

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİT  
MALZEMELERİN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİ**

**RECEP İLHAN**

**KOCAELİ 2018**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİT  
MALZEMELERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ

RECEP İLHAN

Prof. Dr. Erol FEYZULLAHOĞLU  
Danışman, Kocaeli Üniversitesi  
Doç. Dr. Aziz Armağan ARICI  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Şenol MERT  
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 02.07.2018

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte endüstriyel alanlarda farklı beklentiler oluşmuştur. İstenilen özellikleri elde etmede geleneksel malzemelerin yetersiz kalması nedeniyle kompozit malzemelerin kullanımı artmıştır. Düşük yoğunluk, ekonomiklik vb. sebeplerden dolayı polimer matrisli kompozitler ön plana çıkmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemelerin eksik yönleri dolgu ve takviye eklentileri ile tamamlanarak mükemmel malzeme özellikleri elde edilmek istenmektedir. Aşınma dünyadaki en çok maddi kayıpların yaşandığı endüstriyel problemlerden biridir. Bu nedenle mekanik özelliklerin yanında malzemelerin tribolojik özellikleride önem arz etmektedir. Kompozit malzemelerde matris, takviye ve dolgu malzemelerinin farklılığından tribolojik özelliklerin nasıl etkilendiği önem arz etmektedir. Bundan dolayı polistiren çekme katkısı, alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin ilavesinin cam elyaf takviyeli polyster kompozit malzemelerin tribolojik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar sırasında farklı test cihazlarının kullanımında yardımcı olan ve destek veren Prof. Dr. Taner YILMAZ ve Doç. Dr. Sinan FİDAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmamızda deney numunelerinin temininde bizlere destek veren Sami Tongün Cam Elyafı Polyester Ürünleri (Kocaeli) A.ş.'ye teşekkür ederim.

Yapmış olduğum çalışmalar sırasında sıkılmadan her zaman bana destek olan, bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren, bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan değerli hocam Prof. Dr. Erol FEYZULLAHOĞLU'na şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan, beni cesaretlendiren ve bu günlere gelmeme yardımcı olan aileme sonsuz teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Haziran - 2018

Recep İLHAN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER.....	4
1.1. Kompozit Malzemeler .....	4
1.2. Kompozit Malzemelerin Gelişimi ve Tarihsel Süreci .....	4
1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....	7
1.3.1. Matris malzemesi türüne göre kompozit malzemeler .....	7
1.3.1.1. Polimer matrisli kompozitler .....	7
1.3.1.2. Metal matrisli kompozitler .....	8
1.3.1.3. Seramik matrisli kompozitler .....	8
1.3.2. Takviye malzemesinin türüne ve kullanım şekline göre kompozit malzemeler .....	9
1.3.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler .....	9
1.3.2.2. Parçacık (partikül) takviyeli kompozitler .....	10
1.3.2.3. Tabakalı (laminant) kompozitler .....	10
1.3.2.4. Hibrit (karma) kompozitler.....	10
2. ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLER.....	11
2.1. Giriş .....	11
2.2. Reçine Malzemeleri .....	12
2.2.1. Termoset esaslı reçineler.....	12
2.2.1.1. Polyester reçine .....	12
2.2.1.2. Epoksi reçine .....	15
2.2.1.3. Vinilester reçine.....	16
2.2.1.4. Fenolik reçine .....	18
2.2.2. Termoplastik esaslı reçineler .....	19
2.3. Takviye Elemanları.....	20
2.3.1. Cam elyaf .....	20
2.3.2. Karbon elyaf.....	24
2.3.3. Aramid (kevlar) elyafı.....	25
2.3.4. Bor elyaf.....	26
2.3.5. Seramik elyaf .....	27
2.3.6. Metal elyaf .....	28
2.3.7. Doğal elyaf.....	28
2.4. Dolgu Malzemeleri .....	29
2.4.1. Kalsiyum karbonat (CaCO <sub>3</sub> ).....	30
2.4.2. Alüminyum oksit (Alümina).....	31
2.4.3. Cam kürecikler .....	32
2.4.4. Kil .....	32

2.4.5. Wollastonit.....	33
2.4.6. Alüminyum trihidrat .....	33
3. CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİTLER.....	35
3.1. Temel Özellikler .....	35
3.2. Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozitlerin Üretim Yöntemleri .....	35
3.2.1. El yatırması yöntemi .....	37
3.1.2. Püskürtme yöntemi .....	41
3.1.3. Elyaf sarma yöntemi .....	42
3.1.4. Reçine transfer kalıplama yöntemi .....	44
3.1.5. Pres kalıplama .....	46
3.1.6. Pultrüzyon yöntemi.....	51
4. AŞINMA VE AŞINMA MEKANİZMALARI .....	54
4.1. Aşınma .....	54
4.2. Aşınma Mekanizmaları.....	57
4.2.1. Abrasiv aşınma .....	57
4.2.2. Adheziv (yapışma) aşınma.....	59
4.2.3. Eroziv aşınma.....	60
4.2.4. Yorulma (pitting) aşınması .....	62
4.2.5. Korozyon aşınma.....	62
4.3. Literatür Taraması.....	64
4.3.1. Takviye elemanı olarak cam elyaf kullanımının tribolojik özelliklere etkisi .....	64
4.3.2. Dolgu malzemesi olarak alümina ( $Al_2O_3$ ) kullanımının tribolojik özelliklere etkisi .....	66
4.3.3. Dolgu malzemesi olarak cam kürecik kullanımının tribolojik özelliklere etkisi .....	68
4.3.4. Diğer farklı dolgu malzemelerinin kullanılmasının tribolojik özelliklere etkisi .....	69
5. MALZEME VE YÖNTEM.....	71
5.1. Malzeme.....	71
5.2. Yöntem.....	72
5.2.1. Yoğunluk ölçümü.....	72
5.2.2. Sertlik ölçümü .....	73
5.2.3. Aşınma testi .....	74
5.2.4. Aşınma iz kalınlıkları ölçümü.....	76
5.2.5. Yüzey pürüzlülüklerinin ölçümü .....	77
6. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	79
6.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları .....	79
6.2. Barcol Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	80
6.3. Aşınma Testi Sonuçları.....	81
6.4. Yüzey Pürüzlülük Testi Sonuçları .....	96
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	106
KAYNAKLAR.....	109
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	116
ÖZGEÇMİŞ.....	117

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması .....	9
Şekil 2.1.	İzoftalik bir polyester reçinenin kimyasal yapısı .....	15
Şekil 2.2.	Epoksi reçinenin kimyasal yapısı .....	16
Şekil 2.3.	Vinilester reçinesinin sentezine ait reaksiyon şematığı .....	17
Şekil 3.1.	El yatırması yöntemi .....	38
Şekil 3.2.	Püskürtme tekniği .....	41
Şekil 3.3.	Elyaf sarma yöntemi .....	43
Şekil 3.4.	Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi .....	45
Şekil 3.5.	BMC pres kalıplama tekniği .....	47
Şekil 3.6.	SMC pres kalıplama tekniği .....	48
Şekil 3.7.	Pultrüzyon kalıplama tekniği .....	52
Şekil 4.1.	Aşınma mekanizmaları .....	57
Şekil 4.2.	Abraziv aşınma .....	58
Şekil 4.3.	Bir kam mili üzerinde zamanla oluşmuş adheziv aşınma ve abraziv aşınma mekanizmaları .....	59
Şekil 4.4.	Eroziv aşınma mekanizması .....	61
Şekil 4.5.	Korozyon aşınması .....	63
Şekil 5.1.	Aşınma testi için hazırlanmış numuneler .....	72
Şekil 5.2.	AND GR-200 yoğunluk ölçüm cihazı .....	73
Şekil 5.3.	Barcol sertlik ölçüm cihazı .....	74
Şekil 5.4.	Adezif aşınma test cihazı .....	75
Şekil 5.5.	Aşınma testi uygulanmış deney numuneleri .....	75
Şekil 5.6.	Nikon SMZ 745T mikroskopu .....	76
Şekil 5.7.	Nikon SMZ 745T mikroskopu ile aşınma izlerinin görüntülenmesi .....	76
Şekil 5.8.	Nanovea PS50 temassız üç boyutlu profilometre ile yüzey pürüzlülük ölçümü .....	77
Şekil 6.1.	Numunelerin barcol sertlik değerleri .....	81
Şekil 6.2.	Farklı yük ve hızlarda numunelerin sürtünme katsayısı değerleri .....	82
Şekil 6.3.	Numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri .....	84
Şekil 6.4.	Pin on disk aşınma modeli .....	84
Şekil 6.5.	10 N ve 100 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacimleri .....	86
Şekil 6.6.	20 N ve 100 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacimleri .....	87
Şekil 6.7.	10 N ve 200 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacimleri .....	88
Şekil 6.8.	20 N ve 200 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacimleri .....	89
Şekil 6.9.	10 N'luk yük etkisi altında ve değişen hız değerlerinde (100 rpm ve 200 rpm) numunelerin aşınma oranları .....	91
Şekil 6.10.	20 N'luk yük etkisi altında ve değişen hız değerlerinde (100 rpm ve 200 rpm) numunelerin aşınma oranları .....	92
Şekil 6.11.	Numunelerin 100 rpm hız ve farklı yük değerlerinde aşınma oranları .....	93
Şekil 6.12.	Numunelerin 200 rpm hız ve farklı yük değerlerindeki aşınma oranları .....	94

Şekil 6.13. (a) 20 N ve 200 rpm hızda D1 numunesinin tüm yüzeyinin 3 boyutlu görüntüsü (b) D1 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve pürüzlülük eğrisi.....	96
Şekil 6.14. (a) D1 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) D1 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi.....	97
Şekil 6.15. (a) T1 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) T1 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi.....	98
Şekil 6.16. (a) T2 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) T2 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi.....	99
Şekil 6.17. (a) T3 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) T3 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi.....	100
Şekil 6.18. (a) T4 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) T4 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi.....	101
Şekil 6.19. (a) T5 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) T5 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi.....	102
Şekil 6.20. 20 N ve 200 rpm hızda numunelerin ortalama Sa ve Ra pürüzlülük değerleri .....	103
Şekil 6.21. 20 N ve 200 rpm hızda numunelerin aşınma oranları ile Sa pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması.....	105
Şekil 6.22. 20 N ve 200 rpm hızda numunelerin aşınma oranları ile Ra pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması.....	105

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması .....	12
Tablo 2.2. Bazı termoplastik esaslı reçinelerin özellikleri .....	20
Tablo 2.3. Farklı cam elyafların mekanik özellikleri .....	21
Tablo 2.4. Farklı cam elyafların % kimyasal bileşimleri .....	23
Tablo 5.1. Cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin kimyasal bileşimleri .....	72
Tablo 6.1. Numunelerin yoğunluk değerleri .....	79





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

D	: Aşınma iz kalınlığı, (mm)
k	: Aşınma oranı, (mm <sup>3</sup> /Nm)
L	: Uygulanan yük, (N)
r	: Aşındırıcı kürecik yarıçapı, (mm)
R	: Sürtünme yarıçapı, (mm)
R <sub>a</sub>	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü, (µm)
T <sub>g</sub>	: Camsı geçiş sıcaklığı, (°C)
V	: Aşınma hacmi, (mm <sup>3</sup> )
X	: Kayma mesafesi, (m)

### Kısaltmalar

Al	: Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum Oksit (Alümina)
AP	: Antiparalel
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
ATH	: Alüminyum Trihidrat
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Bor Oksit
B <sub>4</sub> C	: Bor Karbür
BeO	: Berilyum Oksit
BMC	: Bulk Molding Compound (Hazır Kalıplama Hamuru)
BPA	: Bisfenol A
BzP	: Benzoil Peroksit
CaCO <sub>3</sub>	: Kalsiyum Karbonat
CaO	: Kalsiyum Oksit
CE	: Cam Elyaf
CTP	: Cam Elyaf Takviyeli Polyester
CK	: Cam Kürecik
DIN	: Deutsches Institut Für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
ETP	: Elyaf Takviyeli Polimer
HMTA	: Hekzaetilen Tetramin
MEKP	: Metil Etil Keton Peroksit
Mg	: Magnezyum
MgO	: Magnezyum Oksit
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
MÖ	: Milattan Önce
MS	: Milattan Sonra
Na <sub>2</sub> O	: Sodyum Oksit
PA	: Paralel
PA	: Polyamid (Naylon)
PAN	: Poliakrilonitril
PEEK	: Polietereterketon

PEI	: Polieterimid
PET	: Polietilentereftalat
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
PP	: Polipropilen
PPS	: Polifenilensülfür
PPTA	: Poli Poro Fenilen Tereftalamid
PTFE	: Politetrafloretillen (Teflon)
PVA	: Polivinil Alkol
PVC	: Polivinil Klorür
RTM	: Resin Transfer Molding (Reçine Transfer Kalıplama)
SiC	: Silisyum Karbür
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	: Silisyum Nitrür
SMC	: Sheet Molding Compound (Hazır Kalıplama Pestili)
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit
TBPO	: t-bütül peroktoat
Ti	: Titanyum
TiO <sub>2</sub>	: Titanyum Dioksit
VE	: Vinilester
ZnO	: Çinko Oksit

## CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİT MALZEMELERİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ

### ÖZET

Cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet, mükemmel elastiklik, düşük ağırlık, yüksek korozyon direnci, yüksek kimyasal direnç ve yüksek termal kararlılık gibi özelliklere sahip olmalarından dolayı farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşınma, malzemelerin yüzey kimyalarını ve mikro yapılarını değiştirerek azaltılabilen bir yüzey özelliğidir. Makine parçalarının en önemli hasar sebeplerinden biri aşınmadır. Bu nedenle CTP malzemelerin sadece mekanik özellikleri değil, aynı zamanda tribolojik davranışları da araştırılmalıdır. Bu çalışmanın amacı farklı dolgu ve reçine malzemeleri ile farklı yük ve hız gibi aşınma işlem parametrelerinin CTP kompozit malzemelerin tribolojik özellikleri üzerine etkisini incelemektir. Numunelerin üretimlerinde farklı reçineler (çekme katkılı ortoftalik polyester ve düz ortoftalik polyester), takviye malzemeleri ve dolgular (cam kürecik ve alümina) kullanılmıştır. Başlangıçta, numunelerin yoğunluk ve sertlik değerleri ölçülmüştür. Daha sonra numuneler 150m'lik sabit kayma mesafesinde iki farklı yükte ( $F=10N$ ,  $F=20N$ ) ve iki farklı hızda ( $n=100rpm$ ,  $n=200rpm$ ) adheziv aşınma deneylerine tabi tutuldu. Tribometre üzerinden test boyunca sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri ölçülmüştür. Bir sonraki adımda aşınma iz kalınlıkları ölçüldü ve aşınma oranları hesaplandı. Numunelerin aşınma yüzeyleri 3D lazer profilometre ile görüntülenerek yüzey topoğrafyaları ve yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Deneysel sonuçlarda, alümina ve cam kürecik dolgu malzemeleri doğru miktarlarda kullanıldıklarında ortalama sürtünme katsayısı değerlerini iyileştirebileceği görülmüştür. Çekme katkılı ortoftalik polyester reçinede cam kürecik dolgu malzemesinin kullanılması alümina dolgu malzemesine göre aşınma oranını düşürmede daha etkili olmuştur. CTP kompozit malzemelerin aşınma davranışı üzerine yük hızdan daha etkili olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Adheziv Aşınma, Cam Elyaf, Dolgu Malzemeleri, Polyester.

## **TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF GLASS FIBER REINFORCED POLYESTER COMPOSITE MATERIALS**

### **ABSTRACT**

Glass fiber reinforced polyester (GFRP) composite materials are widely used in various sectors because of their high specific strength, excellent elasticity, low weight, high corrosion resistance, high chemical resistance and high thermal stability. Wear is a surface property that can be reduced by changing the surface chemistry and microstructures of the materials. One of most important causes of failure of mechanical parts is wear. For this reason GFRP materials should be investigated not only for their mechanical properties but also for their tribological behaviours. The aim of this study is investigation of effects of different fillers and resins materials and wear parameters such as different load and speed on tribological properties of GFRP composite materials. In the sample production, different resins (tensile additive orthophthalic polyester and plain orthophthalic polyester), reinforcing materials and fillers (glass beads, alumina) are used. Initially, the density and hardness values of the samples were measured. Then the samples were subjected to adhesive wear tests on two different loads ( $F=10N$ ,  $F=20N$ ) and two different speeds ( $n=100rpm$ ,  $n=200rpm$ ) at 150m sliding distance. The friction force and friction coefficient were measured during the test on tribometer. In the next step, the wear trace thicknesses were measured and the wear rates were calculated. Wear surfaces of the samples were visualized with 3D laser profilometer to obtain surface topographies and surface roughness values. Experimental results have shown that alumina and glass beads fillers can improve the average coefficient of friction when used in the right quantities. The use of glass beads filler in tensile additive orthophthalic polyester resin is more effective than reducing the wear rate compared to alumina filler material. Load on the wear behavior of GFRP composite materials is more effective than speed.

**Key Words:** Adhesive Wear, Glass Fiber, Filler Materials, Polyester.

## GİRİŞ

Günümüzde değişen talepler ile birlikte metal, seramik ve polimer malzemelerin saf halleriyle kullanımları çok tercih edilmemektedir. Ekonomiklik oluşturabilmek ve daha iyi malzeme özellikleri elde edebilmek için endüstriyel alanlarda kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmış ve yaygınlaştırılmıştır. Kompozit malzemelerde farklı malzemeler birlikte kullanılarak metal, seramik, polimer gibi malzemeler takviye elemanları ve dolgu malzemeleri ile güçlendirilerek geliştirilmiş özellikler kazandırılır. Saf haldeki polimerler metal ve seramiklere göre dayanıksız malzemeler olmalarına rağmen takviye elemanları ve ilave eklentiler ile yüksek mekanik, termal ve tribolojik özellikler elde edilebilmektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak polimerler yaygın olarak tercih edilir ve kompozit malzemelerin çoğunluğunu polimer matrisli kompozitler (PMK) oluşturur.

Takviye olarak elyafın kullanıldığı kompozit malzemelerde polyester, epoksi, vinilester gibi termoset reçineler termoplastiklere göre yaygın olarak kullanılmaktadır. Polyester reçine ekonomik oluşu ve yeterli mukavemet özelliklerine sahip olması nedeniyle cam elyaf (CE) takviyeli bileşiklerde reçine malzemesi olarak kullanılır.

Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak sentetik ve doğal elyafların kullanılmasına rağmen cam elyaf ve karbon elyaf gibi sentetik elyafların kullanımları daha etkili olmuştur. Cam elyaflar yüksek mukavemet, boyutsal kararlılık, termal iletkenlik, mükemmel dielektriksel özellikler ve sentetik reçine malzemeleri ile mükemmel uyumluluk gibi özelliklere sahip olmalarından dolayı PMK'larda yaygın olarak kullanılan takviye elemanıdır.

Polyester reçinelerin elyafları iyi ıslatabilme özelliğinden cam elyafların ise yüksek mukavemet özelliklerinden faydalanmak amacıyla cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit malzemeler oluşturulmuştur. Ülkemizde yaygın kullanıma sahip CTP kompozitler çeşitli dolgu ilaveleri ile performansları daha da arttırılmak istenmektedir.

Aşınma mekanik bir etki sonucunda gerçekleşen yüzey etkileşimlerine bağlı olarak yüzeyden malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Aşınma mekanizmaları makine

elemanlarında ciddi hasarlara neden olabilmektedir. Bu aşınma mekanizmalarından biri de adheziv aşınmadır. Adheziv aşınma sürtünme etkisi ile temas eden yüzeylerin pürüzlü kısımları arasında bağ oluşur ve oluşan bu bağın kopması ile yüzeyde meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır.

Çalışmanın birinci bölümünde genel bilgiler başlığı altında kompozit malzemeler hakkında genel bilgiler, kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi ve kompozit malzemelerin sınıflandırılması gibi konulardan bahsedilmiştir.

İkinci bölümde elyaf takviyeli polimer (ETP) kompozitler ele alınarak termoset, termoplastik gibi reçine malzemelerinden, takviye elemanı olarak kullanılan sentetik ve doğal elyaflardan ve kompozitlerde yaygın olarak kullanılan dolgu malzemelerinden bahsedilmiştir. Ayrıca bu bölümde matris malzemesi olarak kullanılmış olan polyester reçine ve takviye elemanı olarak kullanılmış olan cam elyaf hakkında geniş bilgilere yer verilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde CTP kompozit malzemeler başlığı altında CTP kompozit malzemeler hakkında bilgi verilip CTP kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ayrıntılı şekilde ele alınmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde aşınma ve aşınma mekanizmaları detaylı şekilde incelenmiştir. Çalışmanın bu bölümüne kadar teorik bilgilerden bahsedilip sonraki bölümlerde deneysel çalışmalar anlatılmıştır.

Çalışmanın sonraki bölümlerinde deneysel kısımlar ele alınarak kullanılan malzeme ve kullanılan test yöntemleri hakkında bilgi verilerek elde edilen deneysel sonuçlar literatürdeki bulgular ile karşılaştırılarak tartışılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise genel sonuçlar başlığı altında üretimleri başarıyla gerçekleştirilmiş numunelerin tribolojik özelliklerine farklı reçine malzemeleri ve dolgu malzemelerinin etkisi ile aşınma işlem parametrelerinin etkisi belirtilmiştir.

Bu çalışmada CTP kompozit malzemelerin tribolojik özelliklerini geliştirmek için farklı reçine (çekme katkılı ortoftalik polyester ve düz ortoftalik polyester) ve farklı dolgu malzemeleri (alümina ve cam kürecik) kullanılarak pres kalıplama yöntemiyle belirli sıcaklık (140 °C) ve basınç (150 bar) altında 3 dakikalık sürede numunelerin

üretimleri gerçekleştirilmiştir. Başarılı bir şekilde üretimleri gerçekleştirilen numuneler sonrasında sabit kayma mesafesinde (150 m) iki farklı yük ( $F=10$  N,  $F=20$  N) ve iki farklı hız ( $n=100$  rpm,  $n=200$  rpm) gibi farklı aşınma koşulları altında aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Aşınma testlerinden sonra numunelerin aşınan yüzeyleri profilometre yardımıyla görüntülenerek 3D yüzey topoğrafyaları incelenmiştir.

Bu çalışmanın amacı farklı dolgu ve reçine malzemeleri ile farklı yük ve hız gibi aşınma işlem parametrelerinin CTP kompozit malzemelerin tribolojik özellikleri üzerine etkisini incelemektir.



## **1. GENEL BİLGİLER**

### **1.1. Kompozit Malzemeler**

Kompozit malzemeler iki ya da daha fazla bileşenin birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde istenilen özelliklerin elde edildiği malzemelerdir. Kompozit malzemeler yaygın olarak takviye ve matris olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin oluşturulmasındaki genel amaç takviye kullanımı ile mevcut malzemede bulunmayan bazı mekanik, termal, tribolojik vb. özelliklerin elde edilmesidir. Malzeme performansını iyileştirmek, maliyeti düşürmek ve çeşitli amaçları gerçekleştirmek için kompozit içerisinde dolgu, katkı, renklendirici vb. ilave eklentiler de kullanılabilir. Geçmişten günümüze kadarki olan süreçte artan ihtiyaç doğrultusunda ve gelişen teknoloji ile birlikte kompozit malzemelerin kullanımı hızla artmaktadır. Günümüzde havacılık-uzay-savunma, ev aletleri-iş ekipmanları, yapı sektörü, elektrik-elektronik, denizcilik, otomotiv ve askeri uygulamalar vb. farklı alanlarda yaygın kullanılmaktadır.

Teknolojinin gelişimiyle eş zamanlı olarak kompozit malzemelerden farklı beklentiler oluşmaktadır. Bu nedenle günümüzde araştırmacılar yeni nesil kompozitler ve çok işlevli nano kompozit malzemelerin geliştirilmesi için çalışmaktadırlar.

### **1.2. Kompozit Malzemelerin Gelişimi ve Tarihsel Süreci**

Eski toplumlarda tarım uygulamalarında, silah yapımında ve basit insanlık ihtiyaçlarını karşılamak için farklı malzemeler kullanılmaktaydı. Daha sonra farklı metal ve alaşımların ortaya çıkması ile malzeme teknolojisinde gelişmeler yaşanmıştır. Fakat sonraki yıllarda metal kaynakların tüketiminin artması ile bulunabilirlikleri azalmıştır. Böylece insanlar farklı malzemelere yönelerek kompozit malzemelerin oluşturulmasına zemin hazırlamışlardır.

Kompozit kullanımına dair ilk örnekler MÖ 1500 yıllarına dayanmaktadır. Eski mısırlı ve Mezopotamyalı yerleşimciler, Çamur ve samanı karıştırarak güçlü ve dayanıklı ürünler oluşturmuşlardır. Bundan sonra diğer uygulamalarda da takviye elemanı



olarak saman kullanımını artarak devam etmiştir. Daha sonra MS 1200'de Moğollar ahşap, kemik ve hayvan esaslı yapıştırıcıları bir arada presleyerek kompozit esaslı ilk yayları üretmişlerdir. Böylelikle kompozit yaylar askeri üstünlük göstergesi haline gelmiştir [1].

Araştırmacılar tarafından plastiklerin ortaya konulması ile kompozit malzeme teknolojisi hızlıca ilerleyerek modern kompozitler oluşturulmaya başlanılmıştır. Plastiklerden önce yapıştırıcı ve bağlayıcılar için tek kaynak bitki ve hayvanlardan elde edilen doğal reçinelerdi. 1900'lü yılların başında vinilester, polistiren, fenolik ve polyester gibi polimerler kullanılmaya başlandı. Bu polimerler doğadan saf halde elde edilen reçine malzemelerine kıyasla daha iyi performans sergileyici özelliklere sahiptirler [1].

Daha sonraki yıllarda plastiklerin dayanıklılık yönünden endüstriyel uygulamalar için yetersiz kaldığı fark edilince takviye malzemeleri oluşturulmuştur. Takviye malzemesi olarak 1935'te ilk cam elyafı (CE) piyasaya sunulmuştur. Cam elyafı ile polimer esaslı reçineler birleştirilerek hafif ve malzeme özellikleri daha üstün olan kompozitler oluşturulmuştur. Böylelikle elyaf takviyeli polimer kompozit kavramı hayatımıza girmiştir [1].

İnsanlık tarihinde önemli bir etki bırakan ikinci dünya savaşında ise kompozitler yaygın olarak kullanılmıştır. Askeri uçaklar gibi havacılık uygulamalarında hafiflik istenildiği için alternatif malzemelerin oluşturulması gerekiyordu. Böylelikle az yakıt ile ekonomiklik sağlanacak ve uçakların manevra kabiliyetleri de artırılmış olacaktı. Fakat bu gelişmeler ile hafifliğin yanında mekanik yönden birçok özelliğin geliştiği de fark edilmiştir. Ardından ikinci dünya savaşı sırasında naylon bulunmuştur. Naylon (PA) tribolojik polimerlerin öncüsü oldu ve dayanıklılık gerektiren kompozitli yapılarda kullanılmaya başlanmıştır. İyi mekanik özellikleri nedeniyle daha önce metalden yapılan dişliler, mandallar, burçlar, iş makineleri ve uygulamalarında birçok hareketli parça naylondan yapılmaya başlanmıştır [2].

İlerleyen yıllarda ise araştırmacılar bu avantajları daha da çok arttırmak için yoğun çalışma içerisine girmişlerdir. Bu araştırmalar neticesinde cam elyafın radyo frekanslarına karşı şeffaf olduğu keşfedilmiş ve çok kısa sürede elektronik radar ekipmanı olarak kullanımı için tasarımı yapılmıştır. İkinci dünya savaşının bitmesi ile

1946 yılında ilk kompozit ticari tekne gövdesi üretilmiştir. Sörf tahtasının geliştirilmesi ile de CTP kompozitler denizcilik sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. İlerleyen yıllarda elyaf takviyeli kompozitler içerisinde en çok bilineni CTP kompozitler olmuştur. Ülkemizde CTP kompozitlerin kullanımı 1960'lı yıllarda çeşitli uygulamalar ile başlamıştır. İlk yerli otomobil olan Anadolu'n bazı kısımları bu malzemelerden oluşturulmuştur [3].

Bu gelişmelerden sonra Goldsworthy pultrüzyon olarak bilinen ve güçlü cam elyaf takviyeli ürünlerin imalatını kolaylıkla gerçekleştirebilecek bir yöntem geliştirerek artmakta olan kompozit kullanımının endüstride daha çok kullanılmasını hızlandırmıştır. Günümüzde pultrüzyon yöntemi merdiven korkulukları, çeşitli aletlerin tutamaçları, borular, zırh ve tıbbi cihazların üretiminde kullanılmaktadır [1].

1970'lerde kompozit sektöründe polimer reçine ile cam elyaftan farklı takviye lifleri denenmeye başlanmıştır. Dupont yüksek gerilme mukavemeti, yüksek yoğunluk ve hafiflik sağlayabilecek vücut zırhlarında kullanılabilecek Kevlar (Para-Aramid) adı altında aramid elyaflarını üreterek piyasaya sunmuştur. Ayrıca ticari olarak bor takviyeli epoksi kompozitler üretilmiştir. 1970'li yıllarda bu kompozitler F-14 F-15 gibi uçakların farklı kısımlarında kullanılmaya başlanmıştır [4].

Aramid elyafını karbon elyafın ortaya çıkışı takip etmiştir. Daha önceki yıllarda çelikten yapılmış yapılarda artarak kullanılmaya başlanmış ve karbon elyaf takviyeli kompozitler üretilmiştir. Sonraki yıllarda ise farklı imalat yöntemleri ve farklı özelliklere sahip elyaf üretimlerin gerçekleştirilmeye devam edilmiştir [1].

2000'li yıllarda sentetik elyafların işleme maliyetlerinin yüksek olması araştırmacıları doğal elyaf araştırmalarına yöneltmiştir. Doğal elyaf ve sentetik elyafın birlikte kullanıldığı hibrit kompozitler üzerine çalışmalar hala devam etmektedir. Bu çalışmalarda yenilenebilir kaynaklı ve çevreye karşı duyarlı biyobozunur kompozitler oluşturulmuştur. Yapılan birçok çalışmada araştırmacılar tarafından nanoparçacık takviyesinin malzeme özelliklerine olumlu yansıdığı görülmüş ve çok işlevli nanokompozit malzeme üzerine araştırmalar artarak devam etmektedir.

Gelecek yıllarda çok işlevli olarak kullanılabilen nanoboyutlu ve biyoesaslı polimer kompozitlerin daha da yaygınlaşması beklenilmektedir [1].

### **1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması**

Kompozit malzemeler çoğunluğu oluşturan matris malzemesi ile takviye malzemesi olarak kullanılan bileşenlerin çeşidine ve kullanım şekline göre iki ana kategoride sınıflandırılabilir.

#### **1.3.1. Matris malzemesi türüne göre kompozit malzemeler**

Matris fazı kompozitlerde çoğunluğu oluşturan kısımdır. Genellikle takviye malzemelerini zararlı çevresel etkenlere karşı korur, yapıya gelen yükleri takviye fazına aktararak uygun yük dağılımını sağlarlar, kompozit malzemeye şeklini vererek çeşitli özellikler kazandırır. Kompozit içindeki farklı bileşenlerin birbirleriyle olan uyumu sürekli bir faz olan matris ile sağlanır bu nedenle matris malzemesinin seçimi çok önemli olmaktadır. Kompozitlerde matris malzemesi olarak polimerler, seramikler ve metaller kullanılmaktadır. Matris malzemelerinin kompozit yapılarda üstlendikleri görevler genel olarak şu şekilde sıralanabilir [5]:

1. Ürünün şekil ve boyut stabilitesini sağlar.
2. Elyafı birbirlerine göre ayarlayarak kompozit yapı içerisinde düzgün dağılımı sağlar.
3. Isıl ve mekanik yüklemeler karşısında malzeme deformasyonunun olmaması için sağlamlık sağlar.
4. Bileşen içindeki elyaflara yük dağılımını düzenli şekilde aktarır.
5. Dış çevresel etkilere karşı kompozit malzemelerin direncini artırmak.

##### **1.3.1.1. Polimer matrisli kompozitler**

Polimerlere son yıllarda günlük yaşamımızda ve endüstriyel uygulamalarda sıkça rastlamaktayız. Polimerler termoset, termoplastik ve elastomerler olarak 3 gruba ayrılırlar. Polimer matris olarak ise termoset ve termoplastikler çoğunlukta kullanılırlar. Elyafın takviye olarak kullanıldığı kompozitlerde termoset reçineler daha çok tercih edilmektedirler. Polimerlerin çelik kadar sağlamlık sağlaması, yüksek oranlarda hafiflik ve ekonomiklik sunması kompozit malzemelerde matris olarak kullanımını artırmıştır. Polimerler otomotiv sektöründe yüksek oranlarda tercih edilmektedir. Özellikle araçların tampon kısımlarında kullanılmaktadırlar. İnsan dokusu ile çok iyi uyum sağlamaları nedeniyle çeşitli biyomedikal uygulamalarda da

kullanılabilmektedirler. Polimer kompozitler parçacık dolgulu ve sürekli elyaf içeren kompozit yapı olarak sınıflandırılabilirler. Yüksek performansın gerekli olduğu yerlerde sürekli elyaf içeren kompozitlerin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Polimerler ve kompozitleri hafif olmaları, korozyona karşı direnç, yük kapasitesine karşı iyi mukavemet, kendinden yağlama özellikleri, daha iyi sürtünme katsayısı ve aşınma direnci nedeniyle tribolojik alanlarda matris malzemesi olarak yaygın kullanıma sahiptirler.

### **1.3.1.2. Metal matrisli kompozitler**

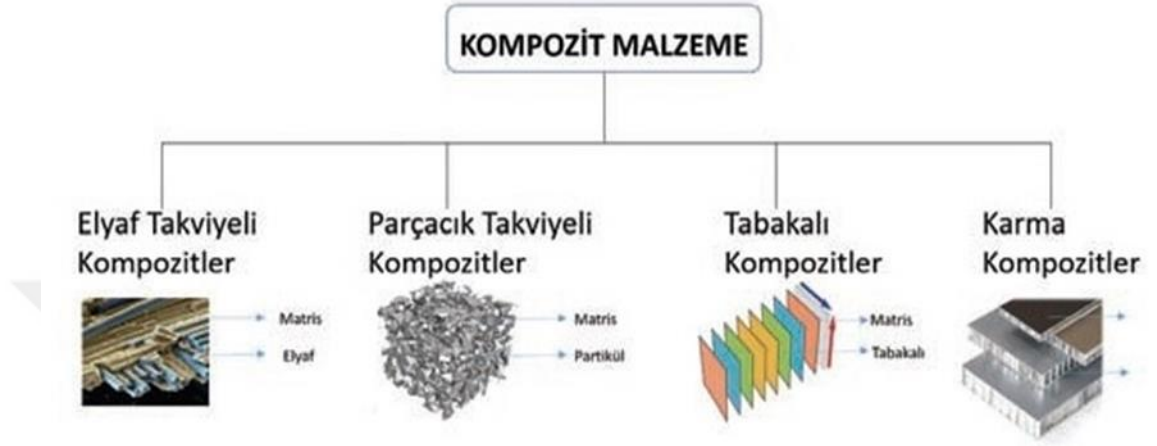
Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler bir bileşenin metal olduğu iki ya da daha çok malzemenin birlikte kullanımı ile meydana getirilirler. Tek bileşenli alaşımlardan elde edilemeyen özelliklerin oluşturulabilmesi için takviyelendirilmiş MMK'lar kullanılır. Matris malzemesi olarak düşük yoğunluk sağlayabilecek alüminyum (Al) ve alaşımları, titanyum (Ti) ve alaşımları, Magnezyum (Mg) ve alaşımları kullanılır. Bu grubun içerisinde Al esaslı malzemeler daha çok tercih edilmektedir. Takviye elemanları metal matris içerisine sürekli fiber, kısa fiber ve partikül şeklinde dahil edilirler. MMK'lar otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

### **1.3.1.3. Seramik matrisli kompozitler**

Seramik malzemeler yüksek sıcaklığa dayanıklılık, hafiflik, erozyon ve aşınma dirençleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Yüksek sıcaklık uygulamalarında polimer esaslı malzemelerin yapılarında bozulmaların görülmesi, MMK'lara göre daha düşük yoğunluk değerlerine sahip olmaları nedeniyle seramik matrisli kompozitler (SMK) kullanılır. Seramiklerin en önemli dezavantajları ise gevrek yapıya sahip olmalarıdır. Bu durum onları çatlaklara karşı hassas yapılarak kompozitlerde kullanımlarını sınırlamaktadır [6]. SMK'ların özellikleri kullanılan takviyelerin boyutlarına ve hacimce ilave edilme yüzdelerine bağlı olmakta birlikte matris ve takviye elemanı arasında oluşacak ara yüzeye bağlıdır. Genellikle partikül takviyeli ve elyafların homojen dağılım gösterdiği SMK'lar daha iyi performans sergilemektedirler [7]. Matris olarak alümina ( $Al_2O_3$ ), silisyum karbür (SiC), silisyum nitrür ( $Si_3N_4$ ), bor karbür ( $B_4C$ ) kullanılır. Seramik matrisli kompozitler uzay roketi motorları, sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçaların imali ile uzay araçlarında kullanılmaktadırlar.

### 1.3.2. Takviye malzemesinin türüne ve kullanım şekline göre kompozit malzemeler

Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması [8]

#### 1.3.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitler (ETP) en yaygın bulunan kompozit türlerinden biridir. Takviye elemanı olarak cam, karbon, aramid veya doğal elyaflar vb. kullanılabilir. Ülkemizde ekonomiklik oluşturması ve yeterli dayanım özelliklerine sahip olması nedeniyle cam elyaf kullanılmaktadır. Genellikle bu tarz kompozit bileşiklerde matris elemanı olarak polimerler tercih edilmektedir. Bunlar içerisinde cam elyaf ile uyumlu özellikler gösteren polyester reçineler yaygın kullanıma sahiptir. Diğer elyaf türleri ile birlikte epoksi, vinilester gibi termoset reçineler ile polyamid gibi termoplastik esaslı reçinelerde kullanılabilir. ETP kompozitlerde dayanım özelliklerini elyaflar üstlendikleri için kompozit malzemelerin özellikleri elyaf malzemesinin özelliklerinden etkilenebilir. En yaygın olarak kullanılan elyaf takviyeli kompozitlerden biri de endüstriyel alanlarda kolaylıkla rastlayabileceğimiz cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozitlerdir. Bölüm 2’de ETP kompozitler daha detaylı olarak incelenecektir.

### **1.3.2.2. Parçacık (partikül) takviyeli kompozitler**

Partikül takviyeli kompozitler malzeme özelliklerini geliştirmek için bir ya da iki boyutlu makroskobik parçacıkların ya da sıfır boyutlu olarak adlandırılan çok küçük boyutlu mikroskobik parçacıkların matris malzemesine takviye edilmesi ile oluşturulan kompozitli yapılardır [9]. Parçacık takviyesi ile oluşturulmuş kompozitler tüm yönlerde aynı malzeme davranışı göstererek izotrop hale sahiplerdir. Kompozit malzemelerin özellikleri takviye edilen parçacık özelliklerinden (parçacık boyutları, yüzey enerjileri, hacimsel miktarları, homojen dağılım şekilleri) etkilenmektedir [10]. Genellikle polimer reçinesi içerisine metal esaslı partikül ilavelerinin yapıldığı kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Çoğu çalışmada ele alınan partikül takviyelerinin sertliği arttırdığı fakat dayanım özelliklerine ise çok etki etmediği görülmüştür. Parçacıklar çoğunlukla kompozit malzemelerde maliyeti azaltmak amacıyla kullanılırlar [3, 10].

### **1.3.2.3. Tabakalı (laminant) kompozitler**

Tabakalı kompozitler farklı elyaf yönlendirmeleri ile oluşturulmuş tabakaların matris elemanı veya bağlayıcı ile bir araya getirilmesi ile oluşturulan yüksek mukavemet değerlerine sahip kompozit malzemelerdir. Tabakalı kompozitler en eski kullanıma sahip kompozit malzemelerdir. Tabakalı kompozitler elyaf malzeme cinsinden ve elyaf örgü şeklinden etkilenebilmektedir. Bu kompozitlere en güzel örnekler uçak yapılarında yaygın kullanıma sahip sandviç yapılar gösterilebilir [3].

### **1.3.2.4. Hibrit (karma) kompozitler**

Kompozit malzeme içerisinde iki ya da daha fazla takviye elemanının bulunduğu karma kompozitlerdir. Doğal elyafların yeterli mukavemet özelliklerine sahip olmaması sebebiyle sentetik elyaflarla bir araya getirilerek oluşturulan hibrit kompozitler en güzel örneklerdendir. Böylelikle sentetik elyafların miktarı azaltılarak ekonomikliğin sağlandığı, doğal elyaflara ise sentetik elyaf ilavesi ile özelliklerinin iyileştirildiği ekonomik ve dayanıklı karma kompozitler oluşturulabilir. Hibrit kompozitler içerisinde özellikle tropikal bölgelerde farklı doğal elyafların kullanımı ile çevreci yeni nesil kompozitler üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

## 2. ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLER

### 2.1. Giriş

Elyaf takviyeli polimer (ETP) kompozitler bir polimer reçine ile kuvvetli takviye liflerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulan yapılardır. Matris fazı olarak termoset ve termoplastik esaslı polimerler kullanılır. Takviye elemanı olarak ise sentetik elyaflar ve doğal elyaflar kullanılır. Sentetik elyaf olarak cam, karbon, aramid, bor vb. elyaflar kullanılırken doğal elyaf olarak ise sisal, jüt, kenaf, bambu, hindistancevizi vb. elyaflar kullanılmaktadır. Bir araya getirilen bileşenler orijinal hallerini korurlar ve üstün özellikleri sayesinde yapıya katkıda bulunarak genel performansı geliştirilmiş yeni bir kompozit malzeme oluşturulur. Polimer malzemelerde takviye elemanı kullanımı mukavemet değerlerini ve sertliği arttırmaktadır. Polimer reçine tipik olarak viskoz ve kolayca kalıplanabilmektedir. Fakat zayıf yapıya sahiptirler. Reçine bileşeni, malzeme yüzeyini aşınmaya ve kimyasal etkilere karşı korur. Ayrıca kompozit malzemelerde reçine üzerine gelen yükü yapıda mekanik olarak yükü taşıma görevini üstlenen takviye elyaflarına aktarır. Reçine elyafları ıslatarak elyafların bir arada kalmasını sağlayan bağlayıcı görevi de görür.

Yüksek mukavemetli, hafif ETP kompozitler savunma sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzun yıllar havacılık sistemlerinde kullanılan ETP'ler son yıllarda lüks otomobiller, rüzgâr türbinleri, sıkıştırılmış gaz depolama tankları gibi farklı yerlerde de kullanılmaya başlanılmıştır. Hafif, güçlü ve sert olan ETP malzemeler imal edilen ürünler için cazip olmaktadır. Hafif malzemeler ulaşım araçlarında önemli derecede enerji tasarrufu sağlamakta ve "hafif ağırlıklandırma" düzenli enerji kullanımını hedefine ulaşmada ana faktörlerdendir. Bunlara ek olarak ETP kompozitlerin mukavemeti, dayanıklılığı ve yapısal özellikleri endüstriyel ekipmanların, binaların ve diğer altyapı elemanlarının servis ömrünü artırmaktadır. Bu nedenle ETP malzemeler kompozit teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [11].

## 2.2. Reçine Malzemeleri

Reçine kompozit malzemelerde en önemli unsurlardan biridir. Termoplastik ve termoset olarak iki reçine türü gösterilebilir. Termoplastik reçineler oda sıcaklığında katı halde bulunurlar. Isıtıldıklarında erirler, soğutulduklarında ise tekrar katılaşırlar. Uzun zincirli polimerler kimyasal olarak çapraz bağlanmaz ve kalıcı şekil değişimi görülmez. Bu sebeple yapısal uygulamalar için çok tercih edilmezler. Termoplastik reçinelerden polipropilen (PP), polifenilen sülfür (PPS), naylon (PA), polietereterketon (PEEK) en çok bilinenlerdir. Aksine termosetler ise yüksek sıcaklıklarda geri döndürülemez çapraz bağlar oluştururlar ve kalıcı olarak şekil değiştirirler. Bu özellik, termoset reçine kompozitlerini yapısal uygulamalar için cazip hale getirmektedir. Kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan termosetler reçineler; doymamış polyesterler, epoksiler ve vinilesterlerdir. En az bilinenleri ise poliüretan ve fenolik reçinelerdir [12]. Termosetlerin yaygın olarak tercih edilmelerinden dolayı bir sonraki bölümde bu reçine türleri ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

### 2.2.1. Termoset esaslı reçineler

Bazı termoset reçinelerin özellikleri aşağıda Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Bazı termoset reçinelerin özellikleri [13]

Reçine Türü	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
Epoksi	1.2 ~ 1.4	2.5 ~ 5.0	50 ~ 110
Fenolik	1.2 ~ 1.4	2.7 ~ 4.1	35 ~ 60
Polyester	1.1 ~ 1.4	1.6 ~ 4.1	35 ~ 90
Vinilester	1.04 ~ 1.1	3.2 ~ 3.6	68 ~ 80

#### 2.2.1.1. Polyester reçine

Polyester reçineler günümüzde farklı amaçlar doğrultusunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle polyester reçineler denizcilik sektöründe çok fazla tercih edilmektedir. Polyesterin çalışma sıcaklığı epoksi reçineden düşüktür. Polyester



pultrüzyon, elyaf sarma, tabaka kalıplama bileşimleri ve reçine transfer kalıplama işlemleri için yaygın olarak kullanılır. Polimer zincirlerinin oluşturulması sırasında uygun değişiklikler yapılarak polyester reçineye çok yönlü özellikler kazandırılmaktadır. Polyester reçineler iyi mekanik-kimyasal-elektriksel özellikler, boyutsal kararlılık, düşük maliyet, işleme kolaylığı gibi özelliklere sahiptir [13].

Polyester reçineler termoset ve termoplastik esaslı olabilmektedir. Termoset polyesterleri dikarboksilik asidin ve iki işlevli alkollerin (glikollerin) yoğunlaştırma polimerizasyonu ile üretilirler [13]. Çapraz bağlanma veya sertleştirme işlemi polimerizasyon olarak adlandırılır ve tersinmez kimyasal reaksiyondur.

Polyester reçineler doymuş (Örn. polietilen tereftalat) ve doymamış polyester reçineler olarak sınıflandırılır. Doymamış polyesterler dikarboksilik asit bileşenleri olan maleik anhidrit veya fumarik asit gibi doymamış bileşenleri içermektedir. Doymamış polyester reçineler dünyada kullanılan tüm polyester reçinelerin yaklaşık %75'ni oluşturmaktadır. Doymamış polyester reçinenin yaygın kullanılma sebebi boyutsal kararlılık ve uygun maliyettir. Doymamış polyester reçineler işleme ve imalat kolaylığı, yüksek korozyon direnci, yangın geciktirici gibi diğer özelliklere de sahiptir [12, 13].

Ortoftalik polyester reçine birçok kişi tarafından tercih edilen standart ekonomik reçinedir. Ortoftalik polyesterler ya maleik anhidrid ya da fumarik asit ile ftalik anhidritin birlikte kullanımı ile yapılır. Ortoftalik polyester reçineler çevreye karşı duyarlıdır ve sınırlı mekanik özelliklere sahiptir [12, 13].

İzoftalik polyester reçine ise su geçirmezliğin arzu edildiği denizcilik endüstrisinde yeni yeni kullanılmaya başlanmıştır [12, 13]. İzoftalik polyester reçineler izoftalik asit ya da tereftalik asidin kullanımı ile oluşturulurlar. İzoftalik polyesterler ise mükemmel çevre direnci ve mekanik özelliklere sahiptir [12].

Çoğu polyester reçine içerisinde genellikle stiren olan bir tekrarlanan birimden (monomer) oluşan viskoz, soluk renkli sıvılardır. Sertleştirme veya çapraz bağlanma (crosslink) işlemi için ağırlıkça %30-50 aralığında reçineye stiren gibi reaktif bir tekrarlanan birim ilave edilir. %50 'ye varan stiren ilavesi reçinenin viskozitesini

düşürerek daha kolay işlenmesine yardımcı olur. Ayrıca stiren herhangi bir yan ürüne ihtiyaç duymadan moleküler zincirleri çapraz bağlayarak sıvı halden katı hale geçirerek reçinenin sertleşmesini sağlar. Stiren içeriği yüksek olan reçineler basınç kullanılmaksızın kalıplanabilir ve bu özellikleri nedeniyle düşük basınçlı reçineler olarak adlandırılırlar [13].

Polyester reçinelerin depolama ömürleri sınırlıdır, uzun süre bekletildiklerinde jelleşme başlar. Genellikle bu jelleşme işlemini yavaşlatmak için reçine üretimi sırasında az miktarlarda inhibitörler eklenir. Polyester reçinenin kalıplanması sırasında katalizör, hızlandırıcı ve çeşitli katkılar yardımcı ürün olarak kullanılır [13]. Reçineler temel halleriyle ya da yardımcı ürünlerle modifiye edilerek kullanılabilir. Polyester reçinelerde polimerizasyon hızı çok yavaştır. Reçinenin uygun sürede polimerizasyonunu sağlamak için katalizörler ve hızlandırıcılar kullanılır [4].

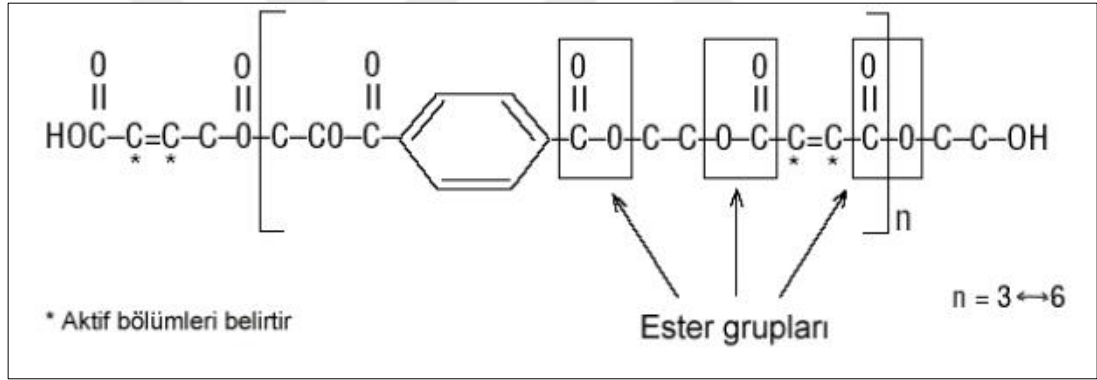
Katalizörler polimerizasyon reaksiyonu başlamadan önce reçine sistemine eklenir. Katalizörler kimyasal reaksiyona katılmazlar ancak işlemi kolayca etkinleştirirler. Hızlandırıcılar ise reaksiyonun çalışma sıcaklığında ya da daha yüksek bir hızda ilerlemesini sağlamak için katalizörlü haldeki reçine sistemine dahil edilirler. Hızlandırıcılar katalizör yokluğunda reçine üzerine çok az etki yaparlar bu nedenle iyi performanslı reçineler oluşturabilmek amacıyla katalizör ve hızlandırıcılar birlikte kullanılır. Bazen ise reçine üreticileri tarafından bir ön hızlandırma yapmak için reçineye yalnızca hızlandırıcı eklenebilir [13].

Reçine sertleştiğinde kimyasal açıdan dayanıklı ve daha sert bir katı olmaktadır [13]. Polyester reçinelerin ortam sıcaklığında sertleşmesi için genellikle başlatıcı olarak metil etil keton peroksit (MEKP) kullanılır. Kobalt naftanat gibi metal tuzları ise MEKP ile hızlandırıcı olarak kullanılır. Bir diğer yaygın başlatıcı ise benzoil peroksittir (BzP). BzP'ye benzer farklı başlatıcılarda bulunmaktadır. T-butil peroksit bu başlatıcılara örnektir ve 140 °C'ye kadar kararlıdır [4].

MEKP ve BzP gibi katalizörler %1-2 oranlarında reçineye ilave edilir. İşleme sıcaklığı ve katalizör miktarı polimerizasyon hızını etkilemektedir. Daha yüksek sıcaklık veya daha fazla katalizör daha hızlı reaksiyonun gerçekleşmesini sağlar. Reçine sıvı halden daha kırılğan bir katıya dönüşmesinden sonra, daha yüksek sıcaklık değerlerinde ilave pişme (post cure) işlemine maruz bırakılır. İlave Pişmenin amacı tam çapraz bağlanma

oluşturarak reçinenin Tg değerini artırmaktadır. Polyester reçinenin özellikleri tepken (reaktan), katalizör ve monomerlerin türü ve miktarından, sertleştirme sıcaklığı gibi üretim değişkenlerinden etkilenmektedir. Polyesterin moleküler ağırlığı ne kadar fazla ve moleküllerde ne kadar çok doymamış kısım varsa sertleşen reçinelerin mukavemeti o kadar yüksektir [12].

Polyester reçinelerin başlıca avantajları; düşük viskozite nedeniyle takviye elemanlarını iyi ıslatabilme özelliği, düşük maliyet, sertleşme koşulları operatörün deneyimi ile kolaylıkla değiştirilebilmesi, kolay imalat ve mükemmel çevresel dayanıklılıktır. Polyester reçinelerin dezavantajları ise; sertleşmeden dolayı oluşan yüksek büzülme nedeniyle zayıf elyaf/matris ara yüzey bağlanma mukavemetine neden olur ve böylelikle ortaya çıkan büzülme polyesterin epoksi reçinelerden daha düşük mekanik özelliklere sahip olmasına neden olur [4].

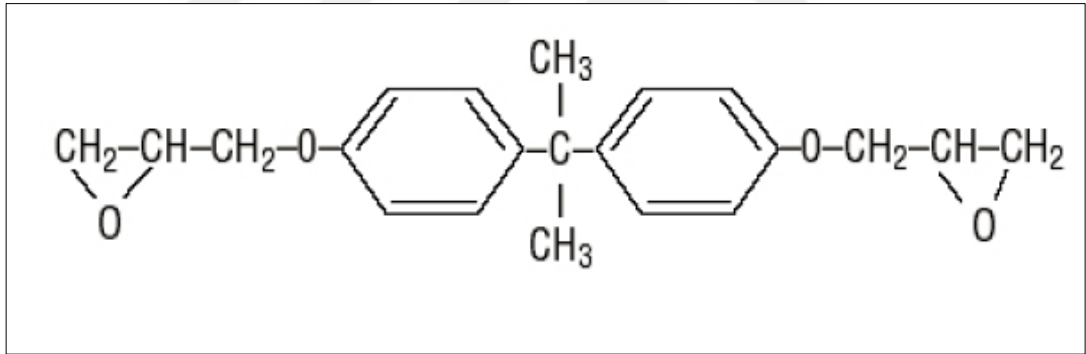


Şekil 2.1. İzofталik bir polyester reçinenin kimyasal yapısı [14]

### 2.2.1.2. Epoksi reçine

Kompozitlerde kullanılan epoksiler ağırlıklı olarak glisidil eterler ve aminlerdir. Malzeme özellikleri ve sertleşme işlemi beklenen performansı karşılamak üzere farklı şekillerde formüle edilebilirler. Sertleştirme işlemi gerçekleştirecek ajanın seçimi önem arz eder. Çünkü gerçekleşecek kimyasal reaksiyonları etkileyerek son nihai ürünün özelliklerini belirlemektedir. Epoksi reçinelerde sertleşme işlemi sırasında %1-2 oranlarında çekme gerilmeleri oluşur. Dışarıdan herhangi bir katkıya ihtiyaç duyulmadan düşük çekme özelliğine sahip epoksi reçineler oluşturulabilir. Bu özellikleri polyestere göre avantaj sağlamaktadır. Fakat epoksi reçinelerin viskoziteleri polyestere kıyasla yüksektir. Viskoziteyi düşürmek için seyrelticiler kullanılır.

Reçineye ilave edilen seyreltici miktarının artması ile viskozite ve malzeme özellikleri azalır. Kompozit özelliklerinde bozunmaya sebep olmamak için seyreltici oranı %10-15 aralığında tercih edilir. Ayrıca üstün performansların hedeflenmesinden dolayı ilave işlemler (özellikleri geliştirme) gerektirir. Bu ilave işlemler epoksileri yüksek maliyetli yapmaktadır. Bu nedenle yüksek performans faktörünün maliyetten daha önemli olduğu denizcilik, otomotiv, elektrik-elektronik ve diğer çeşitli sektörlerde kullanılması avantaj sağlar. Epoksi reçineler cam, karbon, aramid gibi sentetik elyaflarla kullanılabilir. Sertleşme sırasında yan ürün oluşmadığı için sertleşen reçine iyi mekanik, kimyasal ve elektriksel özelliklere sahiptir. Epoksi reçinelerin özellikleri arasında; yüksek mukavemet, düşük sürtünme, mükemmel korozyon direnci, farklı çevresel şartlara karşı dayanıklılık, yüksek sıcaklıklarda yeterli çalışma ömrü ve iyi elektriksel özellikler gösterilebilir. Epoksi reçineler genellikle "vakum torba", otoklav, basınçlı torba, pres, elyaf sarma ve el yatırması gibi üretim proseslerinde sıkıntısız olarak kullanılabilir [12, 15].



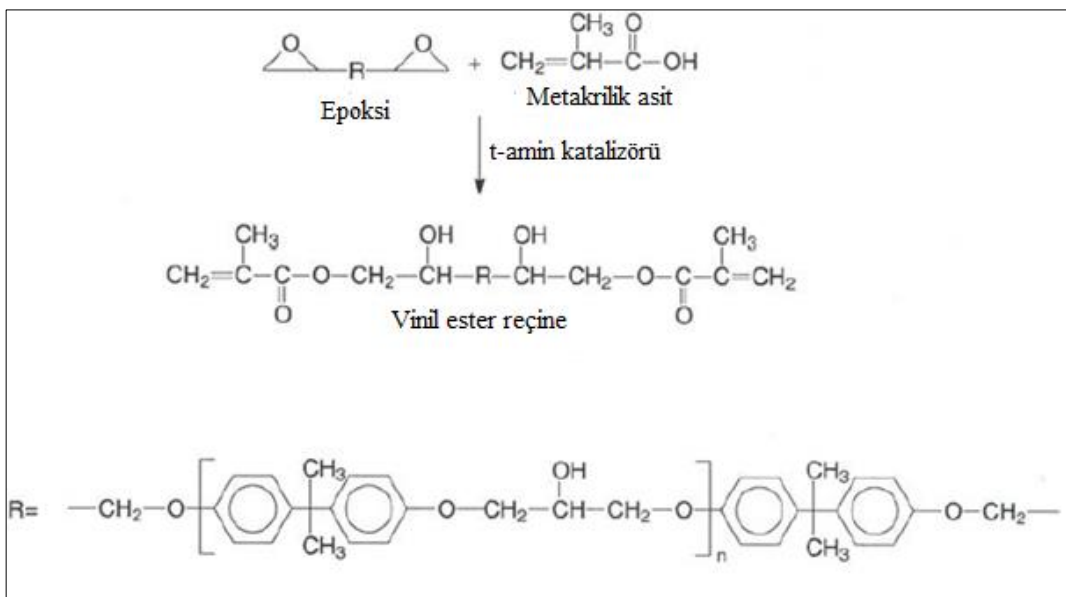
Şekil 2.2. Epoksi reçinenin kimyasal yapısı [14]

### 2.2.1.3. Vinilester reçine

Vinilester (VE) reçineleri, Doymamış karboksilik asit (akrilik asit veya metakrilik asit) ile epoksi reçinenin (iki işlevli veya çok işlevli) birlikte kullanımı ile oluştururlar. Vinilester reçineleri epoksi reçinelerin avantajları ile doymamış polyestere ait kolay işleme/hızlı sertleşme özelliklerini bir arada bulundurlar. Böylelikle vinilester reçinelerin fiziksel özellikleri polyesterden daha yüksek, maliyetleri ise epoksi reçinelerden daha az olmaktadır. Organik peroksitler ile sertleşmeleri sağlanır. Vinilester reçinenin sertleşmesi için metil etil keton peroksit (MEKP) ve kobalt naftanat kullanılır [12].

En basit şekildeki vinilester, Bisfenol A (BPA)'nın diglisidil eterinin bir molu ile iki mol metakrilik asit arasındaki reaksiyon gerçekleşmesi ile üretilir. Reaksiyon yaklaşık 100 °C sıcaklıkta trifenil fosfin katalizörü ile gerçekleşir. Metakrilik asidin polimerizasyonunu durdurmak için hidrokinon inhibitör olarak kullanılır. Vinilester reçinelerin çeşitliliği kullanılacak olan epoksinin yapısının değiştirilmesi ile sağlanabilir. Vinilester reçineleri genel anlamda bir stiren monomeri içinde akrilik esterlerin çözünmesidir. Stiren içeriği geniş bir viskozite aralığı sağlamak için genellikle (0,1-4) Pa.s aralığında ayarlanır [12, 16].

Vinilester reçineler kompozitlerde matris fazı olarak kullanıldığında yüksek tokluk, iyi esneklik ve mükemmel korozyon direnci sağlar. Bu reçine türü suya, organik çözücülere ve alkalilere karşı dirençlidir. Fakat asidik etkilere karşı polyester kadar dirençli değildir. Kalıplama yöntemleri ise polyester ile benzerlik göstermektedir. Korozyon direnci iyi olduğu için depolama tanklarında, içerisinde akışkan geçişinin olduğu boru ve kanalların üretimlerinde kullanılırlar. Elyaf takviyesi içeren vinilester reçineleri televizyon, sinyal alıcı antenlerde, elektrik üretim-dağıtım istasyonlarında kullanılırlar. Vinilester reçineleri su altı uygulamalarında epoksilerden daha iyi performans gösterirler. Yelkenli ve motorlu tekneler, deniz gemilerinin gövde kısımları başta olmak üzere çeşitli denizcilik uygulamalarında kullanılırlar. Ayrıca vinilesterlerin suya dayanıklılıklarının iyi olması nedeniyle klima, nemlendiriciler ve diğer ev aletlerinde kullanılabilirler. [12, 16, 17].



Şekil 2.3. Vinilester reçinesinin sentezine ait reaksiyon şematığı [16]

#### 2.2.1.4. Fenolik reçine

Fenolik reçineler formaldehitin kademeli olarak polimerleştirilmesi ve fenol ya da fenol türevi olan asit ya da baz katalizörü kullanılmasıyla meydana gelirler. Fenolik reçineyi Leo H. Baekeland ticari olarak piyasaya sunan ilk isimdir. Ürün tipi ve kalitesi çoğunlukla kullanılan reaktiflerin miktarına ve katalizörün niteliğine bağlıdır. Novolak ve resol olarak iki yaygın fenolik reçine türü vardır [15].

Termoplastik olan novolak mevcut hali ile kullanılabilir ya da çapraz bağlı yapı elde etmek için heksametilen tetramin (HMTA) ile sertleştirilerek de kullanılabilir. Sertleştirme işleminde kullanılan bu maddeler reaktif ara madde özelliği taşır ve farklı gruplara dönüşümleri sağlanarak farklı özellikler elde edilebilir. Sertleştirme sırasında kondensasyon reaksiyonunun bir sonucu olarak su oluşur ve uzaklaştırılması gerekir. Bu su fenolik reçinelerin enjeksiyon ve basınçlı hazır kalıplama üretim proseslerinde özel işlemler ile buhar olarak çıkışı sağlanarak ortamdaki uzaklaştırılır [15, 16].

Diğer önemli çeşidi ise çok işlevli reaktif bir bileşik olan ve herhangi bir katalizöre ihtiyaç duyulmadan termal olarak iyileştirilebilen resol 'dür. Novolak aşırı miktarda fenol ve asit ya da metal tuzu katalizörü kullanılarak üretilirken, resol ise formaldehit ile bazik bir katalizör kullanılmasıyla üretilir. Novolak'ın raf ömürleri resollere kıyasla daha uzundur [15].

Fenolik reçineler yüksek mekanik mukavemet, uzun süreli termal ve mekanik kararlılık, mükemmel yangın, duman, toksisite özelliği ve mükemmel ısı yalıtımı gibi özellikler göstermektedirler. Fenolik reçineler 180-200 °C'lik sabit kullanım sıcaklıklarında kimyasallara ve neme karşı mükemmel direnç gösterdikleri için yangın hassasiyetinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılan elyaf takviyeli kompozitlerde matris bileşenini oluştururlar. Fenolik reçine ile oluşturulan kompozitlerin dezavantajları ise ışık ve oksijen maruz kaldıklarında renklerini kaybetmeleridir [15, 16].

### 2.2.2. Termoplastik esaslı reçineler

Termoplastiklerin matris olarak kullanımı 150 °C'nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde epoksi reçinelerden daha iyi performans sergileyebilecek reçine malzemelerinin araştırılması esnasında ortaya çıkmıştır [18].

Termoplastik polimerler amorf ve kristal yapı halinde bulunurlar. Yüksek performanslı kompozitlerde matris elemanı olarak termoplastiklerin kullanımı uygun olmaktadır. Kompozit malzemelerde kullanılabilen termoplastik polimerler belirli oranlarda kristalleşme derecesine sahiptir. Tamamen kristal yapıya sahip polimer bulunmamaktadır ve bu sebeple yarı kristalimsi polimer olarak adlandırılırlar [4].

Termoplastikler termoset polimerleri ile karşılaştırıldığında çok az nem emilime sahiptir. Artan sıcaklık değerlerinde mekanik özelliklerinde çok az değişiklik meydana gelmektedir. Termoplastikler termosetlere göre daha dayanıklıdır. Tabakalar arası kesme mukavemeti daha iyidir ve darbelere karşı daha dirençlidirler. Kimyasal reaksiyona gerek duyulmadığı için imalat süreleri oldukça kısadır fakat imalatları için gerekli olan sıcaklık ve basınç değerleri termoset reçinelere kıyasla çok daha fazladır. Bu durum beraberinde maliyet artışını getirmektedir. Termoplastiklerde termosetlerde olduğu gibi sertleştirme işlemine ihtiyaç duyulmaz. Termoplastik reçineler soğutulduklarında kendi sertlik değerlerine ulaşır [4].

Amorf bir termoplastikteki polimer zincirleri herhangi bir düzen olmadan dizilirler. Amorf termoplastikler çözücü içerisinde çözünebilir, takviyeler düşük viskoziteli çözelti ile emdirilir (emprenye edilir) ve yüksek erime viskozitesi sorunundan kaçınılabilir. Fakat oluşan nihai bileşik çözücülere karşı dirençli değildir. Amorf polimerler sürünme deformasyonuna ve yorulma hasarına yarı kristalimsi polimerlere kıyasla daha eğilimlidirler. Çözücü direncinin olmaması amorf malzemelerin bir kısmını iyi ateş, duman, toksisite ve tokluk gibi özelliklerin ön plana çıktığı uygulamalarda kullanılmasını sağlar [4].

Kristal yapı halindeki termoplastikler kimyasal etkilere karşı dirençlidirler. Yarı kristalimsi termoplastiklerde ise polimer zincirleri belirli bir düzene göre dizilir. Uzun moleküllü zincir yapısından dolayı gerçekte tamamen kristal yapı elde etmek mümkün değildir. Bu nedenle kristalleşebilme özelliğine sahip polimerler yarı kristalli olarak

adlandırılır. Yarı kristalimsi termoplastikler iyi çözünme direncine sahiptir ve farklı kimyasallara karşı molekül yapılarını korurlar. Yarı kristalin polimer yapısının bir kısmı amorf bir kısmı kristalin haldedir. Termoplastiklerin özellikleri yapıda bulunan kristalin faz yüzdesine bağlıdır. Kristallik çözünme direnci ve yüksek sıcaklık mekanik özelliklerini geliştirir. Hızlı soğutma işlemi düşük kristalliğe sebep olur, çok yavaş soğutma ya da kristalin noktaya yakın kısımlarda işleme maruz bırakma aşırı kristallik oluşturur. Bu sebeple matris olarak kullanılacak termoplastik reçinelerin üretimleri sırasında uygun işlemler gerçekleştirilmelidir. Yarı kristalin polimerler katılaştıklarında amorf polimerlerden daha fazla büzülürler [4].

Termoplastik reçinelerin başlıca avantajları; Uzun süreli raf ömrü, termosetlere kıyasla daha yüksek tokluk ve darbe direnci, iyi kimyasal dirençtir. Termoplastik esaslı kompozitler hidrolik sıvı, havacılık yakıtları ve boya sökücülerinin kullanıldığı havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

Bazı termoplastik esaslı reçinelerin özellikleri aşağıda Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Bazı termoplastik esaslı reçinelerin özellikleri [19]

Reçine	Yoğunluk (Kg/m <sup>3</sup> )	Elastiklik Modülü (MPa)	Poison Oranı	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama %
Polipropilen (PP)	900	1200	0.4	30	20-400
Polifenilen sülfid (PPS)	1300	4000		65	100
Polyamid (PA)	1100	2000	0.35	70	200
Polietersülfon (PES)	1350	3000		85	60
Polieterimid (PEI)	1250	3500		105	60
Polieter eter keton (PEEK)	1300	4000		90	50

## 2.3. Takviye Elemanları

### 2.3.1. Cam elyaf

Cam elyaflar (CE) polimerlerin içerisine takviye edildiklerinde polimerlerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerini değiştirirler. Camlara mühendislik malzemelerinin



özelliklerini geliştirmek, liflerin kullanımı ve işlenmesini kolaylaştırmak için ilave işlemler uygulanır. Cam elyaf hacmi, cam elyaf çeşitleri (dokunmuş-dikilmiş kumaş, kırılmış demetler), cam filament çapı, cam elyaf uzunluğu ve cam elyaf yönelimi gibi kompozit değişkenleri polimer matrisli kompozitlerin özelliklerini etkilemektedir. Cam elyaf insanlık tarihinde yıllardır kullanılmaktadır. Fakat son yıllara kadar özellikle CTP kompozitlerden öncesine kadar cam elyafların olumlu yönleri çok fark edilememiştir. Cam elyafların polimerler için ideal takviye malzemesi olmasının sebepleri şu şekilde sıralanabilir [20];

1. Elastiklik: Cam elyaflar hooke kanuna uyarlar. Tipik elyafların maksimum %5'lik kopma uzamaları vardır.
2. İyi termal özellikler: Cam elyafları yanıcı değildir, düşük termal genişleme katsayısına ve yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Mukavemetlerinin yaklaşık olarak yarısını 700 °C'de ve %25'lik kısmını ise 1000 °C'ye kadar kaybetmezler.
3. Boyutsal kararlılık.
4. Mükemmel kimyasal ve nem direnci: Cam elyafları nemi ve küfü absorbe etmez, asit ve alkali gibi çözücülere dirençlidirler. Nem kompozitli yapılarda matris ve elyaf arayüzeyini olumsuz etkilemektedir.
5. Mükemmel elektriksel özellikler: Cam elyaf yüksek dielektrik mukavemetine ve düşük dielektrik sabitine sahiptir.
6. Düşük maliyet ile yüksek performansa sahiptirler.

Tablo 2.3. Farklı cam elyafların mekanik özellikleri [21]

	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme mukavemeti (Gpa)	Young modülü (Gpa)	Uzama (%)	Termal genişleme katsayısı (10 <sup>-7</sup> /°C)	Poison oranı	Kırılma indisi
E - cam	2,58	3,445	72,3	4,8	54	0,2	1,558
C - cam	2,52	3,31	68,9	4,8	63	-	1,553
S - cam	2,46	4,89	86,9	5,7	16	0,22	1,521
A - cam	2,44	3,31	68,9	4,8	73	-	1,538
R - cam	2,54	4,135	85,5	4,8	33	-	1,546
EC - cam	2,72	3,445	85,5	4,8	59	-	1,579
AR - cam	2,7	3,241	73,1	4,4	65	-	1,562

Cam elyaflar farklı uygulamalar için değişik çeşitlerde üretilirler. Takviye olarak kullanılan bazı cam elyaflar [20, 22];

- A camı: E tipi cam lifindeki gibi mukavemet, kararlılık ve iyi elektrik dayanımı gibi özelliklerin gerekli olmadığı durumlarda soda silikat camlarının kullanımıyla üretilirler.
- C camı: Kimyasal etkilere karşı dirençlidir. Depolama tankları gibi yerlerde kullanılır.
- D camı: Yüksek performanslı elektronik uygulamalarda kullanılmak için geliştirilmiş dielektrik camıdır. D camının mekanik özellikleri E ve S camlarına kıyasla daha düşük olmasına rağmen düşük dielektrik sabitine ve düşük yoğunluğa sahip olması elektronik uygulamalar için vazgeçilmez yapmaktadır.
- E camı: kireç-Alümina-borosilikat içeriklidir. Elektriksel olarak sürekli lif olarak üretilir. E camı en çok kullanılan takviye elemanıdır.
- S ve S-2 camı: Uzay ve savunma sanayi gibi uygulamalarda kullanılmak için geliştirilmiş yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Bu cam E camından yaklaşık %33 daha büyük çekme mukavemetine ve %20 daha büyük çekme modülüne sahiptir. S-2 camı, S camı ile aynı temel bileşime sahiptir ancak boyutlandırma ve hammaddelerin kalite kontrolü farklıdır.
- R camı: Asidik korozyon dayanımı ve mukavemetin gerekli olduğu durumlarda kalsiyumalimosilikat camlarının kullanılmasıyla oluşturulurlar.

Cam elyafların mukavemet ve modül değerleri artan sıcaklık değerleriyle bozulabilmektedir. Devamlı yük altında sürünme etkisine maruz kalsalar bile iyi performans özellikleri gösterebilecek şekilde tasarım esnekliğine sahiptirler. Lif izotropik malzeme olması nedeniyle çelikten daha düşük termal genişleme katsayısına sahiptir. Polimerlerde takviye olarak kullanılan cam elyaf çapları 14-24 µm aralığındadır ve 27 µm kadar oluşturulabilmektedir [22, 23].

Tablo 2.4. Farklı cam elyafların % kimyasal bileşimleri [12]

	A- Camı	C-Camı	D-Camı	E-Camı	ECR-Camı	AR-Camı	R-Camı	S-2-Camı
SiO <sub>2</sub> %	63-72	64-68	72-75	52-56	54-62	55-75	55-60	64-66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	0-6	3-5	0-1	12-16	9-15	0-5	23-28	24-25
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	0-6	4-6	21-24	5-10		0-8	0-0.35	
CaO%	6-10	11-15	0-1	16-25	17-25	1-10	8-15	0-0.2
MgO%	0-4	2-4		0-5	0-4		4-7	9.5-10
ZnO%					2-5			
BaO%		0-1						
Li <sub>2</sub> O%						0-1.5		
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O%	14-16	7-10	0-4	0-2	0-2	11-21	0-1	0-0.2
TiO <sub>2</sub> %	0-0.6			0-4	0-4	0-12		
ZrO <sub>2</sub> %						1-18		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	0-0.5	0-0.8	0-0.3	0-0.8	0-0.8	0-5	0-0.5	0-0.1
F <sub>2</sub> %	0-0.4					0-5	0-0.3	

Tablo 2.4'te görüldüğü gibi cam, SiO<sub>2</sub> ve çeşitli metal oksitlerden oluşan silikat tipi bileşimdir. SiO<sub>2</sub> camın ana bileşenidir ve yüksek erime derecesine sahiptir. Metal oksit olarak ise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O (K<sub>2</sub>O), BeO, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılır. Bunların yapıdaki işlevleri şu şekildedir; Cam elyaf imalatında işlem koşullarını iyileştirmek, daha düşük erime noktası, kristalleşebilme eğilimini azaltarak lif çekimini kolaylaştıracak uygun sıvı cam viskozitesi elde etmek [23].

Genellikle cam elyafları alkali metal oksitler Na<sub>2</sub>O (K<sub>2</sub>O) içerir. Bu oksitler camın erime sıcaklığını ve viskozitesini düşürür böylece sıvı camdaki kabarcıklar kolaylıkla giderilerek üretim daha kolay gerçekleştirilir. Cam elyafın BeO içermesi modül değerlerini iyileştirir fakat yüksek oranlarda toksisite oluşumuna neden olur. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesi, cam elyafın asit direncini artırır ve elektrik performansını iyileştirir, erime noktasını ve viskoziteyi düşürür, modül ve mukavemet değerlerine ise olumsuz etki yaparak azaltır [23].

Ayrıca cam elyafları kimyasal içeriklerine (alkali metal oksit) göre de sınıflandırılabilir. Alkali cam elyafı alkali metal oksit içeriği %12'den fazladır. Orta alkali cam elyafları alkali metal oksit içeriği %2-6 arasındadır. Mikro alkali cam elyafı alkali metal oksit içeriği %2'den azdır ve alkali olamayan cam elyafı şeklinde de adlandırılmaktadır. Genellikle alkali metal oksit yüksek bir içeriğe sahipse cam kolayca erir ve deniz suyu korozyonuna dayanıklı olur. İnşaat konstrüksiyonlarında

düşük alkali ya da alkali cam elyafları kullanılır. Elektrik ve askeri uygulamalar için ise alkali olmayan cam elyafı kullanılır [23].

### **2.3.2. Karbon elyaf**

Karbon elyafları ağırlıkça %92 karbon ihtiva ettikleri için karbon elyafı olarak adlandırılır. Karbon elyafların yapıları amorf ve kısmen kristal olmaktadır. Karbon elyaf içerisinde grafit oranı %0-100 aralığında olabilmektedir. Grafit oranı yapıda çoğunluğu oluşturduğunda grafit elyafı olarak adlandırılır. Ticari olarak karbon elyaflarında ön madde olarak zift veya poliakrilonitril (PAN) kullanılarak imal edilirler [12].

PAN yüksek gerilme mukavemeti ve yüksek elastiklik modülüne sahip olması nedeniyle karbon elyaf üretiminde yaygın olarak kullanılan öncü malzemelerdendir. Son sertleşme sıcaklığına bağlı olarak PAN ön maddeleri ile yüksek yapışkanlı, orta modüllü lifler, yüksek modüllü ve ultra yüksek modüllü liflerden oluşan farklı karbon elyafları oluşturulmaktadır. Diğer ön madde olan zift ile oluşturulmuş karbon elyafları daha yüksek elastiklik modülüne ve daha düşük gerilme mukavemetine sahiptir [21].

Karbon elyafları elektriksel olarak iletken, kimyasal olarak inerttirler. Karbon elyafı demet, şerit, kumaş halinde üretilmektedir. Bazı durumlar için takviye elemanı olarak kırılmış ve öğütülmüş şekillerde kullanılırlar [21]. Karbon elyaflara yüzey işlemleri uygulanarak takviye elemanı olan lifler ile matris malzemesi arasındaki bağ mukavemeti iyileştirilebilmektedir. Bu iyileştirmeler oksidasyon işlemleri, bağlama ajanları, ıslatma ajanları ile yapılmaktadır [12].

Karbon elyafları termosetler ve termoplastikler için takviye olarak kullanılmaktadır. Karbon elyafları cam ve aramid elyaflarına kıyasla daha düşük ısıl genleşme katsayısına sahiplerdir. Karbon elyafı anizotropik malzemedir. Enine modül ve boyuna modül değerleri farklıdır, enine modül değeri uzunluk modül değerinden küçüktür. Bu nedenle karbon elyafı yüksek yorulma ve sürünme direncine sahiptir [12]. Cam elyafı (CE) ile karşılaştırıldığında karbon elyafının young modülü 3 kat daha fazladır. Bu, belirli gerilme altındayken karbon elyafının daha az elastik deformasyona sahip olacağını gösterir. Termal genleşmesi düşük olması sebebiyle karbon elyaflar yüksek sıcaklık etkisinde temel özelliklerini koruyabilirler. Karbon elyafların yüksek

sıcaklıkta sahip olduğu bir diğer avantaj ise; Düzgün olarak üretildiklerinde karbon elyaflı kompozitlerde yorulma sorunun yaşanmamasıdır. Karbon elyaflar yüksek dayanıklılık ve hafif bir yapı oluşturulmak istenildiğinde tercih edilmektedirler. Karbon elyafları havacılık, elektronik ve otomobil sektörlerinde kullanılmaktadır [17, 21].

### **2.3.3. Aramid (keklar) elyafı**

Kevlar (Dupont) ticari adıyla ilk olarak uçak uygulamaları için yeterli sağlamlık ve mukavemeti sağlayabilmek için PMK'lar da kullanılmıştır. Kevlar katı moleküler bir yapıya sahip olan poli-poro-fenilen-tereftalamid (PPTA) aramid lifidir. Aramid benzeri elyaflar ilk olarak 1960'lı yıllarda kauçuk lastiklerde takviye olarak kullanılan çeliğe alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu gelişmeler sonucunda aramid elyafları balistik uygulamalar için asbeste alternatif olmuştur [17, 21].

Aramid elyafları çoğunlukla hafif, yüksek mukavemet ve sertlik, hasar direnci ve yorulma direnci açısından son derece önemli olan kompozit yapılarda kullanılır. Aramid elyaflarının en sık kullanıldığı uygulamalar kurşun geçirmez yelekler, soğutma araçları, gemi gövdeleri ve inşaat yapılarının güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Aramid elyafların dezavantajı ise basma mukavemetlerinin düşük olmasıdır [21].

Aramid elyafları Meta-aramid, Para-aramid olmak üzere iki kategoride sınıflandırılır. Burada meta ve para terimi aramid elyaf yapısındaki kimyasal bağların izafi (göreceli) konumlarını belirtmektedir. Para-aramid elyafların kimyasal bağları elyafların uzun yönünde hizalanır. Para-aramidlerden yapılmış elyaflar daha yüksek mukavemet sağlarlar. ETP kompozitlerde darbenin önemli olduğu ince levhalarda ve yüksek mukavemet gerektiren yerlerde kullanılır. Kevlar ve technoro ticari olarak bilinen en önemli para-aramidlerdir [21].

Meta aramidler ise uzun yönde daha az hizalanırlar bu nedenle çekme mukavemetleri düşüktür. Meta aramid bağlardan oluşan elyaflar mükemmel termal, kimyasal ve radyasyon direncine sahiptir. Genellikle itfaiyeci ve yarış otomobili sürücülerinin kıyafetlerinde ateş gibi yanıcı etkilere karşı dayanıklı olması beklenen tekstil

ürünlerinde kullanılır. Nomex ve tejjiconex en çok bilinen meta-aramid örneklerindendir [21].

Kevlar elyaflar; keklar 29, 49, 149 olarak karşımıza çıkar. Kevlar elyafların özellikleri;

- Kevlar 29: Yüksek mukavemet (520000 psi/3600 MPa), düşük yoğunluk (90 lb/ft<sup>3</sup> / 1440 kg /m<sup>3</sup>) sahiptir. Uygulama alanları; kurşun geçirmez yelek, kompozit zırh takviyesi, kask, kablo parçalarının imalinde kullanılır [13].
- Kevlar 49: Yüksek modül (19000 ksi/131 GPa), yüksek mukavemet (550000 psi/3800 MPa), (90 lb/ft<sup>3</sup> / 1400 kg/m<sup>3</sup>) sahiptir. Havacılık, otomobil ve denizcilikte kullanılır [13].
- Kevlar 149: Çok yüksek modül değeri (27000 ksi/186 GPa), yüksek mukavemet (490000 psi/3400 MPa), düşük yoğunluk (92 lb/ft<sup>3</sup> / 1470 kg/m<sup>3</sup>) sahiptir. Uçaklarda güçlendirici takviye olarak kullanılan kristal elyaflardır [13].

Aramid elyafları kırılma sırasında büyük miktarda enerjiyi absorbe etme kabiliyetine sahiptir. Karbon ve cam elyafları ile karşılaştırıldıklarında aramid elyafları daha az gevrek, daha yüksek çekme mukavemeti ve modülüne sahiptir. Aramid elyafları uzun süre mor ötesi ışınlara maruz kaldıklarında mukavemetleri bozulur fakat bu proplem aramid elyaf takviyeli kompozitlerde büyük bir problem oluşturmaz, çünkü elyaf reçine malzemesi tarafından korunur. Aramid elyafları her türlü polimerik matrisle uyumlu olarak kullanılabilen takviye elemanıdır [17].

#### **2.3.4. Bor elyaf**

Bor elyafı beyaz sıcak tungsten filament üzerine bor çöktürülerek elde edilen yüksek mukavemetli ve yüksek modüllü elyaftır [17]. Bor elyafları ilk olarak 1959'da keşfedilmiştir. 1960'lı yıllarda ise yüksek performanslı uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Boronun yüksek sıcaklık kapasite sayesinde metal matrisli kompozitlerin üretilebilirliği sağlanmıştır [4].

Yoğun tungsten borit çekirdeği içeriği nedeniyle bor elyafların çapları karbon elyafların çapından çok büyüktür. 100 ve 140 µm çaplarında elyaflar üretilebilmektedir. Elyaf çaplarının büyük olması bor elyafların bükülme mukavemetinin yüksek olmasını sağlar. Fakat bu çap aralıkları kompozit malzemelerde takviye olarak kullanımlarını kısıtlamaktadır. Ayrıca çap büyüklüğü

cam, kevlar ve karbon elyafları gibi bor elyafın kumaş haline getirilmesini engellemektedir [4].

Endüstriyel olarak bor elyafı, bor karbür elyafı ve bor nitrür elyafı bulunmaktadır [17];

1. Bor elyafı: Çekme mukavemeti 100-200 cN/tex ve elastiklik modülü 370-450 kN/mm<sup>2</sup> dir. Genellikle uçak ve uzay uygulamalarında rotorlar, türbinler vb. parçalarda kullanılır.
2. Bor karbür elyafı: Çekme mukavemeti 80 cN/tex, elastiklik modülü 340 kN/mm<sup>2</sup>, 2200 °C'ye kadar dayanıklılık ve yüksek iletkenlik özelliklerine sahiptir.
3. Bor nitrür elyafı: Çekme mukavemeti yaklaşık 100 cN/tex, elastiklik modülü 28-90 kN/mm<sup>2</sup>, kısa süreli olarak 3000 °C sıcaklıklara dayanıklılık, karbon ve cam elyafa göre daha iyi korozyon direnci ve yüksek elektrik direnci gibi özelliklere sahiptir. Uçak ve uzay uygulamalarında, ısı ve elektrik izolasyonu uygulamalarında kullanılır.

Genel olarak bor elyafları 379-414 GPa aralığında çekme modülleri vardır. Yüksek basma mukavemeti ve burkulmaya karşı direnç özelliklerine sahiptir. Bor elyafların en büyük dezavantajı ise karbon elyaftan daha yüksek bir maliyete sahip olmasıdır. Sertleştirilmiş bor kompozitlerin yoğunluğu karbon kompozitlerden yüksek olmasına rağmen alüminyum ve titanyumdan düşüktür bu nedenle havacılık sektöründe kullanım alanı bulmaktadır [17, 4].

### **2.3.5. Seramik elyaf**

Seramik elyaflar çoğunlukla 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda refrakter elyaf olarak kullanılırlar. Amorf yapıdan farklı olarak polikristalin yapı ile karakterize edilirler. Refrakter seramik elyaflar genellikle yüksek sıcaklıklarda ısı yalıtımı ve özel kompozitlerin üretimlerinde kullanılır. Maliyetleri çok yüksektir. Bu sebeple az miktarlarda üretimleri gerçekleştirilerek havacılık gibi belirli alanlarda kullanılır. Seramik elyaflar da kullanılan bileşenler; bor, silika, karbür, alümina ve zirkonyadır. Seramik elyaflar çok ince elyaflardır. Borat, karbür, silikon nitrür ve borat nitrür gibi farklı elyaf çeşitleri vardır. En yaygın kullanılan seramik elyaflar silikon karbür ve alümina (alüminyum oksit) elyaflarıdır. Refrakter elyaflar düşük kimyasal aktifliğe sahiptir. En iyi özellikleri yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direncine sahip olmalarıdır. Seramik elyaflar 1600 °C'ye kadar ulaşan sıcaklıklarda kullanılsa da erime sıcaklıkları

2000 °C'yi aşabilmektedir. Seramik elyafların başlıca kullanım alanları; uçak gaz türbinleri, nükleer reaktör duvarları ve ısı eşanjörleridir [17, 13].

### **2.3.6. Metal elyaf**

Metal elyaflar da lifler birbirleriyle güçlü mekanik kenetlenme oluşturacak şekilde bir araya getirilirler. Mükemmel izotropik mukavemet değerlerine sahiptir ve uzun ömürlüdür. Elyaflar paslanmaz çeliklerden ve farklı demir dışı alaşımlarından 1-50 µm aralığında elde edilebilmektedir. Demir ve demirdışı metal elyafların üretimleri tel çekme yöntemiyle rahatlıkla gerçekleştirilmektedir. Metal elyafları; yüzey kusurlarına karşı düşük hassasiyette, dayanıklı, yüksek sıcaklıklara karşı mükemmel dirence, seramik-polikristal veya çok fazlı malzemelere kıyasla daha sünek davranışa sahiplerdir. Metal elyafları ince şekilli olarak refrakter seramiklere ilave edildiklerinde darbe direncinde ve termal şok özelliklerinde iyileşmeler görülmektedir. Metal elyafları polimer matrislere takviye olarak kullanılır. Epoksi ve polietilen gibi matrislere çelik tel ile takviye sağlanabilmektedir [13].

### **2.3.7. Doğal elyaf**

Elyaflar en basit şekilde doğal ve insan yapımı olarak iki şekilde sınıflandırılır. Doğal elyaflar bitkisel, hayvansal ve mineral elyafıdır. Bitkisel esaslı elyaflar yüksek selüloz (%65-85) içeriğine sahiptir. Bitkisel elyafların yapıtaşları arasında hemiselüloz (%5-11) ve ligninde (%2-15) bulunmaktadır. Bitkisel elyafların yanında atık durumunda bulunan kâğıt ve ahşap ürünlerinin de takviye elemanı olarak kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Ahşap ve selüloz esaslı elyafların çok iyi özellikler sunduğu görülmüş, gelecek yıllarda artarak kullanılacağı beklenilmektedir. Doğal elyaflar termoset ve termoplastik reçinelerde takviye olarak kullanılmaktadır. Doğal elyaflar kimyasal yöntemlerle kolaylıkla modifiye edilebilir. Doğal elyaflar düşük yoğunluk, ekonomiklik, yeterli performans özellikleri, biyolojik bozunabilirlik vb. özelliklere sahiptir. Hayvan esaslı elyaflar çok az kullanılmakta olup, yapışkanlarda ve dolgu macunlarında kullanılır. Doğal elyaflar daha çok bitkisel elyaflar ile akla gelmektedir [24]. Doğal elyaflar hayvanlardan (saç, ipek, yün), minerallerden (asbest, bazalt) veya bitkilerden (yaprak, tohum, gövde) elde edilir. Doğal elyaflar yenilenebilir kaynaklardır. Günümüzde yeşil ve sürdürülebilir kaynak olarak görüldükleri için çok



fazla araştırmada incelenmektedirler [25]. Bitkisel elyafların sınıflandırılması bitki üzerindeki konumlarına göre yapılmaktadır [26];

1. Bitkinin tohum kısımlarından elde edilen elyaflar; pamuk ve kapok
2. Bitkinin gövde bölümünden elde edilen elyaflar; kenevir, keten, jüt ve rami
3. Bitkinin yaprağından elde edilen elyaflar; manila keteni, sisal kendiri, Y.zelenda keneviri
4. Bitkilerin meyve kısımlarından elde edilen elyaf; koko elyafı

#### **2.4. Dolgu Malzemeleri**

Dolgu maddesi, belirli bir rijitlik ve sertlik derecesi sağlamak, maliyeti düşürmek için polimer ürünlerde ve kauçuk bileşimlerde kullanılan yüksek özgül ağırlıktaki inert mineral toz olarak tanımlanabilir. Dolgu malzemesi kullanımındaki en genel amaç kompozitin maliyetini azaltarak malzeme özelliklerini geliştirmektir. Dolgu malzemeleri reçineye herhangi bir pigment veya katalizör ile karıştırılarak eklenir. Bu ekleme işleminde dolgu malzemeleri uygun oranlarda kullanıldığında kürlenme süresini azaltır, termal dayanıklılığı artırır, mekanik özellikleri iyileştirir, elektrik ve kimyasal özellikleri iyileştirerek polimerlere çeşitli özellikler kazandırır [17].

Dolgu maddesi ilave edilmiş kompozitlerin termal, manyetik ve elektriksel özellikleri dolgu malzemesine, matris malzemesine ve dolgu ile matris arasında oluşacak ara yüz etkileşimine bağılı olmaktadır. Dolgu malzemelerinin sınıflandırılmaları parçacık büyüklüğüne göre yapılabilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda parçacık büyüklüğünün kompozit malzeme özelliklerini etkilediğı görülmüştür. Dolgu maddelerinin sınıflandırılmasında kullanılan bazı özellikler [24];

- Partikül büyüklüğü ve dağılımı
- En (çap) boy oranı
- Yüzey kimyasal bileşimi
- Dolgu maddelerinin mekanik özellikleri
- Elektrik ve termal iletkenlik
- Optik özellikler

Polimerlerde çeşitli amaçlar için kullanılan dolgu maddesi miktarı yıllık 10000 tondan fazla olmaktadır. Bu kullanımda kalsiyum karbonat toplam tüketimin 2/3'ünü

oluşturmaktadır. Dolgu malzemelerinin başlıca kullanıldığı alanlar; plastik malzemeler, inşaat, boya ve kaplamalar, kozmetik ve ilaç, elyaflar, gıda, sürtünme malzemeleri ve renkli baskı uygulamalarında kullanılır. Dolgu maddeleri dört polimerde (PVC, PP, PA, polyester) çok yüksek oranda kullanılmaktadır. Fakat gelecek yıllarda farklı polimerlerin geliştirilmesi ile dolgu maddelerinin farklı polimerlerde kullanımlarının gerçekleşeceği ve farklı dolgu maddelerinin ortaya çıkabileceği düşünülmektedir. Yaygın kullanıma sahip dolgu malzemeleri; kalsiyum karbonat, talk, silika, wollastonit, kil, kalsiyum sülfat, mika, cam kürecikler, alümina ve alümina trihidrat'tır [24].

#### **2.4.1. Kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>)**

Kalsiyum karbonat doğada yaygın olarak bulunur ve birçok yararlı özelliğe sahip olmaları nedeniyle kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak çokça tercih edilmektedir. Genellikle öğütülmüş kalsiyum karbonat olarak da adlandırılır. Kalsiyum karbonat kullanımı geçmişte maliyet azaltma amaçlı kullanılırken günümüzde farklı yönlerden malzeme özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Kalsiyum karbonat suda çözülmez ve %4,8 oranı ile doğada yaygın olarak bulunan beşinci elementtir. Kalsiyum karbonat yüzeyi kaplanmış halde ya da kaplanmamış haliyle karşımıza çıkabilir. Özellikle Polivinil klorür (PVC), polipropilen (PP), elastomerler ve doymamış polyester reçinelerde kullanılır. Kalsiyum karbonat yüksek kimyasal saflığa sahiptir. Böylelikle polimerlerin yapısını olumsuz etkileyebilecek katalitik etkileri ortadan kaldırırlar. Yüksek beyazlık ve düşük kırılma indisine sahiptir. Böylece pahalı olan titanyum dioksit gibi aşındırıcı partiküllerin kullanımlarını azaltır ve yüksek kalitede renkli nihai ürünler elde edilebilmektedir. Düşük oranda aşındırıcı etkiye sahiptir. Bu özelliği polimer üretiminin gerçekleştirildiği ekstrüder gibi makinelerde bulunan vida ve silindirlerin zarar görmesine neden olmaz. Doğal haldeki kalsiyum karbonat toksit içermemesi ve kokusuz olması nedeniyle gıda sektöründe plastik ambalajlamada kullanılmaktadır. Termoplastiklerde CaCO<sub>3</sub> darbe mukavemetine çok etki etmese de sertliği artırır ve büzülmeyi önler. Çöktürülmüş haldeki CaCO<sub>3</sub> reolojik özellikleri etkilemektedir. Termoplastiklerde CaCO<sub>3</sub> dolgu olarak kullanılması teknik olarak basittir ve ilave işlemler gerektirmez. Doymamış polyester reçine ve poliürentanlar gibi termosetler ile kullanılarak reçine maliyetini azaltır [17, 24, 27, 28].

Kompozit malzemelerde uygun miktarlarda dolgu maddesi olarak  $\text{CaCO}_3$  kullanımı maliyeti azaltarak mekanik özellikleri (çekme, eğme ve darbe) arttırmaktadır [29].

$\text{CaCO}_3$  farklı polimer matrislerde kullanıldığında malzeme özelliklerini geliştirmektedir. Yüksek yoğunluklu polietilen, naylon, polipropilen, polilaktit, akrilonitril bütadien stiren (ABS) gibi farklı polimer matrislere nano ve mikro boyutlu  $\text{CaCO}_3$  ilave edilerek malzeme özelliklerine etkileri araştırılmış. Nano boyutlu  $\text{CaCO}_3$  parçacıkların kullanılması mekanik özellikleri arttırdığı ve düzgün yüzeylerin elde edilebildiği görülmüştür [30].

#### **2.4.2. Alüminyum oksit (Alümina)**

Alüminyum oksit yaygın olarak alümina ifadesi ile kullanılmaktadır. Alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) mükemmel elektriksel yalıtkanlık özelliğine sahiptir. Fakat seramik malzeme için olabileceğinden daha yüksek termal iletkenliğe ( $30 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) sahiptir. Alüminanın yıllık üretimi yaklaşık 45 ton olabilmektedir, bu üretimin büyük kısmı (%90) alüminyum metal üretiminde kullanılmak için gerçekleştirilir [13]. Alümina metal alüminyumun oluşturduğu tek oksittir. Alümina iki şekilde önemli hal almaktadır. Bunlardan ilki alüminyum metalin eritilebilmesi için gerekli olan başlangıç malzemesi olmasıdır. Diğer sebebi ise seramik ürünlerde ve kimyasal işlemlerde hammadde olarak kullanılmasıdır. Alümina üretimini Avusturyalı bilim insanı Bayer tarafından gerçekleştirilmesi nedeniyle alümina üretimi Bayer prosesi olarak da adlandırılmaktadır. Erimiş alümina doğal haldeki korindon ile benzer kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Erimiş alümina çok sert olduğu için aşındırıcı malzeme olarak kullanılır. Ayrıca erimiş alümina yüksek erime ( $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) noktasına sahip olması refrakter olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır. Alüminyum oksit yapısında atomları bir arada tutan hegzagonal ve oktoedral yapılar bulunmaktadır. Alümina mükemmel dielektirik ve termal şok özelliklerine sahiptir ve yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca elektronik endüstrisinde rezistanslar ve kapasitörler gibi ekipmanlarda kullanılmaktadır. Mükemmel mekanik özelliklere sahip olmaları nedeniyle aşındırıcı olarak kullanılır ve kesici takımların üretimlerinde kullanılmaktadır. Alümina esaslı seramik malzemeler darbe karşı dirençlidirler ve havacılıkta, bazı askeri araçların zırh kaplamalarında kullanılır [31]. Alümina mükemmel aşınma direncine sahip olması ve Bayer prosesi ile düşük maliyetli olarak

üretilebildikleri için kompozit malzemelerde tribolojik özellikleri geliştirmek için kullanılmaktadır.

### **2.4.3. Cam kürecikler**

Cam kürecikler malzeme özelliklerini etkilemektedir. Cam küreciklerin en önemli özelliği kullanıldığı ürünün yoğunluğunu düşürmesidir. Ayrıca cam kürecikler dolgu malzemesi olarak kullanıldıklarında viskoziteyi düşürür, reolojik özellikleri değiştirir, büzölmeleri azaltır, mekanik özellikleri artırmaktadır. Cam küreciklerin kalınlıkları ince olması nedeniyle kırılındırlar. Bu nedenle ürün çeşitliliği az ve üretim yöntemleri sınırlıdır. Cam küreciklerin kalınlıkları arttırıldığında mekanik özellikleri artar ve daha dirençli yapıya dönüşürler fakat ilave edildikleri polimerlerin yoğunluklarını arttırmaktadır. Yoğunluk artışına sebep olmaları kalın duvarlı (cidarlı) cam küreciklerin kullanımlarını sınırlamaktadır [24]. Kompozitlerde dolgu maddesi olarak cam kürecikler; katı cam kürecik, boş cam kürecikler ve pul camlar olarak kullanılmaktadırlar [15]. Cam kürecikler termoplastik esaslı reçinelerde dolgu olarak kullanıldıklarında sürtünme katsayısı değerlerini düşürür ve aşınmayı azaltarak tribolojik özellikleri iyileştirmektedir [32]. Genel olarak polimerlerde kullanıldıklarında yağlayıcı etki yaparak iyi ara yüzey mukavemetinin oluşmasını sağlarlar.

### **2.4.4. Kil**

Kil ifadesi granitin ayrışmasıyla oluşan sulu alümina silikat minerallerini tanımlar. Kilin özellikleri yapısında bulunan alümina ve silika özelliklerine bağlı olmaktadır. Polimer endüstrisinde yaygın olan kil minerali, kaolin ya da Çin kili olarak da bilinen kaolinittir. Kaolinitin başlıca kullanım alanını elastomerler oluşturmaktadır. Parçacık şekli (yığın, ince, hegzagonal) polimer uygulamalarda kaolinitin en önemli özelliklerinden biridir. Kil dolgu maddesi olarak kullanıldığında viskozite, sertlik ve mukavemet değerlerini direk olarak etkilemektedir. Bazı uygulamalar için kil ısıtılarak farklı formlara (metakaolin ve kalsine kaolin) dönüştürülerek kullanılabilir. Metakaolin PVC'nin elektriksel direncini arttırır, bu nedenle PVC esaslı kabloların izolasyonunda kullanılır. Kalsine kaolin ise çok inert haldedir ve çeşitli polimer uygulamalarda kullanılabilir [27]. Killer herhangi bir polimer reçineye kıyasla daha üstün sertlik ve mukavemet özelliklerine sahiptir. Bu nedenle PMK'larda yaygın

olarak kullanılmaktadır. Kil ilavesi mekanik özellikleri artırır, termal bozunma sıcaklığını ise olumsuz etkiler. Kil mineralleri zararlı maddeleri emebilme özelliğine sahiptir [33]. Kilin başlıca avantajları; kimyasal ve hava koşullarına dayanıklılık, pürüzsüz yüzeylerin elde edilebilmesi, düşük su emilimi ve mükemmel mekanik özellikler şeklinde sıralanabilir [34].

#### **2.4.5. Wollastonit**

Wollastonit kalsiyum silikat esaslı beyaz renkli iğnemsî bir mineraldir. Piroksen mineral grubuna dahildir ve endüstriyel olarak önemli bir mineraldir. Dolgu maddesi olarak çap-boy oranı 3:1 ila 20:1 arasında değişebilmektedir. Wollastonit yüzey alanı çok düşük ( $0,8-4 \text{ m}^2/\text{g}$ ) ve gözenekli değildir, yüksek pH değeri (9,8) ve düşük termal genişleme ( $6,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) katsayısı ve düşük nem içeriğine sahip olmaktadır. Polimer uygulamalarında doğru oranlarda kullanıldıklarında olumlu sonuçlar verir. Wollastonit ilavesi çok olduğunda daha da güçlendirici etki yapabilir fakat bu durum maliyeti artırmaktadır. Polipropilen (PP), polyamid ve termoset reçinelerde (doymamış polyester, epoksi, fenolik) kullanılır. Polimerlerde kullanıldıklarında çizilme direncini artırır, kaynak mukavemetini iyileştirir ve büzülme azaltır. Wollastonite farklı yüzey işlemleri uygulanarak matris ile iyi yapışması sağlanabilir, böylelikle boşluklu yapıların oluşması engellenebilmektedir [24, 27].

#### **2.4.6. Alüminyum trihidrat**

Alüminyum trihidrat (ATH) beyaz renkli yumuşak özelliğe sahip bir dolgu malzemesidir. Elastomerler, termosetler ve termoplastiklerin çoğu ile kullanılabilir. ATH; çevre dostu, alev geciktirici, yenilenebilir ve leke tutmaz. ATH dolgu maddeleri bayer hidrat ve çökeltmiş hidrat olarak iki şekilde olabilmektedir. Doğada doğal haliyle bulunsa da sentetik şekilde dolgu maddesi olarak kullanılır. Bayer prosesinde ATH bir ara ürün olarak çökeltir ve ekonomiklik sağlar. ATH parçacıklar 60-80 mikron arasında değişen çaplara sahiptir. Bu çap aralığı çoğu polimer için çok büyüktür, ek işlemler ile daha küçük boyutlarda oluşturularak dolgu maddesi olarak kullanılır. Bayer prosesi ile üretilmiş ATH'ler kompozit malzemelerin elektriksel ve boyutsal karalılığını ve renk gibi özelliklerini etkiler. İkinci tip ATH'leri ise polimer uygulamalarında daha kaliteli ürün elde etmek için özel olarak çökelen ürünler oluşturmaktadır. Kimyasal olarak Bayer prosesi ile benzer olmasına rağmen

daha saf reaktifler kullanılarak çökelme koşulları kontrol edilir ve parçacık büyüklüğü, şekli ayarlanabilmektedir. Böylelikle Bayer prosesinde olduğu gibi ilave işlemlere gerek duyulmadan uygun çaplarda ATH'ler elde edilir. ATH yüksek sıcaklık değerlerinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda yapısındaki suyu serbest bırakarak alev geciktiricilik özelliği kazanır. ATH'ler alev geciktiricilik gibi olumlu özelliklere sahip olsalar da mekanik ve reolojik özellikleri olumsuz etkileyebilmektedirler. Arzu edilmeyen bu olumsuzluklar farklı dolguların kullanılmasıyla, dolgu malzemesinin morfolojisinin değiştirilmesi veya yüzey kaplaması ile düzeltilenmektedir [24, 27].



### **3. CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİTLER**

#### **3.1. Temel Özellikler**

Üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelerin çoğunluğunu cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzemeler oluşturmaktadır. CTP matris elemanı olarak polyesterin kullanıldığı, takviye elemanı olarak cam elyafın kullanıldığı istenilen özellikleri (esneklik, dayanım vb.) karşılamak amacıyla üretilmiş kompozit malzemelerdir. CTP kompozitlerin mekanik, tribolojik vb. özellikleri yapısında bulunan elyafların modül ve mukavemet değerlerine, elyafların kimyasal kararlılığına, matris mukavemetine ve elyaf/matris ara yüzey etkileşimine bağlı olmaktadır. CTP kompozitler uygun kimyasal bileşim ve elyaf oryantasyonu ile çelik kadar iyi özelliklere, alüminyuma göre yüksek rijitliğe ve çeliğin dörtte biri özgül ağırlığa sahip olabilmektedir. CTP kompozit malzemelerin diğer üretim malzemelerine göre üstün yanlarından biri kullanım amaçlarına uygun olacak şekilde değişik özelliklerin kolaylıkla kazandırılabilmesidir. CTP kompozitler istenilen özelliklere göre uygun üretim yöntemi ve kalıp ile kolayca üretilebilmektedir. Günümüzde CTP kompozitler düşük maliyet ve iyi malzeme özellikleri nedeniyle metal ve metal dışı malzemelerin yerini almaya başlamıştır [35].

CTP kompozitler; yüksek spesifik mukavemet, mükemmel elastiklik, hafiflik, yüksek korozyon direnci, yüksek kimyasal ve ısı dayanım, tasarım ve kalıplama esnekliği, mükemmel dielektriksel özellikler gibi avantajlara sahiptir [36].

CTP kompozitler; otomotiv ve taşımacılık, inşaat, elektrik-elektronik, savunma sanayi ve havacılık, medikal ve denizcilik gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Özellikle CTP kompozitler iyi çevresel dirence, yüksek mukavemet ve rijitlik gibi özelliklere sahip olmalarından dolayı denizcilik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [35, 36].

#### **3.2. Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozitlerin Üretim Yöntemleri**

Kompozit malzemelerin özelliklerini matris ve takviye elemanının dışında üretim yöntemleri de etkileyebilmektedir. Endüstride kompozit kullanımının artması farklı

üretim yöntemlerini ortaya çıkarmıştır. Uygun üretim yöntemi seçildiği takdirde iyi malzeme özellikleri elde edilebilmekte ve maliyet düşürebilmektedir. Bu nedenle CTP kompozitler için uygun üretim yönteminin seçilmesi önemli olmaktadır [17]. Genel anlamda CTP kompozitlerin üretimleri açık kalıplama ve kapalı kalıplama yöntemleri olarak sınıflandırılabilir. Bu yöntemlerin bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Açık kalıplama yöntemleri;

- El yatırması yöntemi
- Püskürtme yöntemi
- Elyaf sarma yöntemi
- Vakum torbası yöntemi
- Otoklav yöntemi

Kapalı kalıplama yöntemleri;

- Reçine transfer kalıplama (RTM)
- Pultrüzyon yöntemi
- Pres kalıplama
- SMC (Sheet Molding Compound)
- BMC (Bulk Molding Compound)
- Enjeksiyon kalıplama
- Savurma kalıplama yöntemi

Kompozit üretimleri yüksek ve düşük hacimli olarak gerçekleştirilmektedir. Düşük hacim miktarlarındaki üretimler maliyeti düşük kalıplarda yüksek işçilik maliyeti ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu üretim yöntemlerine örnek olarak el yatırması ve püskürtme yöntemi gösterilebilir. Yüksek hacim miktarlarındaki üretim yöntemlerinin ise ilk yatırım maliyetleri yüksek olabilmektedir. Bu yöntemler arasında elyaf sarma, pultrüzyon ve reçine transfer kalıplama gibi üretim yöntemleri sayılabilmektedir [37].

Başlangıçta ETP kompozitlerin üretimleri için el yatırması tekniği kullanılmaktaydı. Fakat bu yöntemde ürün kalitesi iyi olmasına rağmen çok yavaş gerçekleşmesi ve operatör yeteneğine bağlı üretim yöntemi olması bu tekniği her durumda kullanımı kısıtlamıştır. 1970'li yıllara gelindiğinde presle kalıplama, pultrüzyon, elyaf sarma gibi operatör ihtiyacının az olduğu teknolojik yöntemler geliştirilmiştir [38].



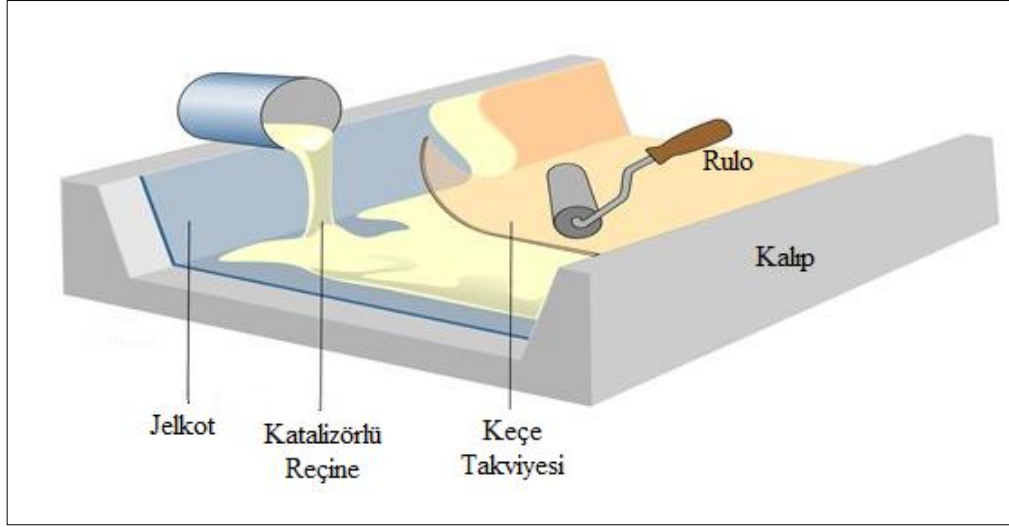
CTP kompozitlerin kalıplama yöntemleri sırasında birçok kusur (gözenekli yüzey, yetersiz ıslanma, et kalınlığında değişmeler, elyaf kopması vb.) görülebilmektedir. Fakat bu kusurlardan en önemlisi ise hava kabarcıklarının oluşması ile boşluklu yapıya sahip ürünlerin oluşturulmasıdır. Çünkü boşluklu yapı ürünün mekanik özelliklerini kötüleştirmektedir [38]. Bu nedenle imalat işlemleri herhangi bir kusura neden olmayacak şekilde hassas olarak gerçekleştirilmelidir.

CTP kompozitlerde jelleşme süresi, katalizör miktarı, hızlandırıcı seçimi, pigment, karıştırma işlemi, ortam sıcaklığı, basınç değeri, ekzotermik ısı, tiksotropi gibi parametrelere dikkat edilmelidir. Bu parametrelere imalat yöntemlerinin anlatılması sırasında değinilecektir.

### **3.2.1. El yatırması yöntemi**

El yatırması yöntemi bilinen en eski ve en basit kompozit üretim yöntemlerinden biri olmaktadır. Düşük miktarlarda büyük boyutlu parçaların üretimleri için uygun olmaktadır. Ürünlerde kaliteli yüzeyler elde edebilmek için öncelikle kalıp yüzeyine sprej tabancası veya fırça ile jelkot uygulanır. Jelkot sertleştikten sonra ise cam elyaf takviyeleri kalıp yüzeyine elle yerleştirilerek üzerine katalizör eklenmiş reçine sürülür. Daha sonra hava kabarcıklarının oluşmasını engellemek ve matris malzemesini elyaf yüzeylerinin tamamına yayılmasını sağlamak için el roluları ile rulolama işlemi yapılır. Elyafın yerleştirildiği laminantlama işlemine istenilen ürün kalınlığı oluşturulana kadar devam edilir. El yatırması yönteminde her elyaf tabakasının yerleştirildiğinde aynı işlemler tekrarlanılarak yapılmaktadır. İstenilen ürün kalınlığı elde edildiğinde ürün kalıptan çıkartılır ve oda sıcaklığında belirli sürelerde sertleşmesi sağlanır [39].

El yatırması yöntemi mekanize bir yöntem olmayıp açık kalıplama yöntemlerinden biridir. El yatırması yönteminde takviye malzemesi olarak herhangi bir elyafın kullanımı uygun olsa da cam elyaf takviyesi yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca bu yöntemde oda sıcaklığında sıvı halde bulunan her türlü termoset reçine kullanılabilir [40].



Şekil 3.1. El yatırması yöntemi [41]

Kalıp şekli ürünün şeklini oluşturduğu için kalıp temiz olmalıdır. Ancak kalıp yüzey kusurlarından arındırıldığı sürece üründe oluşabilecek hatalardan kaçınılmış olunur. Bu yöntemde isteğe göre erkek ve dişi kalıp tercih edilir. Bu kalıp tercihi ürünün hangi yüzeyinde kaliteli görünüm elde etmek istememizle alakalıdır. Ürünün iç yüzeyinin düzgün olması istenildiğinde erkek kalıp kullanılır diğer tercihte ise dişi kalıp kullanılabilir. Böylelikle uygun işlemler ile parlak, mat veya dokulu yüzeyler elde edilebilmektedir. El yatırması yönteminde kalıplar ahşap, elyaf takviyeli polimer kompozit ya da metal olabilmektedir. Ahşap kalıp tercih edildiğinde ilave bitirme işlemlerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Karmaşık şekilli ürünlerin imalatı gerçekleştirilecekse cam elyaf takviyeli polimer ve dökme epoksi kalıplar kullanılabilir. Eğer parça kritik öneme sahipse ve ısıtma veya presleme gibi işlemler gerektiriyorsa metal kalıp seçimi daha uygun olabilmektedir. Kalıp kalınlığı ise ürünün yatırılması ve çıkarılması aşamalarında herhangi bir deformasyona sebep olmayacak şekilde seçilmelidir [40].

Ürünün kalıptan kolaylıkla çıkarabilmek ve herhangi bir hataya sebep olmamak için ayırma ajanları kullanılmaktadır. Bunun için düz levhalar ve basit şekilli ürünler için ince polyester film kullanılabilir. Karmaşık şekilli parçalarda ise vakslar ve polivinil alkol (PVA) tavsiye edilmektedir. PVA suda çözünen bir maddedir ve su içerisine %15'lik çözelti ilavesiyle uygulanır. Suyun buharlaşması ile kalıp yüzeyinde ince PVA filmi oluşur. Kalıplama işleminden sonra PVA filmi kalıptan ve üründen yıkanarak kolaylıkla temizlenebilmektedir [40].

Jelkot ise kalıp ayırıcı üzerine uygulanan ince kalınlıkta (0,5 mm) reçine katmanıdır. Jelkot son ürünün özelliklerini etkileyebilmekte ve istenilen renk pigmentleri eklenilerek kompozitler üretilebilmektedir. Bu üretim yönteminde jelkotun kullanılma sebepleri; ürünlere renk, parlaklık gibi özellikler sağlamak, elyaf tabakasını örterek koruyucu yapı görevi görme, lifin su ve kimyasallarla temas etmesini önlemektir. Bu nedenle jelkot kalınlığı uygun değerlerde seçilmelidir. Jelkot kalınlığı ince olduğunda elyaflar açık kalarak gözle görülebilir halde olacaktır. Çok kalın olduğunda ise yüzey çatlakları görülebilmektedir [40].

El yatırması yönteminde reçine malzemesi olarak polyeşter kullanımı çoğunluktadır. Polyeşter içerisine katalizörlerin, hızlandırıcıların, pigmentlerin ve diğer katkıların eklendiği tiksotropik reçinedir. Tiksotropi; reçine kesme kuvvetlerine maruz kaldığında viskozitesinde meydana gelen azalışı tanımlamaktadır. Tiksotropik sıvı normalde kalın viskoz akışkan halindedir fakat kuvvete maruz kaldığında düşük viskoziteye sahip akışkan gibi kolaylıkla akabilmektedir. Jelkot tiksotropik özelliği nedeniyle yüzeye uygulandıktan hemen sonra viskoz hale gelerek reçinenin akmasını önler. Uygun tiksotropi reçineye yaklaşık olarak %2-3 oranlarında aerosol tozu eklenerek elde edilebilir. Reçinenin viskozitesi kalsiyum karbonat veya diğer dolgular ile arttırılabilmektedir. Fakat dolgu içeriği mümkün olduğu sürece düşük tutulmalıdır. Dolgu miktarının artması ile reçine dip kısımlara akabilir ve sertleştikten sonra çok kırılğan yapıya dönüşebilmektedir. Su ve koroziif kimyasallarla temas halinde olan jelkotalara dolgu maddeleri eklenmez, diğer gerekli pigmentler ve katkı maddeleri jelkot reçinesine eklenilerek ürün özellikleri iyileştirilebilmektedir. Jelkotun jelleşmeye başlaması ile kompozit malzemelerin üretimlerine geçilebilmektedir [40].

Elyaf tabakalarının yerleştirdiği katmanlama işleminde kompozit ürünlere mukavemet ve rijitlik gibi özellikleri kazandırmaktadır. Elyaf kalıp yüzeyine düzgün olarak yerleştirmeli ve yerleştirme esnasında elyaflar hasar almamalıdır. Elyaf ve reçine oranı ise doğru miktarlarda seçilmelidir. Reçineye eklentiler yapıldıktan sonra karıştırmaya işlemin hızlı olarak yapılmamalıdır. Bu durum hava kabarcıklarının oluşmasına neden olmaktadır. Hava kabarcıklarından kaçınabilmek için reçine karışımı yavaş olarak karıştırılabilir veya bir gün önceden hazırlanabilir. El yatırması yönteminde tek seferde dört katmandan fazla elyaf tabakası yerleştirilmesi uygun görülmemektedir. Aşırı katmanlama işleminde dolayı tabakaların içinde yüksek

ekzoterm ısılar oluşabilmektedir. Bu durum çatlakların oluşmasına, tabakaların ayrılmasına ve reçinenin renk değiştirmesine yol açmaktadır. Bunun dışında iki elyaf tabakası arasındaki yerleştirme süresi uzun olmamalıdır. Bir önceki yerleştirilen takviye malzemesinden sonra diğer takviye malzemesinin yerleştirilmesi için çok beklenilmemelidir. Bu durum tabakalar arası bağlanma zorluğuna neden olabilmektedir. Reçine jelleşmeden önce tabakaların yerleştirilmesi yapılmalıdır. Jelleşme süresi eklenen katalizör ve hızlandırıcı miktarına bağlı olmaktadır. Normal koşullarda kürlenme işlemi 15-30 dakika sürebilmektedir. Tabakaların yerleştirilmesi bittikten sonra kalıp üzerinde sertleşmeye bırakılır. Kürlenme işleminin %90'ından fazlası tamamlandıığında ürün kalıptan çıkarılabilmektedir. Tam olarak kürlenme işlemleri 5-10 gün arasında uzun sürebilmektedir. Kürlenme işlemi ürün kalıptan çıkarıldıktan sonra yüksek sıcaklıklarda yapılacak ilave kürlenme işlemleri ile hızlandırılabilir. Ancak tam kürlenme neticesinde üründen iyi fiziksel ve mekanik özellikler elde edilebilmektedir [40].

El yatırması yönteminin avantajları [15, 39, 40]:

- Düşük ekipman maliyeti
- Boyut çeşitliliğine imkân vermesi
- İlk yatırım maliyetinin düşük olması
- Renkli yüzeylerin elde edilebilmesi
- Karmaşık ve büyük boyutlu parçaların kolaylıkla üretilebilmesi
- Dizayn parametrelerinin kolaylıkla değiştirilebilmesi
- Yerinde kalıplama olanağı

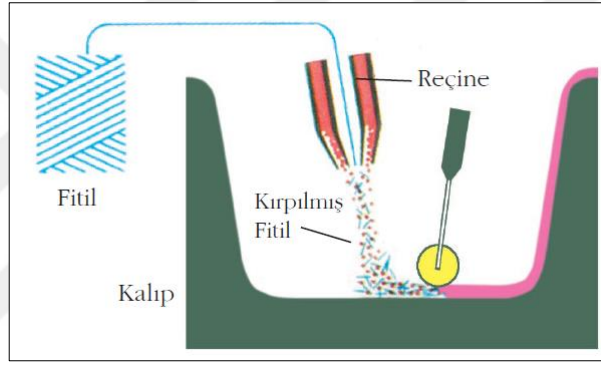
El yatırması yönteminin dezavantajları [15, 40]:

- Ürünün tek tarafında düzgün yüzeylerin elde edilmesi
- Ürün özelliklerinin operatör bilgi ve becerisine bağlı olması
- Reçinenin içerisinde bulunan stiren vb. kimyasalların uçuculuğu

El yatırması yöntemi uygulamaları; tekne gövdeleri, otomobil gövde panelleri, depolama tankları, korozyona dirençli ürünler ve mobilya ekipmanları gösterilebilir [15].

### 3.1.2. Püskürtme yöntemi

Püskürtme yöntemi cam elyaf takviye malzemesi ile katalizör ilavesi yapılmış reçinenin aynı anda uygun püskürtme tabancası ile kalıp yüzeyine biriktirilmesidir. Bu yöntem orta ve büyük boyutlu parçaların üretildiği açık kalıplama işlemidir. Daha karmaşık şekle sahip parçalar ise el yatırması tekniğine göre daha kolay olarak üretilebilmektedir. Püskürtme tabancası içerisinde bulunan kesici kısımlar sayesinde cam elyaflar belirli uzunluklarda (genellikle 20 mm ile 50 mm arasında) kesilerek ürüne takviyesi yapılır. Ayrıca püskürtme tabancasında reçineye katalizör ilavesi de gerçekleştirilebilmektedir. Püskürtme yöntemi tekniğinde farklı özelliklere sahip çeşitli püskürtme tabancaları kullanılabilir [40, 42].



Şekil 3.2. Püskürtme tekniği [15]

Bu teknikte reçine ve takviye elemanı püskürtme tabancası ile operatör tarafından kalıp yüzeyine püskürtülür. Daha sonra elyafları iyice sıkıştırmak ve hava kabarcıklarını önlemek için rulolama işlemi yapılır. En son olarak ürün kalıptan çıkarılmadan önce oda sıcaklığında bekletilir. Sonrasında ise kalıptan çıkarma işlemi gerçekleştirilir. Bu teknikte elyaf reçine karışımının kalıp yüzeyine püskürtülmesinden önce yüzeye jelkot uygulanması kaliteli yüzeylerin elde edilebilmesini sağlamaktadır. Jelkot uygulanmış yüzeylerde özel astarlar kullanılarak dayanıklılık artırılabilir. Ürünlerin kurlenme işlemleri kısa sürelerde gerçekleştirilebilmektedir. Kalıplama işlemi sırasında sıcaklık uygulanarak kurlenme süreleri kısaltılabilir. Kalıplama işlemi tamamlandıktan sonra jelleşme öncesine kadar sıcaklık 35 °C'ye kadar yükseltilebilir. Jelleşme tamamlandıktan sonra ise sıcaklık kademeli olacak şekilde 60 °C'ye kadar artırılabilir. Kompozit ürün kalıptan çıkarılmadan önce oda sıcaklığında soğumasına izin verilir. Ürünün kalıptan kolay çıkarılmasını sağlamak için uygun kalıp ayırıcılar

seçilmelidir. Püskürtme tekniği ile üretilen kompozitlerin tamamen sertleşip belirli kıvama gelebilmesi birkaç haftayı bulabilmektedir. Ancak bu süre yüksek sıcaklıklarda ilave kürlenme işlemleri ile kısaltılabilmektedir. En uygun işlem ise kalıplanan ürünlerin 24 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilip, ardından tercihe göre 80 °C’de 3 saat, 60 °C’de 8 saat, 50 °C’de 12 saat, 40 °C’de 16 saat olarak ilave kürlenme işlemine maruz bırakılmasıdır. Tamamen kürlenmiş ürünü kesmek ise oldukça zor olabilmektedir. Bunun için su jeti ve lazer jeti gibi kesme ekipmanları kullanılır. Tüm düzeltme işlemlerinin tamamlanması ile birlikte kalıp yüzeyleri temizlenmelidir [40, 42].

Püskürtme yönteminin avantajları:

- El yatırması tekniğine göre otomasyona uygun olması ve işçilik maliyetlerinin düşmesi
- Farklı CTP ürünlerin kolaylıkla üretilebildiği verimli bir yöntem olması
- Düşük maliyetli ve basit olarak gerçekleştirilebilmesi
- Karmaşık parçaların üretilebilmesi

Püskürtme yönteminin dezavantajları ise:

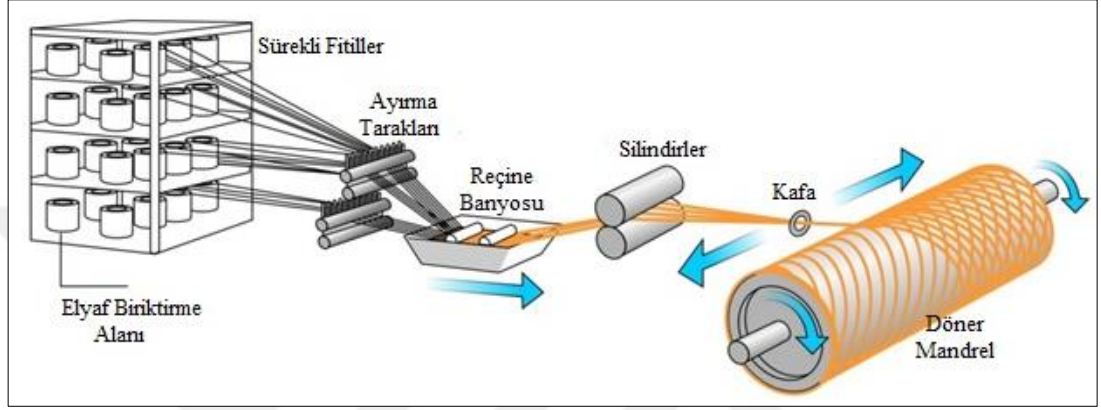
- El yatırması tekniğinde olduğu gibi tek yüzü düzgün yüzeylerin elde edilmesi
- Ürünün özellikleri operatör bilgi ve becerisine bağlı olması
- Birim ürün başına düşen işçilik el yatırması tekniğine göre az olmasına rağmen diğer üretim yöntemlerine kıyasla fazla olabilmektedir.

Bu yöntemle denizcilik ve otomotiv sektörlerinde kullanılacak ürünler, korozyona dayanımlı ürünler ve elektrikli ev aletleri gibi ürünlerin imalatları gerçekleştirilebilmektedir.

### **3.1.3. Elyaf sarma yöntemi**

Elyaf sarma tekniğinde öncelikle elyaflar reçine içeren banyodan geçirilir, elyaflar da biriken fazla reçine mandrele sarılmadan önce süzülür ve istenilen kalınlık elde edilene kadar elyafları mandrele sarma işlemine devam edilir. Daha sonra işlem uygun olarak kürlenmiş ürünün imalatının gerçekleşmesi ile tamamlanır. Elyaf sarma tekniği yaygın olarak kullanılan sürekli işleme tekniklerinden biridir. Genellikle bu yöntem ile basınçlı kap, tahrik milleri, radom, boru vb. ürünlerin üretimleri

gerçekleştirilebilmektedir. Mandrel şekline göre ve liflerin farklı sarım açlarına göre farklı boyut ve şekillerde ürünler üretilmektedir. Bu teknikte CTP kompozitlerin üretimlerini başarılı şekilde gerçekleştirebilmek için işlem parametrelerinin (sargı tipi, mandrel seçimi ve tasarımı, sarım ekipmanları vb.) doğru seçilmesi gerekmektedir. Bu teknikte elyafların sarılma işlemi mandrel ile gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla ürünün iç yüzeyinin kalitesi mandrel yüzeyine bağlı olmaktadır [16, 40].



Şekil 3.3. Elyaf sarma yöntemi [43]

Elyaf sarma yöntemi elyaf yönünün kontrol edilebildiği, çap ve boyutlarının rahatlıkla değiştirilebildiği yavaş gerçekleşen CTP kompozit üretim tekniklerinden biridir. Karmaşık şekilli parçalar çok eksenli sarma milleri kullanılarak üretilmektedir. Bu üretim tekniği ile kaliteli ve yüksek hacimli ürünler elde edilebilmektedir [16, 37].

Elyaf sarma yöntemi ilk olarak termoset reçineler için kullanılmasına rağmen daha sonraki yıllarda termoplastik reçineler ile de kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknik kavisli yüzeye sahip ürünlerin imalatlarına olanak tanımaktadır. Bu işlemde hammadde olarak takviye elyafları ve polimer reçineler kullanılmaktadır. Reçine içerisine dolgu malzemeleri eklenilerek kompozitlerin performansları artırılabilir. Fakat bu durum viskozite artışına neden olabilmektedir. Çoğu elyaf sarma yönteminin kullanıldığı ticari uygulamalarda takviye elemanı olarak E cam fitilleri kullanılmaktadır. Üründen beklenen özellikleri karşılamak için elyaflar farklı reçineler ile sarılarak ürün yapıları güçlendirilebilmektedir. Elyaf sarma işleminde genellikle polyster, vinilester ve epoksi reçineler kullanılmaktadır. Matris kullanımı farklı uygulamalarda değişiklik gösterebilmektedir. Petrol tankı ve boru hattı gibi uygulamalarda izoftalik ve bisfenol polyster reçineler tercih edilmektedir. Epoksi reçineler düşük büzölmeye sahip oldukları için yüksek performansın gerekli

olduğu ürünlerde kullanılmaktadır. Poliimidler, silikonlar, fenolikler ve furan reçineleri yüksek sıcaklık direncinin ve alev geciktirme özelliklerinin istenildiği ürünlerde kullanılırlar. Fakat bu üretim tekniğinde fenolik reçinelerin kullanımı çok tavsiye edilmemektedir. Ayrıca elyaf sarma yönteminde termoplastik reçinelerin kullanımı da mümkün olabilmektedir. Kompozit ürünlerin sertliğini arttırmak için cam elyaf dışında aramid, polietilen ve karbon elyaflar gibi yüksek modüllü elyaflar takviye elemanı olarak kullanılabilir [40].

Elyaf sarma tekniğinin avantajları [40]:

- Çok az operatör bilgisine ihtiyaç duyulması
- Elyaf – matris oranının kolaylıkla ayarlanarak yüksek mukavemet değerlerinin elde edilebilmesi
- Ürün kalitesinin yüksek olması
- Sarma açılı değiştirilerek kompozit ürünlerde istenilen yönde yüksek mukavemet değerlerinin elde edilebilmesi
- Malzeme kaybı diğer polimer kompozit işleme tekniklerine göre çok az olması

Elyaf sarma tekniğinin dezavantajları [40]:

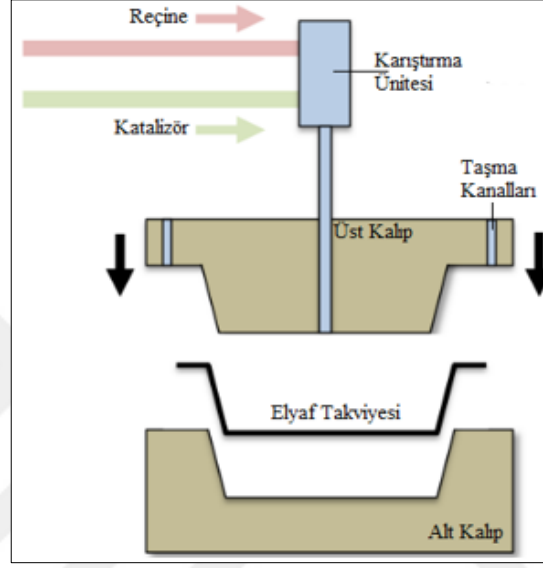
- Karmaşık profilli yüzeylerde zor olması
- Üretim aşaması maliyetli olmamasına rağmen sermaye maliyetinin yüksek olması
- Kompozit ürünlerin tabakalar arası kesme mukavemetleri ve basma dayanımlarının düşük olması
- Ürünlerde dış yüzeylerin düzgün olarak elde edilebilmesi için ilave ekipman ve işlemlere ihtiyaç duyulması

#### **3.1.4. Reçine transfer kalıplama yöntemi**

Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi kalıp içerisine elyafların yerleştirilmesi ve kalıbın kapatılarak içerisine reçinenin yönlendirilmesi işlemdir. Reçine tamamen elyafları sararak başarılı kürlenme işlemi gerçekleştirildiğinde kalıp açılarak ürün çıkartılır. Malzeme, makine ve takım teknolojisindeki gelişmeler bu üretim tekniğinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. RTM üretim tekniği ile üretimi gerçekleştirilen kompozitlerde iyi yüzey kaliteleri ve iyi boyutsal toleranslar yakalanabilmektedir. RTM yöntemi yarı otomatik olarak gerçekleşen üretim tekniğidir. Genellikle bu yöntem ile elyaf takviyeli termoset reçineli ürünlerin üretimleri gerçekleştirilmektedir.



Bu yöntemde el yatırması ve püskürtme tekniğine göre kompozit ürünün her iki tarafında da aynı ürün kalitesi ve kalınlığı sağlanabilmektedir. RTM prosesi reçineyi kalıba yönlendirecek pompalama ekipmanı, gerekli şekle sahip kalıptan ve diğer yardımcı ekipmanlardan oluşmaktadır. Pompalama ekipmanı düşük ve orta basınç değerlerinde reçineyi kalıp içerisine yönlendirerek takviye elemanlarının ıslatılmasını sağlar [17, 40, 42].



Şekil 3.4. Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi [44]

RTM kalıplama yönteminde hammaddeler arasında elyaflar, reçineler, katalizörler, hızlandırıcılar, katkı maddeleri ve dolgu maddeleri gösterilebilir.

Matris elemanı olarak polyester, vinilester ve epoksi reçine yaygın olarak kullanılmaktadır. RTM yönteminde hızlı sertleşebilen polyester ve epoksi reçineler kullanıldığı için el yatırması tekniğine göre kompozitlerin üretimleri daha kısa sürelerde gerçekleşmektedir. Bu yöntemde kullanılacak reçinede istenilen özellikler; kolay akışı sağlamak için düşük viskozite değeri (100 – 400 mPa.s), yüksek ısı birikimini önleyecek düşük ekzoterm ısısı, kısa jelleşme süresi ve kürlenme zamanıdır. Reçine kalıba yer çekimi etkisi ile ya da belirli basınç değerleri ile yönlendirilir. Uygun basınç değerleri seçilerek reçinenin kalıbı tamamen doldurması sağlanabilir. Basınç değeri çok yüksek olmamalıdır. Takviye elemanı olarak cam elyaf kullanımı yaygın olmasına rağmen diğer elyaflar da kullanılabilir [40].

Üretime geçilmeden önce kalıp yarıları temizlenerek yüzey temizliği yapılmalıdır. Yüzey temizliği için ince zımpara kağıtları ya da vakslar kullanılabilir. Ürünün kolaylıkla çıkarılabilmesi için vaks tabakası üzerine ince PVA film uygulanır. Uygun pigmente sahip jelkot reçinesi yüzeye uygulanır ve sonrasında elyafların kalıba yerleştirilmesi aşamasına geçilir. Çalışmanın sonunda ise reçinenin kalıba yönlendirildiği basınç hattı uygun solventler ile temizlenmelidir. Kompozit yapılarına bağlı olarak farklı kürlenme sıcaklıkları tercih edilebilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ısı yayılımı polimer yapısını bozabileceğinden bu yöntemde kalıpların soğutulması gerekli olabilmektedir. Kalıp içerisinde su sirkülasyonu yapılarak soğutma işlemi gerçekleştirilebilmektedir [40].

RTM yönteminde ahşap, köpük ve metal kalıplar kullanılabilir, elyaf ve reçine oranı kontrol edilerek malzeme kaybının önüne geçilir, çeşitli ürünler oluşturulabilir, işlem için açık kalıplama yöntemlerine göre daha az işçiliğe ihtiyaç duyulur, düşük ekipman maliyetine sahip olması gibi özellikler bu üretim yönteminin avantajlarından [37, 40].

RTM yönteminin kısıtlamaları ise; pres kalıplama ve enjeksiyon kalıplama tekniğine göre daha uzun sürelerde gerçekleşmesi, uygun olmayan basınç değerleri kullanıldığında elyafların kolay zarar görmesi, presle kalıplamaya göre ilave işlemler gerektirmesidir [40].

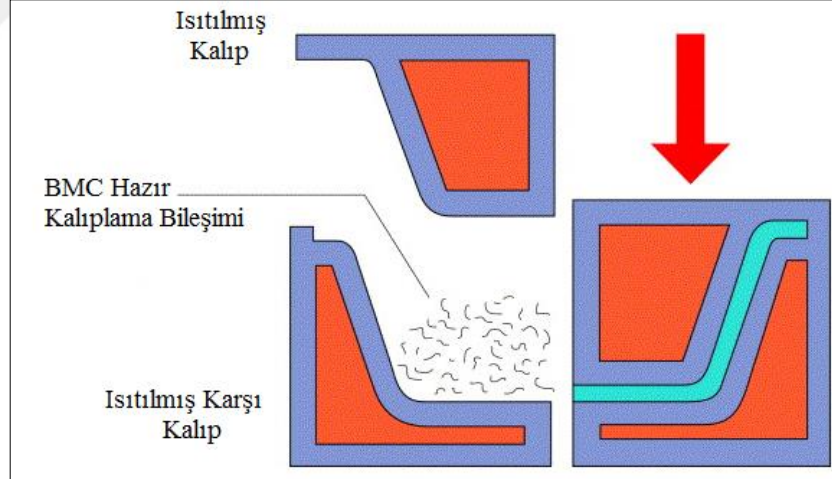
RTM tekniği ile paneller, kirişler, helikopter bileşenleri, duş kabinleri, uçak ve otomotiv parçaları üretilebilmektedir [17, 37].

### **3.1.5. Pres kalıplama**

Pres kalıplama yönteminde üretilecek kompozitler belirli sürelerde uygun sıcaklık ve basınç değerlerine maruz bırakılarak üretimleri gerçekleştirilir. Bu yöntem kapalı kalıplama yöntemlerinden biri olup en hızlı CTP kompozit üretim tekniklerinden biri olmaktadır. Belirli hacim yüzdelerinde elyaf ve reçineler iki kalıp arasına yerleştirilerek kalıplar kapatılır ve belirli sıcaklık değerlerinde 1 ila 5 dakika arasında basınç uygulanır. Basınç etkisiyle takviye ve reçine malzemeleri kalıbın tüm yüzeyini kaplar. Ürün şeklini koruyabilecek kadar rijit hale gelmesi ve kürlenme işlemi bitene kadar kalıp kapalı tutulmaktadır. Kürlenme işleminin tamamlanması ile basınç

uygulanması sonlandırılarak kalıp açılır. Bu üretim tekniğinde %50-70 ağırlık oranlarında cam elyaf takviyesi içeren kompozit malzemeler rahatlıkla üretilmektedir [17, 40]. Presle kalıplama yöntemlerinden SMC ve BMC kalıplama bileşenleri en çok bilinenleridir.

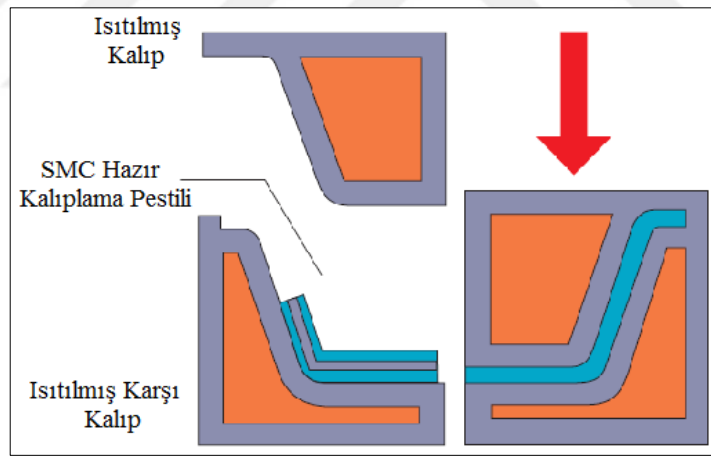
BMC dolgu, katalizör, pigment ve diğer katkıları içeren reçine ile kısa elyaf takviyesi içeren hamur kalıplama bileşenidir. BMC için lif içeriği %10-25 arasında değişmekte olup elyaf uzunlukları 6-12 mm arasında olabilmektedir. BMC için takviye elemanı olarak cam, karbon, aramid, sisal ve diğer doğal elyaflar kullanılabilir. BMC kalıplama bileşeninde 12 mm'den fazla lif uzunluğu tercih edilmez. Çünkü uzun lifler karıştırıcıda bozulma eğilimindedir. Ayrıca reçinenin uzun lifleri ıslatmasının zor olması da diğer nedendir. Matris elemanı olarak polyeater, fenolik, vinilester, epoksi gibi diğer reçine türleri de kullanılabilir. BMC için 1,4-5,6 MPa aralığında basınç değerleri tercih edilmektedir. BMC yönteminde karıştırma işlemi sırasında elyaf düzeninin bozulması ve elyaf içeriğinin düşük olmasına bağlı olarak üretilen ETP kompozitlerin mukavemet değerleri bazen düşük olabilmektedir [39, 40].



Şekil 3.5. BMC pres kalıplama tekniği [14]

SMC reçine içerisine dağılmış kırılmış cam elyafları içeren kalıplama bileşenidir. Elyaflar belli bir düzene göre yönlü, rastgele ya da her iki durumun kombinasyonu olacak şekilde takviye edilebilmektedir. Standard SMC bileşeni rastgele dağılmış %35'e kadar elyaf içeriğine sahip olabilmektedir. SMC bileşiminde elyaflar bozulmadan kalabilir. Elyaflarda işleme sırasında herhangi bir hasar mekanizması oluşmadığı için daha fazla elyaf takviyesi mekanik özellikleri arttırabilmektedir. Bu

yöntem ile kalıplanmış kompozit malzemeler yüksek mukavemet, pürüzsüz yüzey, boyutsal kararlılık, iyi kimyasal direnç, elektriksel yalıtkanlık ve karmaşık parçalarda mükemmel malzeme özellikleri gibi avantajlara sahiptir [39, 42]. SMC bileşeni için ağırlıkça %10-35 arasında elyaf kullanılabilmekte ve elyaf uzunlukları 25-50 mm arasında değişebilmektedir. SMC kalıplama bileşeninde genellikle takviye olarak kırılmış cam elyaf tercih edilmesine rağmen sürekli cam, karbon, aramid elyafların kullanılması ile de yüksek mukavemet değerleri elde edilebilmektedir. Elyaf uzunluğunun artması ürün özellikleri geliştirse de daha iyi bileşik akışı ve yüksek mukavemet değerleri için kısa elyaf takviyesi tercih edilmektedir. SMC üretim tekniğinde 3,5-5,5 MPa arasında değişen basınç değerleri kullanılır. SMC ile imalatı gerçekleştirilen ürünlerin et kalınlıkları 2-6 mm arasında olabilmektedir [40]. SMC kalıplama bileşenlerinde dolgu parçacıklarının neden olabileceği küçük delikçikler, yağlayıcı özellikli eklentilerin (çinko stearat) kötü dağılımı nedeniyle oluşan çatlaklar, reçine büzülmesi, elyaf dağılımı gibi faktörlerin neden olduğu yüzey pürüzlülükleri ve kabarcıklar vb. yüzey kusurları görülebilmektedir [38].



Şekil 3.6. SMC pres kalıplama yöntemi [58]

Pres kalıplama yönteminde kompozit ürünün imalatının verimli gerçekleşebilmesi için bazı işlem parametrelerine dikkat edilmesi gerekmektedir.

Üretimi gerçekleştirilmiş kalıplama bileşenlerinin raf ömürlerini uzatabilmek için uygun sıcaklığa (18 °C) sahip odalarda bekletilmelidir. Reçine diğer eklentiler ile karıştırıldığında reçinenin viskozitesi tüm bileşenleri ıslatabilecek kadar yüksek olmalıdır. Viskozite değerinin düşük bir değerden yüksek değere geçişi kimyasal kalınlaşma ile sağlanır. Kimyasal kalınlaşma düşük viskoziteli reçine karışımını

yüksek viskoziteye ( $1 \times 10^5$  Pa.s) sahip kalıplama bileşenine dönüştürür. Kimyasal kalınlaştırma oksit, magnezyum veya kalsiyum hidroksit eklenerek yapılabilmektedir. Bu bağ kalıcı olmayıp kalıplama sırasında yüksek sıcaklığa ve basınca maruz kaldığında bozulabilmektedir [40].

Diğer önemli etken ise indüksiyon zamanıdır. İndüksiyon zamanı, kalınlaşma hızının yavaş olduğu zamandır. Kalınlaşma hızı çok hızlı gerçekleştiğinde reçinenin penetrasyonu tamamen gerçekleşmeyecek ve kuru bölgeler kalacaktır. Kısa indüksiyon süresinde ise reçinenin emdirilmesi zor olabilmektedir. Bu nedenle uygun kalınlaşma ve indüksiyon zamanı seçilmelidir [40].

Pres kalıplama tekniğinde viskozite sabit kalmalıdır ve ( $0,75-1,5 \times 10^5$  Pa.s) aralığında olmalıdır.  $0,75 \times 10^5$  Pa.s altındaki viskozite değerleri reçinenin elyaftan kolaylıkla ayrılmasına neden olur. Kullanılacak elyaflar ise malzemeye mekanik özellikleri vereceğinden uygun elyaf seçimi gerçekleştirilmelidir. Elyaflar ürünün yüzeyinde görülmeyecek şekilde homojen olarak dağılımları sağlanmalıdır. Pres kalıplamadan sonra mümkün olduğunca çok az büzülme olmalıdır. Cam elyaf iyi mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle yaygın olarak kullanılan takviye elemanıdır. Sisal ise yüksek su direncinin istenilmediği durumlarda karmaşık parçaların üretimlerinin gerçekleştirilmesi için kullanılabilir. Polyamid elyafların kullanılması ile mükemmel elektrik direncine sahip ve düşük maliyetli ürünler oluşturulabilmektedir [40].

Pres kalıplama tekniğinde yaygın olarak kullanılan matris elemanı ise doymamış polyester reçinelerdir. Kalıplama işlemi için kullanılan polyester reçinelerin viskoziteleri yaklaşık olarak  $2,5$  Pa.s olmaktadır. Bununla birlikte  $1-250$  Pa.s arasındaki viskozite değerlerine sahip farklı reçinelerin kullanımları da mümkün olabilmektedir [40].

Kullanılacak dolgu malzemelerinin seçimi de bir hayli önemli olabilmektedir. Dolgu malzemeleri büzülme azaltır, modül ve sertlik değerlerini artırır, elektriksel ve reolojik özellikleri değiştirir, elyaf ve reçinenin birbirinden ayrılmasını önleyebilmektedir. Silika, karbonatlar, sülfatlar ve oksit olmak üzere dört grup pres kalıplamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan parçacık dolguların boyutları  $0,5-50$   $\mu\text{m}$  arasında değişebilmektedir. Kalsiyum karbonat ve killer pres kalıplama

yönteminde en çok tercih edilen dolgu malzemeleridir. Bu yöntemde kalsit, karbon siyahı, mika, alümina ve cam kürecikler kullanılabilir diğer dolgu malzemeleridir [40].

Kürlenme ajanı olarak yüksek sıcaklıklarda sertleşebilen t-butil perbenzoat (TBPB), t-butil peroktoat (TBPO) ve benzoil peroksit (BPO) kullanılmaktadır. BPO ekonomik olması nedeniyle yaygın kullanıma sahiptir. Ürünün kalıptan kolaylıkla çıkarılabilmesi için stearik asit, çinko stearat, magnezyum stearat gibi ayırma ajanları kullanılır [40].

Pres kalıplama yönteminde kompozitlerin kalıplanma sıcaklıkları 120 °C – 200 °C arasında değişmektedir. Isıtma işlemi tüm kalıp yüzeyinde aynı etkiyi oluşturacak şekilde yapılmalıdır. Her iki kalıp yarısının sıcaklığı aynı olmalıdır ya da  $\pm 5$  °C sıcaklık farkı olmalıdır. Bazı durumlarda ise ürünün kalıptan kolaylıkla çıkarılabilmesi için dişi kalıp erkek kalıba göre fazla ısıtılmaktadır. Pres kalıplama işleminde ürünün kürlenmesi için mümkün olduğunca düşük sıcaklık ve basınç değerleri kullanılarak maliyet düşürülmelidir. Kalıplama bileşenlerinin kıvamı kalıbın tüm yüzeyini kaplayabilecek şekilde ve herhangi bir hataya sebep olmayacak şekilde olmalıdır. Kalıplama işlemi ise hassas şekilde gerçekleştirilerek elyafların bozulmasına veya elyaf-matris ayrılmasına neden olmamalıdır. Kalıplanan ürünler düzgün yüzeylere sahip olmalıdır, çatlak, gözeneklilik gibi yüzey kusurları bulunmamalıdır. Kalıplama sıcaklıkları olarak karmaşık şekilli parçalarda kalıbı doldurmak uzun süreceğinden düşük sıcaklık değerleri tercih edilir. Ürün kalınlığının çok değişmediği basit şekilli parçalarda ise yüksek sıcaklık değerleri kullanılabilir. Kalın kesitli parçalar uzun sürelerde yüksek sıcaklıklarda imalatları gerçekleştirilir. Basınç değerleri ise genellikle düşük olarak tercih edilmektedir [40]. Pres kalıplama yöntemiyle üretilen kompozitler otomotiv gövde parçalarında, elektrik kapaklarında, kimyasal ekipmanlarda, büyük ve küçük boyutlu ev aletlerinde kullanılmaktadır [15, 42].

Pres kalıplama yönteminin avantajları [38, 40]:

- Her iki tarafta iyi yüzey kalitesi elde edilmesi
- Üretimin hızlı gerçekleşmesi
- Karmaşık geometri parçaların kolaylıkla üretilmesi
- Uniform ürün kalitesi

- Daha az işgücü
- Çok az ikincil bitirme işlemlerine (kaynak, şekillendirme vb.) ihtiyaç duyulması
- Üretim işlemlerinin (kalıp hazırlama, kalıplama bileşenlerinin kalıp içine yerleştirilmesi ve çıkarılması gibi) otomatik olacak şekilde gerçekleştirilebilmesi

Pres kalıplama yönteminin dezavantajları [40]:

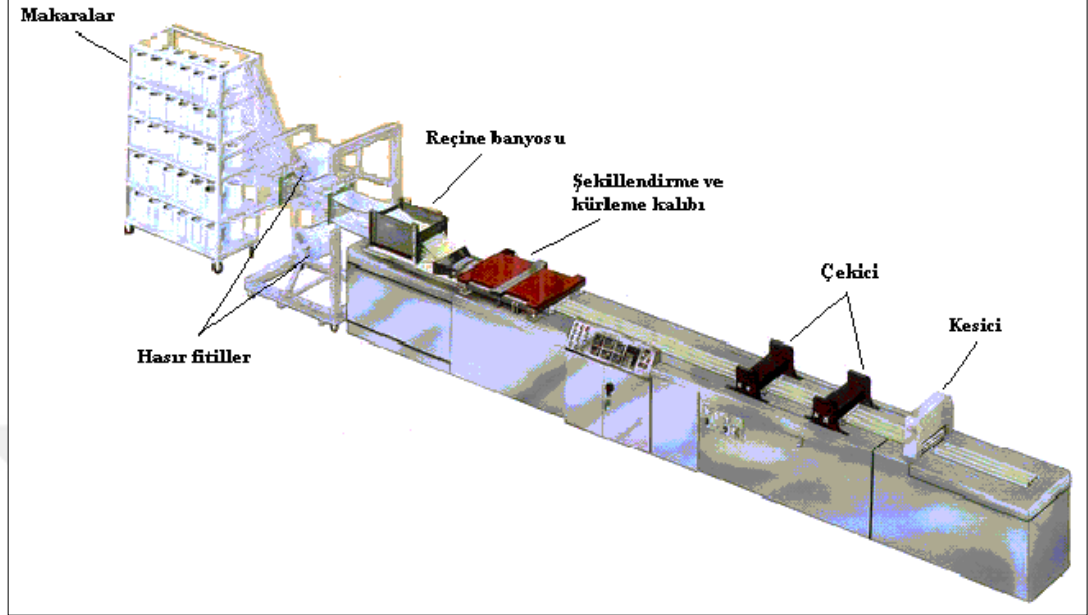
- Yüksek yatırım maliyeti
- Çok büyük boyutlu parçalar için uygun olmaması

### 3.1.6. Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon prosesi genel olarak sürekli formdaki fitilleri ve keçeleri reçine banyosu içerisine daldırılması ve ıslatılan elyafların kalıpta kürleşmesi sağlanarak çekme işlemi ile üretimin gerçekleştirilmesidir. Pultrüzyon tekniği ile sabit kesitli uzun ürünler ve kompozit yapısal profillerin üretimleri gerçekleştirilmektedir. Pultrüzyon tekniği alüminyum ve termoplastiklerin ekstrüzyon işlemine benzer olup, ürünün kalıptan çekilmesi işlemi bu tekniğin farklılığı olarak gösterilebilir. Bu üretim tekniğinde yüksek oranlarda elyaf takviyesi yapılabilmektedir. Pultrüzyon tekniğinde normal olarak sürekli keçeler ve dokuma halindeki cam elyaflar takviye edilmektedir. Fakat üstün özellikli yapısal parçaların üretimlerini gerçekleştirebilmek için karbon, aramid ve S-cam elyaflar da kullanılabilir. Reçine olarak genellikle ekonomik olan polye ester reçineler kullanılmaktadır [40].

Pultrüzyon yönteminin gerçekleştirildiği sistemde elyafların biriktirildiği çağlık sistemi, reçine banyosu, ön şekillendirme alanı, kalıp, çekme makaraları ve kesme aparatı bulunmaktadır [17]. Öncelikle çağlık sisteminde toplanan elyaflar üretimin gerçekleşebilmesi için sürekli olarak sisteme beslenir. Daha sonra ise elyaflar reçine banyosuna daldırılarak reçine ile birleşmesi sağlanır. Reçine banyosu; reçine, kürleme ajanı, renklendirici, UV stabilizatörü, alev geciktirici gibi farklı katkı maddelerinden oluşabilmektedir. Elyafların reçine ile ıslatılmasının ardından fazlalık olan reçine süzülerek ön şekillendirme alanına geçer. Ön şekillendirmede malzeme kalıplanacağı şekle getirilir. Reçine emdirilmiş elyafların kalıba girişi sağlanır. Kalıba girişte erken jelleşmeyi önlemek için su ile soğutma işlemi yapılır. Kalıp sıcaklığı ise kontrollü şekilde elektrikli ısıtıcılardan veya sıcak yağ ile sağlanır. Son şekillendirme, presleme ve kürleme işlemi kalıpta gerçekleşmektedir. Üretim sisteminin son kısmında ise

uygun kesme aparatı ile ürünün uygun uzunluklarda kesimi yapılarak üretim sonlandırılır [38, 40].



Şekil 3.7. Pultrüzyon kalıplama tekniği [45]

Pultrüzyon tekniğinde krom kaplamalı çelik, paslanmaz çelik ve seramik kaplı çelik kalıplar kullanılmaktadır. Ayrıca reçine emdirilmiş takviye elemanının kalıba girişinin kolay gerçekleşebilmesi için kalıp girişinde çene oluşturulur. Üretim işlemi sırasında kalıbın iç yüzeyinin temiz olmasına dikkat edilmelidir. Kalıbın iç yüzeyinin çalışma ömrünün uzun olması için 0,0375-0,05 mm kalınlığa kadar krom kaplama yapılabilir. Kalıpta sertleşen ürünün kalıptan çıkarılması çekme merdaneleri vasıtasıyla çekilerek yapılır. Pultrüzyon tekniğinde üretimin düzgün gerçekleşebilmesi için kalıp sıcaklığı, kalıp uzunluğu, çekme hızı gibi üretim faktörleri doğru seçilmelidir. Pultrüzyon üretim tekniği diğer kalıplama yöntemlerinden farklı olarak herhangi bir dış basınca ihtiyaç duyulmadan gerçekleştirilebilmektedir. Bu teknikte ürün karmaşıklığına, reçine viskozitesine, kürlenme durumuna bağlı olarak pultrüzyon işlemi 50-75 mm/min ile 3-4,5 m/min arasında değişebilmektedir [38, 40].

Pultrüzyon tekniği ile golf sopaları, hokey sopaları, kayak takımları gibi spor ekipmanları, köprü ve platformlar, zemin ızgaraları, boru ve tüp gibi korozyona ve basınca dayanıklı ürünler, I kiriş, düz çubuk, Z çubuk gibi geometriye sahip parçaların üretimleri gerçekleştirilebilmektedir [37, 40].



Bu yöntemin başlıca avantajları; ürünlerde iyi mukavemet değerlerinin elde edilebilmesi, farklı ürünlerin oluşturulabilmesi ve kolay üretim imkânı sunmasıdır. Ürün eklenmesinin zor olması ve kullanılan ekipman maliyetinin yüksek olması ise bu yöntemin dezavantajlarıdır [17].



## 4. AŞINMA VE AŞINMA MEKANİZMALARI

### 4.1. Aşınma

Triboloji sürtünme, aşınma ve yağlamayı inceleyen yunanca tribos kelimesinden türetilen bilim dalıdır. Genel anlamda ise triboloji; ev aletleri gibi küçük ekipmanlardan uzay araçları gibi büyük ekipmanlara kadar güvenilirlik, bakım ve aşınma gibi ekonomik anlamda maliyet oluşturan sorunlara operasyonel olarak çözüm bulmaya çalışan bilim dalıdır. Aşınma yüzey etkileşimi ile gerçekleşmektedir. Yüzey etkileşimi çok önemli olup doğadaki birçok olayı etkileyebilmektedir. Endüstriyel üretimdeki duruş, arıza gibi sebepler çoğunlukla tribolojiktir [46]. Bu nedenle aşınma daha dikkatli olarak incelenmelidir.

Aşınma için birçok araştırmacı tarafından farklı tanımlar oluşturulmuştur. Genel olarak aşınma; birbiri ile temas halinde bulunan mühendislik bileşenlerinin kayma veya yuvarlanma hareketine maruz kaldıklarında yüzeylerden malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır [47]. DIN 50320'ye göre ise aşınma; mekanik bir etki nedeniyle katı bir cismin yüzeyinden ileri malzeme kaybı olarak tanımlanmıştır [48]. Aşınma büyük miktarda enerji ve malzeme kayıpları ile sonuçlanmaktadır [46]. Aşınma hali katı-katı temasta gerçekleşebilirken tribolojik sistemdeki karşı cismin sıvı ve gaz halinde olduğu durumlarda da gerçekleşebilmektedir. Aşınma çeşitli atmosferik koşullarda farklı biçimlerde (abraziv, adheziv, erozyon, kavitasyon vb.) görülebilir. Aşınma genellikle istenilmeyen bir özellik gibi görünmesine rağmen bazen istenilen hal alabilmektedir. Taşlama gibi yüzey işlemlerinde işlemin verimli gerçekleşebilmesi için yüksek aşınma oranları tercih edilebilmektedir [49]. Aşınma uygun yüzey malzemeleri kullanılarak ve ürünlerin kimyasal bileşimleri değiştirilerek azaltılabilen bir özelliktir [48].

Aşınma endüstride hasar mekanizmalarının çoğunluğunu oluşturması nedeniyle ciddi anlamda ekonomik kayıplara sebep olabilmektedir [50]. Yağlama ekonomik kayıpların azaltılması için etkili bir yöntem olabilmektedir. Amerika'da (ABD) dişli tahriklerinin yağlanması için madeni yağ yerine %5'lik verimlilik artışı sağlayan

yağlayıcının kullanılması 0,6 milyar USD tasarruf sağladığı ortaya çıkarılmıştır. 1966 yılında Peter Jost İngiltere’de temel tribolojik prensiplerle oluşturulmuş önlemlerin uygulanması ile yıllık 515 milyon Euro tasarruf edilebileceğini tahmin etmiştir. Batı Almanya’da 1976 yılında yayınlanan benzer bir raporda aşınmadan kaynaklı ekonomik kayıpların 1975 yılında 10 milyar alman markı olduğu ve ülke ekonomisinde ciddi durum oluşturduğu belirtilmiş. ABD’de otomotiv endüstrisinde uygulanacak tribolojik önlemler ile yıllık ortalama 14,3 milyar dolara denk gelen otomobillerin tükettiği enerjinin yaklaşık %18,6’sı tasarruf edilebileceği görülmüştür. Farklı ülkelerde tribolojik önlemlerin uygulanması ile ulusal enerji tasarrufunun yılda 468 ila 700 milyon Euro arasında olacağı tahmin edilmektedir. ABD’de deniz uçağı için toplam aşınma maliyeti uçuş saati başına 243 dolar olduğu tahmin edilmektedir. Genel olarak bakıldığında satışa hazır hale gelmiş ürünün maliyetinin %2’lik kısmını aşınma maliyeti oluşturmaktadır [46].

Aşınmanın ciddi sıkıntılar oluşturması nedeniyle malzemelerin mekanik özelliklerinin yanında tribolojik davranışlarının incelenmesi önemli olabilmektedir. Tribolojik araştırmalar aşınma direncini artırmaya ve sürtünme direncini azaltmaya yönelik gerçekleştirilmektedir. Bunun için birçok çalışmada özel malzemeler ve kaplama teknolojileri geliştirilerek aşınma ve sürtünmenin üstesinden gelinmek istenilmiştir.

Tribolojik araştırmalarda çoğunlukla PMK’lar denenmektedir. Polimer ve takviyeli polimerler düşük yoğunlukları, işlem kolaylığı, düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranına sahip oldukları için uygulamalarda tercih edilmektedirler [52]. Termoset ve termoplastik matrisle sürekli cam ve karbon elyafların yüksek hacimli fraksiyonlarından oluşan yüksek performanslı kompozitler ile uçak, motor ve spor endüstrisinde kullanılan hafif yapısal bileşenler oluşturulur. Kısa elyaf veya partikül takviyeli polimer kompozitler ise sürtünme ve aşınmaya maruz kalabilecek otomotiv parçası uygulamalarında kullanılmaktadır. Tribolojik uygulamalarda kullanılan takviye malzemelerinin (cam elyaf çapları 10 µm veya farklı boyutlarda) çapları µm boyutlarındadır. Elyaf uzunlukları ise tipik olarak enjeksiyon kalıplama ile üretilen kısa cam elyaf takviyeli termoplastikler için 200 µm, uzun elyaf takviyeli kompozitlerde düşük milimetre değerleri ile santimetre arasında değişen uzunluklar kullanılabilir, sürekli olarak elyaf takviyesi yapılan kompozitlerde ise elyaf uzunlukları metreleri bulabilmektedir. Polimer kompozitler çok fazlı malzemelerdir.

Çok fazlı malzeme daha sert ve güçlü parçacık veya elyaflar ile daha yumuşak olan matris malzemesini tanımlamaktadır [50].

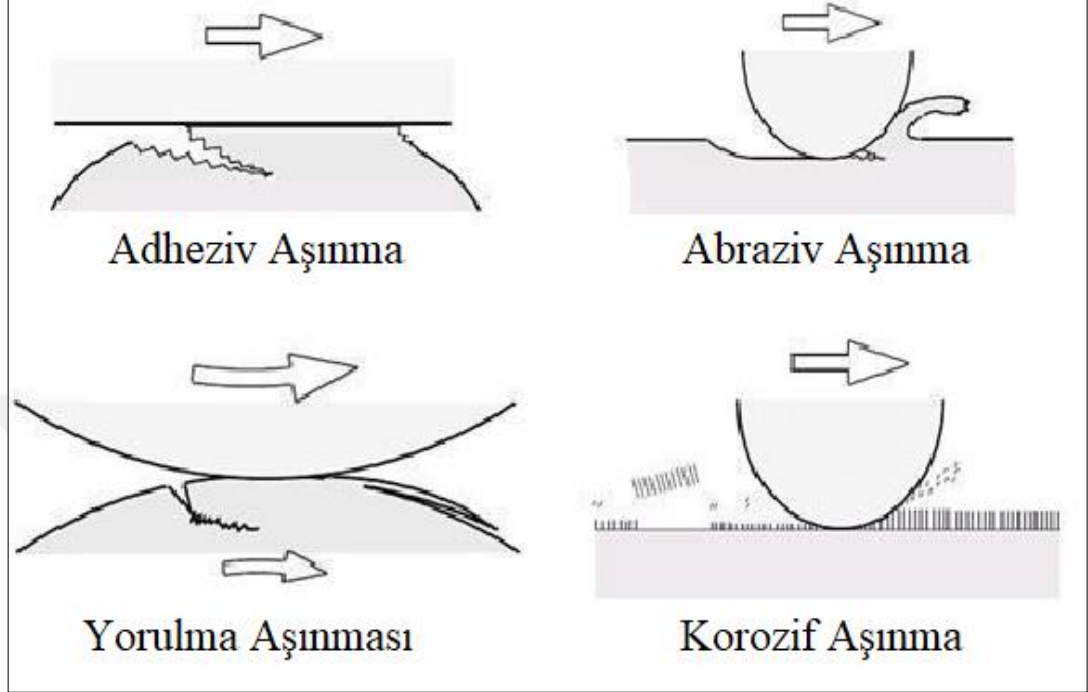
Tribolojik davranış (sürtünme katsayısı, aşınma oranı vb.) malzeme özelliklerine (partikül veya elyaf çap ve boyutlarına, takviye elemanının cinsine, matris ve takviye elemanın arayüzey durumu vb.) bağlı olmaktadır. Aşınma deneylerinde karşı malzeme türü de önemli olmaktadır. Bazı durumlarda ürünlerden farklı beklentiler oluşabilmektedir. Dişli ve yatak gibi makine elemanlarında düşük sürtünme ve düşük aşınma oranları istenirken, fren balataları ve debriyaj gibi otomotiv ürünlerinde düşük aşınma ile yüksek sürtünme katsayısı istenilmektedir. Bu nedenle aşınma incelenirken tasarım kriterlerine dikkat etmek gerekir [50].

Geçmişte yapılan çalışmalarda polimer malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarının düşük yapışma, yüksek sertlik ve mukavemet değerleri ile geliştirilebileceği görülmüştür. Ürün özellikleri özel dolgu ve takviye elemanlarının kullanımı ile arttırılabileceği görülmüştür. Normal olarak polimerler yüksek aşınma oranlarına sahipken, elyaf takviyesi ile aşınma oranları azaltılıp mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. ETP kompozitlerin aşınma karakteristikleri araştırmacılar tarafından ele alınmıştır. Matris malzemesinin aşınması plastik deformasyon, kesme ve çatlama ile kendini gösterirken, elyaf aşınması ise incelme, çatlama ve ara yüzey ayrılması ile karakterize edilmiş [50].

Aşınma sürekli ve yavaş olarak gerçekleşerek parça boyutlarında ve yüzeylerinde hasar oluşturmaktadır. Eksik yağlama, aşırı yüklenme, hatalı tasarım, sürtünme, kaba yüzey, hava-su ve kimyasalların etkisi, sıcaklık vb. etkenler aşınmaya sebep olabilmektedir. Aşınma sonucunda titreşim, aşırı ısınma, aşırı gürültü, sızıntı gibi olumsuz durumlar ile karşılaşılabilir. Aşınma tamamen önlenemese de azaltılabilmektedir. Aşırı yüklenmeden kaçınmak, uygun yağlayıcı cinsi ve miktarı, uygun yağlama yöntemi, yüzey pürüzlülüklerinin giderilmesi, yüzey sertliğinin arttırılması, düzenli bakım, uygun malzeme seçimi gibi işlemler ile aşınma azaltılabilmektedir [47]. Aşınma genellikle dişliler, yataklar, kavramalar, contalar, kamlar vb. makine parçalarında görülmektedir [46].

## 4.2. Aşınma Mekanizmaları

Aşağıda Şekil 4.1’de farklı aşınma mekanizmaları verilmiştir.



Şekil 4.1. Aşınma mekanizmaları [51]

### 4.2.1. Abraziv aşınma

Abraziv aşınma katı bir yüzeyin kendisine eşit veya daha yüksek sertlik değerine sahip malzemelere karşı yüklendiğinde gerçekleşmektedir [46]. Genel olarak bu aşınma mekanizmasında malzeme aşırı şekilde aşındırılır ya da kendisinden daha sert olan bir malzeme tarafından çizilir. Abraziv aşınma tarım, madencilik, kaya ve minerallerin taşındığı ve işlendiği endüstriyel alanlarda görülebilmektedir. Abraziv aşınmada yüzeyler birbirleriyle temas ettiklerinde her iki yüzeyde de aşınma meydana gelebilmektedir. Aşınma oranları malzeme özelliklerinin (sertlik, elastiklik modülü, akma dayanımı, kırılma tokluğu ve mikro yapı vb.) yanında farklı faktörlerden de (hareket dinamiği, çevresel koşullar vb.) etkilenebilmektedir. Yüzeylerin aşınma hızı yüzey özellikleri, temas hızı, yüzeyler arasındaki aşındırıcı varlığına ve çevresel koşullara bağlı olmaktadır [49, 53].

Tipik olarak abraziv aşınmada sert malzemeler kendilerinden daha yumuşak olan malzemelerin içine girerek hasara uğratar. Bu aşınma mekanizmasında sert

parçacıkların daha yumuşak yüzey üzerinde kayma hareketi yaptığında plastik deformasyon sonucunda hasar oluşması yaygın olarak görülmektedir. Abraziv aşınma sürme, mikro-yorulma, kama etkisi, mikro çatlaklar ve kesme şeklinde gerçekleşebilmektedir [54].



Şekil 4.2. Abraziv aşınma [55]

Abraziv aşınma temas şekline göre iki cisimli ve üç cisimli abraziv aşınma olarak sınıflandırılabilir. İzafi hareket sırasında iki cismin bulunduğu ve sert olanın aşındırıcı etki yaptığı sistemler iki cisimli abraziv aşınma olarak tanımlanmaktadır. Bu aşınma şekli taşlama, kesme ve işleme gibi mekanik olaylarda görülebilmektedir. Üç cisimli abraziv aşınma ise sert aşındırıcı parçacıkların iki cismin arasına girerek sertliklerine bağlı olarak bir ya da her iki yüzeyde de aşınmaya sebep olmasıdır [49].

Abraziv aşınmada pürüzlülüklerin şekli ve keskinliği aşınma özelliklerini etkileyebilmektedir. Malzemenin sertliği ve kırılganlığı ise malzeme deformasyonu, oluşacak çizik ya da oluğun şeklini etkileyebilmektedir [49]. Ayrıca sıcaklık ve nemde abraziv aşınmayı etkileyebilmektedir. Sıcaklık artışı ile hem aşınan malzemede hemde aşındırıcı taneciğin sertlik değerlerinde düşmeler görülebilmektedir. Aşınma sırasında gerçekleşen plastik deformasyon etkisi ile sıcaklık artmaktadır. Bir diğer etken ise nemdir. Genellikle atmosferdeki nem içeriği abraziv aşınma oranlarını arttırabilmekte fakat tersi durumlarda gözlemlenebilmektedir [46].

Abraziv aşınma endüstride en yaygın görülen aşınma mekanizmalarından olup ciddi ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Abraziv aşınmadan uygun malzeme seçimi ve yüzey uygulamaları ile kaçınılabilmektedir [53].

#### 4.2.2. Adheziv (yapışma) aşınma

Belirli sürtünme (kuru ve sınır sürtünme) halinde olan yüzeylerin temas ettiği pürüzlü yerlerde adheziv veya sıcaklık etkisi ile kohezif bağ oluşur. Yüzeylerin izafi hareketi sonucunda oluşan bu bağ kesme gerilmesi etkisiyle kopar. Böylelikle yumuşak olan yüzeyden parçalar ayrılarak diğer sert olan yüzeye transferleri gerçekleşecektir. Malzeme kaybının olduğu yüzeyde düzensiz delik veya çukurlar oluşurken, diğer yüzeyde ise fazlalık malzeme birikimi oluşacaktır [49, 56]. Temas yüzeylerinde oluşan kaynak bağlarının kopması ile meydana gelen malzeme kaybı adheziv aşınma olarak tanımlanmaktadır [57]. Genellikle adezyon yüzey etkileşimlerinden ve kayma bölgesindeki pürüzlülüklerin kaynamasıyla gerçekleşmektedir. Ara yüzey yapışması iyonik, kovalent, metalik, hidrojen veya vander waals bağlarından kaynaklanabilmektedir [49]. Oluşan bağların kuvvetliliği yüzeylerin pürüzlülük durumları ile ilgilidir [54]. Yük altında belirli hareket sırasında malzemenin bir yüzeyinden diğerine geçişi sırasında yüzeyden ayrılan parçacıklar kalıcı veya geçici olarak diğer yüzeye bağlanırlar [53].



Şekil 4.3. Bir kam mili üzerinde zamanla oluşmuş adheziv aşınma ve abraziv aşınma mekanizmaları [58]

Adheziv aşınma metalik malzemeler, seramikler, polimerler ve bu malzemelerin kombinasyonları arasında gerçekleşmektedir. Katı yüzeyler tamamen pürüzsüz özellikte olmayıp mikroskobik ya da makroskobik boyutlarda pürüzlülüklere sahiptirler. Normal yük altında yüzeyler birbirlerine temas ettiklerinde gerçek temas alanı dışında pürüzlülüklerin olduğu kısımlar temas ederek elastik ya da plastik deformasyona uğrayarak aşınma başlar. Aşınan parçacıklar tamamen ayrılır ya da tekrardan aşındırıcı etki oluşturabilecek şekilde sisteme katılabilir [53].

Bu aşınma mekanizmasında bağ kopması dört farklı şekilde gerçekleşebilmektedir. Ara yüzeydeki kayma direncinin temas halindeki yüzeylerden küçük olduğu, ara yüzeydeki kesme direncinin temas halindeki yüzeylerden büyük olduğu, kesme direncinin bir malzemedan küçük olduğu diğer malzemeye yakın olduğu ve son olarak kesme direncinin bir malzemedan küçük diğer malzemedan ise çok farklı olduğu durumlarda kohezif bağlar kopabilmektedir. Adheziv aşınmada oluşan aşınma ürünleri ince ve eğimlidir. Temas halindeki yüzeylerin birbirleriyle daha fazla izafi harekette bulunması daha fazla aşınma ürününün oluşmasına neden olur. Aşınan malzeme hacmi ise temas halindeki pürüzlülüklerin boyutlarına bağlıdır [54]. Adheziv aşınmadan kaçınmanın en etkili yolu benzer özelliklere sahip malzemelerin (özellikle metaller) kayma aşınmasına uğrayabilecek şekilde bir arada kullanılmamasıdır [53].

#### **4.2.3. Eroziv aşınma**

Eroziv aşınma küçük katı parçacıkların yüzeye çarparak mekanik bileşenlerde malzeme kaybına neden olan aşınma türüdür. Eroziv aşınma kumlama ve su jeti ile kesim işlemlerinde istenilen bir durum olsa bile, buhar ve jet türbinleri, boru hatları ve valfleri, ısı değiştiricileri, yanma sistemleri gibi birçok mühendislik sistemi için sıkıntı oluşturmaktadır. Eroziv aşınma katı parçacık içeren gaz ve sıvı ortamlarda meydana gelmektedir [53, 54]. Bu aşınma türünde parçacıklar sert ve katı olduğunda gerçekleşen aşınma şekli abraziv aşınmaya benzer özellik göstermektedir [46].

Aşındırıcı partiküllerin özellikleri eroziv aşınmayı etkilemektedir. Eroziv aşınma partikül çeşidi, çarpma açısı, çarpma hızı, partikül büyüklüğü gibi özelliklerden etkilenebilmektedir [46]. Yapılan bir çalışmada alüminyum alaşımı esaslı malzemeler farklı çarpma açılarında eroziv aşınma testine tabi tutularak partikül hızının ve boyutunun eroziv aşınma özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen



sonuçlarda partikül hız ve boyutunun aşınma oranı, yüzeyde erozyon hasarı, pürüzlülük gibi özelliklere etki ettiği görülmüştür [59, 60]. Bu yüzden partikül özellikleri dikkatle incelenmelidir.



Şekil 4.4. Eroziv aşınma mekanizması [61]

Çarpma açısı erozyona uğramış yüzey ile parçacıkların yüzeye çarpmadan önceki yörüngesi arasındaki açıdır. Yüksek çarpma açıları erozyon aşınmasına neden olmaktadır. Çarpma açısı 0 °C ile 90 °C arasında değişebilmektedir. 0 °C'lik çarpma açılarında aşınma ihmal edilebilecek seviyelerdedir. 20 °C'lik küçük çarpma açılarında aşındırıcı partiküller sert ve aşınmaya maruz kalacak yüzey yumuşak ise ağır aşınma meydana gelebilmektedir. Yüzey kırılğan ve çarpma açısı 90 °C'ye ulaşmış ise maksimum aşınma oranları görülebilmektedir [46]. Aşındırıcı partikül hızında ise hızlar düşük olduğunda plastik deformasyon çok az oluşurken, hızların büyük olduğu durumlarda yüksek plastik deformasyonlar oluşabilmektedir. Sıvıların çarpma hızları yüksek olduğunda katı parçacıkların oluşturduğu kadar erozyon aşınmasına neden olabilir. Bunun en güzel örneği bulutların arasından geçen uçaklarda türbin kanatlarının ıslak buhar etkisiyle hasar görmesidir [46]. Partikül sertliğinde ise sert parçacıkların yumuşak parçacıklara göre aşındırma özellikleri yüksek olabilmektedir. Mühendislik uygulamalarında parçacık büyüklüğündeki değişiklikler erozyon mekanizmalarında değişiklikler oluşturabilmektedir. Aşındırıcı partikül boyutları 5-500 µm arasında değişebilmektedir. Cam, çelik, grafit ve seramikler üzerine yapılan

erozyon testlerinde partikül büyüklüğünün 8,75 µm ile 127 µm arasında artarak değiştirildiğinde erozyon aşınmasının süneklikten kırılganlığa dönüştüğü tespit edilmiştir [46].

Genellikle eroziv aşınma pompalar, pervaneler, fanlarda, nozullarda ve boruların dirsek kısımlarında görülmektedir [62].

#### **4.2.4. Yorulma (pitting) aşınması**

Birbirleri ile sürekli olarak etkileşimde bulunan makine parçalarında temas alanı küçük olduğundan Hertz yüzey basınçları meydana gelmektedir. Bu basınçlar yüzey altında farklı büyüklüklerde kayma gerilmelerinin oluşmasına sebep olurlar. Malzemede tekrarlı yük altında maksimum kayma gerilmesinin olduğu yerlerde plastik deformasyon başlayarak küçük boşluklar oluşur. Zamanla oluşan bu boşluklar yüzeye ilerleyerek malzeme yüzeyinde çukurumsu yapılarda hasarların oluşmasına neden olurlar. Bu tür hasarlarda meydana gelen aşınma yorulma (pitting) aşınması olarak isimlendirilir [57, 62]. Yorulma sonucunda malzemeler aşınır ve yüzey işlevselliğini kaybeder. Çoğu durumda malzemelerin yorulması elastik ve plastik deformasyon, çatlak başlaması ve ilerlemesi şeklinde gerçekleşir [49].

Yorulma aşınması basit ve ağır tahribat oluşturacak şekilde iki türü bulunmaktadır. Basit şekilde gerçekleşen yorulma aşınmasında çukurcuklar çok küçük olup büyümeyen ve makine elemanları genellikle normal çalışmalarına devam edebilir. Hasar verici yorulma aşınmasında ise çukurlar zamanla büyür ve yüzeye doğru ilerleyerek makine elemanlarını çalışamaz hale getirir [57]. Bu aşınma mekanizmasında malzemelerin doğal sertlikleri önemli olmaktadır. Yorulma aşınmasından korunmanın en güzel yolu temas halinde bulunan yüzeylerin sertleştirilmesidir [57]. Yorulma aşınması genellikle dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan parçalarda görülmektedir [62].

#### **4.2.5. Koroziyon aşınma**

Koroziyon aşınma çalışma ortamıyla malzeme yüzeyleri arasındaki etkileşimle gerçekleşmektedir. Koroziyon aşınmada temas halindeki yüzeyin ortamla reaksiyona girmesi sonucunda yüzeyde tabaka oluşur. Daha sonra bu temas noktasında çatlak

oluşur veya abraziv etkiden dolayı tabaka hasara uğrar. Korozif aşınma çoğunlukla metallerin oksidatif aşınmasını ifade etmektedir [63]. Korozif aşınmada okside neden olan pasa çok dikkat edilmesi gerekmektedir. Oksitten korunmak için genellikle yüzeylere kaplama yapılır ya da ortamla reaksiyona girmeyecek alaşım elemanları seçilir [62]. Korozyon genellikle mekanik bir yıpranma olmadan meydana gelmektedir. Vakum ve inert atmosfer koşulları hariç tüm ortamlarda korozyon aşınmaya eşlik eder. Korozyon ve aşınma madencilik, mineral işleme, kimyasal işleme, kâğıt üretimi ve enerji üretiminin gerçekleştirildiği endüstriyel alanlarda görülmektedir [64]. Çoğu endüstriyel uygulamada metallerin yaygın kullanımından dolayı korozyon aşınmasından korunmak için geliştirilen yöntemler genellikle metallerin korozif aşınmasından kaçınmak için uygulanır. Korozif aşınmadan kaçınmak için uygulanabilecek yöntemler [64];

- Metal alaşımlarının değiştirilmesi: düz karbonlu veya düşük alaşımlı çelikten farklı olarak daha yüksek alaşımlı ve pahalı paslanmaz çeliklerin kullanılması
- İnhibitörlerin kullanılması veya kurutma işlemi ile ortam koşullarının değiştirilmesi
- Elektrokimyasal reaksiyonları kontrol ederek katodik veya anodik koruma işlemlerinin uygulanması
- Yüzey durumlarına göre organik, metalik veya inorganik kaplama uygulanması



Şekil 4.5. Korozyon aşınması [65]

Yukarıda sıralanmış yöntemler ile aşınma mekanizmasına karşı korunma sağlanabilir. Bu işlemlerin dışında çelikleri korozif aşınmadan korumanın en basit yolu boyamadır.

Genellikle atmosferik korozyona karşı dirençli olan çinko, çinko-alüminyum ve alüminyum kaplamalar kullanılmaktadır. Bunların dışında çelikler için elektro kaplama, elektroliz kaplama, termal püskürtme gibi diğer kaplama işlemleri uygulanabilmektedir [64].

### **4.3. Literatür Taraması**

#### **4.3.1. Takviye elemanı olarak cam elyaf kullanımının tribolojik özelliklere etkisi**

Pıhtılı ve Tosun çalışmasında, iki farklı hız (500 ve 710 rpm) ve iki farklı yük (500 ve 1000 g) altında düz polyester reçine ve cam elyaf takviyeli polyester kompozitler aşındırılarak cam elyaf takviyesinin aşınma özelliklerine etkisini incelemiştir. Elde edilen deneysel sonuçlarda, CTP kompozitlerin aşınma direncinin düz polyester reçineye kıyasla daha yüksek olduğu ve aşınma üzerinde uygulanan yükün hıza göre daha etkili olduğu belirtilmiştir. [66].

Chand ve diğ. çalışmasında, dolgulu ve dolgunsuz haldeki kısa cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin abrazyon aşınma davranışlarını ele almıştır. Deneylerde aşındırıcı olarak 100-200 µm ve 200-300 µm arasında değişen değerlerde partikül boyutuna sahip silika kumu kullanılmıştır. Sonuçlarda, aşındırıcı tanecik büyüklüğü ve uygulanan yük ile kompozitlerin aşınma hacimlerinin arttığı görülmüş fakat sabit yük etkisi altında ve 200-300 µm partikül boyutlarında artan hız değerleri ile birlikte aşınma oranının azaldığı tespit edilmiş ve son olarak cam elyaf takviyesi ile kompozitlerin aşınma direncinin arttığı görülerek kompozitlerin abrazyon aşınma özellikleri üzerinde deneysel test parametrelerinin yanında takviye elemanının da etkili olduğu belirtilmiştir [67].

Yaşar ve Arslan çalışmasında, silan kaplanmış sürekli E cam elyafın takviye edildiği polyester kompozitlerde elyaf hacim oranı ve elyaf doğrultusunun tribolojik özelliklere etkisini araştırmıştır. Deneylerde sürtünme katsayısı ve aşınma direnci gibi tribolojik özellikler elyaf hacim oranı, elyaf yönü, kayma hızı ve yüzey basıncına bağlı olarak incelenmiştir. Sonuçlarda; Antiparalel (AP) elyaf doğrultusunda en düşük sürtünme katsayısı gözlenirken, en düşük aşınma hızı ise paralel (PA) elyaf doğrultusunda görülmüştür. Elyaf hacim oranlarında ise kompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri %15-30 takviye aralığında düşük değerlerde olup %30'luk elyaf

takviyesinden sonra değerlerin arttığı görülmüş, aşınma hızının ise elyaf hacim oranının arttıkça azaldığı %15'lik elyaf oranında ise minimum değerde olduğu bu değerden sonra ise tekrardan arttığı tespit edilmiştir [68].

Vine ve diğ. çalışmasında, polieterimid (PEI) termoplastik polimere cam elyaf takviyesi yapılarak oluşturulan kompozitlerde takviye elemanının aşınma davranışı üzerine etkisi ve farklı sıcaklık değerleri ile kompozitlerin aşınma oranlarının nasıl değişebileceği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda; cam elyaf takviyesinin aşınma oranlarını azalttığı, test sıcaklık değerlerinin artmasıyla polimerin camsı geçiş ( $T_g$ ) sıcaklığına yakın sıcaklık değeri dışındaki tüm değerlerde aşınma hacminin arttığı görülmüştür [69].

Biswas ve diğ. çalışmasında, elyaf miktarının ve oryantasyonunun cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik ve eroziv aşınma özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Elyaf lar üç farklı ağırlık oranlarında (%20, 30 ve 40) ve dört farklı oryantasyonda ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $60^\circ$ ) olacak şekilde takviye edilmişlerdir. Deneysel sonuçlarda; elyaf takviye oranlarının ve oryantasyonlarının mekanik özellikleri farklı şekillerde etkilediği görülmüştür. Eroziv aşınma sonuçlarında ise ağırlıkça %20 cam elyaf takviyesi  $30^\circ$ 'lik elyaf düzeninde maksimum aşınma oranı elde edilirken, diğer iki ağırlık yüzdesine sahip cam elyaf takviyelerinde  $15^\circ$ 'lik elyaf düzeninde maksimum aşınma oranları tespit edilmiştir. Ayrıca eroziv partiküllerin çarpma hızının eroziv aşınma üzerinde çok etkili olduğu belirtilmiştir [70].

Kumar ve Panneerselvam çalışmasında, düz naylon 6 ve cam elyaf (CE) takviyeli naylon 6 kompozitlerin tribolojik özellikleri incelenerek farklı ağırlık yüzdelerinde (%0, 10, 20 ve 30) cam elyaf takviyesinin etkisi araştırılmıştır. Deneyler farklı yük (5, 10, 15, 20 N), farklı kayma hızlarında (1,5 ve 2,0 m/s) ve sabit kayma mesafesinde (1000 m) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda; artan cam elyaf içeriği ile naylon 6 kompozitlerin sürtünme katsayılarında ve spesifik aşınma oranlarında azalma görülmüş ve ağırlıkça %30'luk CE takviyesinde en düşük sürtünme ve aşınma oranı tespit edilmiştir. CE takviyeli naylon 6 takviyeli kompozitlerin artan yük ve kayma hızlarında sürtünme katsayılarının azaldığı görülürken artan yük ve kayma hızlarında spesifik aşınma oranlarının ise arttığı belirtilmiştir [71].

#### 4.3.2. Dolgu malzemesi olarak alümina ( $Al_2O_3$ ) kullanımının tribolojik özelliklere etkisi

Srinivasan ve diğ. çalışmasında, cam elyaf takviyeli polyester kompozitlere farklı miktarlarda (%1, 2, 3) nano- $Al_2O_3$  parçacıkları eklenerek dolgu malzemesinin farklı yük ve hız etkisi altındaki CTP kompozitlerin aşınma davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlarda %3'lük nano- $Al_2O_3$  ilavesi diğerlerine göre daha iyi aşınma direnci gösterdiği belirtilmiştir [72].

Solmaz ve diğ. çalışmasında, alümina ( $Al_2O_3$ ) partikülleriyle takviyelendirilmiş polyester reçinenin mekanik ve aşınma özelliklerini incelemiştir. Partikül takviyesi 6 farklı (%1, 2, 5, 10, 15, 20 ve 25) ağırlık oranında ve 3 farklı (30, 45 ve 60  $\mu m$ ) boyutta olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarda; alümina takviyesi ile polyester reçineli kompozitlerde takviye oranı arttıkça uzamasının azaldığı, çekme gerilmesinde ise net bir artış görülmemiştir. Abraziv aşınma testi sonuçlarına göre ise alümina takviye oranı ve boyutu arttıkça aşınma hızının azaldığı görülmüş ve çalışmanın sonucunda alümina takviyesinin mekanik özellikleri çok değiştirmedeği fakat aşınma özelliklerini iyileştirdiği vurgulanmıştır [73].

Raju ve diğ. çalışmasında, alümina ile doldurulmuş CE takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelenmiştir. Ağırlıkça (%0, 5, 7,5 ve 10) alümina ilavesi yapılan kompozitler öncelikle el yatırması tekniği ardından pres kalıplama işlemi uygulanarak üretimleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda; Alümina dolgusunun çekme mukavemeti, çekme modülünü ve sertliği arttırdığı, aşınma oranını ise azalttığı görülmüştür. En iyi aşınma direnci %10'lük alümina ilavesinde elde edilmiştir [74].

Patnaik ve diğ. çalışmasında, alümina dolgu malzemesinin CTP kompozitlerin eroziv aşınma özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlarda; dolgu bulunmayan CTP kompozitlerde yüksek aşınma oranları görülürken dolgulu haldeki CTP kompozitlerde düşük aşınma oranları görülerek dolgu ilavesinin olumlu etki yaptığı gözlemlenilmiştir [75].

Puneeth ve diğ. çalışmasında, CE takviyeli epoksi kompozitlere 3 farklı kombinasyon oluşturacak şekilde (silika, silika+alümina, silika+alümina+alüminatrihidrat) dolgu

ilavesi yapılarak farklı mesafelerde (250, 500, 750 ve 1000 m) ve farklı yükler (20 ve 40 N) altında 212 µm boyutlu silika kumu ile abraziv aşınma testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlarda; dolgusuz kompozitlerde elyaf ve reçinenin ara yüzeyde birbirine bağlanamaması ve elyafların kolay kırılması nedeniyle aşınma oranlarının yüksek çıktığı, dolgulu kompozitlerde ise aşınma oranlarının düşük çıktığı görülmüştür. Çalışma sonucunda silika, alümina ve alüminatrihidrat gibi seramik esaslı nano dolguların CE takviyeli kompozitlerde aşınma direncini arttırabileceği belirtilmiştir [76].

Devaraj ve diğ. çalışmasında, farklı ağırlık oranlarında (%2, 4 ve 6) alümina dolgusunun kullanıldığı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik ve aşınma özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonuçlarına göre; En iyi çekme karakteristiği %4'lük alümina dolgusu ile elde edilmiş, üç cisimli abraziv aşınma testinde %4'lük dolgu ilavesine kadar aşınma oranının azaldığı %6'lık dolgu ilavesinde ise kısmen azaldığı görülmüştür. İki cisimli abraziv aşınma testinde ise %4'e kadar olan dolgu ilavelerinde kompozitlerin aşınma dirençlerinin arttığı bu değerden sonra ise azaldığı görülmüştür [77].

Yadav ve diğ. çalışmasında, alümina dolgulu ve dolgusuz CE takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik ve abraziv aşınma özelliklerini araştırmıştır. Elde edilen bulgularda, CE takviyesi arttıkça polimer reçinenin çekme mukavemetinin arttığı eğilme mukavemetinin ise optimum elyaf yüklemesine kadar arttığı görülmüştür. Çalışmada CE takviyeli kompozit numunelere alümina ilavesinin çekme, eğilme ve aşınma direncini arttırarak olumlu etki yaptığı görülmüştür [78].

Shivamurthy ve diğ. çalışmasında, farklı ağırlık miktarlarında (%0, 3, 6 ve 9) eklenen alümina parçacıkların cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik ve aşınma özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlarda; %3'lük alümina parçacık ilavesinde en düşük aşınma oranı ve iyi mekanik özellikler elde edilmiştir. En büyük aşınma oranı ise %9'lük alümina ilavesinde tespit edilmiştir [79].

Bhimaraj ve diğ. çalışmasında, alümina nano partikül ilave edilmiş polietilentereftalat (PET) 'in aşınma ve sürtünme özellikleri üzerine çalışılmıştır. Nano partikül yüklemesi %1 ile 10 arasında değişen değerlerde yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre; doldurulmamış polimere kıyasla nano partikül dolgu ilavesinin aşınma

direncini yaklaşık olarak 2 kat arttırdığı ve çoğu durumda ise ortalama sürtünme katsayısını düşürdüğü görülmüştür [80].

Sawyer ve diğ. çalışmasında, alümina nano partikül ilavesinin politetrafloroetilen (PTFE) polimerinin aşınma ve sürtünme özelliği üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlarda; dolgu malzemesi eklenmemiş polimerlere kıyasla dolgulu polimerlerin sürtünme katsayılarının bir miktar yüksek olduğu görülerek dolgu ilavesinin çok az da olsa sürtünme katsayısını arttırdığı belirtilmiş fakat dolgu içeriğinin artması ile aşınma direncinin arttığı ve optimum bir değerin olmadığı tespit edilerek en büyük aşınma direnci %20'lik alümina nano partikül ilavesinde elde edilmiştir. Ayrıca %20'lik dolgu ilavesi dolgusuz polimere kıyasla aşınma direncini yaklaşık olarak 600 kat arttırdığı görülmüştür [81].

#### **4.3.3. Dolgu malzemesi olarak cam kürecik kullanımının tribolojik özelliklere etkisi**

Guo ve diğ. çalışmasında, içi boş cam kürecik ilavesinin nitril kauçuk malzemelerin tribolojik davranışlarına etkisini incelenmiştir. Deneysel sonuçlarda; Cam kürecik dolgusunun iyi bir ara yüzey etkisine sahip olduğu ve kauçuğun aşınma direncini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca cam kürecik ilavesinin sürtünme katsayısını azaltabildiği ve malzemenin aşınmasını önleyici etki yaptığı görülmüştür [82].

Shibata ve diğ. çalışmasında, kuru sürtünme koşullarda farklı yük ve kayma hızlarında pirinç kepeği seramiği ve cam kürecik içeren polyamid 66 (PA66) reçineli kompozitlerin temel tribolojik davranışları ve sert parçacıklı dolgu malzemelerinin düşük sürtünmeli ve aşınmaya karşı direnç gibi özelliklere sahip olup olmadıkları incelenmiştir. Sonuçlarda; dolgu ilavelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarını geliştirdiği, dolgulu kompozitlerin düz polyamid reçineye kıyasla düşük sürtünme ve aşınma değerlerine sahip oldukları gözlemlenmiştir [83].

Klaas ve diğ. çalışmasında, farklı formlardaki cam dolguların ilave edildiği PTFE kompozitlerin tribolojik davranışlarını incelenmiştir. Deneysel çalışmada cam dolguları; cam elyaf, cam pulcukları, içi boş ve dolu cam kürecik halinde ve %25'lik ağırlık yüzdesine sahip olacak şekilde ilave edilmişlerdir. Cam kürecik dolgulu PTFE kompozitler diğer kompozitlere kıyasla daha yüksek aşınma oranına sahip oldukları



görülmüştür. Cam elyaf takviyeli PTFE kompozitlerin katı yağlayıcı ilavesi ile mükemmel aşınma özelliklerine sahip oldukları gözlemlenmiştir [84].

Georgescu ve diğ. çalışmasında, cam kürecik ilavesinin Polibütilen tereftalat (PBT)'nin tribolojik özellikleri üzerine etkisini araştırmıştır. Cam kürecikler ağırlıkça (%10 ve 20) olacak şekilde ilave edilmişlerdir. Deneysel bulgularda; PBT'ye cam kürecik ilavesinin sürtünme katsayısını arttırdığı, aşınma oranını ise azalttığı görülerek cam küreciğin tribolojik özelliklere olumlu yansıtılabileceği görülmüştür [85].

Garg çalışmasında, içi boş mikro cam kürelerin ilave edildiği epoksi kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Deneylerde içi boş mikro cam küreler farklı ağırlık oranlarında (%0, 10, 15 ve 20) eklenmişler. Sonuçlarda; içi boş mikro cam kürecik ile epoksi reçine arasında kuvvetli bir bağlanma gerçekleştiği tespit edilmiş, ağırlıkça %0'dan %20'ye kadar gerçekleşen dolgu malzemesi kullanımlarında mekanik özelliklerin ve aşınma direncinin geliştiği görülmüş ve %20'lik dolgu malzemesi ilavesi ile daha iyi aşınma direnci elde edilmiştir [86].

Feyzulloğlu çalışmasında, farklı dolgu malzemelerinin CTP kompozitlerin adheziv aşınma özellikleri üzerine etkisi incelenmiş. Kompozitlerin içerisinde dolgu malzemesi olarak; polimetilmetakrilat (PMMA), cam kürecik ve cam tozu kimyasal bileşimin %10'luk kısmını oluşturacak şekilde ilave edilmişlerdir. Elde edilen deneysel sonuçlarda; en düşük sürtünme katsayısı değeri ve aşınma oranı cam kürecik dolgulu CTP kompozitlerde tespit edilmiş ve cam küreciğin tribolojik özelliklere olumlu yansıdığı görülmüştür [87].

#### **4.3.4. Diğer farklı dolgu malzemelerinin kullanılmasının tribolojik özelliklere etkisi**

Kumar ve diğ. çalışmasında, Çinko oksit (ZnO) ve Titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) dolgu malzemelerinin CTP kompozitlerin mekanik ve aşınma özelliklerine etkisini araştırmıştır. Deneysel sonuçlarda; dolgu malzemelerinin ilavesi ile çekme mukavemetinin azaldığı fakat sertlik, eğilme mukavemeti, tabakalar arası kesme mukavemeti ve darbe mukavemeti gibi diğer mekanik özelliklerin arttığı görülmüştür. Diğer yandan TiO<sub>2</sub> dolgulu kompozitlerin ZnO dolgulu kompozitlere kıyasla daha iyi aşınma özellikleri sergilediği gözlemlenmiştir [88].

Yılmaz ve diğ. çalışmasında, farklı ağırlık ve partikül boyutlarına sahip  $\text{CaCO}_3$  dolgu ilavesinin CTP kompozitlerin dayanım ve eroziv aşınma özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlarda; kompozit içerisindeki yüksek  $\text{CaCO}_3$  küçük dolgu boyutları ile yüksek dayanım özellikleri ve aşınma dirençlerinin elde edilebileceği tespit edilmiştir [89].

Kaundal ve diğ. çalışmasında, ağırlıkça (%0, 10 ve 20) Silisyum karbür ( $\text{SiC}$ ) dolgu malzemesi kullanımının CTP kompozitlerin darbe mukavemeti, fiziksel özellikleri ve eroziv aşınma özelliklerine etkisini araştırmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlarda;  $\text{SiC}$  dolgulu CTP kompozitlerin eroziv aşınma dirençlerinin dolgusuz kompozitlere kıyasla daha iyi olduğu belirlenmiştir. En yüksek aşınma oranları dolgulu kompozitlerde  $75^\circ$  derecelik çarpma açısında görülürken dolgusuz kompozitte ise  $60^\circ$  derecelik çarpma açısında görülmüştür. Ayrıca  $\text{SiC}$  dolgusu ile darbe mukavemeti ve sertliği arttığı gözlemlenmiştir [90].

Mahore ve diğ. çalışmasında, PTFE dolgulu CTP kompozitlerin aşınma özellikleri incelenerek PTFE dolgusunun etkisi araştırılmıştır. Deney sonunda elde edilen sonuçlara göre; PTFE dolgusunun sürtünmeyi azalttığı ve aşınma direncini arttırdığı görülerek en iyi sonucu ise %10'luk PTFE dolgu ilavesinin verdiği görülmüş. PTFE dolgusunun aşınma özelliklerine olumlu yansımalarının sebebi olarak ise kendinden yağlama özelliğine sahip olması ve matris ile güçlü bağ oluşturabilme yeteneğine sahip olması gibi özelliklerinden dolayı olduğu açıklanmıştır. Ayrıca deney sırasında 5 N'dan 12 N'a kadar farklı yük artışları ile birlikte aşınma oranlarının da arttığı görülmüştür [91].

## 5. MALZEME VE YÖNTEM

### 5.1. Malzeme

CTP kompozit numuneler Sami Tongün Cam Elyafı Polyester Ürünleri (Kocaeli) tarafından deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere üretilmiştir. Cam elyaf takviyeli polyester kompozitler 140 °C'lik sıcaklıkta, 150 bar basınç altında üç dakikalık bekleme sürelerinde sıcak pres kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan cam elyafların çapları 13 µm ve uzunlukları 12 mm'dir. Matris malzemesi olarak düz ortoftalik polyester reçine ve çekme katkılı ortoftalik polyester reçineler kullanılmıştır. CTP kompozitlerin üretimleri sırasında artık çekme gerilmeleri oluşabilmekte ve kompozit malzemelerin performans özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir. Genellikle bu durumun önüne geçebilmek için termoplastik esaslı eklentiler reçine malzemesine ilave edilir. Bu nedenle CTP kompozitlerin üretimleri sırasında çekme katkılı polyester reçinelerde çekme katkısı olarak polistiren kullanılmıştır. Numunelerde dolgu malzemesi olarak ise alümina ve cam kürecikler (CK) kullanılmıştır. CTP numuneler deneylerde kullanılmak üzere 20x20x4 mm boyutlarında kare görünüme sahip olacak şekilde kesilmişlerdir.

Ortoftalik polyester reçineler standart ve ekonomik reçinelerdir. Ortoftalik polyester reçineler kullanıldıkları ürünleri yüksek mukavemetli ve ısıya dayanıklı hale getirirler. Ortoftalik polyesterler çevreye duyarlı olup, sınırlı mekaniksel özelliklere sahiptirler [92].

Genel amaçlı polyester reçinelerin kalıplanmasında en çok karşılaşılan problemler; düzgün yüzeylerin elde edilememesi, iç yüzeyde çatlak oluşumu, yüzeydeki kalın kesitlerde dikkate değer seviyelerde daralmaların meydana gelmesidir. Polyester reçinedeki yüksek seviyedeki hacimsel farklılıkları dengelemek için reçine içerisine kürlenmeden önce çekme katkıları ilave edilir. Polistiren bu amaçla en çok kullanılan çekme katkılarından biridir [93].

Numunelerin kimyasal bileşimleri aşağıda Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin kimyasal bileşimleri

Numune	Matris Malzemesi	Takviye Malzemesi	Dolgu Malzemeleri
D1	%20 Ortoftalik Polyester	%40 CE	%10 CK
T1	%20 Ortoftalik Polyester	%11CE	%1 Alümina
T2	%20 Ortoftalik Polyester + %8 Polistiren	%11CE	%1 Alümina
T3	%20 Ortoftalik Polyester + %8 Polistiren	%11CE	%5 CK
T4	%20 Ortoftalik Polyester	%11CE	%1Alümina + %5 CK
T5	%20 Ortoftalik Polyester + %8 Polistiren	%11CE	%1Alümina + %5 CK



Şekil 5.1. Aşınma testi için hazırlanmış numuneler

## 5.2. Yöntem

### 5.2.1. Yoğunluk ölçümü

Numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre Şekil 5.2’de gösterilen AND GR-200 yoğunluk ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde öncelikli olarak numunelerin havadaki yoğunluk değerleri ölçülüp kaydedildi. Daha sonra ise

numunelerin sıvı ortamdaki yoğunluk değerleri ölçülerek cihaz ekranından numunelerin yoğunluk değerleri okunmuştur.



Şekil 5.2. AND GR-200 yoğunluk ölçüm cihazı

### 5.2.2. Sertlik ölçümü

Malzemelerin sertlik değerleri diğer malzeme özelliklerini de (mekanik, termal, tribolojik) etkileyebilmektedir. Bu nedenle sertlik ölçümleri çoğu mühendislik malzemelerinde tercih edilmektedir. Bu çalışmada numunelerin sertlik değerleri ile aşınma oranları arasında mukayese yapmak için ASTM D 2583 standartına uygun olarak numunelerin yüzeylerinde sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin barcol sertlik ölçümleri aşınma testlerinden önce Şekil 5.3'te gösterilen sertlik ölçme cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Barcol sertlik ölçüm cihazı numune yüzeyine batırılan iğne ile 0 ila 100 birim arasında değişen sertlik değerlerinin okunduğu ekrandan oluşmaktadır.

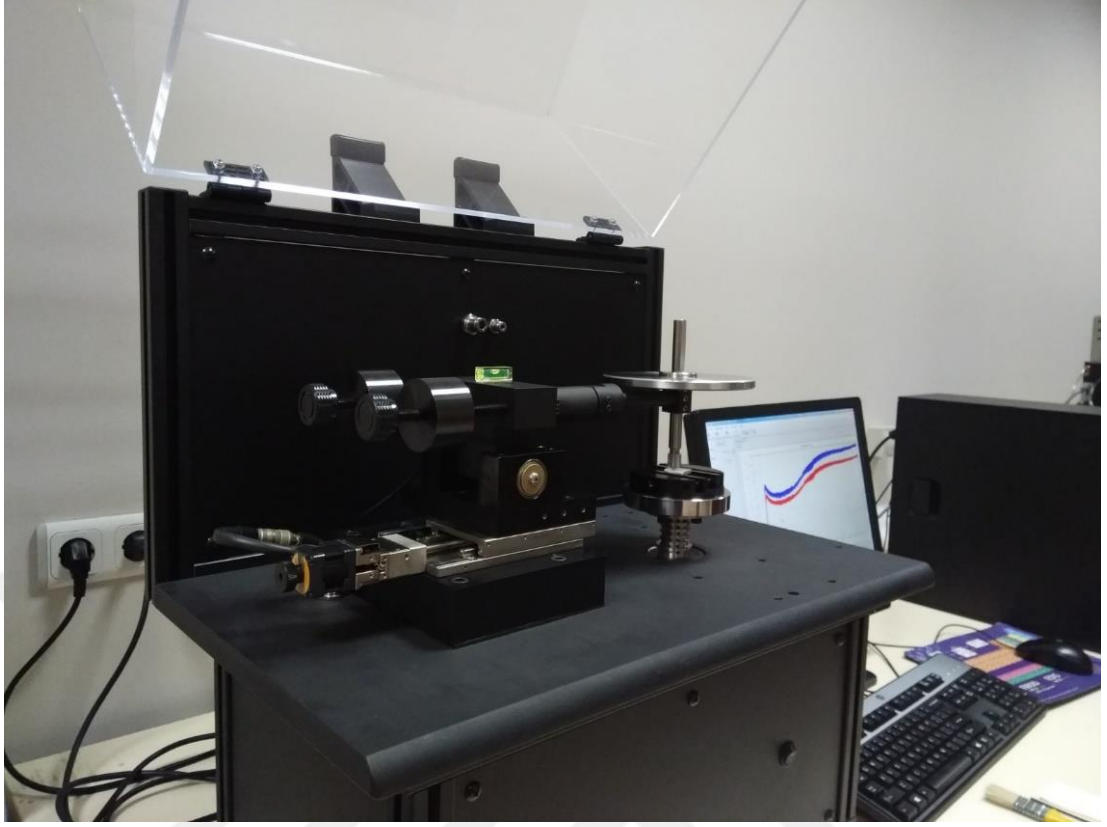


Şekil 5.3. Barcol sertlik ölçüm cihazı [94]

### 5.2.3. Aşınma testi

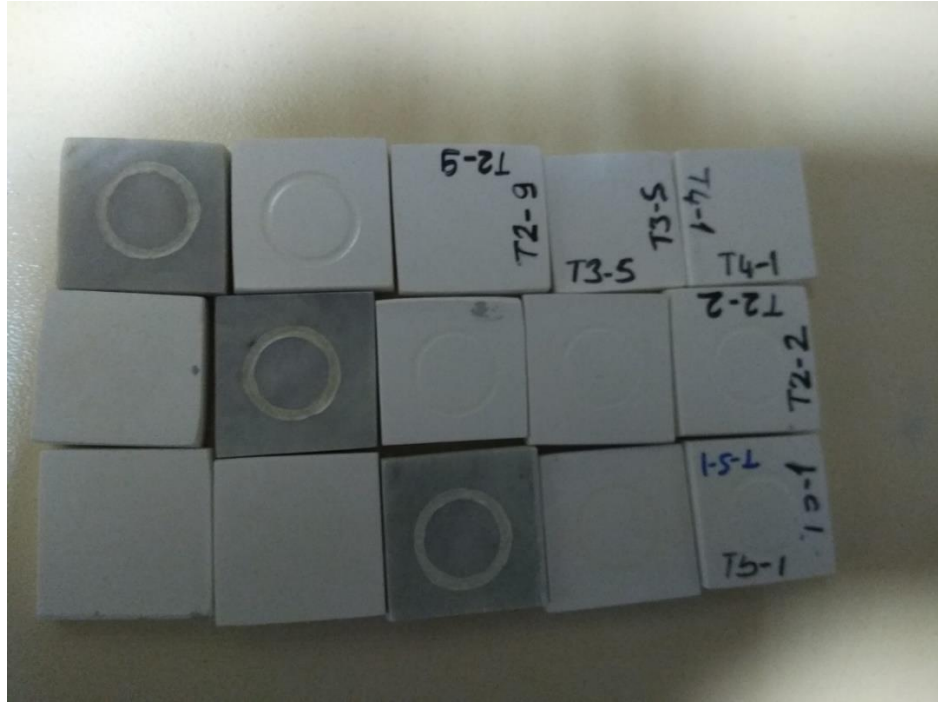
Numunelerin aşınma testleri iki farklı yük (10 N ve 20 N), iki farklı hız (100 rpm ve 200 rpm) ve sabit kayma mesafesinde (150 m) Nanovea markalı tribometre ile gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri 6 mm çapındaki Alümina kürecik ile aşındırılarak yüzeylerde 5 mm yarıçapında dairesel izler oluşturulmuştur. Aşınma testleri dört farklı durum (10 N ve 100 rpm, 10 N ve 200 rpm, 20 N ve 100 rpm, 20 N ve 200 rpm) için en az üç tekrarlı olacak şekilde sabit oda sıcaklığında ( $\sim 22$  °C) gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sırasında sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı değerleri ölçülmüştür. Altı farklı numune için farklı aşınma koşullarında toplam 81 adet aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan aşınma cihazı aşağıda Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

Nanovea tribometre ile 0,01 ile 500 rpm arasında değişen hızlarda ve 100 mN ile 60 N arasında değişen yüklerde aşınma testleri yapılabilir. Cihazın kapalı alan kısmına farklı gazlar gönderilerek farklı çevresel koşullar altında numuneler teste tabi tutulabilirler. Test sırasında sürtünme katsayısı değerleri hassas ve hızlı şekilde yük hücreleri (Loadcell) tarafından okunarak anlık grafik eğrileri şeklinde görüntülenebilmektedir. Aşındırıcı olarak 3, 6, 10 ve 25 mm aralığında değişen çaplarda seramik küreler kullanılabilir.



Şekil 5.4. Adheziv aşınma test cihazı

Tribometre ile adheziv aşınmaya maruz bırakılan deney numuneleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Aşınma testi uygulanmış deney numuneleri

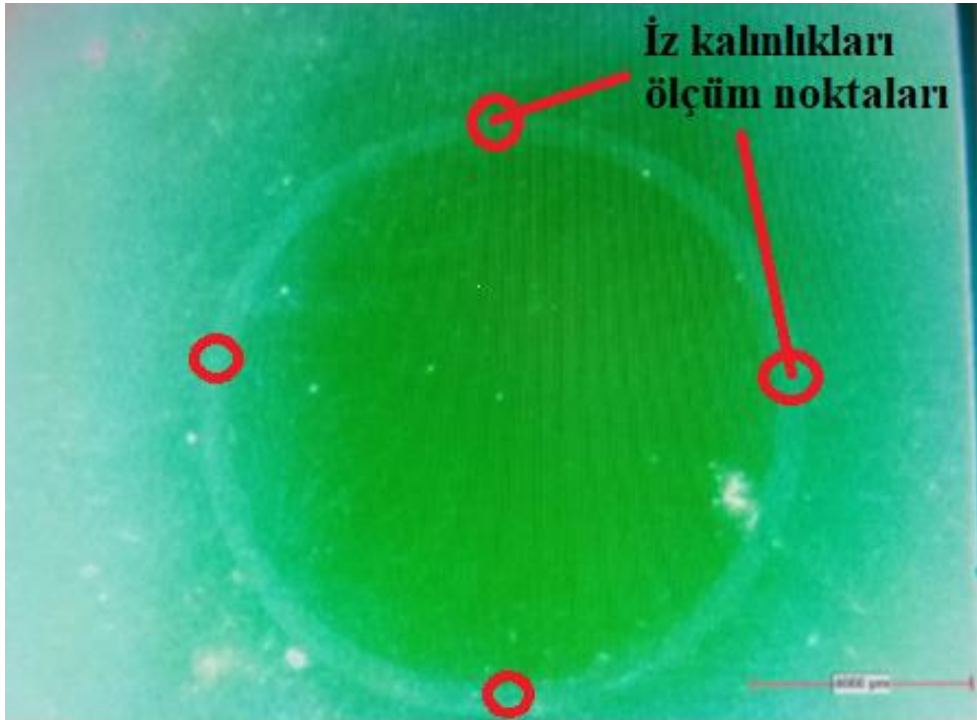


#### 5.2.4. Aşınma iz kalınlıkları ölçümü

Aşındırılmış test numunelerinin iz kalınlıkları Şekil 5.6’da verilen Nikon SMZ 745T mikroskobu ile ölçülmüştür. İz kalınlıkları numunelerin yüzeylerinde oluşturulan aşınma dairesi üzerinde dört farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalaması olacak şekilde elde edilmiştir.



Şekil 5.6. Nikon SMZ 745T mikroskobu

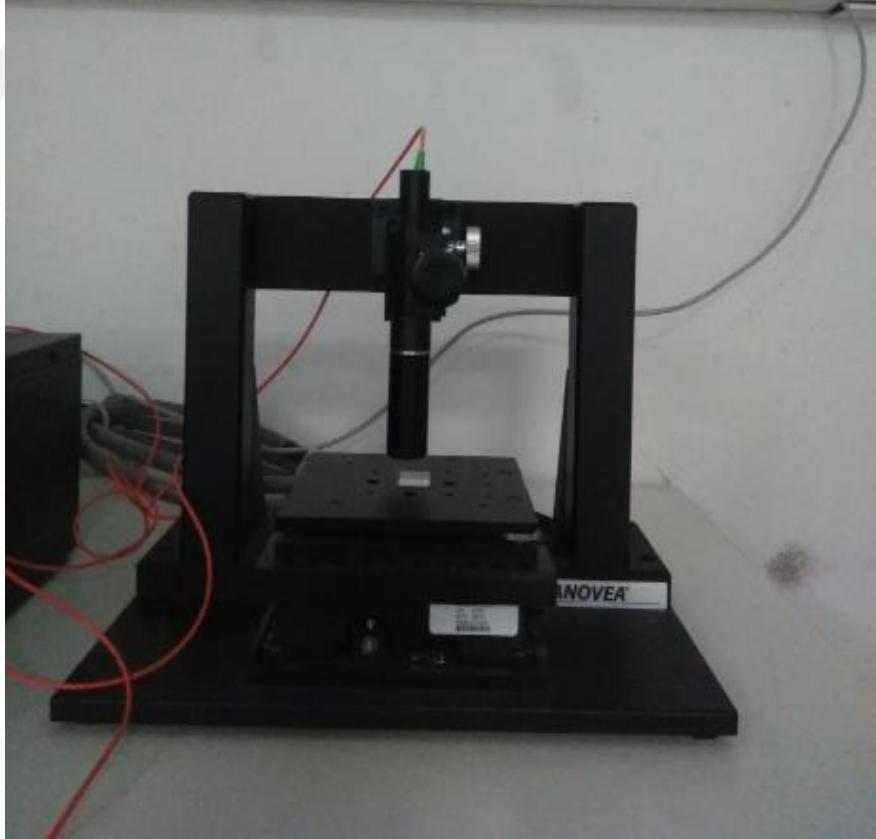


Şekil 5.7. Nikon SMZ 745T mikroskobu ile aşınma izlerinin görüntülenmesi



### 5.2.5. Yüzey pürüzlülüklerinin ölçümü

Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 5.8'deki Nanovea PS50 temassız 3D Lazer profilometre ile gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri maksimum deney koşulları ( $F=20$  N ve  $n=200$  rpm) altında aşındırılan altı farklı (D1, T1, T2, T3, T4, T5) test numunesinin yüzeyleri taranarak yapılmıştır. Öncelikle herhangi bir test numunesi (D1) alınarak profilometre ile numunenin tüm yüzeyi taranmıştır. Yüzey taraması ile elde edilen sonuçlarda D1 numunesinin aşınma dairesi üzerindeki aşınma kanallarının farklı noktalarda farklı genişliklerde olduğu görüldü. Bu nedenle yüzey pürüzlülük ölçümlerinde tutarlı sonuçlar alabilmek için profilometre ile numune çevresini kapsayacak şekilde aşınma dairesi üzerinde olan dört farklı noktada tarama gerçekleştirilerek ortalama değerler kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri 4 (mm/s) tarama hızında 2 (mm) x 2 (mm) karelik alan taranarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma derinliğine göre farklı çözünürlük frekans değerleri kullanılarak yüzey taramaları temassız olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.8. Nanovea PS50 temassız üç boyutlu profilometre ile yüzey pürüzlülük ölçümü

Nanovea profilometre 50x50mm X-Y düzlemlerinde hareket edebilmektedir. Yüzeyleri temassız şekilde tarayarak 3 boyutlu olarak yüzey pürüzlülük topografyasını oluşturarak Mountain Software yazılımı ile bilgisayarda görüntülenmesi sağlar. Yüzeyler uygunluk durumlarına göre farklı frekans değerlerinde taranarak farklı çözünürlükte yüzey görüntüleri alınabilmektedir. Bu cihaz ile farklı tarama hızlarında  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_v$  gibi pürüzlülük değerleri elde edilebilmektedir.



## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 6.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Tablo 6.1. Numunelerin yoğunluk değerleri

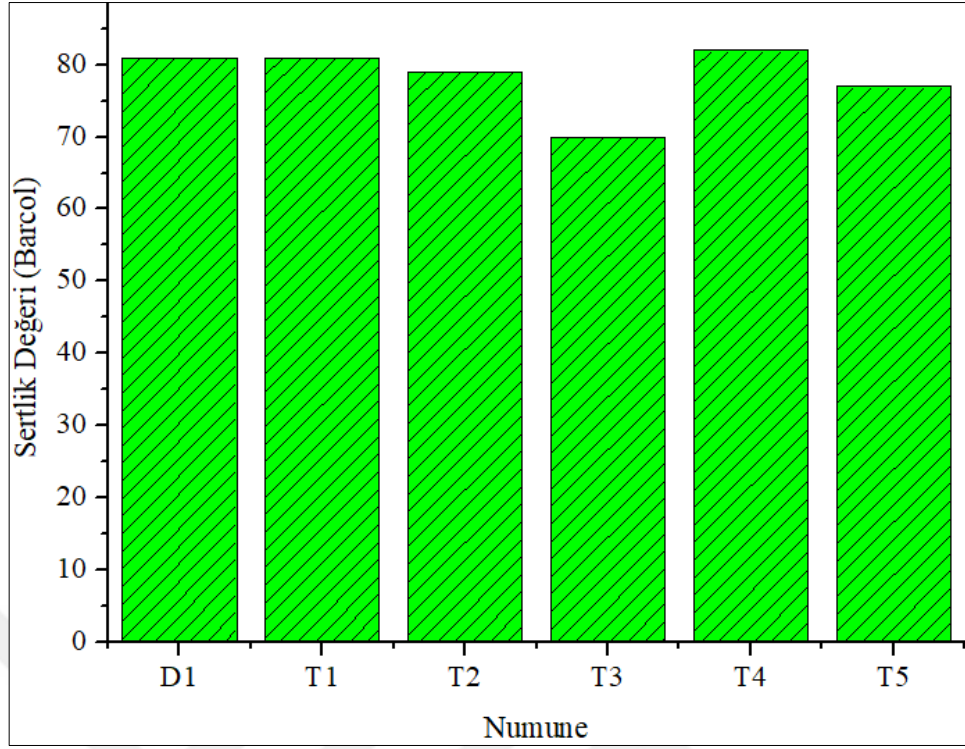
Numune	Yoğunluk (g / cm <sup>3</sup> )
D1	1.60
T1	1.73
T2	1.73
T3	1.70
T4	1.77
T5	1.76

Kompozit malzemelerde ekonomiklik oluşturmanın en güzel yolu yoğunluğun düşük seçilmesidir. Bu nedenle kompozit malzemelere çeşitli dolgu ve takviye ilaveleri yapılarak yoğunlukları düşürülmek istenir. Tablo 6.1’de farklı oranlarda dolgu malzemesi ve takviye elemanı içeren CTP numunelerin yoğunluk değerleri görülmektedir. Tablo 6.1 incelendiğinde en düşük yoğunluk değeri D1 numunesinde görülmektedir. D1 numunesinin yoğunluk değerindeki düşüş artan oranlarda elyaf ve dolgu yüklemesine bağlı olabileceği düşünülmektedir. Yoğunluk değerleri üzerine farklı matris malzemesi kullanımının etkisi incelendiğinde çekme katkılı reçinelere ilave edilen polistiren çekme katkısının yoğunluğu çok etkilemediği görülmektedir. Dolgu malzemesine bağlı olarak yoğunluk değerleri incelendiğinde alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinden yalnızca birinin kullanıldığı numunelerin yoğunluk değerleri alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin birlikte kullanıldığı numunelerin yoğunluk değerlerine kıyasla düşük olduğu görülmektedir. Tek dolgunun kullanıldığı çekme katkılı reçinelerde cam kürecik dolgusunun alümina dolgu malzemesine göre daha düşük yoğunluk etkisi yaptığı görülmektedir. Düz ortoftalik polyester reçinelerde ise yalnızca alümina veya cam kürecik dolgu kullanımı yoğunluk değerlerini düşürdüğü görüldü fakat dolgu malzemelerinin birlikte kullanımı ise yoğunluk değerlerini olumsuz etkileyerek arttırdığı görülmüştür. Maksimum yoğunluk değeri alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin birlikte kullanıldığı düz

ortoftalik polyester reçineli numune olan T4'te gözlemlenmiştir. Yoğunluk değerleri üzerine genel bir yorum yapıldığında CTP numunelerde alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin birlikte kullanımı yoğunluk değerlerini arttırırken, dolgu malzemelerinin ayrı ayrı kullanımları CTP numunelerin yoğunluk değerlerini farklı şekillerde etki ederek azalttığı görülmüştür.

## 6.2. Barcol Sertlik Ölçüm Sonuçları

Şekil 6.1'de farklı kimyasal bileşimlere sahip numunelerin barcol sertlik değerleri görülmektedir. Şekil 6.1 incelendiğinde en yüksek sertlik değerine T4 numunesinin, en düşük değerine ise T3 numunesinin sahip olduğu görülmektedir. Matris malzemesi çekme katkılı ortoftalik polyester reçine (T2, T3, T5) olan numunelerin sertlik değerleri düz ortoftalik polyester reçineli (D1, T1, T4) numunelere kıyasla düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda çekme katkısının kompozit malzemelerin sertlik değerlerine olumsuz yansıdığı görülebilmektedir. Cam kürecik dolgu ilavesi düz ortoftalik polyester reçinelerin sertlik değerini çok değiştirmediği kısmen arttırdiği fakat çekme katkılı reçinelerin sertlik değerlerini ise net şekilde azaltiği görülebilmektedir. Alümina dolgu ilavesinin ise sertlik değerlerine olumlu yansıyarak arttırdiği görülmektedir. Genel olarak bakıldiğında numunelerin sertlik değerlerini arttırmada alümina dolgu malzemesinin cam kürecik dolgularına göre daha iyi olduğu gözlemlenmektedir. Diğer yandan D1 numunesinin sertlik değeri de yüksek değerlerdedir. D1 numunesinde diğer numunelerden farklı olarak elyaf takviyesi %40 oranında ve CK dolgu malzemesi ise %10 oranında kullanılarak diğer numunelerden fazla olacak şekilde takviye ve dolgu ilavesi ile yüklenmiştir. Literatürde yapılan bir çalışmada cam elyaf takviyesinin artması ile CTP kompozitlerin sertlik değerlerinin iyileştiği görülmüştür [95]. D1 numunesinin sertlik değerinin yüksek olması aşırı cam elyaf takviyesinden kaynaklı olabileceği düşünölmektedir.



Şekil 6.1. Numunelerin barcol sertlik değerleri

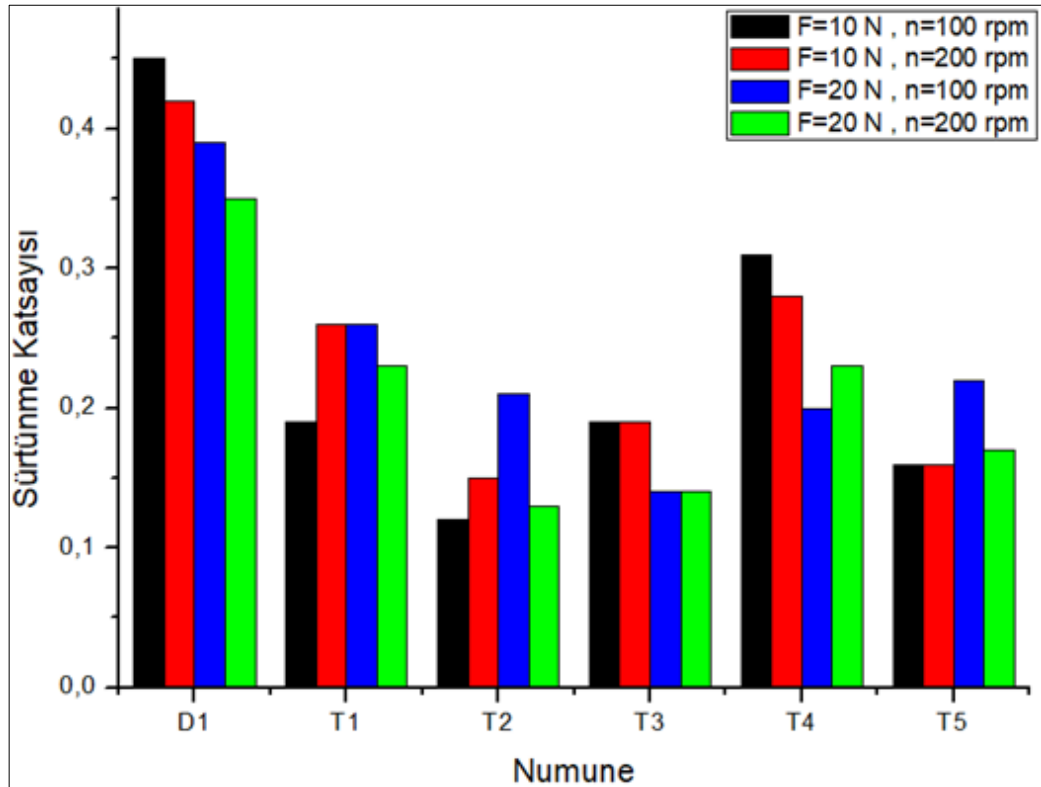
### 6.3. Aşınma Testi Sonuçları

Bu bölümde farklı yük ve hızlarda aşındırılan test numunelerinin sürtünme katsayısı, ortalama sürtünme katsayısı, aşınma hacmi, aşınma oranları incelenecektir.

Numunelerin farklı yük ve hızlardaki sürtünme katsayısı değerleri aşağıdaki Şekil 6.2'de verilmiştir.

Şekil 6.2 incelendiğinde D1 numunesinin sürtünme katsayısı değerinin artan hız ve artan yük değeri azaldığı görülmektedir. Yük ve hızın birlikte artırılmasıyla oluşturulan maksimum çalışma koşulunda D1 numunesinin en küçük sürtünme katsayısı değerine sahip olduğu görülmektedir. Yük ve hızın ayrı ayrı ya da birlikte artırılmasıyla D1 numunesinin sürtünme katsayısı değerlerinde azalış gözlemlenmiştir. T1 numunesinde en düşük sürtünme katsayısı değeri düşük çalışma koşullarında ( $F=10$  N,  $n=100$  rpm) elde edilmiştir. 10 N'luk yük altında hız artışı ile T1 numunesinin sürtünme katsayısı değeri artmıştır fakat aynı durum 20 N'luk yük etkisinde gözlemlenmemiştir. T1 numunesinde 20 N'luk yük etkisi oluşturulduğunda artan hız değeri ile sürtünme katsayısı değerinin azaldığı görülmektedir. T1 numunesinin sürtünme katsayısı değerlerine hızın yüke kıyasla etkisinin daha fazla

olduğu anlaşılmaktadır. T2 numunesinin sürtünme katsayısı değerleri T1 numunesine benzer şekilde 10 N'luk yük etkisinde hızın artışı ile sürtünme katsayısı değerinin arttığı fakat 20 N'luk yük etkisinde ise azaldığı görülmektedir. T2 numunesinde ise hız ve yükün her ikisinin de sürtünme katsayısı değerlerini etkilediği görülmektedir. T3 numunesinde en yüksek sürtünme değerleri 10 N'luk yük etkisinde gözlemlenildi. T3 numunesinde hız artışı sürtünme katsayısı değerlerini etkilemediği fakat yük artışıyla birlikte sürtünme değerlerinin azaldığı gözlemlenerek T3 numunesinin sürtünme değerleri üzerinde yükün etkili olduğu tespit edildi. T4 numunesinin sürtünme katsayısı değerleri 10 N'luk yük etkisinde daha yüksek olmaktadır. T4 numunesinde hız artışı 10 N'luk yük etkisinde sürtünme katsayısı değerinin düşürürken 20 N'luk yük etkisinde arttırdığı görüldü. T4 numunesinin sürtünme katsayısı değerlerine hem hızın hemde yükün etki ettiği şekilden görülebilmektedir. Son olarak T5 numunesinde ise en düşük sürtünme değerleri 10 N'luk yük etkisinde görülmüştür. T5 numunesinde 10 N'luk yük etkisinde hız artışı sürtünme katsayısı değerine etki etmez iken, 20 N'luk yük etkisinde hızın artırılması sürtünme katsayısı değerini düşürmüştür. T5 numunesinde yük artışı ile sürtünme net şekilde artmıştır. T5 numunesinde hız artışı sürtünme değerleri üzerine farklı etkiler oluşturmuştur.

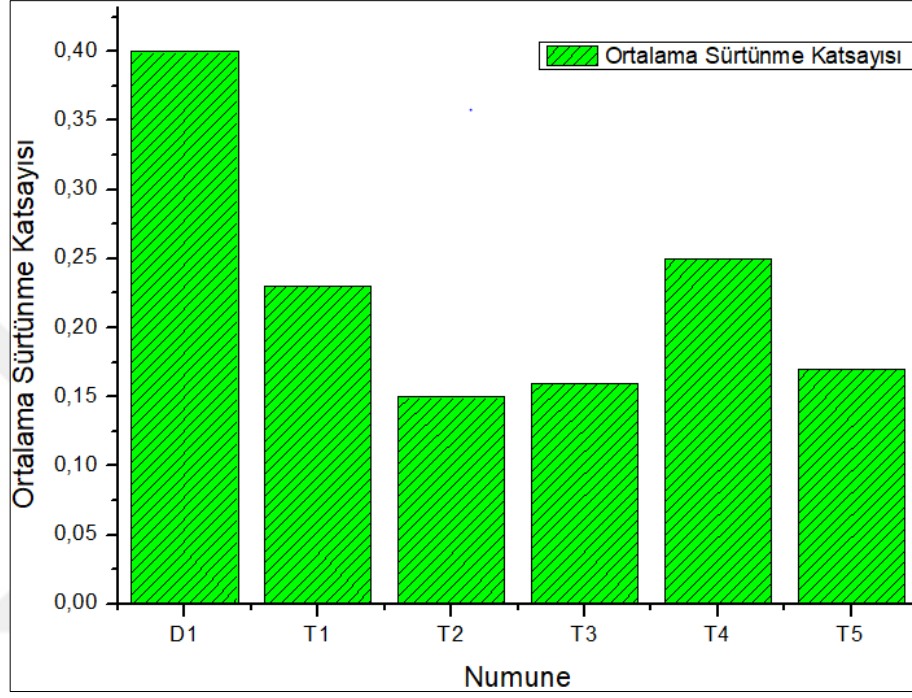


Şekil 6.2. Farklı yük ve hızlarda numunelerin sürtünme katsayısı değerleri

Numunelerin dört farklı aşınma koşulu altındaki sürtünme katsayısı değerlerinin ortalaması alınarak Şekil 6.3'te verilmiştir.

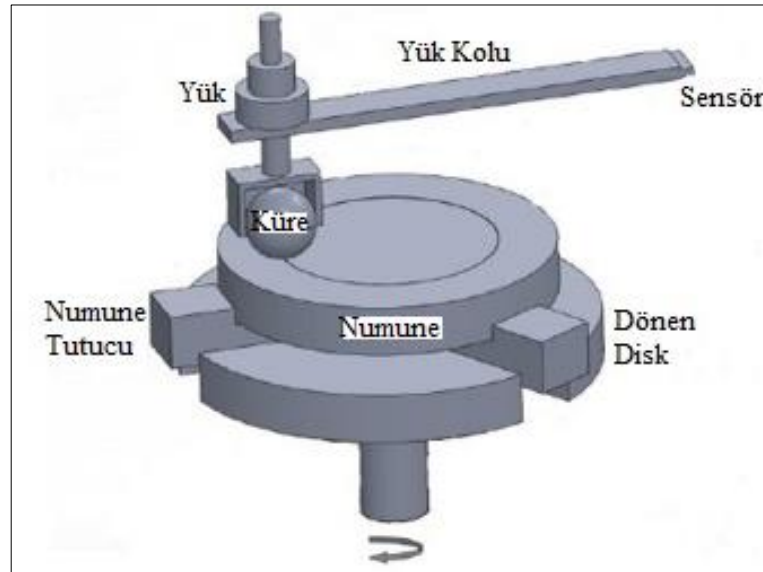
Şekil 6.3 incelendiğinde en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değeri D1 numunesinde, en düşük ortalama sürtünme katsayısı değeri ise T2 numunesinde elde edildi. Ortalama sürtünme katsayısı değerleri T2, T3 ve T5 numunelerinde diğer numunelere kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu üç numunenin ortak özelliği ise matris malzemelerinin çekme katkılı ortoftalik polyeester reçine olmasıdır. Matris malzemesi düz ortoftalik polyeester reçine olan D1, T1 ve T4 numunelerinin sürtünme katsayısı değerleri yüksek olmaktadır. Polistiren çekme katkısı numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerlerini azalttığı görülebilmektedir. Aynı oranlarda elyaf takviyesine (%11) sahip numunelerde her iki matris malzemesinde de alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin birlikte kullanımı ortalama sürtünme katsayısı değerlerini arttırırken dolgu malzemelerinden herhangi birinin kullanımı ise malzemelerin sürtünme değerlerine olumlu yansiyarak iyileştirdiği görülmektedir. Dolgu malzemelerinden sadece birinin kullanıldığı çekme katkılı ortoftalik polyeester reçinelerin ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Fakat çekme katkılı ortoftalik polyeester reçinede alümina dolgulu CTP numunenin biraz daha düşük ortalama sürtünme katsayısı değerine sahip olduğu görülebilmektedir. Ortalama sürtünme katsayısı değerlerine bakılarak alümina ve cam kürecik dolgu malzemeleri doğru miktarlarda kullanıldığında sürtünme katsayısı değerlerine olumlu yansiyarak malzeme özelliklerini iyileştirilebileceği tespit edildi. Literatürde cam elyafın sürtünme özelliklerine olumlu yansıdığı görülmüş, yine bu çalışmada diğer numunelerin sürtünme özelliklerine cam kürecik dolgusunun da olumlu yansıdığı tespit edildi, fakat sürtünme özelliklerine olumlu yansıyan cam elyaf ve cam kürecik D1 numunesinde aşırı oranlarda kullanıldıkları için sürtünme özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Literatürde kompozit malzemelerde takviye ve dolguların optimum oranlarda kullanılmadığı takdirde malzeme özelliklerini olumsuz etkileyebileceği gözlemlenmiş. Bu çalışmada doğru oranlarda CE takviyesi ve CK dolgu malzemesinden oluşan T3 numunesi düşük sürtünme davranışı gösterirken, aşırı CE ve CK dolgu malzemesinden oluşan D1 numunesi ise en yüksek sürtünme değerine sahiptir. D1 numunesinin ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,4 iken T3 numunesinin ortalama sürtünme katsayısı 0,16'dır. T3 numunesinde çekme katkılı ortoftalik

polyester reçine kullanımının yanında doğru oranlarda takviye elemanı ve dolgu malzemesi kullanımı ortalama sürtünme katsayısı değerinin yaklaşık olarak %60 dolaylarında iyileştiği görüldü. Bu çalışma literatürde belirtildiği gibi dolgu ve takviye malzemesinin doğru oranlarda kullanılması ile sürtünme bakımından iyi malzeme özelliklerinin elde edilebileceğini göstermiştir.



Şekil 6.3. Numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri

Aşağıdaki Şekil 6.4’te adheziv aşınmanın prensip şeması verilmiştir.



Şekil 6.4. Pin on disk aşınma modeli



Mikroskop yardımıyla aşınma iz kalınlıkları ölçülen numunelerin aşınma hacimleri ASTM G99-05 standart test metoduna uygun olarak Denklem 6.1'deki formülden hesaplanmıştır. Daha sonra aşınma hacimleri Denklem 6.2'de yerine yazılarak her bir test numunesi için aşınma oranları hesaplanmıştır.

$$V = \frac{\pi.R.D^3}{6.r} \quad (6.1)$$

Burada V aşınma hacmi ( $\text{mm}^3$ ), R sürtünme yarıçapı (5 mm), D aşınma iz kalınlığı (mm) ve r ise aşındırıcı kürecik yarıçapı (3 mm)'dir.

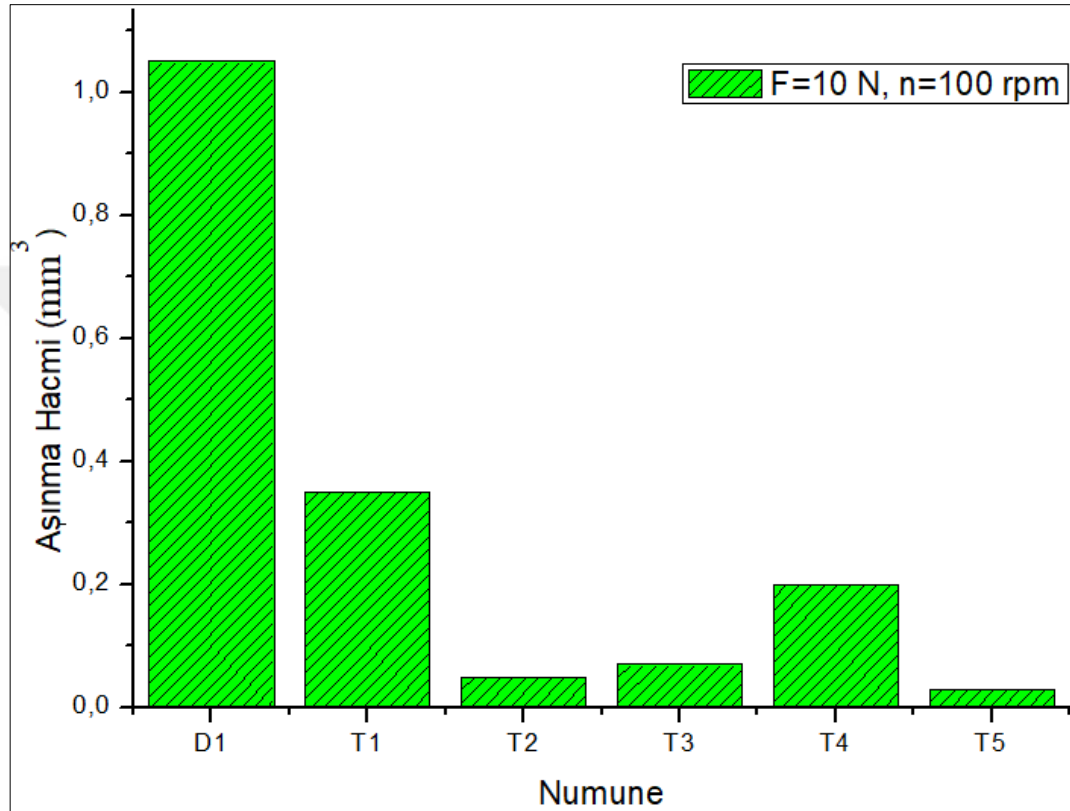
$$k = \frac{V}{L.X} \quad (6.2)$$

Burada k aşınma oranı ( $\text{mm}^3 / \text{Nm}$ ), V aşınma hacmi ( $\text{mm}^3$ ), L uygulanan yük (N), X ise kayma mesafesi (150 m)'dir.

Numunelerin aşınma hacimleri denklem 1'deki formülden hesaplanarak grafiklerde sunulmuştur. Aşağıdaki şekillerde farklı çalışma koşulları altında her bir numuneye ait aşınma hacmi değerleri verilmiştir.

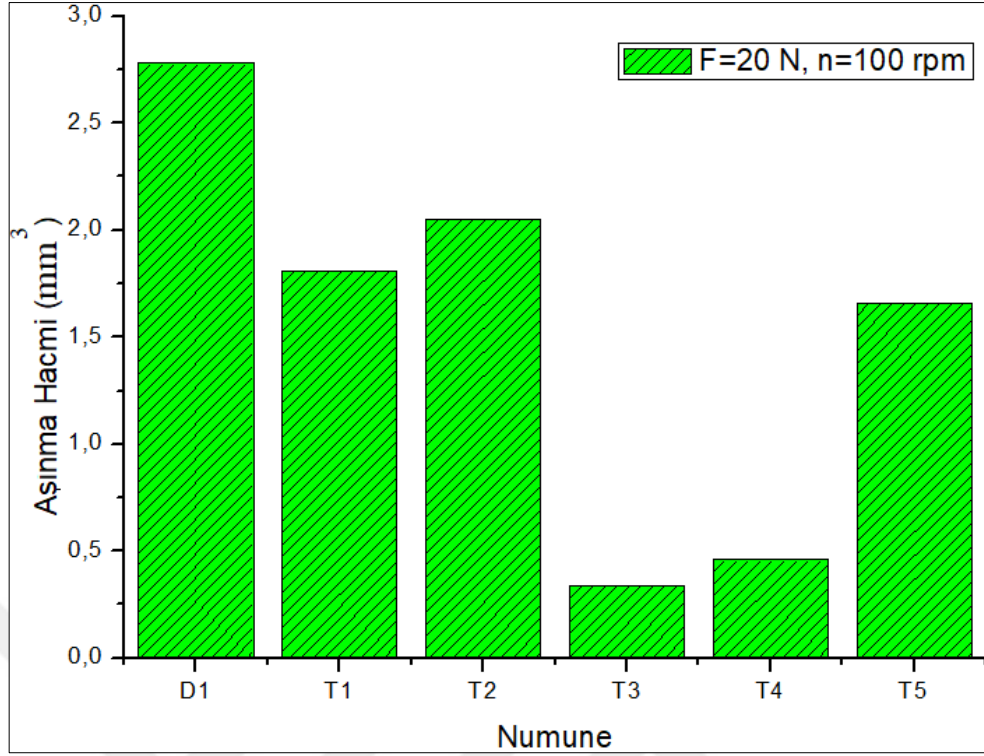
Şekil 6.5 10 N ve 100 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacmi değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde en büyük aşınma hacmi değeri D1 numunesinde, en düşük aşınma hacmi değeri ise T5 numunesinde gözlemlenmiştir. Düşük çalışma koşulları altında numunelerin sürtünme katsayısı değerleri ile aşınma hacmi değerleri benzer özellikte olduğu görüldü. Düşük çalışma koşulları altında düşük sürtünme katsayısı değerine sahip numuneler (T2, T3 ve T5) düşük aşınma hacmi değerlerine sahip olduğu görüldü. En yüksek aşınma hacmi değerleri düz ortoftalik polyester reçineli numunelerde (D1, T1 ve T4) görülmüştür. Düşük çalışma koşulları altında çekme katkısı içeren polyester reçineli numunelerde alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin ayrı ayrı veya birlikte kullanımları aşınma hacmi değerlerini iyileştirdiği görüldü. Aynı oranlarda takviye elemanı içeren düz ortoftalik polyester reçineli numunelerde ise alümina ve cam kürecik dolgularının birlikte kullanımı yalnızca alümina dolgulu numuneye göre daha iyi sonuç verdiği tespit edildi. Düşük çalışma koşulları altında en yüksek sürtünme katsayısı değerine sahip D1 numunesi en yüksek aşınma hacmi değerine de sahip olduğu görülmektedir. D1 numunesi fazla sürtünmeden dolayı yüzeyinden ciddi şekilde malzeme kaybına uğradığı için aşınma

hacmi değeri yüksek olmaktadır. Düşük çalışma koşullarında aynı oranlarda CE takviyesi içeren numunelerde yalnızca cam kürecik dolgu kullanımı veya alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin birlikte kullanımı aşınma hacmi değerlerini iyileştirmiştir. Polistiren çekme katkısı düşük çalışma koşullarında malzeme özelliklerine olumlu etki yapmıştır.



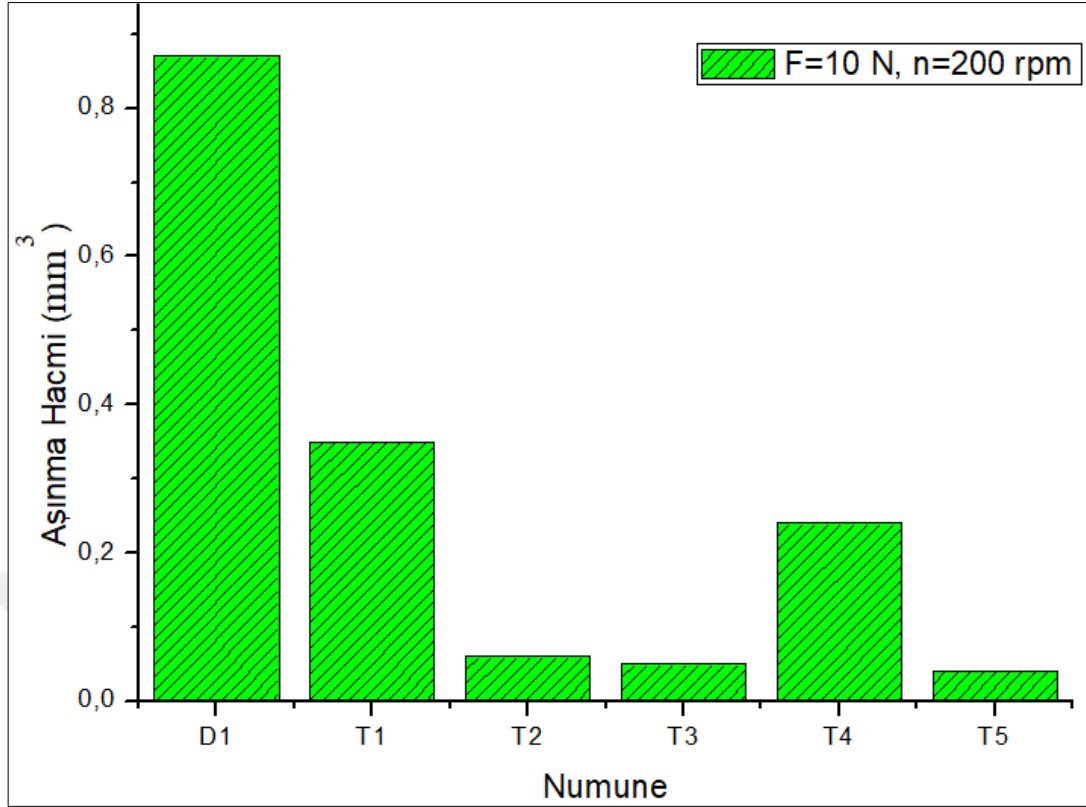
Şekil 6.5. 10 N ve 100 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacimleri

Aşağıda Şekil 6.6'da 20 N ve 100 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacmi değerleri verilmiştir. Şekil 6.6 incelendiğinde en yüksek aşınma hacmi değeri (2,78 mm<sup>3</sup>) D1 numunesinde, en düşük aşınma hacmi değeri (0,34 mm<sup>3</sup>) ise T3 numunesinde görüldü. Aynı oranlarda elyaf takviyesine sahip numunelerde sadece alümina dolgusunun kullanılması aşınma hacmi değerlerini yükseltirken, alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin birlikte kullanımı aşınma hacmi değerlerini iyileştirdiği, en iyi aşınma hacmi değeri ise cam kürecik dolgu malzemesinin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Düşük hızdaki çalışma koşullarına bakılarak 20 N ve 100 rpm hızdaki en belirgin değişiklik yük artışı ile tüm numunelerin aşınma hacmi değerlerinin artmasıdır. Yük artışı ile numunelerin yüzeylerinden daha fazla malzeme kaybı gerçekleşmiştir.



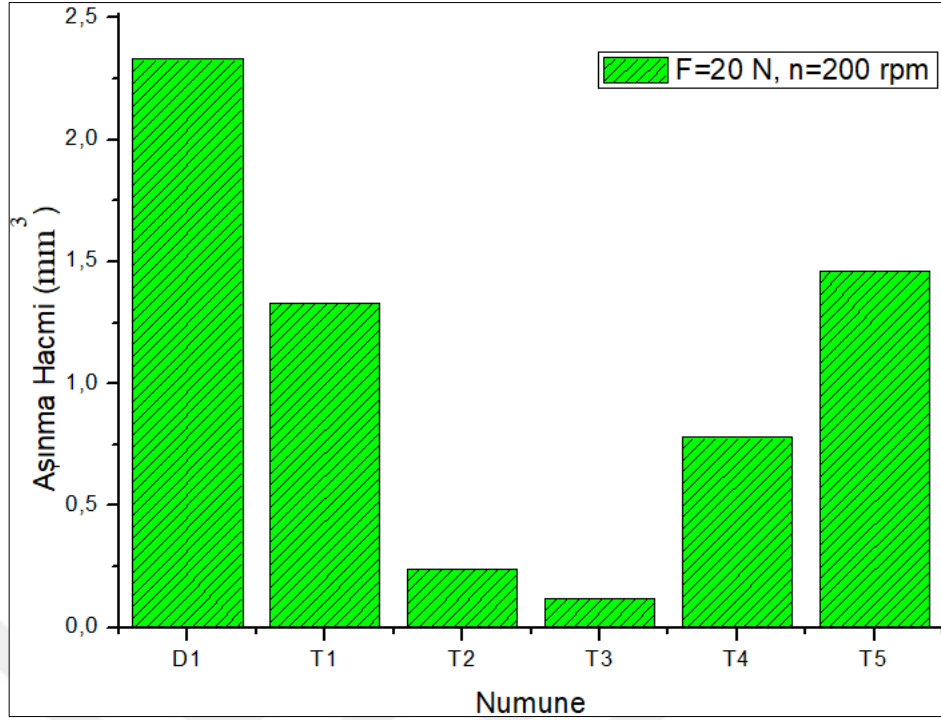
Şekil 6.6. 20 N ve 100 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacimleri

Aşağıda Şekil 6.7’de 10 N ve 200 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacmi değerleri verilmiştir. Şekil 6.7 incelendiğinde 10 N’luk yük etkisinde kayma hızının artırılması D1 numunesi dışındaki diğer numunelerin aşınma hacmi değerlerini çok değiştirmedeği görüldü. 10 N’luk yük etkisinde kayma hızının artırılmasıyla D1 numunesinin aşınma hacmi değeri 1,05 mm<sup>3</sup>’ten 0,87 mm<sup>3</sup>’e düştüğü görüldü. Düşük hızdaki çalışma koşullarında olduğu gibi 10 N ve 200 rpm hızda polistiren çekme katkılı ortoftalik polyester reçineli numunelerin aşınma hacim değerleri düz ortoftalik polyester reçineli numunelerden daha iyi olduğu görüldü. Polistiren çekme katkısının 10 N ve 200 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacim değerlerine olumlu yansıdığı görülebilmektedir. Diğer çalışma koşullarında olduğu gibi D1 numunesi en yüksek aşınma hacmi değerine sahip iken, en düşük aşınma hacmi değeri ise T5 numunesinde gözlemlendi. Aynı elyaf oranlarına sahip numunelerde tıpkı düşük çalışma koşullarında olduğu gibi düz ortoftalik polyester reçineli ve alümina dolgulu T1 numunesi 10 N ve 200 rpm hızda yüksek aşınma hacmi değerine sahiptir. Düşük yük (10 N) etkisi altında düz ortoftalik polyester reçineli ve alümina dolgu malzemesinin kullanılması aşınma hacmi değerleri kötüleştirilmesine rağmen çekme katkılı ortoftalik polyester reçineli ise aşınma hacmi değerlerini iyileştirmektedir.



Şekil 6.7. 10 N ve 200 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacimleri

Aşağıda Şekil 6.8’de 20 N ve 200 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacmi değerleri verilmiştir. Şekil 6.8 incelendiğinde 200 rpm hızda yük artışı ile numunelerin aşınma hacim değerlerinin arttığı görülmektedir. 20 N’luk etkisinde hızın arttırılmasıyla T4 numunesi hariç diğer numuneleri aşınma hacim değerlerinde azalma görüldü. Hız artışı ile T4 numunesinin aşınma hacmi değeri 0,46 mm<sup>3</sup>’ten 0,78 mm<sup>3</sup>’e yükselmiştir. Maksimum çalışma koşullarında T3 numunesi en iyi aşınma hacmi değerine sahiptir. 20 N ve 200 rpm hızda T3 numunesinde çekme katkısı ve %5 ‘lik cam kürecik dolgusunun kullanımı aşınma hacmi değerlerini iyileştirildiği görüldü.



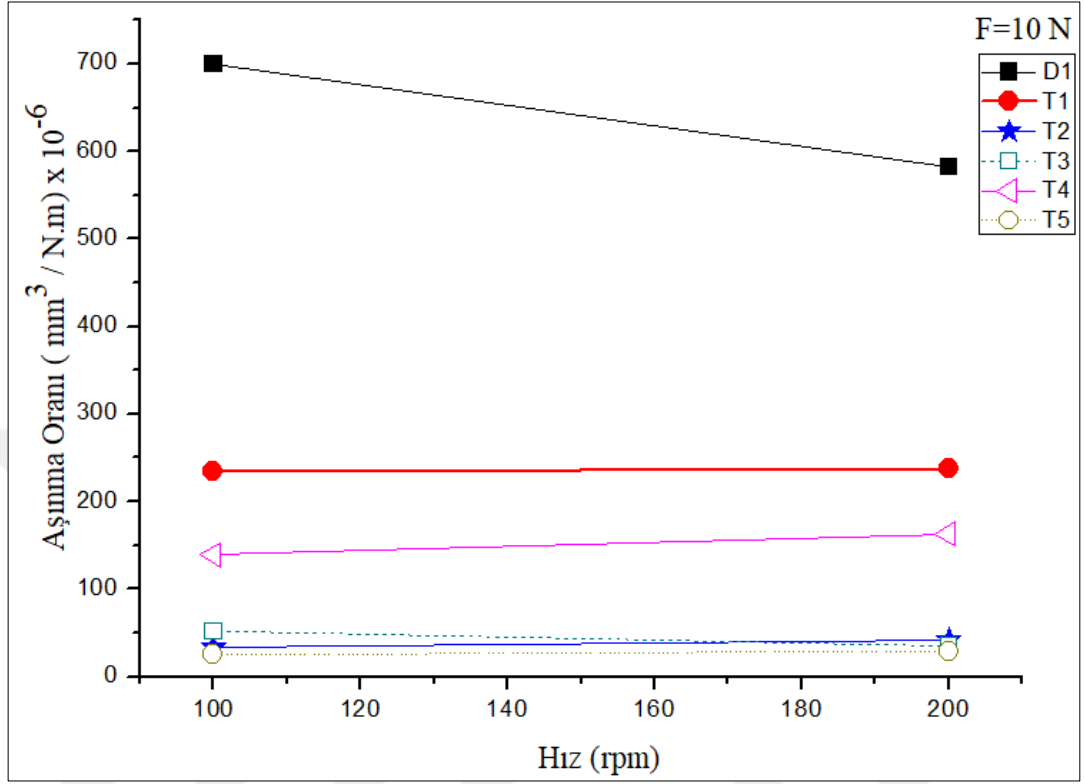
Şekil 6.8. 20 N ve 200 rpm hızdaki numunelerin aşınma hacimleri

Genel anlamda farklı aşınma koşullarındaki numunelerin aşınma hacmi değerlerine bakıldığında en yüksek aşınma hacmi değerine D1 numunesinin sahip olduğu görülmektedir. Aşınma hacmi değerleri üzerine yükün etkisi hıza göre daha etkili olmaktadır. Uygulanan yükün artırılmasıyla numunelerin aşınma hacminin arttığı net şekilde görüldü. Fakat kayma hızının artması numunelerin aşınma hacmi değerlerini farklı şekillerde etkileyerek çoğu zaman aşınma hacmini azalttığı bazı durumlarda ise kısmen değiştirerek arttırdığı görüldü. Düşük yük etkisinde çekme katkılı reçine içeren numunelerin düşük aşınma hacmi değerine sahip olduğu görüldü. Diğer yandan düşük yükleme etkisinde aynı oranlarda takviye elemanı içeren numunelerde dolgu malzemesi olarak yalnızca alümina kullanımı aşınma hacmi değerlerini yükseltmektedir. Farklı çalışma koşulları altında en iyi aşınma hacmi değerleri farklı numunelerde gözlemlendi. Fakat T3 numunesi farklı aşınma koşullarında genellikle aşınma hacmi yönünden iyi sonuçlar vererek polistiren çekme katkısı ve cam kürecik dolgusunun kullanımı CTP kompozitlerde olumlu etki yaptığını gösterdi.

Numunelerin aşınma oranları ise denklem 2'den hesaplanmıştır. Her bir numuneye ait aşınma oranları değişimi yüke ve hıza bağlı olacak şekilde grafiklerde gösterilmiştir. Aşağıdaki şekillerde farklı aşınma koşullarındaki numunelerin aşınma oranları verilmiştir.

Şekil 6.9’da 10 N’luk sabit yük etkisi altında numunelerin 100 rpm ve 200 rpm hız değerlerindeki aşınma oranları verilmiştir. Şekil 6.9 incelendiğinde 10 N’luk yük etkisinde düşük sürtünme katsayısı değeri ve aşınma hacmi değerine sahip numunelerin düşük aşınma oranlarına sahip olduğu görülmektedir. 10 N’luk yük etkisinde çekme katkılı ortoftalik polyester reçineli numunelerin (T2, T3, T5) aşınma oranlarının düz ortoftalik polyester reçineli numunelerden düşük olduğu görülmüştür. En düşük aşınma oranı T5 numunesinde, en yüksek aşınma oranı ise yüksek sürtünme ve aşınma hacmi değerine sahip D1 numunesinde görüldü. 10 N’luk yük etkisinde D1 numunesi dışındaki diğer numunelerin aşınma oranlarının değişen hız değerleriyle birlikte çok değişmediği görüldü. 10 N’luk yük etkisinde T3 numunesinin aşınma oranında kısmen azalış görülürken D1 numunesinin aşınma oranındaki azalış net şekilde görülebilmektedir. D1 ve T3 numunelerinin dışındaki diğer numunelerde artan hız değerleriyle birlikte aşınma oranlarında artış gözlemlenmiştir. Artan hız değerleriyle birlikte CE takviyeli ve sadece cam kürecik dolgulu malzemelerin aşınma oranlarında düşüş görülmüştür. Düşük yük etkisinde matris malzemesi olarak kullanılan ortoftalik polyester reçineli polistiren çekme katkısının kullanılması numunelerin tribolojik özelliklerine olumlu yansiyarak aşınma oranları düşürmüştür. 10 N’luk yük etkisi altında aynı elyaf oranına sahip numunelerde alüminanın dolgu malzemesi olarak kullanılması diğer dolgu malzemelere göre düz ortoftalik polyester reçinelerin aşınma özelliklerine olumsuz yansımıştır. Düz ortoftalik polyester reçinelerde alümina dolgu malzemesinin yanında cam kürecik dolgu malzemesinin kullanımı aşınma oranını düşürmüştür. Çekme katkılı ortoftalik polyester reçinelerde ise alümina ve cam küreciğin ayrı ayrı veya birlikte kullanımları aşınma oranlarına olumlu etki yapmıştır. 10 N’luk yük etkisinde aşırı takviye ve dolgu malzemesi içeren D1 numunesi hariç cam kürecik ilavesi her iki reçine malzemesinin aşınma oranını düşürürken, alümina dolgu malzemesi sadece çekme katkılı ortoftalik polyester reçineli numunelerde olumlu özellikler vermiştir. Düşük yükleme altında doğru oranlarda kullanılan polistiren çekme katkısı ve cam kürecik dolgu malzemesi tribolojik özellikleri iyileştirirken alümina dolgu malzemesi ise matris malzemesi türüne göre CTP kompozitlerin tribolojik özelliklerine farklı etkiler yapmıştır. Aynı oranlarda elyaf bulunan numuneler arasında kimyasal bileşimi düz ortoftalik polyester reçine ve alümina dolgusu olan numune (T1) en yüksek aşınma oranına sahip iken, en

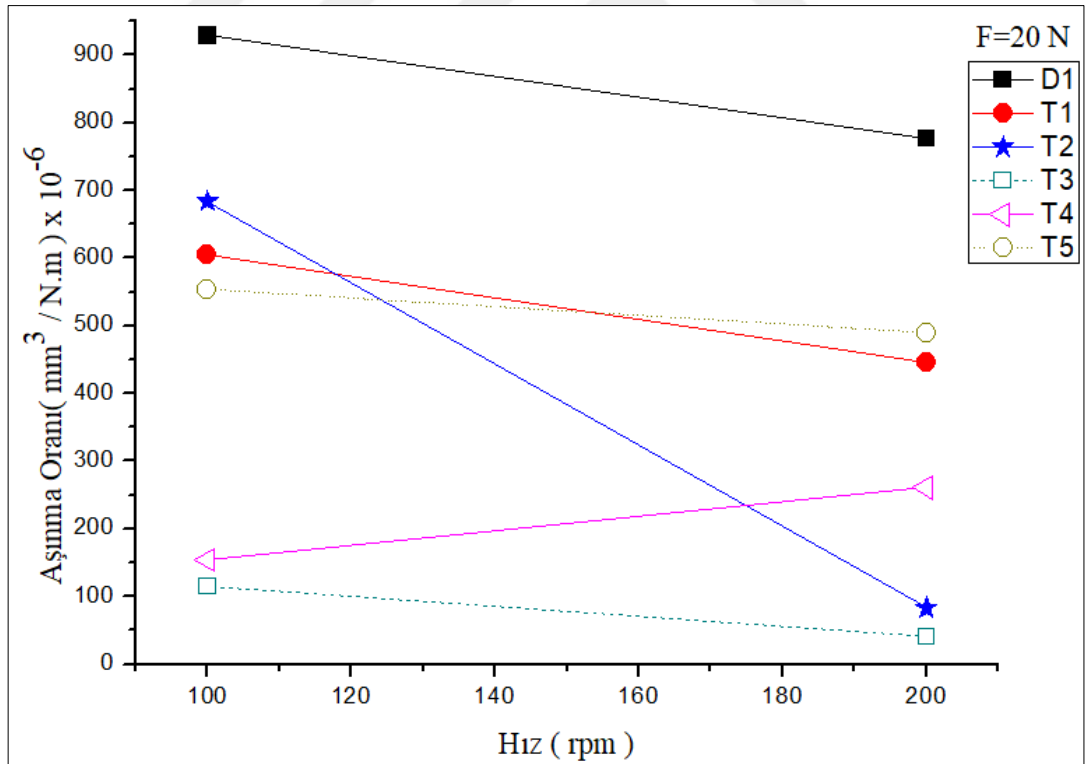
düşük aşınma oranı ise kimyasal bileşimi çekme katkılı ortoftalik polyester reçine ve alümina, cam kürecik dolgularının birlikte kullanıldığı numunede (T5) görülmüştür.



Şekil 6.9. 10 N'luk yük etkisi altında ve değişen hız değerlerinde (100 rpm ve 200 rpm) numunelerin aşınma oranları

Şekil 6.10'da 20 N'luk sabit yük etkisinde 100 rpm ve 200 rpm hız değerlerinde numunelerin aşınma oranları verilmiştir. Şekil 6.10 incelendiğinde en düşük aşınma oranı T3 numunesinde, en yüksek aşınma oranı ise D1 numunesinde gözlemlenmiştir. 10 N'luk yük etkisinde hız artışı çoğu numunenin aşınma oranını çok değiştirmezken, 20 N'luk yük etkisindeki numunelerin aşınma oranları artan hız değerleriyle birlikte değiştiği görülmektedir. 10 N'luk yük etkisinde artan hız değerlerinde T3 ve D1 numunesinin aşınma oranları azalırken 20 N'luk yük etkisinde artan hız değeriyle T4 numunesi hariç diğer numunelerin aşınma oranları azalmıştır. 20 N yük etkisinde artan hız değeriyle birlikte aşınma oranlarındaki en büyük değişim T2 numunesinde meydana gelmiştir. 20 N ve 100 rpm çalışma koşullarında çekme katkılı ortoftalik polyester reçinede alümina dolgu malzemesi kullanımı numunelerin aşınma direncini azaltmıştır. Bu çalışma koşullarında çekme katkılı ortoftalik polyester reçinede cam kürecik dolgu malzemesinin kullanımı aşınma direncini arttırmıştır. Düz ortoftalik polyester reçinede cam kürecik kullanımı aşınma oranlarını azaltmıştır. Fakat düz

ortoftalik polyester reçinede yalnızca alümina dolgu malzemesinin kullanımı aşınma özelliklerine olumsuz yansımıştır. Düz ortoftalik polyester reçinede alümina ve cam küreciğin birlikte kullanılması sadece alümina kullanımına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. 20 N ve 100 rpm hızda aynı elyaf oranına sahip numunelerde cam kürecik dolgusu içeren numunelerde düşük aşınma oranları görülmüştür. Sadece alümina dolgusu içeren numuneler ise daha yüksek aşınma oranlarına sahip oldukları görüldü. 20 N ve 200 rpm ağır çalışma koşullarında en yüksek aşınma direnç miktarları çekme katkı reçinede yalnızca cam kürecik kullanılmasıyla ve çekme katkı reçinede yalnızca alümina dolgu malzemesinin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Ağır çalışma koşullarında çekme katkı reçinede dolgu malzemelerinin ayrı ayrı kullanımları birlikte kullanımları göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Düz ortoftalik polyester reçinede ise dolgu malzemelerinin birlikte kullanımları daha iyi sonuçlar vermiştir. Ağır çalışma koşullarında en düşük aşınma oranı T3 numunesinde en yüksek aşınma oranı ise D1 numunesinde gözlemlenmiştir.

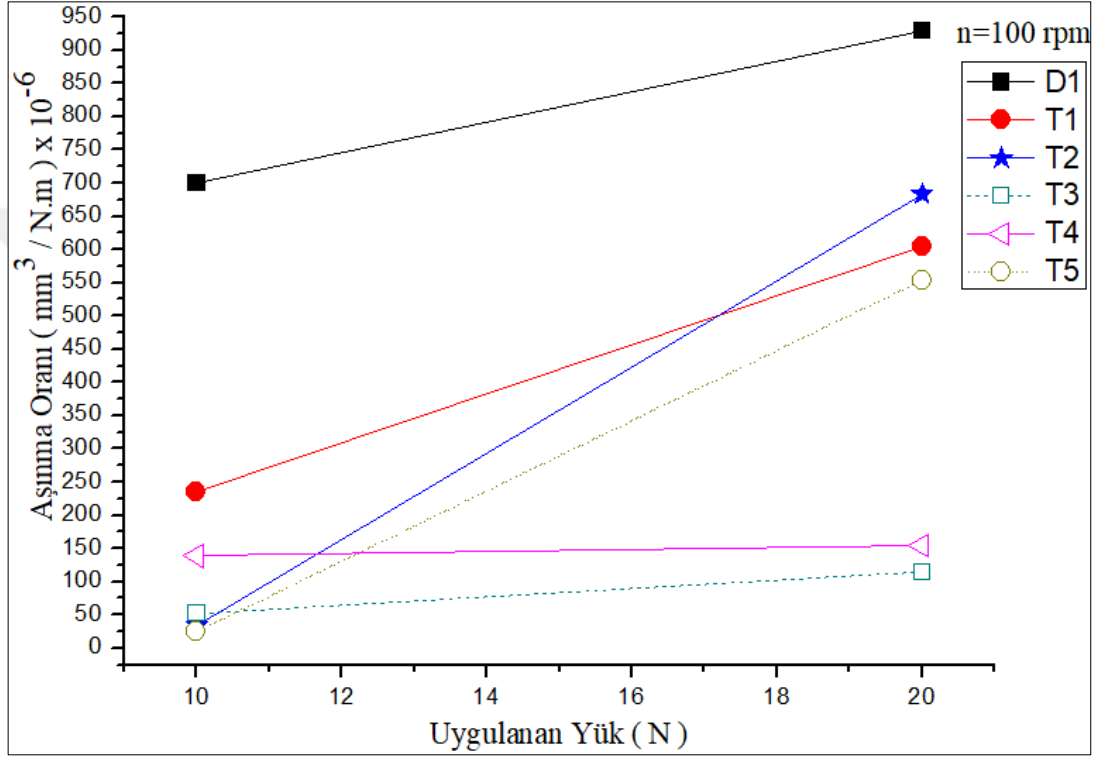


Şekil 6.0.10. 20 N'luk yük etkisi altında ve değişen hız değerlerinde (100 rpm ve 200 rpm) numunelerin aşınma oranları

Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de uygulanan yük değişimlerine göre aşınma oranları verilerek numunelerin aşınma davranışı üzerine yükün etkisi incelenmiştir.

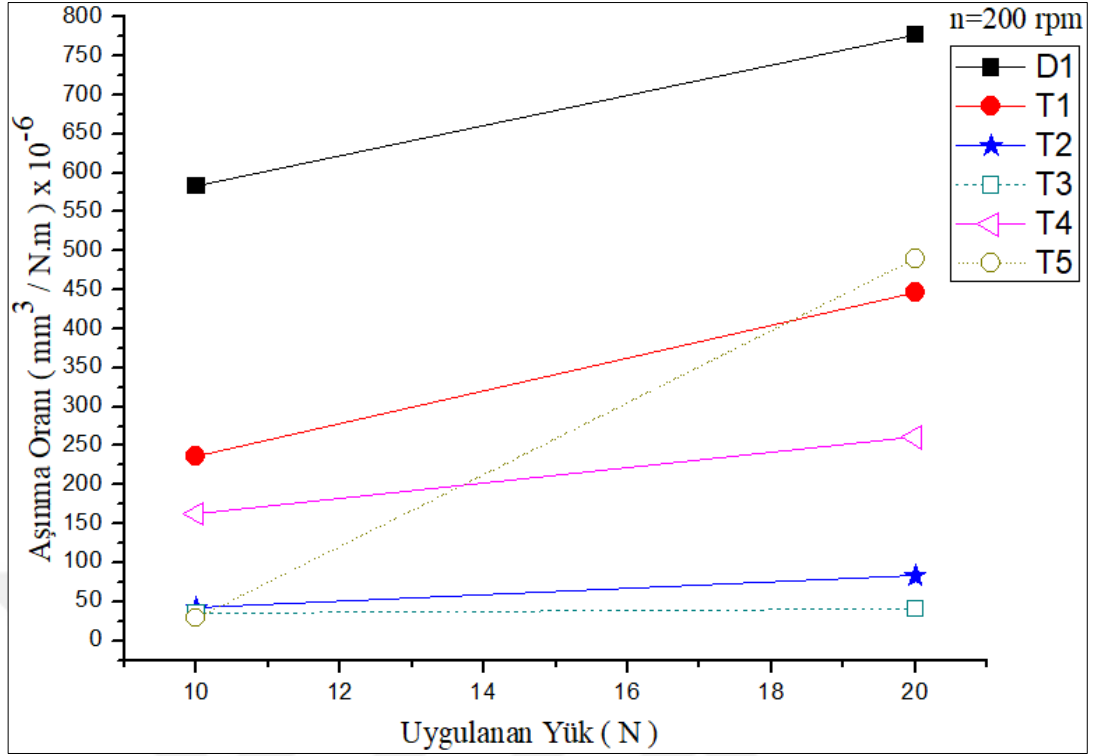


Şekil 6.11’de 100 rpm hızda iki farklı yük (10 N ve 20 N) etkisi altındaki numunelerin aşınma oranları verilmiştir. Şekil 6.11 incelendiğinde 100 rpm hızda artan yük değerleriyle birlikte numunelerin aşınma oranları artmıştır. Yük artışı T3 ve T4 numunesinin aşınma oranlarına az etki yaparken diğer numunelerin aşınma oranları ciddi şekilde arttırmıştır. 100 rpm hızda aşınma davranışı üzerine en çok değişiklik T2 ve T5 numunelerinde meydana gelmiştir.



Şekil 6.11. Numunelerin 100 rpm hız ve farklı yük değerlerindeki aşınma oranları

Şekil 6.12 ‘de 200 rpm hızda iki farklı yük (10 N ve 20 N) etkisi altındaki numunelerin aşınma oranları verilmiştir. Şekil 6.12 incelendiğinde 200 rpm hızda da artan yük değerleriyle birlikte numunelerin aşınma oranları artmıştır. Yük artışı T2, T3 ve T4 numunelerinin aşınma oranları üzerinde az etkiye sahip iken D1, T1 ve T5 numunelerinin aşınma oranlarını çok etkilemiştir. 200 rpm hızda yük artışı ile birlikte T5 numunesinin aşınma oranında ciddi artış görülmüştür.



Şekil 6.12. Numunelerin 200 rpm hız ve farklı yük değerlerindeki aşınma oranları

Yükün ve hızın farklılığına göre aşınma oranları incelendiğinde yukarıdaki şekillerden de görülebileceği gibi artan yük değerleriyle birlikte numunelerin aşınma oranlarının arttığı görülmektedir. Bu deneysel çalışmada olduğu gibi literatürdeki farklı çalışmalarda da yük artışı ile aşınma oranının arttığı görülmüştür [66, 67, 71, 87]. Yük artışı ile birlikte temas yüzeyinde sıcaklık artacaktır. Artan sıcaklık değeriyle birlikte polyester reçine kırılğan yapıya dönüşerek malzeme yüzeyinden ayrılmaktadır [66]. Cam elyafları bütünüyle sararak koruyucu görev üstlenen reçinenin yüzeyden ayrılmasıyla birlikte cam elyaflar direk olarak hasar almaya başlar. Yük artışı ile ağır hasara uğrayan cam elyafları nedeniyle numunelerin aşınma direnci azalır ve aşınma oranları artar.

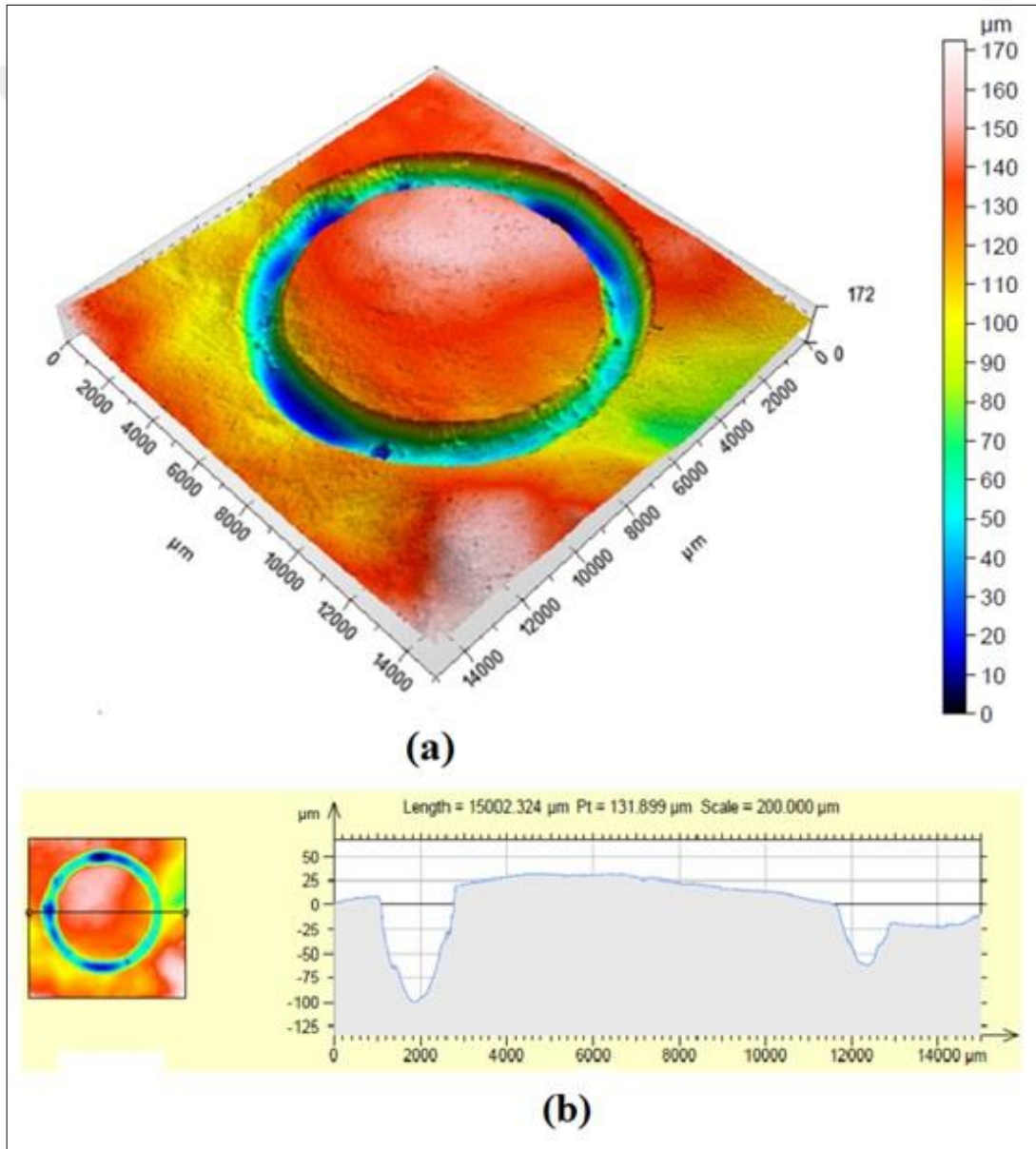
Bu çalışmada hız artışı numunelerin aşınma davranışları üzerinde farklı etkiler oluşturmuştur. Genellikle 10 N'luk düşük yüklemde hız artışı ile numunelerin aşınma oranları çok değişmez iken 20 N'luk yük etkisinde genellikle numunelerin aşınma oranları azalmıştır. Bu deneysel çalışmada numunelerin aşınma davranışı üzerine yükün etkisinin hızın etkisinden daha çok olduğu görülmüştür. Literatürde aşınma özelliklerinin incelendiği deneysel çalışmalarda numunelerin yük etkisine hızdan daha hassas oldukları görülmüştür [66, 96].

Numunelerin aşınma oranları farklı yük ve hız etkisi altında değişmiştir. Genellikle T3 ve T4 numunelerinin artan yük ve hız değerleriyle birlikte aşınma oranlarında küçük değişiklikler olmuştur. T5 numunesinin aşınma oranı ise artan hız değeri ile değişmezken artan yük değeriyle birlikte çok değiştiği görülmüştür. Diğer numunelerin ise aşınma oranları değişen yük ve hız değerleriyle birlikte farklılık göstermiştir. Genellikle T3 numunesinin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri düşük çıkmıştır. T3 numunesinin kimyasal bileşiminde polistiren çekme katkılı ortoftalik polyester reçine, cam elyaf ve cam kürecik dolgu malzemesi bulunmaktadır. Çekme katkısı, cam elyaf ve cam kürecik kullanımının malzemenin tribolojik özelliklerine olumlu yansıdığı görülebilmektedir. Literatürde kompozit üretiminde malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi için çekme katkıları kullanılmaktadır [93]. Literatürde yapılan deneysel çalışmalarda cam elyaf takviyesinin tribolojik özellikleri geliştirdiği görülmüştür [66, 67, 69, 71]. Literatürde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda cam küreciğin yağlama özelliğine sahip olduğu ve reçine ile kuvvetli bağlanma gerçekleştirerek iyi ara yüzey mukavemetleri sahip oldukları görülerek düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerine sahip oldukları belirtilmektedir [82, 83, 86]. Yapılan bu deneysel çalışmada literatürde olduğu gibi cam küreciğin çekme katkılı reçine malzemesi ile iyi ara yüzey etkileşimi gerçekleştirerek düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak değerlendirildiğinde dolgu malzemesi olarak cam kürecik kullanımı alüminaya kıyasla daha etkili olduğu görülmüştür.

Kompozit malzemelerde kullanılacak takviye ve dolgu malzemeleri uygun oranlarda kullanılarak malzeme özellikleri olumsuz etkilememelidir. Bu deneysel çalışmada tribolojik özelliklere çok iyi yansıyan cam elyaf takviyesi ve cam kürecik dolgusu D1 numunesinde aşırı oranlarda kullanılarak malzeme özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Cam küreciğin yağlama özelliğine sahip olması çok kullanıldığında sürtünme ve aşınma değerlerini azaltmayacağı ancak doğru değerlerde kullanılarak azaltabileceğini göstermiştir. En yüksek sürtünme katsayısı ve aşınma oranı D1 numunesinde görülmüştür. D1 numunesinde olumsuz tribolojik özelliklerin görülmesi aşırı takviye elemanı ve dolgu malzemesi kullanımından kaynaklanmaktadır.

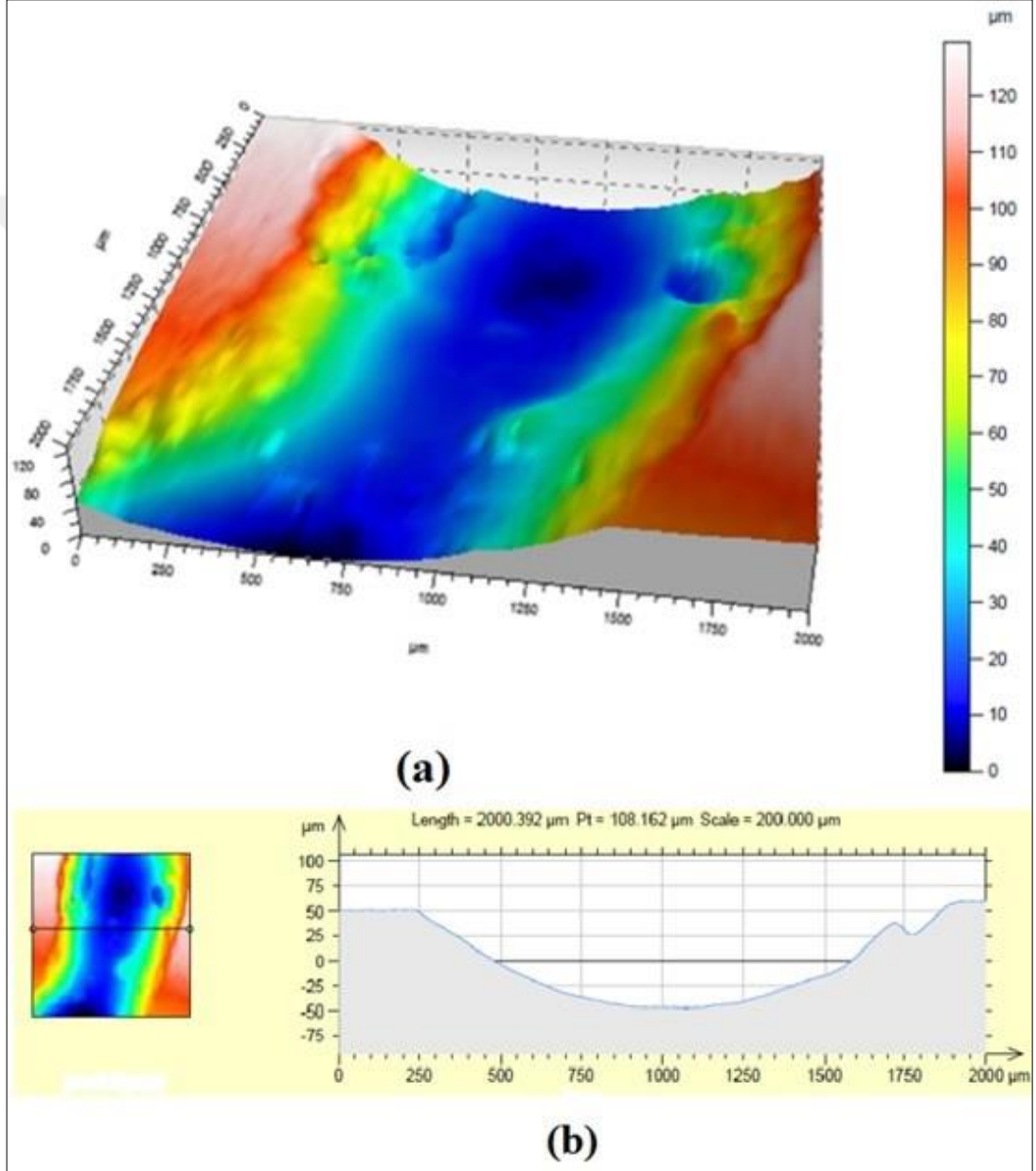
#### 6.4. Yüzey Pürüzlülük Testi Sonuçları

Öncelikle D1 numunesinin tüm yüzeyi profilometre ile görüntülendi. Şekil 6.13 (a)'da D1 numunesinin tüm yüzeyinin 3 boyutlu görüntüsü verilmiştir. Şekil 6.13 (b)'de D1 numunesinin yüzey pürüzlülük eğrisi görülmektedir. Aşınmaya maruz kalmış D1 numunesinin aşınma dairesi üzerinde farklı noktalarda aşınma izlerinin genişlik ve derinlik değerlerinin farklı olduğu Şekil 6.13 (b)'de görülebilmektedir. Bu nedenle testlerde numunelerin aşınma iz dairesi üzerinde olacak şekilde farklı noktalarda yüzey pürüzlülükleri ölçülerek  $R_a$  ve  $S_a$  değerlerinin ortalaması alınmıştır.



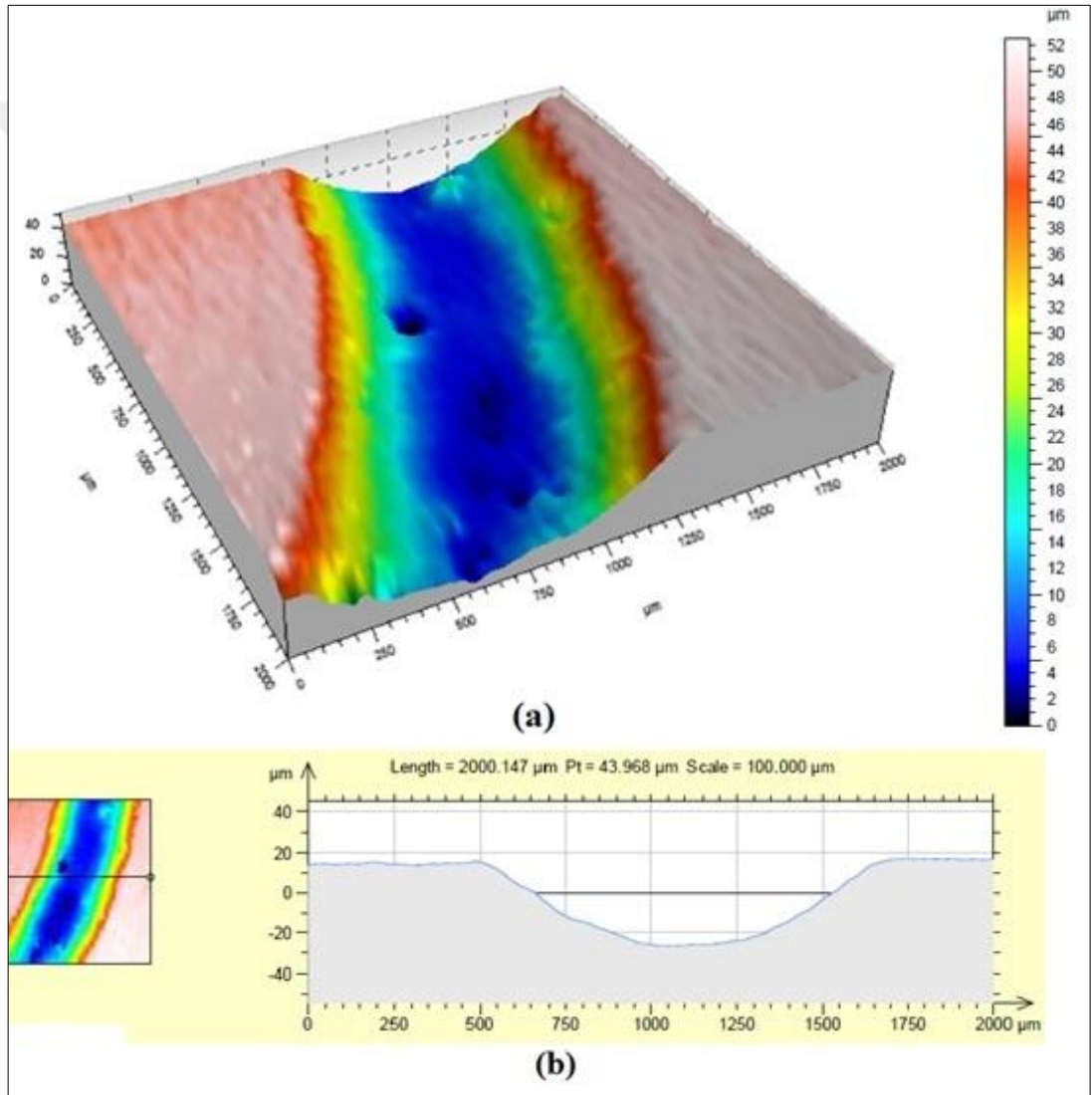
Şekil 6.13. (a) 20 N ve 200 rpm hızda D1 numunesinin tüm yüzeyinin 3 boyutlu görüntüsü (b) D1 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve pürüzlülük eğrisi

Şekil 6.14 'de D1 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası, yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi verilmiştir. Şekil 6.14 incelendiğinde D1 numunesinin aşınma kanalının genişlik ve derinlik değerlerinin büyük olduğu ve numunenin maksimum çalışma koşullarında ( $F=20$  N,  $n=200$  rpm) ciddi şekilde aşınmaya maruz kaldığı görülmektedir. D1 numunesinin aşınma yüzeyinde ( $2 \times 2$  mm<sup>2</sup>) ölçülen ortalama  $S_a$  değeri  $23,146$   $\mu\text{m}$ ,  $R_a$  değeri ise  $3,062$   $\mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 6.14. (a) D1 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) D1 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi

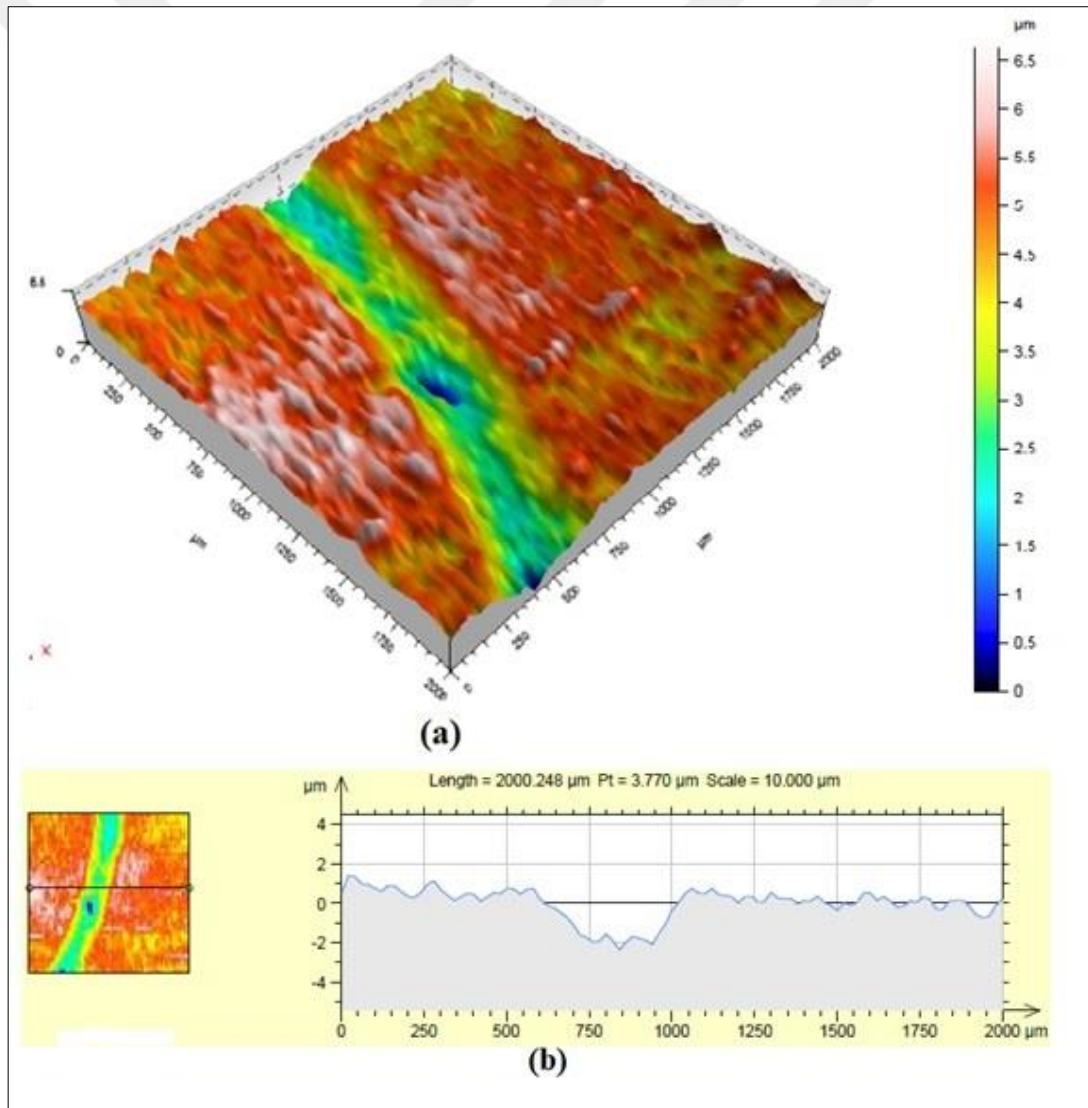
Şekil 6.15 'de T1 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası, yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi verilmiştir. Şekil 6.15 incelendiğinde aşınma kanalının genişliğinin ve derinliğinin D1 numunesine göre daha az olduğu görülebilmektedir. D1 numunesine göre daha doğru oranlarda takviye ve dolgu malzemesi kullanımının aşınmayı azalttığı ve pürüzlülük değerlerini düşürdüğü T1 numunesinin 3D yüzey topoğrafyasına ve pürüzlülük eğrisine bakılarak görülebilmektedir. T1 numunesinin aşınma yüzeyinde ölçülen ortalama  $S_a$  değeri 15,854  $\mu\text{m}$ ,  $R_a$  değeri ise 2,817  $\mu\text{m}$  dir.



Şekil 6.15. (a) T1 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) T1 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi

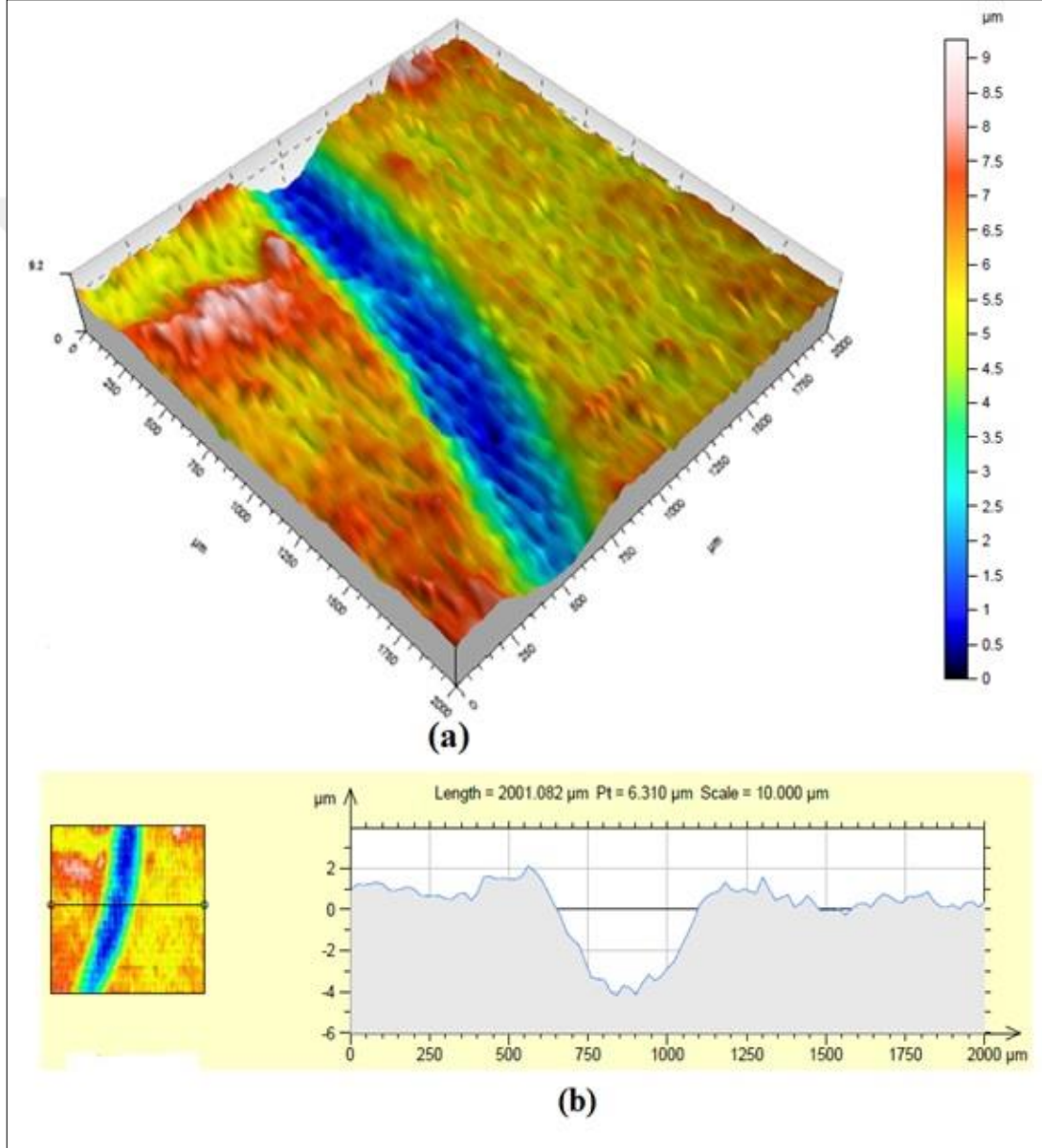


Şekil 6.16 'da T2 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası, yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi verilmiştir. Şekil 6.16 incelendiğinde T2 numunesinin T1 numunesine göre aşınmasının ve pürüzlülük değerlerinin azaldığı görülmektedir. T2 numunesinin T1 numunesi ile aynı oranlarda cam elyaf takviyesi ve alümina dolgusuna sahipken, iki numune arasındaki farklılık matris malzemesi olarak T2 numunesinde polistiren çekme katkılı ortoftalik polyester reçinenin kullanılmasıdır. 20 N ve 200 rpm hızda sadece alümina dolgu malzemesinin kullanıldığı numunelerde polistiren çekme katkısının aşınma oranını ve pürüzlülük değerlerini düşürdüğü görülmüştür. T2 numunesinin aşınma yüzeyinde ölçülen ortalama  $S_a$  değeri 1,222  $\mu\text{m}$ ,  $R_a$  değeri ise 0,501  $\mu\text{m}$  dir.



Şekil 6.16. (a) T2 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) T2 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi

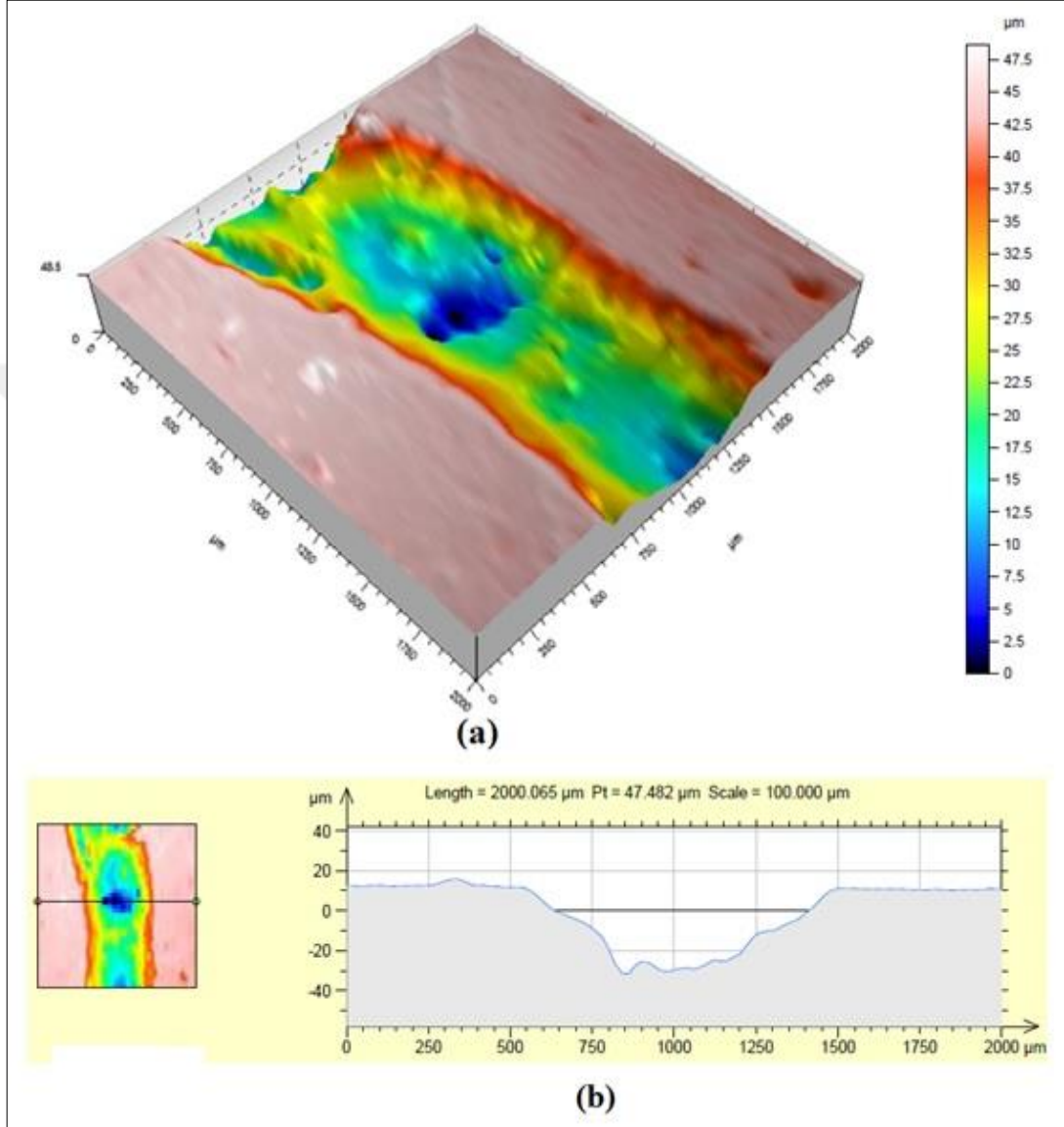
Şekil 6.17 'de T3 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası, yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi verilmiştir. T3 numunesi T2 numunesi gibi az miktarlarda aşınmaya maruz kaldığı 3D yüzey topoğrafyasından görülebilmektedir. Çekme katkılı reçinede yalnızca cam kürecik dolgu kullanımı aşınma ve pürüzlülük değerlerini düşürmüştür. T3 numunesinin aşınma yüzeyinde ölçülen ortalama  $S_a$  değeri 1,983  $\mu\text{m}$ ,  $R_a$  değeri ise 1,033  $\mu\text{m}$  dir.



Şekil 6.17. (a) T3 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) T3 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi

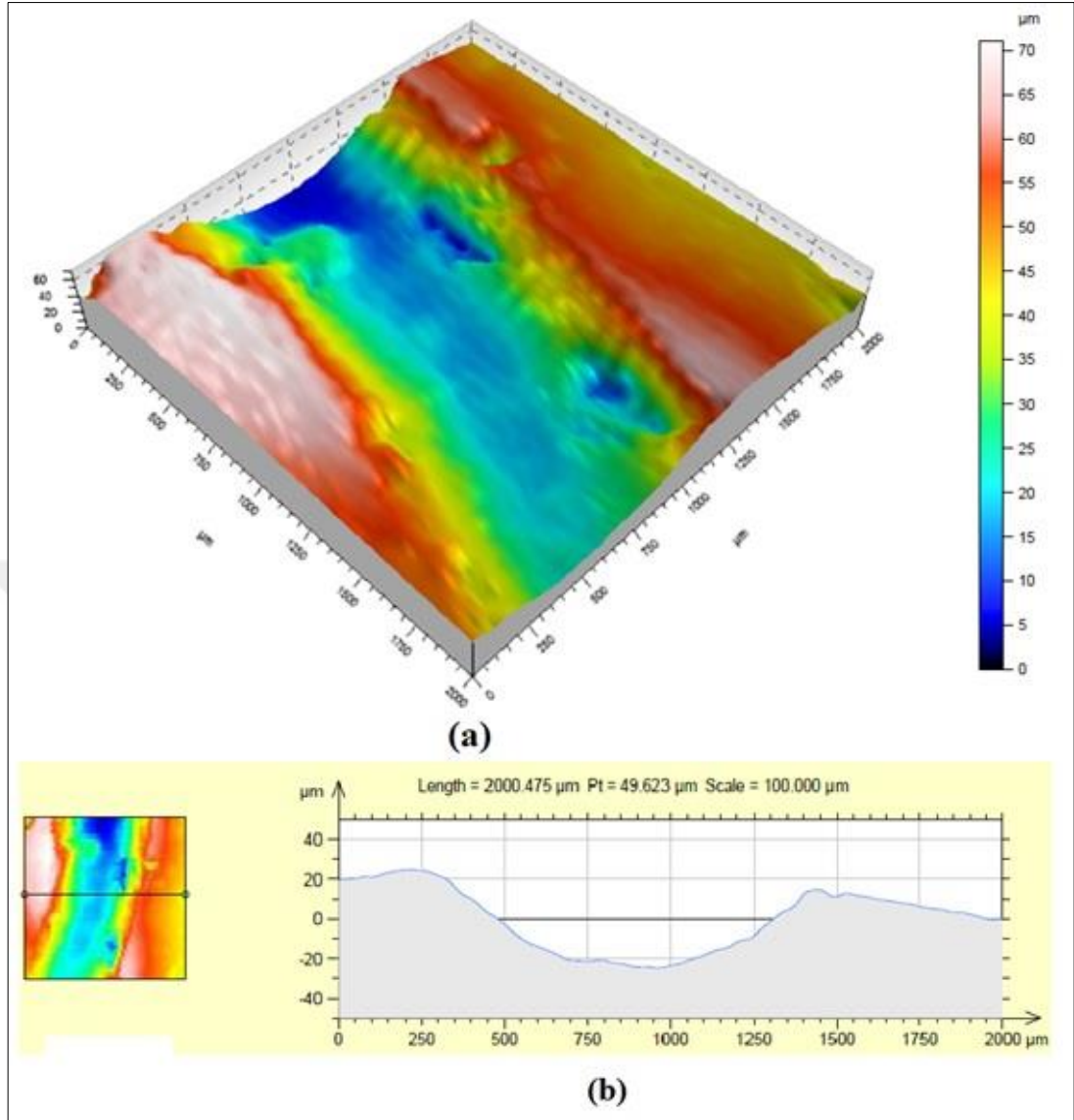


Şekil 6.18 'de T4 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası, yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi verilmiştir. T4 numunesinin aşınma yüzeyinde ölçülen ortalama  $S_a$  değeri  $12,087 \mu\text{m}$ ,  $R_a$  değeri ise  $2,874 \mu\text{m}$  dir.



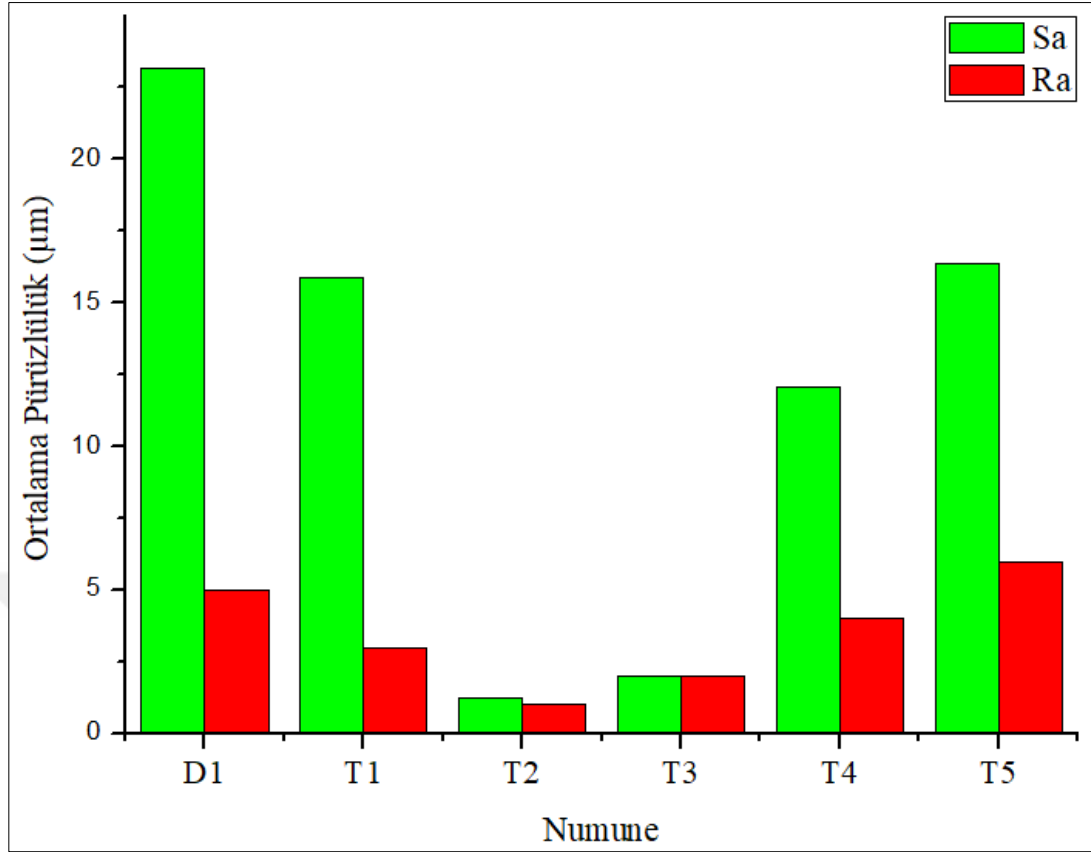
Şekil 6.18. (a) T4 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) T4 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi

Şekil 6.19 'da T5 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası, yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi verilmiştir. T5 numunesinin aşınma yüzeyinde ölçülen ortalama  $S_a$  değeri  $16,342 \mu\text{m}$ ,  $R_a$  değeri ise  $3,441 \mu\text{m}$  dir.



Şekil 6.19. (a) T5 numunesinin aşınma yüzeyinin 3D topoğrafyası (b) T5 numunesinin yüzey pürüzlülük ölçüm hattı ve yüzey pürüzlülük eğrisi

Şekil 6.20’de numunelerin ortalama  $S_a$  ve  $R_a$  pürüzlülük değerleri verilmiştir. Şekil 6.20 incelendiğinde numunelerin  $S_a$  ve  $R_a$  pürüzlülük değerleri sıralanış bakımından benzer özellik gösterdiği görülmektedir. Yüksek sürtünme katsayısı, aşınma hacmi ve aşınma oranına sahip D1 numunesinin yüksek  $S_a$  ve  $R_a$  pürüzlülük değerlerine sahip olduğu görülmüştür. T1 numunesinin maksimum çalışma koşullarında yüksek sürtünme katsayısı ve aşınma oranına sahip olması yüzey pürüzlülük değerlerine de yansdığı görülmektedir. T2 ve T3 numunelerinin  $S_a$  ve  $R_a$  pürüzlülük değerleri düşük sürtünme katsayısı ve aşınma değerlerine sahip olmalarından dolayı düşük olmaktadır. Genellikle T3 numunesi T2 numunesine göre daha iyi tribolojik performans göstermesine rağmen pürüzlülük değerleri T2 numunesine göre biraz daha yüksektir.



Şekil 6.20. 20 N ve 200 rpm hızda numunelerin ortalama Sa ve Ra pürüzlülük değerleri

Çekme katkılı ortoftalik polyester reçinede sadece alümina veya cam kürecik dolgu malzemesi kullanıldığında düşük pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. T4 numunesinde düz ortoftalik polyester reçinede alümina ve cam küreciğin birlikte kullanımı dolgu malzemelerinin çekme katkılı reçinede ayrı ayrı kullanımlarına göre pürüzlülük değerlerini arttırmıştır. Çekme katkılı reçinelerin kullanıldığı numuneler arasında en yüksek  $S_a$  ve  $R_a$  pürüzlülük değerlerine T5 numunesinin sahip olduğu görülmüştür. Çekme katkılı ortoftalik polyester reçinede alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin ayrı ayrı kullanımları birlikte kullanımlarına göre daha iyi pürüzlülük değerleri vermiştir. Alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin birlikte kullanıldığında numunelerde düz ortoftalik polyester reçineli numunenin daha iyi pürüzlülük değerine sahip olduğu görülmüştür. Çekme katkılı ortoftalik polyester reçinede cam kürecik dolgu ilavesi pürüzlülük değerlerini artırırken, düz ortoftalik polyester reçinede cam kürecik ilavesi pürüzlülük değerlerini azaltmıştır. Numunelerin maksimum aşınma koşullarında aşınma değerleri ile pürüzlülük değerleri benzer özellikler göstermiştir. Aşınma oranının yüksek olduğu numunelerde yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek olduğu, aşınma oranının düşük olduğu numunelerde

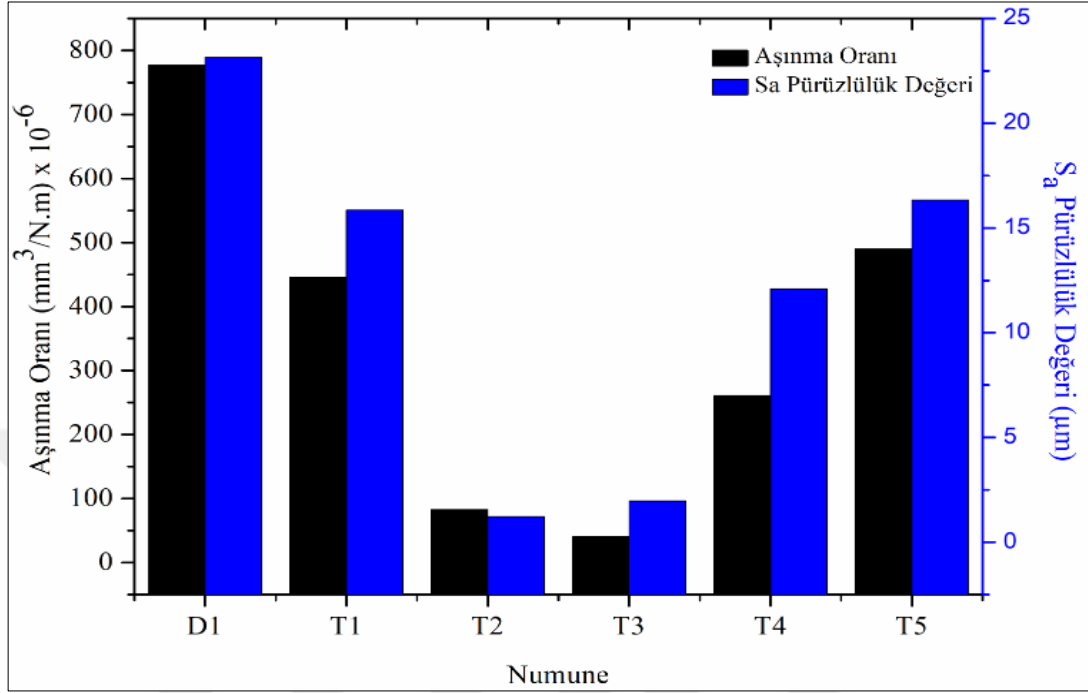
ise yüzey pürüzlülük değerlerinin düşük olduğu görülmüştür. Numunelerin yüzey topoğrafyalarına bakıldığında D1, T1, T4, T5 numunelerinin yüksek oranlarda aşınmaya maruz kaldıkları görülmüştür. T2 ve T3 numunelerinin ise düşük aşınma etkisine maruz kaldıkları görülmektedir. 20 N ve 200 rpm hızda numunelerin aşınma yüzey topoğrafyalarına bakıldığında yüzeyden malzeme kaybının en çok D1 numunesinde gerçekleştiği, en az malzeme kayıplarının ise T2 ve T3 numunelerinde gerçekleştiği görülmektedir. Aynı elyaf oranına sahip numunelerde çekme katkılı ortoftalik polyester reçinede alümina ve cam küreciğin birlikte kullanılması, düz ortoftalik polyester reçinede ise dolgu malzemesi olarak sadece alüminanın kullanılması aşınma değerlerinin yanında  $S_a$  ve  $R_a$  gibi pürüzlülük değerlerinin de yüksek çıktığı görülmüştür. Maksimum aşınma koşullarında alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin tek başına kullanıldığı çekme katkılı ortoftalik polyester reçinelerde pürüzlülük değerlerinin düşük olduğu görülmüştür. Polistiren çekme katkısı doğru dolgu malzemesi ile kullanıldığı takdirde aşınma özelliklerinde olduğu gibi pürüzlülük değerlerini de iyileştirmektedir. CTP kompozitlerin yüzey pürüzlülük değerlerine numunelerin kimyasal bileşimlerinde kullanılan takviye ve dolgu malzemelerinin çeşidinin ve kullanılma oranlarının etkili olduğu görülmüştür.

Aşağıda Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de 20 N ve 200 rpm çalışma koşullarında numunelerin aşınma oranları ile  $S_a$  ve  $R_a$  Pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

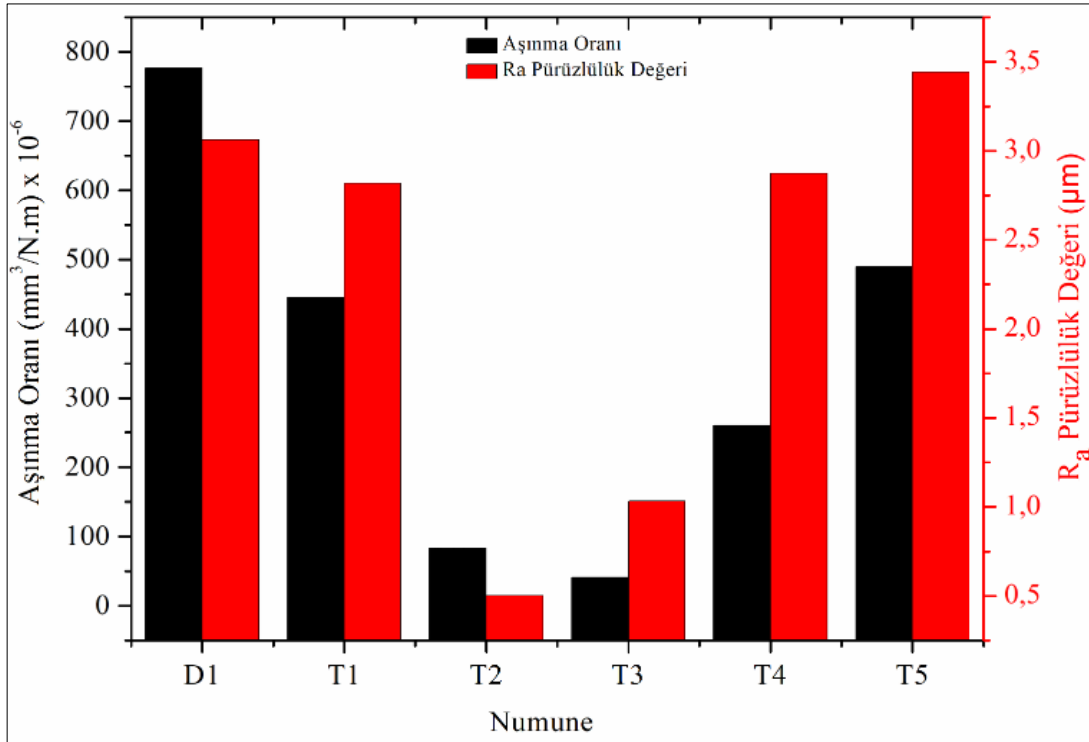
Şekil 6.21 incelendiğinde 20 N ve 200 rpm hızda numunelerin aşınma oranları ile  $S_a$  pürüzlülük değerlerinin genellikle benzer özellikte olduğu görülmektedir. T2 numunesinin aşınma oranı T3 numunesinden yüksek olmasına rağmen T2 numunesinin  $S_a$  pürüzlülük değeri T3 numunesine göre düşük çıkmıştır. T2 ve T3 numunelerinin dışındaki diğer numunelerde aşınma oranları ile  $S_a$  pürüzlülük değerlerinin benzer özellikte olduğu görülmüştür.

Şekil 6.22 incelendiğinde 20 N ve 200 rpm hızda numunelerin aşınma oranları ile  $R_a$  pürüzlülük değerleri arasında farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır. D1 numunesinin aşınma oranı T5 numunesinden yüksek olmasına rağmen  $R_a$  pürüzlülük değeri düşük çıkmıştır. T1 numunesinin ise aşınma oranı T4 numunesinden yüksek olmasına rağmen  $R_a$  pürüzlülük değeri düşük çıkmıştır.  $S_a$  pürüzlülük değerinde olduğu gibi T2

numunesinin aşınma oranı T3 numunesine kıyasla yüksek olmasına rağmen  $R_a$  pürüzlülük değeri düşük çıkmıştır.



Şekil 6.21. 20 N ve 200 rpm hızda numunelerin aşınma oranları ile  $S_a$  pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.22. 20 N ve 200 rpm hızda numunelerin aşınma oranları ile  $R_a$  pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sıcak pres kalıplama yöntemiyle üretilmiş CTP kompozit malzemelerde farklı reçine ve dolgu malzemesi kullanımının ve yük, kayma hızı gibi aşınma işlem parametrelerinin tribolojik özelliklere etkisi araştırılmıştır.

Numunelerin üretimlerinden ve deneysel çalışmalardan önce literatürde yapılan çalışmalar takip edilmiştir. Literatürdeki deneysel çalışma sonuçlarında alümina dolgu malzemesinin aşınma direncinin iyi olduğundan bahsedilmektedir. Aynı şekilde literatürde cam kürecik dolgu malzemesinin yağlama özelliğinden bahsedilerek reçine ile iyi ara yüzey mukavemetine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle CTP kompozit malzemelerde alüminanın aşınma direncinden cam küreciğın ise yağlayıcılık özelliğinden faydanılarak tribolojik özellikleri geliştirilmiş CTP kompozit malzeme elde edilmek istenmiştir. Bu amaçla sıcak pres kalıplama yönteminde alümina dolgulu, cam kürecik dolgulu ve her ikisinin de birlikte kullanıldığı numuneler üretilerek deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Polistiren çekme katkısı numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerlerini azaltmıştır.
- Aynı oranlarda elyaf takviyesine (%11) sahip numunelerde her iki matris malzemesinde de alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin birlikte kullanımı ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin arttırırken, dolgu malzemelerinde herhangi birinin kullanılması ise ortalama sürtünme katsayısı değerini azaltmıştır.
- Ortalama sürtünme katsayısı değerlerine bakıldığında alümina ve cam kürecik dolgu malzemeleri doğru miktarlarda kullanıldıklarında ortalama sürtünme katsayısı değerlerini iyileştirebileceği görülmüştür. T3 numunesinde polistiren çekme katkısıyla birlikte doğru oranlarda CE takviyesi ve CK dolgu malzemesinin kullanılması aynı takviye ve dolgu malzemesinin kullanıldığı D1 numunesine göre ortalama sürtünme katsayısı değerini %60 oranında iyileştirmiştir.
- Yük ve hız gibi aşınma parametrelerinin numunelerin aşınma davranışı üzerine etkisi incelendiğinde CTP kompozit malzemelerin aşınma davranışı üzerine yükün

hızdan daha etkili olduğu görülmüştür. Artan yük değerleriyle birlikte numunelerin aşınma oranları artmıştır.

- Polistiren çekme katkılı ortoftalik polyester reçinede cam kürecik dolgu malzemesinin kullanılması alümina dolgu malzemesine göre aşınma oranını düşürmede daha etkili olmuştur.
- Aynı elyaf oranına sahip numuneler arasında düz ortoftalik polyester reçineli numunelerde cam kürecik dolgu malzemesinin kullanılması aşınma oranını azaltmıştır.
- D1 numunesinde aşırı miktarlarda takviye ve dolgu malzemesi kullanılmasından dolayı yüksek sürtünme katsayısı, aşınma hacmi, aşınma oranı ve pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.
- Farklı aşınma koşulları altında numunelerin ortalama aşınma oranları düşünüldüğünde genellikle en iyi aşınma davranışını T3 numunesinin sergilediği görülmektedir.
- Farklı aşınma koşulları altında aynı elyaf oranına sahip numunelerin ortalama aşınma oranları düşünüldüğünde düz ortoftalik polyester reçineli ve yalnızca alümina dolgu malzemesi içeren T1 numunesinin diğerlerine göre daha yüksek aşınma oranına sahip olduğu görülmüştür.
- Numunelerin aşınma değerleriyle yüzey pürüzlülük değerleri arasında benzerlik bulunmaktadır. Yüksek aşınma değerine sahip numunelerde yüksek yüzey pürüzlülük değerleri, düşük aşınma değerlerine sahip numunelerde düşük yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Numunelerde aşınma yüzeyindeki malzeme kaybına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır.
- Numunelerin tribolojik özellikleri üzerine aşınma işlem parametrelerinin yanında numunelerin kimyasal bileşimleri de etkili olmaktadır.
- En düşük yoğunluk değeri D1 numunesinde görülmüştür. CTP numunelerde alümina ve cam kürecik dolgu malzemelerinin birlikte kullanımı yoğunluk değerlerini artırırken, dolgu malzemelerinin ayrı ayrı kullanılmaları CTP numunelerin yoğunluk değerlerini farklı şekillerde etkileyerek daha düşük yoğunluk değerleri görülmüştür.
- En düşük barcol sertlik değeri T3 numunesinde gözlemlenmiştir. Çekme katkısının sertlik değerlerine olumsuz yansıdığı görülmüştür. Numunelerin sertlik değerlerini

arttırmada alümina dolgu malzemesinin cam kürecik dolgu malzemesine göre daha etkili olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar neticesinde bu deneysel çalışmadan çıkarılabilecek öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Cam kürecik dolgu malzemesi tribolojik özelliklere olumlu yansıdığı tespit edilmiştir. Bu nedenle farklı elyaf takviyeli polimer kompozitlerde de kullanılarak kompozit malzemelerin tribolojik özellikleri geliştirilebilir.
- Cam kürecik dolgu malzemeli CTP kompozitler farklı çevresel koşullara maruz bırakılarak yüksek yük, hız ve kayma mesafelerinde aşınma testlerine tabi tutularak tribolojik performansları incelenerek özellikleri daha da geliştirilebilir.
- CTP kompozitler de cam kürecik dolgu malzemesinin tribolojik özelliklere olumlu yansımından dolayı cam kürecik dolgulu CTP kompozit malzemelerin mekanik ve termal özellikleri incelenerek cam kürecik dolgu malzemesinin mekanik ve termal özellikler üzerine olumlu etki yaptığı görülebilir.
- CTP kompozit malzemeler içinde CK ve alümina dışında farklı dolgu maddeleri kullanılarak tribolojik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] Johnson Todd., History of Composites, Thoughtco.com, <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>, (Ziyaret tarihi: 17.06.2018).
- [2] Glaeser William A., *Materials for Tribology*, 1st edition, Elsevier Science, Netherlands, 1992.
- [3] Zor M., *Kompozit Malzeme Mekaniği*, Dokuz Eylül Üniversitesi Ders Notları, 2018.
- [4] Baker A., Dutton S., Kelly D., *Composite Materials for Aircraft Structures*, 2nd edition, AIAA Education Series, USA, 2004.
- [5] Shali E. R., *Polymer Matrix Composites*, 1st edition, Chapman & Hall, India, 1995.
- [6] Kalemtaş A., Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler, *Putech & Composites*, 2015, Nisan-Mayıs-Haziran sayısı, 20-26.
- [7] Low I. M., *Ceramic Matrix Composites*, 1st edition, Woodhead Publishing, USA, 2006.
- [8] Kaya İ. A., Kompozit Malzemeler ve Özellikleri, [turkchem.net, http://www.turkchem.net/kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri.html](http://www.turkchem.net/kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri.html), (Ziyaret tarihi: 17.06.2018).
- [9] Aktaş M., Kompozitler, Dokuz Eylül Üniversitesi Ders Notları, <http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.aktas/MMD-2.pdf>, (Ziyaret tarihi: 17.06.2018).
- [10] Kaya İ. A., Kompozit Malzemeler ve Özellikleri, *Putech & Composites*, 2016, Temmuz-Ağustos-Eylül sayısı, 38-45.
- [11] Fiber-Reinforced Polymer Composites, Advanced Manufacturing Office, [https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/pdfs/fiber\\_reinforced\\_composites\\_factsheet.pdf](https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/pdfs/fiber_reinforced_composites_factsheet.pdf), (Ziyaret tarihi: 17.06.2018).
- [12] Bagherpour S., Polyester, Editors: Saleh El-Din H, *Fibre Reinforced Polyester Composites*, DOI: 10.5772/48697, InTech, 135-166, 2012.
- [13] Park S. J., Seo M. K., *Interface Science and Composites*, 1st edition, Academic Press, USA, 2011.
- [14] Genç Ç., Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Üretim Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 197858.

- [15] <http://www.dogusfiberglas.com/images/CTPcamelyaf.pdf>, (Ziyaret tarihi: 17.06.2018).
- [16] Ratna D., *Handbook of Thermoset Resins*, 1st edition, Smithers Rapra Technology, UK, 2009.
- [17] Zhao H., Guo Y., Composites, Bachelor's thesis, Tampere University of Applied Sciences, Textile and Chemical Engineering, Finland, 2014.
- [18] Mangalgi P. D., Polymer matrix Composites for High temperature Applications, *Defence Science Journal*, 2005, **55**(2), 175-193.
- [19] Gay D., Hoa V. S., Tsai W. S., *Composite Materials: Design and Applications*, 1st edition, CRC Press, USA, 2002.
- [20] *Engineering Design Handbook-Discontinuous Fiberglass Reinforced Thermoplastics: (DARCOM-P 706-314)*, U.S. Army Materiel Command, 1981.
- [21] Prashanth S., Subbaya K. M., Nithin K., Sachhidananda S., Fiber Reinforced Composites-A Review, *Journal of Material Sciences & Engineering*, DOI: 10.4172/2169-0022.1000341.
- [22] Seydibeyoğlu Ö. M., Mohanty K. A., Misra M., *Fiber Technology for Fiber Reinforced Composites*, 1 st edition, Woodhead Publishing, UK, 2017.
- [23] Wang M. R., Zheng R. S., Zheng P. Y., *Polymer matrix composites and technology*, 1st edition, Woodhead Publishing, UK, 2011.
- [24] Wypych G., *Handbook of fillers*, 2nd edition, ChemTec Publishing, Canada, 1999.
- [25] Hodzic A., Shanks R., *Natural fibre composites Materials, processes and properties*, 1st edition, Woodhead Publishing, UK, 2014.
- [26] Başer İ., *Elyaf Bilgisi*, 2nd edition, Marmara Üniversitesi Döner Sermaye İşletmesi Teknik Eğitim Fakültesi Matbaa Birimi, Türkiye, 2002.
- [27] Rothon N. R., *Particulate Fillers for Polymers*, 12th edition, Rapra Technology Limited, UK, 2002.
- [28] Tegethoff W., Rohleder J., Kroker E., *Calcium Carbonate*, 1st edition, Birkhäuser Basel, Switzerland, 2001.
- [29] Hongzhen C., Keyan Y., Weiming Y., Effects of calcium carbonate on preparation and mechanical properties of wood/plastic composite, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, **10**(1), 184-190.
- [30] Abdolmohammadi S., Siyamak S., Ibrahim A. N., Yunus Z. W., Ab Rahman Z. M., Azizi S., Fatehi A., Enhancement of Mechanical and Thermal Properties

of Polycaprolactone/Chitosan Blend by Calcium Carbonate Nanoparticles, *International Journal of Molecular Sciences*, doi:10.3390/ijms13044508.

- [31] Davis K., Material Review: Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), *School of Doctoral Studies (European Union) Journal*, 2010, **2**, 109-114.
- [32] Shibata K., Yamaguchi T., Hokkirigawa K., Tribological behavior of polyamide 66/rice bran ceramics and polyamide 66/glass bead composites, *Wear*, 2014, **317**, 1-7.
- [33] Istrate M. O., Chen B., Structure and properties of clay/recycled plastic composites, *Applied Clay Science*, 2018, **156**, 144-151.
- [34] Mekhemer K. W., Abou El-Ala A. A., El-Rafey E., Clay as a Filler in the Thermoplastic Compounding, *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology*, DOI: 10.1080/10587250008023597.
- [35] Sathishkumar T. P., Naveen J., Glass fiber-reinforced polymer composites-A review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, DOI: 10.1177/0731684414530790.
- [36] İlhan, R., Feyzullahoğlu, E., The Wear of Glass Fiber Reinforced Polyester Composite Materials at Different Loads and Speeds, *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 2018, **5**(1); 259-266.
- [37] Pop A. P., Gheorghe M. B., Manufacturing Process and Applications of Composite Materials, *Fascicle of Management and Technological Engineering*, DOI: 10.15660/AUOFMTE.2010-2.1896.
- [38] Mallick K. P., *Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design*, 3rd edition, CRC Press, USA, 2007.
- [39] <http://www.moldedfiberglass.com> / Technical Design Guide for FRP Composite Products and Parts, (Ziyaret tarihi: 17.06.2018).
- [40] Balasubramanian M., *Composite Materials and Processing*, 1st edition, CRC Press, USA, 2013.
- [41] <http://www.nuplex.com/composites/processes/hand-lay-up>, (Ziyaret tarihi: 18.06.2018).
- [42] [http://cn.scottbader.com/uploads/files/3381\\_crystic-handbook-dec-05.pdf](http://cn.scottbader.com/uploads/files/3381_crystic-handbook-dec-05.pdf), (Ziyaret tarihi: 18.06.2018).
- [43] <https://medium.com/@hpjesrani/filament-winding-94c796ca28f0>, (Ziyaret tarihi: 18.06.2018).
- [44] <http://orencocomposites.com/processes/rtm/rtm-process-illustration/>, (Ziyaret tarihi: 17.06.2018).

- [45] Boztoprak Y., Topçu İ., Işık B., Yapı Sektöründe Kullanılan Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin (CTP) Sünme Davranışı, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.
- [46] Stachowiak W. G., Batchelor W. A., *Engineering tribology*, 3rd edition, Butterworth-Heinemann, UK, 2005.
- [47] Dodiya K. V., Parmar P. J., A Study of Various Wear Mechanism and Its Reduction Methods, *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2016, 2(09), 242-248.
- [48] Zum Gahr H. K., *Microstructure and Wear of Materials*, 10th edition, Elsevier, Netherlands, 1987.
- [49] Basu B., *Biomaterials for Musculoskeletal Regeneration*, 1st edition, Springer Singapore, Singapore, 2017.
- [50] Fischer A., Bobzin K., *Friction, Wear and Wear Protection*, 1st edition, Wiley-VCH, Germany, 2009.
- [51] <https://www.muhandisbeyinler.net/asinma-nedir-asinma-cesitleri/>, (Ziyaret tarihi: 18.06.2018).
- [52] Almeida Rosa G. A., Moreto A. J., Manfrinato D. M., Rossino S. C., Study on Friction and Wear Behavior of SAE 1045 steel, reinforced Nylon 6.6 and NBR Rubber Used in Clutch Disks, *Materials Research*, 2014, 17(6), 1397-1403.
- [53] Abdelbary A., *Wear of Polymers and Composites*, 1st edition, Woodhead Publishing, UK, 2015
- [54] Temiz V., İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Elemanları I Ders Notları.
- [55] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Usure\\_par\\_abrasion\\_02.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Usure_par_abrasion_02.jpg), (Ziyaret tarihi: 18.06.2018).
- [56] Kaymaz İ., Erzurum Teknik Üniversitesi Triboloji Notları.
- [57] Akkurt M., *Makina elemanları 1*, 1. Baskı, Birsen Yayınevi, Türkiye, 2005.
- [58] [http://www.wikiwand.com/tr/Adezyon\\_a%C5%9F%C4%B1nmas%C4%B1](http://www.wikiwand.com/tr/Adezyon_a%C5%9F%C4%B1nmas%C4%B1), (Ziyaret tarihi: 18.06.2018).
- [59] Erdoğan A. A., Feyzulloğlu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Effect of Erodent Particle Size on Erosive Wear Behavior of AA6082-T6 Aluminum Alloy, *1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, Afyon, Turkey, 21-22 April 2016
- [60] Erdoğan A. A., Feyzulloğlu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Effect of Erodent Particle Velocity on Erosive Wear Behavior of AA6082-T6 Aluminum Alloy, *1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, Afyon, Turkey, 21-22 April 2016.

- [61] <https://www.pumpsandsystems.com/pumps/march-2016-extend-asset-value-applying-protective-coatings-pump-wet-ends>, (Ziyaret tarihi: 18.06.2018).
- [62] <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ha/lecture2.pdf>, (Ziyaret tarih tarihi: 18.06.2018).
- [63] Yıldız T., Gür K. A., Aşınma Sistemleri, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 2006, **4**(2), 86-91.
- [64] <https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/acfaa74.pdf>, (Ziyaret tarihi: 18.06.2018).
- [65] <https://www.emaze.com/@AQZQCWRC>, (Ziyaret tarihi: 18.06.2018).
- [66] Pıhtılı H., Tosun N., Investigation of the wear behaviour of a glass-fibre reinforced composite and plain polyester resin, *Composites Science and Technology*, 2002, **62**, 367-370.
- [67] Chand N., Naik A., Neogi S., Three-body abrasive wear of short glass fibre polyester composite, *Wear*, 2000, **242**(2000), 38-46.
- [68] Yaşar İ., Arslan F., Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozitlerde Elyaf Hacim Oranı ve Elyaf Doğrultusunun Tribolojik özelliklere Etkisi, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 1998, **24**(2000), 181-191.
- [69] Vina J., Garcia A. M., Castrillo A. M., Vina I., Argüelles A., Wear Behavior of a Glass Fiber-Reinforced PEI Composite, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2008, **21**(3), 279-286.
- [70] Biswas S., Deo B., Patnaik A., Satapathy A., Effect of Fiber Loading and Orientation on Mechanical and Erosion Wear Behaviors of Glass-Epoxy Composites, *Polymer Composites*, DOI 10.1002/pc.21082.
- [71] Kumar S., Pannerselvam K., Research on Tribological Behaviors of Pure and Glass Fiber Reinforced Nylon 6 Composites against Polymer Disc, *Journal of Material Science and Mechanical Engineering*, 2015, **2**(6), 24-28.
- [72] Srinivasan, V., Mohammad, M., Karthikeyan, R., Charecterisitics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nano-Particled Filled GFRP Composites Using Wear Maps, *Journal of Reinforced and Composites*, 2010, **29**, 3006-3015.
- [73] Solmaz Y. M., Muratoğlu M., Eroğlu M., Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Partikülleriyle Takviyelendirilmiş Polyester Matrisli Kompozitin Abrasiv Aşınma Davranışının İncelenmesi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Türkiye, 16-18 Mayıs 2011.
- [74] Raju R. B., Suresha B., Swamy P. R., Kanthraju G. S. B., Investigations on Mechanical and Tribological Behaviour of Particulate Filled Glass Fabric Reinforced Epoxy Composites, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2013, **1**, 160-167.

- [75] Patnaik A., Satapathy A., Mahapatra S., Dash R. R., Parametric Optimization Erosion Wear of Polyester-GF-Alumina Hybrid Composites using the Taguchi Method, *Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES*, 2008, **27**(10), 1039-1058.
- [76] Puneeth S., Anup T. J., Rajesh S., STUDY OF THREE BODY ABRASIVE WEAR BEHAVIOR OF NANO PARTICLES FILLED UNIDIRECTIONAL GLASS FIBER REINFORCED EPOXY COMPOSITES, *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 2017, **4**(4), 171-174.
- [77] Eand D., Haseebuddin M.R., Study of Mechanical and Wear behaviour of carbon fiber reinforced epoxy resin composites with alumina filler additions, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013, **2**(10), 2602-2607.
- [78] Yadav S., Haque Zyaoul MD., Kumar S., Sandeep., Mechanical and Sliding Wear Behaviour of E-GLASS Fiber Reinforced with EPOXY Composites, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2016, **3**(5), 563-567.
- [79] Shivamurthy B., Anandhan S., Bhat U. K., Mangalore S., Sliding Wear and mechanical Properties of Alumina/Glass Fabric/Epoxy Composites, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 2015, **9**, 46-53.
- [80] Bhimaraj P., Burris L. D., Action J., Sawyer G. W., Toney G. C., Siegel W. R., Schadler S. L., Effect of matrix morphology on the wear and friction behavior of alumina nanoparticle/poly(ethylene) terephthalate composites, *Wear*, 2004, **258**, 1437-1443.
- [81] Sawyer G. W., Freudenberg D. K., Bhimaraj P., Schadler S. L., A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles, *Wear*, 2003, **254**, 573-580.
- [82] Guo Y., Cao Z., Wang D., Liu S., Improving the friction and abrasion properties of nitrile rubber hybrid with hollow glass beads, *Tribology International*, 2016, **101**, 122-130.
- [83] Shibata K., Yamaguchi T., Hokkirigawa K., Tribological behavior of polyamide 66/rice bran ceramics and polyamide 66/glass bead composites, *Wear*, 2014, **317**, 1-7.
- [84] Klaas V. N., Marcus K., Kellock C., The tribological behaviour of glass filled polytetrafluoroethylene, *Tribology International*, 2005, **38**, 824-833.
- [85] Georgescu C., Botan M., Deleanu L., Tribological Characterisation of PBT + Glass Bead Composites with the Help of Block-on-Ring Test, *Tribology in Industry*, 2013, **35**(2), 134-140.
- [86] Garg K. G., Investigation into Mechanical and Tribological Behaviour of Hollow Glass Microsphere (HGM) Reinforced Epoxy Composite, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2015.

- [87] Feyzullahoğlu E., Effect of Different Fillers on Adhesive Wear Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites, *Tribology in Industry*, 2017, **39**(4), 482-486.
- [88] Singh K. A., SIDDHARTHA., DEEPAK., Assessment of mechanical and three-body abrasive wear peculiarity of TiO<sub>2</sub>- and ZnO-filled bi-directional E glass fibre-based polyester composites, *Bulletin of Materials Science*, 2016, **39**(4), 971-988.
- [89] Yilmaz G. M., Unal H., Mimaroglu A., Study of the strength and erosive behavior of CaCO<sub>3</sub>/glass fiber reinforced polyester composite, *eXPRESS Polymer Letters*, 2008, **2**(12), 890-895.
- [90] Kaundal R., Patnaik A., Satapathy A., Effect of SiC Particulate on Short Glass Fiber Reinforced Polyester Composite in Erosive Wear Environment, *Walailak Journal of Science and Technology*, 2012, **9**(1), 49-64.
- [91] Mahore K., Chaugaonkar S., Tiwari S., Yadav G., Modi M., Abrasive Wear Behaviour of PTFE Filled E-Glass Fiber Reinforced Polyester Composites, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2017, **4**(8), 1036-1039.
- [92] Saleh, H.E.M (2012). Polyester. Intech, ISBN 978-953-51-0770-5
- [93] Khoun L., Chaudhuri R. I., Hubert H., Effect of low-profile additives on thermo-mechanical properties of glass fiber-reinforced unsaturated polyester composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011, **30**(9), 815-823.
- [94] <http://www.karkimya.com.tr/tr/urunler/sertlik - elastikiyet - darbe dayanimi/ barcol-sertlik-testi>. (Ziyaret tarihi: 18.06.2018).
- [95] El-Wazery S. M., El-Elamy I. M., Zoalfakar H. S., Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites, *International Journal of Applied Science and Engineering*, 2017, **14**(3), 121-131.
- [96] Deo C., Acharya K. S., Effects of load and sliding velocity on abrasive wear of Lantana camara fibre-reinforced polymer matrix composite, *Engineering Tribology Part J*, DOI: 10.1243/13506501JET699.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **İlhan R.**, Feyzullohoğlu E., The Wear of Glass Fiber Reinforced Polyester Composite Materials at Different Loads and Speeds, *2nd International Engineering Research Symposium UMAS*, Düzce, 83-83, 11-13 September 2017.
- [2] **İlhan R.**, Feyzullohoğlu E., The Wear of Glass Fiber Reinforced Polyester Composite Materials at Different Loads and Speeds, *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 2018, **5**(1), 259-266.





## ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Düzce’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Düzce’de tamamladı. 2011 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2016 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2014 yılında başladığı Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yandal Programını 2016 yılında tamamladı. 2016-2018 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2018 yılından beri Bursa Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Lif ve Polimer Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

