayrıntılı olarak araştırılmıştır. İlk olarak, birinci dereceden kesilme deformasyon teorisine dayanarak, burulma yüklemesine tabi tutulan akıllı boru bağlantı sistemini teorik olarak modellemek için ilgili sınır ve süreklilik şartlarına sahip temel denklemler geliştirilmiştir. Ayrıca, orta düzlemde yer değiştirmeler için analitik çözümler ve yapışkan katmandaki makaslama ve soyma gerilmeleri Levy çözümü ve durum-uzay yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Son olarak, birleştirici bağlayıcıdaki yığılma sırasının ve entegre kompozit piezoelektrik tabakaların kalınlığının ayrıntılı etkisini değerlendirmek için bazı sayısal örnekler sunulmuştur. Yapışkan tabaka içindeki gerilme konsantrasyonunun düşürülmesi; uygulanan elektrik alanlarının yapışkan tabakadaki kesilme ve soyma gerilmeleri üzerindeki etkisi de gösterilmiştir.

Das ve Pradhan (2010), Boru Elyaf Takviyeli Plastik (FRP) kompozit yapılarda yapışkanla birleştirilen derzlerin sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılarak analizi için sonlu elemanlara dayalı simülasyon tekniğini sunmuşlardır. Birbirine yama ile birleştirilmiş kompozit borunun uygun performanstaki üst üste binme uzunluğunu Tsai-Wu hasar kriterine dayanarak belirlemişlerdir. Eklemdeki üç boyutlu etkileri ihmal etmenin önemini ortaya koyan üç boyutlu stres analizleri yapılmıştır. Kayma gerilmesi ($\tau_{\theta r}$), diğer düzlem dışı gerilmelerle (τ_{rz} , σ_r) kıyaslandığında üç boyutlu etkilere aşırı duyarlı bulunmuştur. Yapışma yeterliliğini değerlendirmek için karakterize edici parametre olarak Sanal Çatlak Kapatma Tekniği (VCCT) kullanılarak hesaplanan Darbe Enerji Çıkarma Hızı (SERR) kullanılmıştır. Yapışma hasarında hasar yayılımının kendi kendine benzer olduğu gözlenmiştir ve çoğunlukla düzlem kesme modunda yayılım göstermiştir. Kompozit yapışkanların anizotropi derecesinin artırılması yapışma başarısızlığının hasar görme direncini artırır. Bor/Epoksi (B/E) FRP kompozitlerinin, bu çalışmada ele alınan çeşitli FRP kompozit yapışkanların arasında en iyisi olduğu bulunmuştur.

Imanaka ve arkadaşları, yapışkanla bağlı CFRP boru/çelik çubuk derzlerinin yorulma dayanımını düzenleyen önemli bir parametreyi araştırmak için farklı tur uzunluklarına sahip ve farklı boru kalınlıklarına sahip derzlerde bir dizi dönen eğme yorulma testi gerçekleştirmişlerdir. Yorulma testi verileri, FEM analizi ile belirlenen yapışkan tabaka içindeki gerilme dağılımlarına dayanarak

tartışılmıştır. Sonuçlar, derzin yorulma mukavemetinin ağırlıklı olarak, tur sonunda yapışkan ara yüze normal maksimum gerilme stresine bağlı olduğunu göstermiştir (Imanaka vd., 1995).

Basınçlı kaplar, borular, tahrik milleri ve roket motorları içeren pratik silindirik yapılar genellikle iki eksenli veya üç eksenli gerilme sistemlerini içeren karmaşık yüklere maruz kalmaktadırlar. Özellikle, filamentli kompozitler gemiler, uzay aracı tankı uygulamalarında ve çeşitli ticari uygulamalarda sıvıların depolanmasında kullanılırlar. Gargiulo ve arkadaşları, iki eksenli yükleme koşulları altında filamentli karbon elyaf takviyeli epoksi reçine ince boruların mukavemetine ilişkin sayısal ve deney verileri incelemişlerdir. İç veya dış basınç ve eksenel yükler aynı anda iki eksenli stres koşulları üretmek için uygulanır. Fiber takviyelerin sargı açısının boru hataları üzerindeki etkileri incelenmiştir (Gargiulo vd., 1996). Deney sonuçlarıyla karşılaştırma ve numunenin başarısızlığını öngörmek için, farklı başarısızlık kriterlerini kullanarak probleme sonlu elemanlar ve ince kabuk analizi uygulanmıştır.

Matemilola ve Stronge (1997), basit olarak desteklenmiş bir anizotropik kompozit silindirin darbe hasar davranışı için analitik bir çözüm geliştirmiştir. Temas kuvveti, elastik çarpma tertibatı ve silindir arasındaki uyumluluk koşulu, modifiye Hertz kanunuyla elde edilmiştir. Hertz temas kuvveti terimi, darbe hızı ile temas kuvveti genlik varyasyonunda bir hafif doğrusal olmayanlık içerir. Mevcut analiz, aynı zamanda bir kabuğun bir element bölümünün trapez şekli nedeniyle gerilme sonuçlarının ve gerilme çiftlerinin ifadelerinde ortaya çıkan terimleri de içermektedir. Bu trapezoidal terimler, bileşik kaplamanın simetrik olmaması durumunda kalın kabuk elemanlarının gerilme tepkisinde önemli etkilere neden olabilir.

Lamine kompozit silindirler, hibritleme yoluyla malzeme maliyetlerini en aza indirmek amacıyla optimize edilmiştir. Bunlar, iç veya dış basınçlar altında çalışan kalın silindirler olarak modellenmiştir. Optimum tasarımlar, maksimum gerilme ölçütleri tarafından belirlenen hasar basıncında bir alt sınıra tabidir. Silindirler, gerilme modelinde daha kuvvetli malzeme yüksek gerilimli alanlarda, daha düşük malzeme ise düşük gerilimli alanlarda kullanılarak imal edilirler. Ortaya çıkan yapı hibrit yapıdadır ve maliyet minimizasyonu, yalnızca ucuz bir malzeme kullanılarak değil aynı zamanda tasarımda kullanılan pahalı malzemenin

miktarının en aza indirgenmesiyle sağlanır. Verijenko vd. (1997), sıcaklık değişiminin gerilmeler üzerindeki etkisini incelemiş ve malzeme özelliklerini analizlere dahil etmiştir. Grafit/cam hibrit silindirleri için sayısal sonuçlar vermiş ve tasarımların verimlilikleri, hibrit ve hibrit dışı tasarımların maliyetlerini kıyaslayarak önemli olduğunu göstermiştir. Ayrıca, sıcaklığın malzemelerin sertlik ve mukavemet parametreleri üzerinde göz ardı edilmesinin, tasarımın altında ve erken hasara neden olacağını göstermiştir.

CTP boruları korozyon ortamlara karşı direnç ve hafiflik gerektiren özel uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılır. CTP boru alanında özel önem taşıyan unsur, güvenilir ve kurulumu uygun bir bağlantı yönteminin geliştirilmesidir. Huysmans ve arkadaşları, uygun bir bağlantı konseptinin tasarımında farklı aşamalar sunmuşlardır (Huysmans vd. 1998).

Tzeng çalışmasında (1998), hareketli bir basınca maruz bırakılan kompozit silindirde dinamik tepkinin neden olduğu kırılma davranışını araştırmıştır. Gerilme dalgalarının rezonansı, hareketli hava basıncının kritik bir hızla yaklaştığında ön basınç geçişi anında, bulunduğu bölgede silindirde çok yüksek genlik ve frekansa neden olduğunu gözlemlemiştir. Yüksek şiddette olan gerilme dalgası kısa sürede yapısal bir arızaya neden olmamış fakat bir silindirdeki yayılımı başlangıçta bir kusurla hızlandırmış ve yorulma ömrünü kısaltmıştır. Dinamik büyütme etkileri tarafından tetiklenen kırılma mekanizmasının, çok malzemeli ve anizotropik yapı, malzeme özelliklerinde termal bozulma ve hafif yapılara özgü tasarım amacı nedeniyle, üst üste sarılmış kompozit silindirler için kritik öneme sahip olduğu tespit edilmiştir.

Her canlı dış dünyadan gelecek tehlikelere karşı kendisini korumak ister. Dolayısıyla insanoğlu bu tehlikelere karşı tarih boyunca önlem almış ve korunmak için farklı yöntemler geliştirmiştir. Tarihe bakıldığında bu yöntemler başta surlar, kaleler, hendekler vb. gibi yapılar olmuştur. Günümüzde ise teknolojinin gelişmesiyle birlikte yüksek direnç ve elastikliğe sahip kumaşlarla üretilen çelik yelek, zırh vb. kişisel koruyucu ürünler üretilmektedir. Özellikle askeri alanda yapılan çalışmalarda bu tarz ürünlere sıklıkla rastlanmaktadır. Sözen vd. (2016), çalışmalarında kişisel koruyucu zırh ve balistik panel üretiminde kullanılan kompozit malzemelerin özelliklerini incelemiş, bu malzemeler ile üretilen koruyucu malzemeler üzerinde birtakım testler gerçekleştirmişlerdir.

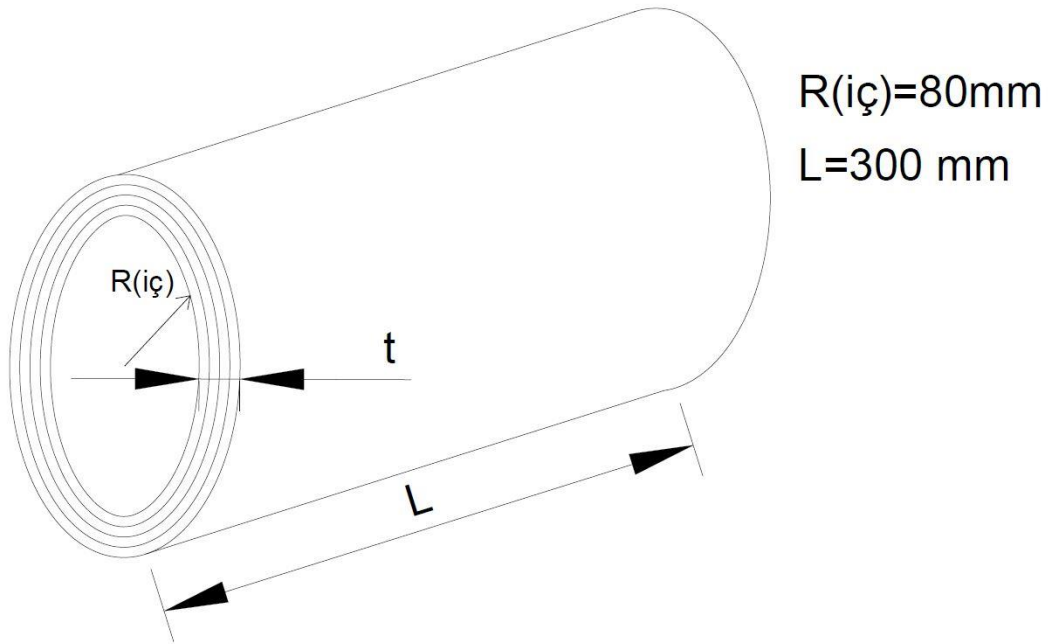
Sülü (2014), alın altına yapıştırılmış, yama kullanılarak birleştirilmiş ve farklı sarım açılarına sahip cam elyaf kompozit boruların içsel basınç altındaki hasar gerilme davranışını incelemiştir. $45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$, $55^{\circ}/-55^{\circ}/30^{\circ}/-30^{\circ}$ ve $55^{\circ}/-55^{\circ}/55^{\circ}/-55^{\circ}$ sarım açısına sahip 4 tabakalı 102 mm ve 105,4 mm iç yarıçapa sahip cam elyaf borular üretmiştir. Alın altına yapıştırılan boruları desteklemek suretiyle yapıştırma bölgesinden yama ile destekleme yapılmıştır. Farklı yarıçaplara sahip borular ise birbirinin içerisine geçmek suretiyle yapıştırılmış ve 10, 15, 20, 30 ve 40 mm olmak üzere 5 farklı bindirme uzunluğunda çalışılmıştır. Borular ve yamaların yapıştırılması için iki farklı yapıştırıcı kullanmıştır. Tüm bu çalışmalar sonucunda içsel basınca maruz bırakılan kompozit boruların hasar davranışını yorumlamıştır.



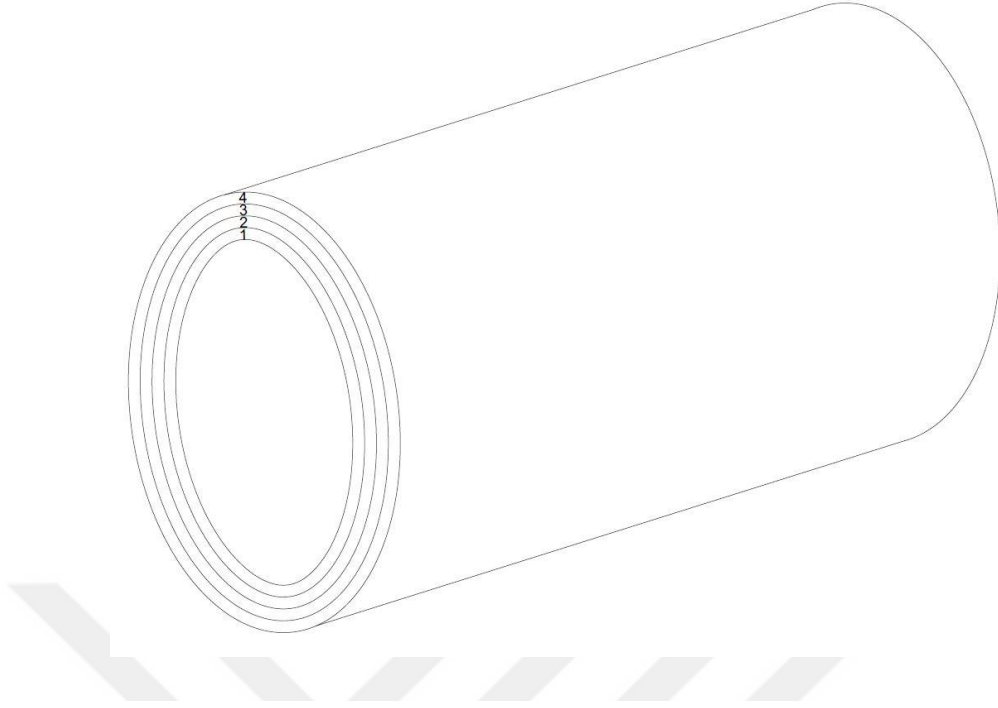
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kapsam ve İçerik

Bu çalışmada, aramid elyaf ve cam elyaf kullanılarak oluşturulan tabakalı kompozit boruların, iç basınç altındaki hasar davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda 4 tabakalı kompozit borular kullanılmıştır ve hazırlanan borulara içsel basınç uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan kompozit plakalar ve boruların tamamı Fibermak Mühendislik Makina Kalıp Kompozit Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. firması tarafından sıcak presleme yöntemi ile hazırlanmıştır. İçsel basınca maruz bırakılan kompozit boruların boyları 300 mm ve iç çapı 80 mm'dir. C-C-C-C, C-A-C-C, C-C-A-C ve C-A-A-C numunelerine ait cidar kalınlıkları ise sırasıyla 1 mm, 1,5 mm, 1,5 mm ve 2 mm'dir. Ölçüleri verilen kompozit boru Şekil 3.1'de ve kompozit borulara ait tabaka numaralandırma tipi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kompozit boru ölçüleri



Şekil 3.2. Kompozit borulara ait tabaka numaralandırma sistemi

Toplamda 12 adet olarak hazırlanan kompozit boru numuneleri 4 farklı türde üretilmiştir ve 4 ayrı gruba ayrılmıştır. Gruplara ait detaylar Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

C-C-C-C	Tabaka No	Tabaka Türü	C-A-C-C	Tabaka No	Tabaka Türü
	1	Cam Elyaf		1	Cam Elyaf
	2	Cam Elyaf		2	Aramid Elyaf
	3	Cam Elyaf		3	Cam Elyaf
	4	Cam Elyaf		4	Cam Elyaf
C-C-A-C	Tabaka No	Tabaka Türü	C-A-A-C	Tabaka No	Tabaka Türü
	1	Cam Elyaf		1	Cam Elyaf
	2	Cam Elyaf		2	Aramid Elyaf
	3	Aramid Elyaf		3	Aramid Elyaf
	4	Cam Elyaf		4	Cam Elyaf

Şekil 3.3. Numune gruplarına ait detaylar

4 ayrı kompozit malzemeden hazırlanan borular Şekil 3.3’de gösterildiği şekilde gruplandırılmış olup, gruplara ait kısaltma açıklamaları şu şekildedir;

C-C-C-C: 4 tabaka cam elyaftan oluşan kompozit boru

C-A-C-C: Sadece 2 nolu tabakası aramid, diğer 3 tabaka cam elyaftan oluşan kompozit boru

C-C-A-C: Sadece 3 nolu tabakası aramid, diğer 3 tabaka cam elyaftan oluşan kompozit boru

C-A-A-C: Ortadaki 2 tabaka aramid, diğer 2 tabaka cam elyaftan oluşan kompozit boru

Öncelikle lif yönü $\pm 55^\circ$ olan cam elyaftan oluşan 4 tabakalı 3 adet kompozit boru numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler C-C-C-C olarak adlandırılmış ve üzerine Şekil 3.4’de gösterildiği gibi sonuçların karıştırılmaması adına 1 yazılarak numaralandırılmıştır.



Şekil 3.4. C-C-C-C numuneleri

Aynı şekilde tabaka numarası en iç tabakadan başlamak suretiyle 2. tabakası aramid elyaf olan ve kalan 3 tabakası lif yönü $\pm 55^\circ$ olan cam elyaftan oluşan 3 adet kompozit boru numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler ise C-A-C-C olarak adlandırılmış olup, hazırlanan numuneler Şekil 3.5’de gösterildiği gibi 2 yazılarak numaralandırılmıştır.



Şekil 3.5. C-A-C-C numuneleri

Tabaka numarası en içten başlamak suretiyle sadece 3. tabakası aramid elyaf, kalan 3 tabaka ise lif yönü $\pm 55^\circ$ olan cam elyaftan oluşan 3 adet kompozit boru üretilmiştir. Bu numuneler ise C-C-A-C olarak adlandırılmıştır ve hazırlanan numuneler Şekil 3.6’da gösterildiği gibi üzerine 3 yazılarak numaralandırılmıştır.



Şekil 3.6. C-C-A-C numuneleri

Son olarak 2. ve 3. tabakası aramid elyaf, en iç ve en dıştaki tabakası lif yönü $\pm 55^\circ$ olan cam elyaftan oluşan 3 adet kompozit boru hazırlanmış olup, bu numuneler ise C-A-A-C olarak adlandırılmıştır. C-A-A-C numuneleri Şekil 3.7’de gösterilmiş olup, üzerine 4 yazılarak numaralandırılmıştır.



Şekil 3.7. C-A-A-C numuneleri

3.2. Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için öncelikle bu malzemelere ait gerilme-şekil değiştirme bağıntısının incelenmesi gerekmektedir. 3 boyutlu bir malzeme için Genelleştirilmiş Hooke Kanunu şu şekilde yazılır.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Yukarıda matris şeklinde ifade edilen denklemin genel olarak şu şekilde ifade edilir;

$$\sigma_k = C_{kj} \varepsilon_j \quad (k, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (3.2)$$

Bu denklemde yer alan C_{kj} elastiklik katsayılarıdır.

Şekil değiştirme enerjisi yoğunluk fonksiyonu U_0 denklem 3.3'deki gibi belirtilir;

$$U_0 = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma_i d\varepsilon_i \quad (3.3)$$

Denklem 3.2'deki ifade 3.3'de yerine yazılırsa;

$$U_0 = \frac{1}{2} C_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j \quad (3.4)$$

eşitliği elde edilir.

$$\sigma_k = \frac{1}{2} (C_{kj} + C_{jk}) \varepsilon_j \quad (3.5)$$

Denklem 3.2 ve 3.5 karşılaştırıldığında $C_{kj} = C_{jk}$ olduğu anlaşılmaktadır (Sülü, 2014).

İnce cidarlı kompozit levhalarda düzlem dışından kuvvet etki etmiyorsa, düzlemsel gerilme durumu oluşmaktadır. Dolayısıyla;

$$\sigma_3 = 0, \tau_{31} = 0, \tau_{23} = 0$$

Bu durumda düzlemsel gerilme durumu için Genelleştirilmiş Hooke Kanunu şu şekilde yazılır;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Bu denklemde yer alan S_{ij} terimi uygunluk matrisini ifade etmektedir. Bu terim mühendislik sabitleri cinsinden şu şekilde ifade edilebilir;

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

Denklem 3.6'da yerine konulursa;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilir.

Kompozitler, farklı yönlerde de yüksek dayanımlar elde edebilmek için farklı açılı tabakalardan oluşmaktadır.

Kompozit tabakalarda kullanılan koordinat sistemi eksenlerini 1 ve 2 olarak isimlendirebiliriz. Burada 1 olarak ifade edilen eksen elyaf yönünü, 2 olarak ifade edilen eksen ise elyaf yönüne dik olan yönü ifade etmektedir ve Şekil 3.8'de gösterilmektedir. x-y koordinat sistemi ile 1-2 diye isimlendirilen koordinat sistemi arasındaki bağıntı (Dursun, 2006) aşağıda gösterilmiştir;

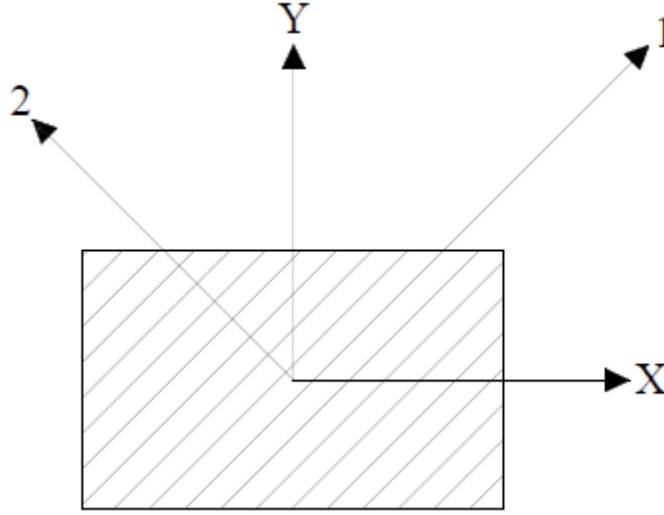
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Bu denklemde yer alan $[T]$ ifadesi yine bir dönüşüm matrisidir ve şu şekilde ifade edilir;

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 s^2 & -2sc \\ s^2 c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 s^2 & 2sc \\ s^2 c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Bu denklemlerde yer alan $c = \cos(\theta)$, $s = \sin(\theta)$ 'dır.



Şekil 3.8. Malzeme tabakasına ait koordinat eksenleri

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Denklem 3.13'de ifade edilen $[R]$ terimi Reuter matrisidir ve eşitlik 3.14'deki gibi ifade edilir (Sülü, 2014).

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

1-2 eksen takımında yapılan gerilme-şekil değiştirme analizi ifadesi x-y koordinat eksenine dönüştürülünce denklem 3.15 oluşur.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3. Kompozit Borularda Gerilme Analizi

Boru enkesiti bakıldığında dairesel bir geometriye sahiptir. Daha basit bir şekilde düşünülürse kavisli bir plaka yapısına benzemektedir. Dolayısıyla plaka üzerinde gerçekleştirilen gerilme analizleri, ince cidarlı kompozit borularda da geçerlidir (Önder, 2007). Şekil 3.9'da gösterildiği gibi cidar kalınlığı t olan boru için gerilme denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$N_{\theta} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{\theta} \left(\frac{r_1+z}{r_1} \right) dz \quad (3.16)$$

$$N_{\phi} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{\phi} \left(\frac{r_2+z}{r_2} \right) dz \quad (3.17)$$

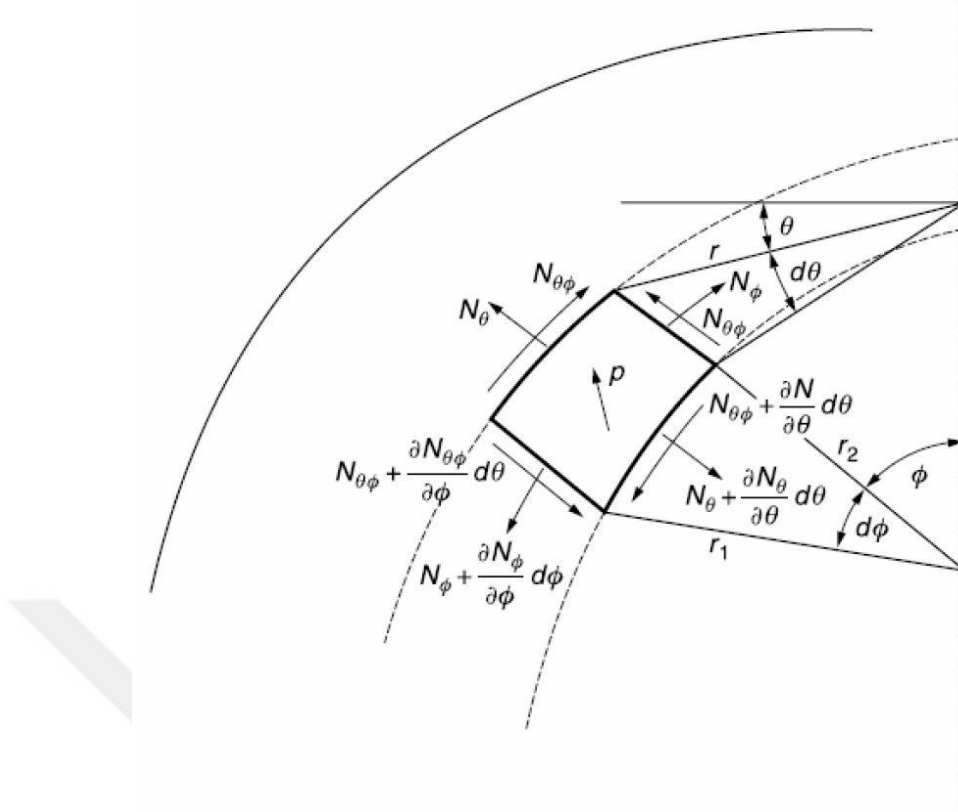
$$N_{\theta\phi} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{\theta\phi} \left(\frac{r_2+z}{r_2} \right) dz \quad (3.18)$$

$$N_{\phi\theta} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{\phi\theta} \left(\frac{r_1+z}{r_1} \right) dz \quad (3.19)$$

Bu gerilme sonuçlarının sadece iç basıncın yarıçap ekseninde etkidiği durumda olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca bu gerilme denklemleri için burkulma etkisi ihmal edilmiş ve moment değerleri sıfır alınmıştır. Bu sonuçla;

$$N_{\theta\phi} = N_{\phi\theta} \quad (3.20)$$

eşitliği elde edilir.



Şekil 3.9. Boru cidar gerilmeleri (Önder, 2007)

Kuvvet dengesinin dikkate alınması ile oluşan denklemler;

$$\frac{d(rN_\phi)}{d\phi} - r_1 N_\theta \cos \Phi = 0 \quad (3.21)$$

$$N_\theta = pr_2 - \frac{r_2}{r_1} N_\phi \quad (3.22)$$

Eşitlik (3.21) ve (3.22)'de "r" yerine " $r_2 \sin \Phi$ " getirilirse;

$$N_\phi = \frac{pr_2}{2} \quad (3.23)$$

$$N_\theta = pr_2 \left(2 - \frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3.24)$$

(3.23) ve (3.24)'deki eşitliklerde 2 özel durum ortaya çıkmaktadır. Bunlar;

1. Küresel kabuk yarıçapı olan $R=r_1 = r_2$ olarak alınırsa denklem (3.25) elde edilir.

$$N_{\theta} = N_{\phi} = \frac{pr_2}{2} \quad (3.25)$$

2. Silindirik basınç tankları için kabul edilen değerler olan $r_1 = \infty$, $r_2 = R$ değerleri kullanılırsa;

$$N_{\phi} = \frac{pR}{2} \quad (3.26)$$

$$N_{\theta} = pR \quad (3.27)$$

eşitlikleri elde edilir.

Yukarıdaki eşitlikler sonucunda daireye ait gerilmeler elde edilir.

$$\sigma_{daire} = \sigma_{\theta} = \frac{N_{\theta}}{t} = \frac{pR}{t} \quad (3.28)$$

Boyuna doğrultudaki gerilme ise;

$$\sigma_{long} = \sigma_{\phi} = \frac{N_{\phi}}{t} = \frac{pR}{2t} \quad (3.29)$$

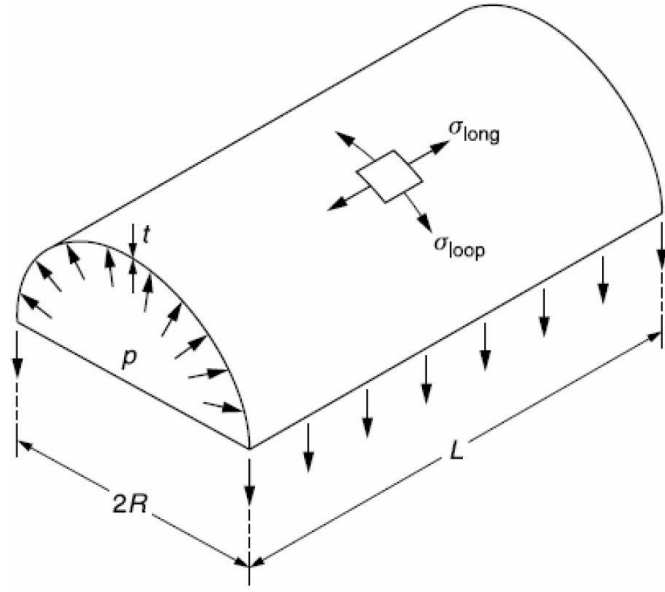
şeklinde elde edilir.

Denklem (3.28) ve (3.29)'dan elde edilen denklemler yarıçapı R , et kalınlığı t ve iç basıncı p olan kompozit borular için kullanılabilir. Şekil 3.10'daki gibi bir boru kesitinde enine " σ_{loop} " ve boyuna " σ_{long} " gerilmeler gösterilmiştir. Borunun enine ve boyuna yönde üniform kalınlıkta olduğu kabul edilerek;

$$pL(2R) = 2\sigma_{loop}tL \quad (3.30)$$

$$\sigma_{loop} = \frac{pR}{t} \quad (3.31)$$

eşitlikleri bulunur.



Şekil 3.10. Boru cidarı üzerindeki gerilmeler (Önder, 2007)

Boru en kesitine bakıldığında boyuna gerilme ile iç basınç arasında aşağıdaki şekilde bir ilişki bulunur;

$$p\pi r^2 = \sigma_{long}(2\pi Rt) \quad (3.32)$$

Gerekli sadeleştirmeler yapılırsa;

$$\sigma_{long} = \frac{pR}{2t} \quad (3.33)$$

eşitliği bulunur.

Yukarıda elde edilen (3.33) eşitliği ile kompozit borularda boyuna doğrultudaki gerilme değerleri bulunur (Önder, 2007).

3.4. Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler hakkında bilgi bu bölümde anlatılmıştır. Çünkü kompozit malzemelerin özelliklerini bilebilmek için deneysel verilere ihtiyaç vardır. Bu nedenle kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için birtakım deneysel test metotları geliştirilmiştir. Bu metotların büyük bir bölümü Amerikan Test ve Malzeme Şirketi (ASTM) tarafından geliştirilmiş ve kabul edilmiştir (Koruvatan, 2008).

Kompozit malzemelerin çeşitliliği arttıkça deneysel test metotlarının daha güvenilir ve etkili kullanımı önem kazanmıştır. Deneylerin standartlara uygun bir biçimde gerçekleştirilmesi, malzemenin karakteristik özelliklerinin doğru belirlenmesine yardımcı olur. Ortotropik bir malzemenin özelliklerinin belirlenebilmesi için bilinmesi gereken parametreler;

E_1 : 1 yönündeki elastisite modülü

E_2 : 2 yönündeki elastisite modülü

ν_{12} : 1 yönündeki poisson oranı

ν_{21} : 2 yönündeki poisson oranı

G_{12} : 1-2 düzlemindeki kayma modülleri

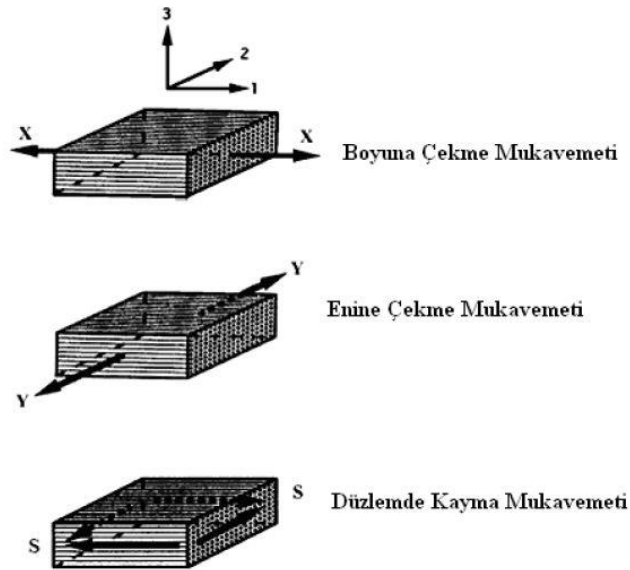
Aynı malzemeye ait mukavemet parametreleri;

X: 1-yönlü boyuna gerilmesi

Y: 2-yönlü enine gerilmesi

S: 1-2 düzlemindeki kayma gerilmesi

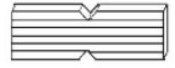
Bu gerilme parametrelerine ait yön gösterimleri Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Tek yönlü kompozit malzemelerin mukavemet yön gösterimi
(Koruvatan, 2008)

Kompozit malzemelerin ASTM test metodu sınıflandırması ve deneylere ait numune geometrileri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Numune geometrisi ve ASTM test sınıfları (Koruvatan, 2008)

Numuneye Ait Parametreler	Parametre Sembolleri	ASTM Test Metodu	Numune Geometrisi
Young Modülü Poisson Oranı Çekme Mukavemeti	E (MPa) ν X_c (MPa)	ASTM 3039-76	
Kayma Modülü	G (MPa)	ASTM 3518-76 ASTM D 5379	 
Kayma Mukavemeti	S (MPa)	ASTM D 5379	

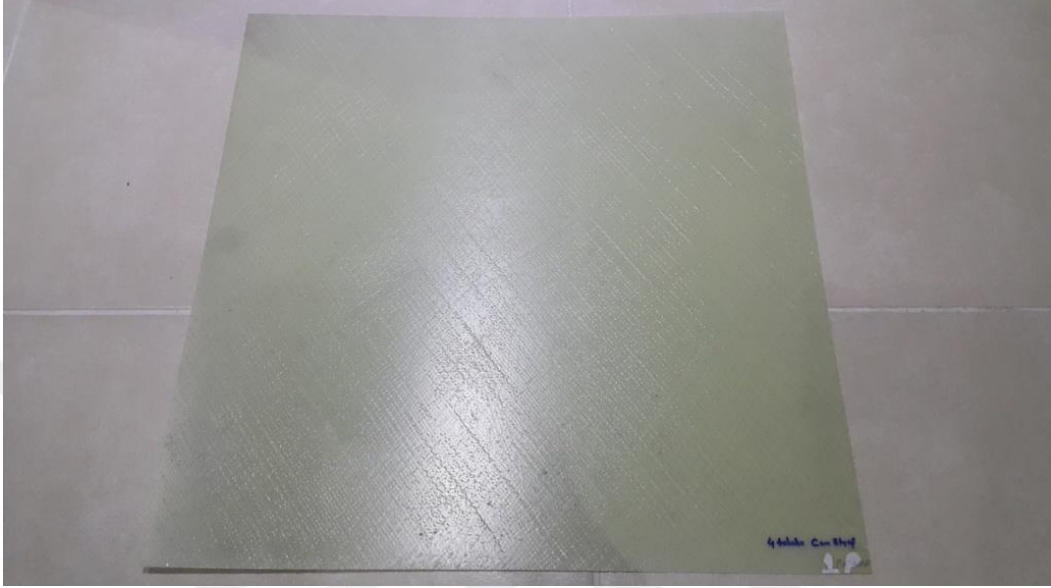
3.4.1. Kompozit Malzemelerde Çekme Deneyi Test Metodu

Çekme deneyi, çekme numunesinin bir test makinesi tarafından her iki ucu sıkıca tutturularak karşılıklı çekme kuvveti uygulanması suretiyle gerçekleştirilen bir deneydir. Sabit hızla uygulanan çekme kuvveti neticesinde çekme numunesinde boyuna uzama meydana gelir ve kopma oluşur (Demircan, 2018). Bu işlem meydana gelirken kuvvet ve uzama verileri bir strain-gauge yardımıyla kaydedilir. Kaydedilen bu veriler sayesinde aşağıdaki mekanik özellikler belirlenir;

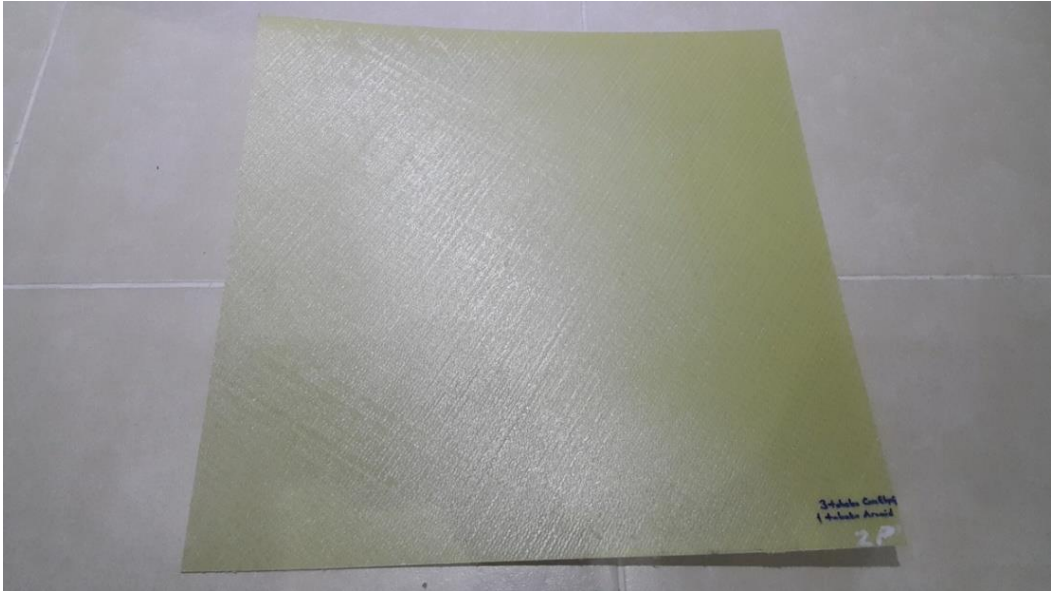
- Elastisite (Young) Modülü
- Poisson Oranı
- Maksimum Çekme Mukavemeti

Aramid ve cam elyaftan oluşan kompozit boruların basınç dayanımları ve hasar analizlerini inceleyebilmek için öncelikle borularda kullanılan malzemelere ait boyuna ve enine çekme mukavemeti, Young modülleri, Poisson oranlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu özellikleri belirlemek için çekme ve kayma deneyleri her bir numune için 3'er kez gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan 3 sonucun ortalaması alınarak her numune için çekme gerilmesi, kayma gerilmesi, poisson

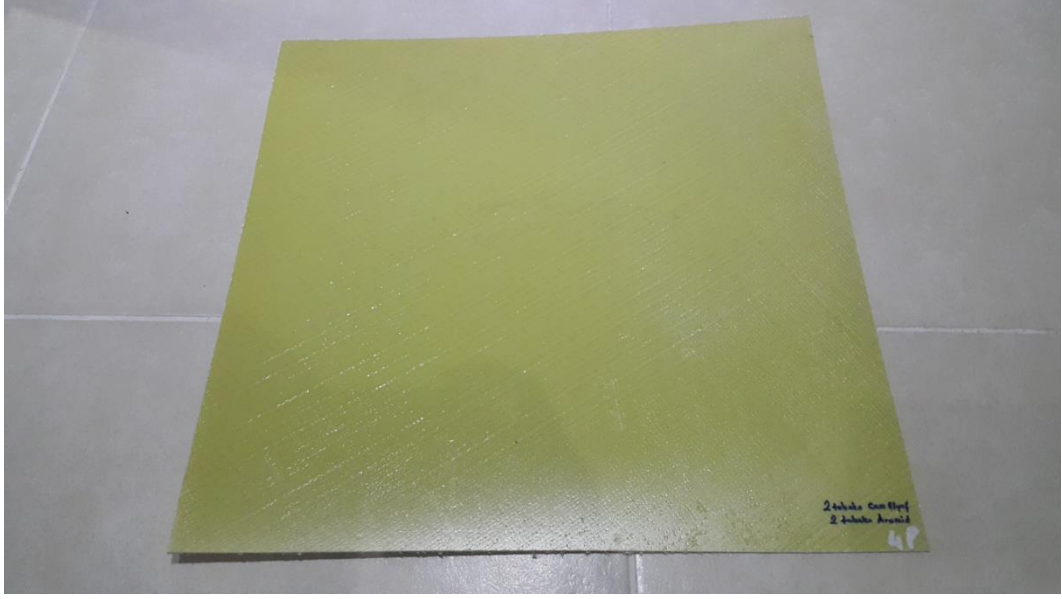
oranı ve elastisite modülü belirlenmiştir. Malzeme özelliklerini belirlemek için kullanılan numunelere ait kompozit plakalar Şekil 3.12-3.15'de gösterilmiştir. Tabakalı kompozit malzemenin çekme özellikleri ASTM D3039-76 standart test metoduna göre belirlenmiştir.



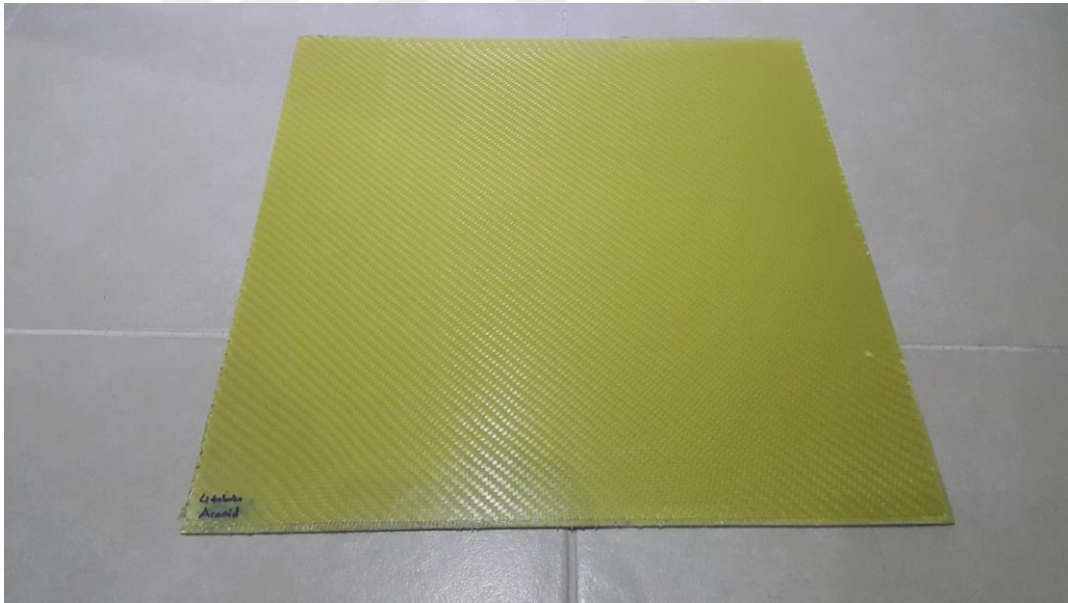
Şekil 3.12. Yalnızca 4 tabaka cam elyaftan oluşan kompozit plaka (C-C-C-C)



Şekil 3.13. 3 tabaka cam elyaf ve 1 tabaka aramid elyaftan oluşan kompozit plaka (C-A-C-C)

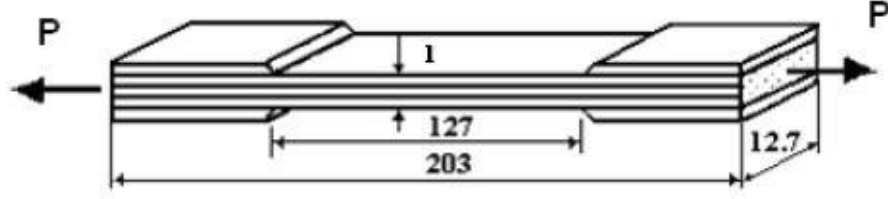


Şekil 3.14. 2 tabaka cam elyaf ve 2 tabaka aramid elyaftan oluşan kompozit plaka (C-A-A-C)



Şekil 3.15. Sadece 4 tabaka aramid elyaftan oluşan kompozit plaka (A-A-A-A)

Şekil 3.12-3.15'te gösterilen plakaların her birinden çekme deneyi için x yönünde 3, y yönünde 3 ve kayma deneyi için de 3'er adet numune kesilmiştir. Çekme deneyleri için kesilen numunelere ait ASTM D3039-76 standart test metoduna göre belirlenen ölçüler Şekil 3.16-3.17'de gösterilmiştir. Şekil 3.16'da görülen 4 tabaka halinde üretilen kompozit çekme numunesinin boyu 203 mm, eni ise 12,7mm'dir (Koruvatan, 2008).



Şekil 3.16. Boyuna çekme deneyi için hazırlanan numune ölçüleri (Koruvatan, 2008)



Şekil 3.17. Çekme deneyi için hazırlanan numuneye ait ölçüler

Çekme deneyi için hazırlanan numuneler x ve y yönlü olmak üzere isimlendirilmişlerdir. Şekil 3.18’de gösterildiği gibi numune üzere yönler yazılmış olup yanlarında yazan numaralar ise numunenin ait olduğu kompozit malzemenin türünü temsil etmektedir;

- X1: x yönünde ve sadece 4 tabaka cam elyaftan oluşan çekme numunesi
- X2: x yönünde ve 1 tabaka aramid 3 tabaka cam elyaftan oluşan çekme numunesi
- X3: x yönünde ve 2 tabaka aramid 2 tabaka cam elyaftan oluşan çekme numunesi
- X4: x yönünde ve sadece 4 tabaka aramid elyaftan oluşan çekme numunesi
- Y1: y yönünde ve sadece 4 tabaka cam elyaftan oluşan çekme numunesi
- Y2: y yönünde ve 1 tabaka aramid 3 tabaka cam elyaftan oluşan çekme numunesi
- Y3: y yönünde ve 2 tabaka aramid 2 tabaka cam elyaftan oluşan çekme numunesi
- Y4: y yönünde ve sadece 4 tabaka aramid elyaftan oluşan çekme numunesi

Kompozit plakalardan CNC lazer metoduyla Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de verilen ölçülere göre kesilen x ve y yönlerindeki çekme deneyi numuneleri Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. x ve y yönlerinde hazırlanan çekme deneyi numuneleri

Çekme deneyi sonucunda kompozit malzemeye ait çekme gerilmesi, x-y yönlerindeki birim uzama ve kısalma miktarları gibi değerler elde edilir. Bu değerler kullanılarak E_x , ν_{xy} ve σ_x değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla elde edilir;

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad \sigma_x = \frac{P_{max}}{A}, \quad \nu_{xy} = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}, \quad E_x = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x} \quad (3.34)$$

Yukarıdaki eşitlikte A ile gösterilen parametre kompozit çekme numunesine ait P kuvvetine dik kesit alanıdır.

Çalışmalarda kullanılan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Shimadzu marka çekme test cihazı Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



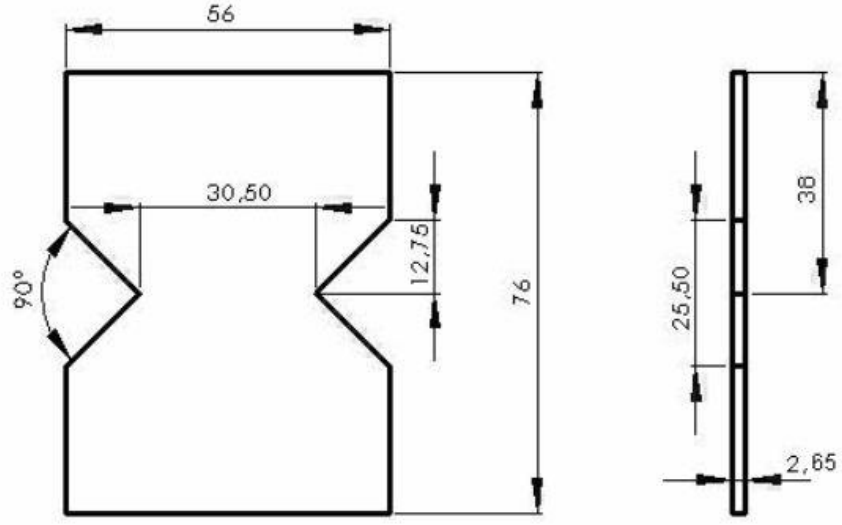
Şekil 3.19. Çekme deneylerinin yapıldığı test cihazı

3.4.2. Kompozit Malzemelerde Kayma Deneyi Test Metodu

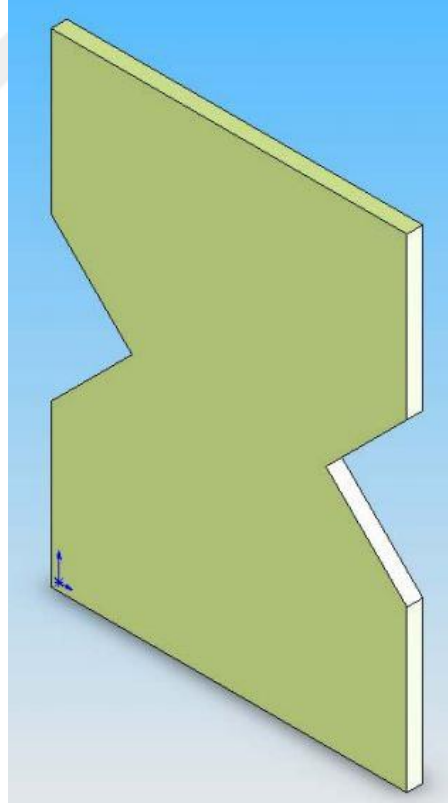
Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri içerisinde kayma gerilmesi kalınlıkları nedeniyle farklılık göstermektedir. Bu nedenle deneylerde kullanılacak numunelerin kalınlıklarının aynı olması önem arz etmektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için, kayma mukavemeti (S) ve kayma modülü (G) gibi parametrelerin deneysel test metodlarıyla bulunması gereklidir (Koruvatan, 2008).

Kayma numuneleri ASTM D 7078 standardına uygun ölçülerde hazırlanmıştır. Numune ölçülerinin toleransı $\pm 0,3$ mm, numune kenarlarına açılan çentik açılarının toleransı ise $\pm 0,5^\circ$ dir. Çentikler V şeklinde ve arasındaki açı 90° dir (Kaya vd., 2008).

Deneylerde kullanılan kayma numunesi ölçüleri Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

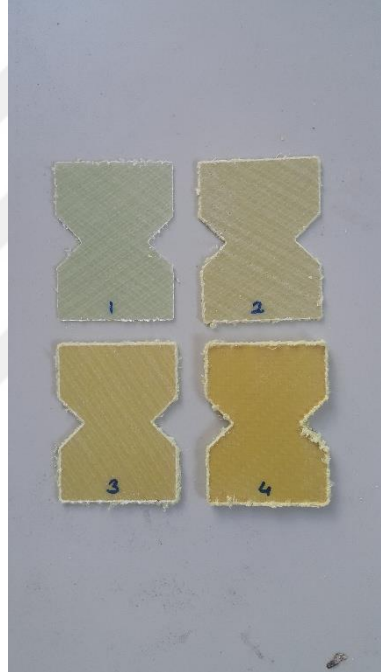
Şekil 3.20. Kayma deneyi için hazırlanan numune ölçüleri (a), (b) (Kaya vd., 2008)

Kompozit plakalardan CNC lazer kesimiyle Şekil 3.20’de verilen ölçülere göre elde edilen kayma deneyi numuneleri Şekil 3.21’da gösterilmiştir.

Kayma deneyi sırasında ihtiyacımız olan parametreler, maksimum kuvvet ve kesit alanıdır. Bu parametreler yardımıyla Eşitlik (3.35)’de gösterilen kayma gerilmesi değeri elde edilmiştir.

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (3.35)$$

Bu eşitlik yardımıyla her numune için maksimum kuvvete karşılık kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir.



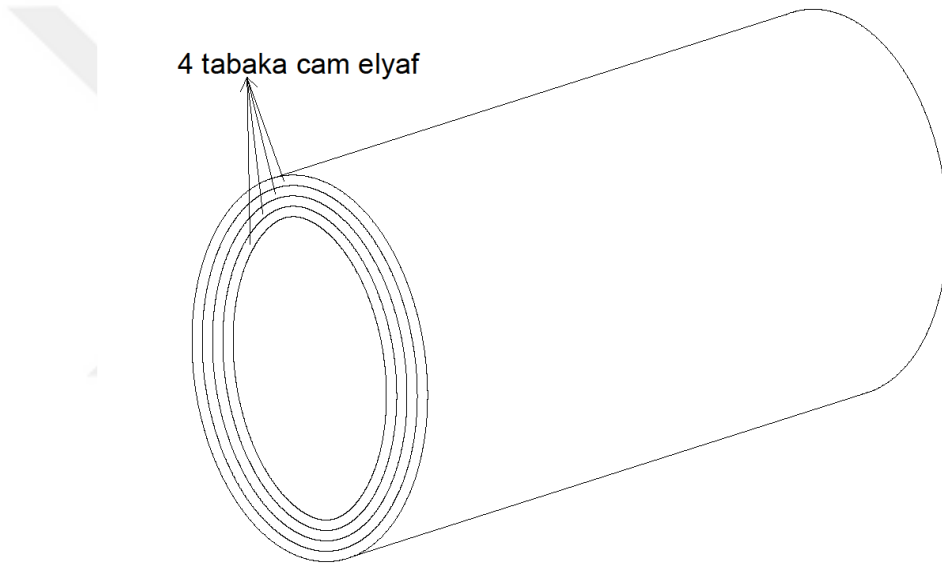
Şekil 3.21. 4 gruba ait kayma deneyi numuneleri

Şekil 3.21’de gösterilen kayma numuneleri üzerinde yazılı olan rakamlar ait oldukları plaka gruplarını göstermektedir. Her grupta 3’er adet numune olmak üzere toplamda 12 adet kayma deneyi numunesi hazırlanmıştır.

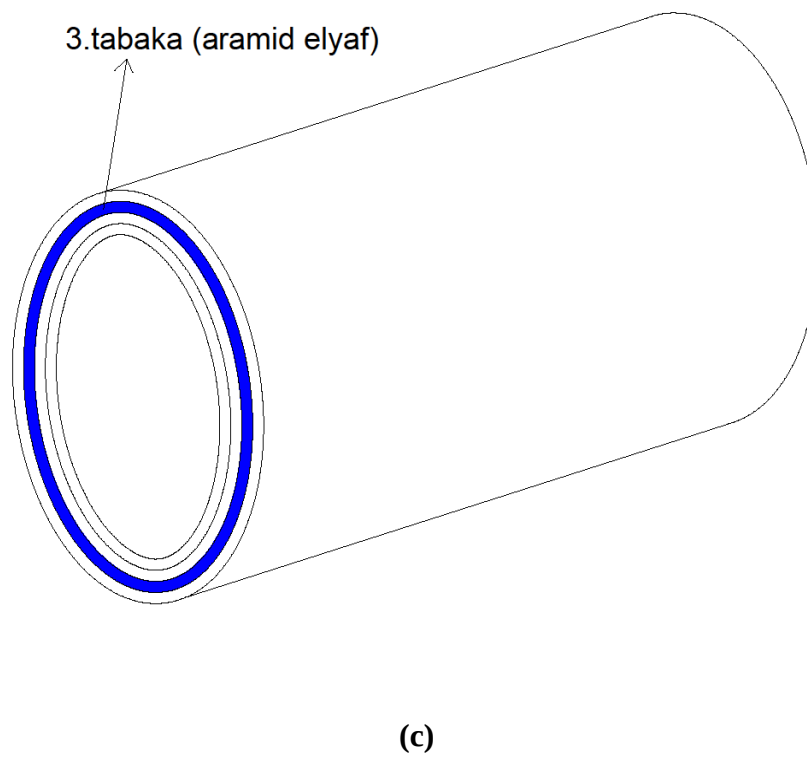
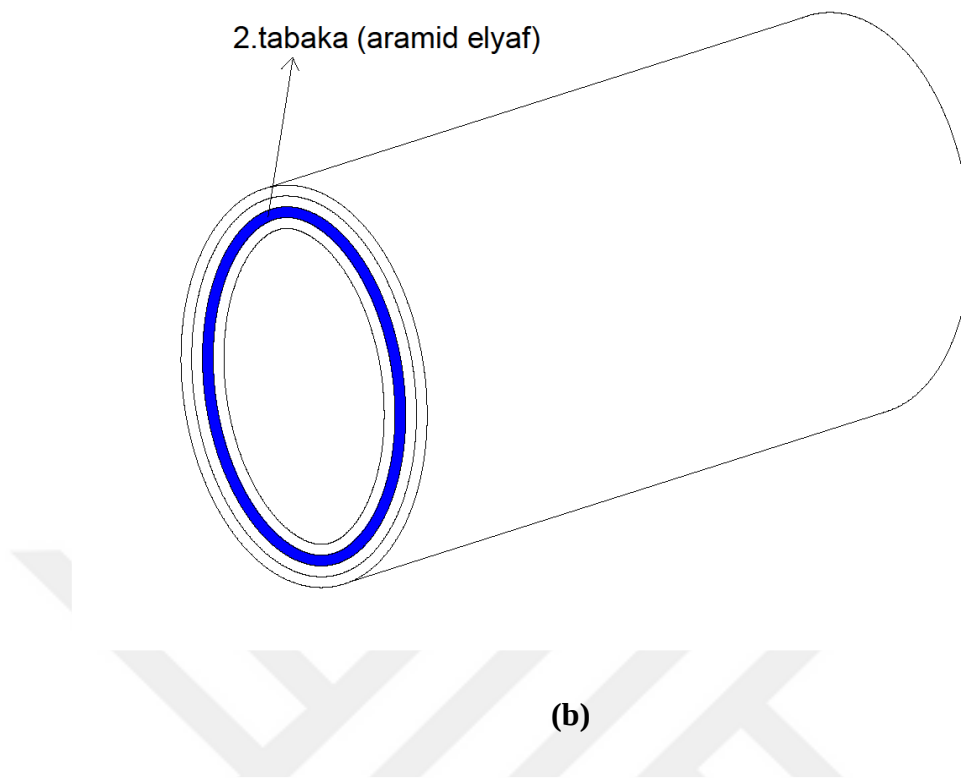
3.5. Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

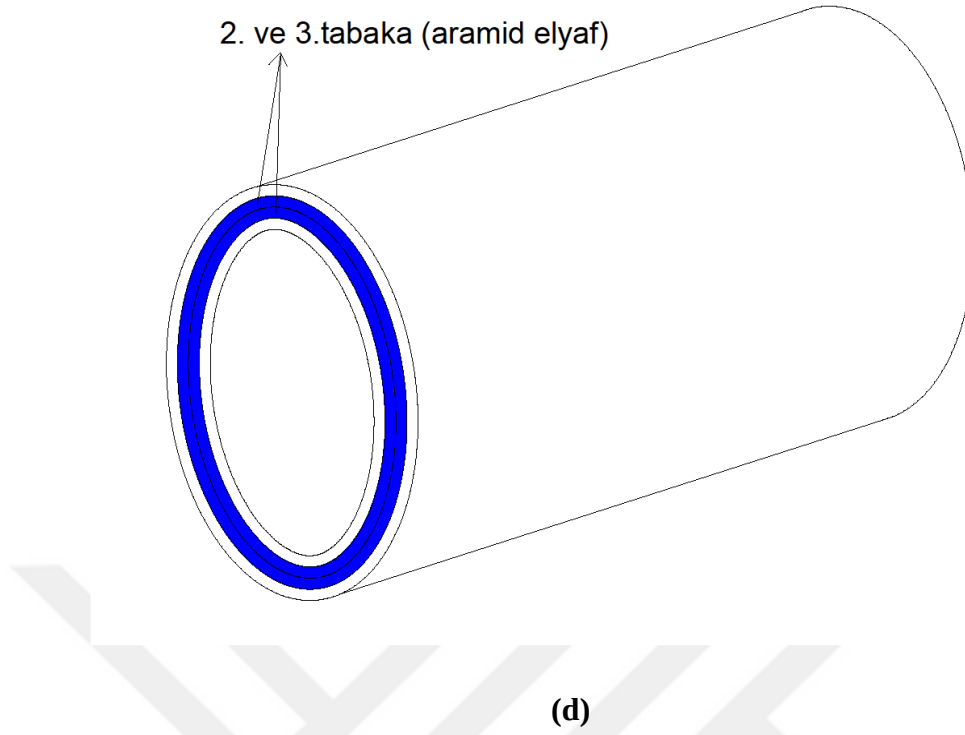
İlk olarak, Şekil 3.22(a)’da teknik olarak çizimi gösterilen, 4 tabakanın hepsi cam elyaf kullanılarak 3 adet kompozit boru üretilmiştir. Daha sonra, ara tabakalardan biri aramid elyaf olacak şekilde bir kompozit boru üretilmiş olup,

üçüncü numune için ise Şekil 3.22'de görüleceği üzere aramid elyaf tabakasının sıralamadaki lokasyonu değiştirilmiştir. Dördüncü numune için ise Şekil 3.22(d)'de görüleceği üzere en içte ve en dışta cam elyaf tabakalar, bu tabakalar arasında da 2 tabaka olacak şekilde aramid elyaf kullanılmıştır. Bahsedilen bu tabakalı kompozit boruların tamamı Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Bu numunelerin hazırlanmasındaki öncelikli amaç, aramid elyaf tabakasının boru içerisindeki sayısı ve lokasyonunun, yalnızca cam elyaf ile üretilen boruya kıyasla iç basınç altındaki gerilme ve hasar davranışının kıyaslanmasıdır.



(a)





Şekil 3.22. Cam elyaf ve aramid elyaf birleşimli kompozit borular (a), (b), (c), (d)

3.6. Deney Düzenegi ve Yardımcı Elemanlar

İçsel basınç altında hasar davranışlarını gözlemlemek üzere hazırlanmış olan 4 grup, toplamda 12 adet kompozit boru için kullanılan patlatma ünitesi Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Patlatma ünitesi, üzerinde yaklaşık 1000 bar kadar basınç uygulayabilen bir yağ pompası, yağ pompasının üzerine oturtulduğu metal ayaklı bir tezgah ve numunenin patlatma esnasında etrafa yağ sıçratmaması için tasarlanan bir metal muhafazadan oluşmaktadır. Kompozit borunun her iki ucunu kapatabilmek için tasarlanan çelik başlıklar Şekil 3.25'de ve bu başlıklara ait ölçüler Şekil 3.26'da görülmektedir. Bu metal başlıklardan bir tanesinin ucunda yağ pompası borusunun bağlanabilmesi için uygun bir çapta açıklık bırakılmış olup, diğer uca ait çelik başlık ise tamamen kapalı bir şekilde tasarlanmıştır. Kompozit boruları çelik başlıklara oturtup ikisi arasındaki birleşmeyi ve sızdırmazlığı sağlayabilmek için hafif kokulu akrilik yapıştırıcı DP 810 kullanılmıştır. DP 810 iki bileşenli akrilik bir yapıştırıcı türü olup, çalışma ömrü 10 dakikadır ve yaklaşık 10 dakikada tutuş gücü sağlamaktadır. Ayrıca çok yüksek seviyede çekme ve soyulma dayanımının yanı sıra iyi darbe dayanımı ve kalıcılığa sahiptir. Hasar deneyleri için ise 46 numara hidrolik yağ kullanılmıştır.



Şekil 3.23. Deney düzeneği

Yapılan çalışmalar boyunca basınç değerlerini ölçmek için kullanılan Pakkens marka manometre Şekil 3.24'de gösterilmekte olup, manometrenin maksimum basınç ölçüm değeri 250 bar'dır.

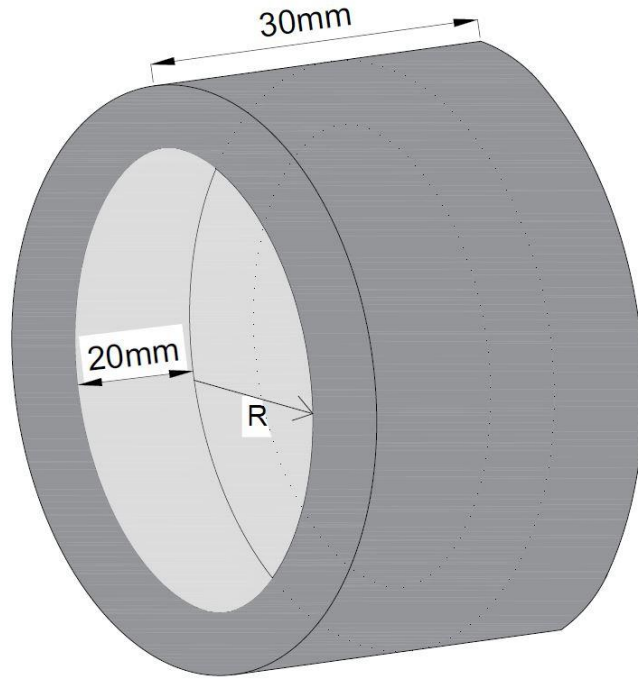


Şekil 3.24. Ölçümler için kullanılan manometre

Kompozit boruların açık uçlarını kapatmak için kullanılan çelik başlıklar ZMM Bulgaria marka CNC tornanın CU 500 modelinde üretilmiştir. Üretimi yapılan başlıkların boru üzerindeki bindirme boyu 20 mm olup, iç yarıçapı (R) 81,2 mm'dir. Başlığa ait ölçüler Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Çelik başlıklar



Şekil 3.26. Çelik başlık çizimi

Çelik başlıkların üretiminin yapıldığı ZMM Bulgaria marka CU 500 model CNC torna tezgahı ve üretim safhası Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.27. CNC torna tezgahı

Borular ve başlıklar arasında tam birleşmeyi sağlayan DP 810 akrilik yapıştırıcı 3M™ Scotch-Weld™ markadır ve Şekil 3.28’de gösterilmiştir. Hafif

kokulu, sertleştirilmiş ve iki bileşenli bir yapıya sahip olan DP810'a ait özellikler şu şekildedir;

- 10 dakika çalışma ömrüne sahiptir
- 10 dakikada tutuş gücü sağlamaktadır
- Hafif kokuludur
- Darbe dayanımı için sertleştirilmiştir
- Genel endüstriyel, spor malzemeleri, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, kompozitler, elektronik eşyalar, askeri, ulaşım ve havacılık alanında kullanılmaktadır
- 1:1 karışım oranına sahiptir
- Mükemmel kesme ve soyma mukavemeti



Şekil 3.28. Hafif kokulu akrilik yapıştırıcı DP810

3M™ Scotch-Weld™ marka DP 810 akrilik yapıştırıcıya ait teknik özellikler Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. DP 810 Teknik Özellikler

Sertleşme Süresi	8-24 saat
Yapıştırıcı Tipi	Akrilik
Raf Ömrü	12 ay
Kesme Dayanımı	3600 psi
Özgül Ağırlık	1,07 g/cm ³
Hacim	50 ml

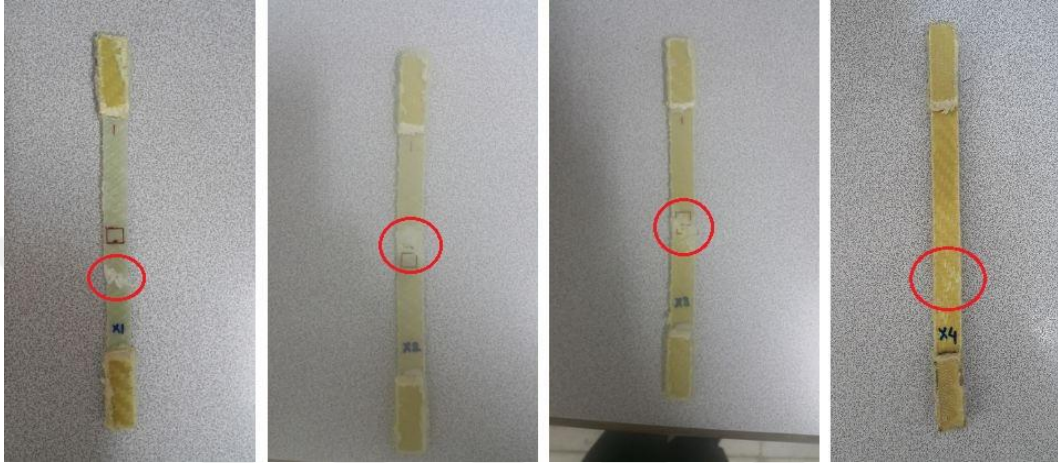
Deneylerde iç basınç uygulanması için kullanılan hidrolik yağ 46 numaradır. Bu yağ yüksek stabiliteye sahip olup, içerisinde aşınmayı, oksidasyonu ve pası önleyici katkıları bulunduran bir yağ türüdür. Deneylerde kullanılan hidrolik yağın başlıca özellikleri ve faydaları şu şekildedir;

- İçerisinde bulunan dispersan katırlar sayesinde sistemin temiz kalmasını sağlar
- Aşınma, paslanma ve korozyona engel olur
- Sudan ayrışma özelliği yüksek olup, oksidasyona karşı dayanımı fazladır
- Kaviteasyonu önleyici yapıdadır ve köpürmez
- Özel filtreleme sistemi kullanılmasından dolayı kirlilik düzeyi NAS 1638 standardına göre kodu 7-8 olarak üretilmektedir.

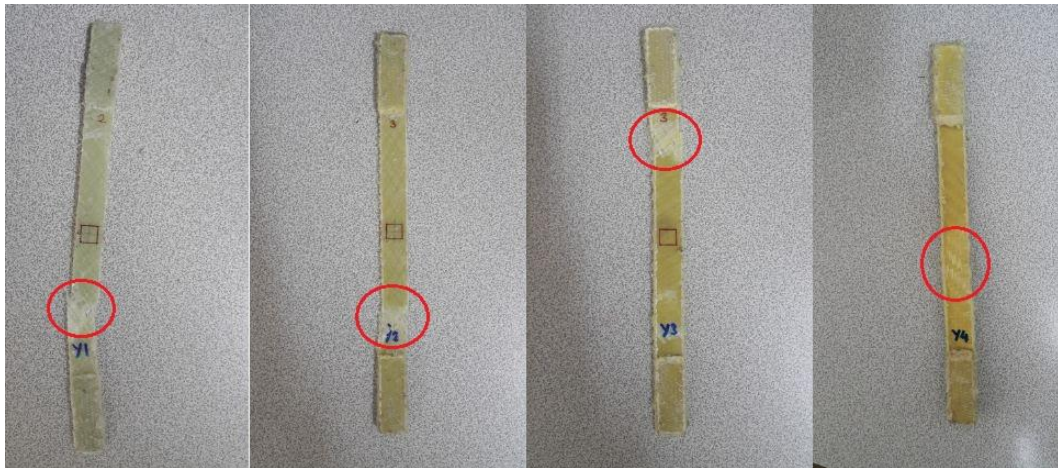
Özellikleri verilen PO marka hidrolik yağı (HD 46), DIN 51524 Part II, Denison HF-0, HF-1, HF-2, Cincinnati Milacron P 68 – P 69 – P 70, Vickers HP Vane Pump Tests, M-2950 S, I-286 S şartname ve onaylarını karşılamaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çekme deneyi numuneleri Shimadzu marka test cihazına yerleştirilerek 0,5 mm/dk hız ile çekilmiştir (Koruvatan, 2008) ve kopma gerçekleştikten sonra deneyler sonlandırılmıştır. Çekme deneyleri sonrası kopma gerçekleşen x yönlü numuneler Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Aynı şekilde çekme deneyleri sonrası kopma gerçekleşen y yönlü numuneler ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

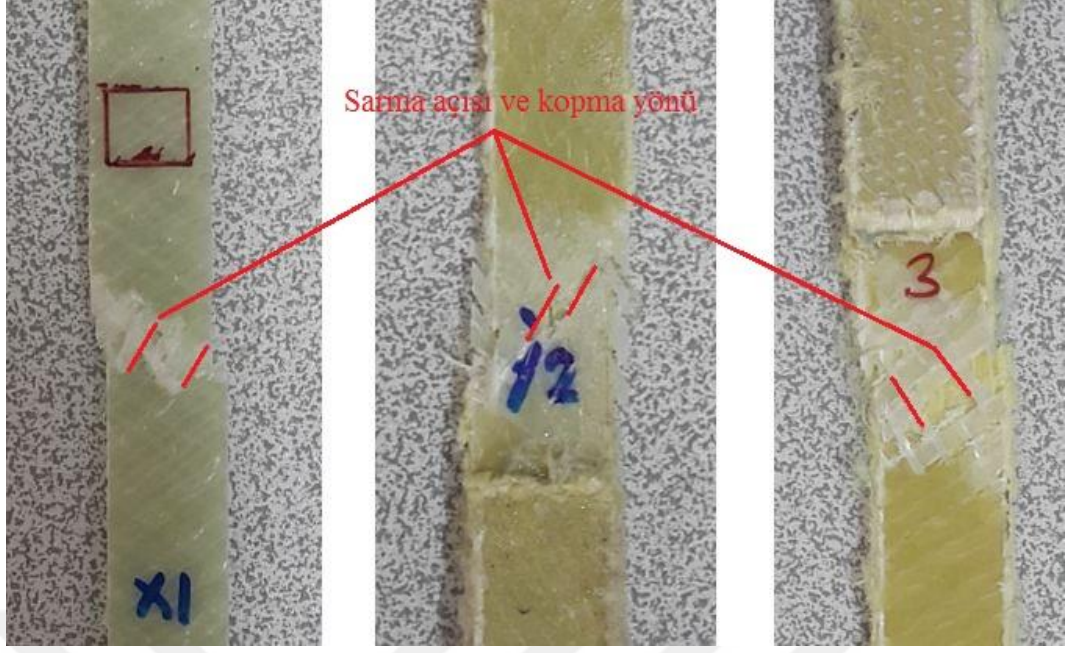


Şekil 4.1. x yönlü çekme deneyi numunelerinin kopma sonrası görünüşleri



Şekil 4.2. y yönlü çekme deneyi numunelerinin kopma sonrası görünüşleri

C-C-C-C çekme numunelerinin hasar durumları incelendiğinde kopmanın, Kara ve Uyaner'in (2017) çalışmasında yapılan çekme deneylerine benzer şekilde $\pm 55^\circ$ sarım açısı doğrultusunda olduğu görülmüştür. Özellikle C-C-C-C, C-A-C-C ve C-A-A-C numunelerinde beyazlaşma ve matris çatlakları gözlemlenmiştir (Toh vd., 2018). Elyaf doğrultusunda kopan numuneler Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

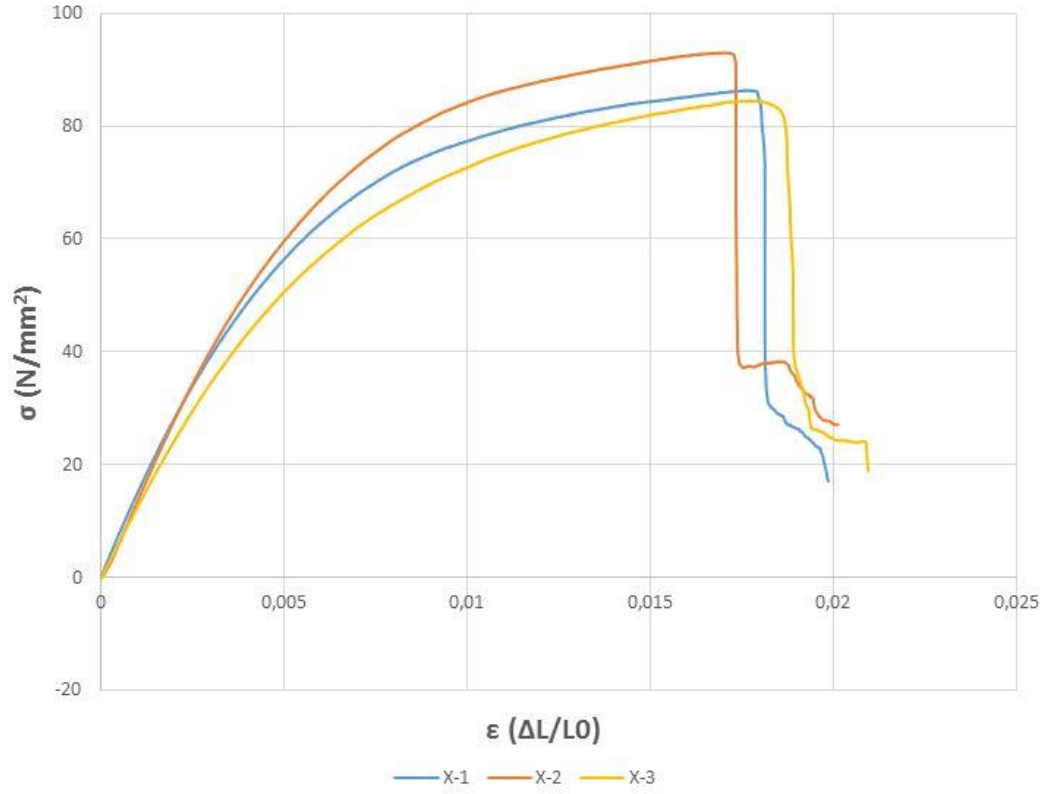


Şekil 4.3. y yönlü çekme deneyi numunelerinin kopma sonrası görünüşleri

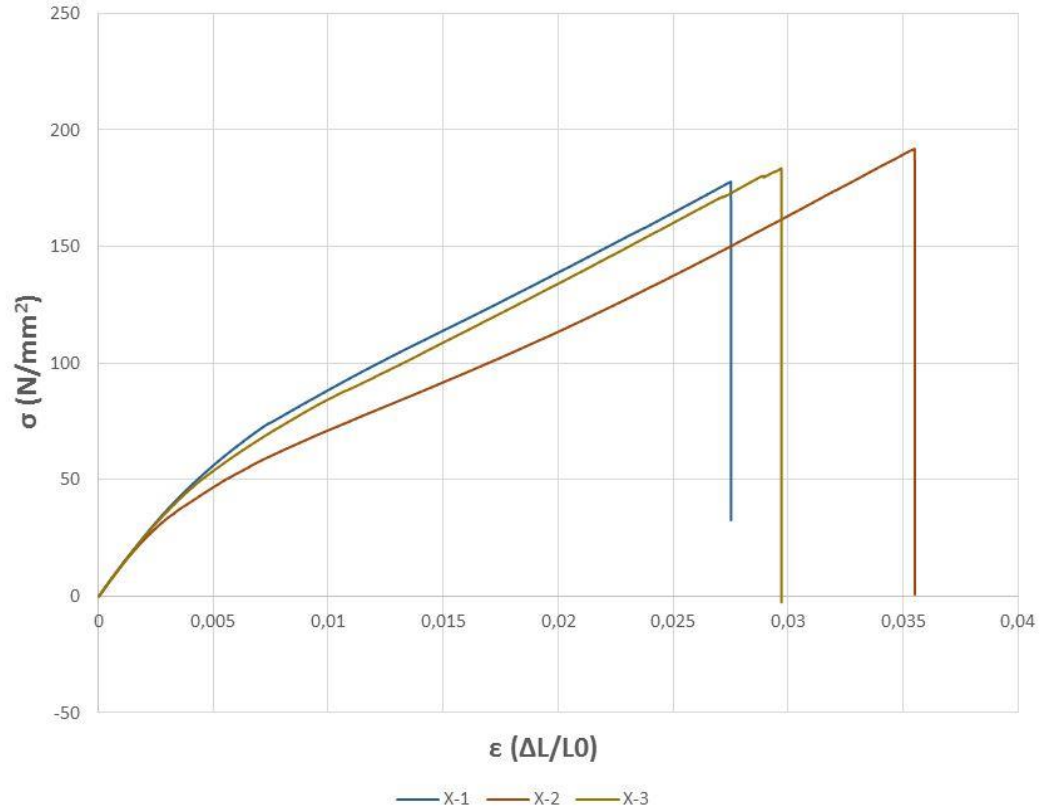
Şekil 4.1 ve 4.2’de görüldüğü üzere çekme kuvvetine maruz kalan kompozit çekme numuneleri, artan çekme kuvvetine bağlı olarak maksimum çekme kuvveti değerinde kopma gerçekleşmiştir. Deneyler gerçekleştirildiği sırada zaman-kuvvet-uzama değerleri 0,01 saniye aralıklarla dijital ortamda çekme cihazına bağlı bir bilgisayara kaydedilmiştir. Bilgisayar ortamına kaydedilen kuvvet-uzama verileri kullanılarak tüm malzemelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuştur.

C-C-C-C, C-A-C-C, C-A-A-C ve A-A-A-A numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri Çizelge 4.1-4.8’de gösterilmiştir.

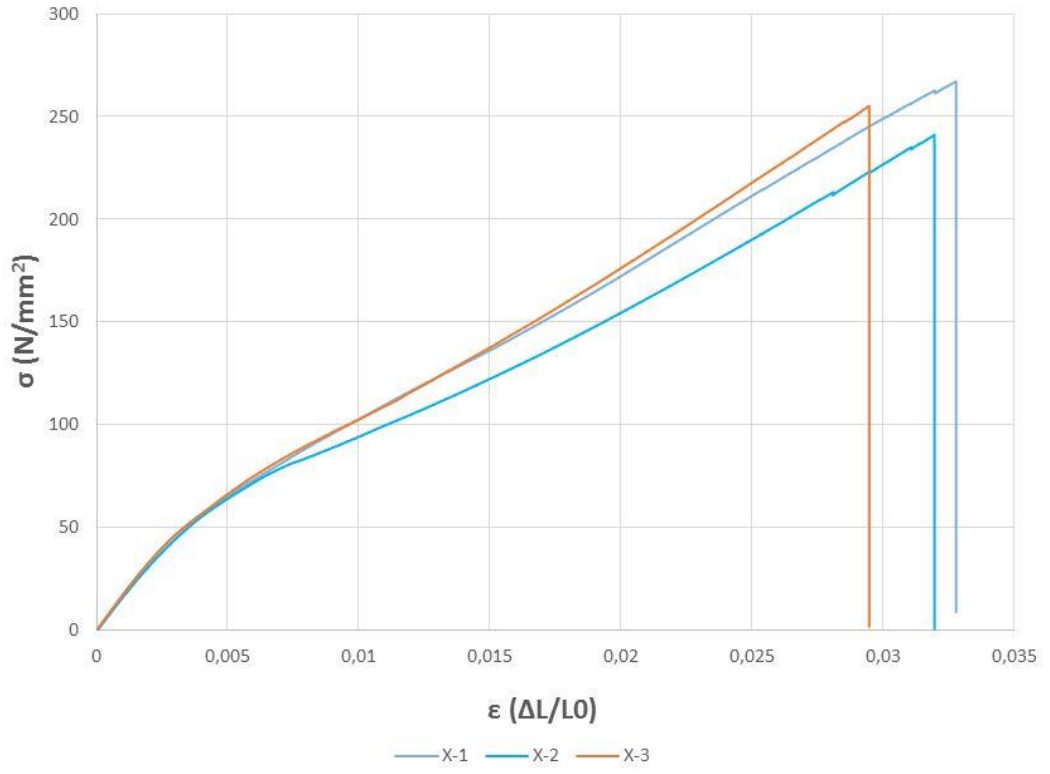
Çizelge4.1. x yönlü C-C-C-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



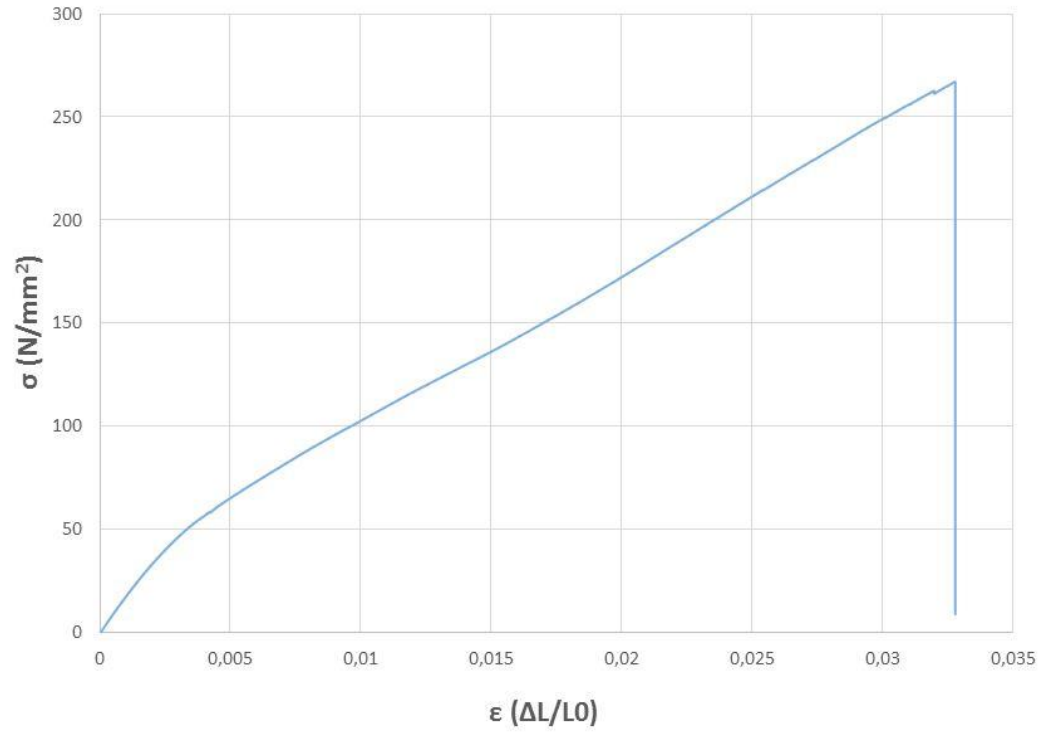
Çizelge4.2. x yönlü C-A-C-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



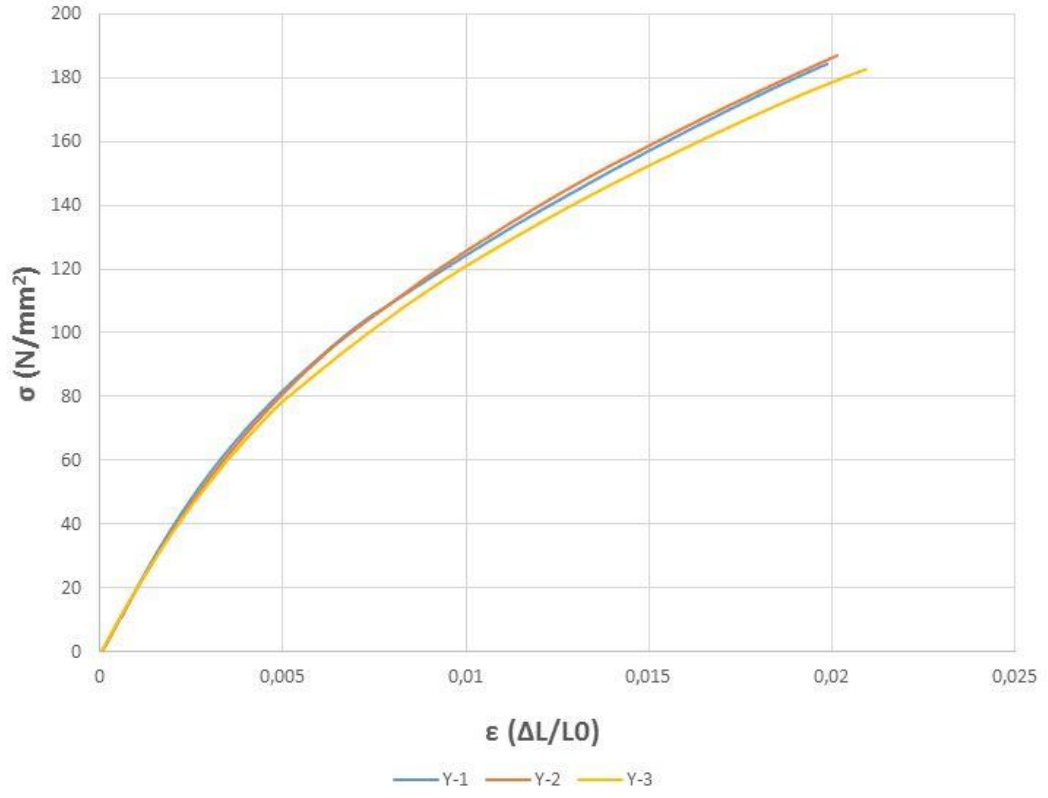
Çizelge4.3. x yönlü C-A-A-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



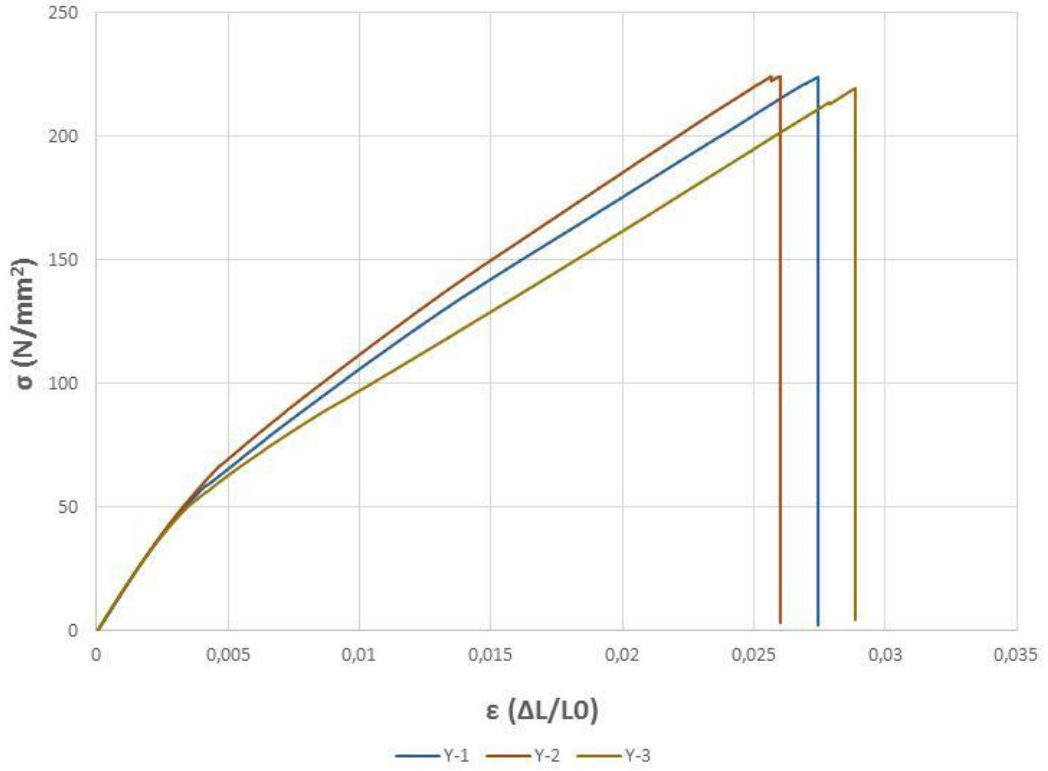
Çizelge4.4. x yönlü A-A-A-A numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



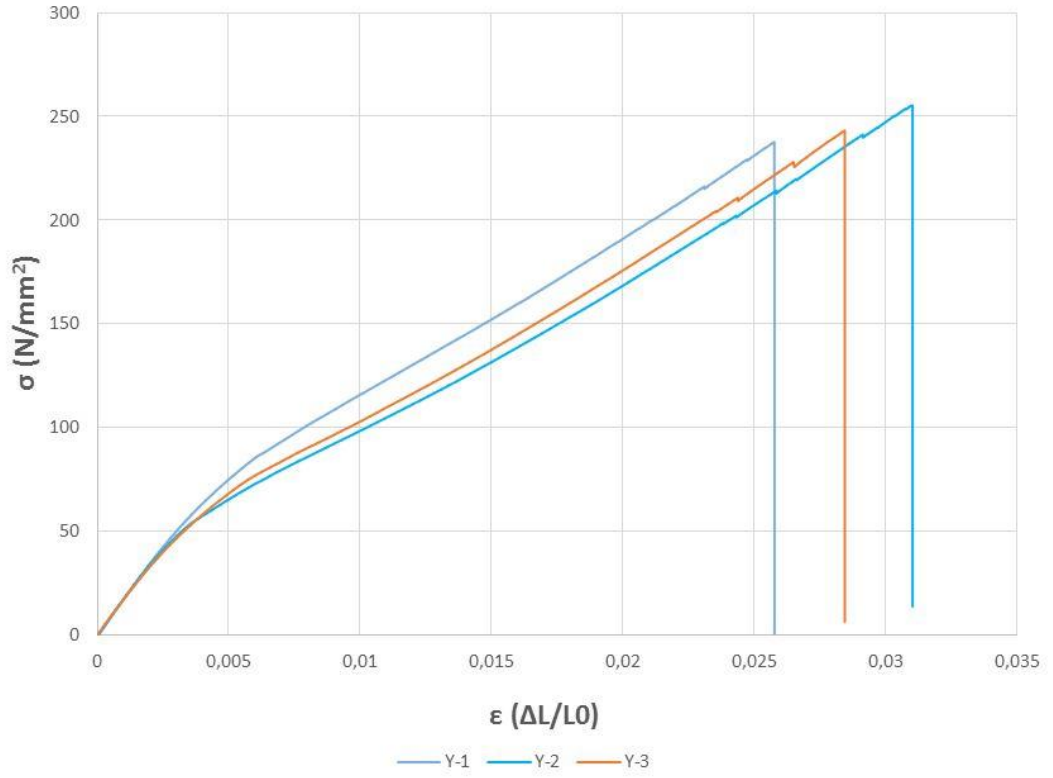
Çizelge4.5. y yönlü C-C-C-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



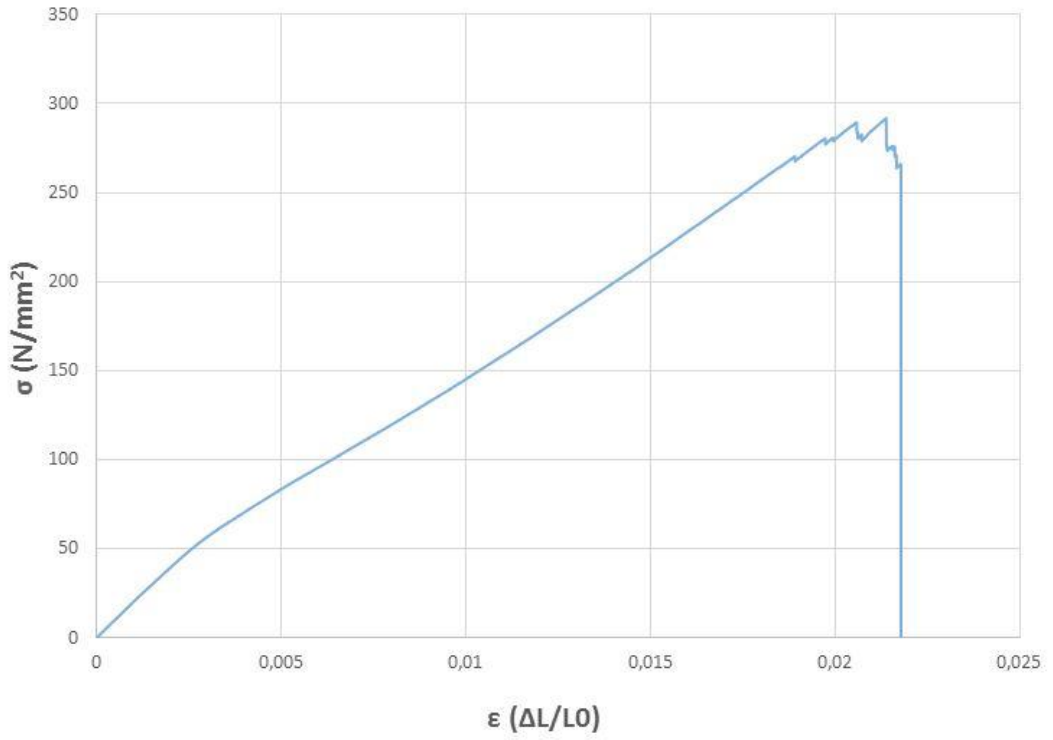
Çizelge4.6. y yönlü C-A-C-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



Çizelge 4.7. y yönlü C-A-A-C numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



Çizelge 4.8. y yönlü A-A-A-A numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



Gerilme – Şekil Değiştirme grafiklerinden bakıldığı zaman grafiğin yatay eksenini altında ifade edilen kodlamalara ait tanımlamalar şu şekildedir;

- X-1: X yönlü 1. Numune
- X-2: X yönlü 2. Numune
- X-3: X yönlü 3. Numune
- Y-1: Y yönlü 1. Numune
- Y-2: Y yönlü 2. Numune
- Y-3: Y yönlü 3. Numune

Grafiklerden de anlaşılabacağı üzere x ve y yönlerinin her ikisinde de yer alan numunelerden C-C-C-C numuneleri en düşük kopma mukavemeti ve en düşük kopma uzamasına sahiptir. C-C-C-C'den C-A-A-C'ye doğru devam ettikçe aramid elyaf tabakasının sayısının artışı nedeniyle hem numunelere ait kopma mukavemeti artmıştır hem de birim şekil değiştirmeler yükselmiştir. X ve Y yönlerinde en yüksek çekme gerilmesi değerine ulaştığı görülen A-A-A-A çekme numunelerinin kopma anında 11,163 kN çekme kuvvet değerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Çekme deneyleri sonucunda toplamda 4 çeşit kompozit malzemeye ait mekanik özellikler Çizelge 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri

Mekanik Özellik	Birim	C-C-C-C	C-A-C-C	C-A-A-C	A-A-A-A
$\sigma_{x(max)}$	(MPa)	87,96	184,38	254,44	267,09
$\sigma_{y(max)}$	(MPa)	216,14	222,7	245,4	291,85
ν_{xy}	-	0,301	0,34	0,377	0,437
ν_{yx}	-	0,295	0,321	0,378	0,431
E_x	(MPa)	9763,98	6291,48	8487,66	17995,5
E_y	(MPa)	8255,2	12538,1	15134,3	29606,1

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri bulunurken kuvvet-uzama verileri Trapezium-X adlı program vasıtasıyla bilgisayara kaydedilmiş ve daha sonra bu verilerden gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Gerilme-

şekil değiştirme grafiğinin lineer-elastik (doğrusal) bölümünün eğiminden malzelere ait elastisite modülü (E) bulunmuştur. Her kompozit çeşidi için 3 adet test gerçekleştirildiğinden, elde edilen elastisite modülü değerlerinin ortalaması alınmıştır. Ayrıca $\sigma_{x(max)}$ ve $\sigma_{y(max)}$ değerleri gerilme-şekil değiştirme grafiği üzerinde kopmanın gerçekleştiği andaki değer olarak kaydedilmiştir.

Toplamda 4 grup halinde hazırlanmış olan 12 adet kompozit boru, DP810 hafif kokulu akrilik yapıştırıcı kullanılarak metal başlıklarla birleştirilmiş olup, iç basınç uygulamaya hazır olan numuneler Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. İçsel basınç uygulamaya hazır hale getirilen numuneler

Aşağıda ayrıntıları verilen deneysel çalışmalar göz önüne alınarak deneylerde $55^\circ/-55^\circ/55^\circ/-55^\circ$ oryantasyon açılı cam elyaf tabakaları kullanılmıştır.

Xia vd. (2001), $55^\circ/-55^\circ/55^\circ/-55^\circ$, $55^\circ/-55^\circ/30^\circ/-30^\circ$ ve $50^\circ/-30^\circ/30^\circ/-50^\circ$ sarım açılına sahip 4 tabakalı karbon fiber/epoksi kompozit boruların iç basınç altındaki davranışını incelemişlerdir. Dairesel gerilmenin aksenal gerimeye oranının 2:1 olduğu filaman sarım borularda optimum sarım açısını $\pm 55^\circ$ olarak bulmuşlardır.

Wahab vd. (2007) çalışmalarında, 5 farklı diagonal şekilli kompozit boruların FEM analizi ile farklı oryantasyon açılarındaki gerilme davranışını incelemişlerdir. Sonuçta en iyi iç basınç hasar gerilmesi değerini 50° ile 60°

arasındaki fiber oryantasyonundan elde etmişlerdir. Bakaiyan vd. (2009) çalışmalarında, 4 tabakalı $[+55/-55/+55/-55]$ ve $[+55/-55/+30/-30]$ sarım açısına sahip kompozit boruların iç basınç altındaki davranışını incelemişlerdir. Borulara ait her bir tabaka kalınlığı 0,5 mm ve iç yarıçap 50 mm'dir. Boyutsuz radyal mesafe doğrultusundaki radyal gerilme dağılımının $[+55/-55/+30/-30]$ sarım açısına sahip borularda $R=0,5$ mm'den yukarıdaki değerlerde ani düşüş yaşadığını tespit etmişlerdir. Radyal gerilmenin, $[+55/-55/+55/-55]$ sarım açısına sahip borularda doğrusal bir şekilde arttığı ve radyal şekil değiştirmenin daha düşük olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla deneysel çalışmalarda $55^\circ/-55^\circ/55^\circ/-55^\circ$ oryantasyon açısı tercih edilmiştir.

Sülü (2014) tarafından yapılan çalışmalarda en yüksek iç basınç hasarına $55^\circ/-55^\circ/55^\circ/-55^\circ$ oryantasyon açısına sahip numunelerde ulaşılmıştır. Yapılan çalışmada 4 tabakalı cam elyaf borular için $45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ$, $55^\circ/-55^\circ/30^\circ/-30^\circ$ ve $55^\circ/-55^\circ/55^\circ/-55^\circ$ olmak üzere 3 farklı oryantasyon açısı kullanmıştır. Bu çalışmada kullanılan 4 tabakalı kompozit boruların cidar kalınlığı 1,5 mm'dir. İlk iki oryantasyon açısına sahip numunelere ait iç basınç değeri düşük çıkmış ve hasar basıncı değerlerinin kendi içinde değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir.

Kompozit borular metal başlıklarla birleştirilmeden önce metal başlıkların iç yüzeyi ve kompozit boruların metal başlıklarla olan birleşme bölgeleri Proses marka sentetik tinerle temizlenerek metal ve kompozit arasındaki aderans artırılmıştır.

Şekil 4.4'de görüldüğü üzere içsel basınç uygulanmaya hazır hale getirilen numuneler, C-C-C-C, C-A-C-C, C-C-A-C ve C-A-A-C olmak üzere toplamda 4 kompozit malzeme çeşidi ile 12 kez patlatma deneyine tabi tutulmuşlardır. C-C-C-C grubuna ait 3 adet kompozit boru bilindiği üzere 4 tabaka cam elyaftan oluşmaktadır ve içsel basınç uygulanması sırasında manometre üzerinde sırasıyla 42, 41 ve 45 bar değerleri en yüksek basınç değerleri olarak ölçülmüştür. Ayrıca bu grupta yer alan numuneler en yüksek basınç değerlerine ulaştıkları anda hasara uğramaya başlamış olup, her 3 numuneye ait hasar incelendiğinde hidrolik yağın boru yüzeyinden sızarak dışarı çıktığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla söz konusu hasarın, kompozit boru yüzeyindeki en zayıf kesitlerde meydana geldiği görülmüştür.

C-C-C-C numunesinin içsel basınç uygulanması sonrası oluşan hasar görüntüsü Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Yağın boru cidarı üzerindeki zayıf bölgelerden dışarı sızdığı görülmektedir.



Şekil 4.5. C-C-C-C numunesine ait hasar durumu

Aynı şekilde 3 adet C-A-C-C numunesi için de benzer şekilde içsel basınç uygulanmış olup, ortaya çıkan hasar durumu incelenmiştir. C-A-C-C numuneleri üzerinde C-C-C-C numunelerine benzer şekilde boru yüzeyinde sızma yoluyla hasar olduğu gözlenmiştir. İçsel basınca tabi tutulan 3 numuneye ait en yüksek basınç değerleri 56, 54 ve 57 bar olarak ölçülmüştür. Değerlerden de görüleceği üzere birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiş olup, sadece 1 tabaka aramid elyaf içeren C-A-C-C numunesine ait hasar basıncı değerleri C-C-C-C numunelerine ait değerlerden daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca C-A-C-C numunelerinden elde edilen en yüksek basınç değeri Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



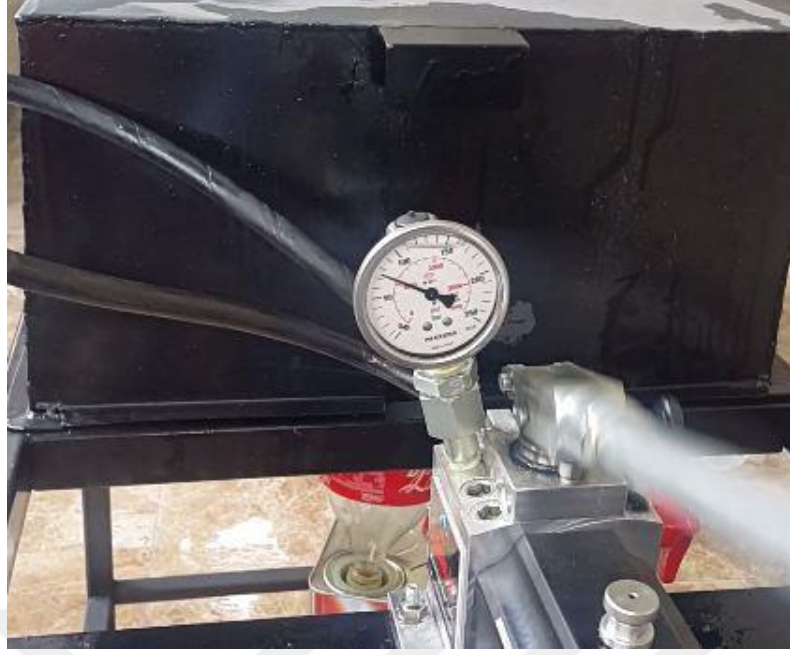
Şekil 4.6. C-A-C-C numunesine ait en yüksek basınç değeri

Bu gruba ait 3 adet numune ile yapılan deneylerde boru çeperindeki hasar, C-C-C-C numunelerinde olduğu gibi yağın boru yüzeyindeki zayıf bölgelerden sızması ile oluşmuştur. Yani borunun hasar basıncı değerine ulaşıldığı anda boru yüzeyinde yağ sızıntıları meydana gelmeye başlamış ve basınç değeri artışı son bulmuştur. Dolayısıyla bu aşamadan sonra boru içerisine basınç uygulamasına son verilmiş olup, numune içerisindeki yağ boşaltılmıştır. Sızma şeklinde hasarın meydana geldiği C-A-C-C numuneleri en yüksek basınç değerine ulaştığı anda oluşan hasar görüntüsü Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

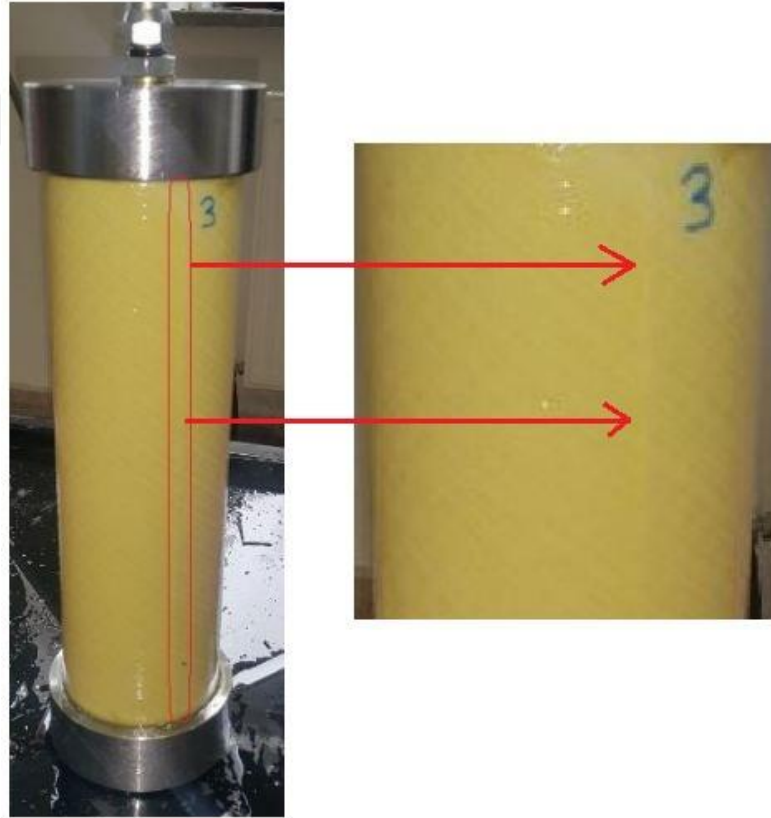


Şekil 4.7. C-A-C-C numunesine ait hasar durumu

C-C-A-C isimli kompozit borular da diğerleri ile aynı şekilde içsel basınca maruz bırakılarak hasara uğratılmıştır. Ulaşılan en yüksek basınç değerinde C-C-C ve C-A-C-C numunelerinde olduğu gibi boru yüzeyinde sızmalar meydana gelmiştir. Bu grupta yer alan 3 numune için elde edilen en yüksek basınç değerleri sırasıyla 74, 75 ve 74 bardır. C-C-A-C numuneleri ile C-A-C-C numuneleri sadece 1 tabaka aramid elyaf ve 3 tabaka cam elyaftan oluşmaktadır. Ancak ikisi arasındaki fark tabakaları içten dışa doğru sıraladığımız takdirde C-A-C-C numunelerinin 2. tabakası aramid elyaf iken, C-C-A-C numunelerinin 3. tabakası aramid elyaftır. C-A-C-C ve C-C-A-C numunelerinin hasar davranışı incelendiğinde 2. tabakada bulunan aramid elyafın 3. tabakaya geçmesiyle birlikte ortalama hasar basıncı değeri %33,4 oranında artmıştır. C-C-A-C numunesi için elde edilen en yüksek basınç değeri ve hasar görüntüsü sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.8. C-C-A-C numunesine ait en yüksek basınç değeri



Şekil 4.9. C-C-A-C numunesine ait hasar durumu

C-C-C-C, C-A-C-C ve C-C-A-C numunelerinin hasar oluşumlarına bakıldığında Gemi'nin (2014) çalışmalarına benzer şekilde önce damlama, daha sonra boru yüzeyinde beyazlaşma ve matris ayrılması şeklinde sonuç verdiği görülmüştür.

Bölüm 3.3'de bahsedilen asal gerilme eşitlikleri;

$$\sigma_{loop} = \frac{pR}{t} \quad (4.1)$$

$$\sigma_{long} = \frac{pR}{2t} \quad (4.2)$$

şeklindedir.

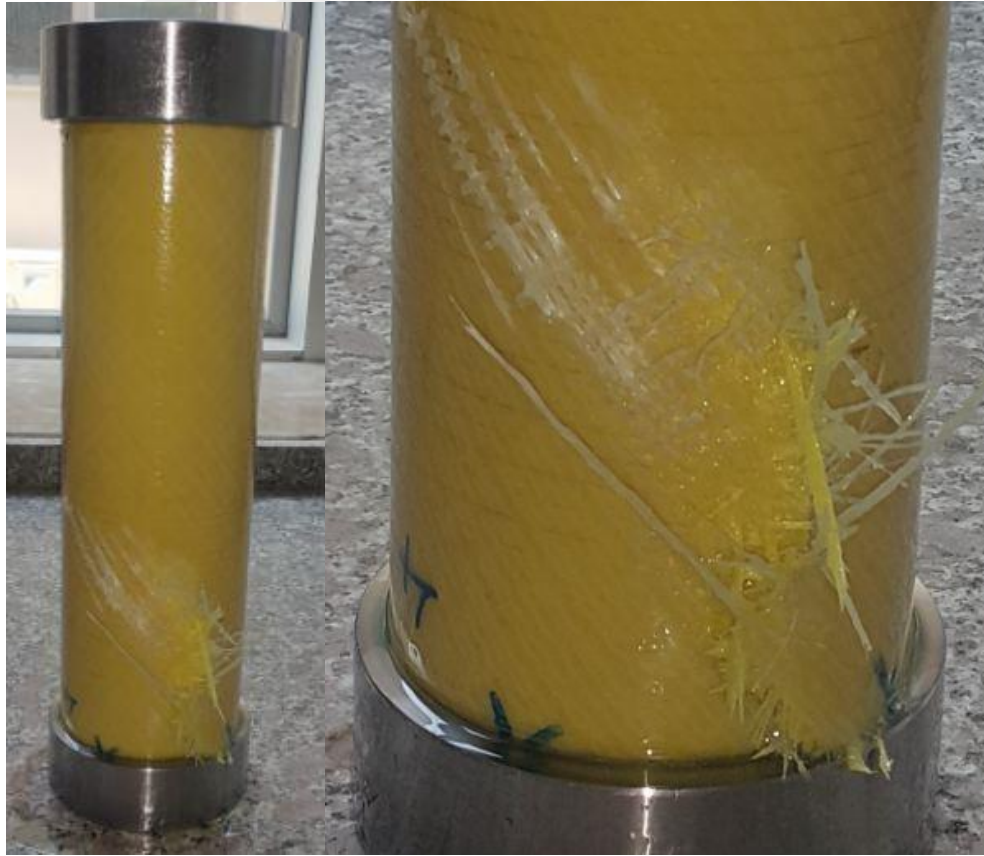
Bu eşitliklerden yararlanarak boru enkesiti doğrultusunda oluşan σ_{loop} asal gerilmelerinin yüksek olması sebebiyle borunun enkesiti doğrultusunda ayrılmalar ve beyazlaşmalar gözlemlenmiştir (Kara, 2012). σ_{loop} asal gerilmesinin boru enkesiti doğrultusunda olmasından dolayı, yani teğetsel sarım açısının 90° olduğu filaman sarım kompozit borularda enine cidar gerilmeleri en yüksek değere ulaşmaktadır (Akgün, 2015).

C-A-A-C kodlu son 3 adet kompozit boru da diğer gruplarla aynı şekilde içsel basınca tabi tutulmuş olup, bu grupta yer alan numunelerin diğerlerinden farkı daha önce de anlatıldığı üzere ortada bulunan 2 adet tabakanın her ikisinin de aramid elyaf olmasıdır. En içte ve en dışta bulunan tabakalar ise cam elyaftan oluşmaktadır. Bu grupta yapılan deneyler sonucunda en yüksek hasar basıncı elde edilmiş olup, bu değerler sırasıyla 89, 93 ve 90 bar olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.10. C-A-A-C numunesine ait en yüksek basınç değeri

Ayrıca C-A-A-C numuneleri için yapılan deneyler sonucunda kompozit boru yüzeyinde yırtılma ve elyaf kopması (Taşyürek, 2014) şeklinde hasar meydana gelmiştir. Oluşan hasar durumu Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11. C-A-A-C numunesine ait hasar durumu

4 grup için toplam 12 adet deney sonucunda elde edilen hasar basıncı değerleri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

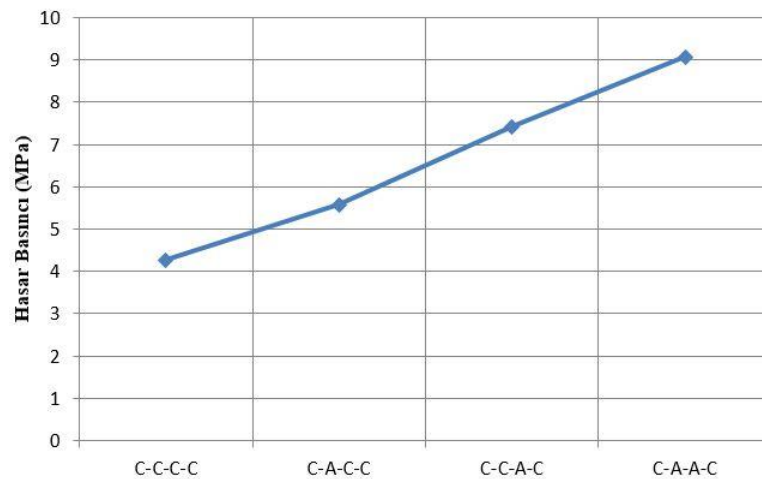
Çizelge 4.10. Deneylerde elde edilen hasar basıncı değerleri

Numune No	Hasar Basıncı (MPa)			
	C-C-C-C	C-A-C-C	C-C-A-C	C-A-A-C
1	4,2	5,6	7,4	8,9
2	4,1	5,4	7,5	9,3
3	4,5	5,7	7,4	9
Ortalama	4,27	5,57	7,43	9,07
Standart Sapma	0,204	0,153	0,058	0,208

$\pm 55^\circ$ sarım açılı 4 tabakalı cam elyaf ile üretilen C-C-C-C kodlu kompozit boruların hasar basıncı diğerlerine göre çok düşüktür. Deney çalışmaları sırasında boru en yüksek hasar basıncına ulaştığı anda boru çeperinde en zayıf noktalardan sızma yollu hasarlar meydana gelmiştir. Aynı şekilde C-A-C-C ve C-C-A-C kodlu kompozit boruların çeperinde de sızma ve boru eksenine doğrultusunda beyazlaşmalar şeklinde hasarlar gözlenmiştir. C-A-A-C kodlu 3 adet numune ise en yüksek basınca ulaştıkları anda boru çeperlerinde yırtılma şeklinde hasarlar meydana gelmiştir.

Deney numunelerine ait hasar basıncı grafiği Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Kompozit borulara ait hasar basıncı grafiği



Deneyler sonucunda özellikle C-A-C-C ve C-C-A-C numunelerinin maksimum hasar basıncı değerlerine bakılacak olursa, her iki grupta da sadece tek tabaka aramid elyaf olmasına rağmen C-C-A-C numunelerinin hasar basıncı değerleri C-A-C-C numunelerinden daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi ise dış tabakalarda şekil değiştirmenin fazla olması ve şekil değiştirme özelliği yüksek olan tabakanın dışta olması halinde borunun daha geç hasara uğramasıdır. Güçlü tabakanın dışarda, zayıf tabakanın içerde yer alması sayesinde C-A-C-C numunelerinden elde edilen değerlerin daha da üstüne çıkmıştır.

Sülü'nün (2014) 4 tabakalı cam elyaftan oluşan kompozit borular üzerinde yaptığı deneysel çalışmalarda, en yüksek hasar basıncı $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip kompozit borulardan elde edilmiştir. Deney numuneleri 1,5 mm cidar kalınlığı ve 102 mm iç yarıçapa sahiptir. $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip 4 tabakalı cam elyaftan oluşan kompozit borulara ait hasar iç basıncı ortalama değeri 9,67 MPa olarak bulunmuştur. Deneysel çalışmalarda kullanılan aynı özellikteki C-C-C-C kodlu numunelere ait hasar iç basıncı ortalama değeri ise 4,27 MPa olarak tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarımızda kullanılan kompozit borulara ait cidar kalınlıkları 1 ila 2 mm arasında değişmekte olup, iç yarıçapı 80 mm'dir. Her iki çalışmada kullanılan numunelerin cidar kalınlığı, iç yarıçapları, numune uzunlukları vs. birbirinden farklı olmasından ötürü hasar basınçları arasında farklı sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca numunelerin üretimi sırasında gözden kaçırılan hususlar, ortam sıcaklığındaki farklılık, çevresel etmenler vb. nedenler sonuçlar arasındaki farklılığın etkenlerindendir.

Gemi (2016) çalışmasında, filaman sarım yöntemi ile malzeme sırası cam-karbon-cam ve sarım açısı $\pm 75^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ$ olan hibrit borular üretmiş ve bu boruların iç basınç altındaki yorulma davranışlarını incelemiştir. 6 tabaka halinde üretilen boruların iç yarıçapı 72 mm, dış yarıçapı 77,1 mm, cidar kalınlığı 2,55 mm ve boyu 300 mm'dir. Yorulma mukavemetini ve rijitliği arttırması için borunun iç tabakasına $\pm 75^\circ$ cam elyaf, hasar basıncının ise maksimuma çıkarılması için borunun orta tabakasına $\pm 55^\circ$ cam elyaf sarılmıştır.

Akgün (2015) çalışmasında, cam elyaf ve epoksiden oluşan dış çapı 65 mm, cidar kalınlığı 1,7 mm ve boyu 650 mm olan kompozit boruların içsel basınç altındaki hasar durumunu incelemiştir. 4 tabakadan oluşan kompozit boruların

elyaf sarım açıları $90^\circ/+55^\circ/-55^\circ/90^\circ$ ve $+55^\circ/-55^\circ/90^\circ/90^\circ$ şeklindedir. PLC kontrollü hidrolik test cihazında gerçekleştirilen deneyler sonucunda 4 tabakalı $90^\circ/+55^\circ/-55^\circ/90^\circ$ sarım açısına sahip kompozit borulara ait hasar basıncı değeri 24,642 MPa olarak bulunmuştur. Yine 4 tabakadan oluşan ve $+55^\circ/-55^\circ/90^\circ/90^\circ$ sarım açısına sahip kompozit boruların hasar basıncı değeri ise 24,442 MPa bulunmuştur.

Deneysel çalışmalarımızda kullanılan $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip 4 tabakalı kompozit borularımızın ortalama hasar basıncı 4,27 MPa olarak bulunmuş ve sonucun Akgün'ün çalışmasındaki değerlerden düşük çıktığı tespit edilmiştir. Basınç değerleri arasındaki bu farkın numune boyu, cidar kalınlığı, boru çapı, elyaf çeşidi ve borunun üretim aşamasında çalışılan ortamın sıcaklığı gibi birçok sebepten kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Ayrıca Akgün'ün çalışmasında kullanılan 90° elyaf yönlü numunelerin σ_{loop} asal gerilmesi ile aynı doğrultuda olmasından dolayı hasar mukavemetinin yükseldiği açıktır.

Taşıyürek (2014) yaptığı çalışmada, filaman sarım E-camı/epoksi kompozit boruların iç basınç altındaki yorulma davranışını incelemiştir. Bu doğrultuda, $\pm 55^\circ$ sarım açılı, 300 mm boyunda, 72 mm iç çapa ve 2,2 mm cidar kalınlığına sahip 6 tabakalı kompozit borular üretilmiştir. İçsel basınca maruz bırakılan borularda matrislerde mikro seviyede çatlaklar oluşmuş ve elyaf-matris ayrılmasının başladığı noktada 327 MPa basınca ulaşıldığı görülmüştür. Nihayetinde boru yüzeyinde yoğun beyazlaşmanın olduğu ve patlama anında oluşan hasar basıncı değerinin 489 MPa olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarımızda elde edilen hasar basıncına oranla çok yüksek olan bu değerde tabaka sayısının fazla olması, cidar kalınlığı ve numune boyutları, üretim şekli ve deneyin serbest uçlu olarak gerçekleştirilmesi etkin rol oynamıştır. 154,08 mm iç çap ve 7,11 mm cidar kalınlığına sahip çelik borunun kullanıldığı diğer bir çalışmada (Rohem vd., 2016) ise hidrostatik basınç altındaki hasar gerilmesi 326,2 bar olarak ölçülmüştür.

$\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 63^\circ$ ve $\pm 63^\circ/\pm 45^\circ/\pm 55^\circ$ sarım açılarından oluşturulan 4 çeşit cam elyaf takviyeli plastik borunun iç basınç altında hasar durumu incelenmiştir (Sebaey, 2019). Tüm deney numuneleri aynı özelliklere sahip olup, iç yarıçapı 110 mm, cidar kalınlığı 3,8 mm ve boru boyu 448,5 mm'dir. İçsel basınca tabi tutulan tüm numuneler göstermiştir ki en yüksek hasar basıncı $\pm 55^\circ$ sarım açısına

sahip numunelerde (56 bar), en düşük hasar basıncı ise $\pm 45^\circ$ sarım açısına sahip numunelerde (7 bar) tespit edilmiştir. Ayrıca $\pm 63^\circ/\pm 45^\circ/\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip numunelerden elde edilen sonuçların da $\pm 55^\circ$ 'ye yakın olduğu görülmüştür.

Üstün vd. (2016) çalışmalarında, karbon fiber takviyeli epoksi kompozit boruların iç basınç altındaki yorulma davranışını incelemişlerdir. $[\pm 55^\circ]$ sarım açısında ve 4 tabaka halinde üretilen borulara ait iç yarıçap 72 mm, cidar kalınlığı 3 mm'dir. Deneysel çalışmalar sırasında karbon fiber/epoksi borulara ait patlama basıncı 410 MPa olarak tespit edilmiştir.

Fitriah vd. (2017), $[\pm 45^\circ, \pm 55^\circ, \pm 63^\circ]$ filaman sarım cam elyaf takviyeli kompozit borular üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sonuçta $\pm 45^\circ$ sarım açısına sahip GRE boruları en yüksek basınç dayanımları sergilerken (118,91 MPa), bunu sırasıyla $\pm 55^\circ$ (69,17 MPa) ve $\pm 63^\circ$ (59,38 MPa) sarım açılı numuneler izlemiştir.

Bir başka çalışmada, $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip cam elyaf takviyeli kompozit borularda patlama basıncı yaklaşık 220 MPa bulunmuştur (Benyahia vd., 2018). Oldukça yüksek çıkan bu sonuçta, $6,2 \pm 0,1$ mm olan cidar kalınlığının etkisi çok yüksektir. Ayrıca numune uzunluğu $20 \pm 0,1$ mm olup, deneysel çalışmalarımızda kullanılan boruların uzunluğundan 15 kat daha küçüktür.

Arıkan'ın (2007) çalışmasında ise 6 tabaka halinde $(\pm 55^\circ/-55^\circ)_3$ sarım açısıyla üretilen çentiksiz numunelere ait patlama basıncı 27 MPa olarak bulunmuştur. Söz konusu numunelerin boyu 100 mm, iç çapı 72 mm, cidar kalınlığı 2,4 mm'dir. Tabaka sayısının fazlalığına dayanarak elde edilen sonuçların yüksek çıktığı gözlenmiştir. Aynı tabaka sayısı ve sarım açısına sahip bir başka çalışmada ise patlama hasar basıncı 28,2 MPa olarak ölçülmüştür (Kara, 2012).

Yukarıda verilen literatürden görüldüğü üzere, çalışmalarda kullanılan malzemelerin cinsi, bu malzemelerden yapılan boruların tabaka sayısı, tabaka sarım açısı, boru cidar kalınlığı, boru çapı ve uzunluğu, üretim şekli ve deneyin serbest uçlu olarak gerçekleştirilmesi vb. gibi etkenler hasar basıncı değerlerinin farklı çıkmasında etkilidir. Bu parametrelerdeki değişiklikler hasar basıncı değerlerinin farklılaşmasına sebebiyet vermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 4 tabaka cam elyafıdan oluşan ve $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip kompozit boru ile 2. ve 3. tabakaları aramid elyafı ile değiştirmek suretiyle oluşturulan kompozit boruların içsel basınç etkisi altındaki hasar davranışları incelenmiştir. 4 grupta yer alan toplamda 12 adet kompozit boru için ayrı ayrı içsel basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki gibidir;

1. C-C-C-C kodlu 4 tabaka cam elyaf ile oluşturulmuş kompozit borular için ortalama hasar basıncı 4,27 MPa olarak tespit edilmiştir.
2. C-A-C-C kodlu 3 tabaka cam elyaf ve 1 tabaka aramid elyafıdan oluşan kompozit borular için ortalama hasar basıncı 5,57 MPa olarak tespit edilmiştir.
3. C-C-A-C kodlu 3 tabaka cam elyaf ve 1 tabaka aramid elyafıdan oluşan kompozit borular için ortalama hasar basıncı 7,43 MPa olarak elde edilmiştir.
4. Son olarak C-A-A-C kodlu en içteki ve en dıştaki tabakaları cam elyaf, içteki tabakaları (2. ve 3. tabakalar) aramid elyafıdan oluşan kompozit borular için ortalama hasar basıncı değeri 9,07 MPa olarak belirlenmiştir.
5. C-C-C-C, C-A-C-C ve C-C-A-C numunelerinin hasar durumları incelendiğinde en düşük hasar basıncına sahip C-C-C-C numunelerinde boru yüzeyinde sızmalar meydana geldiği görülmüştür. C-A-C-C ve C-C-A-C numunelerine bakıldığında ise sızma ve boruya ait eksenel doğrultuda beyazlaşmalar gözlemlenmiştir.
6. C-A-A-C numuneleri incelendiğinde ise oluşan yüksek şiddette patlamaya bağlı olarak hasar durumunun boru çeperinde matris ayrılması ve elyaf kopması şeklinde meydana geldiği görülmüştür.

Ortalama hasar basıncı sonuçlarından da görüleceği üzere tabakalı kompozit borularda cam elyaf yerine aramid elyafın kullanılması, boruya ait hasar mukavemetini oldukça arttırmıştır. Aramid elyaf tabaka sayısının artmasıyla birlikte C-A-A-C numunesi hasar basıncı değerinin C-C-C-C numunesine göre %112,4 oranında arttığı tespit edilmiştir.

Tüm bu verilere bakılınca aramid elyaf ile oluşturulan kompozit malzemeler yüksek mukavemet gerektiren birçok alanda (Uçak sanayi, savunma sanayi, inşaat sektörü vb.) kendisine kullanım alanı bulabilecektir.

Deneylerde 2 farklı malzemedan oluşturulan kompozit boruların yerine farklı bir malzeme daha kullanılarak 3 ayrı malzemedan oluşan kompozit borular oluşturulabilir ve daha yüksek hasar basıncı değerleri elde edilebilir.



6. KAYNAKÇA

- Adali, S., Verijenko, Viktor E. (1997). Minimum cost design of hybrid composite cylinders with temperature dependent properties. *Composites Structures*, **38**, 623-630.
- Akgün M.B. (2015). *Kompozit Sargılı Borularda Patlama Basıncının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Anonim. (2019a). [http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.zor/composite%20 materials /2-](http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.zor/composite%20materials/2-) (on-line access on 28 May, 2019).
- Anonim. (2019b). [https://www.nkfu.com/cam-elyafi-nedir-ozellikleri-nelerdir /](https://www.nkfu.com/cam-elyafi-nedir-ozellikleri-nelerdir/) (on-line access on 28 May, 2019).
- Anonim. (2019c). http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/78375/3_1395/kompozit_malzemeler_ders_notu.pdf (on-line access on 28 May, 2019).
- Anonim. (2019d). <http://carbomid.com.tr/tr/aramid-%20elyaf-ozellikleri/> (on-line access on 28 May, 2019).
- Anonim. (2019e). [http://ansys.deu.edu.tr/wp-content/uploads/cmdm/621 /1450959921_EREN_VATANGUL_2002508078.pdf](http://ansys.deu.edu.tr/wp-content/uploads/cmdm/621/1450959921_EREN_VATANGUL_2002508078.pdf) (on-line access on 29 May, 2019).
- Anonim. (2019f). <https://aves.ktu.edu.tr/ImageOfByte.aspx?Resim=8&SSNO=35&USER=3906> (on-line access on 29 May, 2019).
- Anonim. (2019g). [http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas/kompozit/4_%20 Uretim %20 Yontemleri.pdf](http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas/kompozit/4_%20Uretim%20Yontemleri.pdf) (on-line access on 30 May, 2019).
- Arıcasoy O. (2006). *Kompozit Sektör Raporu*. [http://www.peksen.com.tr/ Uploads /Document /42c32601617a59c.pdf](http://www.peksen.com.tr/Uploads/Document/42c32601617a59c.pdf)(on-line access on 28 May, 2019).
- Arıkan H. (2007). *Filaman Sarım Kompozit Boruların Mix Moda Göre Statik İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı* (pp: 527-533).8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Bakaiyan, H., Hosseini, H., Ameri, E. (2009). Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under combined internal pressure and thermo mechanical loading with thermal variations. *Composites Structures*, **88**, 532-541.

- Bayraktar M. (2014). *Cam Elyaf Takviyeli (Fiber Glass Reinforced) Kompozit Boruların Dayanım Test Makinesi Tasarımı ve Fea Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Benyahia, H., Tarfaoui, M., El Moumen, A., Ouinas, D., Hassoon, O.H. (2018). Mechanical properties of offshoring polymer composite pipes at various temperatures. *Composites Part B*, **152**, 231-240.
- Casari, P., Jacquemin, F., Davies, P. (2006). Characterization of residual stresses in wound composite tubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **37**, 337-343.
- Cheng, J., Li, G. (2008). Stress analyses of a smart composite pipe joint integrated with piezoelectric composite layers under torsion loading. *Internal Journal of Solids and Structures*, **45**, 1153-1178.
- Das, R.R., Pradhan, B. (2010). Adhesion failure analyses of bonded tubular single lap joints in laminated fibre reinforced plastic composites. *Internal Journal of Adhesion and Adhesives*, **30**, 425-438.
- Demircan G. (2018). *Al₂O₃ Nanopartikül Katkılı Aramid Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik Özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.
- Demircioğlu G. (2006). *Kısa Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerde Elyaf Boyutunun Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Deniz, M. E., Özen, M., Özdemir, O., Karakuzu, R., İçten, B. M. (2013). Environmental effect on fatigue life of glass–epoxy composite pipes subjected to impact loading. *Composites Part B: Engineering*, **44**, 304-312.
- Dursun T. (2006). *Cıvata Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Ellyin, F., Martens, M. (2001). Biaxial fatigue behaviour of a multidirectional filament-wound glass-fiber/epoxy pipe. *Composites Science and Technology*, **61**, 491-502.

- Fitriah, S.N., Abdul Majid, M.S., Ridzuan, M.J.M., Daud, R., Gibson, A.G., Assaleh, T.A. (2017). Influence of hydrothermal ageing on the compressive behaviour of glass fibre/epoxy composite pipes. *Composites Structures*, **159**, 350-360.
- Gargiulo, C., Marchetti, M., Rizzo, A. (1996). Prediction of failure envelopes of composite tubes subjected to biaxial loadings. *Acta Astronautica*, **39**, 355-368.
- Gemi L. (2014). *Düşük Hızlı Darbe Hasarlı Filaman Sarım Hibrid Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışı*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Görücü Ü. (2011). *Elyaf Takviyeli Boğumla Kuvvetlendirilmiş Kompozit Boruların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Geometrik Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Huysmans, G., Verpoest, I., De Roeck, G. (1998). Structural analysis of GRP pipe couplers by using a fracture mechanical approach. *Composites Part B: Engineering*, **29**, 477-487.
- Imanaka, M., Nakayama, H., Morikawa, K., Nakamura, M. (1995). Evaluation of fatigue life of adhesively bonded CFRP pipe/steel rod joints. *Composites Structures*, **31**, 235-241.
- Kara, M., Uyaner, M. (2017). Filaman Sarım ile Üretilen CTP Kompozit Borularda Tabaka Sayısının Teğetsel Gerilme Dayanımına Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **21**, 666-672.
- Kara M. (2012). *Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama İle Tamir Edilmiş Filaman Sarım Ctp Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Kaya K.D., Kılınç S.S. (2008). *Kompozit Malzemelerin Kayma Testi İçin Aparat Tasarımı, İmalatı Ve Kayma Gerilmesi Analizi*. Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Kitching, R., Hose, D.R. (1995). Experimental and theoretical stress analysis of multi-mitred lined glass reinforced plastic pipe bends. *International Journal of Mechanical Sciences*, **37**, 97-119.

- Knox, E.M., Cowling, M.J., Hashim, S.A. (2000). Creep analysis of adhesively bonded connections in GRE pipes including the effect of defects. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **31**, 583-590.
- Koruvatan A. (2008). *Farklı Kür Sıcaklığı Ve Sürelerinde Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların Pimli/Civatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Kruijer, M.P., Warnet, L.L., Akkerman, R. (2006). Modelling of the viscoelastic behaviour of steel reinforced thermoplastic pipes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **37**, 356-367.
- Matemilola, S.A., Stronge, W.J. (1997). Impact response of composite cylinders. *International Journal of Solids and Structures*, **34**, 2669-2684.
- Önder A. (2007). *First Failure Pressure Of Composite Pressure Vessels*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Öztürk Ö. (2015). *Polüüre Matris Malzemesi ve Cam, Aramid, Karbon Elyaf Kumaş Takviyeleri Kullanılarak Üretilen Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- Parashar, A., Mertiny, P. (2012). Adhesively bonded composite tubular joints: Review. *Internal Journal of Adhesion and Adhesives*, **38**, 58-68.
- Peck, J. A., Jones, R. A., Pang, S.S., Li, G., Smith, B. H. (2007). UV-cured FRP joint thickness effect on coupled composite pipes. *Composites Structures*, **80**, 290-297.
- Rafiee, R., Elasmı, F. (2017). Theoretical modeling of fatigue phenomenon in composite pipes. *Composites Structures*, **161**, 256-263.
- Rohem, N.R.F., Pacheco, L.J., Budhe, S., Banea, M.D., Sampaio, E.M., de Barros, S., (2016). Development and qualification of a new polymeric matrix laminated composite for pipe repair. *Composites Structures*, **152**, 737-745.
- Sayman O. (1975). *Helisel Olarak Takviye Edilmiş Kompozit Malzeme Borularında Yükleme Biçimine Göre Takviye Malzemesinin Optimum Helis Açısı*. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.

- Sebaey, T.A. (2019). Design of Oil and Gas Composite Pipes for Energy Production. *Energy Procedia*, **162**, 146-155.
- Sözen, E., Gündüz, G., İmren, E. (2016). Balistik Panel ve Koruyucu Zırh Üretiminde Kullanılan Lif ve Kompozit Malzemeler. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 18(2): 194-204.
- Sülü, İ.Y. (2014). *İç Basınca Maruz Tabakalı Kompozit Boruların Farklı Birleştirme Yöntemleri ile Yapıştırılması ve Gerilme Analizi*. Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Şahin A. (2011). *Düşük Hızlı Darbe Görmüş Filaman Sarım E-Camı/Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışlarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Şekercioğlu, T., Meran, C. (2001). The effects of adherend on the strength of adhesively bonded cylindrical components. *Materials & Design*, **25**, 171-175.
- Taşyürek M. (2014). *Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız $\pm 55^\circ$ Filaman Sarım Cnt Takviyeli Ctp Kompozit Boruların Mekanik Özelliklerinin ve İç Basınç Etkisi Altındaki Yorulma Davranışının Araştırılması*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Toh, W., Tan, L.B., Tse, K.M., Giam, A., Raju, K., Lee, H.P., Tan, V.B.C. (2018). Material characterization of filament-wound composite pipes. *Composites Structures*, **206**, 474-483.
- Tzeng, J.T. (1998). Dynamic response and fracture of composite cylinders. *Composites Science and Technology*, **58**, 1443-1451.
- Uyaner, M., Güvensoy, S. (2011). Filaman Sarım Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Davranışının Simülasyonu. *Selçuk Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Derg.*, **26**, 1304-8708.
- Üstün, T., Eskizeybek, V., Avcı, A. (2016). Enhanced fatigue performances of hybrid nanoreinforced filament wound carbon/epoxy composite pipes. *Composites Structures*, **150**, 124-131.
- Vatangül, E. (2008). *Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Ansys 10 Programı ile Isıl Gerilme Analizi*, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

- Verijenko, V.E., Adali, S., Tabakov, P.Y. (2001). Stress distribution in continuously heterogeneous thick laminated pressure vessels. *Composite Structures*, **54**, 371-377.
- Yang, Q., J., Hayman, B. (2015). Prediction of post-buckling and ultimate compressive strength of composite plates by semi-analytical methods. *Engineering Structures*, **84**, 42-53.
- Zhao, J.H., Chen, X., Dharani, L.R., Ji, F.S. (2000). Stress analysis of a multilayered composite cylinder with defects. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **34**, 143-153.
- Wahab, M.A., Alam, M.S., Pang, S.S., Peck, J.A., Jones, R.A. (2007). Stress analysis of non-conventional composite pipes. *Composites Structures*, **79**, 125-132.
- Xia, M., Takayanagi, H., Kemmochi, K. (2001). Analysis of multilayered filament-wound composite pipes under internal pressure. *Composites Structures*, **53**, 483-491.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ömer Faruk ÇİÇEK

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya - 04.11.1988

Adres: İnönü Mh. İnönü Cd. No:186 A-Blok 6. Kat

E-Posta: omerfarukcicek.im@gmail.com

Lisans: Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim ve Ödüller: 2013 yılında Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2013 - 2015 yılları arasında Malatya'da özel yapı denetim firmalarında çalıştı. 2015 - 2017 yılları arasında kendi özel proje ofisini açmak suretiyle birçok üst yapı projesinin müellifliğini yaptı. 2017 yılından bu yana Malatya Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Hizmetleri Dairesi Başkanlığı'nda sözleşmeli mühendis olarak görev yapmaktadır. Autocad, Idecad, Vissim, Synchro, Cube Voyager gibi bazı hazır paket programlarını iyi seviyede kullanabilmekte olup, ileri derecede İngilizce bilmektedir.