



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

**YUVARLAMA SARMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN KARBON
FİBER BORULARDA FİBER YÖNÜNÜN DAYANIMA ETKİSİ**

AKİF KABAKÇI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ MERT KILINÇEL**

DÜZCE, 2021

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YUVARLAMA SARMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN KARBON
FİBER BORULARDA FİBER YÖNÜNÜN DAYANIMA ETKİSİ

Akif KABAKÇI tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Mert KILINÇEL

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Mert KILINÇEL

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Fikret POLAT

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Volkan Ramazan AKKAYA

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 07/01/2021

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

07 Ocak 2021

Akif KABAĞÇI

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mert KILINÇEL'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca her konuda katkılarını esirgemeyen değerli hocam Ar. Gör. Dr. Yakup Okan ALPAY'a de şükranlarımı sunarım.

Çalışmamıza prepreg malzeme desteği sağladıkları için KordSA firmasına teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2020.06.05.1137 ve BAP-2019.06.05.1025 numaralı Bilimsel Araştırma Projeleri ile desteklenmiştir.

07 Ocak 2021
Akif KABAĞCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER VE GELİŞİM SÜRECİ.....	6
2.1. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER	17
2.2. SERAMİK MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	18
2.3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	18
2.3.1. Termoset Malzemeler	19
2.3.1.1. Epoksi.....	19
2.3.1.2. Polyester	19
2.3.1.3. Fenolik Reçineler	20
2.3.1.4. Silikon	20
2.3.1.5. Poliimid Reçineler	20
2.3.2. Termoplastik Malzemeler	20
2.3.3. Elastomerler.....	21
2.4. TAKVİYE ELEMANLARI	21
2.4.1. Elyaf İçerikli Kompozit Malzemeler	22
2.4.1.1. Cam Elyaf	23
2.4.1.2. Karbon / Grafit Elyaf.....	25
2.4.1.3. Aramid Elyaf.....	25
2.4.1.4. Bor Elyafı.....	25
2.4.1.5. Silisyum Karbür Elyafı.....	25
2.4.2. Tanesel Yapı Takviyeli Kompozit Malzemeler	26
2.4.3. Tabakalı (katmanlı) Kompozit Malzemeler	27
2.4.3.1. Laminer Katmanlı Yapı.....	27
2.4.3.2. Sandviç Katmanlı Yapı.....	28
2.4.4. Karma Kompozit Malzemeler	28
2.5. AÇIK KALIPLAMA YÖNTEMLERİ.....	28
2.5.1. Elle Yatırma Yöntemi	28
2.5.2. Püskürtme Yöntemi	30
2.5.3. Elyaf Sarma Yöntemi.....	31
2.6. DİĞER İLAVE MALZEMELER.....	32
3. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	34
3.1. KAPALI KALIPLAMA KULLANILAN TEKNİKLER	34
3.1.1. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (RTM)	34
3.1.2. Profil Çekme (pultruzyon) Yöntemi.....	35
3.1.3. Reaksiyonlu Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi.....	37
3.1.3.1. Yapısal Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi (S-RIM).....	38

3.1.3.2. Takviye Reaksiyonlu Enjeksiyon Kalıplama (R-RIM).....	39
3.1.4. Pres Kalıplama Yöntemi.....	39
3.1.4.1. SMC (Sheet Moulding Compoud) Yöntemi	40
3.1.4.2. BMC (Bulk Moulding Compoud) Yöntemi	41
3.1.4.3. TMC Yöntemi	42
3.1.4.4. Takviyeli Termoplastik Levha Yöntemi (GMT)	43
3.1.5. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi	44
3.1.6. Santrifüj (Savurma) Kalıplama Yöntemi	45
3.1.7. Torbalama Yöntemi.....	45
3.1.7.1. Vakum Torbası.....	46
3.1.7.2. Otoklav Prosesi.....	46
3.1.8. Yuvarlanma ile Sarma (Roll Wrapping) Metodu	47
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	50
4.1. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANIŞI.....	50
4.2. DENEY NUMUNELERİNİN KÜRLEME İŞLEMİ.....	52
4.3. ÜÇ NOKTA EĞİLME DENEY DÜZENEGİ.....	53
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	55
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
7. KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	74

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Uçak kapısı.	11
Şekil 2.2. Uçak radar sistemi.	11
Şekil 2.3. Kompozit bölgelere sahip araç uygulaması.	12
Şekil 2.4. VEL 25 Kompozit karbon direk.	13
Şekil 2.5. Kompozit içerisine elyaf yerleşimi a) Tek yönlü sürekli elyaf b) Çift yönlü sürekli elyaf c) Dağınık süreksiz elyaf.	22
Şekil 2.6. Liflerin doku içerisine yerleşme şekillerine göre kompozit türleri.	23
Şekil 2.7. Cam elyaf üretiminin sistematığı.	24
Şekil 2.8. Tanesel yapı takviyeli kompozit.	26
Şekil 2.9. Tabakalı (katmanlı) kompozit malzemeler.	27
Şekil 2.10. Laminer kompozitler.	27
Şekil 2.11. Sandviç katmanlı yapı.	28
Şekil 2.12. El yatırması işlemi.	29
Şekil 2.13. Püskürtme metodu ile kompozit üretimi.	30
Şekil 2.14. Püskürtme tabancaları a) Hızlandırıcı karışımlı tabanca b) 2 hazneli tabanca.	31
Şekil 2.15. Elyaf sarma sistemi.	32
Şekil 3.1. RTM proses kalıbı.	35
Şekil 3.2. Pultrüzyon işlemi sistemi.	36
Şekil 3.3. Reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama yöntemi.	38
Şekil 3.4. SMC ile kompozit üretimi.	41
Şekil 3.5. BMC hamur imalatı.	42
Şekil 3.6. TMC hamur üretimi.	43
Şekil 3.7. GMT plaka imalatı.	43
Şekil 3.8. Enjeksiyon kalıplama sistemi.	44
Şekil 3.9. Santrifüj kalıplama.	45
Şekil 3.10. Vakum torbası katmanları.	46
Şekil 3.11. Sanayi tipi otoklav fırınları.	47
Şekil 3.12. Roll wrappig ile imal edilen boru örneği.	48
Şekil 4.1. Farklı fiber açısı oryantasyonlarında hazırlanan katman görselleri.	51
Şekil 4.2. Kalıp üzerine büzülme bandı uygulaması ve son ürün.	52
Şekil 4.3. Deney numuneleri görsel.	53
Şekil 4.4. Üç nokta eğilme test düzeneği.	54
Şekil 5.1. FLIR E6 temassız termal kamera görüntüleri.	55
Şekil 5.2. [45°/-45°/0°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	56
Şekil 5.3. [45°/-45°/15°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	56
Şekil 5.4. [45°/-45°/30°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	57
Şekil 5.5. [45°/-45°/45°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	57
Şekil 5.6. [45°/-45°/60°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	58
Şekil 5.7. [45°/-45°/75°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	58
Şekil 5.8. [45°/-45°/90°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	59
Şekil 5.9. [0°/90°/0°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	59
Şekil 5.10. [0°/90°/15°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	60
Şekil 5.11. [0°/90°/30°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	60
Şekil 5.12. [0°/90°/45°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	61
Şekil 5.13. [0°/90°/60°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	61

Şekil 5.14. $[0^\circ/90^\circ/75^\circ]$ s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	62
Şekil 5.15. $[0^\circ/90^\circ/90^\circ]$ s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.	62
Şekil 5.16. Bakır numunesi yük/deplasman grafiği.	63
Şekil 5.17. Alüminyum numunesi yük/deplasman grafiği.	63
Şekil 5.18. Çelik numunesi yük/deplasman grafiği.	64
Şekil 5.19. $[45^\circ/-45^\circ/x]$ s grubu numunelerin karşılaştırmalı yük/deplasman grafiği.	64
Şekil 5.20. $[0^\circ/90^\circ/x]$ s grubu numunelerin karşılaştırmalı yük/deplasman grafiği.	65



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Bazı termoplastiklere ait özellikler.....	21
Çizelge 3.1. Reçine içerisine katılan diğer dolgu malzemeleri ve özellikleri.....	37
Çizelge 4.1. Boru üretiminde kullanılan katman kombinasyonları.	51



KISALTMALAR

ABS	Akrilonitril bütadien stiren
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
BMC	Dökme kalıplama
C ₆ H ₅ OH	Karbolik asit
C ₆ H ₈ N ₂	Fenilendiamin
C ₈ H ₄ Cl ₂ O ₂	Tereftaloil klorür
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
CaSiO ₃	Wollostanit
CdS	Kadmiyum sülfür
CFRP	Karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme
CH ₂ O	Asetik asit
GFRP	Cam elyaf takviyeli kompozit malzeme
GMT	Takviyeli termoplastik levha kalıplama
MgO	Magnezyum oksit
MMK	Metal matrisli kompozit
Mo ₂ Si	Molibden disilisit
PAN	Poliakrilonitril
PBT	Polibütilen tereftalat
PC	Polikarbonat
PET	Poliyeten tereftalat
PLC	Programlanabilir lojik kontrolcüsü
PMK	Polimer matrisli kompozitler
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PVC	Polivinil klorür
RIM	Reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama
R-RIM	Takviye reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama
RTM	Reçine transfer kalıplama
SiC	Silisyum karbür
SMC	Levha kalıplama
S-RIM	Yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama
TiB ₂	Titanyum diborür
TMC	Kalın kalıplama
UD	Unidireciton
WC	Tungsten karbür
WSi ₂	Tungsten disilisit
ZnS	Çinko sülfür
ZrB ₂	Zirkon diborür
ZrC	Zirkonyum karbür
ZrO ₂	Zirkonyum dioksit

SİMGELER

°C	Santigrat derece
cm	Santimetre
cm ³	Santimetre küp
dk	Dakika
g	Gram
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
kW	Kilovat
m	Metre
mm	Milimetre
Mpa	Megapaskal
sn	Saniye
µm	Mikrometre
%	Yüzde değeri
~	Yaklaşık
°	Derece

ÖZET

YUVARLAMA SARMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN KARBON FİBER BORULARDA FİBER YÖNÜNÜN DAYANIMA ETKİSİ

Akif KABAĞÇI

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mert KILINÇEL

Ocak 2021, 71 sayfa

Günümüzde yüksek mukavemetli ve aynı zamanda hafif malzeme arayışı, endüstriyel birçok uygulamada performansı artırmak için üzerinde çalışılan son derece güncel ve yeni bir konudur. İşte bu yüzden kompozit malzemeler giderek önem kazanmaktadır. Kompozit malzemeler iki veya daha fazla bileşenin bir araya getirilmesi ile oluşturulan daha üstün özelliklerdeki malzemelerdir. Özellikle yüksek mukavemetli kompozit malzemeler olarak bilinen fiber takviyeli plastiklerin (FTP) ileri teknoloji gerektiren uygulamalarda kullanımı oldukça fazladır. Bu uygulamalardan bazıları denizcilik, havacılık, motor sporları, enerji ve savunma sanayi uygulamalarıdır. Ancak uzun üretim süreleri, yüksek üretim maliyetleri ve karmaşık geometri üretilen zorlukları gibi halen çözülmesi gereken bazı zorluklar bulunmaktadır. Halihazırda kullanılan filaman sarma, pultrüzyon çekme, kalıba yatırma gibi bazı yöntemler bulunmasına rağmen yüksek seviyede dayanımın elde edilebilmesi için en etkili yöntem yuvarlayarak sarma yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada karbon fiber kompozit boru üretimi için silindirik alüminyum boruların kalıp olarak kullanıldığı bir rezistanslı ısıtma fırını imal edilmiştir. Unidirectional (UD) olarak bilinen tek yönlü dokumalı karbon/epoksi prepreg malzemeler alüminyum kalıplara sarılmıştır. Ardından düzgün yüzey özelliklerini sağlamak ve son üründe oluşabilecek katman ayrılmalarını önlemek için yeterli basıncı sağlaması adına ısı bantları kullanılmıştır. Isıtma hızı, maksimum sıcaklık ve plato süresi gibi değerler üretici firmanın önerdiği değerlere göre seçilmiştir. Endüstrideki farklı potansiyel uygulama alanları göz önüne alınarak prepreg malzemelerin kalıplara serilmesi farklı açılar (0, 15, 30, 45, 60, 75 ve 90°) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Son ürünlerin mukavemetleri ise standart mekanik dayanım testleri uygulanarak belirlenmiştir. Test sonuçlarına göre grafiksel veriler oluşturulmuş ve tartışılmıştır. Sonuçlar fiber yönünün karbon fiber kompozit boru üretiminde son derece önemli olduğunu göstermiştir.

Anahtar sözcükler: Fırın, Isıtma, Karbon fiber boru, Kompozit Prepreg.

ABSTRACT

THE EFFECT OF FIBRE DIRECTION OF ON THE STRENGTH OF THE CARBON FIBRE PIPES MANUFACTURED VIA ROLL WRAPPING METHOD

Akif KABAĞÇI

Düzce University

Institute of Science, Mechanical Engineering Department

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mert KILINÇEL

January 2021, 71 pages

Searching of high strength and lightweight materials are hot topic for enhancing the performance of the industrial applications. This is why the composite materials are getting more attention. Composite materials are obtaining from two or more materials and they contain the superior properties of these materials. Especially fibre reinforcement plastics (FRP) which are known as high strength composite materials are used in a considerable amount of high-tech applications. Some of these applications can be listed as marine, aviation, motorsports, energy and defence industry applications. However, there are still some challenges needs to be handled such as long production times, high production costs and difficulties for complex geometries. Although there are several production methods are existing for these geometries like filament winding, pultrusion and lay up in a mold, the roll wrapping method is the most efficient method for enhancing highest strength for the materials. For this reason, a resistance heater assisted oven is manufactured and cylindrical pipe aluminium materials used as mold to manufacture carbon fibre composite pipes in the present study. Unidirectional carbon/epoxy prepreg materials were roll wrapped to these aluminium mold. Shrink tapes are used to enhance the surface smoothness and required pressure for prevent delaminating of the product during the process. Heating rates, the maximum temperature value and the dwelling time values were chosen according to the manufacturer's recommendations. Prepregs are roll wrapped to the mold at the determined angles (0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90°) according to the different potential usages areas in the industry. The strength of the products is measured with standard mechanical tests. According to the test results the graphical data are created and discussed. The results indicated that the fibre orientation is crucial for the strength of the carbon fibre composite pipe material.

Keywords: Composite, Energy transfer, Fibre orientation, Roll wrapping, Uniform temperature.

1. GİRİŞ

Farklı türden malzemelerin kimyasal bir birleşim oluşturmadan fiziksel olarak bir araya getirilmeleriyle oluşan yeni yapıya kompozit malzeme adı verilmektedir [1]. Kompozit yapılar takviye fazı ve daha akışkan bir yapıya sahip olan matris fazdan oluşmaktadır. Takviye fazı kırılma dayanımı ve mukavemet, matris fazı da imalat esnasında oluşabilecek çatlakların malzeme içerisine yayılmasını engellemek ve kopma direnci sağlamak gibi amaçlar ile kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin en önemli özelliği imalat esnasında kullanılan bileşenlerin tek başına karşılayamadığı özellik beklentilerini, bu bileşenlerin birleşmesi ile sorunsuz olarak karşılayabilmesidir.

Kompozit malzemeler, 1930'lu yıllarda ilk cam elyafın keşfedilmesi, 1936 yılında, kompozitlerin uçak sanayinde kullanılması, 1947'de kompozit kasaya sahip otomobillerin üretilmesi, 1960'ta elyaf sarma metodu ile küçük kapasiteli ilk roket motoru üretilmesi gibi dünyadaki kullanımı oldukça hızla yaygınlaşan malzemelerdir [2].

Kompozit yapılar takviye fazı, daha akışkan bir yapıya sahip olan matris fazı ve bağ yapıdan oluşmaktadır [3]. Malzemeye tatbik edilen yükün büyük oranda karşılandığı takviye fazı, yeni kompozit yapıya kırılma dayanımı, mukavemet, sertlik ve sıcaklık direnci gibi özellikler kazandırmaktadır. Temel bileşenlerden matris faz ise elyafları çevreleyerek yüzeylerini dış etkenlerden korumakta ve aynı zamanda takviye elemanlarının dağılmasını engelleyerek uygulanan gerilmenin malzeme içerisine homojen dağılmasını sağlamaktadır. Bu faydalarının yanında matris faz takviye elemanlarının birbirleriyle olan temasını azaltarak malzeme içerisinde çatlak oluşumunu ve ilerlemesini engellemekte, bu şekilde malzemenin ani kırılmasının önüne geçilmiş olmaktadır [4],[5],[6].

Kompozit malzemeler yapılarındaki matris fazın türüne göre polimer, seramik ve metal matrisli kompozitler olmak üzere 3'e ayrılmaktadır. Düşük maliyetlerle kolay olarak üretilbilme, yüksek korozyon ve kırılma dayanımı gibi özellikleri ile polimer matrisli kompozit malzemeler (PMK) en yaygın kullanılan kompozit türüdür. Termoset ve termoplastik olarak ikiye ayrılan PMK'larda takviye malzemesi olarak cam, kevlar, bor

ve karbon fiberler kullanılmaktadır. Daha çok sürekli fiber ile desteklenmiş olarak kullanılan PMK'larda hafiflik, korozif ve kimyasal ortamlara karşı yüksek direnç, düşük yoğunluk özellikleri dolayısı ile termoset grubunda yer alan polyester ya da epoksi reçineler matris olarak tercih edilmektedir.

İmalatta kullanılan elyafların bireysel basma ve kesme dayanımlarının yüksek olması, üretilen kompozit yapının da o derece güçlü mekanik özellikler taşıması anlamına gelmektedir [7]. Bu nedenle iyi mekanik özellikler gösteren cam ve karbon elyafların kullanıldığı cam elyaf takviyeli (GFRP) ve karbon elyaf takviyeli (CFRP) kompozit malzemeler en çok kullanılan PMK malzemelerdendir.

Kompozit yapı malzemelerin kullanım noktaları; otomotiv, askeri donanım imalatı, sağlık sektörü, inşaat, deniz ve hava araçları imalatı, akışkan ve gaz nakil borularından altyapı malzemelerine kadar pek çok değişik alanın da bulunduğu geniş bir alana sahiptir. Bu endüstrinin içinde yer alan PMK boru imalatı, Türkiye'de kompozit imalat alanları grafiğinde oldukça büyük bir paya sahip olmakla birlikte boru imalat sektöründe de hatırı sayılır oranda yenilikçi ve yüksek rekabet gücüne sahip bir noktaya ulaşmıştır [8]. Pek çok firma tarafından farklı ölçeklerde imalat yapılan PMK boru sektöründe rekabette odak noktası, geleneksel boru malzemeleri ile değil kendi içerisinde daha kaliteli daha fazla iyi özelliğe sahip ve aynı zamanda maliyeti düşük ürün imalatı üzerinde odaklanmaktadır.

Sadece akışkan iletim hatlarında değil, geleneksel betonarme yapıların 50 yıl sağlıklı kullanım ömrü sundukları dikkate alındığında bu yapılarda kullanılacak borulama sistemlerinin de en az 50 yıl kullanımda kalmaları gerekliliği yeterli bir tasarım kriteri olarak görülmektedir [9]. Aynı zamanda iç basınç ve dayanım değerleri yüksek olan kompozit boruların, birim uzunluk için ağırlıklarının oldukça düşük olması kurulum ve imalat alanına nakil bedelleri oldukça düşüktür [10].

Aktif kullanım ömrünün yüksek olması, kurulum sonrası hizmetlerin düşük maliyetli ve kolay olması, her alanda korozyon dayanımının sağlanması, düşük ağırlık, yüksek korozyon, yorulma direnci vb. pek çok avantajları ile CFRP ve GFRP borular geleneksel çelik alternatiflerine göre daha çok tercih edilmektedir [11],[12]. Bu malzemeler ile üretilen borular özellikle yelken direği, kürek yapımı ve olta yapımı gibi denizcilik uygulamalarında alüminyum alternatiflerine kıyasla %50 daha hafif olarak imal edilebilmekte ve buna bağlı olarak kullanıcılara daha az bakım maliyeti ile daha

uzun süreler kullanım ömrü sunmaktadır [13].

Kompozit yapılı borular çoğunlukla içten dışa doğru; astar, prepreg yapı, dış film olmak üzere üç temel katmandan oluşmaktadır. Astar işlem sonrası ayrılmayı kolaylaştırmak için kullanılan kalıp ayırıcı olarak kullanılmaktadır. Açık uçlu kompozit boruların iç kısımlarına yüksek basınç etki ettiğinde boruda çevresel ve eksenel yönde gerilmeler oluşmaktadır. Ancak bu gerilmeler iç basınç kaynaklı olduğunda hesaplamalarda eksenel doğrultudaki gerilme değerleri "0" kabul edilmektedir [14]. İmalat esnasında kompozit boru üzerinde çevresel ve eksenel gerilmeler dışında pek çok farklı türde gerilme gözlenebilmektedir. Tüm bu gerilmelerin ve kompozit yapıda bunlara bağlı oluşabilecek süreksizliklerin hesaplamaları dış film yok kabul edilerek gerçekleştirilmelidir [15].

Tüm bu avantajları bilim insanlarını CFRP boru imalatı üzerinde araştırma yapmaya yönlendirmiş ve bu alanda çok sayıda çalışma yapılmış ve yapılmaktadır. Bu çalışmalara ait bazı örnekler şöyle sıralanabilir;

Kakogiannis ve arkadaşları, uzunluğu 100 mm, kalınlığı 2 mm olan 23 - 30 mm çaplarında, E-camı kullanılmış, polimer matrisli dört farklı türde PMK boru üretmiş ve bu boruların eksenel darbelerle karşı dayanımlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada kompozit boruların çaplarındaki artışın enerji sönümleme değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir [16].

Ghazijahani ve arkadaşları, uzunluğu 300 mm, kalınlığı 1.6 mm ve 76.2 mm çapında CFRP borular üretmiş ve numunelerin içlerini tamamen ve artı şeklinde kereste ile doldurarak eksenel basma kuvvetlerine karşı dayanımlarını incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda iç kısmı dolu olarak kullanılması gereken kompozit boruların dolumunda artı şeklindeki dolumun daha mukavim bir yapı oluşturduğunu tespit etmişlerdir [17].

Sayman, farklı kalınlıklarda PMK boruların hidrotermal kuvvetlerin etkisi altında üzerlerinde oluşan gerilmelerin tespitinde yeni bir metod oluşturmuştur. Kompozit katmanlar $[0^{\circ}/90^{\circ}]$, $[30^{\circ}/-30^{\circ}]$, $[45^{\circ}/-45^{\circ}]$ ve $[60^{\circ}/-60^{\circ}]$ elyaf yönelimlerinde seçilmiştir [18].

Kalaycıoğlu ve arkadaşları, $[90^{\circ}, \pm 55^{\circ}, 90^{\circ}]$ simetrik ve $[\pm 55^{\circ}, 90^{\circ}, 90^{\circ}]$ asimetrik yapıya sahip 650 mm uzunluğunda, 65 mm çapında ve 1,7 mm kalınlığında; CFRP borular üretmiş ve patlama dirençlerini değerlendirmişlerdir [19].

Sebaey, $[\pm 45^{\circ}/\pm 45^{\circ}/\pm 45^{\circ}]$, $[\pm 55^{\circ}/\pm 55^{\circ}/\pm 55^{\circ}]$, $[\pm 63^{\circ}/\pm 63^{\circ}/\pm 63^{\circ}]$, $[\pm 63^{\circ}/\pm 55^{\circ}/\pm 45^{\circ}]$ elyaf yönelimine

sahip CFRP borular üretmiş, iç basınç ve düşük hızda darbe yüklemesi altında performans testlerini yapmışlardır. İç basınç altında $[\pm 55/\pm 55/\pm 55]$ yönelimli boruda, darbe yükü altında ise $[\pm 63/\pm 55/\pm 45]$ yönelimli boruda yüksek performans değerleri tespit etmişlerdir [20].

İleri Mühendislik Ürünleri olarak tanımlanan kompozit borular temelde, pultruzyon, elyaf sarma ve yuvarlama ile sarma olmak üzere 3 farklı imalat metodu kullanılarak üretilmektedir [21],[22].

Pultruzyon imalatı bu metodlar arasında en yaygın kullanıma sahiptir. Ancak bu yöntemde tek yönlü yerleştirilen takviye elemanlarının bulunması ve daldırma işleminden kaynaklı reçine yoğunluğunun daha fazla olmasına bağlı ağırlık artışı gözlenmektedir [21]. Yapı içerisinde takviye malzemesinin tek yönde olması, bu doğrultuda yüksek mukavemet sağlamakta ancak basma ve burulma altında düşük performansa sahip ürünler ortaya çıkmaktadır [23]. Diğer iki yöntemle karşılaştırıldığında otomasyon da uygulanabilen ve çok daha düşük maliyetli ürünler kısa sürelerde bu yöntemle imal edilebilmektedir.

Elyaf sarma işleminde ise sürekli elyaflar yine reçine banyolarından geçirilerek dönen mandreller üzerine istenilen açılarda sarılır ve sertleştirilir. Bu yöntemde tek yönlü bir elyaf yerleşimi olmadığından talep edilmesi halinde, çekmeye olduğu kadar eğilme burulmaya da dirençli malzemeler üretilmektedir. Ancak tek bir örgü tipinde sarım yapılabildiğinden içyapıda farklı sarım teknikleri aynı anda kullanılamamaktadır. Yüksek oranda otomasyon ile yapılan elyaf sarma işleminde kısa zamanlarda oldukça büyük boyutlu boru imalatları gerçekleştirilebilmektedir.

Yuvarlanma ile sarma prosesinde, prepreg levhalar elle ve otomasyon sistemleri kullanılarak mandreller üzerine sarılmakta ve kurutulmaktadır. Bu yöntemde farklı elyaf dizilimine sahip çok sayıda hazır prepreg levha farklı konfigürasyonlar kullanılarak imalat esnasında bir araya getirilebilmektedir. Yuvarlanma ile sarma işlemi bu özelliği ile farklı doğrultularda oldukça iyi mekanik özelliklere sahip ürün imalatının önünü açmaktadır. Pultruzyon ve elyaf sarma işlemleri ile karşılaştırıldığında çok daha ekonomik, küçük boyutlu parçaların imalatında otomasyon gerektirmeyen ve imalatta özelleşmeye büyük oranda uyum gösteren bir yapıya sahiptir.

Bu çalışmada, yapılan değerlendirmeler ışığında pultruzyon ve elyaf çekmeye oranla boru imalatına daha uygun olarak kabul edilen rulo sarma işlemi kullanılarak,

uygulamalarda taşıyacağı yüke, maruz kalacağı kuvvetlere ve burulma yüklerine göre arzu edilen dayanımın sağlanabileceği boru profillerin üretimi hedeflenmektedir.



2. KOMPOZİT MALZEMELER VE GELİŞİM SÜRECİ

Kompozitler; çok sayıda aynı veya farklı gruplardaki malzemelerin atomsal bir alışveriş olmadan makro düzeyde bir araya getirilerek, bileşenlerin sahip olduğu üstün özelliklere aynı anda sahip olan termoset veya termoplastik yapıda polimer matrislerdir. Başka bir deyişle, farklı yapıların birleşiminden oluşan, birbirlerinin zayıf yönünü onararak üstün özelliklere sahip yeni ürünlere kompozit malzeme adı verilir [24].

Bu malzemelerde, malzemenin mukavemetini, yük taşıma kabiliyeti ve tokluğunu artırmak, yüksek sıcaklıkta çalışma özelliklerini iyileştirmek amacı ile cam elyafı vb. takviye elemanları kullanılmaktadır. Deformasyon sırasında oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önlemek ve malzemede oluşabilecek kopma ya da kırılmaların geciktirilmesini sağlamak için kullanılan bileşimin hacimsel olarak büyük kısmını oluşturan ise ana malzeme (matrix) kullanılmaktadır. Ana malzemenin bir amacı da takviye elemanı olarak kullanılan malzemeler üzerinde yükü homojen dağıtarak yük altında bu malzemeleri bir arada tutabilmektir.

Kompozit bir parça tasarlanırken; imalat yöntemi, maliyet, parçanın çalışacağı çevre koşulları, uygulanacak kalite kontrol metotları gibi pek çok etken aynı anda değerlendirilmelidir. Kompozit malzemeler her nokta ve doğrultuda aynı özelliği göstermediğinden, tasarım parametrelerinin tespitinin, dayanım gereksinimleri ve bölgeleri göz önünde bulundurularak yapılması gerekmektedir.

Kompozit ürünlerden talep edilen temel nitelikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Farklı bileşimlerdeki birden fazla sayıda maddenin tek yapıda toplanmış olması,
- Malzeme birleşimlerinin 3D olması gerekliliği,
- Son ürünün bileşenlerden daha üstün donanıma sahip olması gerekliliği.

Buna göre malzeme, mikroskobik açıdan heterojen özellikte olsa da, makroskobik açıdan homojen bir yapıda olmaktadır.

Kompozit malzemelerin içyapılarının gözle ayırt edilememesine karşın laboratuvar incelemeleri ile doğrudan tespit edilebilen özellikleri, gelişim süreçlerinin

değerlendirmesini oldukça kolaylaştırmakta ve doğru sonuçlara varılabilmektedir. Kompozitlere dair gelişim süreç basamakları aşağıdaki gibidir:

- 20. yy'ın başlarında çamur ve kil içerisine bitki veya hayvan kaynaklı iplikli yapıların (saman vb.) eklenmesi ile dış ortama daha dayanıklı yunan tarzı çömlekler, kerpiç evler, Moğolların kullandığı hayvansal ürün takviyeli çok daha esnek yapılı yaylar gibi pek çok alanda kullanılmıştır,
- 1930'lu yıllarda Amerika'da ilk cam elyafın keşfedilmesi ve camın eritilmesi ile üretilen bu ürünün yalıtım amaçlı kullanılmıştır. Yine 1930'lu yıllarda sentetik yapılı plastiklerin keşfi ile plastik malzemelerin tekrar tekrar kullanılabilmesi, estetik görünüşleri, düşük ağırlık ve aşınma dayanımları sayesinde kullanımları yaygınlaşmış ancak kırılma ve kopma dirençlerinin düşük olması plastikler üzerinde yapılan çalışmaları artırmış. Yapılan araştırmalar cam elyaflar ile plastikleri bir arada kullanma denemelerini başlatmıştır,
- 1936 yılında, patenti doymamış polyester reçineler uçak sanayinde kullanılmaya başlanmıştır,
- 1938 yılında epoksi keşfedilmiştir,
- 1998 yılından sonra tekne ve daha birçok deniz aracı üretiminde cam elyaflar kullanılmıştır,
- II. Dünya Savaşı ile birlikte başlayan uçak üretim zorunluluğu ile 1950 yılında elyaf sarma, pultrüzyon, vakum kalıplama ve elle yatırma yöntemleri kullanılarak malzeme imalatına başlanmıştır. Yine bu dönemde yalıtım amaçlı kullanılan sandviç yapılar ve prepreg imalat ve kullanımlarına başlanmıştır,
- 1947'de kasası tam anlamı ile kompozit olan otomobil üretilmiştir,
- 1953'te "Chevrolet Corvette" marka araç üretilmiştir,
- 1960'ta elyaf sarma metodu ile küçük kapasiteli ilk roket motoru üretilmiştir,
- 1965'de bor esaslı elyafalar üretilmiştir,
- 1971'de aramid elyaflar üretilmiştir.

Günümüzde ise Çin başta olmak üzere Amerika, Japonya, Almanya, Fransa ve İtalya gibi pek çok ülkede ev aletlerinden uçak ve uzay araçlarına kadar farklı boyut ve özelliklerde pek çok ürün imalatı seri olarak üretilebilmektedir.

Kompozit malzemelerin tercih edilmesinde öncülük eden bazı özellikler aşağıdaki gibi temellendirilebilir [25],[26]:

Kompozit malzemeler, çekme - eğilme dayanımları incelendiğinde çelikler ve imalatta sık tercih edilen malzemeler arasında ön plana çıkmaktadır. Farklı içyapılarda tasarlanabilme özellikleri sayesinde talep edilen yön ve bölgede özel mukavemet değerleri elde edilebilmektedir. Böylece bir uygulamadaki özel tasarım beklentilerine uygun mukavemet değerleri sağlanabildiği gibi daha az malzeme kullanılarak uygun fiyatlı ve düşük ağırlığa sahip ürünler elde edilebilmektedir [27].

Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu, hem klasik plastiklere hem de metallere göre daha düşük ağırlık değerlerinde daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmasını mümkün kılmaktadır. Hafiflik ve yüksek mukavemet özellikleri sayesinde endüstriyel pek çok alanda aktif kullanımda tercih edilmektedir.

Kompozit malzemeler aşağıdaki özelliklerinden dolayı endüstriyel pek çok uygulamada tercih sebebi olmaktadır.

Tasarım Esnekliği:

Kompozit malzemeler oluşturulurken farklı malzemeler makro düzeyde bir araya getirilmektedir. Buna bağlı olarak tasarımcı istediği boyutlarda ve bölgesel olarak mukavemet, sağlamlık, yorulma dayanımı, ısıl genleşme - elektrik iletim sabitleri gibi özel değerlere sahip yeni malzemeler elde edebilmektedir.

Elektriksel Özellikler:

Üretilen kompozit ürünlerde, tasarımcıların doğru malzeme seçimi yapmasına paralel olarak istenilen elektrik bazlı özellikler karşılanabilmektedir. Bunun yanında imalat esnasında doğru katkı malzemesi ve takviye maddelerinin kullanımı ile kompozit malzemelerde iyi elektrik iletkenliğinin dışında iyi yalıtkanlık değerleride elde edilebilmektedir [28].

Korozyon Dayanımı:

Korozyon dayanımı konusunda termoset polimer kompozit malzemeler öne çıksa da tüm kompozit malzemeler aşınmaz ve paslanmaz, hava – korozyif ve kimyasal ortam ve koşullardan etkilenmez, az bakım işçiliği ile oldukça uzun kullanım ömründe çalışabilmektedirler.

Kalıplama Kolaylığı:

Kompozit malzeme üretiminde tercih edilen kalıplama yöntemi ne olursa olsun seçilecek araç ve gereçlerin maliyetinin düşük olması ve birleştirme işlemini tek

parçada kalıplama olanağı ile daha kolay hale getirmesi, aktif uygulamalarda yaygın kullanıma sahip metal ve metal alaşımlı diğer malzemelere kıyasla kalıplama kolaylığı sağlamaktadır.

Şeffaflık:

Kompozit malzemeler, oldukça geçirgen bir yapıya sahiptir. Bu özellikleri dolayısı ile ışık ışınlarını yansıtabilir, sera ve güneş kolektörü yapımı gibi difüze ışığın önem kazandığı uygulamalarda önemli avantajlar sağlayabilirler.

Yüzey Uygulamaları:

Kompozit uygulamalarının çoğunda renk, kalıplama sırasında reçineye ilave edilen özel pigment katkıları sayesinde ek bir masraf ve işçilik gerektirmeden ürüne kazandırılmaktadır. Bu şekilde kendinden renkli ve uzun süre bakım gerektirmeden kullanılabilen ürünler elde edilebilmektedir.

Yanmazlık:

Kompozitlerin yanma direnci, kullanılan reçinenin yapısı ile ilişkili olduğundan, yanma direnci talep edilen malzemelerde buna özel reçine ve katkı malzemeleri kullanılmalıdır.

Sıcaklık:

Isıya karşı direnç kullanılan polyester reçinenin cinsine bağlıdır. Kompozit malzemeler, polyester reçine kullanılarak imal edildiğinde yumuşamaz ve şekil değiştirmezler. Talep edilen özellikler doğrultusunda kompozit içeriğine eklenecek katkı malzemeleri ile yüksek sıcaklık değerlerinde çalışacak ürünler imal edilebilmektedir.

Kolay İmalat- Seri Üretim:

Kompozit malzemeler imalat kolaylığı sağlaması, emek yoğun olmayan proses uygulamalarının bulunması ve bu özelliklere bağlı oluşan imalat maliyetinin az olması gibi özellikleri dolayısı ile tercih sebebi olmaktadır.

Yüksek Kimyasal Direnç:

Özellikle termoset polimer kompozit malzemeler olmak üzere birçok kompozit türü hava etkilerinden, korozyondan ve asitler, alkaliler, çözücüler gibi pek çok kimyasaldan etkilenmezler. Bu özellikler sayesinde kimyasallarla çalışılan pek çok alanda ve deniz taşıtları imalatında kullanılmaktadırlar.

Hava Koşulları:

Kompozit malzemelerin aşınma dayanımı, titreşim sönümlenme özellikleri sayesinde değişken hava şartlarına uyumlu çalışabilmektedirler.

Düşük Araç-Gereç Maliyeti:

Polimer kompozit üretiminde tercih edilen kalıplama yöntemi ne olursa olsun imalatta kullanılan ekipman ve tezgah maliyeti, metal ve alaşımlarından imal edilen diğer malzemelere kıyasla çok daha düşüktür. Ayrıca farklı boyutlarda üretim yapılabilmesi, her özelliğe uygun üretim metotlarının bulunması, farklı malzemelerle birlikte çalışabilmeleri, imalat sırasında boya uygulaması yapılabilmesi vb. çok sayıda pozitif özelliği bünyesinde bulundurabilmektedir [28],[29].

Kompozitler, uçak imalatı ve uzay uygulama sahasında zamanla daha fazla tercih edilmeye başlamıştır. Özellikle uçak imalatlarında tam gövde imalatından iç ekipmanlara, sıcaklık basınç direnci ekipmanlarına kadar pek çok elemanın imalatında kompozitler kullanılmaktadır. Uçak imalatlarında takviye olarak daha çok sürekli elyaf tercih edilmektedir. Uçuş ekipmanlarında alüminyum esaslı malzemeler yerine tercih edilmeye başlanan kompozitler, hafifliklerinin yanında iyi mukavemet özelliklerine de sahiptirler [29]. Son yıllarda, ileri kompozit malzemeler ve hafif yapısal teknolojiler, gövde ağırlığını azaltmak için kilit teknolojiler haline gelmiştir.

20. yy'ın ortalarında sanayi uygulamalarında kullanılmaya başlanan kompozitler ilk olarak elyaf takviyesi ile radar uygulamalarında kullanılmıştır [30]. Bu yy'ın son yarısında İngiltere ve Amerika tarafından carbon ve bor esaslı elyafın keşfedilmesi uçuş sektöründe kompozit kullanımını daha da ön plana taşımıştır. Her iki elyaf türü de yakın zamanda keşfedilmesine rağmen maliyet kısıtları dolayısıyla karbon elyaf kullanımı çok daha fazla kullanım alanı bulmuştur [30].

Günümüzde pek çok uçuş ekipmanı imalatında kompozit malzemeler kullanılmaktadır. A-310, A-300, A-600 gibi pek çok Air-bus uçakta kompozitler kullanılırken; A-310 ve A-300 imalatlarında çok daha yağın kullanılmaktadırlar [31]. Bu ve buna benzer pek çok uçak ekipmanı kompozitten üretilmesi ile neredeyse yüzde 15'lik bir hafiflik ve buna bağlı yakıt tüketimi değerleri gözlenmeye başlanmıştır [31]. Şekil 2.1, Şekil 2.2, Şekil 2.3, Şekil 2.4'te kompozit parça kullanım alanları gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Uçak kapısı [32].



Şekil 2.2. Uçak radar sistemi [33].

Bina yalıtımları, kısmi zamanlı kullanılan konaklama alanları, güneş koruyucuları, ısıya dayanıklı olması gerek mahaller, iklimlendirme uygulamaları, C-25 kalıplamaları, seracılık alanları, inşaat ve köprü uygulamaları, çarpma dirençli korkuluklar ve reflekte tabelalar gibi pek çok alanda kompozit uygulamaları yapılmaktadır. Bu alanlarda kompozit uygulamaları yapılması ile hafif ve düşük maliyetli imalatlar gerçekleştirilebilmektedir. Yapı sektöründe en çok karşılaşılan problem izolasyon problemidir, kompozit uygulamalar ile bu problem çözülmekte ve bakım giderleri azaltılmaktadır. Uygulama alanları aşağıda belirtildiği gibidir.

Çevreyi koruma tedbirlerinin ön plana alındığı günümüzde araçların karbon salınımlarını azaltmak otomotiv sektörünün önceliği haline gelmiştir. Bir otomobilde

sağlanan 118 kg ağırlık azalması ile seyir şartlarına göre % 16-36 yakıt tasarrufu sağlandığı gözlenmiştir [34]. Buna bağlı olarak herhangi bir otomobilden sağlanacak her 1 kg. tasarruf karbondioksit emisyonunu azaltacaktır. Araçların ağırlığını hafifletmek, maliyeti düşürmek ve yakıt tasarrufu için kompozit malzeme kullanımını arttırmak birçok firmanın stratejik planı haline gelmiştir [35].



Şekil 2.3. Kompozit bölgelere sahip araç uygulaması [36].

Kompozit malzemeler otomotiv sektörünün aşağıda belirtilen farklı türde ve çok sayıda ürün özellik talebini karşılayabildiğinden bu alanda oldukça fazla tercih edilmektedir,

- Fiyat/performans oranı,
- Seri imalata uyum,
- Hafiflik,
- Tasarım esnekliği,
- Yüksek kalitede yüzeyler elde edilebilmesi,
- Her bölgede ısı direnci.

1940'larda kompozit malzemeler, Amerika Birleşik Devletleri donanmasında ilk olarak gemi yapımında kullanılmıştır. Kompozitler havacılık ve ulaştırma sektörlerinin yanında küçük kapasiteli deniz ulaşım aracı olan “kano” imalatında da kullanılmaktadır. Kano üretiminde epoksi reçineler ile birlikte kevlar ya da karbon elyaflar daha fazla kullanım alanı oluşturmaktadır. Epoksinin tercih nedenleri arasında hafiflik, düşük

maliyet ve suyla birlikte kullanıma mükemmel uyum sağlaması gibi özellikler sayılabilir. Kevlar – karbon elyaf kullanımı ise iyi mukavemet değerlerine ulaşma çabasını karşılamak için daha fazla tercih edilmektedirler. Bu sayede imal edilen kanolar kullanıcıya çok daha rahat kullanım olanağı sunmaktadır. Kompozit malzemenin kullanımına ait bazı örnek uygulamalar [37].

- Yelken direkleri,
- Yat ve tekne ekipmanları,
- Gemi basamakları,



Şekil 2.4. VEL 25 Kompozit karbon direk [38].

Fosil yakıtların ve özellikle petrol kaynaklarının azalması ile başlayan enerji sorunları, yenilenebilir ve temiz enerji kaynakları üzerine araştırma yapmayı zorunlu kılmıştır. Yenilenebilir enerji kapsamında; güneş enerjisi, jeotermal enerji, hidrojen enerjisi, biokütle enerjisi, hidro elektrik enerjisi, dalga enerjisi ve rüzgâr enerjisinden bahsetmek mümkündür. Dünyada temiz enerjinin öneminin artmasına paralel olarak kompozit malzeme kullanımdaki artış dikkat çekmektedir. Kompozit üretim oranları tüm dünyada yüzde 7 artmış ve 3,6 milyar euro satış yapılmıştır [39].

Rüzgâr enerjisinin temel elemanları türbin kanatları ve enerji sağlayacak motor kısmıdır. Rüzgâr türbin kanatları yüksek mekanik mukavemete sahip kompozitten

oluşmakta ve ana malzeme olarak çevre etkilerinden en az etkilenen epoksi reçine kullanılmaktadır.

Bugün türbin kanat boyu l için ; < 40 m, 40 m $< l < 60$ m ve > 60 m olarak 3 farklı bölümde değerlendirilmektedir. Kanat imalatında kullanılan malzeme ve imalat yöntemi tercihinde kanat boyu oldukça kritik bir parametre olarak üreticilerin karşısına çıkmaktadır. Kanat imalatında malzeme maliyetlerin düşürülmesi talebi karbon elyaflar yerine cam elyaf kullanımının önünü açmaktadır. Fakat talep edilen kapasite değerlerinin giderek yükselmesi ve bunun karşılanabilmesi için kanat boylarının 65 m'ye varan değerlere getirilmesi çalışmaları, daha dayanıklı bir yapıya sahip karbon elyafı üzerinde tekrar toplamıştır. Takviye malzemesi olarak ise daha fazla hazır prepregler tercih edilmektedir.

Yapılan yeni araştırmalar ile genel türbin verimini etkileyen en önemli parametreler arasında kanat tasarımları ilk sıralarda yer almaktadır. Yine yapılan çalışmalar ile kanat imalatında performans değerlerinin artırılması ve maliyetin azaltılması gibi pek çok etken dolayısı ile kompozit kullanımı uygun görülmektedir [40].

İş ekipmanı kullanımındaki temel prensip yüksek darbe dayanımı ve kırılmaya karşı direnç esaslarının sağlanmasıdır. Kompozit malzemeler geleneksel imalat malzemeleri ile karşılaştırıldığında talep edilen bu üstün özelliklerin elde edilmesinde çok daha aktif rol oynamaktadır. Bugün, atık ürün depoları, dönüşüm kutuları, iş güvenliği malzemeleri, taşıma palet ve ekipmanları, taşıyıcı profiller, araç kasa ve kapakları, iş makinesi kabinleri gibi pek çok alanda kompozit malzeme kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu yöntemin seçilmesi ile imalat esnasında çoklu donanın ihtiyacı azalmakta ve daha az ekipman maliyeti ile seri imalatlar yapılabilmektedir. Aynı zamanda değişimin gerektiği durumlarda kompozit malzemedan yapılan imalatlarda parçalar çok daha kolay ve ekonomik olarak değiştirilebilmektedir.

Kompozit malzemeler elektrik iletimi ya da yalıtımının sağlanmasından bu alanda kullanılacak pek çok malzemenin imalatına kadar her alanda kullanılmaktadırlar. Kullanıldığı yerler aşağıda belirtildiği gibidir [29].

- Elektriksel yalıtkan, elektromanyetik dalga toplayıcılar, elektrik panelleri,
- Şalterler, sigortalar,
- Armatür gövde ve bağlantıları, yalıtkan taşıyıcılar,
- Sigorta panel ve anahtarları, elektrik iletim direkleri,

- Türbin jeneratör parçaları, kablo aktarıcılar,
- Elektrik iletim hat koruyucuları, gaz iletim hatları,
- Yansıtıcılar.

Korozyona neden olabilecek pek çok sıvı ve gaz malzeme ile pek çok alanda çalışılmaktadır ve bu durumlarda korozyon önleme ve dayanım çalışmaları oldukça önem kazanmaktadır. Bu tarz pek çok uygulama alanından bazıları şöyle sıralanabilmektedir;

- Akışkan dağıtım ve taşıma hatları,
- Kimyasal depolama tankları,
- Basınçlandırma ekipman parçaları,
- Su hatları,
- Korozif ortam türbin kanatları,
- Atık arıtma sistemleri,
- Drenaj kanalları,
- Kimyasal karıştırıcılar,
- Atık hava taşıma hatları.

Modern yemek grupları, tv kasaları, tekstil ekipmanları, kurutucular gibi çok sayıda ekipmanın imalatında kompozit kullanımı yaygınlaşmaktadır. Kompozit imalat metotlarının kullanımı ile karmaşık parçaların tek seferde ve çok sayıda üretilebilmesi, diğer malzemelerle uyumlu montaj özelliği, yalıtkanlık ve düşük ağırlık vb. avantajlar sayesinde pek çok alanda kompozitler tercih sebebi olmuştur. Uygulama alanları aşağıda belirtildiği gibidir [29].

- Buzdolapları, dondurucular,
- Mikro dalga fırınlar, fırınlı ocaklar, mikserler,
- Çim biçme makineleri, endüstriyel tekstil ekipmanları,
- PC ve kopyalama makinesi parçaları,
- Aydınlatma lambası, tepsiler,
- Sıvı tankları, atık kutuları,
- Ev mobilyaları,
- İş güvenliği ekipmanları,
- Mutfak tezgâhları,

Spor malzemelerinin üretimi ve tasarımında özellikle iki beklenti öne çıkmaktadır. Bunlar sırası ile spor performansını artırmak ve sporcuyu daha özgür ve daha serbest kılmaktır. Bu amaçlar doğrultusunda pek çok kullanım alanı karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan bazıları şöyledir.

- Sörf malzemeleri,
- Snowboard ekipmanları,
- Bisiklet gövdeleri,
- Yürüyüş ayakkabısı tabanları,
- Golf ekipmanları,
- Tenis ekipmanları,
- Balıkçılık malzemeleri,

Kış sezonunda tarımsal gıda üretimine olanak sağlayan koruyucu alanların imalatı, ürün hasat makineleri ve tarım ürünü depolama ekipmanları, su nakil hatları gibi pek çok tarımsal çalışma alanında kompozit kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bunun yanında kompozit kullanımı ısı, ses ve ışık yalıtımı, korozif ortam direnci vb. pek çok özelliğe daha düşük maliyetlerle ulaşım kolaylığı sağlamaktadır [28]. Bu alanda kompozit kullanım örnekleri aşağıdaki gibidir,

- Tahıl depolama sistemleri,
- Su taşıma hatları,
- Hayvan besi tesis ekipmanları,
- Karıştırıcı ve ısıtıcı besin tankları,
- Yapay balıkçılık alanları,
- İlaçlama ekipman ve tankları.

Kompozitlerin içyapıları temelde 3 ana basamakta değerlendirilmektedir. Bu basamaklar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

- Matris fazı,
- Takviye ediciler,
- Katkı ve dolgu malzemeleri.

Burada kompozit malzemelerin davranışının anlaşılabilmesi için matris ve takviye elemanlarının görevlerinin bilinmesi önemlidir [41].

Kompozit imalatında matris malzemelerin kullanım gerekçeleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Takviye malzemelerinin yapı içerisindeki bütünlüğünü muhafaza etmek,
- Dışarıdan uygulanan yükü takviye malzemesi üzerine orantılı yaymak,
- Takviye malzemelerini olumsuz ortam şartlarından korumak.

Kesme gerilmelerine karşı malzemenin göstereceği direnç, takviye malzemesi ve seçilen matrisin birbirine tam uyum sağlaması ve yine matrisin kendi mukavemeti ile doğrudan bağlantılıdır. Kompozitin dayanımı büyük ölçüde bu yapılaşma özelliğine bağlı olup, gerilmenin düşük dayanımlı matristen yüksek dayanımlı takviyeye iletilmesi için, matris ve elyaf arasındaki bağ kuvvetinin yeterince yüksek olması gerekir [6],[42].

Yük altında çalışacak malzemelerde, reçinenin kendi kesme dayanımı ve matris-takviye malzemesi bağ dayanımı fazla ise matris veya takviye malzemesi üzerinde başlayan bir boşluk oluşumunun, aynı doğrultuda ve daha hızla ilerlemesine sebep olabilmektedir. Böyle bir oluşumda malzemeler gevrek kırılma göstermekte ve kırılma yüzeyi oldukça düzgün bir form göstermektedir. Tam aksine matris-takviye malzemesi bağ dayanımı zayıf ise malzemenin mukavemet değeri çok düşük değerler göstermektedir. Orta dereceli matris-takviye malzemesi bağ dayanımı elyaf dizilimine paralel çatlak oluşumuna zemin hazırlamakta bu da esnek kopmalara yani kopma yüzeyinde iplikçik formunda yapıların oluşumuna sebebiyet vermektedir. Tüm bunlar değerlendirildiğinde elyafı birbirinden ayırarak süneklik ve plastiklik özelliği kazanmasını sağlayıp kompozit malzemedeki oluşabilecek çatlakların ilerleme durumunu veya ilerlemenin sonucunu doğrudan etkiler. Elyaf takviyeli kompozitlerin matris fazı; metal, polimer veya seramik olabilir [43].

2.1. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Metal matrisli kompozitler; kırılmış, sürekli ya da granül formundaki takviye malzemelerinin metal yapılı matris malzemesine çeşitli teknikler ile katılması ile oluşmaktadır. 20. yy'ın ortalarında, kompozit yapının yoğunluğunu düşürebilecek alüminyum, titanyum, magnezyum ve bu elementlerin alaşımları ile malzemenin

mukavemet ve süneklik gibi özellikleri artırılmaya başlanmıştır. Bu şekilde plastiklerden daha yüksek elastiklik, mukavemet ve kırılma direnci gösterebilen artan sıcaklık değerlerinde daha iyi performans gösteren malzemeler elde edilebilmektedir. Fakat MMK'ların imalatı oldukça güçtür. Bu tür malzemeler her takviye malzemesi ile düzgün bağ yapısı oluşturmazlar [44],[45]. Metal matrisli kompozitler araç imalat ve yedek parça üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir [46].

“MMK'lar daha çok uzay ve havacılık sanayisinde, yük taşıma sistemlerinde, uzay haberleşme cihazlarının reflektör ve destek parçaları vb. yerlerde kullanılır” [47].

2.2. SERAMİK MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

En az bir metalin, ametallerle bir araya gelmesi ile oluşan ve inorganik yapıdaki bileşiklere seramik adı verilir. Çoğunlukla çeşitli yollar ile meydana gelen kil ve saf kil olarak tanınan kaolin gibi maddelerin yüksek sıcaklık altında pişme işlemine tabi tutulması ile oluşmaktadır. “Tuğla, kiremit, porselen ayrıca oksitler, nitritler, boridler, karbitler, silikatlar ve sülfidler seramik gurubuna ait malzemelerdir” [48]. İleri teknoloji seramikleri metallerle olduğu gibi metal dışı elementlerle de bileşik oluşturabilirler. Oluşumda yer alan elementlerin arasındaki güçlü iyonik ve kovalent bağlar sayesinde oldukça sert ve dayanıklı bir yapıya sahip olmaktadır. Özellikle çok yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri direnç ve kimyasallara karşı sahip oldukları korozyon dayanımları sayesinde diğer kompozit türlerine göre tercih sebebi olabilmektedirler.

En çok tercih edilen yüksek teknoloji seramikleri Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , Mo_2Si , WSi_2 , CdS , ZnS , TiB_2 , ZrB_2 , SiC , ZrC , WC şeklinde sıralanabilir.

Seramik matrisli kompozitler 3 gruba ayrılabilir [49];

- 1- Seramik / Seramik
- 2- Seramik / Cam
- 3- Seramik / Metal

2.3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Polimerler, monomer isimli oldukça küçük yapıdaki moleküllerin birbiri ardına dizilmesi ile oluşan uzun zincirli, organik ya da sentetik olabilen malzemelerdir. Polimerler kompozit malzemelere kolay işlenebilirlik, hafiflik, kullanım yerine göre

yüksek dayanım ve ekonomik imalatşansı sağlama gibi özellikler kazandırdıkları için yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Polimerler; termoset, termoplastik ve elastomer olarak sınıflandırılabilir. Kompozit imalatında termoset ve termoplastik yapıdaki matrisler daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Eğer kompozit imalat sürecinde takviye elemanı olarak elyaf kullanılmışsa matris olarak termoset reçine grubu tercih edilmektedir.

2.3.1. Termoset Malzemeler

Termoset malzemeler genellikle akışkan ya da oldukça düşük erime noktasına sahip katı fazda olurlar. Kompozit imalatı esnasında bir katalizör ve ısı kaynağının birlikte ya da ayrı ayrı kullanılması ile sertleştirilirler ve oldukça sert, yüksek sıcaklığa karşı mukavemet gösteren bir malzeme halini alırlar. Akışkan yapıları sayesinde oldukça kolay şekil alabilen termoset malzemelerin en büyük dezavantajları barındırdıkları çapraz bağlar nedeniyle bir kez işleme tabi tutulduktan sonra bağ yapıları değiştiğinden tekrar ısıtılsalar bile ilk hallerine döndürülemezlerdir. Kompozit için en çok tercih edilen termoset malzemeler,

2.3.1.1. Epoksi

İçerisine katıldığı malzemeleri birbirine yapıştırma özelliğine sahip kimyasal bir reçine türü olan epoksi, imalat esnasında kullanılan sertleştirici türüne göre kompozite oldukça farklı özellikler kazandırabilmektedir.

2.3.1.2. Polyester

Çok fonksiyonlu asit ve alkollerin çeşitli kimyasal reaksiyonları sonucu oluşan malzemelere polyester reçine adı verilir. Doymuş kimyasal yapıya sahip polyesterler ısıtılarak yeniden imal edilebilirken doymamış yapıdaki poliyesterler ise tekrar kullanılma özelliğine sahip değildirler [50]. Bu malzemeler daha çok takviye malzemesi olarak cam elyafın tercih edildiği kompozit uygulamaları için tercih edilmektedirler. Düşük sıcaklıklarda dayanımlarının ve yapı sektöründe kullanılan malzemelere tutunma özelliğinin iyi olması, tasarım esnekliği, ekonomiklik gibi avantajları olurken soğuma esnasında oluşan çekme gerilmeleri, yük altındaki burkulma dirençlerinin düşük olması ve buna bağlı olarak hasar görme ve korozyona uğrama eğilimlerinin olması ise dezavantajları arasında sayılabilir [4].

2.3.1.3. Fenolik Reçineler

Günümüz plastik sanayinde çokca tercih edilen fenolik reçinelerin büyük kısmı C_6H_5OH ve CH_2O kullanılarak üretilmektedir. Kompozit imaltı sırasında asidik ve bazik katalizörlerin her ikisinde kullanımına uygun bir yapıya sahiptir. Yaygın kullanımları $300\text{ }^{\circ}C$ 'den $1000\text{ }^{\circ}C$ sıcaklık aralığında çalışabilmeleri gösterilebilir. Ancak imalat esnasında malzeme yüzeyine küçük boşluklar oluştuğundan yüksek basınçta imalat gerekmektedir.

2.3.1.4. Silikon

Yapısında oksijenle birlikte farklı türde hidrokarbon barındıran sentetik yaoılı kbir polimer olarak bilinen silikon karbon ile yapısal benzerlik göstermektedir. Silikonlar yaklaşık $250\text{ }^{\circ}C$ sıcaklıklarda kullanılabilirken elektriksel yalıtım ve korozyon direnci gibi özellikleri ile tercih sebebi olmaktadır.

2.3.1.5. Poliimid Reçineler

Poliimid reçineler imid monomerlerden oluşan yüksek sıcaklıklara dayanımları ile bilinen polimerlerdir. Zincir birleşimleri değerlendirildiğinde alifatik, yan-aromatik, aromatik olmak üzere gruplandırılabilirler.

- Poliüretan: Bir diizosiyanatın iki veya daha fazla aktif hidrojen içeren bir bileşikle birlikte oluşturduğu maddelere poliüretan denir. Uçak kanatlarının imalatından ısı ve ses yalıtımına kadar pekçok alanda kullanılmaktadırlar.
- Siyanat Ester; Elektronik ürün ve uçak imalatında sıklıkla tercih edilen siyanat esterler, 2 ve daha fazla neredeyse aynı tepkimeler veren siyanat grubu ihtiva eden monomerlerin katalizör ve ısı kullanılarak homopolimerize edilmesi ile üretilmektedir. Çoğunlukla bisfenollerden ve polifenollerden imal edilirler.

olarak sıralanabilir.

2.3.2. Termoplastik Malzemeler

Termoplastik malzemeler günümüzde, soğuma esnasında ekstra bir sertleştirme işlemine gerek duymamaları ve tekrar tekrar ısıtılarak şekillendirilebilmeleri dolayısı ile kompozit üretiminde yer almaya başlamışlardır. Ayrıca kırılganlıklarının düşük oluşu ve hafiflik özellikleri nedeni ile otomotiv sektöründe de kullanılmaktadır.

Kalıplama esnasında oldukça fazla öneme sahip olan viskozite değerlerinin termoplastik malzemeler için yüksek değerler alması ise en önemli dezavantajları sayılabilir. Çizelge 2.1’de birkaç termoplastiğe ait özellik değerleri görülmektedir.

Çizelge 2.1. Bazı termoplastiklere ait özellikler.

Malzeme Adı	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Çekme Muk. (Mpa)	Elastik Modülü (Mpa)	Kullanma Sıcaklığı Sınırı (°C)
Polietilen	0.92-0.93	7-17	105-280	80
PVC	0.95- 0.96	20-37	420- 1260	100
PP	1.50- 1.58	40-60	2,800-4,200	110
PS	0.90- 0.91	50-70	1,120-1,500	105
ABS	1.08- 1.10	35-68	2,660-3,150	85
Polimetilmetakrilat	1.05-1.07	42-50	-	75
Teflon	1.11-1.20	50-90	2,450-3,150	125
Naylon 6,6	2.1-2.3	17-28	420-560	120
Sellülozikler	1.06-1.15	60-100	2,000-3,500	82

2.3.3. Elastomerler

Elastomerler 22 °C – 25 °C sıcaklıklarda kendi boyutlarının neredeyse 2,2 katına kadar elastik olarak (bırakıldığında çok küçük sapmalarla eski haline dönmek üzere) uzatılabilen, çok düşük sıcaklık değerlerinde oldukça sert davranış gösteren ancak yüksek sıcaklık değerlerinde aşırı akışkan bir hal almayan polimer yapılı malzemelerdir. Doğal ve sentetik kauçuk malzemeler en çok kullanılan türleridir.

2.4. TAKVİYE ELEMANLARI

Kompozit malzemelerin imalatında matris içerisinde kullanılan takviye malzeme oldukça önemli bir yere sahiptir. Kompozit malzemenin kaldırabileceği yük kapasitesinden, mukavemet ve iletkenliğe kadar pek çok özelliğin malzemeye kazandırılması için doğru takviye malzemesinin seçilmesi ve matris içerisinde uygun doğrultu ve konuma yerleştirilmesi önemlidir. Kompozit imalatında; doğada kendinden oluşabilen ya da endüstriyel olarak imal edilebilen çok farklı tür ve şekilde takviye malzemesi kullanılmaktadır. Bu takviye malzemeleri yapılan çalışmalar ışığında sürekli değişiyor olsada genel sınırlar içerisinde aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [51].

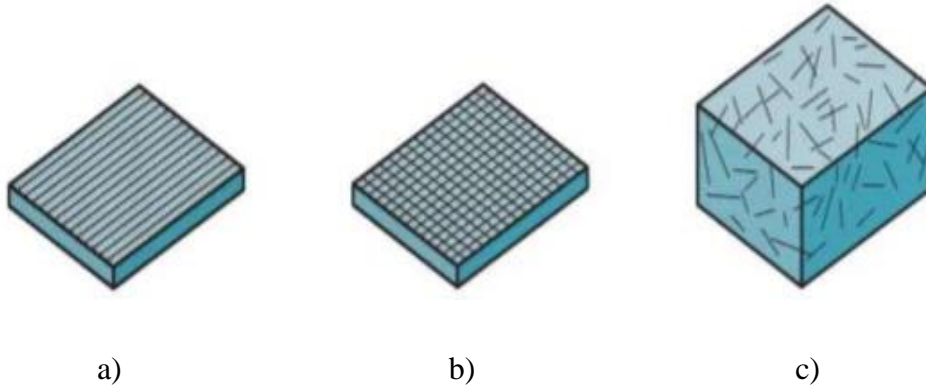
- Elyaf İçerikli Kompozitler
- Parçacık İçerikli Kompozitler
- Tabaka İçerikli Kompozitler
- Karma İçerikli Kompozitler

2.4.1. Elyaf İçerikli Kompozit Malzemeler

Elyaf yapıli kompozit malzemeler, ince elyafliarin matris içerisine tek – ift yönlü ya da dağınık olarak yerleştirilmesi ile üretilmektedir. Elyafliarin matris içerisindeki yerleşim doğrultulari malzeme mukavemeti açısından oldukça önemlidir. Elyafliar parça doğrultusunda yerleştirilmiş ise bu doğrultuda yüksek mukavemet sağlanırken diğer yönde mukavemet değerleri düşük ölçülmektedir. b)

c)

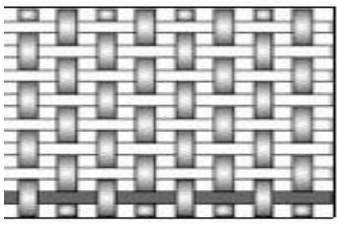
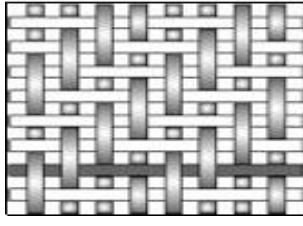
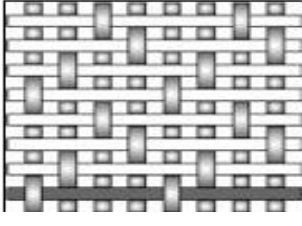
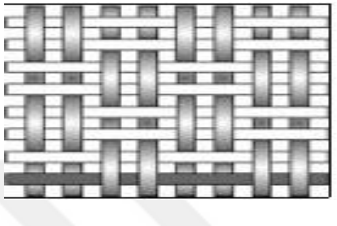
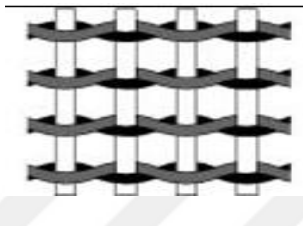
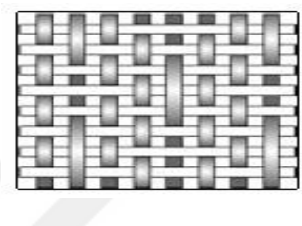
şekil 2.5’de kompozit içerisine elyaf yerleşimi örnekleri gösterilmektedir.



şekil 2.5. Kompozit içerisine elyaf yerleşimi a) Tek yönlü sürekli elyaf b) ift yönlü sürekli elyaf c) Dağınık süreksiz elyaf [52].

Ancak aynı zamanda parça yönüne dik olarak da yerleştirilirse iki yönde de aynı değerde mukavemet sağlanabilmektedir. Elyafliar homojen ve dağınık olarak matris içerisine yerleştirilmiş ise her yönde aynı mukavemet değerleri elde edilebilmektedir.

İmalat sırasında liflerin doku içerisine yerleşme şekillerine göre kompozit türleri şekil 2.6’da gösterilmektedir.

		
“Plain” Örgü	“Twill” Örgü	“Stain” Örgü
		
“Basket” Örgü	“Leno” Örgü	“Mock Leno” Örgü

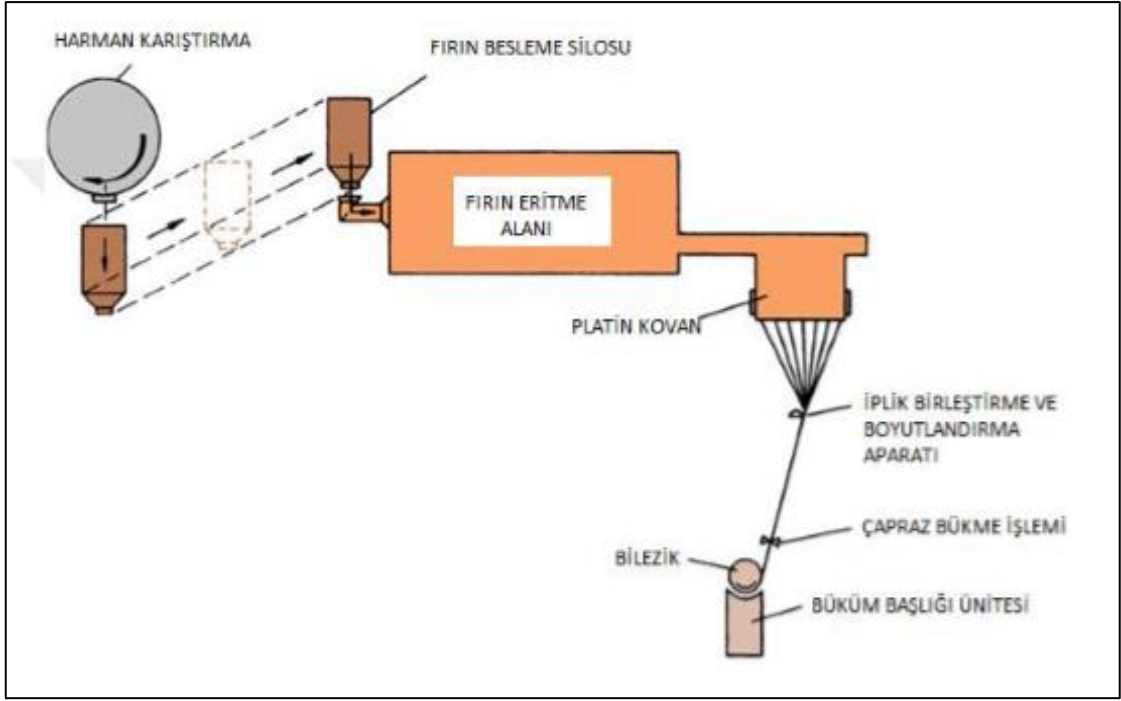
Şekil 2.6. Liflerin doku içerisine yerleşme şekillerine göre kompozit türleri [53].

Elyafın uzunluk/çap oranları 100 ve yukarıda ise uzun elyaf 100’ün altında ise kısa elyaf olarak tanımlanmaktadır. Bunların yanı sıra, elyafın uzunluk/çap değerleri yükseldikçe elyafın aktarılan yük değeri de artış göstermektedir.

Elyaf yapılarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır [54].

2.4.1.1. Cam Elyaf

Cam elyaf SiO_2 içerisine alüminyum, magnezyum, kolemanit, sodyum, bor, kalsiyum vb. elementlerden bir veya birkaçının eklenmesi ile elde edilen homojen yapıdaki karışımın yaklaşık $1100\text{ }^\circ\text{C}$ - $1600\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklarda akışkan hale getirilerek, altına mikron ölçekli binlerce delik bulunan ve genellikle platin ya da rodyum alaşımli bir haznedan basınç altında yaklaşık 23 m/sn hızla aşağı doğru demetler halinde çekilmesi ile elde edilmektedir. Çekme işlemi esnasında demetler hızlı bir şekilde su ya da hava kullanılarak soğutulmakta, nem ve korozyona karşı kaplanmaktadır. Şekil 2.7’de cam elyaf üretiminin sistematığı gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Cam elyaf üretiminin sistematığı [6].

Elyaf üretiminde kullanılan camlar aşağıdaki gibi gruplandırılabilir [55]:

A Camı: İçeriğinde alkali bulunan bu cam türü kompozit imalatının ilk dönemlerinde kullanılmış ancak sonrasında mekanik dayanımı yetince artıramadığı için daha az kullanılmıştır.

C Camı: Kimyasalların meydana getirdiği aşınmaya karşı oldukça dirençli bir yapıya sahip olan C camı aşınma dayanımı istenen birçok alanda kompozit imalatında kullanılmaktadır [56].

E Camı: Kalsiyum alüminyum borosilikat ve % 2'lik alkali içeriği ile en yüksek alkali miktarına sahip olan E camı, büyük oranda elektriksel yalıtım için kullanıma başlanmış olsa da yapılan çalışmalar ışığında bugün mekanik dayanım ve nem yalıtımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. En çok tercih edilen elyaf türüdür.

S Camı: Magnezyum alümina silikat bileşimine sahip S camı yaygın kullanılan e camından daha ince bir yapıya sahip olduğundan aynı alanda daha fazla lif kullanımına olanak tanımaktadır. Bu şekilde malzemede daha yüksek mukavemet sağlanabilmektedir. İlave olarak ısı ve kimyasal direnci de oldukça iyi olan bir elyaf türüdür.

2.4.1.2. Karbon / Grafit Elyaf

Temel malzeme olarak daha çok PAN ve zift kullanılarak üretilen Karbon ve grafit elyaflar, piyasa koşullarında eş değer olarak kabul edilse de bileşimlerindeki karbon oranları % 5-7 oranında farklılık göstermektedir. Üretimi esnasında, elyaf çapının azaltılması ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için çekme işlemi uygulanır. Bunu takiben 300 °C’de elyafların uzunlukları sabitlenir. Tam karbon içeriğinin sağlanması için elyaflar 3000 °C’ye tekrar ısıtılır ve son basamakta reçineye daldırılarak yüzey koruması sağlanmış olur.

Karbon elyaflar yüksek mukavemet ve sıcaklık dayanımı, aşınma direnci gibi olumlu katkı sağlayacak yönlerinin yanında düşük elektrik yalıtımı ve uzama oranlarının nispeten düşük olmasına bağlı darbe dayanımlarının düşük olması gibi negatif özellikleri de bilinmektedir. Bu elyaf türü termoset ve termoplastik kompozit üretiminde kullanılmaktadır.

2.4.1.3. Aramid Elyaf

Aramid kelimesi “aromatik polyamid” in kısaltılmasıdır, bu yapı malzemenin katılık oranını artırdığı için aramid elyaflar eritilemez ve $C_8H_4C_{12}O_2$ ve $C_6H_8N_2$ maddelerinin çözeltilerinin ekstrüzyonu ile elde edilirler [56]. Uygulamada ve kompozit piyasasında kullanılan “kevlar 29” ve “kevlar 49” isimli iki tür aramid elyaf mevcuttur.

Aramid elyafların diğer tür elyaflara göre birim ağırlıkları için daha yüksek dayanıma sahip olmaları ve α_L katsayılarının negatif oluşu avantajları arasında sayılırken, kesilerek işlenmelerinin zor oluşu ise en büyük dezavantajlarıdır.

2.4.1.4. Bor Elyafı

20. yy’ın ortalarında imal edilmeye başlanan bor lifleri, bor elementinin “kimyasal buharının” oldukça ince “W” veya “C” teller üzerinde yoğunlaştırılarak çöktürülmesi ile üretilmektedir. Cam elyaflardan çok daha sert oldukları için piyasada önceden reçine emdirilmiş prepreg halde bulunmaktadırlar. Bor elyaflar herhangi bir ara malzeme kullanılmadan polimer matrisli kompozitlerle tam uyum sağlayabilmektedirler [57]. İyi mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen imalat zorlukları ve maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı özek uygulamalar dışında yaygın olarak kullanılmamaktadırlar.

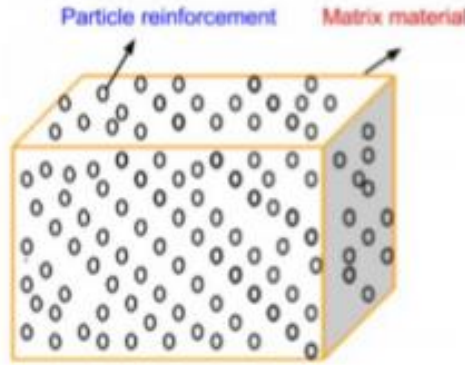
2.4.1.5. Silisyum Karbür Elyafı

Silisyum karbür elyafların üretimi, 0.1 ~ 0.14 mm çaplarında bor elyaflar ile benzer

olarak silisyum karbürün, W teller üzerine çöktürülmesi ile yapılmaktadır. “W” teller yerine “C” teller kullanılarak üretilen elyafların yoğunluğu daha düşük olmaktadır [58]. Ancak bor elyaflardan neredeyse iki kat daha fazla sıcaklık dayanımına sahiptirler. Bu tür elyaflar alüminyum, vanadyum ve titanyum matrisler ile uyumlu olarak kullanılabilirler.

2.4.2. Tanesel Yapı Takviyeli Kompozit Malzemeler

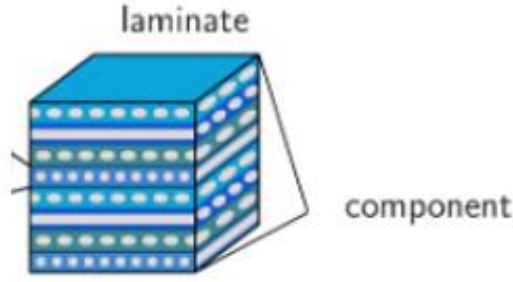
Farklı türde matris malzemeler içerisinde parçacık ($d \geq 1 \mu\text{m}$) ya da partikül ($d \leq 1 \mu\text{m}$) halinde takviyelerin yapının izotrop olacak şekilde yerleştirilmesi ile üretilmektedirler. Polimer kompozitlerde tane takviyesi olarak; CaCO_3 , CaSiO_3 , kil, toz veya parçalı metaller ve tarım artıkları yaygın olarak tercih edilmektedir [54]. Kullanılan takviye malzemesinin özellikleri üretilecek kompozitin özelliklerini büyük oranda belirleyici görev üstlenmektedir [51]. Öyle ki tanesel yapı takviyeleri kompozitlerde; çekme, sertlik, darbe dayanımı gibi özellikler kazandırmaktan ziyade korozyon direnci, elektriksel iletkenlik, sertlik vb. özellikler kazandırmak ve birim maliyeti düşürmek için kullanılmaktadır. Şekil 2.8’de tanesel yapı takviyeli kompozit iç yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Tanesel yapı takviyeli kompozit [59].

Tanesel yapı takviyeli kompozit imalatında plastik matris - metal takviye ya da plastik matris - seramik takviye eşlemeleri tercih edilmektedir. Metal takviyesi kullanıldığında metal kaynaklı iyi elektrik iletimi sağlanırken, seramik takviye kullanıldığında iyi sertlik ve sıcaklık dayanımı gözlenmektedir.

2.4.3. Tabakalı (katmanlı) Kompozit Malzemeler

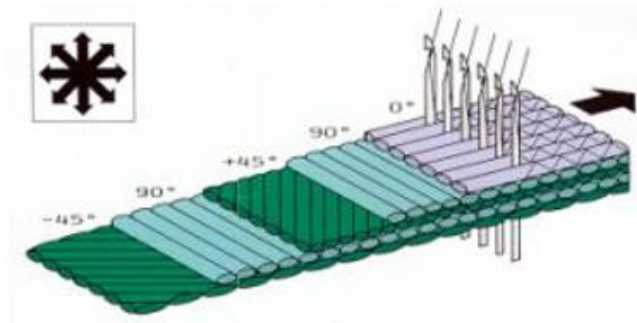


Şekil 2.9. Tabakalı (katmanlı) kompozit malzemeler [60].

Farklı yönlerde elyaf yerleşimleri ile dokunmuş tabakaların bir araya getirilmesi ile oluşturulan kompozit malzemelerdir. Kompozitlerin tabakalı olarak üretilmesi sayesinde mekanik, fiziksel ve kimyasal olarak farklı özelliklere sahip katmanlar bir araya getirilerek üstün özelliklere sahip malzemeler elde edilebilmektedir [4]. Bu yapıların su geçirgenliği de oldukça düşüktür. Sık tercih edilen katmanlı kompozitler laminar ve sandviç kompozitlerdir. Şekil 2.9’da tabakalı (katmanlı) kompozit malzemelere ait iç yapı gösterimi yer almaktadır.

2.4.3.1. Laminer Katmanlı Yapı

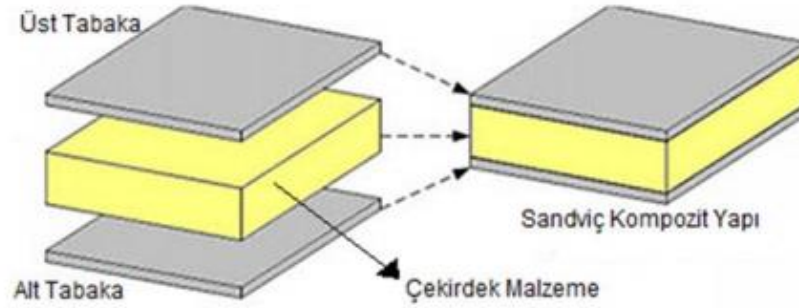
Bu kompozit türü 2D yapılı, farklı kompozit katmanların uygun yapışkan malzemeler ile birleştirilmesi temeli ile üretilmektedir. Şekil 2.10’da laminar kompozit örneği yer almaktadır.



Şekil 2.10. Laminer kompozitler [23].

2.4.3.2. Sandviç Katmanlı Yapı

Alt ve üst tabaka arasına yerleştirilen birim alan için düşük ağırlıklı ancak dayanıklı yapılar elde edilebilmektedir. Tabakalar istenilen kompozit türünde seçilebilmektedir. Sandviç katmanlı dizilimin tercih edildiği imalatlarda ağırlık değerindeki küçük artışlar ile mukavemet değerlerinde 3.5, sertlik değerlerinde ise 7 kat artış görülebilmektedir. Şekil 2.11’de sandviç katmanlı yapı örneği görülmektedir.



Şekil 2.11. Sandviç katmanlı yapı [61].

2.4.4. Karma Kompozit Malzemeler

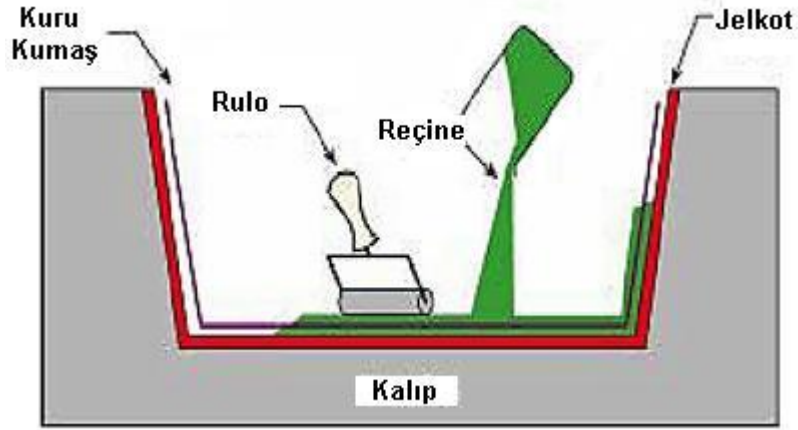
Tek bir kompozit bileşimine birbirinden farklı birden fazla takviye elemanının aynı anda eklenmesi ile talep edilen farklı türde özelliklerin bir araya getirildiği hibrit malzemeler elde edilebilmektedir. Bu tür yapılarda doğada kendiliğinden oluşan elyafların kullanımı ile ucuzluk, endüstriyel olarak üretilen elyafların kullanımı ile iyi mekanik özellikler birleştirilmiş olmaktadır [62].

2.5. AÇIK KALIPLAMA YÖNTEMLERİ

2.5.1. Elle Yatırma Yöntemi

Kompozit imalatının başlangıç ve gelişim dönemlerinde çok sık kullanılmış, günümüzde de üzerinde ar-ge çalışmaları yoğun olarak sürdürülen, diğer imalat metotlarına göre daha kolay uygulanabilen bir yöntemdir. Tamamen iş gücü ile gerçekleştirilen bu yöntemde; kalıp ile temas tek yüzde sağlanabildiğinden tek yüzeyde pürüzsüzlük istenen, az sayıda üretilecek ve büyük boyutlardaki parçaların üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu yöntemde farklı türlerde takviye ve matris malzemeleri

kullanılabilirken, sıklıkla cam elyaf takviyeleri ve epoksi-polyester reçineler tercih edilmektedir. Şekil 2.12’de el yatırması işlemi gösterilmektedir.



Şekil 2.12. El yatırması işlemi [63].

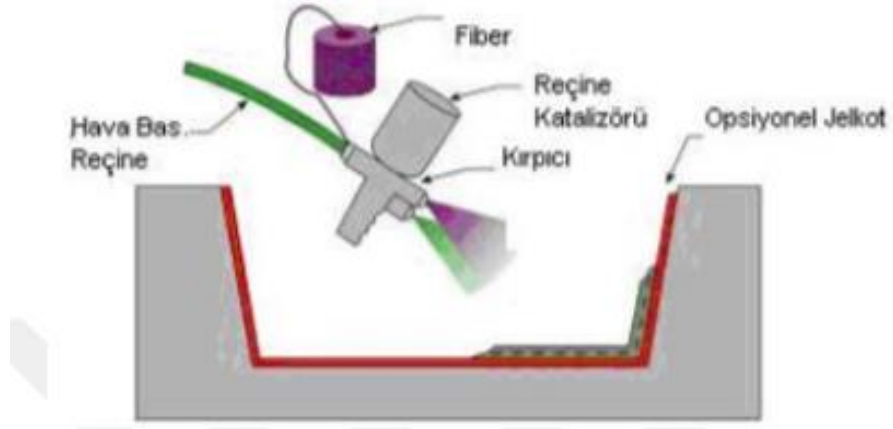
El yatırması yöntemi istenilen boyutlarda parça üretiminin yapılabilmesi, çok sayıda kalıp çeşidinin uygun fiyatlarda üretilebilmesi açısından tercih sebebi olmuştur. Ancak imalatı gerçekleştiren iş gücünün tecrübe ve dikkatine göre; imalat esnasında boyut değişimlerinin yaşanabilmesi, takviye elemanı dağılımının homojen yapılamamasına ya da rulolama işleminde kalabilecek kabarcıkların tespit edilememesine bağlı mekanik özellik zayıflığı veya dengesizliğinin oluşabilmesi gibi dezavantajlara da sahiptir [64].

El yatırması ile kompozit imalatında istenilen kalınlığa ulaşana kadar aşağıdaki uygulama aşamaları tekrarlanır;

- Yüzey düzgünlüğü için kalıp temizlenir,
- Ayrılmayı kolaylaştırmak için kalıp iç yüzeyine polivinil alkol, silikon, madeni yağlar, vaks vb. pigment katkısı olan (sıklıkla ½ mm kalınlıkta) jelkot uygulanır [65],
- Uygulanan jelkotun tamamen kuruması için yeterli süre beklenir,
- Kuruyan jelkot üzerine tercih edilen yapı ve yönde takviye elemanları yerleştirilir ve reçine uygulanır,
- Kompozit içerisinde hava kabarcıklarının oluşmaması için uygulanan reçine kuruyana kadar elle rulolama işlemi gerçekleştirilir. Kuruma işlemi dışarıdan bir ısı kaynağı kullanılarak kalıbın ısıtılması ile yapılabileceği gibi reçine içerisine eklenecek katalizörler veya hızlandırıcılar ile de gerçekleştirilebilmektedir.

2.5.2. Püskürtme Yöntemi

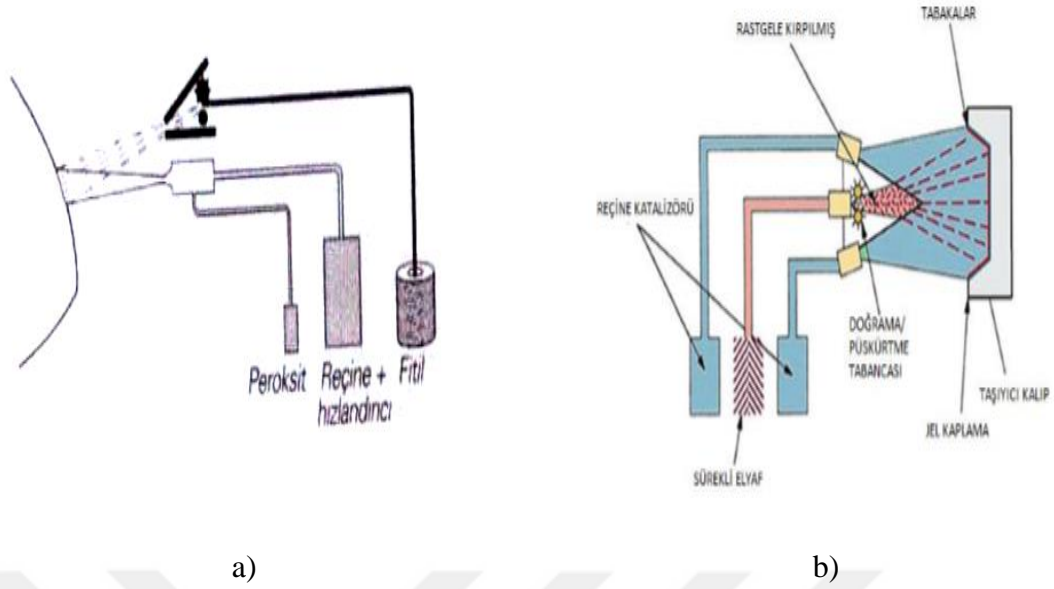
Şekil 2.13’de de gösterilen püskürtme yönteminde hazırlanan kalıp içerisine el yatırması yönteminde de olduğu gibi temizleme ve ayırıcı jelkot uygulamaları gerçekleştirilir. Jelkot kurduktan sonra seçilen uygun bir tabanca yardımı ile kırılmış elyaf ve reçine aynı anda kalıp yüzeyine püskürtülür. Sürekli elyaflar tabanca içerisindeki bir düzenek yardımı ile püskürtme esnasında ~ 1,3-2,5 cm uzunluğunda kesilir. Bu uygulamaya parça istenilen kalınlığa ulaşana kadar devam edilir.



Şekil 2.13. Püskürtme metodu ile kompozit üretimi [66].

Bu yöntemde kullanılan tabancaları çalışma prensibine ve karışım oluşturma türlerine göre ikiye ayırmak mümkündür.

Karışım oluşturma türleri değerlendirildiğinde iki farklı türde püskürtme tabancası kullanılmaktadır. İlk tür tabancada uygulama öncesi hızlandırıcı katılmış reçineye bir enjektör yardımı ile oldukça hassas ölçüm yapılarak katalizör ilavesi yapılır. İkinci tür tabancalarda ise reçine-katalizör ve reçine-hızlandırıcı karışımlarının olduğu iki farklı kap yer almaktadır. Bu farklı karışımlar püskürtme işleminde aynı anda yüzeye püskürtülmektedir.

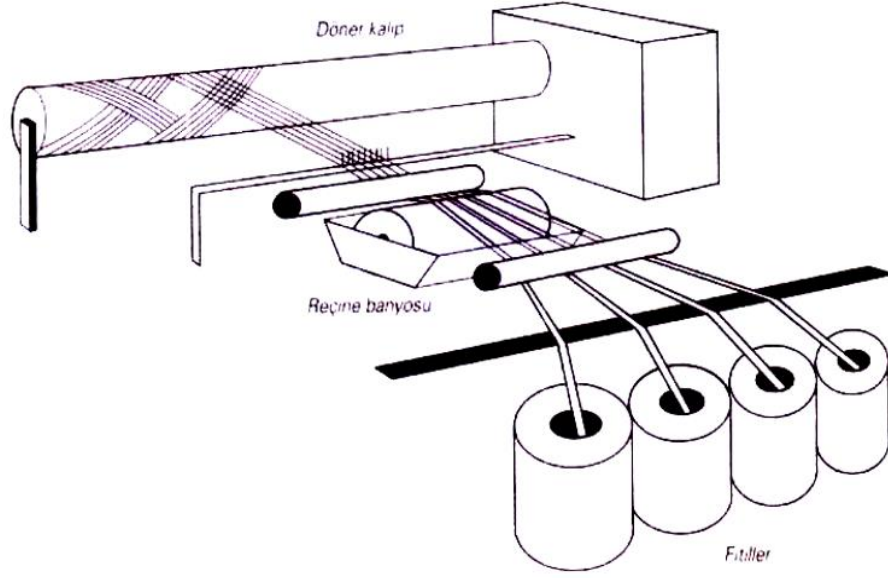


Şekil 2.14. Püskürtme tabancaları a) Hızlandırıcı karışımli tabanca b) 2 hazneli tabanca [6].

Şekil 2.14’de de gösterilen püskürtme tabancalarını çalışma şekillerine göre havalı tabancalar ve havasız tabancalar olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Havasız sistemlerde itme işlemi hidrolik sistemler vasıtası ile sağlandığından püskürtme esnasındaki dalgalanmalar çok daha az olmakta, bu durum da bu tabancaları daha avantajlı hale getirmektedir.

2.5.3. Elyaf Sarma Yöntemi

Şekil 2.15’te gösterilen elyaf sarma yöntemi, çeşitli malzemelerden imal edilmiş, eksenini etrafında dönen mandreller üzerine; sıklıkla reçine havuzundan geçirilen sürekli elyafların ya da önceden reçine emdirilmiş prepreg haldeki levhaların sarılması ile gerçekleştirilen kompozit üretim şeklidir. Prepreg levha kullanım maliyeti yüksek olmasına rağmen karmaşık yönlü takviye yerleşimi gerektiren uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir. Sarım işleminde manrel öncesi yapılan ısıtma ile malzemede tam bir bütünlük sağlanmaktadır. Yeni nesil karma taviye yapıya sahip kırpılmış elyaf kullanılan uygulamalarda ise elyaf parçalarının ve reçinenin eş zamanlı olarak mandrel yüzeyine püskürtülmesi ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.15. Elyaf sarma sistemi [23].

Bu işlemden tekli deneme üretimleri için daha çok kontrol plak veya alüminyum mandreller tercih edilirken, seri üretimlerde daha çok çelik mandreller kullanılmaktadır. Çok spesifik üretimler olan kapalı hacme sahip parça imalatlarında ise düşük sıcaklıklarda akışkan bir hal alan malzemeler kullanılmaktadır. Mandreller çoğunlukla imalat sonrası ana malzeme içerisinden çıkartılırlar ancak basınçlı tank imalatı gibi işlemlerde şişirilebilir mandreller kullanılarak ya işlem sonunda mandrel söndürülerek çıkartılması sağlanır ya da malzeme içerisinde bırakılır. Malzeme içerisinde bırakılan mandrellere bir örnekte boru içerisindeki basınçlı akışkanın sızmasını engellemek amacıyla tercih edilen çelik mandreller gösterilebilir.

Cam, karbon ve kevlar liflerinin yaygın kullanıldığı elyaf sarma yönteminde, matris malzemesi olarak çoğunlukla genel amaçlı reçineler kullanılırken; korozyon dayanımı istenen uygulamalarda bisfenol A, yüksek sıcaklık dayanımı istenen uygulamalarda vinil esterler, iyi mekanik özelliklere sahip olması beklenen imalatlarda epoksiler, organik solvent direnci gerekli uygulamalarda fırınlar, yüksek kimyasal direnç talebinde izoftalik poliesterler tercih edilmektedir.

2.6. DİĞER İLAVE MALZEMELER

Kompozit malzeme imalatında temel elemanlar matris ve takviye elemanları olsa da estetik görsel dizayn taleplerinin ve performans çıktılarının istenen sonuçlara

ulařabilmesi için çeřitli katkı ve dolgu desteklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ilaveler dūřuk oranda maliyet artıřına sebep olsalar da hem imalat kolaylıęı saęlamakta hem de barındırdıkları performans kriterleri sayesinde daha dūřuk maliyetli matris ve takviye elemanı kullanımının nūnū açmaktadırlar. Dolgu, katalizör, inhibitör, kalıp ayırıcı, renklendirici tūrleri polimer matrisler için bu grupta deęerlendirilmektedirler [67]



3. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Kompozit imalatında tercih edilen matris ve takviye malzemelerinin doğru seçimi ürün maliyetini ve talep edilen özelliklerin elde edilmesini doğrudan etkilemektedir. Ancak malzeme seçiminin doğru yapılması kompozit malzeme kalitesini yükseltmekte tek başına yeterli değildir. Doğru seçilmiş malzemelerin yanlış imalat yöntemine tabi tutulması elde edilecek sonuçları doğrudan etkilemektedir. Örneğin; istenilen dayanım değeri için kullanılması gereken sürekli elyaf miktarı belirli olan bir uygulama için kırılmış elyaflar kullanılan BMC yönteminden ziyade “pultrüzyon” veya “elyaf sarma” gibi sürekli elyaf kullanılan proseslerin çok daha uygun olacağı bilinmelidir.

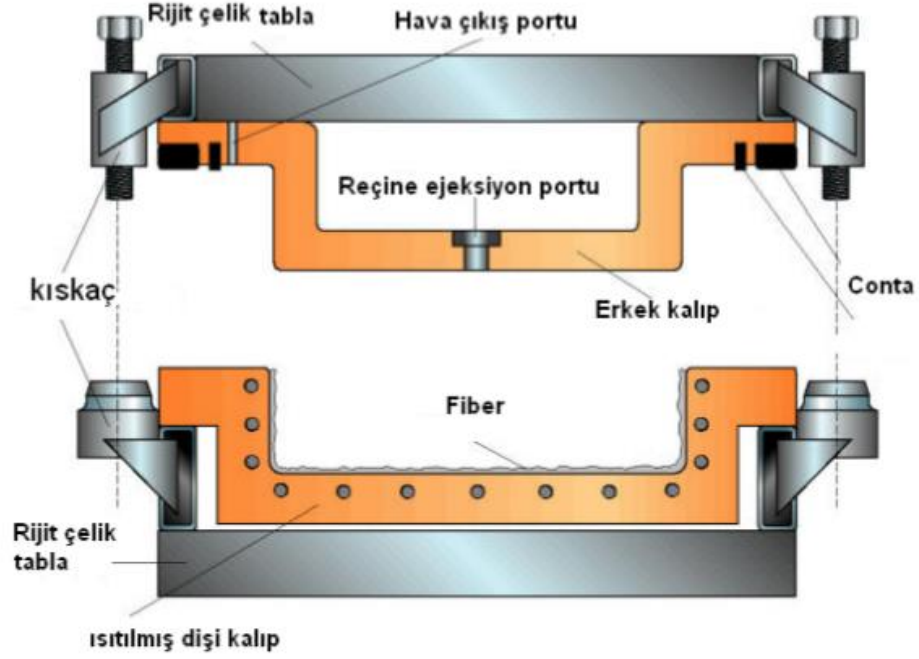
Kaliteli, fonksiyonel ve estetik görünüme sahip kompozit ürünlerin elde edilebilmesi için kullanılacak malzeme ve imalat yönteminin birlikte değerlendirilmesi kompozit imalatının temel prensiplerindedir. Bu anlamda çok sayıda doğrudan veya hibrit olarak kullanılacak imalat yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemleri kalıplama şekline göre ikiye ayırmak mümkündür.

- 1- Açık Kalıplama Kullanılan Teknikler: Uygulama yapılan yüzey hav ile temas halindedir.
- 2- Kapalı Kalıplama Kullanılan Teknikler: Uygulama yapılacak yüzeyin hava ile teması bir kalıp veya vakum torbası ile kesilmiştir.

3.1. KAPALI KALIPLAMA KULLANILAN TEKNİKLER

3.1.1. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (RTM)

Reçine transfer yöntemi orta ölçekli üretimler ve SMC ile yapılacak üretimlerde deneme ürünü imalatlarında kullanılmaktadır. Bu yöntemle imal edilen parçaların her iki yüzeyine de jelkot uygulanabildiğinden alt ve üst yüzeyler pürüzsüz olmakta ve parçalarda yüksek mukavemet değerlerine ulaşılabilmektedir.



Şekil 3.1. RTM proses kalıbı [68].

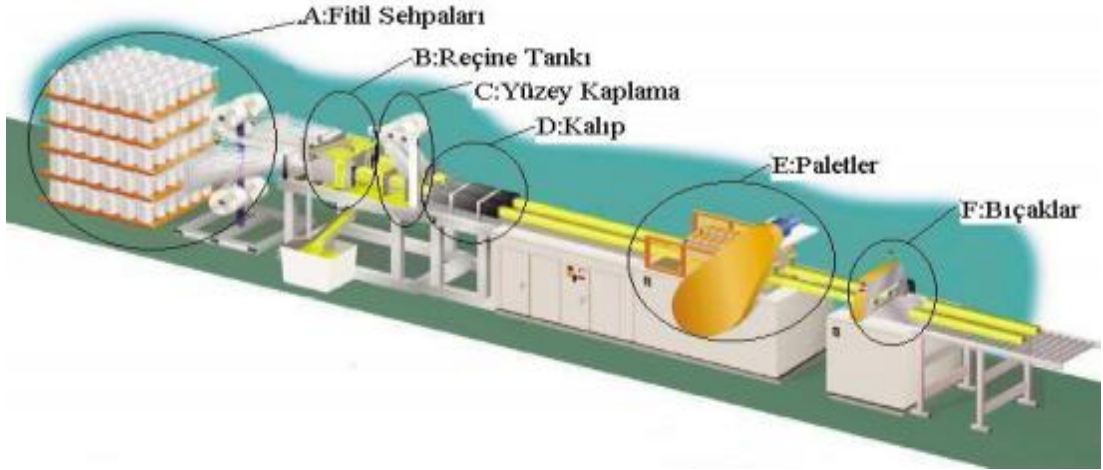
Kırpılmış veya sürekli elyaflar ya da önceden şekillendirilmiş ve kalıba tam uyması için ısıtılmış prepreglerin; imalatı yapılacak malzemeye özel hazırlanmış, Şekil 3.1'de de örneği gösterilen, birbiri üzerine tam oturan dişi ve erkek kalıpların içerisine basılması ile imalat gerçekleştirilmektedir. Reçine dolumu, kalıplar içerisine yerleştirilen takviye elemanları üzerine ayrı kaplarda bulunan reçine ve katalizör gibi destek elemanlarının bir karıştırıcı yardımıyla ölçülebilir miktarlarda ve yaklaşık 3 bar basınçla doldurulması prensibine göre gerçekleştirilmektedir. İmalat kalıpları üzerinde reçine kaçaklarını engellemek için sızdırmazlık elemanları yer aldığı gibi parça içerisinde hava kabarcıklarını kalmasını engellemek için hava çıkış delikleri de yer almaktadır.

3.1.2. Profil Çekme (pultruzyon) Yöntemi

Şekil 3.2'de şematik gösterimi yer alan pultruzyon yönteminde imalat basamakları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- 1- Sürekli takviye malzemeleri (E ve S cam, karbon-aramid lifleri) silindirler yardımı ile içerisinde reçine (çoğunlukla vinil reçine ve doymamış polyester) ve diğer katkı malzemelerinin olduğu bir daldırma kabından geçirilir. Bu işlem kalıp içerisinde de yapılabilir.
- 2- Reçine emdirilmiş takviye malzemeleri yapılacak üretime uygun hazırlanmış ~ 120-150 °C'deki ve çoğunlukla çelikten imal edilmiş kalıplardan geçirilir,

3- Kalıp çıkışında istenilen boyutlarda kesilerek imalat tamamlanmış olur.



Şekil 3.2. Pultruzyon işlemi sistemi [69].

Bu yöntemde en çok tercih edilen takviye elemanı E camı olsa da; tek ve çok uçlu veya bükümlü fitiller, karbon elyafı, sürekli keçeler, cam ve karbon elyaftan tüller, örgü kumaşlar kullanılmaktadır. Pultruzyon yönteminde genel olarak elyaf doğrultusunda yüksek mukavemet elde edilse de farklı türde takviye elemanlarının farklı doğrultularda ve birlikte kullanımı ile parçalara çok yönlü mukavemet özelliği kazandırılmaktadır.

Parçalarda mukavemet ve ısı dayanımı aranan durumlarda reçine olarak epoksiler tercih edilirken, duman yayılımının düşük olması gereken durumlarda fenolik reçineler kullanılmaktadır.

Reçine içerisine katılan diğer dolgu malzemeleri ve özellikleri

Çizelge 3.1'deki gibidir [70].

Çizelge 3.1. Reçine içerisine katılan diğer dolgu malzemeleri ve özellikleri [70].

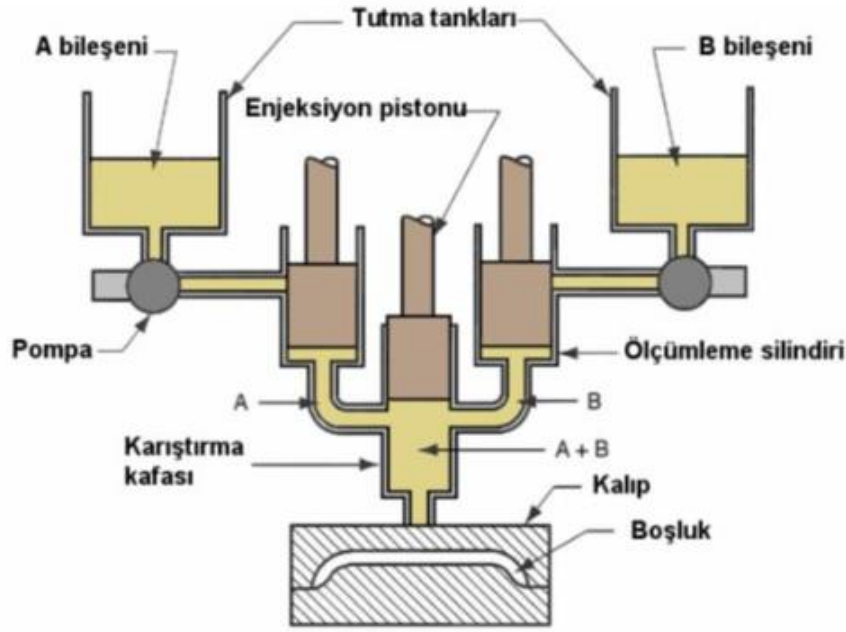
Katkı Malzemesi	Kullanım Amacı
CaCO ₃	<ul style="list-style-type: none">- Düşük maliyet- Opaklık
Al(OH) ₃ ve Sb ₂ O ₃	<ul style="list-style-type: none">- Alev geciktirme
Al ₂ SiO ₅	<ul style="list-style-type: none">- Yalıtım- Opaklık- Korozyon dayanımı- Yüzey düzgünlüğü

Takviye malzemelerinin ve kalıpların maliyetinin düşük olması, seri üretimde kısa sürede çok sayıda ve istenilen uzunlukta parçanın üretilebilmesi, nispeten düşük işçilik maliyeti gibi özellikleri ile pultrüzyon tekniği tercih sebebi olmaktadır. Ancak reçinenin kalıplara yapışabilmesi, kalıp içinde oluşan hatalarda müdahalenin gecikmesi dolayısı ile çok sayıda parçanın hatalı üretilmiş olması ve yaygın imalat türünde tek doğrultuda mukavemet sağlanması yöntemin dezavantajları arasındadır.

3.1.3. Reaksiyonlu Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

RIM, enjeksiyon kalıplamaya benzer görünsede bir takım kimyasal reaksiyonlar kullanılarak, daha karmaşık ve özel şekilli parçaların; daha düşük maliyetle, daha güçlü, sert, hafif olarak imal edilebilmesini sağlamaktadır.

Şekil 3.3’de şematik gösterimi verilen RIM yöntemi, farklı iki kimyasalın (izosiyanat ve poliol) ayrı kaplarda depolanarak, aralarında kimyasal birleşme oluşturulması için yüksek basınçla ve hızla bir çarpma mikseri yardımı ile karıştırılarak, düşük basınç altında bulunan yaklaşık 82 °C’ye ısıtılmış kalıba (çoğunlukla alüminyum) dökülmesi temeline dayanmaktadır. Bu kimyasal birleşme işlemi ısı veren bir şekilde gerçekleşmektedir. İmalat sonrası elde edilen son ürünlerin yoğunluğu çoğunlukla 0,2-1,6 arasında değişen değerler almaktadır. Birleşme işlemi öncesi kimyasallardan birine veya her ikisinde çeşitli katkı ve katalizörler eklenebilmektedir, bu şekilde yapılan kalıplamalara güçlendiricili reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama denmektedir.



Şekil 3.3. Reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama yöntemi [71].

RIM yöntemi kendi içerisinde iki farklı başlık altında detaylandırılabilir.

- 1- Yapısal Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi (S-RIM)
- 2- Takviye Reaksiyonlu Enjeksiyon Kalıplama (R-RIM)

3.1.3.1. Yapısal Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi (S-RIM)

S-RIM yöntemi ile kompozit üretimi, RIM yöntemine benzer olarak polioli ve izosiyanatın farklı kaplardan çarpmalı karıştırıcı içerisinde alınarak burada birleştikten takviye malzemesi serilmiş kalıplara alınarak yapının soğutulması prensibine dayanmaktadır [70]. İmalatta kullanılan kalıplarda sıcaklık değerleri düşük olduğundan alüminyumdan imal edilebilmektedirler. Emek yoğun bir sürece sahip olmayan yöntemde her 3-5 dk'da 1 parçanın imalatı sağlanabilmektedir.

Diğer RIM çeşitleri ile kıyaslandığında bu yöntemle, imalatta kırılmış lifler yerine sürekli lifler ya da hazır örülmüş fiber ağlar kullanıldığından yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip parçalar üretilebilmektedir. Ancak kullanılan takviye malzemelerinin kalıba reçine öncesi yerleştirilmesi gerektiğinden kalıp boyama işlemi uygulanamadığı için A sınıfı bir yüzey boya kalitesi istenen parçalarda kullanılması uygun görülmemektedir. A sınıfı yüzey kaplama kalitesi beklenen parçalarda SRIM ile aynı amaca yönelik kullanılan ancak elyaflar ile reçine birleşiminin kalıplama öncesi

yapılması ile kalıp içine kaplama uygulanmasına elverişli bir yöntem olan LFI kullanımı daha yaygındır.

Yapısal reaksiyon enjeksiyonlu kalıplamada elyafları ıslatmak için kullanılan reçinelerin viskozitelerinin düşük olması kalıba yayılımın düzgünlüğü ve buna bağlı olarak elyaf-reçine uyumu için büyük önem taşımaktadır. Bu uyumun sağlanabilmesi için en yaygın kullanılan reçine türü termoset poliüretandır.

Bu yöntem RTM ile benzer bir sürece sahip olsa da daha düşük sıcaklık ve basınç ihtiyacı duyduğundan çok daha düşük maliyetlerle yüksek performanslı üretim gerçekleştirilmesi sağlanabilmektedir.

3.1.3.2. *Takviye Reaksiyonlu Enjeksiyon Kalıplama (R-RIM)*

Bir başka ifade ile güçlendirilmiş reaksiyon enjeksiyonlu kalıplama da S-RIM yönteminin aksine kırılmış lifler kullanılmaktadır. Yapısındaki bu farklı liflerin varlığı dolayısıyla ile diğer yöntemlere kıyasla çok daha yüksek sıcaklıklara (~149 ile 177 °C) ihtiyaç duyulmaktadır.

R-RIM işlemi, farklı iki kimyasalın (izosiyanat ve poliol) ayrı kaplarda depolanarak, kompozit üretimi sırasında yüksek basınçla ve hızla bir çarpma mikseri yardımı ile karıştırılarak, kalıba dökülmesi temeline dayanmaktadır. Diğer RIM türlerinden farklı olarak bu işlemde reçine enjeksiyonu öncesi poliole kırılmış elyafların (0,2 ve 0,5 mm uzunluğunda) karıştırılmasıdır. Yaygın olarak cam elyaflar kullanılsa da, yeni nesil üretimlerde daha hafif ve güçlü bir yapıya sahip olan karbon elyafların kullanımı da yaygınlaşmaya başlanmıştır.

R-RIM yönteminde en yaygın kullanılan reçineler; epoksi, polyester, naylon ve poliüretandır. Ancak bunların içerisinde poliüretanlar daha sürede kurdukları ve düşük maliyetleri dolayısıyla ile daha fazla kullanım oranına sahiptir.

S-RIM işleminin aksine bu yöntemde elyaflar kalıba reçine ile birlikte enjekte edildiğinden kalıp içine boyama işlemi uygulanabilmekte ve buna bağlı olarak A sınıfı yüzey kaplama kalitesine sahip parçalar üretilebilmektedir.

3.1.4. **Pres Kalıplama Yöntemi**

Pres kalıplama, önceden hazırlanmış özel hamur bileşimlerin dişi ve erkek kalıpların

kullanıldığı ısıtılmış presler içerisinde belirlenmiş sınırlar içerisinde basınç uygulanarak şekillendirilmesi esasına dayanmaktadır. RTM ve enjeksiyon işlemlerine göre çok daha ince formda ürün elde edilebilmekte ve buna bağlı olarak kuruma esnasında parça üzerinde daha düzgün ısı dağılımı sağlanmakta artık gerilme oluşumunun önüne geçilebilmektedir. Bu imalat türünde ağırlıkça % 30-50 elyaf takviyesine sahip imalatlar yapılabilmektedir [72].

Pres kalıplama teknikleri dört farklı türde değerlendirilebilmektedir.

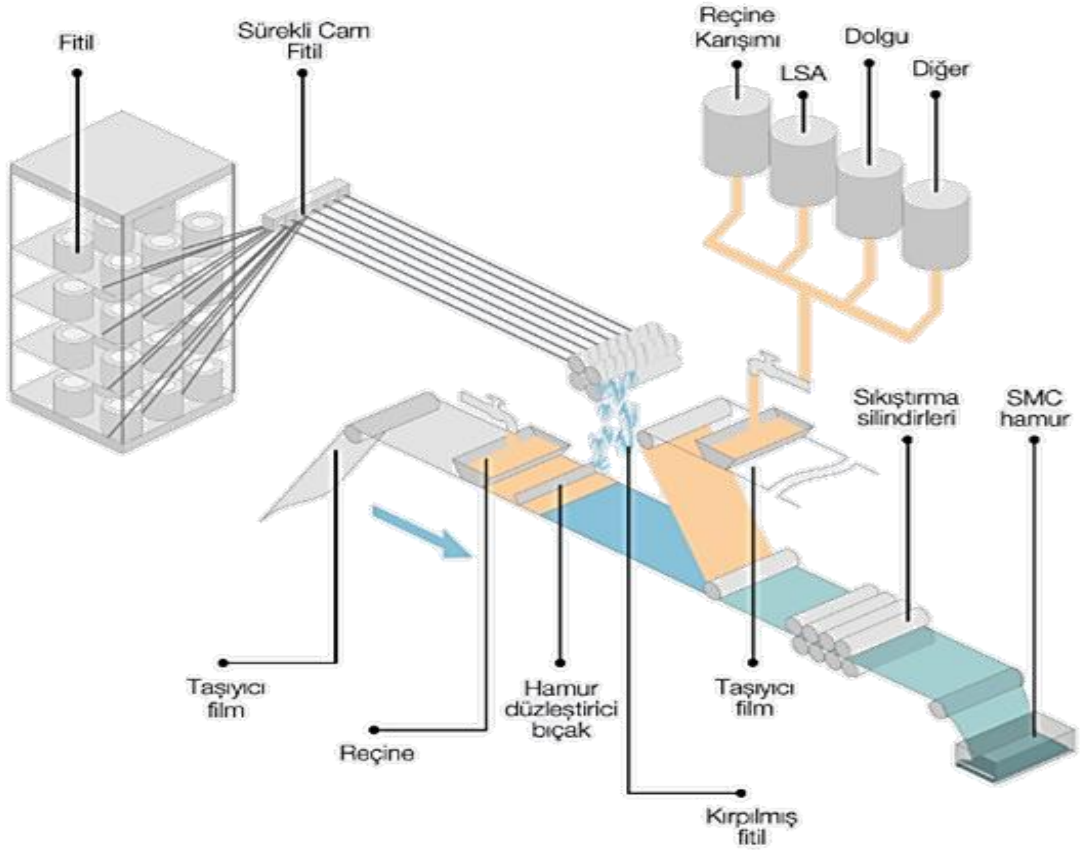
- 1- SMC (Sheet Moulding Compoud) Yöntemi
- 2- BMC (Bulk Moulding Compoud) Yöntemi
- 1- TMC Yöntemi
- 2- Takviyeli Termoplastik Levha Yöntemi (GMT)

3.1.4.1. SMC (Sheet Moulding Compoud) Yöntemi

Pres kalıplamada en çok kullanılan hamur bileşimlerinden biri SMC hamurudur. SMC hamuru Şekil 3.4'de gösterildiği gibi; hareket halindeki alt ve üstten taşıyıcı bantlar üzerine, içerisine gerekli katkı malzemeleri ilave edilerek oluşturulan reçine karışımının sürülmesi ve bu bantların arasına kırılmış takviye elemanlarının yerleştirilerek gerekli reçine-takviye birleşimin sağlanması ve hava kabarcığı oluşumunun engellenmesi için ısıtılmış ezici silindirlere geçirilerek bantların sıkıştırılması prosesi ile gerçekleştirilmektedir. İşlem sonrası oluşturulan preprek reçinenin uçmasını engellemek ve istenilen yoğunluğun sağlanması için rulo haline getirilerek 20-23 °C sıcaklıktaki depolarda bekletilir.

SMC hamuru, basınç altında ısıtılmış (120-170 °C) preslerde basınç (140 – 170 bar) etkisi altında kalıplar yardımı ile preslenir. İmalat süresi son ürünün kalınlığı, reçine karışımı ve kalıp sıcaklığına göre 1-4 dk'da tamamlanmaktadır.

SMC hamurundan imal edilen ürünler oldukça hafif olmalarının yanında oldukça sert ve yüksek dayanıma sahip olmaktadır. Bunun yanında SMC üretiminde kullanılan kalıplar çelik kalıplara oranla daha uygun maliyete sahip olduğundan bu yöntemde üretim maliyeti de oldukça düşüktür.



Şekil 3.4. SMC ile kompozit üretimi [73].

SMC-R: Kırılmış elyaflar bantlar üzerine rastgele dağıtılır. Ürün özellikleri tüm yönlerde aynıdır.

SMC-C: Bantlar arasında sürekli elyaflar yerleştirilir. Elyaf doğrultusunda yüksek mukavemet elde edilirken diğer yönlerde dayanımı zayıftır.

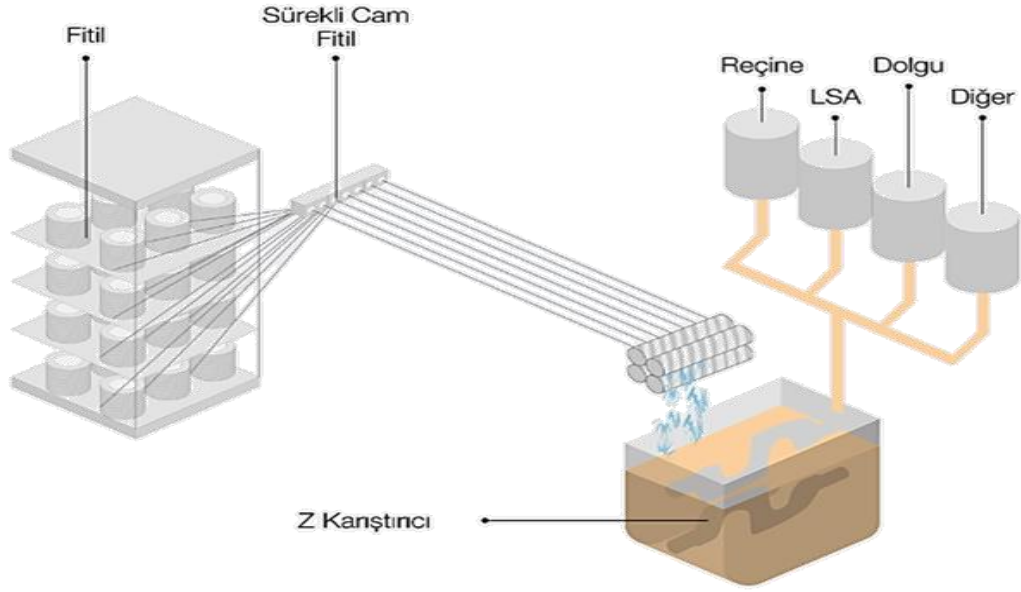
SMC-C-R: SMC-R ve SMC-C'nin birleşimidir. Hem kırılmış hem sürekli elyaflar kullanılır, bundan dolayı tüm yönlerde yüksek dayanım görülmektedir.

SMC-D: ≥ 10 cm uzunluğunda kesilen kırılmış elyafların tek yönde düzgün dağıtılması ile oluşturulur. Elyaf doğrultusunda yüksek mukavemet elde edilir ancak bu değer SMC-C'den daha düşüktür. SMC-R ile birleştirilebilir.

3.1.4.2. BMC (Bulk Moulding Compound) Yöntemi

Şekil 3.5'te imalat şeması yer alan BMC hamuru; reçine, katalizör, toz formda dolgu maddesi, kırılmış elyaf, kaydırıcı ve performans arttırıcıların bir mikserde karıştırılması ile elde edilmektedir. Elde edilen hamur farklı miktarlarda tartılarak plastik poşetlerde paketlenerek muhafaza edilmektedir. BMC hamur karışımı içerisinde

min 6 mm, max 12 mm uzunluğunda kırılmış cam, karbon, aramid elyaf kullanımı yaygındır. Uzunluğun 12 mm ile kısıtlandırılmasının sebebi uygulamada karıştırıcıda elyafların zarar görebilmesi ve reçine ile tam ıslanmanın sağlanamamasıdır.

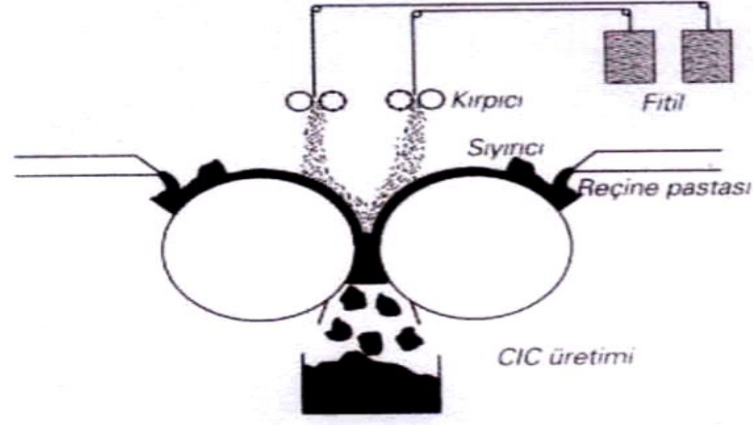


Şekil 3.5. BMC hamur imalatı [74].

Elde edilen bu hamur BMC hamurunda olduğu gibi ısıtılmış preslerde basınç (1,4-5,6 MPa) altında sıkıştırılarak son ürün elde edilmektedir. BMC hamuru ile yapılan üretimlerde yüksek ısı dayanımı ve mukavemet özellikleri ile birlikte sert bir yapı elde edilir. Ancak hamur hazırlanırken elyaf miktarının ve dağılım dengesinin düzgün sağlanamaması durumunda bu değerlerde düşme görülebilmektedir [75],[76].

3.1.4.3. TMC Yöntemi

TMC hazır kalıplama bileşimi, imalat öncesinde reçine ve diğer katkı malzemelerinin birleştirilmesi ile elde edilen macunun ve imalat esnasında kırılan elyafların dönel silindirler üzerine akıtılarak basınç altında birleştirilmesi ile oluşturulur. Üretilen TMC hamuru yine silindirler yardımı ile istenilen kalınlıkta şeritler haline getirilerek özellikle basınçlı kalıplama, TMC ve enjeksiyonla kalıplamada yaygın kullanılmaktadır. Şekil 3.6'da hamur üretimi şeması yer almaktadır.

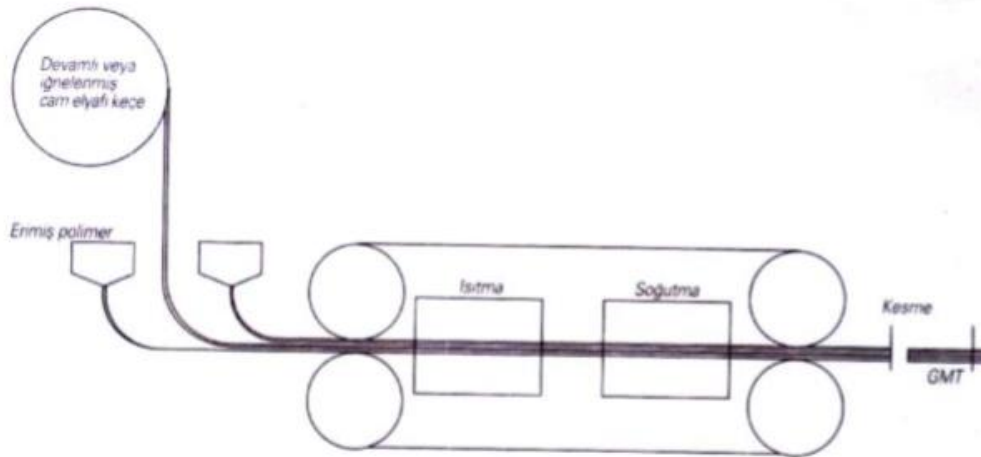


Şekil 3.6. TMC hamur üretimi [23].

3.1.4.4. Takviyeli Termoplastik Levha Yöntemi (GMT)

GMT plakaları, Şekil 3.7’de gösterildiği gibi kırılmış veya sürekli elyafların önceden hazırlanmış reçine (polipropilen, PET, PBT, PC vb.) karışımlarının üzerine sürüldüğü hareketli bantlar üzerine dökülerek silindirlerin arasından geçirildiği bir imalar işlemi ile üretilmektedir. Silindirler içerisinden geçirilen bantlar önce ısıtma ardından soğutma işlemine tabi tutulduktan sonra istenilen boyutta kesilerek GMT plakaları hazırlanmış olmaktadır.

Karmaşık yapıdaki parçaların üretiminde kırılmış elyaflar tercih edilirken, eğilme dayanımı, mukavemet ve sertlik değerlerinin iyi olması gereken parça imalatlarında doğru yönlendirilmiş sürekli elyaflar tercih edilmektedir.



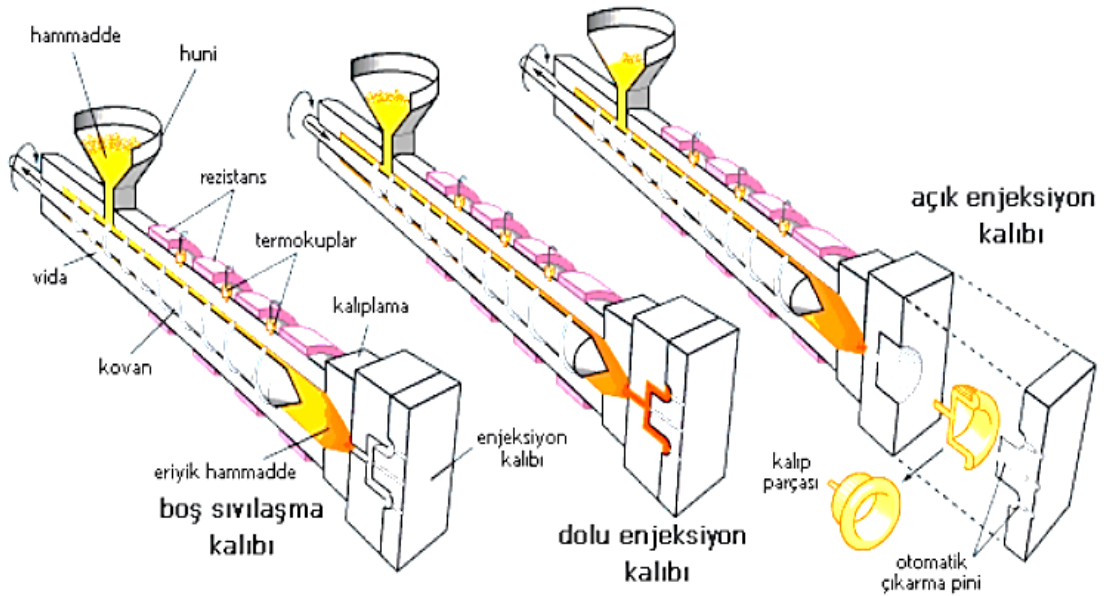
Şekil 3.7. GMT plaka imalatı [23].

Hazır GMT plakaları daha öncesinde ısıtılmış pres kalıplarına yerleştirilerek yaklaşık

100–200 bar basınç altında preslenmekte ve 1-3 dk arasında bekletilerek kompozit imalatı tamamlanmış olmaktadır. Bu yöntem ile üretilen parçalarda yüksek darbe direncinin yanında iyi sertlik değerleri de elde edilmektedir.

3.1.5. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

Enjeksiyon ile kalıplamada termoset ve termoplastik malzemeler kullanılabilirken ısı ile kolay şekillenebilme özelliklerinden dolayı termoplastikler daha çok tercih edilmektedirler. Termoplastik malzemeler besleme haznesine alınarak sonsuz vidaya dökülür. Sonsuz vida ile ısıtıcıya gönderilen malzeme burada erime ısısına getirilerek enjeksiyon noktasına itilir. Dişi ve erkek kalıplardan oluşan ve kapalı konumda yer alan prese enjekte edilen akışkan haldeki termoplastik malzeme, soğuyana kadar kalıpta bekletilir ve soğuma sonrası kalıp basıncı kaldırılmakta ve imalat işlemi tamamlanmaktadır. Şekil 3.8’de gösterilen enjeksiyon yöntemi ile 15-23 kg arasında ağırlığa sahip parça imalatları gerçekleştirilebilmektedir [77]. Erimiş plastiklerin değişken akma davranışları dolayısı ile enjeksiyon süresi ise belirlenmesi zor parametrelerden biridir [78].

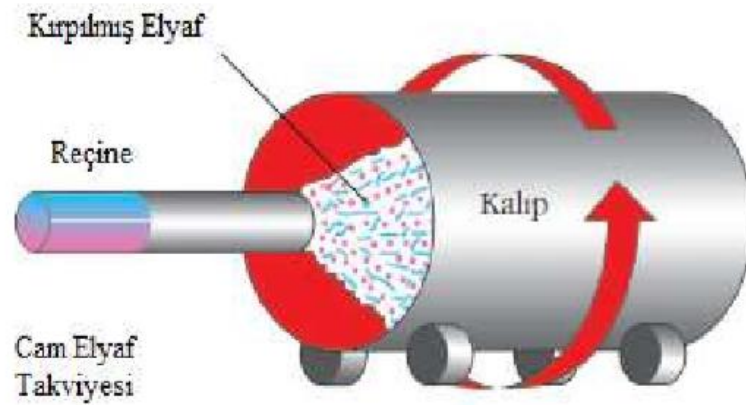


Şekil 3.8. Enjeksiyon kalıplama sistemi [79].

Karışık şekilli parçaların üretilmesi, artan atık termoplastiklerin eritilerek tekrar kullanılabilmesi, emek yoğun olmaması enjeksiyonla imalatı tercih sebebi kılarken; kalıp maliyetinin yüksek oluşu yöntemin dezavantajıdır.

3.1.6. Santrifüj (Savurma) Kalıplama Yöntemi

Santrifüj kalıplama yönteminde kırılmış elyaf ve reçine karışımı Şekil 3.9’da gösterildiği gibi hızla dönen kalıplar içerisine konulur. Dönme esnasında oluşan merkezkaç kuvveti dolayısı ile kalıp içerisine konan malzeme homojen bir şekilde kalıp iç yüzeyini kaplar. Kaplama sonrası soğuyan malzeme kalıptan çıkartılarak imalat işlemi tamamlanmaktadır. Kalıbın dönme işlemi düşey ve yatay düzlemde tercih edilebilmektedir. Ayrıca imalat öncesi kalıp iç yüzeyi katkısız reçine ile kaplanarak üretilen kompozit parçanın mekanik dayanımı artırılabilir.



Şekil 3.9. Santrifüj kalıplama [73].

Bu yöntemle kompozit parçanın kalıp içine temas eden yüzeyinin düzgün olması ve kalıp çıkışının kolaylaşması için ayırıcı-tül kullanılması gerekmektedir. Santrifüj kalıplama ile boru ve tank imalatı kolayca yapılabilirken büyük boyutlu imalatlarda kalıbın döndürülmesi ise oldukça zor olmaktadır.

3.1.7. Torbalama Yöntemi

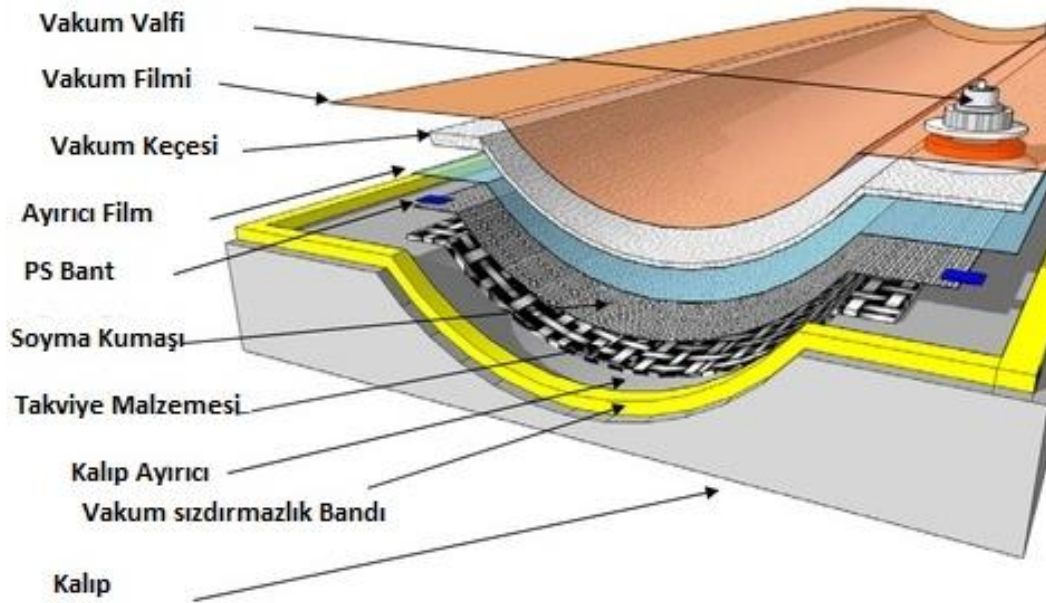
El yatırması ve püskürtme ile kompozit imalatına benzer yönleri bulunan bu kalıplama türünde basınç ve sıcaklık etkisi altında kuruma prosesi uygulanmaktadır. Torbalama ile kalıplama sıcaklık basınç etkisine göre 2 şekilde incelenebilir.

- 1- Vakum torbası
- 2- Otoklav uygulama

3.1.7.1. Vakum Torbası

Şekil 3.10'da katman detayları verilen vakum torba uygulaması işlem basamakları aşağıdaki gibidir;

- Kalıp iç yüzeyine ayırıcı film tabakası sürülür,
- Ayırıcı film üzerine tercih edilen doğrultu ve miktarda takviye elemanı yerleştirilir,
- Takviye elemanlarının üzerine elle ya da püskürtme ile reçine karışımı uygulanır,
- Takviye elemanlarının üzerine tekrar ayırıcı bir film ve hava kabarcığı oluşumunu engelleyecek özel bir kumaş yerleştirilir,



Şekil 3.10. Vakum torbası katmanları [80].

- Reçine uygulanan alanın üzeri dış ortamdan tamamen izolasyon sağlanacak şekilde plastik bir torba ile kapatılır ve torbanın kenarları hava çıkışını engelleyecek şekilde yapışkanlarla kapatılır,
- Dışarıdan uygulanan vakum işlemi ile torba içerisindeki hava alınır ve kuruma tamamlanana kadar beklenerek imalat işlemi tamamlanır.

3.1.7.2. Otoklav Prosesi

Otoklav prosesi vakum torbasına benzer bir uygulamasına sahiptir. Ancak bu kalıplama türünde sadece vakum basıncı değil dış basınç ve sıcaklık etkisinden de

yararlanılmaktadır. Şekil 3.11’de sanayi tipi otoklav fırınlarına örnekler verilmektedir. Otoklav prosesi uygulama basamakları aşağıdaki gibidir;

- Kalıp içerisine önceden reçine emdirilmiş prepregler yerleştirilir,
- Kalıbın üzeri vakum torbalama uygulamasındaki gibi torbalanır,
- Hazırlanan kalıp otoklav fırınına yerleştirilerek fırın içi basınç ve sıcaklık etkisi ile kürlenir,
- Kürlenme tamamlandığında malzeme kalıptan çıkarılarak imalat tamamlanır.



Şekil 3.11. Sanayi tipi otoklav fırınları [81].

Otoklav kalıplamada fırın içerisinde karşılanması gereken basınç torba içerisinde vakumlanarak sağlanabileceği gibi fırının içerisinde torba üzerinde dış basınç oluşturularak da uygulanabilmektedir. Bu dış basınç hava ile veya azot gazı kullanılarak oluşturulmaktadır. Azot gazı kullanımı yanma dayanımından kaynaklı olarak daha yaygındır.

3.1.8. Yuvarlanma ile Sarma (Roll Wrapping) Metodu

Rulo sarma olarak da bilinen bu yöntem daha çok yüksek dayanıma sahip boru imatlarına kullanıldığı gibi bisiklet gövde ve salıncak elemanları, golf sopaları ve olta gibi pek çok malzemenin imalatında da kullanılmaktadır. Bu yöntem ile üretilen borular klasik çelik borulara oranla çok daha hafif ve mukavemetli bir yapıya sahip

olmaktadırlar. Şekil 3.12’de roll wrappig ile üretilen boru görselleri yer almaktadır.

Yuvarlanma ile sarma metodunda yaygın olarak önceden reçine emdirilerek hazırlanmış prepreg levhalar kullanılmaktadır. Bu levhalar S-cam, E-cam, karbon veya kevlar elyaf kullanılarak imal edilebilmektedir. Yaygın olarak birim uzunlukta oldukça düşük ağırlık ve ince cidar beklentilerinin karşılanması adına karbon elyaf kaynaklı prepregler kullanılmaktadır. İstenilen çapta bir kalıp (mandrel) üzerine işlem sonrası ayrılmayı kolaylaştırmak için kalıp ayırıcı uygulanır. Ayırıcı üzerine istenilen doğrultu ve yoğunlukta elyaf dağılımı sağlayacak şekilde ve oldukça sıkı bir şekilde prepreg levhaların sarımı gerçekleştirilir. Bu işlem el ile yapılabileceği gibi çeşitli ekipmanlar kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Kullanılan prepreg levhaların sarım doğrultusuna göre kompozit ürüne kazandırdıkları özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir.

- Mandrel boyunca yerleşim: Eğilme dayanımı,
- Mandrelle 90° açı yapan sarım: Basınç ve gerilim dayanımı,
- Mandrelle 45° açı yapan sarım: Burulma dayanımı.



Şekil 3.12. Roll wrappig ile imal edilen boru örneği [82].

Son aşamada elyaf üzeri büzülme bantları ile sarılır, bu işlemde her turda en fazla 1-2 mm ilerleme sağlanması ve mümkün olan en sıkı şekilde sarım yapılması oldukça önemlidir. Sarım işlemlerinin tamamlanmasının ardından malzeme kürlenme işlemi için fırına konulur. Burada sıcaklığın artması ile birlikte malzemede genişleme, dış bantta ise büzüşme başlaması ile malzeme üzerinde bir basınç meydana gelir. Bu basınç ile

reçine ve takviye malzemesinin tam birleşmesinin yanında sarım işleminde oluşabilecek mukavemeti düşüren hav boşlukları en az seviyeye indirilmiş olmaktadır.

Fırınlama işlemi sonrası malzeme mandrel üzerinden sıyılır ve büzüşme bantları sökülerek imalat işlemi tamamlanır.

Yuvarlanma ile sarma, oldukça düşük ağırlığa sahip, elyaf sarım konfigürasyonunda özelleştirilebilen ve düşük maliyetli ürün imalatı yapılabilen yenilikçi bir kompozit imalat metodudur.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmada CFRP boru üretimi için UD karbon epoksi prepreg malzemeden belirlenen farklı açı kombinasyonlarında parçalar hazırlanmıştır. Her bir açı takımından 3'er adet olacak şekilde toplam 48 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler sarım sonrasında ısıtma sistemi 220 volt şebeke hattında çalışan 2 kW gücünde elektrikli bir ısıtıcı ile kontrollü olarak kütleme işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin ısıtılması sırasında homojen ısı dağılımı sağlanabilmesi için bir termal kamera kullanılmıştır. Böylece ürünlerin sıcaklıkları anlık olarak gözlemlenmiş ve kür çevrimine göre ısıtma sağlanmıştır.

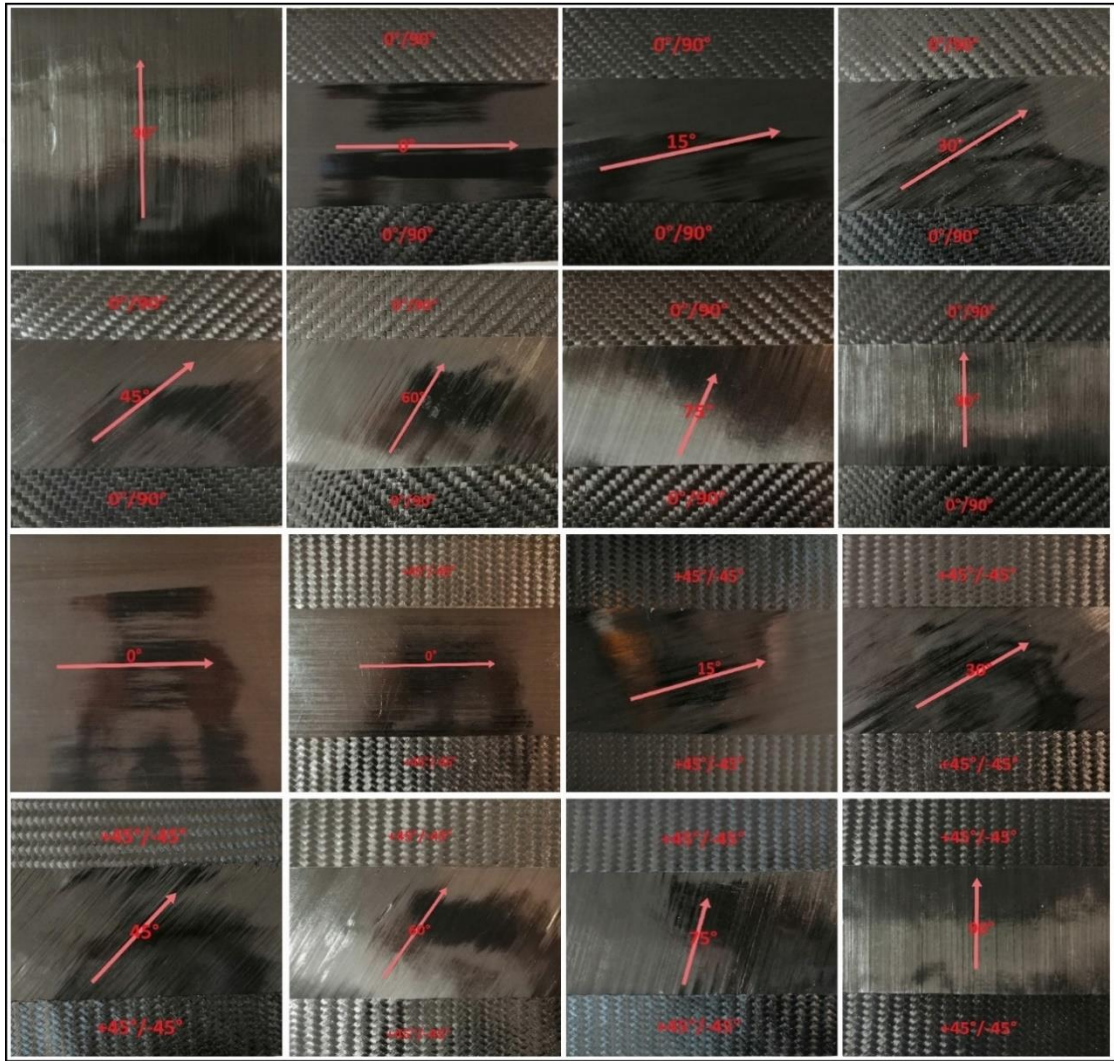
4.1. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANIŞI

Boru üretiminde kullanılmak üzere karbon fiber epoksi prepreg malzemelerden 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° açılarda ve silindir çevresini iki kat çevreleyecek şekilde parçalar kesilmiştir. Hazırlanan levhalara, sarım sırasında kesintisiz birleşimin sağlanması, kütleme ve test esnasında oluşabilecek malzeme hasarların engellenmesi için ön birleştirme işlemi uygulanmıştır. Öncelikle sadece 0° ve sadece 90° açındaki UD prepreg malzemeler kalıba sarılarak üretim yapılmıştır. Ancak daha test aşamasına geçilemeden üçer tekrarlı olarak üretilen ürünlerin tamamında çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemeleri gözlemlenmiştir. Bu yüzden birleştirme işleminde orta katmanlar 0° ile 90° arasındaki açı değerlerindeki parçalardan sarılırken ön ve arka katmanlarda ise $45^\circ/-45^\circ$ ve $0^\circ-90^\circ$ kesimli parçalardan sarılmıştır. Bu sarım oryantasyonları $[0/90/x]_s$ ve $[0/90/x]_s$ şekilde isimlendirilmiştir. Burada "x" orta katmana sarılan UD prepreglerin yönlerini gösterirken, "s" indisi sarımın simetrik şekilde yapıldığını göstermektedir. Sarımı yapılan bu katmanların kombinasyonlarına ait bilgiler

Çizelge 4.1'de verilmiştir. Birleştirilmiş katmanlara ait açıklamalı görseller Şekil 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Boru üretiminde kullanılan katman kombinasyonları.

		Orta katman						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Ön-arka katman	0°	✓						
	90°							✓
	45°/-45°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	0°/90°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓



Şekil 4.1. Farklı fiber açısı oryantasyonlarında hazırlanan katman görselleri.

16 mm çapında alüminyum kalıp (mandrel) üzerine işlem sonrası üretilen borunun kalıp yüzeyinden rahatça ayrılabilmesi için ChemTrend Chemlease PMR EZ isimli endüstriyel bir kalıp ayırıcı uygulanmış ve hazırlanan katmanlar 4 kat ve 1.2 mm et kalınlığı sağlanarak, ayırıcı uygulanan kalıp üzerine oldukça sıkı bir şekilde sarılmıştır.

Son aşamada sarımı tamamlanan kalıp üzerine ısıt bantlar sarılmıştır.



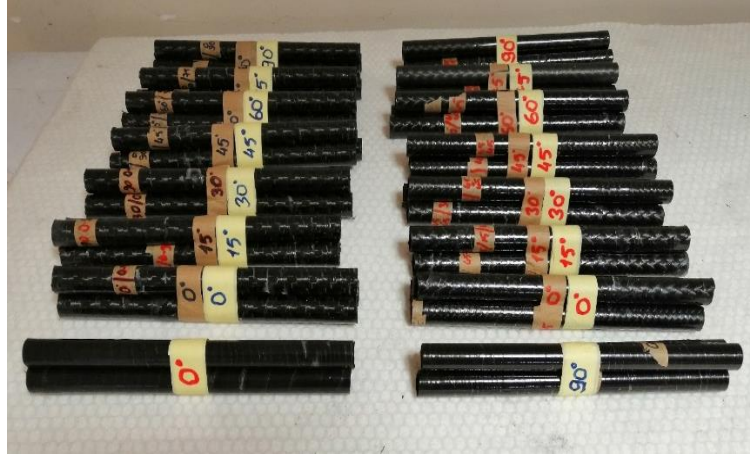
Şekil 4.2. Kalıp üzerine büzülme bandı uygulaması ve son ürün.

Bu işlemde her turda en fazla 1-2 mm ilerleme sağlanması ve mümkün olan en sıkı şekilde sarım yapılmasına dikkat edilmiştir. Isıt bantların kalıp üzerine sarımı, kürlenmeye hazır numune ve kürlenmiş numune örneği Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

4.2. DENEY NUMUNELERİNİN KÜRLEME İŞLEMİ

Sarımı tamamlanan karbon fiber epoksi prepeg katmanların kürlenmesi, tasarlanan ve üretilen fırın ile gerçekleştirilmiştir. Bu prepeg malzemelerin kullanımı sırasında en çok dikkat edilmesi gereken husus kontrollü ve ayarlı bir ısıtma çevrimini sağlamaktır. Bu yüzden ısıtma hızı üreticinin verdiği ölçüler rehberliğinde belirlenmiş ve malzemenin her yeri yaklaşık olarak eş sıcaklıkta olacak şekilde ayarlanmıştır. Malzemelerin eş sıcaklık dağılımlarının ölçümü ve ayarlı sıcaklık kontrolü için FLIR E6 temassız termal kamera kullanılmıştır.

Kürleme işlemi tamamlanan numuneler, üzerlerinden büzülme bantları sökülerek kalıptan çıkartılmış ve elyaf yönlenmelerine göre gruplanmıştır. Deney numunelerine ait görseller Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Deney numuneleri görsel.

Hazırlanan numuneler dış yüzeyindeki pürüz ve hataların testler sırasında herhangi bir çentik etkisine maruz kalmaması amacı ile sırasıyla 120'den başlayarak 220, 340, 600, 1000, 1200, 1500 ve 2000 kum zımpara olacak şekilde sulu zımparalama işlemine tabi tutulmuştur.

4.3. ÜÇ NOKTA EĞİLME DENEY DÜZENEGİ

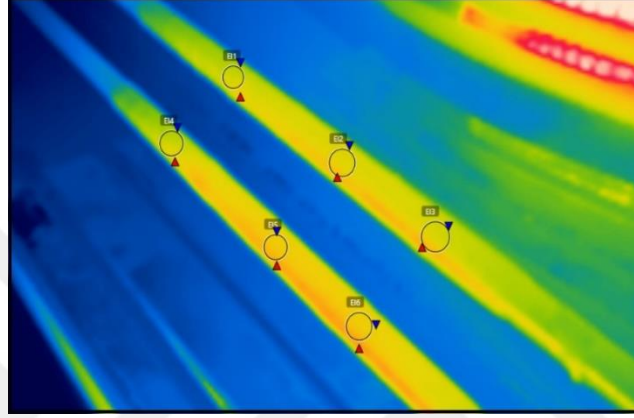
Üç nokta eğilme deneyi, Orman Fakültesi Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği bölümü laboratuvarında yer alan, eğme testi cihazında yapılmıştır. Üç nokta eğilme deneylerinde, numune uzunluğu (L) yüksek alınarak eğilme etkisinin artması amaçlanmıştır. Bu amaçla deneylerin tamamında L/D oranının (D: numune çapı) 7, mesnet ve mandrel çaplarının numune çapıyla eşit olmasına özen gösterilmiştir. Deneylerin yapıldığı üç nokta eğilme deney düzeneği Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Üç nokta eğilme test düzeneği.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

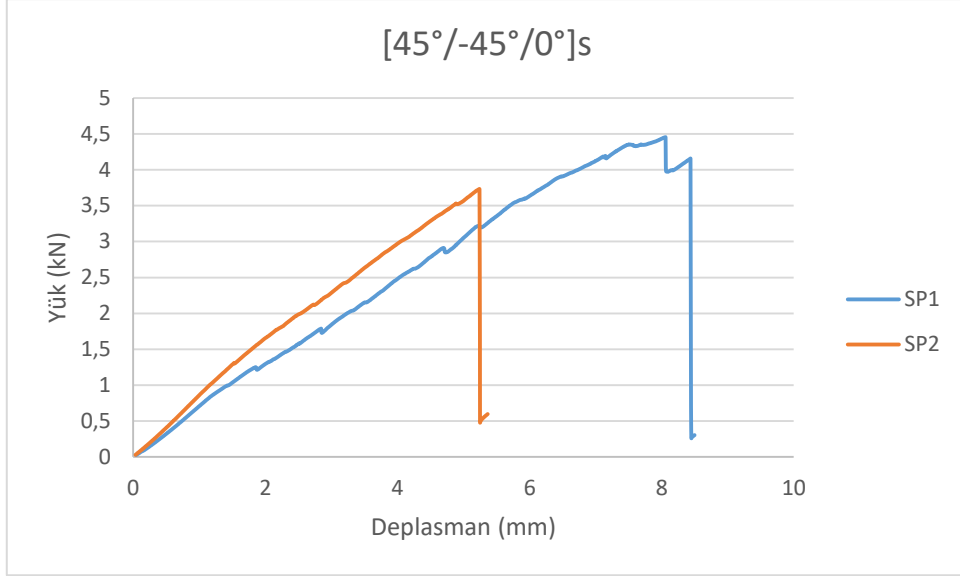
Isıtma sırasında malzemelerin kendi içinde ve birbirleri ile sıcaklıkların ilişkilerini gözlemlemek amacıyla deneyler sırasında termal görüntüler alınmıştır. Alınan termal görüntü Şekil 5.1’te verilmiştir.



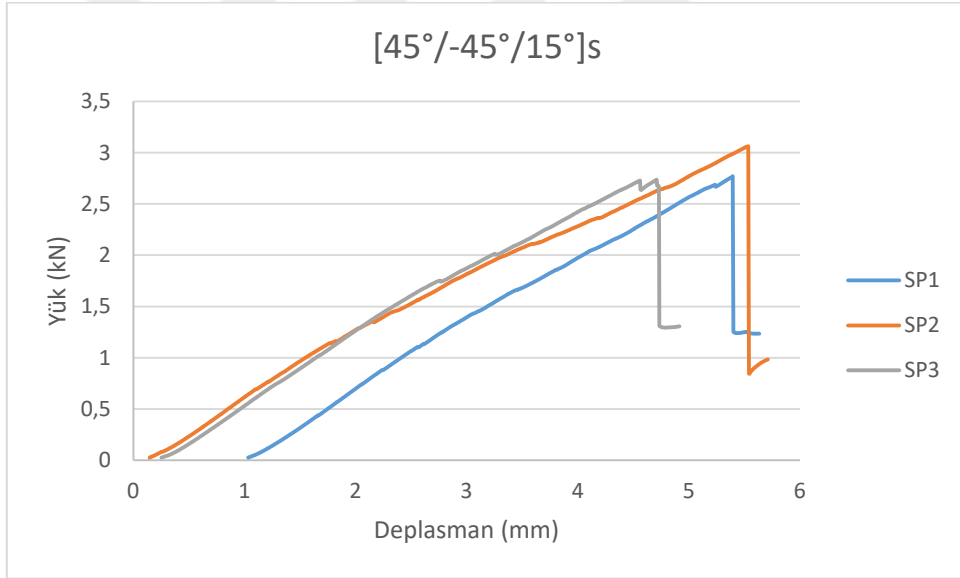
Şekil 5.1. FLIR E6 temassız termal kamera görüntüleri.

Alınan termal görüntüler dijital platformda incelenmek üzere Flir Tools yazılımına aktarılarak bölgesel ısıtma değerleri incelenmiştir. Bunun için görüntülerde her bir ürünün yüzeyinde 3 er adet dairesel bölge seçilerek bu bölgelerin en yüksek, en düşük ve ortalama sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir. Bu değerler dikkate alınarak ısıtma işlemi eş sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.

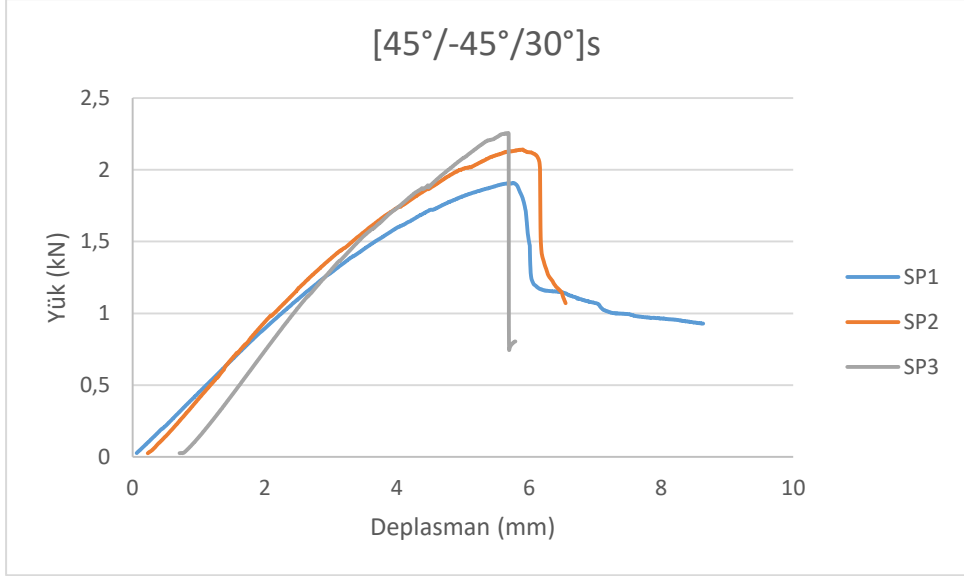
Çalışmada farklı fiber yönleri belirlenerek 16 farklı dizilimde olmak üzere üçer deney tekrarı yapılabilecek şekilde 48 adet karbon fiber numune üretilmiştir. Üretilen numuneler üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Böylece her bir malzemelerin taşıdığı maksimum yükler ve bu yükleri taşıırken meydana gelen deplasman değerleri tespit edilmiştir. Her dizilim türü için tespit edilen deplasman eğrileri Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’te ayrı ayrı gösterilmiştir.



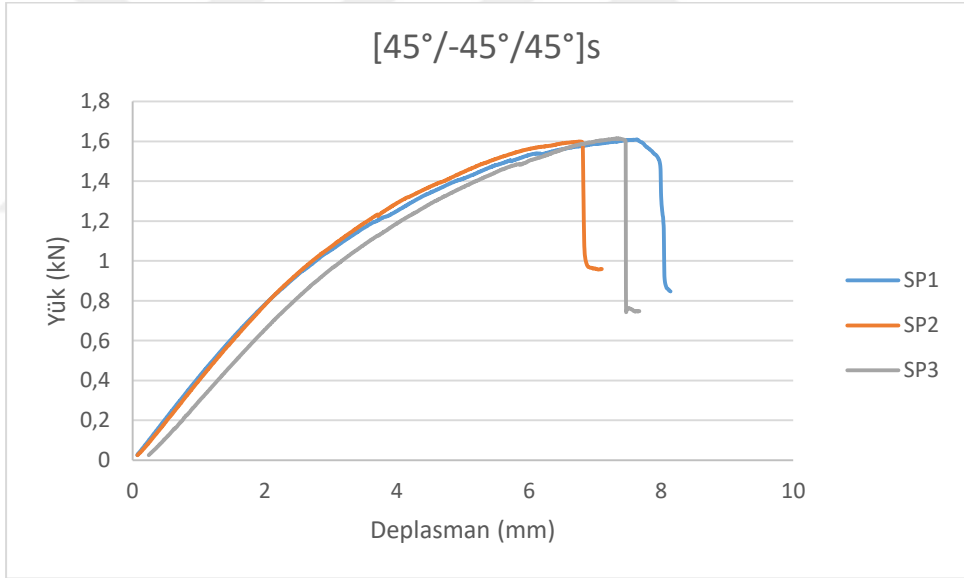
Şekil 5.2. [45°/-45°/0°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.



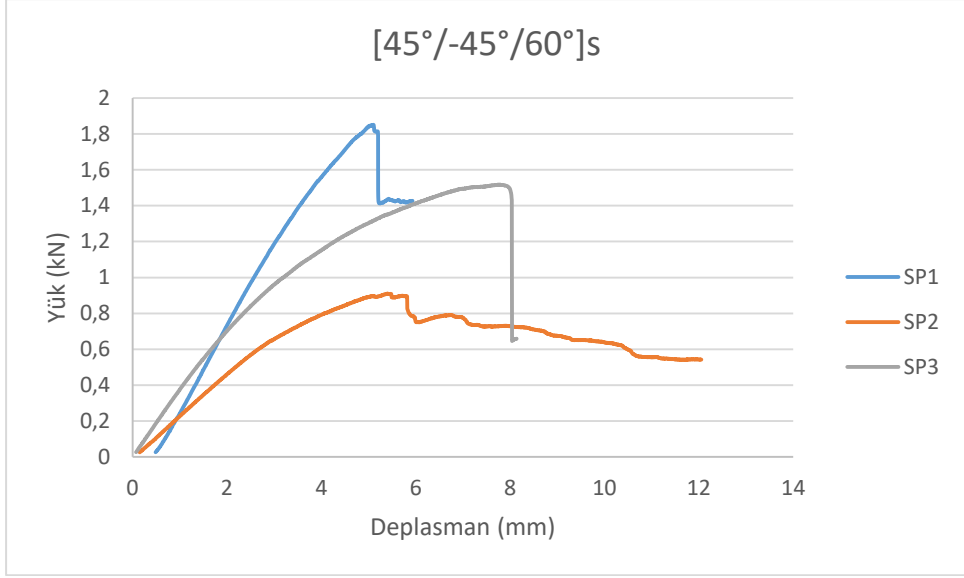
Şekil 5.3. [45°/-45°/15°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.



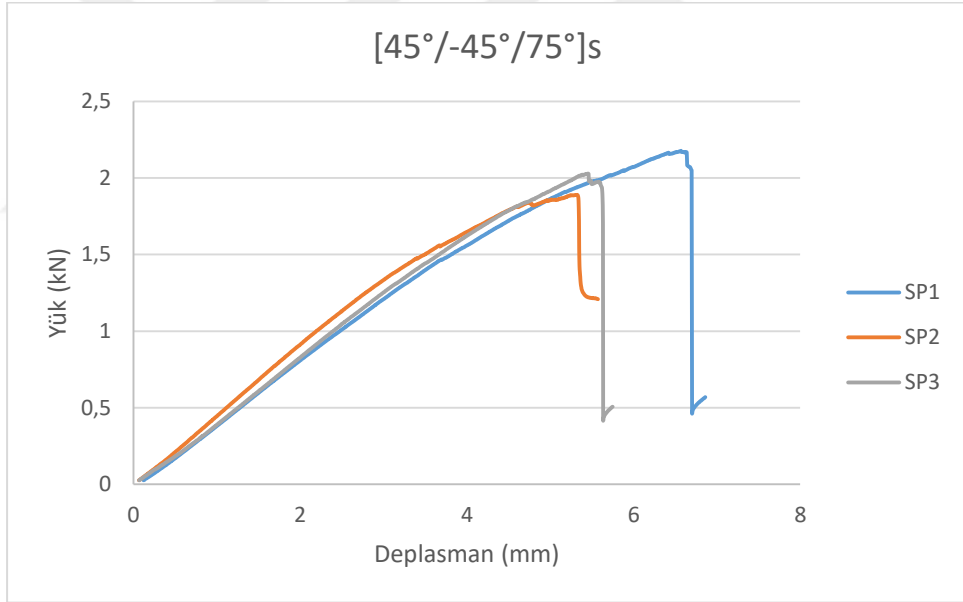
Şekil 5.4. [45°/-45°/30°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.



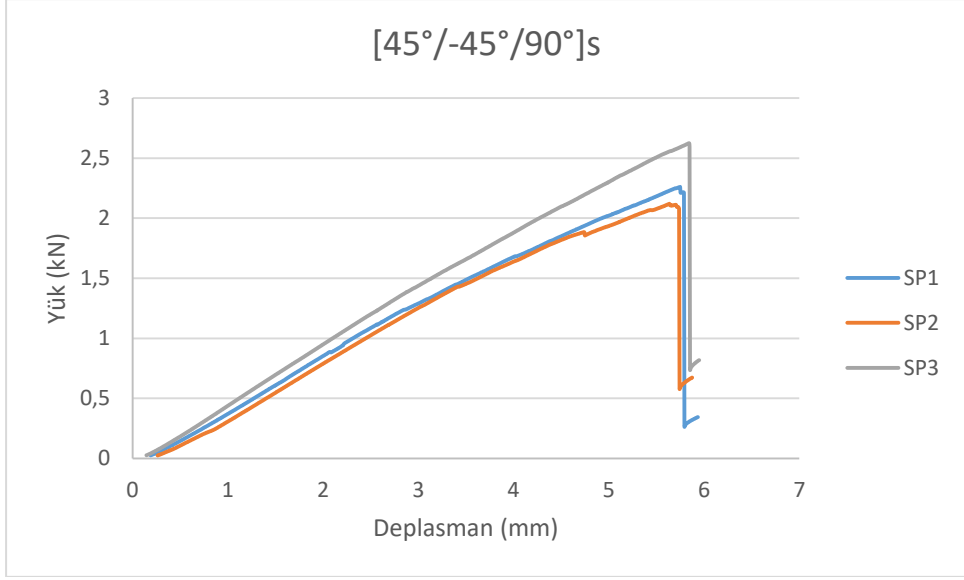
Şekil 5.5. [45°/-45°/45°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.



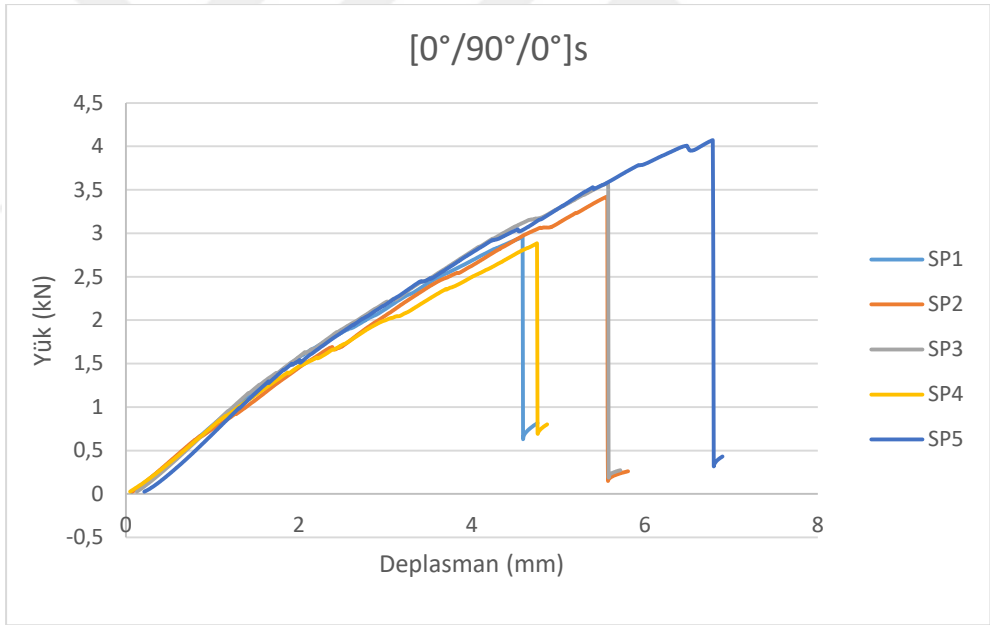
Şekil 5.6. [45°/-45°/60°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.



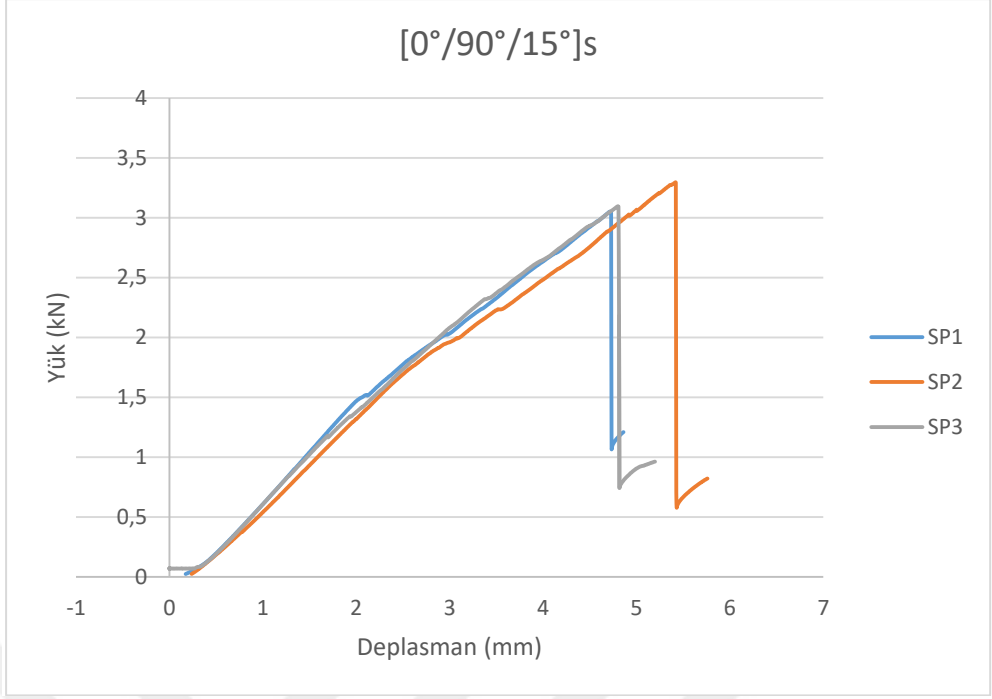
Şekil 5.7. [45°/-45°/75°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.



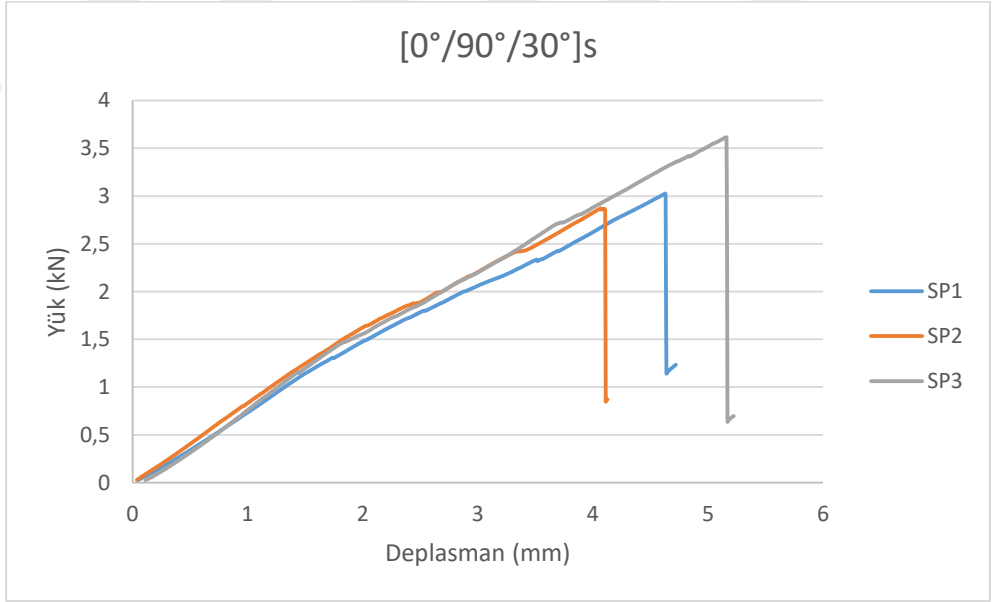
Şekil 5.8. [45°/-45°/90°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.



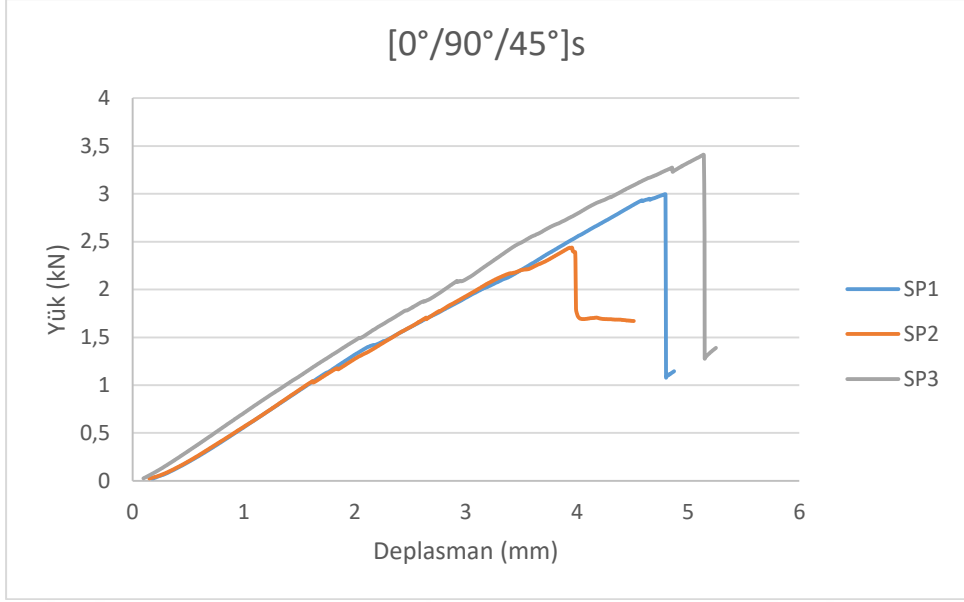
Şekil 5.9. [0°/90°/0°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.



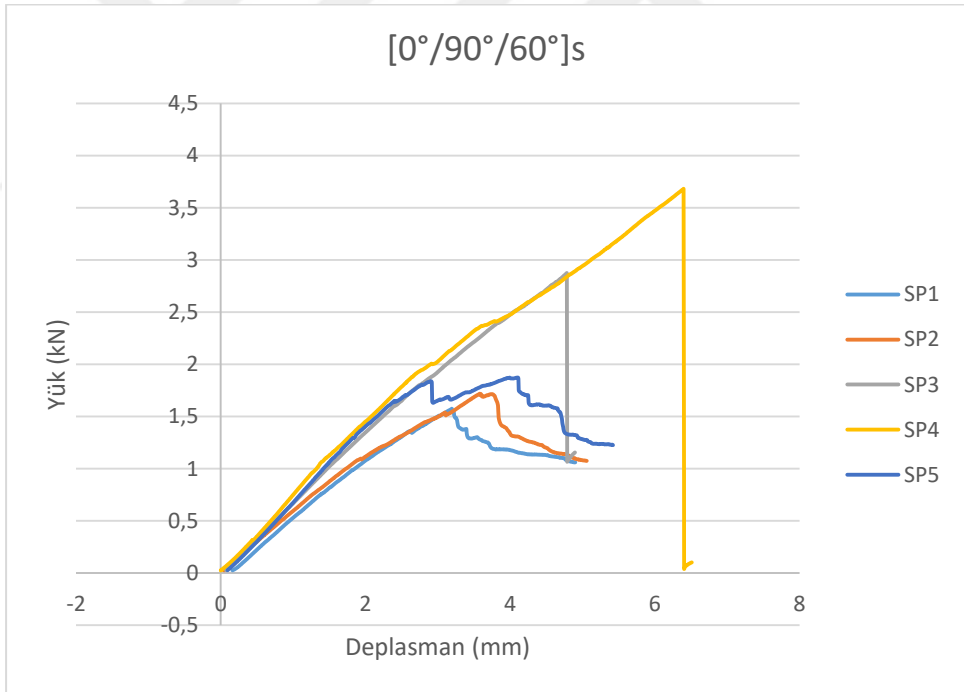
Şekil 5.10. [0°/90°/15°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.



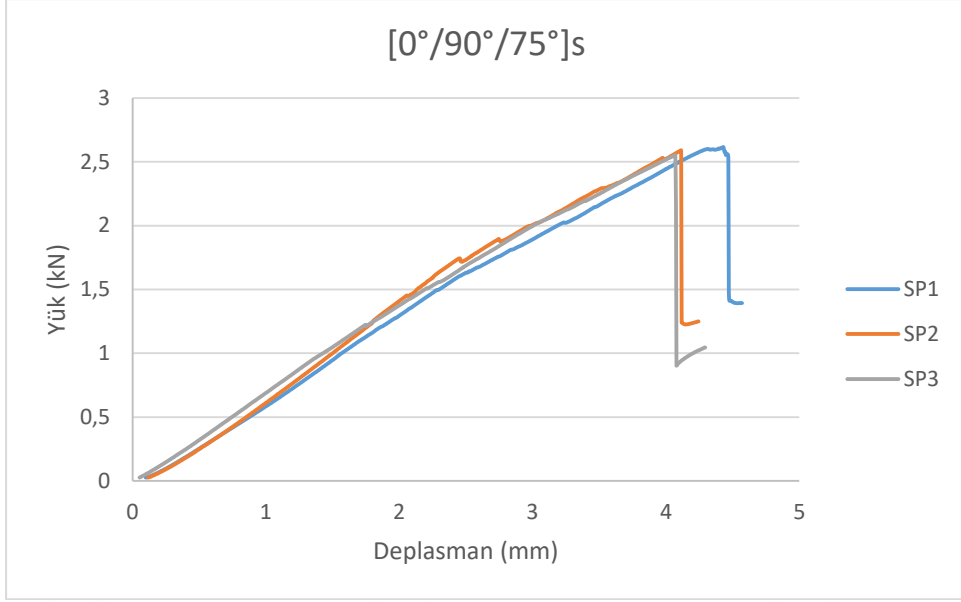
Şekil 5.11. [0°/90°/30°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.



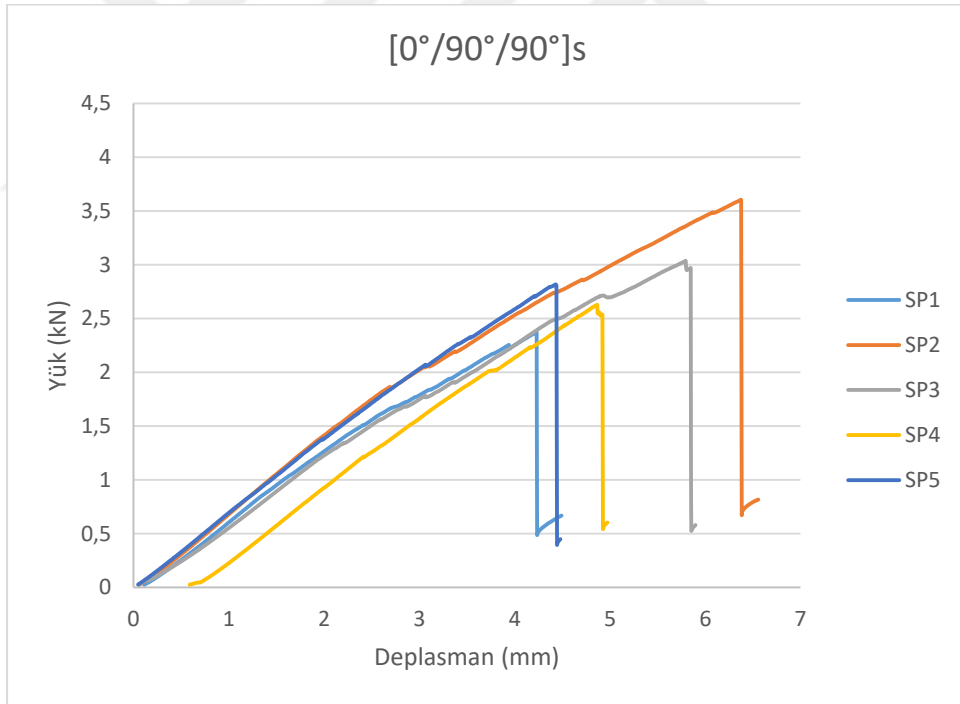
Şekil 5.12. [0°/90°/45°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.



Şekil 5.13. [0°/90°/60°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.

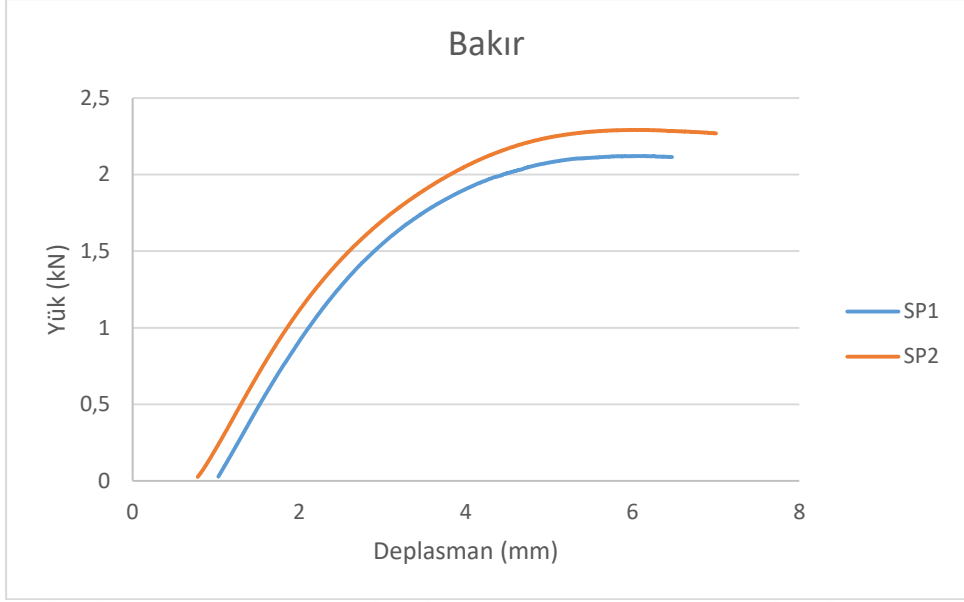


Şekil 5.14. [0°/90°/75°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.

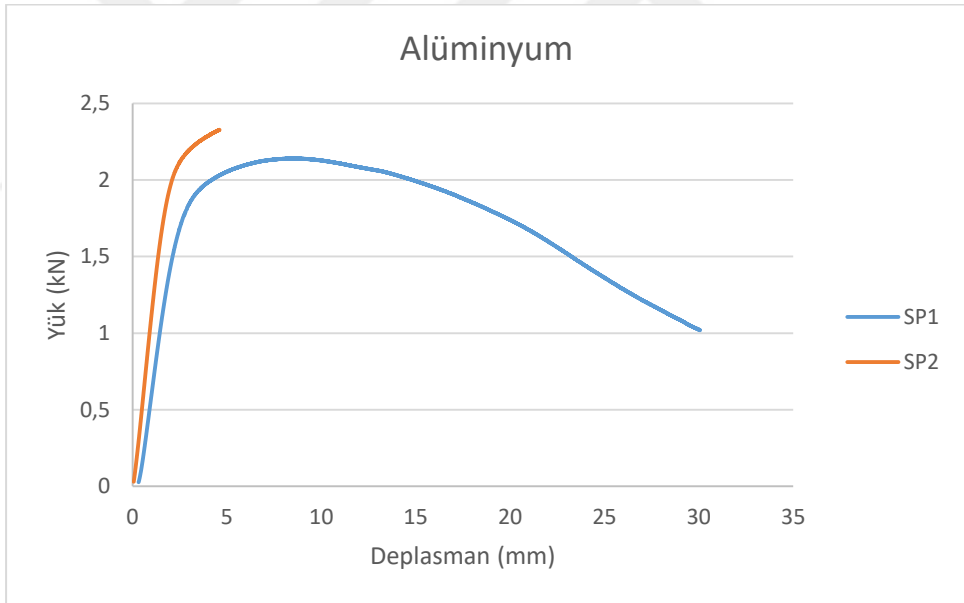


Şekil 5.15. [0°/90°/90°]s karbon fiber numunesi yük/deplasman grafiği.

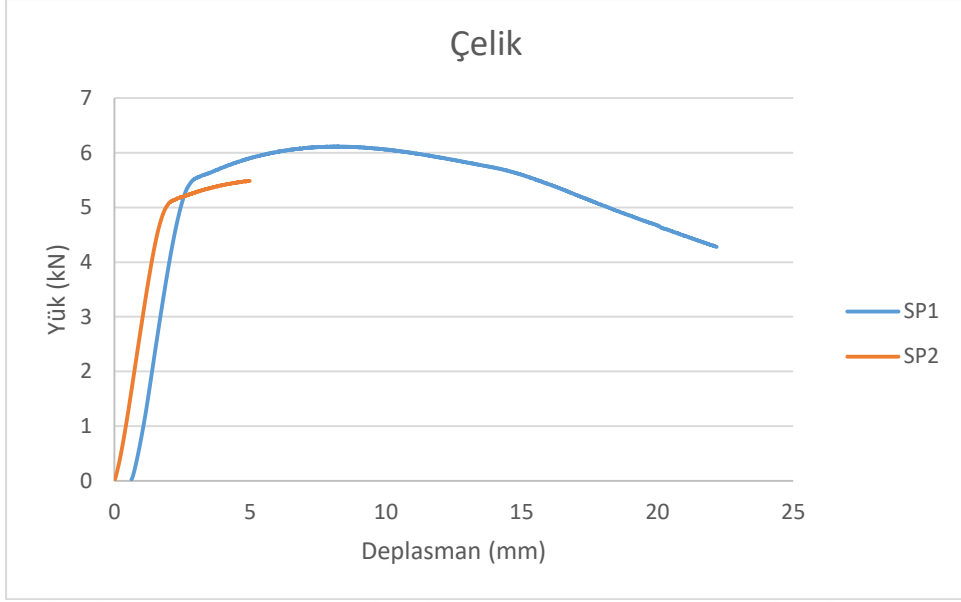
Üretimi gerçekleştirilen CFRP boruların mekanik davranışlarının, aynı boyutlardaki alüminyum, çelik ve bakır borularla kıyaslanabilmesi için aynı testler bu borulara da tatbik edilmiş ve Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18'deki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 5.16. Bakır numunesi yük/deplasman grafiği.

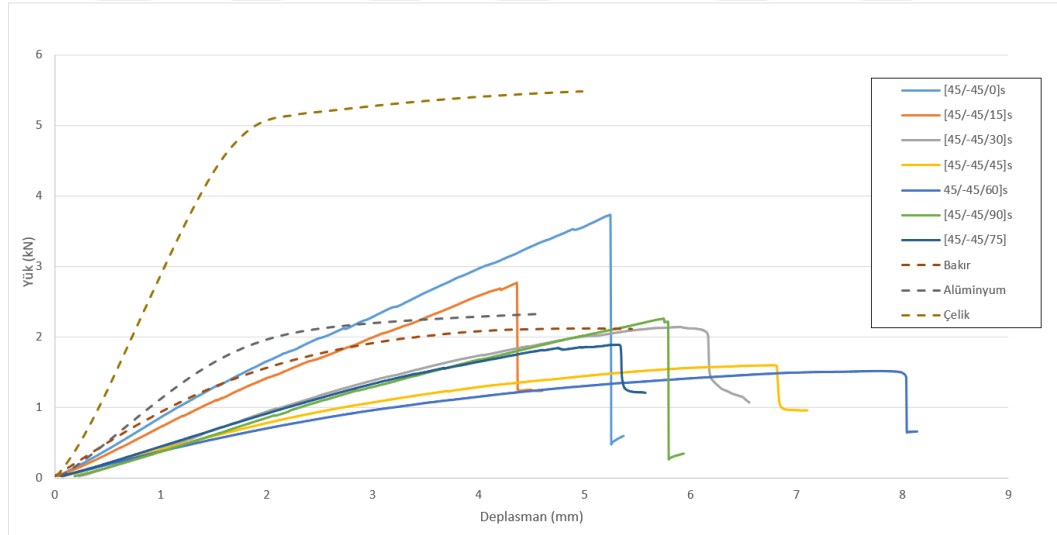


Şekil 5.17. Alüminyum numunesi yük/deplasman grafiği.

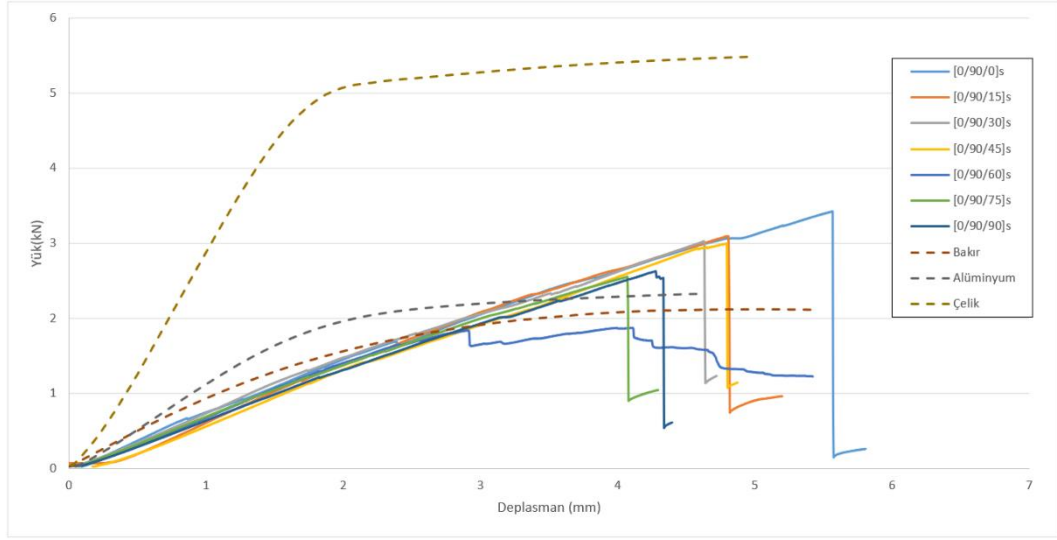


Şekil 5.18. Çelik numunesi yük/deplasman grafiği.

Her bir numune için ayrı ayrı en az üçer tekrarlı olarak gerçekleştirilen test sonuçları dikkate alındığında, ürünlerin dayanım performanslarını en iyi temsil edecek değerler belirlenmiştir. Test sonuçlarının birbirleri ile karşılaştırılabilmesi için veriler bir araya getirilerek elde edilen grafikler Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.19. [45/-45/x]s grubu numunelerin karşılaştırmalı yük/deplasman grafiği.



Şekil 5.20. [0/90/x]s grubu numunelerin karşılaştırmalı yük/deplasman grafiği.

Çalışmada üretilen numunelerin taşıyabildikleri maksimum yüklerin, iç katmanlarda kullanılan UD prepreg açılarının artışı ile azalması beklenmektedir. Ancak Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de verilen grafikler incelendiğinde [45/-45/x]s grubu deneylerinde [45/-45/0]s oryantasyonundaki numunelerin beklendiği gibi en yüksek değerde yük taşıdığı görülürken, [45/-45/90]s ve [45/-45/75]s numunelerinin ise beklenenden yüksek değerlerde yük taşıdığı görülmektedir. Diğer taraftan [45/-45/45]s ve [45/-45/60]s numunelerinin beklenilenden düşük yük taşıdıkları anlaşılmaktadır.

Maksimum yükte ortaya çıkan deplasman değerleri söz konusu olduğunda ise [45/-45/60]s numunesi 8,04 mm ile en yüksek değere sahiptir. En düşük deplasman değerinin ise [45/-45/15]s numunesinde 2,6 mm olduğu görülmektedir.

Çalışmada kullanılan [0/90/x]s grubu numunelerin taşıdıkları maksimum yükler incelendiğinde [45/-45/x]s grubu numunelerle benzer trendde sonuçlar görülmesine rağmen, maksimum deplasman değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. En yüksek deplasman değeri 5,56 mm olarak not edilmiştir.

Metalik malzemelerin taşıdıkları maksimum yüklere bakıldığında çelik akma sınırında 4,8 kN, alüminyum 1,9 kN ve bakır 1,2 kN olarak ölçülmüştür. Ayrıca kompozit numunelerin taşıdığı en yüksek yük değeri çelikten %25 daha düşük ölçülmesine rağmen, çelikten altı kat daha hafif olduğu görülmüştür. Alüminyum ise yaklaşık kompozit numunelerin yarısı kadar yük taşımasına rağmen ağırlığı ise kompozit numunelerin iki katı değerindedir. Bakır ise kompozit numunelerin taşıyabildiği yükün %30 kadarını taşımasına rağmen ağırlığı kompozit numunelere kıyasla yaklaşık 7 kat

daha fazladır.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma sonunda elde edilen bulgulara göre [45/-45/x]s grubu oryantasyonların dikkat çekici şekilde maksimum yük sırasında daha yüksek deplasmanlara ulaştığı görülmektedir. Bu sonuç dikkate alındığında ise [45/-45/x]s grubu oryantasyonlarının olta kamışı gibi esnekliğin beklendiği uygulamalarda kullanılması önerilmektedir. Diğer taraftan elastik rijitliğin ön planda olduğu yelken direği, kürek, beysbol sopası, tenis raketi, araç salıncakları gibi uygulamalarda ise [0/90/x]s grubu oryantasyonların tercih edilmesi önerilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] A. Şahin, “Düşük hızlı darbe görmüş filaman sarım e-camı/epoksi boruların iç basınç altında yorulma davranışlarının incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2011.
- [2] Ö. Kandemir, “Kompozit kaplamalı dış cephe Sistemlerinin Üretimi ve uygulamasında dikkat edilmesi gerekenlerin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Mimarlık, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haliç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [3] F. Yastımoğlu ve A. Özkan, “Tekrarlanan yükler altında kompozit malzemelerin yapılarının incelenmesini amaçlayan deney aygıtı tasarımı,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, ss. 56–66, 2017.
- [4] C. Barut, “Aramid esaslı kompozit malzemelerin balistik performanslarının ve mekanik davranışlarının incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2015.
- [5] E. J. Barbero, *Introduction to Composite Materials Design*, New York, USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2018, ss. 37–102.
- [6] K. K. Chawla, *Composite Materials Science and Engineering*, New York, USA: Springer, 2011, ss. 133–163.
- [7] S. Sathishkumar, T. P. Satheeskumar ve J. Naveen, “Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, sayı 33, ss. 1258–1275, 2014.
- [8] Anonim, (2021,1 Ocak). *Kompozit boru sektörüne genel bakış*. [Online]. Erişim: https://www.academia.edu/10767026/Kompozit_Boru_Sekt%C3%B6r%C3%Bcne_Genel_Bak%C4%B1%C5%9F.
- [9] R. Rafiee ve B. Mazhari, “Simulation of the long-term hydrostatic tests on glass fiber reinforced plastic pipes,” *Composite Structures*, c. 136, ss. 56–63, 2016.
- [10] G. Czél ve T. Czigány, “A study of water absorption and mechanical properties of glass fiber/polyester composite pipes-effects of specimen geometry and preparation,” *Journal of Composite Materials*, c. 42, sayı 26, ss. 2815–27, 2008.
- [11] J. M. Lees, “Behaviour of GFRP adhesive pipe joints subjected to pressure and axial loadings,” *Composites*, c. 37, sayı 8, ss. 1171–1179, 2006.
- [12] Y. Akın, “Cam elyaf takviyeli kompozit boruların mekanik özelliklerine hidrotermal yaşlandırmanın etkisi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2018.
- [13] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Denizcilik*. [Online]. Erişim:

<https://izoreel.com.tr/sayfa/158/sectorler/Denizcilik.html>.

- [14] B. Kalaycıoğlu, H. Arslan ve M. B. Akgün, “Simetrik ve simetrik olmayan katman düzenlerine sahip kompozit sargılı boruların tasarımı ve testleri,” *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, c. 12, sayı 2, ss. 648–663, 2020.
- [15] G. Wróbel, M. Szymiczek ve J. Kaczmarczyk, “Influence of the structure and number of reinforcement layers on the stress state in the shells of tanks and pressure pipes,” *Mechanics of Composite Materials*, c. 53, ss. 165–78, 2017.
- [16] D. Kakogiannis ve diğerleri, “Response of pultruded composite tubes subjected to dynamic and impulsive axial loading,” *Composites Part B*, ss. 537–547, 2013.
- [17] T. Ghazijahani, H. Jiao, ve D. Holloway, “Timber filled CFRP jacketed circular steel tubes under axial compression,” *Construction and Building Materials*, ss. 791–799, 2015.
- [18] O. Sayman, “Analysis of multi-layered composite cylinders under hygrothermal loading,” *Composites Part A*, c. 36, ss. 923–33, 2005.
- [19] B. Kalaycıoğlu, H. Arslan, ve M. B. Akgün, “Simetrik ve simetrik olmayan katman düzenlerine sahip kompozit sargılı boruların tasarımı ve testleri,” *International Journal of Engineering Research and Development*, c. 12, sayı 2, ss. 648–663, 2020.
- [20] T. A. Sabaey, “Design of oil and gas composite pipes for energy production,” *Energy Procedia*, c. 162, ss. 146–155, 2019.
- [21] Anonim, (2021, 1 Ocak). *İmalat süreçleri ve boru imalat teknikleri*. [Online]. Erişim: <https://www.chemical-supermarket.com/Manufacturing-Processes---Tube-Fabrication-Techniques-c101.html>.
- [22] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Kompozit boru üretimi*. [Online]. Erişim: <http://tr.composite-china.com/news/4-methods-for-producing-composite-tubing-24845502.html>.
- [23] M. F. Ergin, “Yığın kalıplama bileşimi ile elde edilen malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi,” Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [24] A. Işık, “Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Uçak ve Uzay Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [25] V. Acar, “Karbon iplik dolgulu termoset film kompozitlerde arayüzey çalışmaları,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2013.
- [26] S. Karadayı, “Düşük hızlı darbe yükü altında tabakalı kompozit malzemelerin mekanik davranışı,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri

Enstitüsü, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, Türkiye, 2012.

- [27] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi*. [Online]. Erişim: <https://docplayer.biz.tr/17284916-Kompozit-malzemelerin-mekanik-ozelliklerinin-belirlenmesi-ve-ansys-10-programi-ile-isis-gerilme-analizi.html>.
- [28] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Camelyaf teknolojisi*. [Online]. Erişim: <https://docplayer.biz.tr/14627561-Yaflam-n-her-alan-nda.html>.
- [29] O. Arıcasoy, “Kompozit sektör raporu,” İstanbul Ticaret Odası Yayınları, Türkiye, 2006.
- [30] F. Cıbrır, kişisel görüşme, Mart 2007.
- [31] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Uçak teknolojileri*. [Online]. Erişim: http://Www.Uted.Org/Dergi/2005/Nisan/Nisan_3.Htm.
- [32] M. Bakkal, *Malzeme bilimi ve mühendisliği*, 8. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Yayınevi, 2011, böl. 9, ss. 746–755.
- [33] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Uçak radar sistemi*. [Online]. Erişim: <http://www.supplierquality.gdatp.com/imagefolio/imageFolio.cgi?search=F-16%20M61A1%20Gatling%20Gun&img=0&cat=&bool=or>.
- [34] A. Balcı, M. Borat ve O. Sürmen, “Benzin motorlarında yakıt ekonomisi,” *Gütef Dergisi*, c. 1, sayı 2, 1987.
- [35] S. Aslıtürk, “Otomotiv sektöründeki uygulamalar,” *III. Uluslararası Polimerik Kompozitler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 2012, ss. 45–49.
- [36] S. İnkaya, “Dünyada ve Türkiye’de kompozit sektörü,” *Mühendis ve Makine Dergisi*, c. 52, sayı 613, ss. 31–34, 2011.
- [37] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Kompozitler*. [Online]. Erişim: <https://www.metaluzmani.com/kompozitler/>.
- [38] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Kompozit tekne ve direk üretimi*. [Online]. Erişim: http://www.velenamast.com/?page_id=319.
- [39] İ. H. Hacalioğlu, “Türkiye 10. kalkınma planı projeksiyonunda kompozit sektörü genel değerlendirmesi,” *Türk Kompozit 2013-Kompozit Zirvesi*, İstanbul, 2013, ss. 2–14.
- [40] S. Karabağ, “Rüzgâr türbini kanadı imalatı,” *Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi*, İzmir, Türkiye, 2011, ss. 51–59.
- [41] H. Yıldızhan, “Polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2008.
- [42] M. E. Deniz, “Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıl işleme presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarım ve imalatı,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye, 2005.

- [43] D. Gay, S. V. Hoa, ve S.W. Tsai, *Composite Materials Design and Applications*, New York, USA: CRC Press, 2003.
- [44] D. Eserci, “Alümina, Zirkonya ve Alümina-Zirkonya kompozit malzeme üretimi, karakterizasyonu ve etkin difüzyon sabitinin bulunması,” Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [45] M. Öztürk, “SiC ilaveli alümina seramik kompozitler,” Yüksek lisans tezi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2007.
- [46] R. İlhan, “Cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzemelerin tribolojik özellikleri,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2018.
- [47] G. A. Arı, “Polimer nanokompozitlerin özelliklerine değişik nanopartiküllerin etkisinin incelenmesi,” Doktora tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [48] M. Karşlı, “Hafif silahlar için polimer kompozit malzeme seçimi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2016.
- [49] M. Seydibeyoğlu, “Karbon elyaf kompozitlerin hazırlanmasında yeni teknolojiler,” *III. Uluslararası Polimerik Kompozitler Sempozyumu*, İzmir, 2012, ss. 273–275.
- [50] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Polyester reçineler*. [Online]. Erişim: <https://www.boytek.com.tr/polyester-recineleri/>.
- [51] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Kompozit malzemeler ve kullanım alanları*. [Online]. Erişim: <https://www.muhendisbeyinler.net/kompozit-malzemeler-ve-kullanim-alanlari/>.
- [52] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Polimer kompozitler*. [Online]. Erişim: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fakademi.itu.edu.tr%2Fvuralmu%2FDosyaGetir%2F65047%2Fch08-Polimer-Kompozit.pdf+%&date=2014-0708>.
- [53] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Kompozitler klavuzu*. [Online]. Erişim: <http://www.netcomposites.com/education.asp?sequence=53>.
- [54] G. Güzel, “Epoksi reçinesi - yüksek fırın cürufu / yer fıstığı kabuğu tozu kompozitlerinin hazırlanması ve özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2016.
- [55] M. Kara, “Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı,” Doktora tezi, Makine

- Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2012.
- [56] M. S. Ersoy, “Lif takviyeli polimerik kompozit malzeme tasarımı,” Yüksek lisans tezi, Tekstil Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye, 2005.
- [57] S. İ. Mıstık, “Bor lifi takviyesinin polimer esaslı kompozit yüzeylerin mekanik özelliklerine etkileri,” Doktora tezi, Tekstil Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [58] Ş. Bayraktar, “Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin frezeleme işleminde işlenebilirliğinin deneysel araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [59] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Kompozitler*. [Online]. Erişim: <https://iesgeneralstudies.com/chapter-7-composites/>.
- [60] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Kompozit yapıların mekanik modellenmesi*. [Online]. Erişim: <https://my.vanderbilt.edu/mcml/cv/failure-prediction-of-composites-under-uncertainty/>.
- [61] O. Efe, “Farklı destek mesafelerinde polivinil klorür (PVC) çekirdek yapıları sandviç kompozitlerin eğilme davranışlarının nümerik Analizi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye, 2009.
- [62] K. Erbay, “Silah gövdeleri için polimer esaslı kompozit malzeme üretimi ve özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2009.
- [63] İ. Durgun, “El yatırma yöntemi ile kompozit parça üretimi,” *7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*, Ankara, 2014, ss. 283–287.
- [64] G. İnançer, “Farklı takviye malzemeli plastik kompozitlerin darbe davranışına çevrenin etkisi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2015.
- [65] H. Özer, “Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2015.
- [66] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Kompozit üretim yöntemleri*. [Online]. Erişim: <https://docplayer.biz.tr/11873459-4-kompozit-uretim-yontemleri.html>.
- [67] P. Mangalgi, “Polymer matrix composites for high temperature applications,” *Defence Science*, c. 55, sayı 2, ss. 175–193, 2005.
- [68] Anonim, (2021, 1 Ocak). *RTM prosesi*. [Online]. Erişim: <http://www.plastech.co.uk/Images/JEC RTM Diagram.jpg>.
- [69] M. Sarıbyık, A. Cumhuri, F. Aydın, A. Sarıbyık, ve N. Çağlar, “Pultrüzyon metodu ile üretilen cam fiber takviyeli plastik profillerin sera modellemesinde

kullanılması,” *Uluslararası Deprem ve Yapı Mühendisliğinde Gelişmeler Sempozyumu*, 2007, ss. 674–682.

- [70] S. K. Mazumdar, *Composite Manufacturing Materials, Product and Process Engineering*, Florida, USA: CRC Press LLC, 2002.
- [71] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Kalıplama yöntemleri*. [Online]. Erişim: <https://silo.tips/download/plastklern-kalıplama-yntemler-ve-reaksyonlu-enjeksyon-kalıplama-rim>.
- [72] Y. Şahin, *Kompozit Malzemelere Giriş*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Seçkin Yayınevi, 2015, böl. 9, ss. 398–407.
- [73] A. İ. Otabatmaz, “Kompozit Malzemeler - Üretim Yöntemleri - Ürünler - Uygulamalarda Yaşanan Sorunlar ve Çözümler,” I. Polimerik Kompozitler Sempozyumu ve Sergisi, 2006, ss. 603–618.
- [74] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Sıcak pres*. [Online]. Erişim: <https://www.poliya.com/tr/smc-ve-bmc-sicak-pres>.
- [75] K. Ales Steve ve K. Sumanasiri, “Development of natural fibre composites in papua new guinea (Png),” *Composites Manufacturing*, 2014, ss. 1–6.
- [76] M. Balasubramanian, *Composite Materials and Processing*, 1. baskı, Cleveland, USA: CRC Press, 2013, böl. 7, ss. 595–610.
- [77] A. Eker, *Plastiklerin Şekillendirilme Yöntemleri Ders Notu*, İstanbul, 2009.
- [78] M. Noordin, “Sink marks defect on injection molding using different raw materials,” Master’s thesis, Faculty of Mechanical Engineering, University Malaysia Pahang, Pekan, Malaysia, 2009.
- [79] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Dizayn vida*. [Online]. Erişim: http://www.dizaynvida.com/tr/urun.aspx?urun_ID=1.
- [80] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Vakum torbaları*. [Online]. Erişim: <http://www.maskim.com.tr/tr/sayfa/urun-detay/93/vakum-torbaları/0>.
- [81] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Otoklav*. [Online]. Erişim: <https://www.tanksan.com/sanayi-tipi-otoklav>.
- [82] Anonim, (2021, 1 Ocak). *Rulo sarılı karbon fiber tüp*. [Online]. Erişim: <https://www.cgprosports.com/wap/xraysecurityinspectionequipment/212.html>.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Akif KABAKÇI

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lise		Düzce Lisesi	2007

YAYINLAR

A. Kabakçı, M. Kılınçel ve Y. O. Alpay, “Yuvarlama sarma yöntemi ile üretilen karbon fiber borularda fiber yönünün dayanıma etkisi,” *V. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi, Tam Metin Kitabı*, ss. 499–510, 2020.