

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİT
MALZEMELERİN FARKLI ÇEVRESEL KOŞULLARDAKİ
AŞINMA ÖZELLİKLERİ**

MİHRİBAN KORKU

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİT
MALZEMELERİN FARKLI ÇEVRESEL KOŞULLARDAKİ
AŞINMA ÖZELLİKLERİ

MİHRİBAN KORKU

Prof.Dr. Erol FEYZULLAHOĞLU

Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Doç.Dr. Yusuf Aytaç ONUR

Jüri Üyesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniv.

.....

Doç.Dr. Egemen AVCU

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 23.06.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İnsanlığın başlangıcından günümüze değişmeden ve hız kesmeden peşinde süregelen kavram gelişimdir. Gelişim her alanda, her insanda ve her teknolojiye olduğu gibi sistemlerin temel yapıtaşlarından biri olan malzeme biliminde de hiç azalmadan devam etmektedir. Günümüz endüstrisi, gelişen malzeme biliminde her daim taleplerin artması, beklentilerin karşılanması amacıyla yeni ve özellikli kompozit malzemelerin kullanımını da beraberinde getirmiştir. Hafif, dayanımı yüksek, düşük yoğunluklu bu kompozit malzemeler, alandaki kullanıma göre ve ihtiyaç doğrultusunda eksik yönlerin mükemmelleştirilmesi amacıyla çeşitli dolgu malzemeleri, takviye elemanları ile kullanılmaya başlanmıştır. Tüm malzemelerde olduğu gibi polimer kompozitlerin de çeşitli etkenler ile aşınması, endüstrinin önüne geçmesi ve azaltması gereken bir problemdir. Bu amaçla birçok çalışmalar yapılmış, kompozitlerin tribolojik özellikleri araştırılıp geliştirilmiştir. Farklı çevresel şartların aşınma üzerine etkileri, malzemenin aşınma davranışı, malzemenin katkısına göre ve cam elyaf takviyesine göre aşınmaya karşı tribolojik tepkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullandığımız kompozit numunelerin üretiminde ve temininde bize destek veren Sami Tongün Cam Elyaflı Polyester Ürünleri (Kocaeli) A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Deneysel ve teorik çalışmam esnasında büyük bir sabır ve özveriyle bana her daim destek olan, tecrübesi ve bilgi birikimi ile bana ışık tutan çok değerli hocam Prof. Dr. Erol FEYZULLAHOĞLU'na emeklerinden dolayı sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu süreçte her zaman yanımda olan, beni destekleyen ve en büyük motivasyon kaynaklarımdan biri olan aileme ve eşime sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Haziran – 2021

Mihriban KORKU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	4
1.1. Kompozit Malzemeler	4
1.2. Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi.....	4
1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	7
1.3.1. Takviye malzemelerine göre kompozit malzemeler.....	8
1.3.1.1. Elyafli kompozitler.....	8
1.3.1.2. Parçacıklı kompozitler.....	9
1.3.1.3. Tabakalı kompozitler.....	9
1.3.1.4. Karma (hibrit) kompozitler	10
1.3.2. Matris malzemelerine göre kompozit malzemeler	10
1.3.2.1. Polimer matrisli kompozitler.....	11
1.3.2.2. Seramik matrisli kompozitler	11
1.3.2.3. Metal matrisli kompozitler	12
2. ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELER.....	13
2.1. Giriş.....	13
2.2. Reçine Malzemeleri.....	14
2.2.1. Termoplastik esaslı reçineler	14
2.2.2. Termoset reçineler	16
2.2.2.1. Polyester reçine	17
2.2.2.2. Epoksi reçine	19
2.2.2.3. Fenolik reçine	20
2.2.2.4. Vinilester reçine	21
2.3. Takviye Malzemeleri.....	23
2.3.1. Cam elyaf.....	23
2.3.2. Karbon elyaf	26
2.3.3. Aramid elyaf	28
2.3.4. Seramik elyaf	29
2.3.5. Bor elyaf	29
2.3.6. Asbest elyafı	30
2.3.7. Metal elyaf	30
2.3.8. Bitkisel esaslı elyaflar.....	31
2.4. Dolgu Malzemeleri.....	32
2.4.1. Kalsiyum karbonat (CaCO ₃).....	33
2.4.2. Cam kürecikler.....	34
2.4.3. Alüminyum oksit (alümina).....	34
3. CAM ELYAF TAKİYELİ POLYESTER KOMPOZİT MALZEMELER	35

3.1. Genel Özellikler	35
3.2. Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	36
3.2.1. El yatırması yöntemi.....	37
3.2.2. Püskürtme yöntemi	38
3.2.3. Pultrüzyon yöntemi.....	40
3.2.4. Pres kalıplama yöntemi.....	42
3.2.5. Elyaf sarma yöntemi	44
3.2.6. Vakum infüzyon yöntemi	45
4. AŞINMA VE AŞINMA MEKANİZMALARİ.....	46
4.1. Aşınma	46
4.2. Aşınma Mekanizmaları	47
4.2.1. Abrasiv aşınma	48
4.2.2. Adhezif aşınma	49
4.2.3. Eroziv aşınma	50
4.2.4. Korozif aşınma.....	51
5. LİTERATÜR TARAMASI.....	53
5.1. Takviye Elemanı Olarak Kullanılan Cam Elyafın Aşınmaya Etkisi.....	53
5.2. Farklı Çevresel Koşulların CTP Kompozitlerin Aşınmasına Etkisi.....	55
6. MALZEME VE YÖNTEM.....	59
6.1. Malzeme	59
6.2. Yöntem	60
6.2.1. Yoğunluk ölçümü	60
6.2.2. Sertlik ölçümü.....	61
6.2.3. Numunelerin maruz bırakıldıkları farklı çevresel koşullar.....	62
6.2.3.1. Tuzlu su ortamı.....	62
6.2.3.2. Asit ortamı	63
6.2.3.3. Hızlandırılmış yaşlandırma	64
6.2.3.4. Termal çevrim	64
6.2.3.5. Ultraviyole (UV) ışını	64
6.2.3.6. Hidrotermal yaşlandırma.....	65
6.2.3.7. Kuru sürtünme aşınma deneyleri.....	65
6.2.3.8. Sıvı sürtünme aşınma deneyleri	66
6.2.3.9. Aşınma sonrası numune yüzey görüntüsü alma.....	68
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	70
7.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları.....	70
7.2. Barcol Sertlik Ölçüm Sonuçları	71
7.3. Aşınma Test Sonuçları	72
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	96
KAYNAKLAR	102
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	109
ÖZGEÇMİŞ	110

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Takviye elemanlarına göre kompozitlerin sınıflandırılması.....	8
Şekil 1.2. Tabakalı Kompozit	10
Şekil 1.3. Monomer ve polimer yapı.....	11
Şekil 2.1. İzofthalik bir polyester reçinenin kimyasal yapısı.....	18
Şekil 2.2. Tipik epoksi reçinenin kimyasal yapısı	20
Şekil 2.3. Vinilester reçinesinin kimyasal yapısı	22
Şekil 3.1. El yatırma yöntemi.....	37
Şekil 3.2. Püskürtme yöntemi	39
Şekil 3.3. Pultrüzyon yöntemi.....	41
Şekil 3.4. SMC pres kalıplama yöntemi	42
Şekil 3.5. BMC pres kalıplama yöntemi	43
Şekil 3.6. Elyaf sarma yöntemi	44
Şekil 4.1. Bağlı hareket türüne göre başlıca aşınma kategorileri.....	48
Şekil 4.2. Abrasiv aşınma çeşitleri.....	48
Şekil 4.3. Al-Si alaşımlı yüzeyde meydana gelen adhezif aşınma.....	50
Şekil 4.4. Pompa gaz keleşbeği burcunda oluşan eroziv aşınma.....	51
Şekil 4.5. Gerilim hücreleri nedeniyle oluşan koroziv aşınma	52
Şekil 6.1. AND GR-200 yoğunluk ölçüm cihazı	61
Şekil 6.2. Barcol sertlik ölçüm cihazı	62
Şekil 6.3. Tuzlu su ortamında bekleyen CTP numuneler.....	62
Şekil 6.4. Asit ortamında bekletilen CTP numuneler	63
Şekil 6.5. Asit ortamından alınıp arıtılmış numuneler	63
Şekil 6.6. ATC-L120 UV ışık kabini	65
Şekil 6.7. Ultrasonik temizleme cihazı	66
Şekil 6.8. Hassas terazi.....	67
Şekil 6.9. Çok amaçlı aşınma test cihazı.....	68
Şekil 6.10. Aşınma testi sonrası CTP numuneler.....	68
Şekil 6.11. Görüntü almada kullanılan cihaz Duravision 20 G5.....	69
Şekil 7.1. İşlem görmemiş numunelerin ortalama sürtünme katsayı değerleri	72
Şekil 7.2. CTP numunelerin aşınma sonrası ağırlık kayıpları.....	74
Şekil 7.3. İşlem görmemiş CTP numunelerin aşınma oranları	76
Şekil 7.4. Termal çevrime maruz kalmış numunelerin aşınma oranları	77
Şekil 7.5. Tuzlu su ortamında bekletilmiş CTP numunelerin aşınma oranları	78
Şekil 7.6. Asit ortamına maruz kalmış numunelerin aşınma oranları	79
Şekil 7.7. Hızlandırılmış yaşlandırma uygulanan numunelerin aşınma oranları	80
Şekil 7.8. UV ışınına maruz bırakılan CTP numunelerin aşınma oranları	81
Şekil 7.9. Hidrotermal yaşlandırma sonrası numunelerin aşınma oranları	82
Şekil 7.10. Sıvı sürtünme sonrası numunelerin aşınma oranları.....	83
Şekil 7.11. N1 numunesinin farklı çevresel koşullardaki aşınma oranları.....	84
Şekil 7.12. N2 numunesinin farklı çevresel koşullardaki aşınma oranları.....	87
Şekil 7.13. N3 numunesinin farklı çevresel koşullardaki aşınma oranları.....	89
Şekil 7.14. N4 numunesinin farklı çevresel koşullardaki aşınma oranları.....	91
Şekil 7.15. N5 numunesinin farklı çevresel koşullardaki aşınma oranları.....	93

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Termoplastik reçinelerin mekanik ve termal özellikleri	16
Tablo 2.2. Bazı termoset reçinelerin özellikleri	16
Tablo 2.3. Çeşitli cam elyafların bazı özellikleri	23
Tablo 2.4. Değişik türde cam elyaf takviyeli polyesterlerin özellikleri.....	26
Tablo 2.5. Kevlar 29 ile Kevlar 49'un karşılaştırılmalı özellikleri	29
Tablo 6.1. CTP kompozit numunelerin kimyasal bileşimleri	60
Tablo 7.1. CTP numunelerin yoğunluk değerleri.....	70
Tablo 7.2. CTP numunelerin barcol sertlik değerleri.....	71
Tablo 7.3. Farklı koşullardaki N1 numunelerinin mikroskop görüntüleri.....	86
Tablo 7.4. Farklı koşullardaki N2 numunelerinin mikroskop görüntüleri.....	88
Tablo 7.5. Farklı koşullardaki N3 numunelerinin mikroskop görüntüleri.....	90
Tablo 7.6. Farklı koşullardaki N4 numunelerinin mikroskop görüntüleri.....	92
Tablo 7.7. Farklı koşullardaki N5 numunelerinin mikroskop görüntüleri	94
Tablo 8.1. Numunelerin çevresel koşullara göre puanlaması.....	99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μ	: Sürtünme katsayısı
F_S	: Sürtünme kuvveti (N)
F_N	: Normal kuvvet (N)
W	: Aşınma oranı ($m^3/Nm \times 10^{-4}$)
ΔM	: Ağırlık kaybı (gr)
P	: Yoğunluk (gr/m^3)
L	: Kayma mesafesi (11200 m)

Kısaltmalar

ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
Al	: Alüminyum
Al_2O_3	: Alümina
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
BMC	: Bulk Molding Compound (Hazır Kalıplama Hamuru)
BS	: British Standards (İngiliz Standartları)
$CaCO_3$: Kalsiyum Karbonat
CE	: Cam Elyaf
CK	: Cam Kürecik
CTP	: Cam Elyaf Takviyeli Plastikler
CuO	: Bakır (II) Oksit
DIN	: Deutsches Institut Für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
EMI	: Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
ETP	: Elyaf Takviyeli Polimerler
GMT	: Glass Mat Thermoplastics (Takviyeli Termoplastik Levha Pres Kalıplama)
HMTA	: Hekzametilen tetramin
HNO_3	: Nitrik Asit
MEKP	: Metil Etil Keton Peroksit
Mg	: Magnezyum
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
MÖ	: Milattan Önce
MS	: Milattan Sonra
PA	: Poliamid (naylon)
PAN	: Poliakrilonitril
PE	: Polietilen
PEEK	: Polietereterketon
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
PMMA	: Polimetilmetakrilat
POM	: Poliasetal
PP	: Polipropilen
PPS	: Polifenilen Sülfid

PS	: Polistiren
PTFE	: Politetrafloretillen
PVC	: Polivinil Klorür
RFI	: Request for Information (Bilgi Talebi)
RRIM	: Reinforced Reaction Injection Molding (Takviyeli Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama)
RTM	: Resin Transfer Molding (Reçine Transfer Kalıplama)
Si ₃ N ₄	: Silisyum Nitrür
SiC	: Silisyum Karbür
SMC	: Sheet Molding Compound (Sac Kalıplama Bileşigi)
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit
Ti	: Titanyum
UV	: Ultraviyole



CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİT MALZEMELERİN FARKLI ÇEVRESEL KOŞULLARDAKİ AŞINMA ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit malzemeler, hafif yapısıyla birlikte yüksek mukavemet, yüksek elastiklik gibi iyi mekanik özelliklere ve yüksek aşınma direnci gibi güçlü tribolojik özelliklere sahip, gelişime açık malzemelerdir. Malzeme biliminde malzemenin kullanım ömrü ve performansını etkileyen önemli bir etken aşınmadır. Çalışma koşulları, kompozit malzemelerin bu ortama dayanımı ve davranışını etkileyen diğer bir unsurdur. Bu çalışmanın amacı, farklı çevresel koşullara (tuzlu su ortamı, asit ortamı, hızlandırılmış yaşlandırma, hidrotermal yaşlandırma, UV ışını, termal çevrim) maruz bırakılmış CTP numunelerin, sabit yük ve hız altında aşınma dayanımlarını inceleyerek tribolojik etkileri ele almaktır. CTP numunelerin üretiminde farklı çekme katkıları (polistiren ve plastifiyen çekme katkısı) ortoflatik ve izoflatik reçineler, cam elyaf (CE) takviye malzemesi ve cam kürecik dolgusu kullanılmıştır. Deneylere başlamadan önce malzemelerin yoğunluk ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Farklı çevresel koşullara maruz bırakılmış numunelere 500 rpm hız ve 60N yük altında kuru sürtünme deneyi ve işlem görmemiş numunelere 500 rpm hız ve 60N yük altında kuru ve 500 rpm hız ve 20N yük altında sıvı sürtünme deneyi uygulanmıştır. Malzemelerin deneyler sonrası ağırlık kayıpları ölçülmüş, aşınma oranları ile numunelerin aşınma dayanımları kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlarda farklı çevresel ortamlarda CTP malzemelerindeki elyaf takviyesinin aşınma dayanımına olumlu etkisi gözlemlenmiştir.

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

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF GLASS FIBER REINFORCED POLYESTER COMPOSITE MATERIALS UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTAL CONDITIONS

ABSTRACT

Glass fiber reinforced polyester (GFRP) composite materials, as being can be improved easily, have a light structure, good mechanical properties such as high strength, thermal resistance and strong wear properties such as high corrosion resistance. In materials science, an important factor affecting the service life and performance of the material is wear. Operating conditions are another factor affecting the strength and behavior of composite materials. The aim of this study is to examine the tribological effects of the abrasion resistance of GFRP samples that are exposed to different environmental conditions (salt water, acid environment, accelerated weathering, hydrothermal weathering, UV radiation, thermal cycling) under constant load and speed. In the production of GFRP samples, orthoptic and isophthalic resins with different tensile additives (polystyrene and plasticizer tensile additive), glass fiber (GF) reinforcement material and glass bead filler were used. Before the experiments, the density and the hardness of the materials have been measured. Dry friction test at 500 rpm speed and 60N load was applied on the samples that were exposed to different environmental conditions. Untreated samples were tested using both dry friction test and lubricated friction test (under 500 rpm speed and 20N load). As a result of the calculations made, the abrasion resistance of the samples was compared by making a comparison with the abrasion rates of the samples. In the experimental results, a positive effect of fiber reinforcement in GRP materials on abrasion resistance was observed in different environmental conditions.

Keywords: Adhesive Wear, Glass Fiber, Environmental Conditions, Filler Materials, Polyester.

GİRİŞ

Üretim metotları ve teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte, bir ürünün ilk girdisi olan malzeme ve malzeme çeşitleri de gelişerek malzeme biliminin ilerlemesini sağlamıştır. Endüstride alışlagelmiş malzemelerin yanı sıra, ekonomik, daha iyi malzeme özelliklerine erişilebilir olan kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Birçok çeşitte katkı ve takviye elemanlarıyla birlikte dolgu malzemelerin kullanımıyla, metal, seramik gibi malzemelere alternatif olarak geliştirilen kompozit malzemeler farklı malzemelerin iyi özellikleri bir araya getirilip tek bir malzeme olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede dayanımı yüksek, hafif, boyutsal kararlılık, aşınma ve korozyon direnci yüksek malzemeler elde edilmektedir. Kombinasyon sayısında sınırı olmayan kompozit malzemeler, istenilen özelliklere göre inşa edilip değişiklik yapılmasına müsaade edebilen malzemelerdir.

Elyaf takviyeli kompozitlerde doğal ve sentetik olmak üzere birçok elyaf çeşidi kullanılmaktadır. Bunların arasında cam elyaf ve karbon elyaf en çok tercih edilen elyaf çeşitleridir. Kolay erişilebilirliği ve ekonomik oluşuyla cam elyaf, katkı edildiği kompozit malzemeye yüksek mukavemet, yük altında şekil değiştirmede azalma ve iyi mekanik yapı gibi özellikler kazandırmaktadır. Uzay ve savunma sanayii, elektronik ekipman, otomotiv ve korozyon dayanımı gerektiren deniz sektöründe kullanımı oldukça yaygın olan cam elyaf takviyeli kompozitler ayrıca aşınmaya maruz kalan makine parçaları ve hareketli ekipmanlarda da kullanılmaktadırlar.

Her ne kadar çok iyi tasarlansa da malzemeler çalışma şartlarından veya ortam koşullarından kaynaklı olarak aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Malzemelerin çalışma ömrünü azaltan ve fonksiyonlarını etkileyen aşınma, istenmeyen bozulmalara neden olan, temas sonucu yüzey üzerinden parça ayrılması sonucu oluşmaktadır. Kaynak bağı teorisi ile açıklanacak olursa, adheziv aşınma temas halindeki yüzeylerin arasında oluşan bağların kopmasıyla meydana gelen malzeme kaybıdır.

Çalışmanın birinci bölümünde kompozit malzemelerin tarihi, gelişimi, sınıflandırılması gibi genel bilgilere yer verilmiştir.

İkinci bölümde elyaf takviyeli polimer kompozitler hakkında genel bilgilere yer verilmiştir. Ayrıca reçine malzemeleri termoset ve termoplastik olmak üzere sınıflandırılarak kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Kompozit malzemelerin yapısında kullanılan farklı doğal ve sentetik elyaflar, dolgu malzemeleri ve takviye elemanları bu bölümde ele alınmıştır. Özellikle matris malzemesi olarak polyester reçine ve ilave elemanı olarak tercih edilen cam elyafa ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde cam elyaf takviyeli polimer (CTP) malzemeler ile ilgili geniş bilgilere yer verilerek CTP malzemelerin üretim yöntemleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde aşınma ile ilgili teorik bilgilere yer verilerek aşınma mekanizmaları tek tek ayrıntılı şekilde anlatılmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde CTP malzemelerin aşınma davranışlarıyla ilgili literatürde yer alan makaleler araştırılıp incelenmiştir. Ayrıca farklı çevresel koşulların CTP kompozit malzemelerin aşınmasına etkileriyle ilgili literatür taraması sonuçlarına yer verilmiştir. Çalışmanın bu bölümü, teorik olarak yer verilen bilgilerin son bölümüdür ve sonraki bölümde deneysel çalışmalar anlatılmıştır.

Çalışmanın sonraki bölümlerinde deneysel çalışmada kullanılan malzeme ile kullanılan test ekipman ve yöntemleri ile ilgili bilgi verilmiştir. Numunelerin maruz kaldıkları çevresel koşullar ve bekleme şartları anlatılarak deneysel sonuçlar irdelenmiş ve literatürle kıyaslanmıştır. Son bölümde ise farklı içerikteki CTP numunelerin farklı çevresel koşullarda gösterdikleri tribolojik davranışları ile aşınma özellikleri incelenmiştir.

Çalışmada CTP malzemeler, farklı reçine malzemeleri (çekme katkılı ortoftalik polyester ve izoflatik polyester) ve farklı elyaf oranları ile pres kalıplama yöntemi kullanılarak 140°C sıcaklık ve 150 bar basınç altında 3 dakika süreyle üretilmiştir. Başarıyla üretilen numuneler tuzlu su ortamı, asit ortamı, hızlandırılmış yaşlandırma, hidrotermal yaşlandırma, termal çevrim ve UV ortamı gibi farklı koşullara maruz bırakılarak kuru sürtünme ile aşınma testine tabi tutulmuştur. Ayrıca işlem görmemiş numunelere de kıyas yapılabilmesi için kuru ve sıvı sürtünme deneyi uygulanmıştır.

Aşınma testleri sonucu numunelerin aşınma oranları hesaplanarak incelenmiştir. Numune yüzeyleri optik mikroskopla görsel olarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın amacı çalışma şartları dolayısıyla farklı etkilere maruz kalan CTP malzemelerin bu koşullar altındaki aşınma davranışlarını inceleyerek ön görüntü oluşturmak ve aşınma davranışlarıyla tribolojik özelliklerini incelemektir.



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme genel olarak farklı özellikteki iki veya daha fazla mikro ve makro bileşenin kimyasal bağ kurmaksızın belirli yöntemlerle birleştirilerek farklı karakteristikte elde edilen malzemedir. Kompozit malzemeler içeriğini oluşturan takviye ve matris elemanları ile mevcut malzemedен daha farklı mekanik, tribolojik, kimyasal vb. özelliklerin elde edilmesi amacıyla üretilir. Gelişmiş mühendislik ve endüstri alanlarında yüksek performanslı, daha hafif ve düşük maliyetteki kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Yüksek sertlik, düşük yoğunluk, üstün mukavemet, daha büyük spesifik modül ve belirli amaçlara uyarlanabilme yeteneği gibi farklı özelliklerine sahip olan kompozit malzemeler dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, yetkin mekanik ve çok iyi darbe özellikleri, düşük ısıl genişleme katsayısı, yüksek mukavemet / ağırlık oranı, korozyona karşı direnç, iyileştirilmiş basınç ve gerilme mukavemeti ve daha iyi yorulma direnci gibi özelliklerle birçok mühendislik alanında uygulamalara sahiptirler. Çeşitli katkı malzemeleri ile iyileştirilen kompozit malzemeler, geleneksel polimerlere, metal ve alaşımlara alternatif olarak birçok alanda kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte geçmişten günümüze uzay teknolojisi ve havacılık, elektrik-elektronik, yapı ve inşaat, otomotiv, savunma sanayii, sağlık sektörü gibi birçok alanda başarıyla kullanılmaktadırlar.

Malzeme bilimi kapsamında geniş kullanım alanlarına sahip olan kompozit malzemelerin üstün teknoloji ağında araştırmacılar tarafından geliştirilmeye devam etmektedir.

1.2. Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi

Kompozit malzemeler tabiatta varlık gösteren yapılardan hareketle, eski toplumlarda temel basit ihtiyaçları karşılamakla başlayarak çağdaş teknolojide birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır. Binlerce yıl önce insanlık, selüloz, kauçuk ve

proteinler gibi doğadaki kompozit bileşenleri keşfederek yine doğadaki plastikleştirici yağlar, doğal lifler ve minerallerden elde ettikleri dolgu malzemeleriyle kompozitin ilk adımlarını atmıştır. Kerpiçten bu yana kullanılagelen kompozit malzemeler, asfalt ve betonarme ve sonrasında metal ve alaşımlarının ortaya çıkmasıyla malzeme teknolojisinde önemli yerini almıştır.

Kompozit kullanımına dair ilk örnekler MÖ 1500 yıllarına kadar dayanmaktadır. Eski Mısırlı ve Mezopotamyalı yerleşimciler, saman ve balçığı karıştırarak güçlü ve dayanıklı ürünler meydana getirmişlerdir. Bundan sonra diğer uygulamalarda da saman, takviye elemanı olarak kullanılmaya devam etmiştir. Daha sonra MS 1200'de Moğollar ahşap, kemik ve hayvan esaslı yapıştırıcıları bir araya getirerek oldukça güçlü ve hassas yapıya sahip kompozit temelli ilk yayları üretmişlerdir [1].

Sentetik reçine polimer/metal kompozitleri M.S. 20. yüzyılın başlarında başlamış olsa da çok önceki yıllarda doğal reçine kompozitleri mevcuttur. Ağaç ve bitki eksüdasyonları, şellak, fosilleşmiş reçineler, bitümlü malzemeler, balık veya hayvan sakatları ile kurutulmuş yağlar, yumurta akı ve midye gibi kabuklulardaki yapışkan materyallerin birleşmesi gibi birçok doğal malzemeler doğal kompozit örnekleri arasında verilebilir [2].

1800'lerin sonlarında, kano üreticileri kağıt laminatları yapmak için farklı malzemeler üzerinde denemeler yapmaya başlamışlardır. Gomalak ile birlikte odun hamurundan oluşturulan sağlam, makine yapımı kağıt kraft kağıt katmanlarını yapıştırmayı denemişlerdir. Sıvıdan katıya dönüştürülebilen ilk sentetik reçineler 1870 ve 1890 arasında geliştirilmiştir. 1930'lar, reçineler için yeni bir çağın ve sonuçta bir bütün olarak kompozit endüstrisinin müjdesini vermiştir [3].

1900'lü yılların başında vinilester, polistiren, fenolik ve polyester gibi polimerler kullanılmaya başlanmıştır. Bu polimerler doğadan saf halde elde edilen reçine malzemelerine kıyasla daha iyi performans sergileyici özelliklere sahiptirler [1].

Kompozit kavramları genellikle 20. yüzyıldaki gelişmelerle ilişkili olmuştur ve incelemeler son 100 yıla ait yakın tarihteki referanslardan ilerledikçe, ilgili verilerin kullanılabilirliği artmıştır. Bunun yanı sıra metal/polimer kompozitlerdeki gelişmeler de son 100 yılda büyük ölçüde artmıştır. Metal tel veya çubuklara metal olmayan katkı

maddelerinin ilave edildiği birçok uygulama görülmüştür. Bu uygulamalar arasındaki ilk patentlerden birisi de kalın metal çubuklar ile organik reçine veya kağıt hamurunun Őemsiye ve baston üretiminde kullanılmasıdır. Bu uygulama 1911 yılında gerçekleştirilmiştir [2].

1900'l yılların ikinci yarısından sonra kompozit malzemelerin üretimi ve mekanik özellikleri üzerinde araştırma ve geliştirme faaliyetleri artarak devam etmiştir. Pek çok farklı kompozit malzeme ve üretim türü mevcut olup her geçen gün bunlara yenileri eklenmektedir [4].

Kompozitlerin geliŐiminde İkinci Dünya SavaŐı'nın önemli yeri vardır. Yapısal bir kanat kutusu kiriŐinin yapımında fenolik takviyeli kağıt ve keten ipliğinden hazırlanan fenolik reçineli kompozit kullanılmıştır. Uçak gövdesini oluşturan bu malzeme ile kompozitlerin gelişimi hızlandırılmıŐtır. Bu süreçte, doğal elyaflarla güçlendirilmiş fenolik kompozitler gemi yatakları, Őalter cihazları ve fren balataları gibi havacılık dıŐı uygulamalar için de kullanılmıştır [5].

İkinci Dünya SavaŐı sırasında askeri amaçlarla kullanılan ilk kompozit plastik örnekleri, ancak 1946'dan sonra tüm dünyada ticari boyuta gelebilmiŐtir. Yani, tüm dünyada hala yeni bir malzemedir [6].

Karbon siyahının baz olarak kullanımındaki etkisi öğrenildikçe 1970'lerin başında yaygın olarak kullanılmış, karbon karası parçacıkları daha yüksek saçaklanma ve yapı ile geliştirilmiştir. Birim ağırlık başına daha fazla partikül içeren gözenekli yapılar da üretilmiştir. Bu eğilim devam etmiş ve grafit lifler test edildiğinde zirveye taŐınmıŐtır. Grafit lifler parçalanıp termoplastik formüllerle karıştırılarak yüksek sertlikte ve kayganlıkta kompozitler üretilmiştir [2].

1935 yılında ilk cam elyafı, takviye malzemesi olarak sunulmuŐtur. Plastik polimerlerle birleŐtiđinde oldukça güçlü ve aynı zamanda hafif malzeme özelliği oluşturan cam elyafların oluŐumuyla, elyaf takviyeli polimer kompozit kavramı hayatımıza girmiŐtir [1].

1974 yılına gelindiğinde, dış yüzeyi metalize ederek, geleneksel bir dolgu malzemesi olan cam elyafı modifiye etmek için çalışmalara devam ediliyordu. Vakum ve

daldırma işlemlerinin yanı sıra farklı metaller de değerlendirilmekteydi. İlk çalışmalar, büyük bir bilgisayar üreticisi, bir araştırma laboratuvarı ve bir plastik üreticisi firmanın katıldığı ortak geliştirme programında yapılmıştır. Bu kapsamda nikel kaplı cam elyaflar üretilmiş ve polikarbonat reçine ile birleştirilmiştir, böylece yüksek iletkenlik seviyesine sahip ve EMI / RFI kalkanı için uygun bir bileşik elde edilmiştir [4].

1970’li yıllarda yüksek teknoloji ürünleri olarak bilinen aramid elyafı önemli bir mesafe kat etmiş olup uzay, denizcilik, spor ürünleri, eğlence, otomotiv ve silah endüstrisi gibi klasik kompozit pazarlarına hitap etmiştir. Bu polimer, düşük yoğunluk ile yüksek modül ve yüksek düzeyde yapışma özelliği ile yüksek mukavemet ağırlık oranını üründe bir araya getirmektedir [7].

Son yıllarda ise kompozit çalışmalarının gelişmesiyle hibrit kompozitlere, yenilenebilir kaynaklı kompozitlere ve nano kompozitlere yönelim artmıştır. Nano kompozit araştırmaları ve vaat ettiği büyük faydalar son yıllarda önemli ölçüde dikkat çekmiştir. Kompozitlerde eğilim, nano malzemeleri polimer reçinelerinde bir tür “süper dolgu maddesi” olarak kullanmak olmuştur. Nano element dolgulu reçineler aynı zamanda gelişmiş termal ve elektrik iletkenliği ve azaltılmış yanıcılık gibi özelliklere de sahiptir [8].

Bugün, kompozit malzemeler konusundaki araştırmalar hükümetler, üreticiler ve üniversitelerden destek görmektedir. Bu eğilimler yeniliğin hızlanmasına ve kompozit materyallerin büyümesine olanak sağlayacaktır. Geri dönüştürülmüş plastikler ve biyo bazlı polimerler içeren çevre dostu reçineler gibi diğer malzemeler daha güçlü, daha hafif ve çevre dostu ürünlere olan talebi karşılamaktadır. Geleceğe bakacak olursak, hala geliştirilecek lifler ve reçineler günlük ve özel kullanım için daha fazla uygulama yaratacaktır [9].

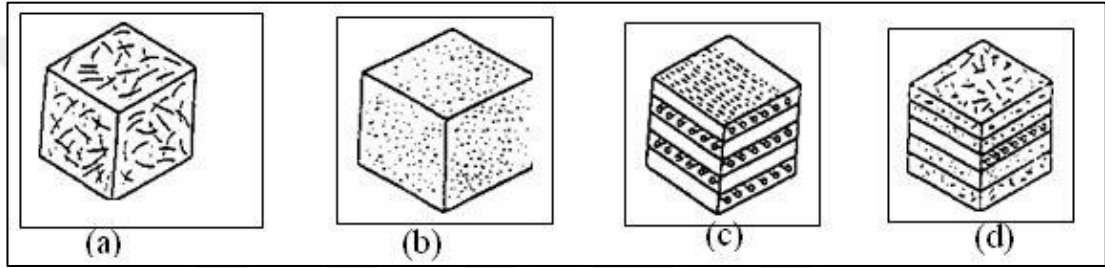
1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması birçok farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Genel olarak kompozitlerin yapısı iki ana fazdan oluşur. Bunlar matris ve takviye malzemesidir. Matris sürekli bir fazdır, takviye ise süreksizdir. Takviyelerin görevi kompozitin güçlendirilmesini sağlamaktır. Matris ise takviyelerin yapıştırılmasından sorumludur.

Geniş bir özgürlük yelpazesi olan ve istenen mühendislik özelliklerini karşılamak için tasarlanan kompozit malzemeler için en yaygın sınıflandırma, içeriğinde kullanılan takviye ve matris malzemelerine göre yapılanıdır [10].

1.3.1. Takviye malzemelerine göre kompozit malzemeler

Kompozit malzemelerin oluşum seçenekleri oldukça fazla olduğu için sınıflandırılması sonsuz denebilecek kadar fazla şekilde yapılabilir. Ancak en yaygın sınıflandırma, içeriğinde kullanılan takviye ve matris malzemelerinin formuna göre yapılmaktadır.



Şekil 1.1. Takviye elemanlarına göre kompozitlerin sınıflandırılması. (a) Elyafli kompozitler, (b) Parçacıklı kompozitler, (c) Tabakalı kompozitler, (d) Karma kompozitler.

1.3.1.1. Elyafli kompozitler

Günümüzde, yüksek dayanım ve düşük maliyet özelliklerinden dolayı en sık tercih edilen kompozit çeşitlerindedir. Bu kompozit tipi yumuşak matris içerisine, sert ve dayanıklı elyafların farklı şekillerde yer almasıyla meydana gelmiştir. Genellikle matris hacminin %30-%70 kadarını kaplayan elyaflar matris içinde kırılmış, doğranmış, öğütülmüş ve dokunmuş şekilde bulunabilir. Elyafların şekliyle birlikte matris içindeki yerleşimi de kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Aynı zamanda takviye olarak kullanılan elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. İstenen mekanik özelliklerinin yanı sıra, korozyona karşı dirençleri de bu kompoziti farklı alanlarda kullanmak için cazip bir faktördür. Yapısındaki bağları iyileştirmek adına genellikle nişasta, balmumu, yağ ve jelatin gibi bağlayıcılar takviye edilir. Fiber takviyeli polyesterler uçaklarda, elektronik bileşenlerde, otomotiv sektöründe, spor ekipmanlarında, demiryolları ve vagon sistemlerinde sıkça kullanılırlar [10]. Takviye elemanı olarak kullanılan cam, aramid, karbon veya doğal elyaflar gibi elamanlar arasında en yaygın kullanılanı ve en

düşük maliyetli olanı cam elyafıdır. Yapısal uygulamalarda çokça tercih edilen cam elyaf takviyeli polyster (CTP) kompozitler 3. bölümde daha ayrıntılı ele alınacaktır.

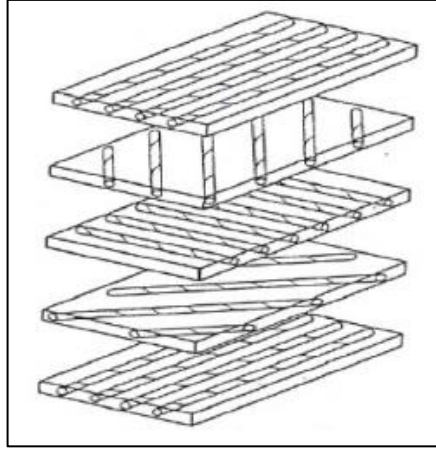
1.3.1.2. Parçacıklı kompozitler

Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilen izotrop yapıdaki kompozit çeşididir. Parçacıklar çoğunlukla kompozitin sertliğini artırmada etkilidir. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlı olarak değişmektedir. Parçacık dolgulu malzemede performansı etkileyen diğer unsurlar arasında parçacık boyutları, yüzey enerjileri, boyut dağılımları, homojen dağılıp dağılmadığı, hacimsel oranlar vs. ve daha birçok etken sayılabilir. Parçacık takviyeli kompozitler arasında en yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Uçak motor parçalarının üretiminde tercih edilmektedirler [11,12]. Parçacıklı kompozitlere verilebilecek bir başka örnek ise yapı alanlarındaki en önemli malzemelerden birisi olan betondur. Yapısal açıdan çok değişik özellikte farklı türleri bulunan beton malzeme adına yoğun araştırmalar halen sürmektedir.

1.3.1.3. Tabakalı kompozitler

Tabakalı (laminet) kompozit, temel malzeme eksenleri doğrultusunda değişik yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste konularak bir araya getirilmesi ile elde edilirler. Laminetler, matris içerisine rastgele yönelmiş elyaflar, tek yönlü elyaflar veya farklı elyaf takviyeli tabakadan oluşabilir [13]. Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan çok yüksek mukavemetli kompozit tipi olmakla birlikte ısıya ve neme dayanıklı, metallere göre daha hafif ve daha mukavemetlidir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler.

Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler [12].



Şekil 1.2. Tabakalı Kompozit [14]

1.3.1.4. Karma (hibrit) kompozitler

Hibrit kompozitler bir matristen, mikro dolgulardan, geleneksel dolgu maddelerinden ve nadiren cam elyaftan yapılır. Geleneksel dolgu maddelerinin boyutuna bağlı olarak, bunlar kaba ve ince hibrit kompozitlere ayrılabilir [15]. Hibrit kompozitlerde aynı matriste birden fazla takviye kullanır. Burada, takviyelerin özelliklerinin kompozitlerin genel özellikleri üzerindeki sinerjistik etkisini elde etmek hedeflenmiştir. Hibrit kompozitlerin özellikleri üzerinde daha fazla kontrole sahip olunarak herhangi bir kompozit malzemedeki bulunan avantajlar ve dezavantajlar arasında daha uygun bir denge sağlamak mümkün olabilir [16].

1.3.2. Matris malzemelerine göre kompozit malzemeler

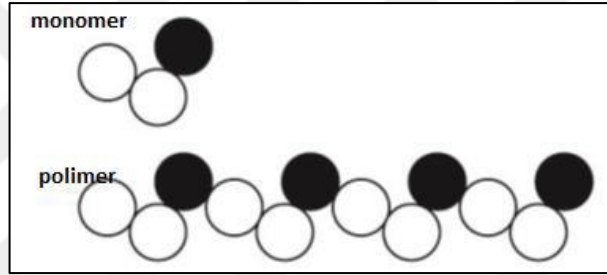
Kompozitlerde sürekli bir karaktere sahip olan birincil faz matristir. Matris genellikle içeriğine giren katkı malzemelerinden daha sünek ve daha az serttir. Matris formu kompozit malzemenin yapısının fiziki, kimyasal, ısıl özelliklerini belirlerken yapıya uygulanan yükün aktarımını ve dengeli dağılmasını sağlar. Matris fazı takviye malzemesini bir arada tutan eleman olup kimyasal etkilerden ve atmosferik dış etkilerden korur. Kompozit yapının mukavemetinin belirlenmesinde de önemli etkendir.

Kompozitleri matris malzemelerine göre; polimer matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve metal matrisli kompozitler olmak üzere 3 ayrı grupta inceleyebiliriz.

1.3.2.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler, dağınık fazdaki lif takviyesiyle polimer matrisinden oluşan malzemelerdir. Kelime anlamı olarak çok parçalı manasına gelen polimer malzeme, belirli bir biçimde şekillendirilen yapay malzeme grubudur. Polimer matrisli kompozitler, çoğunlukla petrokimya esaslı ürünlerdir ve günümüzde en yaygın kullanım alanı olan malzemelerdir [11]. Polimerler, kolay şekil almaları, düşük üretim maliyetleri ve uzun süreli kullanıma uygunlukları açısından sık kullanılan matris malzemesidir. Aynı zamanda birim kütle başına yük kapasiteleri de oldukça yüksektir.

Plastik yani polimer, monomer adı verilen küçük moleküllerin birbirine eklenmesi ile elde edilen uzun zincirli yapıya sahip sentetik malzemelerdir [17].



Şekil 1.3. Monomer ve polimer yapı [17]

Polimer esaslı matris malzemelerin, kompozit içerisinde kullanılmasıyla farklı yapıda ve özellikte yüzlerce plastik geliştirilmiştir. Polimerlerin sınıflandırılması kimyasal bileşimine göre, yapılarına göre, kullanım alanlarına göre, fiziksel yapılarına göre ve işleme esasına göre gibi birçok farklı şekilde yapılabilir. Yapılarındaki kimyasal bağa bağlı olarak polimer matrisler termoset ve termoplastikler olarak ikiye ayrılabilir. Günümüzde endüstriyel alanda ve günlük yaşamda birçok uygulamada kullanılan polimer matrisli kompozitlerin (PMK) hafif yapıları, korozyona karşı dirençleri, iyi mukavemet ve iyi aşınma dayanımı nedeniyle malzeme biliminde önemli bir yeri vardır.

1.3.2.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik basit anlamıyla çok yüksek sıcaklıkta pişirilmiş toprak, daha teknik tanımıyla bir veya birden fazla metalin, metal olmayan elementlerle birleşmesi sonucu elde edilen organik olmayan bileşiktir [17]. Yüksek sıcaklık matrisleri arasında sayılan

seramik matrislerin en önemli özellikleri sıcaklığa dayanımları, erozyon ve aşınma dirençleridir. Endüstriyel fırınlar, elektronik ve optik cihazlar gibi yüksek ısıya maruz kalınacak uygulamalarda seramik matrisli kompozitler (SMK) tercih edilirler. Bu kompozit türünün mukavemetleri çok yüksek olsa da çok sert ve gevrek yapıda olmaları, kırılma direncini artırması nedeniyle uygulama alanlarını kısıtlamaktadır.

Seramik matrisli kompozitlerin (SMK), polimer matrisli kompozitlere göre yüksek sıcaklıkta bozulmamaları ve metal matrisli malzemelere göre daha düşük yoğunluk özelliği, SMK'ları tercih sebebi yapmaktadır. Seramiklere silisyum karbür (SiC), alümina (Al_2O_3), silisyum nitrür (Si_3N_4) gibi fiberlerle takviye edilmesi kırılma tokluklarını artırır.

1.3.2.3. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK), bileşenlerinden biri metal olan kompozitlerdir. Bu tür kompozitlerde kullanılan matrislerden bazıları alüminyum (Al), magnezyum (Mg) ve titanyumdur (Ti). Kullanılan fiberlere örnek olarak karbon ve silisyum karbür (SiC) verilebilir. Metaller saf halde yumuşaktır ve kendi özelliklerini artırmak veya azaltmak için takviye edilirler. Örneğin, silikon karbid fiber takviyesiyle metallerin elastik rijitlik ve mukavemetinin artırılması bu uygulamalardandır. Alüminyum gibi düşük yoğunluklu metallerin takviyesiyle yüksek özgül modüllü ve mukavemetli kompozitler elde edilirken, grafit gibi düşük termal genişleme katsayısına sahip fiberlerle takviye edilmesiyle düşük termal katsayılı kompozitler yapılabilir [18].

MMK uygulama alanları arasında uzay bilimleri, askeri, otomotiv ve ulaşım sayılabilir. Uzay mekiği gövde iskeletini desteklemek için boron/alüminyum tüpler kullanılır. Bu malzeme kullanımı ile uzay mekiğinde 145kg'dan fazla ağırlıkta azalış sağlanırken, termal izolasyon gereksinimleri de azalır [18].

2. ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Giriş

Plastikler uzun yıllardır tribolojik uygulamalarda artarak kullanılmıştır. Bu süreçte yapılarının iyileştirilmesi adına birçok çalışma yapılmıştır. Mevcut malzemelerin olumsuz yanlarını iyileştirmek adına bu çalışmalar sonucu ortaya çıkan kompozit malzemelerle, plastiklerin kullanım alanı önemli derecede artmıştır. Kompozit malzemelerin büyük bir grubunu oluşturan elyaf takviyeli polimerler (ETP), tasarımcı ve üreticiler tarafından amaçlarına uygun şekilde çok yönlü olarak kullanılmıştır. Farklı malzemelerin liflerle takviye edilmesiyle çeşitli özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanarak birçok deneysel çalışma yapılmıştır. İlk uygulamalarının eskilere dayanıldığı bilinen ETP malzemelere örnek olarak, bitkisel elyaf ve samanın kerpiçe karıştırılması, hayvansal lif ve kılların alçı gibi malzemelerle karıştırılması verilebilir.

ETP malzeme en basit haliyle iki fazlı bir malzeme olarak adlandırılabilir. Kompozitin sürekli fazı olan matris malzeme, kompozitin hacimsel oranının büyük kısmını oluşturduğu için ve takviye liflerin bir arada durmasını sağladığı için ana bileşen olarak adlandırılabilir. Matris fazı olarak kullanılan polimerler termoset veya termoplastik esaslı olarak ikiye ayrılırlar.

Lif şeklinde adlandırdığımız kuvvetli takviye malzemeleri ise ikinci fazı oluşturur. Takviye elemanı olarak kullanılan bu lifleri sentetik elyaflar ve doğal elyaflar olarak ayırabiliriz. Karbon, aramid, cam vb. elyaflar sentetik elyaflar arasındadır. Doğal liflere örnek olarak ise sisal, viskoz, jüt, hindistan cevizi, kenevir, muz, kauçuk vb. verilebilir. Elyaf takviyeli kompozitlerde lifin yük taşımaya katılabilmesi için matris üzerindeki yükün liflere iletilmesi gerekir. Bu iletim, liflerle matris arasında herhangi bir kimyasal bağ olmadığından kayma gerilmeleri ile gerçekleşir.

ETP malzemelerin çekme, eğilme ve çarpma dayanımları oldukça yüksektir. Buna bağlı olarak yüksek mukavemetli olan elyaf takviyeli malzemeler hafif olması

sebebiyle önemli derecede enerji tasarrufu sağlamaktadır. Havacılık, uzay sanayiinde, otomobillerde, sualtı borularda, rüzgar türbinlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

2.2. Reçine Malzemeleri

Reçine, kompozitlerde önem taşıyan bir başka bileşendir. İç yapılarına göre reçineler termoplastik reçineler ve termoset reçineler olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Termoplastikler, düz ya da dallı zincirlerden oluşmuş polimerler olup, zayıf bir yapıya sahiptir. İkinci dereceden Van der Waals bağlarıyla bağlanan termoplastikler yanal bağların zayıf olması itibarıyla, yüksek sıcaklıklarda yumuşamaktadır. Sıcaklık azaldığında ise tekrar sertleşirler ve bu değişim, sıcaklık etkisiyle tekrar tekrar gerçekleşebilir. Yükselen sıcaklıkla yumuşamaları sebebiyle termoplastiklerin kullanım sıcaklıkları da düşüktür. Termoplastik reçinelere örnek olarak akrilikler, poliamid (PA) diğer adıyla naylon, polipropilen (PP), polietereketon (PEEK), polifenilen sülfid (PPS) verilebilir. Termosetler ise monomer moleküllerin kimyasal reaksiyonlar sonucunda birbirine yanal bağlarla bağlanması ile meydana gelirler. Kovalent bağlarla bağlanmış termosetler oldukça rijit özellik sergilerler. Yüksek sıcaklıklarda şekillendikten sonra geriye dönüşü yoktur ve bu sebeple tekrar ısıtılıp yumuşamaz, yeniden şekillendirilemezler. Fenolik reçineler, polyester, silikon, alkid ve epoksi reçineler termoset malzeme grubuna girmektedir [19].

2.2.1. Termoplastik esaslı reçineler

Termoplastikler ikinci dereceden Van der Waals bağlarıyla bağlanarak oluşurlar. Termoplastik bir reçine oda sıcaklığında katı haldedir, ısıtıldığında erir ve tekrar soğutulduğu zaman katılaşır [10].

Bu malzemeler oda sıcaklığında yüksek viskoziteye sahiptirler. Belirli ısı ve basınç altında yumuşarlar ve böylece kolay tamir edilebilir. Termoplastiklerin yapışkan olmayan yapıları sayesinde işlenmesi kolaydır. Termosetlerin aksine yeniden işlenebilme özellikleri ile geri dönüşüm kabiliyetleri vardır. Sertleşmeleri için organik çözücülere ihtiyaç duymazlar. Çok kısa kürlenme süreleri olan termoplastikler aynı zamanda soğutucu olmadan depolanabilme özelliğine sahiptirler [18].

Oda sıcaklığında yüksek viskoziteye sahip oldukları için, matris malzemesi olarak kullanıldığında, uygulamada lifler ile arasındaki bağların kurulmasını termosetlere kıyasla daha zordur [19]. Termoplastiklerin yüksek üretim sıcaklığı, viskozitesi ve yüksek basınç ihtiyacı üretimlerini zorlaştırmaktadır. Bu da imalat açısından maliyeti artırmaktadır. Termosetlere göre daha dayanıklı olan termoplastikler, geliştirilmiş takviye uygulamaları ile her geçen gün kullanımını artırmaktadır. Termoset reçinelerin aksine yarı sıvı haldeyken şekillendirilip kalıplanabilirler.

Kompozitlerde, termoplastik reçineler özellikle elyafla takviye edildiğinde çok avantajlı özellikler sunmaktadırlar. Son yıllarda ürün performansını artırmak, üretim maliyetlerini düşürmek isteyen tasarımcı ve üreticiler termoplastik kompozitlere yönelimini artırmışlardır. Sert ve parlak olarak nitelendirilen termoset reçinelere karşın termoplastik reçineler daha sağlam ve darbeye karşı dayanıklıdırlar. Termoplastik reçinelerden yapılan kompozitler, özellikle otomotiv piyasasında geri dönüştürülerek kullanılmaktadır [7].

Poliasetal (POM) olarak bilinen termoplastik malzeme yüksek rijitlik, dayanım, tokluk ve aşınma direnci gibi özelliklere sahiptir. Ergime noktası 180°C olan POM malzemenin nem alma kapasitesi de düşüktür. Bu özellikleri ile otomobil parçaları, pompa parçaları vb. üretimlerinde kullanılırlar [17]. Termoplastiklere bir başka örnek de günlük kullanımda teflon olarak bilinen Politetrafloretilen'dir (PTFE). Kimyasal ve çevresel etkilere karşı oldukça dirençli olan teflon, düşük sürtünme direncinden dolayı yağlanamayan parçaların üretiminde sıklıkla tercih edilirler. Gıda ve kimya sektöründe de kullanılmaktadır [17].

Diğer bir termoplastik reçine ise elastiklik modülü ve aşınma direnci yüksek olan poliamiddir (PA). Mekanik özelliklerini 125°C'ye kadar koruyabilen PA, kendi kendini yağlama özelliğine de sahiptir. En önemli örneği ise naylon ailesidir (Naylon 6, Naylon 6.6) [17].

Polifinilen sülfür (PPS) de bir başka termoplastik reçine olarak otomotiv sektöründe, elektronik komponentlerde kullanılmaktadır. Mukavemette iyi denge, yüksek ısı derecelerinde kullanılabilme, kimyasal dayanım gibi özellikleriyle PPS malzemenin kullanımını artırmaktadır. Bu ve bu gibi bazı termoplastik esaslı reçinelere ait özellikler Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Termoplastik reçinelerin mekanik ve termal özellikleri [17].

Reçine Adı	Öz Kütle (g/m ³)	Çekme Muk. (MPa)	Elastik Mod. (MPa)	Sıcaklık Sınırı (°C)
Poli-Etilen (PE) (düşük yoğunluk)	0.92-0.93	7-17	105-280	80
Poli-Etilen (PE) (yüksek yoğunluk)	0.95-0.96	20-37	420-1260	100
Poli-Vinil-Klorür (PVC)	1.50-1.58	40-60	2800-4200	110
Poli-Propilen (PP)	0.90-0.91	50-70	1120-1500	105
Poli-Stiren (PS)	1.08-1.10	35-68	2660-3150	85
Akronitril-Butadien-Streyn (ABS)	1.05-1.07	42-50	-	75
Poli-Met-Metha-Arkilik (PMMA)	1.11-1.20	50-90	2450-3150	125
Poli-Tetra-Flor-Etilen (PTFE)(Teflon)	2.10-2.30	17-28	420-560	120
Poli-Amid (PA) Naylon 6.6	1.06-1.15	60-100	2000-3500	82

2.2.2. Termoset reçineler

Termoset reçineler rijit polimerler açısından önemli bir sınıftır. Yüksek sıcaklıklarda çapraz bağlanma ile sertleşen termoset malzemeler kalıcı olarak sertleşir ve ısıyla tekrar ayrıştırılamazlar. Termoset reçineler, doğru materyallerle takviye edildiğinde teknolojinin geliştirdiği en dayanıklı malzemeler arasına girebilmektedir. Kompozit endüstrisinde kullanılan en yaygın reçineler termoset reçinelerdir. Polyester, epoksi, fenolik reçineler, vinilester bu gruba giren termoset reçinelerdendir.

Bazı termoset reçinelerin genel özellikleri Tablo 2.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Bazı termoset reçinelerin özellikleri [19].

Özellik (Birim)	Polyester reçine	Epoksi reçine	Fenolik reçine
Kalıplama sıcaklığı (C°)	20-150	20-185	135-175
Kalıplama basıncı (MPa)	0-0.8	0-13	0.1-14
Çekme dayanımı (MPa)	125-455	245-595	60-350
Çekme modülü (GPa)	7-20	14-25	8-17
Devamlı sıcaklık dayanımı (C°)	95-175	105-150	120-260
Basınç dayanımı (MPa)	140-410	240-550	235-520

2.2.2.1. Polyester reçine

Polyester reçineler, denizcilik endüstrisi başta olmak üzere birçok alanda en yaygın kullanılan reçine çeşididir. Polyesterler çok iyi korozyon direncine sahiptir ve bunun yanı sıra maliyetleri oldukça düşüktür. Çalışma sıcaklıkları epoksilerden daha düşüktür. Polyesterler, kompozit endüstrisinin bütün segmentlerinde sınırsız denebilecek kullanışlılığa sahiptirler [20].

Cam takviyeli plastiklerin imalatında en çok kullanılan matris malzemelerinden olan polyester reçineler, doymuş ve doymamış polyesterler olarak iki grupta toplanırlar. Doymuş polyester reçineler, termoplastik özellikler gösterirler. Enjeksiyon kalıplamada ve elyaf üretiminde kullanılan malzemelerdir [19].

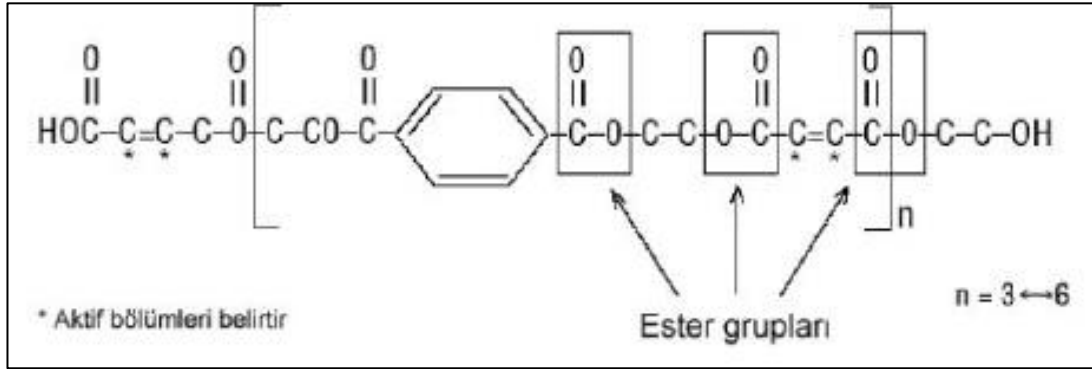
Doymamış polyesterler ise termoset özellik gösterirler ve uygun bir katalizör aracılığıyla yapı oluştururlar. Cam takviyeli plastiklerin üretiminde matris malzemesi olarak en çok doymamış polyesterler kullanılır. İyi mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleriyle bilinen doymamış polyesterler kullanım amacına göre tasarım, işleme ve üretim kolaylığı sebepleriyle tercih edilirler. Aynı zamanda boya ve benzeri katkı maddelerini kabul ederler. Olanakları geniş, kullanım alanları fazla ve ekonomik malzemelerdir [19].

Temel doymamış polyester malzeme bir diolün tepkimeye giren çift karbon-karbon bağı içeren bir diolün tepkimesi ile meydana gelmektedir. Örneğin; etilen glikol ve maleik asit tepkimeye girerek doğrusal polyester oluştururlar. Düşük viskoziteye sahip olan doymamış polyesterler, yüksek miktarda dolgu maddesi ve güçlendiricilerle karıştırılabilirler. Birçok işleme seçeneği olan bu polyester çoğunlukla kalıplanırlar. Otomobil panelleri gibi büyük parçalar için ise basınçlı döküm diğer bir üretim yöntemidir [20].

Polyester reçinelerden ortoftalik polyester reçine günümüzde sıkça tercih edilen ekonomik bir reçinedir. Ortoftalik polyesterler, maleik anhidrit veya fumarik asidin ftalik anhidridin bir araya gelmesiyle oluşurlar [10].

İsoftalik polyester reçineler ise diğer bir polyester çeşididir. Denizcilik sektörü gibi su direncinin yüksek olması gereken alanlarda, gemi iskeleti, boru gövdelerinde

kullanılmak üzere tercih edilirler. İzofталık polysterler, izofталık asit veya tereftalik asit ile yapılır [10].



Şekil 2.1. İzofталık bir polyster reçinenin kimyasal yapısı [21]

Polyester reçineler, kendisiyle kopolimerize olacak ve reçinenin özelliklerine katkıda bulunacak monomerde çözülürler. Bu monomerlerden en yaygın olanı stirendir. Bu gibi reaktif eklentiler reçinenin sertleşmesine, viskozitesini düşürerek kolay işlenmesine katkıda bulunur [10].

Polyesterler monomer içerisinde çözüldüğünde, oda sıcaklığında jelleşmeye başlarlar. Bunu önlemek ve polyester ömrünü artırmak adına inhibitör eklemesi yapılır. Kullanılan başlıca inhibitörler hidrokınon, t-bütıl katekol ve süstitüe benzokınonlardır. İnhibitörler genellikle redükleyici özellikteki kimyasal maddelerdir ve reçinenin polimerizasyonunu önlerler. Polimerizasyon işleminin uygun sürede gerçekleşmesi adına reçinenin içerisine katalizör eklemesi yapılır. Polyesterin iyi performans göstermesini sağlamak için katalizörler, hızlandırıcılarla birlikte kullanılırlar. Hızlandırıcılar, katalizör malzeme ile reaksiyona girerler ve polimerizasyon reaksiyonunu hızlandırırılar. İnhibitörler reçineye belirli bir raf ömrü sağlarlarken, hızlandırıcılar katalizörlerle birlikte sertleşmeyi çabuklaştırırılar [7]. En sık kullanılan katalizörlerden biri metil etil keton peroksit (MEKP) ve benzoil peroksittir. Kullanım miktarları ise %1-2 arası değişmektedir.

Polyester reçineler saf hallerinde yüksek korozif dayanıma ve suya karşı mukavemete sahiptirler. Polyester reçineler kompozit endüstrisinin önemli bir elemanıdır ve kullanılan bütün reçinelerin %75'i gibi büyük bir oranını oluşturmaktadırlar.

Polyester reçinelerin avantajları arasında düşük maliyeti, boyutsal kararlılığı, taşıma, işleme ve imalat kolaylığı sayılabilir. Polyester reçineler hangi üretim metoduyla uyumlu olması isteniyorsa ona göre formüle edilebilirler. Bu özellikleriyle çok yönlü oldukları bilinen polimerler aynı zamanda polimer zincirlerinin oluşması esnasında modifiye edilebilirler. Böylece kompozit endüstrisinin hemen hemen tüm bölümlerinde sınırsız kullanım alanına sahiptirler. Polyester reçinelerin en büyük avantajlarından bazıları da güçlü mekanik, elektriksel ve termal özellikleridir.

2.2.2.2. Epoksi reçine

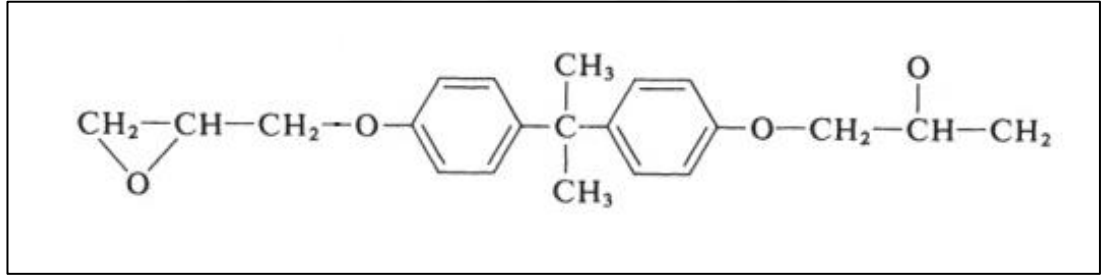
Liflerle takviyelenmiş kompozitlerde kullanılan diğer bir termoset grubu malzemesi epoksi reçinelerdir. Epoksi reçineler, üstün özellikli kompozitlerin üretiminde etkin rol oynayan ve sertleşme esnasında hiçbir yan ürün çıkarmayan malzemelerdir. Sertleşme sonunda meydana gelen madde, üstün kimyasal, mekanik ve elektriksel özelliklere sahiptir ve her türlü elyafla birlikte kullanılabilirler. Epoksi reçineler, spesifik performans özellikleri elde etmek adına farklı şekillerde formüle edilebilirler veya diğer epoksi reçinelerle karıştırılabilirler. Epoksi reçineler, laminat ve döküm uygulamalarında kullanılmaktadır. Uygulamaların çoğunda, uygun ürünü elde etmek adına, reçine ile sertleştirici birlikte kullanılır. Her bir sertleştirici farklı sertleşme profili sergilerler ve nihai ürüne farklı özellikler katarlar. Birinci ve ikinci derece aminler, poliaminler ve organik anhidritler sık kullanılan sertleştiricilerden bazılarıdır [19,7].

Epoksilerin yapısına baktığımızda, sıvı haldeki epoksi reçineler, sahip oldukları düşük moleköl ağırlıkları onlara üstün moleköl hareketliliği verir. Bu özellikleri ile epoksi reçineler yüzeyleri kolayca ıslatabilir ve güçlendirilmiş malzemeler için yapışkan olarak kullanılmaya olanak sağlar. Düşük viskoziteye sahip olan epoksiler bu özellikleriyle elektrik devrelerin kaplanması için kullanılırlar [22].

Epoksi reçinelerin kürlenme sıcaklıkları, kolayca ve hızlı bir şekilde kullanılan sertleştiricilerin özelliklerine bağlı olarak 5°C ile 150°C arasında değişmektedir. Bu reçinelerin polyester malzemeyle kıyaslandığında sağladığı önemli bir avantaj, sertleşme sırasında %1-2 oranındaki düşük çekme (büzüşme) özelliğidir [19].

Epoksi reçineler iyi yapışmaları ve iyi mekanik, kimyasal direnç özellikleri nedeniyle koruyucu ve süs kaplaması olarak birçok uygulamada kullanılırlar [22]. Otomotiv, denizcilik, elektrik-elektronik ve diğer farklı sektörlerde yer alan epoksiler popüler olmalarının yanında üstün performans istenildiğinde ek işlemler gerektirdiğinden maliyetleri diğer polimerlere göre yüksektir. Yüksek maliyetine rağmen kullanılmalarının nedenlerinden bazıları şu şekilde sıralanabilir [18];

1. Yüksek mukavemete sahiptirler.
2. Düşük viskozite, düşük akım hızları sayesinde fiberlerin iyi ıslanmasına izin verirler ve işleme sırasında fiberlerin kaymasını önlerler.
3. Kurlenme sırasında düşük uçuculuk göstermesi.
4. Belirli işleme gereksinimlerini karşılamak üzere çok fazla sınıfın mevcut olması.
5. Düşük büzülme oranlarıyla, epoksi ve takviye arasındaki bağda oluşan büyük kayma gerilmelerinin artma eğilimini azaltması.



Şekil 2. 2. Tipik epoksi reçinenin kimyasal yapısı [21]

2.2.2.3. Fenolik reçine

Fenolik reçineler ya da fenol-formaldehit reçineler bu yüzyılın başından beri kullanılan sanayideki ilk termoset plastik malzemedir. Çoğunlukla fenolün formaldehit ile kondensasyon reaksiyonu sırasında sertleşmesiyle meydana gelirler. Bu reaksiyon sırasında ortamdan uzaklaştırılması gereken su açığa çıkar. Sertleşme, ısı enerjisiyle gerçekleşmektedir. Laminat ve kalıplama işlemleri için ise basınca ihtiyaç vardır. Reaksiyon sonucu ortaya çıkan su, özel işlemlerle buhar çıkışı sağlanarak ortamdan uzaklaştırılır [7, 19].

İki yaygın fenol reçineye örnek olarak novolak ve resol verilebilir. Novolak reçineyi çapraz bağlamak için gerekli sıcaklık 120°C ile 177°C arasındadır. Bu çapraz bağları oluşturmak için ana katalizör olarak hekzametilen tetramin (HMTA) kullanılır. Asidik katalizörle hazırlanırlar [22].

Diğer bir çeşidi ise reaktif bileşen olan ve katalizöre ihtiyaç duymadan kendi kendine sertleşebilen resoldür. Resol, formaldehit ile bazik bir katalizör kullanılarak hazırlanırlar. Fenolik reçinelerin elektrik özellikleri, ısı stabiliteyi, suya ve alkaliler dışındaki kimyasallara karşı dayanımları oldukça iyidir. Bu reçineler 300°C'ye kadar sürekli kullanılabilirler. Asbest lifleriyle takviye edildiklerinde ise kısa süreli olarak 1000°C'ye kadar kullanılırlar [23,24].

Fenoliklerin yapısal özelliklerini incelemek gerekirse, yüksek sıcaklık dayanımı, yük altında boyutsal stabilite, korozyona karşı dayanım, ses geçirmezlik, çok iyi alev dayanımı gibi özellikleri sayabiliriz. Fenolikler, cila ve izolasyon endüstrisinde, otomotiv ve elektrik uygulamalarda, elektrik kablolarında, telefon iletim sistemlerinde kullanılırlar. Hidrolik fren ve nakil paralarında, düğme ve frenlerde de kullanımları yaygındır. Neme karşı dirençli olmalarından ve yüksek ısıya dayanımlarından ötürü ağaç kaplamalarında da kullanılırlar [22].

Reçinenin ileri düzeyde polimerizasyon reaksiyonu ile hazırlanan fenolik prepregler, uçak endüstrisinde kullanılırlar. Özel solüsyon içerisinde çözüldükten sonra cam veya karbon takviyesi ile doldurulur. Sonrasında solüsyonundan arındırılarak yüksek sıcaklık ve basınçta kalıplanırlar. Önceki zamanlarda kullanımının çok pratik olmadığı öne sürülen fenolik kompozitler, yeni tekniklerle geliştirilip, yeni uygulamaların kapısını açmıştır [7].

2.2.2.4. Vinilester reçine

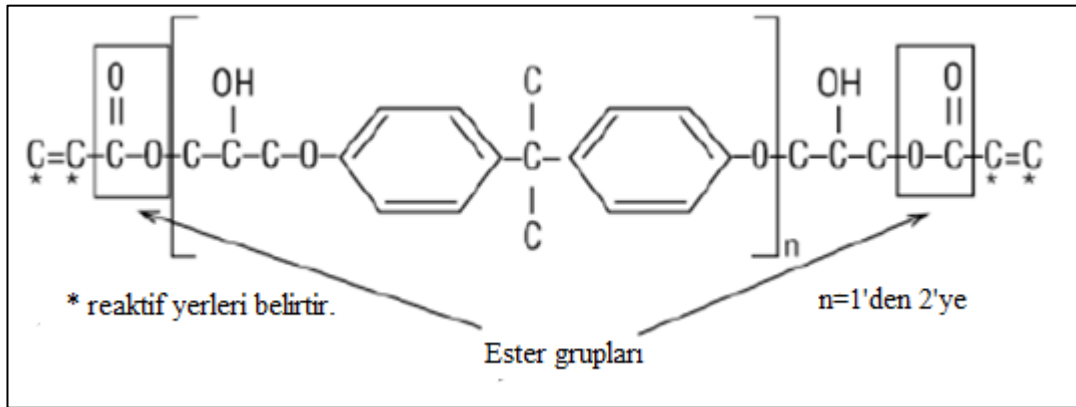
Vinilester reçinler, polyester reçinelere benzer bir biçimde üretilirler. Bu reçine, epoksi reçinelerin işlenebilirliğinden ve polyesterlerin hızlı sertleşmesi özelliğinden yararlanmak adına geliştirilmiştir. Vinil esterler, polyesterlerden daha yüksek fiziksel özelliklere sahiptir ve aynı zamanda epoksilerden daha az maliyetlidirler. Vinilester reçinelerin üretimi için, akrilik esterler bir stiren monomerinde çözündürülür. Metil

etil keton peroksit ve kobalt naftanat gibi organik peroksitlerle ise sertleşmesi sağlanır. Vinilester içeren bir kompozit, yüksek tokluk talebine dayanabilir [10].

Vinilester reçineler mekanik dayanımı iyi, korozyona karşı dirençli bir reçine türüdür. Aynı zamanda kimyasal dayanımı ve sertliği ile yapısal avantaj sağlarlar. Çoğunlukla epoksi reçineden reçineden yapılan, akrilik ester veya meta akrilik asit içeren vinilester reçineler kimya tesislerinde, borularda ve depolama tanklarında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Alev geciktirici özellik gereksinimi olduğu durumlarda ise üretiminde bromlu reçineler kullanılır. Vinil esterler mekanik dayanım ve iyi korozyon dirençleri sayesinde epoksi reçinelerdeki gibi karmaşık üretim aşamalarına veya özel kullanım becerileri gerektirmezler [7,24].

Vinilesterlerin içeriğindeki ester grupları hidroliz yoluyla suyun bozulmasına karşı hassastırlar ve bu özellikleri sayesinde suya ve diğer kimyasallara polyester muadillerine kıyasla daha iyi direnç gösterirler. Bu nedenle boru hatları ve kimyasal depo tanklarında rahatlıkla kullanılabilirler. Hasara daha az eğilimleri olan vinilester reçineler bazen tekne gövdesi gibi suya batırılacak bir polyester laminat için kaplama olarak da kullanılabilir [25].

Aşağıdaki şekilde tipik bir vinilesterin idealize kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Vinilester reçinesinin kimyasal yapısı [25]

2.3. Takviye Malzemeleri

Elyaf takviyeli kompozitlerin imalatında farklı kaynaklardan elde edilen, değişik özellikler gösteren lifler kullanılmaktadır. Kullanılan bu lifler farklı boy ve biçimlerde olabilirler. Bu bölümde takviye elemanı olarak kullanılan elyaflardan bazılarını ele alacağız.

2.3.1. Cam elyaf

Cam lifleri veya diğer bir deyişle cam elyafı (CE), elyaf takviyesi olarak kompozitlerde en çok kullanılan donatı malzemesidir. Çeşitli matris malzemeleriyle kullanılmasına rağmen, temel kullanım alanı cam elyaf takviyeli plastiklerdir (CTP). Takviye malzemeleri içinde, tüketim ve satış miktarları baz alındığında, en geniş ölçüde kullanılan takviye elemanı cam elyafıdır. Cam elyafların üretimi ticari anlamda 1930'lu yıllarda İngiltere'de başlamıştır. Cam elyafların plastik malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılması ise 1950'lerin başında gerçekleşmiştir. 1960'lı yılların başlarında ise Sovyetler Birliği'nde cam elyafı, çimento kompozitlerinin donatılmasında kullanılmıştır [19].

Farklı uygulamalar için ve değişik kompozisyonlarda kullanılmak amacıyla birçok eltaf tipi vardır. Kullanılan camın tipine göre farklı özelliklerde cam elyaf tipleri oluşturulabilir.

Tablo 2.3. Çeşitli cam elyafların bazı özellikleri [23,24]

	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Çekme dayanımı (Mpa)	Kopma uzama oranı (%)	Çekme E- modülü (Gpa)	Kırılma indisi	Isıl genleşme katsayısı (cm/cmK ^o)	Lif çapı (mm)	Yumuşama noktası (C ^o)
E-Camı	2,54	3600	4,8	76	1,548	1,6 x 10 ⁻⁶	3-20 x 10 ⁻³	850
A-Camı	2,45	3100	-	72	1,512	-	-	700
M-Camı	2,89	3500		111,3	1,635			
S-Camı	2,49	4500	5,4	86	1,523	1,7 x 10 ⁻⁶	3-13 x 10 ⁻³	-
C-Camı	2,45	3400	4,8	70		2,2 x 10 ⁻⁶	-	690
D-Camı	2,16	2450		53	1,47	3,1 x 10 ⁻⁶		770
R-Camı	2,58	4400	-	85	-	-	-	990

- E-camı: Çok az alkali içerikli borsilikat camıdır. Üstün elektriksel ve mekanik özellikleri vardır. Uygulamada en çok tercih edilen takviye malzemesidir. Yalıtım özellikleri iyidir.
- A-camı: Yüksek oranda alkali içerirler. Düşük maliyetlidirler. E camına göre daha az kullanılırlar. E camındaki gibi mukavemet, elektrik dayanımı gibi özelliklerin gerekli olmadığı durumlarda tercih edilirler.
- M-camı: Yüksek elastik modülüne sahiptirler.
- S-camı: Alminyum ve magnezyum oksit miktarı E-camına kıyasla daha yüksektir. Yüksek mukavemetli bu cam türü E-camına göre daha büyük çekme mukavemetine ve çekme modülüne sahiptir. Savunma sanayi uygulamalarında sıkça kullanılırlar. Özel uygulamalar için yüksek mekanik özellikler arandığında tercih edilirler.
- C-camı: Cam liflerinin yapımında kullanılırlar ve cam takviyeli plastikler (CTP) için yüzey tülünün üretiminde tercih edilen cam türüdür. Bu malzemenin kimyasal dayanımı oldukça yüksektir. Depolama tankları gibi uygulamalarda kullanılırlar.
- D-camı: Özel amaçlı cam elyaflar arasında yer alan D-camı düşük dielektrik sabitine sahiptir. E-camına kıyasla daha düşük dielektrik sabitine ve daha düşük dielektrik kayıp tegetlerine sahiptirler. Günümüzde piyasadaki PCB laminatlarını güçlendirmede en etkili sonucu veren ve tercih edilen cam türüdür. Düşük hacimlidirler ve maliyetleri yüksektir. Mekanik özellikleri E camına göre düşük olmasına rağmen düşük dielektrik özelliğinden dolayı elektronik uygulamalarda sıklıkla tercih edilirler.
- R-camı: Özel uygulamalar için çok yüksek mekanik özelliklere sahip bir diğer cam türüdür. Üstün özellikleri nedeniyle havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılmaktadır. Asidik korozyon dayanımı ve mukavemetin gerekli olduğu uygulamalarda tercih edilirler. Yüksek çekme dayanımına sahiptirler. Maliyeti yüksek olduğundan genellikle özel uygulamalarda kullanılırlar [7,19,26,27].

Cam elyaf üretiminde farklı çaplarda cam lifleri oluşturmak mümkündür. Bunu elde etmek amacıyla camın cinsi, camın viskozitesi, işlem sıcaklığı ve çekme hızları gibi etkenler değiştirilir. Cam üretim prosesi, özel formülasyon ve içeriğe sahip camların eritilmesiyle başlar. Erimiş cam çeşitli yöntemlerle şekil verilip soğutulur ve cam lif şekline getirilir. Bu esnada sarma hızı, kovan boyutu, sıcaklık gibi değişkenler elyafın çapını belirler. Polimerlerde takviye elemanı olarak kullanılan cam elyaflar ticari olarak 2.5 µm ile 20 µm arasındaki kalınlıklarda piyasaya sürülürler. Yaklaşık 400 adet liften oluşan bir cam lifi demetinin 1000 metre uzunluğunun gram cinsinden değeri “teks” olarak adlandırılır. Cam elyafın üzerindeki organik bağlayıcıların kaldırılmasını sağlamak amacıyla ısıtılması sonucu, elyafın üzerinde kalan bağlayıcı miktarının yüzde olarak ağırlık kaybına “kızdırma kaybı” denmektedir [7,19].

Cam lifleri genellikle bir uygulamada, belirli boylarda lif kırıntıları ve sürekli lifler halinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra cam lifi keçeler ve dokumalar bu kırıntı ve sürekli liflerin kullanılmasıyla üretilirler. Devamlı fitil, kırılmış demet, cam keçe ve cam dokuma, kompozitlerin üretiminde kullanılan başlıca cam lifleridir [24];

- Devamlı fitil, bir veya daha fazla sayıda cam lifi demetinden oluşur. Bükümsüz olarak sarılmış bobinler halindedir. Bobinlerin boyutları, içerdikleri demet sayısı ve kullanılan camın özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir.
- Kırılmış demet, boyları genellikle 3 mm ile 50 mm arasında değişiklik gösteren cam lifidir. Cam lifi demetler, kompozitlerin üretiminde donatı ve dolgu malzemesi olarak kullanılırlar. Laminatların yüzeyinde dayanımı artırılırlar.
- Cam keçe, özellikle CTP üretiminde kullanılırlar. Sürekli demet veya fitilden kırılmış, genellikle 50 mm’lik cam liflerinin, birbirleri üzerine gelişigüzel dağılımla eklenerek üretilirler.
- Cam dokuma, cam fitillerden ve bükülmüş ipliklerden üretilir. Bu fitiller, bağlayıcı bir eleman kullanılarak dokumaya uygun hale getirilirler. Cam lifi dokumada genellikle E-camı kullanılır. Kimyasal dayanımın artırılması istenen durumlarda ise C-camı liflerden yararlanılmaktadır.

Tablo 2.4. Değişik türde cam elyaf takviyeli polyesterlerin özellikleri

	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Isıl genleşme katsayısı (10 ⁶ .cm/cmK ^o)	Isı iletkenlik katsayısı (W/m K ^o)	E- modülü (N/mm ²)	Çekme dayanımı (N/mm ²)	Özgül ısı (Wh/kgK ^o)
Cam lifi	2,57	5-7	0,74	70 x 10 ³	3000	0,17
Keçe %30	1,5	25	0,21	8 x 10 ³	100	0,31
Keçe %40	1,6	20	0,23	10 ⁴	140	0,28
Dokun. Fitol %60	1,8	12	0,26	1,9 x 10 ⁴	350	0,22

Cam elyafların polimerlere katkı malzemesi olarak kullanılmasının birçok sebebi ve avantajı vardır [22];

- Yüksek mukavemet: Cam elyaf takviyeli malzemeler, takviyesiz hallerine göre daha mukavemetlidirler. Cam elyaf oranı uygun şekilde arttıkça, malzemenin mukavemetinde artış görülür.
- Çekme mukavemetleri yüksektir.
- Kimyasal malzemelere ve kimyasal ortamlara karşı dirençlidirler.
- Çok iyi elektriksel özelliklere sahiptirler. Yüksek dielektrik mukavemeti, düşük dielektrik sabiti ile yalıtım uygulamalarında rahatlıkla kullanılırlar.
- Düşük maliyet ile birlikte yüksek performans gösterirler.
- Nem direnci: Cam elyaflar nemi ve küfü absorbe etmezler.
- Termal özellikler: Cam elyaflar yanıcı değildir. Düşük termal genleşme katsayıları vardır. Yüksek termal iletkenliğe sahiptirler.
- Boyutsal kararlılık: Kullanıldıkları kompozitlerde, çeşitli mekanik baskılar altında şekillerini ve işlevselliklerini korumalarını sağlar.
- Elastiklik: Hooke kanununa uyarlar.

2.3.2. Karbon elyaf

Karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu anlaşıldıktan sonra karbon lifi üretilmiştir. Cam elyaf kullanımı ile sağlanamayan yüksek sertlik özelliği, cam elyaftan 3-5 kat daha sert olan metallere yönelmiştir. Karbon elyafı epoksi matrisler

ile birleştirildiğinde iyi dayanıklılık ve sertlik özellikleri sağlanır. 1965'ten sonra geliştirilen karbon elyafı, kompozit teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Cam elyaflardan daha sonra gelişen karbon karbon elyaflar, cam elyafına göre daha hafiftirler ve düşük yoğunluktadırlar. Karbon elyafları amorf yapıda ve kısmen kristallerdir. Karbon elyaflara çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaf kömürleşir ve grafit yapı meydana gelir. Grafit oranı %0-100 arasında olabilir ve grafit oranı çoğunluğu oluşturduğunda grafit elyafı olarak isimlendirilir. Isıl işlemlerin farklı sıcaklıklarda uygulanmasıyla farklı mekanik özelliklere sahip karbon elyaflar üretmek mümkündür [22, 28].

İleri teknoloji ürünü olarak pazarın geniş bir bölümünü oluşturan karbon elyaflar piyasada iki şekilde bulunmaktadır [22];

1. Sürekli elyaf: Tel bobin uygulamalarında ve pregreglerde kullanılır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.
2. Kırpılmış elyaf: Basınçlı kalıplarda makine parçaları ve enjeksiyon kalıplamada kullanılırlar. Yüksek sağlamlık ve sertlik elde edilmesine olanak verirler.

Karbon elyaflar genellikle üç hammaddeden imal edilirler. Bunlar rayon, poliakrilonitril (PAN) ve zifttir. Bunlar arasında en popüler olanı yüksek gerilme mukavemeti sebebiyle PAN'dır. PAN fiberler mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla üretimi sırasında boyları beş ile on katı kadar uzatılır. Birkaç aşamalı ısı işlemlerden sonra fiber yapışmasını iyileştirmek ve kompozitlerde takviye olarak kullanıldığında laminer kayma mukavemetini arttırmak için fiber yüzeyi iyileştirilir [18].

Karbon elyaflar yüksek özgül mukavemet ve modül yüksek yorulma dayanımı ve düşük termal genleşme katsayısı gibi avantajlara sahiptirler. Düşük termal genleşme özelliği sayesinde yüksek sıcaklıklarda temel özelliklerini koruyabilmektedirler. Cam elyaflara ve aramid elyaflara göre daha düşük ısı genleşme katsayısına sahiptirler. Karbon elyafları günümüzde hala gelişmeye devam etmekte ve çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyaflar yüksek maliyetleri sebebiyle daha çok uçak sanayinde veya yüksek değerli tıbbi, spor malzemelerinin üretiminde kullanılmaktadır [18,22].

2.3.3. Aramid elyaf

Aramid kavramı bir çeşit naylon olan aromatik poliamid maddesinden gelmektedir. Yapısal olarak karbon, oksijen ve azottan oluşmuş bir organik bileşiktir. Piyasada ise daha çok kevlar ve twaron olarak bilinmektedir [22]. İlk olarak uçak uygulamalarında kullanılan kevlar katı moleküler bir yapıya sahiptir. Daha sonra balistik uygulamalarda da yerini almıştır.

Aramid elyaflar düşük yoğunluk ve yüksek mukavemete sahiptirler ve hasar direncinin yüksek olması beklenen kompozitlerin yapımında kullanılırlar. En sık kullanılan uygulamalar arasında kurşungeçirmez yelekler, inşaat yapıları ve gemi gövdeleridir. Önemli özellikleri arasında yüksek çekme dayanımı, yüksek darbe dayanımı, iyi aşınma dayanımı sayılabilecek olan kevlar elyafların kullanıldığı kompozitler cam elyaflılarına göre %35 daha hafiftir ve camdan daha rijittir [19,29].

Aramid elyaflar, yapısındaki kimyasal bağların izafi konumlarına göre ikiye ayrılırlar. Bunlar Meta-aramid ve para-aramidlerdir. Para-aramidler yüksek mukavemetli elyaflar olup kimyasal bağları elyafların uzun yönünde hizalanır. Meta aramidler ise uzun yönde daha az hizalanırlar ve çekme mukavemetleri düşüktür [29].

Kevlar elyafların 1970'li yıllarda Dupont firması tarafından piyasaya sunulan Kevlar 29 ve Kevlar 49 türleri en yaygın kullanılanlarıdır. Bunlardan özellikle Kevlar 49 birçok olumlu özelliğe sahiptirler. Camdan daha hafif ve rijit olan Kevlar 49, fiyat açısından da diğer birçok lif türünden daha uygun fiyatlıdır. Havacılık, denizcilik ve otomobil sektöründe kullanılmaktadır. Kevlar 29 ise yüksek mukavemet ve düşük yoğunluktadır. Kurşungeçirmez yelek, zırh ve kasklarda, halat ve kablo parçalarının imalatında kullanılır [18,19].

Kevlar malzeme, sıcaklığın artmasıyla birlikte boyca kısılma özelliğine sahiptir. Bu liflerin yüksek sıcaklıklarda sünme dayanımı oldukça iyidir. Aramid liflerin korozyon dayanımı iyidir fakat sülfürik aside ve güneş ışınlarına karşı duyarlıdırlar [19].

Tablo 2.5. Kevlar 29 ile Kevlar 49'un karşılaştırılmalı özellikleri [18]

	Özgül ağırlık	Young modülü (GPa)	Maksimum çekme mukavemeti (Mpa)	Eksenel termal genleşme katsayısı ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{C}^\circ$)
Kevlar 29	1,44	62,05	3620	-2
Kevlar 49	1,48	131	3620	-2

2.3.4. Seramik elyaf

Çok yüksek sıcaklıklarda kullanılan seramik elyaflar genellikle 1000°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda refrakter elyaf olarak kullanılır. Genellikle çok kısa kıl şeklindeki seramik elyaflar, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılır. Kompozit uygulamalarda seramik elyaf kullanımı son on yıldan bu yana dikkat çekmektedir. Yüksek termal toleranslara ve korozif direncine sahip olan seramik lifler yüksek sıcaklık uygulamalarında kimi zaman metallerin yerine geçmektedir. Seramik lifler uygulama alanına bağlı olarak farklı formlarda üretilebilir. Bunlar keçe şeklinde, battaniye şeklinde, kağıt veya kumaş şeklinde olabilir. Endüstriyel uygulama açısından seramik fiber takviye edilmiş kompozitler, türbin yanıcıları veya kompresör gibi uçak motor bileşenlerinde, ısı eşanjörlerinde, gaz türbini elemanlarında ve roket nozulları gibi birçok alanda kullanımı vardır. En yaygın kullanılan seramik elyaflar silikon karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) elyaflarıdır [30].

2.3.5. Bor elyaf

Bor elyafı, ticari amaçlı olarak yüksek teknoloji ürünleri arasında piyasaya çıkan ilk ürünlerden biridir. 1960'lı yıllarda üretilmeye başlanan bor elyafı günümüzde özellikle metal matris elemanlarıyla birlikte takviye elemanı olarak kullanılır. Borun kimyasal buharının ince tungsten tellerinin üzerinde yoğunlaştırılması ile üretilen bor elyafı, çok sağlam ve dayanıklı bir takviye malzemesidir. Yüksek yoğunluğa sahiptirler. $100\ \mu\text{m}$ çapındaki bir bor elyafının yoğunluğu $2,6\ \text{g}/\text{cm}^3$ 'tür. Yüksek sıcaklık kapasitesine sahip bor elyafının erime noktası 2040°C 'dir.

Bor elyafı diğer birçok elyafa göre oldukça kalın lif özelliğine sahiptir. Elyaf çapları 0,1 mm ile 0,2 mm arasında değişmektedir. Bu özelliğiyle çekme dayanımları karbon liflerinden yüksek olup 3-4 GPa arasındadır. Elastiklik modülleri ise 380-400 GPa arasındadır. Çok iyi mekanik özelliklere ve düşük yoğunluğa sahip olan bor elyafı, askeri uçaklarda, uzaycılık uygulamalarında, golf, tenis ve bisiklet gibi spor ekipmanlarında kullanılmaktadır. Endüstriyel olarak bor elyafı, bor karbür elyafı ve bor nitrür elyafı olarak bulunmaktadır. Yüksek basma mukavemeti ve burkulmaya karşı direnci olan bor elyafının yüksek maliyetli olması en büyük dezavantajıdır [7,19,30].

2.3.6. Asbest elyafı

Asbest, lifli yapıya sahip doğal bir mineraldir. Yanmazlık özelliğine sahip asbest elyafının esası magnezyum silikattir. En küçük çapı 0.01 μm 'ye kadar düşen asbest liflerinin boyları genel olarak 0.8 mm ile 19-20 mm arasındadır. Literatürde bu liflerin çekme dayanımının 3000 N/mm²'nin üzerinde olduğu söylenilir fakat donatı malzemesi olarak kullanıldığında çok daha düşük düzeylerde olduğu belirtilmektedir. Asbest liflerinin özellikle alkali ortama karşı dayanımları, çimento gibi bağlayıcılarla oluşturulan kompozitlerde çok iyi sonuçlar göstermesini sağlarlar. Asbest liflerinin dayanımı yüksek çeşitlerinden biri olan crocidolite (mavi asbest), insan sağlığı açısından olumsuz özellikler göstermektedir. Bu sebeple uzun süre solunması olumsuz sonuçlara yol açmaktadır ve kullanımı sırasında bazı önlemler alınmalıdır. Asbest lifleri, bu yüzyılın başlarından itibaren çimento kompozitlerinde başarılı sonuçlar doğurmuştur [19].

2.3.7. Metal elyaf

Teknik olarak bir metal fiber, tek başına veya alaşım şeklinde üretilen bir lif çeşididir. Çok uzun yıllar önce kullanılmaya başlanan metalik elyaflar ilk zamanlar altın ve gümüşün çok ince tabakalar halinde dövülüp şeritler halinde kesilmesi ve kumaş halinde işlenmesi şeklinde kullanılmıştır. 1940'lı yıllarda ilk modern metal elyafı üretilmeye başlanmış 1960'lı yılların başında ise geliştirmek için araştırma programları yürütülmüştür. Metal fiberler artık yaygın olarak üretiliyor ve her türlü teknolojide kullanılıyorlar. Çok iyi elektrik ve ısı iletkenliği, termal direnci ve çok iyi EMI (Elektromanyetik girişim) ekranlama özellikleri sayesinde, paslanmaz çelik

fiberler çeşitli alanlarda çok sayıda endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Diğer bir metal lifi olan fecralloy (demir krom alüminyum alaşımı) lifleri yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır ve genelde araç egzoz borularında kullanılır. Metal fiber ve kullanıldığı ürünler, belirli uygulamaların işlevine ve yapısına fayda sağlayan yüksek gözeneklilik gibi özellikler gösterir. Düşük elektrik direnci, onları elektrik iletkenliği gerektiren uygulamalarda tercih sebebi yapar. Metal fiberlerin diğer mekanik avantajları ise şok direnci, yangına dayanıklılık ve ses yalıtımıdır [31].

2.3.8. Bitkisel esaslı elyaflar

Elyaf lar genel olarak doğal ve insan yapımı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bitkisel esaslı lifler doğal liflere girerler ve yüksek selüloz (%65-85) içeriğine sahiptirler. Genelde alçı, kireç ve çimento gibi inorganik bağlayıcılarla üretilen harç ve betonlarda takviye elemanı olarak kullanılırlar. Bitkisel esaslı elyaf kullanımı aslında yerel kaynakların değerlendirilmesi ve atık malzemelerin geri kazanımı ile çok ekonomiktir [19].

Bitkisel liflere örnek olarak selüloz lifleri, hindistan cevizi lifleri, akwara ve sisal lifleri verilebilir. Akwara lifleri, Nijerya’da yetişen ayn isimdeki bitkinin gövdesinden elde edilip kullanılan bir elyaf çeşididir. E-modülü düşük olup 1 kN/mm² civarındadır. Bitkisel esaslı olmasına karşın su ile maruz kaldığında boyutsal şekil değiştirmemektedir [19].

Diğer bir bitkisel elyaf çeşidi ise selüloz elyaflarıdır. Selüloz lifleri kompozitin dayanımını %15-20 oranında olumlu yönde etkilemektedir. Selüloz lifleri, asbest liflerine belirli oranda katılara, birlikte çimento kompozitlerinde kullanılmaktadır. Hindistan cevizi de bitkisel temelli kullanılan elyaf türlerinden biridir. Bu lifler doğa koşullarına son derece dayanıklı olmasıyla birlikte ortamdaki nem seviye değişikliklerinden etkilenmemektedir [19].

Bitkisel lifler düşük yoğunluklu, ekonomik liflerdir. Günümüzde yaprak, tohum, bitki gövdeleri yeşil ve sürdürülebilir kaynak olarak görülmekte ve araştırmalara konu olmaktadır. Ayrıca yenilenebilir kaynak olmaları dolayısıyla geliştirmeye dayalı birçok çalışma hala sürdürülmektedir [19].

2.4. Dolgu Malzemeleri

Dolgu malzemeleri, kompozit malzemenin rijitliğini artırmak, performansını güçlendirmek, sertlik derecesini artırmak ve aynı zamanda maliyeti düşürmek adına kompozite eklenen katı haldeki malzemelerdir. Son ürünün mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen dolgu malzemeleri günümüzde çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Dolgu maddeleri sadece ürün maliyetini düşürmekle kalmaz, takviye ve reçine eklentileriyle elde edilmesi mümkün olmayan performans artışlarını sağlamaktadır. Dolgular kompozit malzemenin içeriğindeki organik madde içeriğini azaltıp inorganik kullanımını artırır. Böylece malzemenin alev dayanımı özelliğini artırır [7].

Dolgu maddesi ilave edilmiş kompozitlerin dolgusuz malzemelere göre çekme dayanımı daha düşüktür. Buna bağlı olarak da kalıplanan parçaların boyutsal stabilitelerini artırmaktadırlar. Dolgu maddeleri aynı zamanda yoğunluğa da direkt etki ederler. Genelde inorganik yapıda bulunsalar da organik yapıda olanları da mevcuttur [7,22].

Dolgu maddelerinin genel özelliklerine değinecek olursak [7,22];

- Maliyet düşürücü etkileri vardır.
- Çekme oranını düşürürler.
- Kullanıldığı malzemeye sertlik, boyutsal stabilite özellikleri katar.
- Isıya dayanımı artırır.
- Laminat malzemenin alev dayanımını artırır.
- Eklendikleri kompozitin su ve hava direncini yükseltirler.
- Farklı tane boyutunda kullanılan dolgu malzemeleri yapının daha homojen olmasını sağlar.
- Reçine ve matris arasında yük dağılımını sağlarlar.
- Uygun oranda kullanıldığı takdirde kürlenme süresini azaltır.
- Elektriksel ve kimyasal özellikleri iyileştirirler.

Dolgu malzemeleri ağırlıklı olarak inşaat, boya, kaplama, kozmetik, ilaç ve plastik malzeme uygulamalarında kullanılmaktadır. Yaygın kullanılan dolgu maddeleri;

kalsiyum karbonat, alminyum oksit (alümina), kil, silika, talk, wollastonit, cam kürecikleri gibi maddelerdir.

2.4.1. Kalsiyum karbonat (CaCO₃)

En yaygın kullanımını olan inorganik dolgu maddelerinden biri kalsiyum karbonattır. Doğada yaygın olarak bulunurlar ve birçok kompozit malzemesine dolgu olarak tercih edilirler. Kalsiyum karbonatlar taş ocağından çıkarılarak bazı işlemler görek kullanıma hazırlanırlar. Bu dolgu malzemesinin çoğunluğu tebeşir, kireçtaşı ve mermer gibi elemanlardan elde edilirler. Reçine sistemleriyle beraber en çok kullanılan dolgu maddesi olan kalsiyum karbonata yüzey işlemi uygulanarak yağ emici özelliği kazandırılabilir [7,22].

Genellikle öğütölmüş halde kullanılan kalsiyum karbonat, maliyeti azaltmak ve malzeme özelliklerini artırmak amacıyla çoğunlukla tercih edilmektedir. Daha çok polivinil klorür (PVC), polipropilen (PP) ve elastomerlerde kullanılmaktadırlar. Kalsiyumkarbonat partikülleri, kauçuk, plastik, boya ve diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar. Kalsiyum karbonatın şekli, boyutu ve içeriği, dolgu malzemesi olarak kullanıldığı kompozitin genel özelliklerini etkileyen faktörlerdir. Boyutsal olarak inorganik dolgu maddeleri, odun liflerinden daha küçüktür. Böylece polimerik matrise kolayca doldurulabilirler [22,32].

CaCO₃ farklı polimer matrislerde kullanıldığında malzeme özelliklerini geliştirmektedirler. Bazı özelliklerini sıralamak gerekirse [22];

- İyi yüzey bitirme özelliği vardır.
- Yüksek darbe direnci ve elektrik direncine sahiptirler.
- Normal plastik işleme koşullarında kararlıdırlar.
- Düşük maliyet.
- Kullanıldığı ürünlerde termal iletkenliği arttırır.
- Termal genleşme katsayısını azaltır.
- Aşındırıcı etkisi yoktur, kolay işlenebilir.
- Malzemeye tokluk özelliği kazandırır.
- Zararsız, kokusuz bir dolgu malzemesidir.

- Geçirgenliği yüksektir ancak son ürünün mekanik ve elektriksel özelliklerinde küçük bir etki bırakabilir.

2.4.2. Cam kürecikler

Plastik endüstrisinde takviye dolgu maddesi olarak kullanılan cam kürecikler malzeme özelliklerini etkilemektedir. Cam kürecikler malzeme içerisinde 710 µm ve altında boyutlarda kullanılır. Uygulama alanlarına bağlı olarak daha büyük boyutlarda da kullanılır. Küresel şekil, düzensiz şekilli parçacıklara göre plastik bileşik boyunca daha eşit ve daha kolay dağılmasını sağlar. Cam kürecikler, dolgu olarak kullanıldığı malzemenin çekme mukavemetini artırır ve uzamayı azaltır. Bazı plastiklerde ise bitmiş ürünün basma mukavemetini üç katına çıkarırlar. Ayrıca cam kürecikler dolgu malzemesi olarak kullanıldığında viskoziteyi düşürür ve büzülmeyi azaltır. Cam kürecikler ince olmaları sebebiyle kırılımandır ve bu sebeple üretim yöntemleri kısıtlıdır. Genellikle aşınmayı azaltırlar ve yağlayıcı etki yaparlar. Birkaç cam kürecik kullanım alanları olarak [33];

- Yapışma mukavemetini artırmak için yapıştırıcılarda kullanılır.
- İyi yalıtım için kalıplanmış fenolik motor gövdelerinde kullanılır,
- Daha iyi bükülme mukavemeti için fiberglas-epoksi laminatlarında kullanılır.

2.4.3. Alüminyum oksit (alümina)

Alümina veya diğer bir adıyla alüminyum oksit uzun yıllardır kullanılan bir dolgu malzemesidir. Yüksek elektriksel yalıtınlığa sahip olan alüminyum oksit (Al_2O_3), aynı zamanda çok iyi termal özellikler de göstermektedir. Basma dayanımının istendiği durumlarda ve yüksek sıcaklık gereksinimi gereken uygulamalarda tercih edilirler. Alüminaların büyük bir kısmı alüminyum metal üretiminde kullanılmaktadır. Alümina aynı zamanda alüminyum metalinin eritilebilmesi için gerekli olan başlangıç malzemesidir. Alüminalar balistik uygulamalarda kullanılmak için değerlendirilmiştir fakat nispeten yüksek yoğunluk ve yüksek maliyet nedeniyle balistikte yer bulamamıştır. Bunun yanı sıra yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Elektronik endüstrisinde kapasitör rezistans gibi elemanlarda kullanılırlar. Çok iyi mekanik özellikleri olan alüminalar kesici takım üretiminde ve havacılıkta kullanılmaktadır [34].

3. CAM ELYAF TAKİYELİ POLYESTER KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Genel Özellikler

Teknolojinin ve malzeme biliminin çok hızla ilerleyip geliştiği günümüzde, her geçen gün daha üstün özelliklere sahip malzeme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda uzun yıllar önce kullanılmaya başlanan ve ihtiyaç duyulan özellikleri karşılayan kompozit malzemeler için her geçen gün yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları artarak devam etmektedir. Son yıllarda ise elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve kullanımı oldukça artmıştır. Bu üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelerin çoğunluğunu ise cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler oluşturmaktadır. Cam elyaf takviyeli polimer kompozitler (CTP) kullanım alanlarına göre istenilen mekanik ve tribolojik özellikleri karşılayan polimer matrisli, cam elyaf dolgu malzemeli bir kompozit türüdür.

En eski ve en tanınmış yüksek performanslı fiberlerden olan cam, CTP malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanıldığında malzemeye yüksek mukavemet, yüksek kimyasal ve ısı dayanım gibi özellikler sağlar. CTP kompozitler, iyi elastiklik, tasarım ve kalıplama esnekliği, çok iyi dielektriksel özelliği, hafiflik gibi özelliklere sahiptir [35].

CTP kompozitler günümüzde, uygun kimyasal oran birleşimiyle birçok metalin kullanım alanlarında tercih edilmektedir. CTP kompozitler ışığa mukavemeti ve dış etkenlere dayanımı yüksek malzemelerdir. CTP malzemelerin uygulama alanları dönemsel olarak farklı sektörlerde önem kazanmıştır. İnşaat alanında CTP kirişler kullanılarak, duvar yapıları sağlamlaştırılabilir. Otoyol köprüleri, otomobil panelleri gibi birçok uygulama örnekleri verilebilir. Düşük maliyete sahip CTP malzemelerin bu özelliği, tercih sebeplerinden biridir. Çok iyi çevresel dirence sahip olmalarıyla, denizcilik, havacılık, inşaat sektöründe yerlerini almışlardır [7].

CTP kompozitlere şekil verme ve delme işlemleri uygulanabilir. Fonksiyonellerdir ve çeşitli ihtiyaçlara uygun olacak şekilde tasarlanabilirler (esnek, hafif, sert vb.).

Beton, demir, ahşap yüzeylerde iyi bağlanma davranışı gösterirler. Geç tutuşma veya alev almama özellikleri vardır [36].

3.2. Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Endüstride kullanım alanları git gide artan kompozitlerin, bu bağlamda üretim yöntemleri de çeşitlenerek artmaktadır. Kompozitlerde uygun üretim yöntemi, kompozitlerin sağladığı avantajları ve son ürünün sınırlarını geleneksel malzemelerde olduğundan daha fazla etkilemektedir. İçeriğindeki katkı malzemeleri ve miktarlarını seçebilme avantajını sunan kompozitlerin üretim yöntemi de bu değişkenlere bağlı olarak seçilmelidir. Bu kapsamda çeşitli üretim yöntemlerinden hangisini ve nasıl seçilmesi gerektiğini bilmek büyük önem taşımaktadır. Bazı kompozit üretim yöntemlerini sıralayacak olursak; [7]

- El yatırması yöntemi
- Püskürtme yöntemi
- Pres kalıplama,
- BMC hazır kalıplama
- Islak sistem pres kalıplama,
- Takviyeli termoplastik levha pres kalıplama (GMT)
- Takviyeli reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama yöntemi (RRIM)
- Reçine enjeksiyon kalıplama (RTM)
- Pultrüzyon yöntemi
- Elyaf sarma yöntemi
- Enjeksiyon kalıplama yöntemi
- Vakum infüzyon yöntemi
- Otoklav yöntemi
- Savurma kalıplama yöntemi

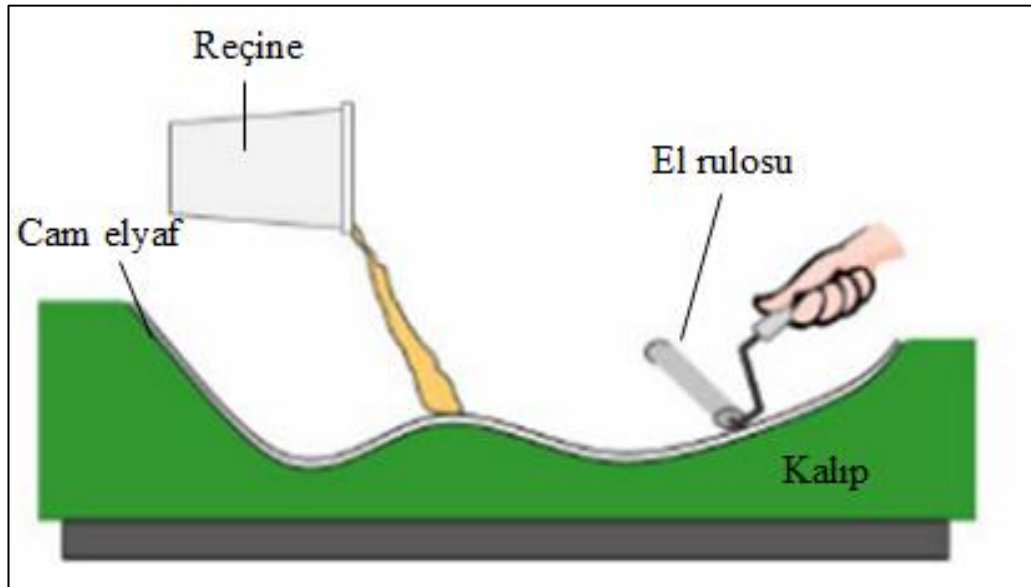
Katkı malzemesi ve matris malzemesi gibi etkenler kadar üretim yöntemini seçmek de oldukça önemlidir. Üretilen kompozitin kalitesini doğrudan etkileyecek olan üretim yöntemi seçimi ürünün içeriğine, miktarına ve maliyetine göre belirlenmelidir. Başlangıçta elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde el yatırması tekniği

kullanılmaktaydı. Sonrasında ise üretim aşamalarını geliştirmek ve hızlandırmak adına diğer birçok üretim yöntemi geliştirilmiştir.

3.2.1. El yatırması yöntemi

CTP kalıplama yöntemleri arasında en eski ve en yaygın kullanılan yöntem el yatırması yöntemidir. İlk zamanlardan beri sürekli geliştirilen ve üzerinde çalışılan el yatırması yönteminin birçok uygulama alanı vardır. Özellikle büyük boyutlu parçaların üretiminde kullanılır.

El yatırması yönteminde açık kalıp kullanılır ve bu kalıplar erkek veya dişi olabilir. Kullanılacak kalıbın yüzeyi, üretim sonrası pürüzsüz yüzeyle ürünler elde edebilmek için parlatılır. İyi kalitede bir son yüzey için spreyci veya fırça gibi bir el aleti ile jelkot püskürtülür/sürülür. Jelkot sertleştikten sonra cam elyaf yerleştirilerek üzerine katalize edilmiş reçine sürülür. Bu işlem esnasında kabarcıklar oluşmaması adına el ruloları kullanılabilir ve kabarcık oluşturulmamasına dikkat edilir. Matris malzemesinin elyaf yüzeyinin tamamına yayılmasına özen gösterilir. Laminantlama işlemi tabakaların sırayla uygulanmasıyla istenilen kalınlığı elde edinceye kadar devam ettirilir. Sertleşme için malzeme oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Sertleşme gerçekleştirildikten sonra malzeme kalıptan çıkarılır [37,38].



Şekil 3.1. El yatırma yöntemi [38]

El yatırması yönteminin avantajları;

- Düşük maliyetli olması
- Basit ve uygun kalıp, basit işleme imkanı
- Çok çeşitli parça boyutu potansiyeli
- Tasarım değişikliğinin kolayca yapılabilmesi
- Renkli yüzeyler elde etme imkanı.

El yatırması yönteminin dezavantajları:

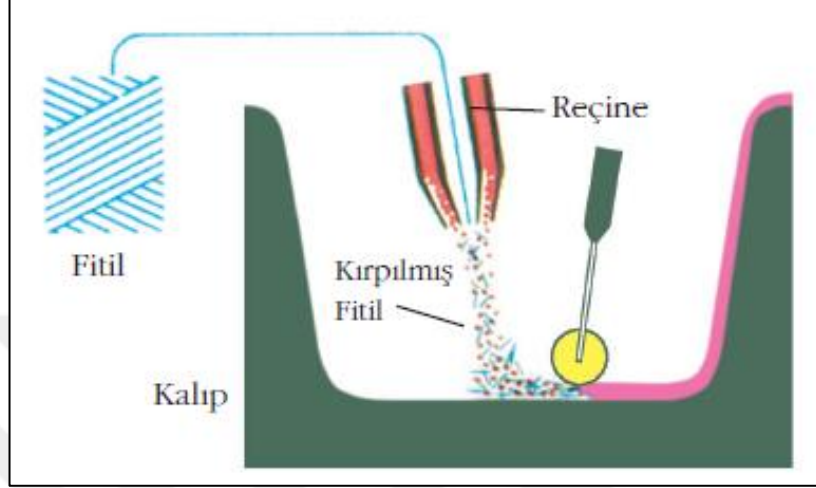
- Sadece bir yüzeyin parlak yapılabilmesi
- Ürünün sadece tek tarafında düzgün yüzey elde edilebilmesi
- Üretimde kişinin el becerisine bağlı olarak kalite tutarlılığı sorunu
- Yüksek elyaf oranlarına ulaşmak istendiğinde boyutlardaki sapma sorunu [37,38].

3.2.2. Püskürtme yöntemi

Püskürtme yöntemi, el yatırması yöntemine benzer bir şekilde tek kalıp kullanılarak yapılır. El yatırması yönteminin tabancalı uygulama şekli olarak düşünülebilir. Püskürtme yöntemi cam elyaf takviye malzemesinin kalıp içerisinde, katalize edilmiş reçine ile aynı anda uygun püskürtme tabancası kullanılarak birleştirilmesi yöntemidir. Bu yöntem, daha karmaşık ve büyük şekilli parçaların daha hızlı ve daha kolay üretimini mümkün kılmaktadır. Üretimde kullanılacak kalıp yüzey kalitesini artırmak amacıyla işlem öncesi jelkot ile kaplanabilir. Püskürtme tabancasının haznesine ilave edilen cam elyafla, tabanca içerisindeki kesiciler yardımıyla belirli uzunluklarda (1.3-2.5 cm) kırılır. Aynı zamanda tabanca içerisine reçine ile katalizör ilavesi yapılır. Kullanılan elyaf miktarı, ıslanabilmesi açısından yaklaşık %35'ten fazla olmamalıdır. Püskürtme işlemi, farklı özelliklere sahip birçok çeşit tabancayla gerçekleştirilebilir. Püskürtme işlemi esnasında elyaf takviyesinin düzgünce sıkıştırılması için bir el rulosuyla rulolama yapılır. Bu işlem yapılırken hava kabarcığı kalmamasına dikkat edilmelidir [37,38].

Püskürtme yönteminde kullanılan tabancalar çalışma prensibine göre havasız ve hava püskürtmeli olarak ikiye ayrılır. Havasız tabancalarda reçine takviye malzemesi

hidrolik basınçla özel nozullardan damlacıklar halinde püskürtülür. Hava püskürtmeli tabancalarda ise reçineyi uygulamak için basınçlı hava kullanılmaktadır. Bazı ticari püskürtme makinaları dakikada 11.6 kg'a kadar laminat işleme kapasitelerine sahiptir [7].



Şekil 3.2. Püskürtme yöntemi [7]

Püskürtme yönteminde, üründen beklenen özellikleri geliştirmek ve maliyeti düşürmek adına reçine içerisine kalsiyum karbonat ve alüminyum trihidrat gibi dolgu malzemeleri de ilave edilebilir. Bu uygulamalarda genellikle genel amaçlı polyester reçineler ve arzu edildiği takdirde izoflatik polyesterler ve vinil esterler de kullanılmaktadır. Cam elyaf istenilen et kalınlığına ulaşana kadar kat kat uygulanır. Cam elyaf tabakaları işlenirken reçinenin jelleşme ve sertleşme sürelerine dikkat edilmelidir. Püskürtme işlemi sonrası parçalar oda sıcaklığında sertleşmeye bırakılır. Gerektiği durumlarda sertleştirme sürecini hızlandırmak adına dıştan ısıtma da kullanılabilir [7].

Püskürtme yönteminin avantajları;

- El yatırması yönteminde olduğu gibi düşük maliyete sahip olması
- Kompleks ve detaylı parçaların üretimine elverişliliği
- El yatırmasına göre daha fazla makineye bağlı olup ve işçilik giderleri daha düşüktür.
- Basit uygulanabilirliği
- Kontrollü ve hızlı uygulanabilmesi

Püskürtme yönteminin dezavantajları;

- Kısa elyaf kullanımından ötürü kısıtlı mekanik dayanım göstermesi,
- El yatırması yöntemindeki gibi tek yüzeyde düzgünlük elde edilebilmesi
- Ürünün kalitesinin operatörün kabiliyetine bağlı olması
- Reçine sistemindeki uçucu kimyasal madde sebebiyle zararlı gaz çıkışının var olması. [7,37].

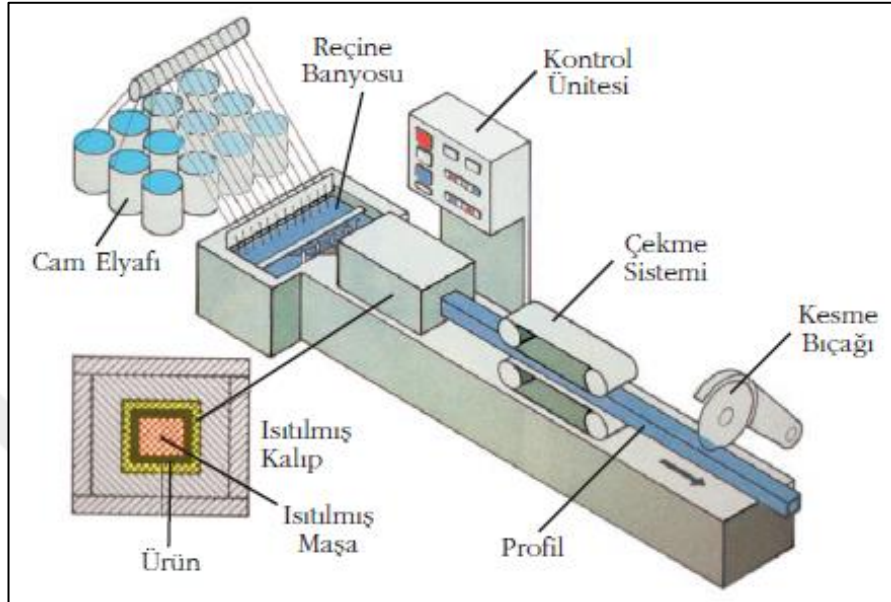
3.2.3. Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon yöntemi, seri üretime yönelik kullanılan bir kompozit üretim yöntemidir. Düşük maliyetli bir yöntem olan Pultrüzyon yöntemi, fiberlerin kalıp içerisinden çekilmesiyle gerçekleştirilir. 1940'ların sonundan itibaren kullanılan bu yöntem, rijit çubuk ve lamalar, sabit kesitli uzun ürünler; boru, kanal, endüstriyel profiller ve kirişlerin üretiminde tercih edilir. Malzemenin kalıp boyunca çekilmesiyle üretimi yapılır. Cam elyaf takviyesi olarak dokunmuş fitil, keçe veya bunların kombinasyonları kullanılır. Cam elyaf önce reçine banyosundan geçirilerek bir takım şekillendirme kılavuzuna gönderilir. Sonrasında ısıtılmış çelik kalıptan geçirilerek sertleşmesi sağlanır. Kalıptan çıkan ürün kesme aparatlarıyla istenilen uzunluklarda kesilir [7,39].

Pultrüzyon yöntemi, metal ve alüminyumlardaki ekstrüzyon yöntemine benzerdir. Fakat ekstrüzyonda basılarak yapılan bu işlem pultrüzyonda çekilerek yapılmaktadır. Her iki yöntemde de parçalar sabit kesit geometrisinde olmaktadır [39]. Pultrüzyon yönteminde kullanılan reçinelerin %90'ı polyester ve vinil reçinelerdir. Fenolik reçineler bu yöntemle üretilen ürünlerin yanmazlık özelliğini iyileştirirken, epoksiler yüksek mukavemet, iyi ısı dayanımı ve daha yüksek elektriksel özellikler kazandırırılar [7].

Pultrüzyon işlemi için bazı ekipmanlar gerekmektedir. Bu ekipmanlardan birisi takviye malzemelerinin depolanması ve dağıtımını gerçekleştiren keçe ve fitil sehpalarıdır. Buradan geçen takviye elemanları reçine banyosuna gitmektedir. Reçine banyosu takviye malzemelerini ıslatma görevi görürler. Şekillendirme kılavuzları ise malzemenin kalıba göre şekillenmesini sağlarlar. Bir diğer ekipman ise kontrol panelidir. İşlemi gerçekleştiren operatör buradan kalıp sıcaklığı, çekme hızı, kesme

uzunluğu gibi parametrelerin kontrolünü gerçekleştirir. Son olarak, çekilen takviye malzemesini istenilen uzunlukta kesmeyi sağlayan kesme bıçakları da bu ekipmanlar arasındadır. İhtiyaca göre kesim sırasında oluşan tozları toparlayacak bir aspiratör sistemi de kullanılmaktadır [7].



şekil 3.3. Pultrüzyon yöntemi [7]

Pultrüzyon yönteminin avantajları;

- Üretim otomatik olduğundan pratik ve hızlıdır.
- Ürün uzunluğu için kolay ayarlanabilme seçeneği
- Son üründe iyi mukavemet özelliği
- Matris ve takviye oranlarının kolayca kontrol edilebilmesi
- Seri üretime olanak vermesi
- Düşük işçilik gerektirmesi

Pultrüzyon yönteminin dezavantajları;

- Elyafın büyük bölümü tek yönden çekildiği için çapraz yönde mukavemeti düşüktür.
- Ekipman maliyetinin yüksek olması
- Ürün eklenmesinin zor olması

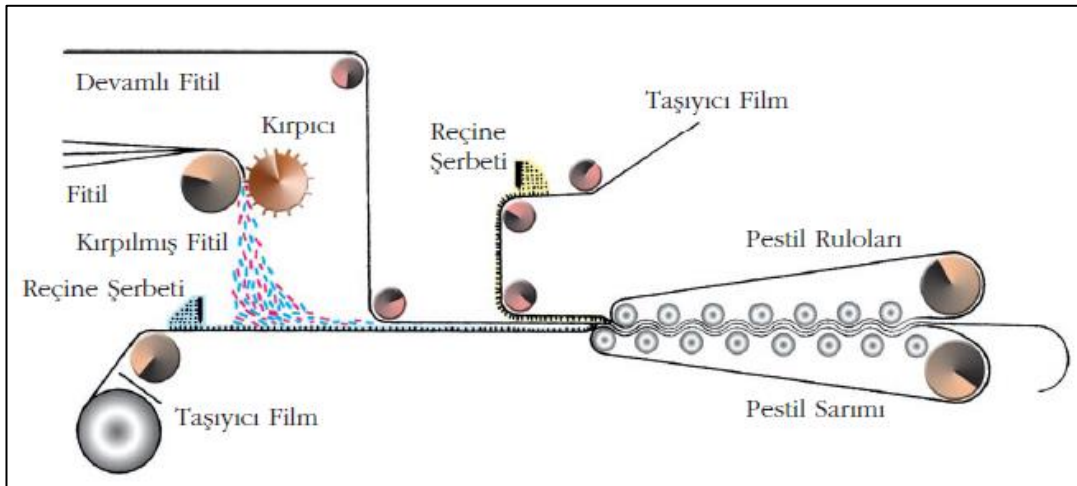
- Sadece sabit kesite sahip parçalar üretilmesi dolayısıyla, kullanım alanlarının sınırlı olması [7,37,39].

3.2.4. Pres kalıplama yöntemi

Pres kalıplama yöntemi, ısıtılmış metal kalıplar kullanılarak kompozit malzemenin şekillendirilmesi yöntemidir. CTP ürünlerin pres kalıplama yöntemi ile üretilmesinde dört temel pres kalıplama metodu kullanılabilir. Bunlar;

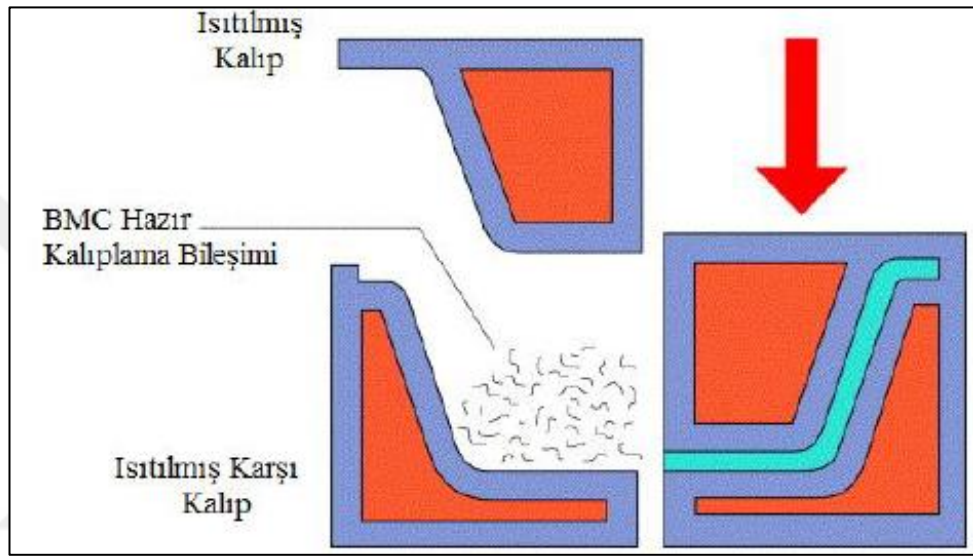
- SMC pres kalıplama yöntemi
- BMC pres kalıplama yöntemi
- Islak sistemli pres kalıplama
- Takviyeli termoplastik levha pres kalıplama (GMT) [7].

Bu yöntemlerden en fazla ticari kullanım alanına sahip olanı SMC kalıp yöntemidir. SMC kalıplamada takviye malzemeleri, reçine, katalizörler, dolgu malzemeleri, kalıp ayırıcı gibi malzemelerin birleştirilmesi ve kolaylıkla pestil haline getirildiği hazır kalıplama işlemidir. Cam elyaf takviyesi dışındaki tüm SMC girdileri mikserde karıştırılır. SMC bileşeni genellikle %35'e kadar elyaf içeriğine sahiptir. Macun kıvamına gelen malzemelere taşıyıcı filmler vasıtasıyla üstten ve alttan, kırılmış cam elyaf malzemelerle kapatılarak sandviç yapı elde edilir. Sonrasında konveyör bant ile sıkıştırma rulolarıyla pestil haline getirilir. Basınçlı preslere monte edilmiş metal kalıpların sıcaklıkları 120-170 °C arasındadır. Son olarak rulo haline getirilen malzeme naylon ambalajlarla paketlenirler [7,38].



Şekil 3.4. SMC pres kalıplama yöntemi [7]

Diğer çok kullanılan pres kalıplama yöntemi ise BMC kalıplama tekniğidir. Polyester BMC uygulamaları 1940'ların ortalarında başlamıştır. Bu yöntemde katalizörler, reçine, toz halindeki dolgu malzemeleri ve kırılmış lifler hamur haline getirilir. Malzemeler enjeksiyon, basınç veya transfer kalıplama ile uygulanabilir. Bu yöntemin avantajı ise yüksek sıcaklıklarda renk değişimi meydana gelmeyecek, UV etkisine dayanıklılık gösterecek şekilde malzemelerin formüle edilerek en uygun maliyetle, iyi performansta ürün elde edilebilmesidir [7].



Şekil 3.5. BMC pres kalıplama yöntemi [21]

Hazır kalıplamanın avantajları;

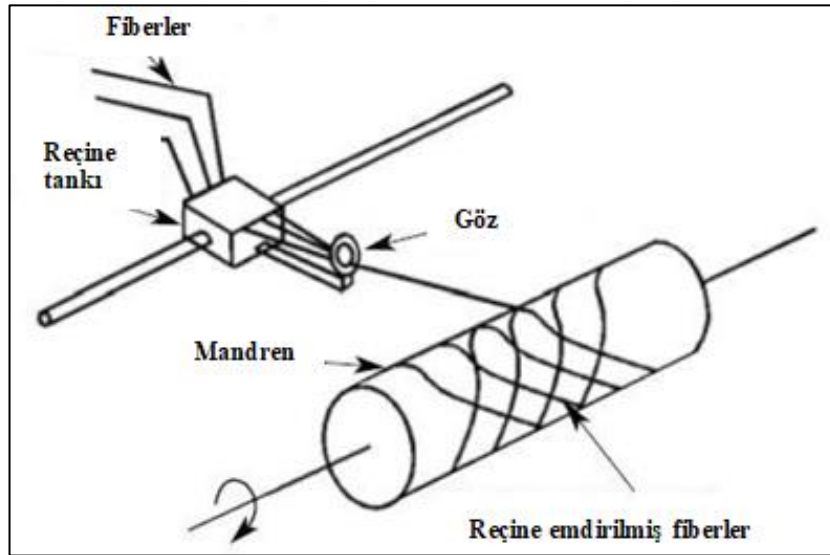
- Esnek tasarım olanağı
- El yatırma ve püskürtme yöntemlerine göre daha pürüzsüz yüzeyler
- Kolay kaplanabilme özelliği,
- Yüksek sıcaklığa dayanım
- Yüksek oranda dolgu maddesi ilavesi ile yüksek sertlik ve alev dayanımı sağlanabilir.

Hazır kalıplamanın dezavantajları;

- İnce parçaların üretiminin zorluğu
- Kalıp maliyetinin yüksek olması
- Büyük parçalarda presleme maliyetinin yüksek olması [7,38].

3.2.5. Elyaf sarma yöntemi

Elyaf sarma yöntemi, iyi kalitede yüzey sağlanabilen bir üretim şekli olup elyafın sürekli makaradan alınarak reçine banyosuna yatırılması ve tekrar bir makaradan geçirilerek sarılması işlemidir. Elyaf sarma yönteminde sıklıkla kullanılan reçineler; genel amaçlı polyesterler, vinil esterler, Bisfenol A ve epoksilerdir. Elyaf sarma metodunda her çeşit takiye malzemesi kullanılabilir. Direk sarma lifleri ise en fazla kullanılan çeşittir. Farklı çeşitteki cam elyaf kombinasyonlarıyla en uygun performansta ve düşük maliyetli parçalar üretilebilir. Bu yöntemde, üretilecek ürüne bağlı olarak çeşitli ekipmanlar kullanılabilir. Genel prensip, takviye malzemesinin dönen mandrel üzerine sarılmasıdır. Kullanılan mandrel, seri üretimde kullanılacaksa çelik levhadan, prototip için kullanılacaksa genellikle kontrplak veya alüminyum levhadan yapılabilir. Mandrel üzerine yapılan bu sarma işlemi çeşitli açılarda gerçekleştirilebilir. Farklı açılarda ve çok katlı şekilde sarılan cam elyaf, sertleştikten sonra kalıptan çıkarılır. Otomotiv sektöründe, petrol ve gaz borularında, su arıtma tanklarında, uçak yakıt tanklarında, roket motor ve silah namlularında, tenis raket çerçevelerinde kullanılmaktadır [7].



Şekil 3.6. Elyaf sarma yöntemi [39]

Elyaf sarma yönteminin avantajları;

- Çeşitli mukavemet değerlerinin sağlanabilmesi
- İşçilik oranının düşük olması

- Termoplastiklerin ve termosetlerin kullanımına olanak ermesi
- Kullanılabilecek takviye malzemesine reçine çeşidinin fazla olması
- Üretimin büyük oranda otomasyona uyarlanabilmesi

Elyaf sarma yönteminin dezavantajları;

- Sadece eksenel ürünler için kullanılabilmesi
- Üretim için tesis ve ekipman maliyetinin yüksek olması [7].

3.2.6. Vakum infüzyon yöntemi

Vakum infüzyon yönteminde tek yönlü kalıp kullanılmaktadır. Kuru haldeki takviye malzemeleri kalıp içerisine yerleştirilir ve belirlenen kanallar içerisinden vakumla çekilen reçine-katalizör karışımı, takviye malzemelerinin içerisine yayılır. Bu üretim metodunda, imalat hazırlıkları tamamlanmış ürünün el değmeden üretilmesi amaçlanmaktadır. Sistemin havasının emilmesinde kolaylık sağlaması amacıyla reçine yapışmayan kumaş kullanılır. Kürleşme sonrası bu kumaş, laminasyonun üzerinden soyulur. Vakum naylonu ile laminasyon arasında ince bir hava tabakası kalması için hava geçirici bir başka kumaş kullanılır. Vakum naylonu ise yüzeyin etrafına sarılarak sistemin hava izolasyonunu sağlar. Bunun dışında vakumlamayı sağlamak için vakum pompası ile düzenek arasına kontrol vanalarını da içeren bir tesisat kurulur [21].

Vakum infüzyon yönteminin avantajları;

- Kişiyeye bağlı kalite sorunlarının daha az olması,
- Reçinenin elyaf yüzeyine dağılımı ve emilimi aynı miktarda olmasıyla homojen ürün elde edilmesi
- Sağlam ve uzun ömürlü ürün elde edilebilmesi

Vakum infüzyon yönteminin dezavantajları;

- Tek seferlik malzeme kullanımı sebebiyle seri üretim için yüksek üretim maliyeti [21,38].

4. AŞINMA VE AŞINMA MEKANİZMALARI

4.1. Aşınma

Birbiriyle etkileşim halindeki yüzeylerin nispi hareketlerdeki sürtünme, aşınma ve yağlama konularıyla ilgili bilim dalı triboloji olarak adlandırılır. 1967 yılında Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Örgütü komitesi tarafından tanımlanan triboloji bilimindeki triboloji kelimesi sürtünme veya kayma anlamına gelen tribos kelimesinden türetilmiştir. Triboloji, günlük kullandığımız gereçlerden, uçaklara kadar ekonomik olarak büyük önem arz eden ve yaşam standardımızı etkileyen aşınma, malzeme israfının ve mekanik performans kaybının ana nedenlerindedir. Aşınmadaki en ufak bir azalma, önemli ölçüde tasarruf sağlar [40]. Bu sebeple tasarımda ve uygulamada önem arz eden aşınma, çok dikkate alınmalıdır.

Mühendislik plastikleri, herhangi bir taşıyıcı eleman için kullanıldığında, kullanım koşullarına göre mekanik ve tribolojik açıdan uygun bir kombinasyona sahip olmalıdırlar. Aşınma genel olarak sürtünme veya darbe sonucu, birbiriyle temas halindeki yüzeylerden çıkan malzeme kaybı olarak tanımlanabilir [41]. İnsanın yaptığı her şey, yüzeyler arasındaki göreceli hareketler sonucunda yıpranır. Bu yıpranma, dişli, rulman, kavramalar gibi etkileşim halindeki hareketli parçalardan, insan vücudundaki hareketli eklemlere kadar geçerlidir. Hareketli parçaların kullanıldığı sistemlerdeki makine arızalarının çoğu analiz edildiğinde dişli, rulman, conta, kam gibi hareketli parçalarda meydana gelen yıpranma sonucunda olduğu ortaya çıkmaktadır [40,41].

Malzemeleri mekanik özellikleriyle birlikte tribolojik davranışlarını da etkileyen aşınma için araştırmalar uzun yıllardır devam etmektedir. Plastik malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları 50 yılı aşkın süredir incelenmektedir. Plastik sınıfında yeni malzemelerin çoğalması ve laboratuvarların gelişmesiyle birlikte deneysel çalışmalar artarak devam etmektedir [42].

Endüstride hasara sebebiyet veren aşınma olayı, ekonomik kayıpların sebepleri arasında önemli yer almaktadır. Bu ekonomik kayıpları önlemek adına bazı yöntemler geliştirilmiştir. Yağlama, bu yöntemler arasında en etkili olanlardandır. 1966 yılında İngiltere’de yapılan bir çalışmada tribolojik önlemlerin uygulanması ile yıllık 515 milyon Euro tasarruf edilebileceği belirtilmiştir. Aşınmayı önleyici önlemler ile sistemlerde elde edilen enerji tasarrufu, ürün maliyetinin %2’sini oluşturan aşınma maliyetini azaltmaktadır [40].

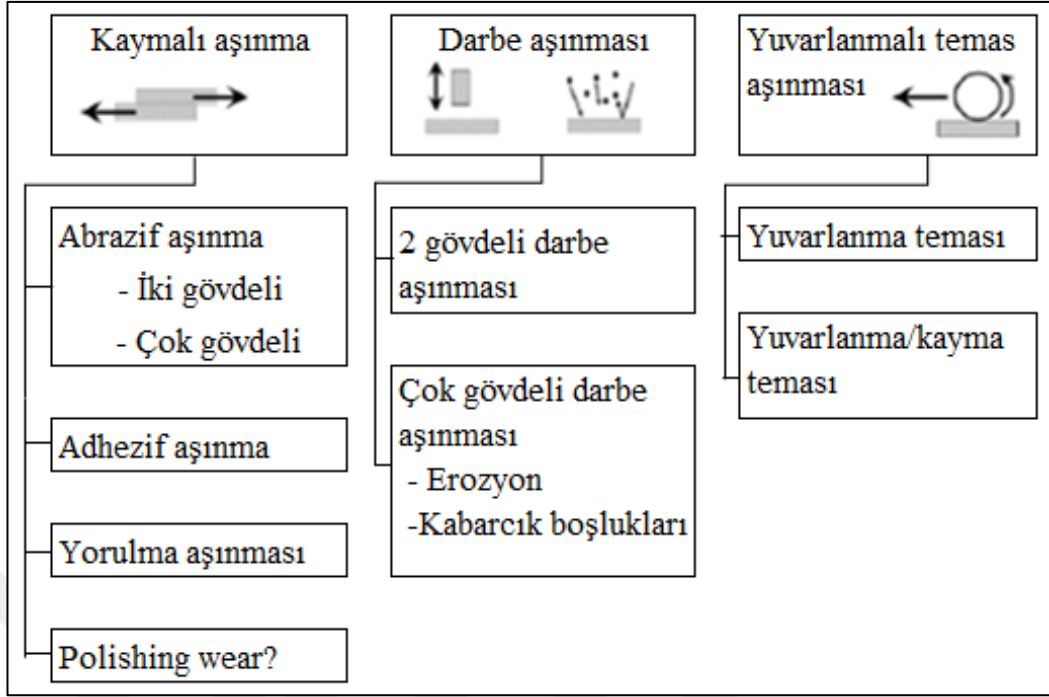
Polimerler, elastik olmaları, düşük sürtünme ve aşınma dayanımları ve şok dayanımları gibi özellikleri sebebiyle tribolojik uygulamalarda çok fazla kullanılmaktadır. Polimerler metallerin aksine visko-elastiktirler ve polimerlerin tribolojisi metallerin tribolojisinden farklıdır [43].

Polimerlerin aşınmasıyla ilgili çalışmalar hem bilimsel hem de teknolojik açıdan önem arz eder. Aşınma, farklı etkenlere bağlı olarak birçok şekilde ortaya çıkabilir. Çalışma ortam ve koşulları, çevresel şartlar, etkileşime giren yüzeylerin malzemeleri bu etkenler arasında sayılabilir [43].

4.2. Aşınma Mekanizmaları

Aşınmaya yol açan birçok temas yolu vardır. Aşınma sınıflandırmaları çok çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir. Malzemenin çıkarılmasına sebep olan temel hareketler, bu sınıflandırmalardan biridir. Buna dayalı olarak birçok sınıflandırma şeması oluşturulmuşsa da hiçbirisi evrensel olarak kabul görülmemiştir. Bu şemalardan birisi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Aşınmaya sebep olan hareket tipine göre bir ayırım yapıldığında, aşınmayı üç kategoriye ayırabiliriz. Bunlar; kayma aşınması, darbe aşınması ve yuvarlanma temas aşınmasıdır. En çok karşılaşılan aşınma türleri arasında adhezif aşınma, korozyif aşınma, abrazyif aşınma, kazımalı aşınma, erozyon aşınması ve yorulma aşınması sayılabilir [41].

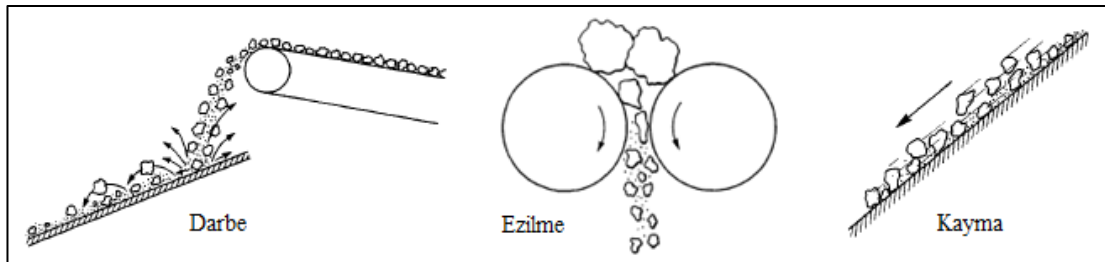


Şekil 4.1. Bağlı hareket türüne göre başlıca aşınma kategorileri [44]

4.2.1. Abraziv aşınma

1976 yılında Almanya’da yayınlanan bir rapora göre, aşınma ve sürtünmenin neden olduğu ekonomik kayıplar Gayri Safi Milli Hasılının %1’ine denk gelmektedir. Bu kayıpların yaklaşık %50’si ise abraziv aşınma kaynaklıdır [40].

Abraziv aşınma temel olarak sert parçacıkların belirli bir yüzeyin üzerinden geçerken sebep olduğu malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Abraziv aşınma, katı bir objeye ancak kendisine eşit veya kendisinden daha yüksek sertliğe sahip olan bir malzemeyle karşılaşır ise meydana gelir. Farklı çeşitlerde oluşabilen abraziv aşınma, darbe, ezme veya kayma ile meydana gelebilir [45].



Şekil 4.2. Abraziv aşınma çeşitleri [45].

Literatüre göre temas şekilleri baz alınarak iki temel abraziv aşınma şekli vardır; iki cisimli ve üç cisimli abraziv aşınma. İki gövdeli abraziv aşınmaya, bir yüzey üzerinde zımpara kağıdının hareketi örneği verilebilir. Üç cisimli abraziv aşınma ise aşındırıcı parçaların iki cisim arasında meydana getirdiği aşınma olarak adlandırılabilir [40].

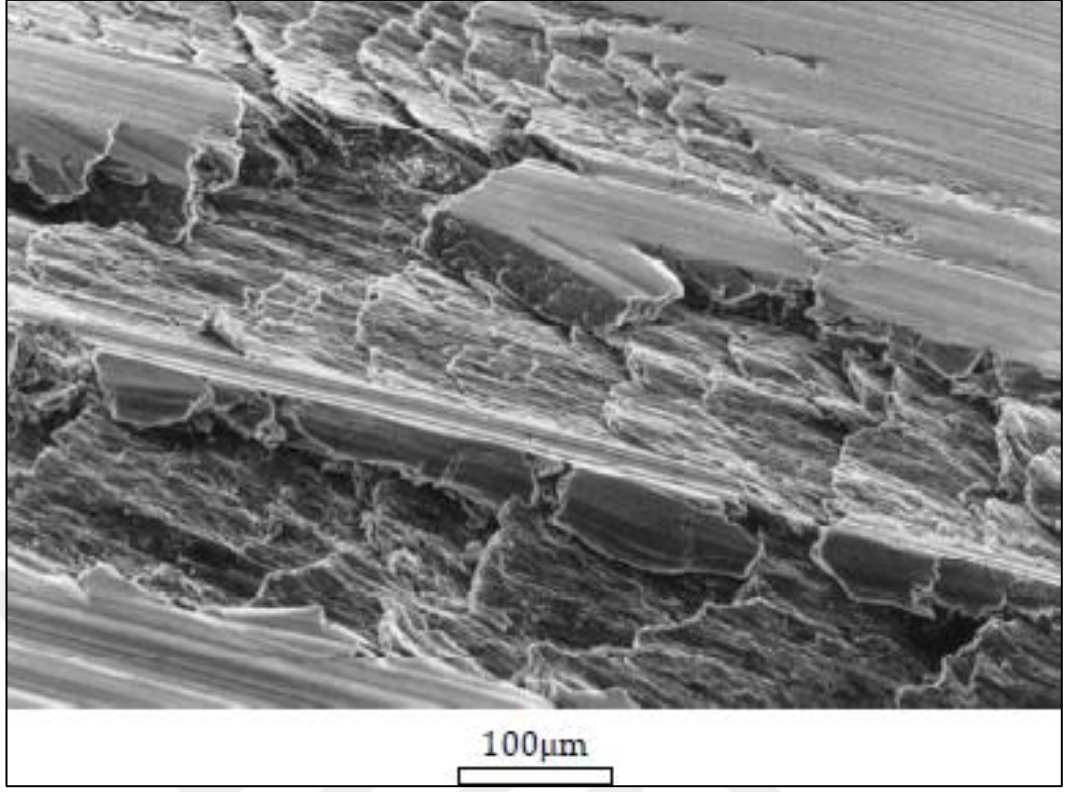
Ciddi ekonomik kayıplara mal olan abraziv aşınmanın, tribolojinin temel ilkelerini uygulayarak, uygun malzeme seçimi ve yüzey uygulamaları ile azaltılması ve büyük oranda tasarruf sağlanması mümkündür [40].

4.2.2. Adhezif aşınma

Aşınma türlerinden biri olan adhezif aşınma, normal kuvvet etkisi ile birbirine temas eden iki yüzey arasında meydana gelmektedir. Yağlı veya yağsız ortamda oluşan bu aşınma çeşidi, kuvvet altında oluşan izafi hareketler sebebiyle iki cisim arasında diğer cisme kıyasla daha yumuşak olan malzemeye sahip cisimde boşlukların, diğer yüzeyde ise çıkıntıların meydana gelmesi ve sonucunda adhezif parçaların dökülmesi olayıdır. Çoğunlukla yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhezif aşınmada parça dökülmesi ve kopma olayı, cisimler arasında oluşan bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan gerçekleşir ve yüzeyler arası malzeme transferi gerçekleşir [46].

İki nesne tesadüfen bir araya geldiğinde her zaman adhezif aşınma gözlenmez, belirli koşullar sağlandığı takdirde iki katı arasında bir dereceye kadar aşınma gerçekleşir. Adhezif aşınma metal-metal, metal-polimer, metal-seramik ve bunların kendi aralarında kombinasyonları gibi farklı şekillerde görülebilir [40].

Önemli olan bir diğer nokta ise adhezif aşınmanın kontrolsüz ilerlemesine izin verilmemesi gerektiğidir. Aksi durumda transfer partiküllerinin büyümesi, yüksek sürtünme ve ciddi yüzey hasarları gibi istenmeyen sonuçlara sebep olabilir [40].



Şekil 4.3. Al-Si alaşımlı yüzeyde meydana gelen adhezif aşınma [40]

4.2.3. Eroziv aşınma

Eroziv aşınma, bir nesnenin yüzeyine çarpan katı veya sıvı parçacıkların oluşturduğu aşınma türüdür. Eroziv aşınma birçok makine ve makine parçasında oluşumu sıkça görülmektedir. Eroziv aşınma, parçacık malzemesi ve boyutu, çarpma açısı, çarpma hızı ve çevresel faktörler gibi parametrelerle ilişkilidir [40].

Deniz pervanelerine kum, taş gibi yabancı ve sert partiküllerin çarpması, helikopter ve uçak kanatlarında görülen erozyon aşınması, kömür dönüşüm sistemlerinde meydana gelen aşınma, kumlama makineleri ve püskürtme lülelerinde görülen aşınmalar eroziv aşınmaya örnek olarak verilebilir [47].

Malzemede oluşabilecek eroziv aşınmanın en aza indirgenmesi, malzeme özelliklerinin çok iyi araştırılıp incelenmesiyle sağlanabilir. Aynı zamanda aşındırıcı parçacığın özellikleri ve malzeme yapısı da bilinmesi gereken parametreler arasındadır [40].



Şekil 4.4. Pompa gaz kelebeği burcunda oluşan eroziv aşınma [48].

Makine ve parça ömürlerini azaltması, verimliliği düşürmesi gibi olumsuz etkilerine kıyasla az da olsa, eroziv aşınma yararlı kullanım alanlarına da sahiptir. Kum püskürtme işlemi ve epoksi kompozit malzemelerinin de kesiminde kullanılan sıvı jeti ile kesme işlemi gibi farklı kullanım alanları mevcuttur. [47].

4.2.4. Korozyif aşınma

Korozyon denildiğinde birçok insanın aklına pas gelse de pas, demirin korozyona uğramış şekline verilen isimdir. Korozyon ise neredeyse tüm metalleri etkileyen ve yıkıcı sonuçlara sebep olan oksidatif aşınmadır. Korozyondan kaynaklanan üretim aksaklıkları, arızaların ceza maliyetlerinin artması ve güvenlik tehditleri, korozyonun önlenmesi ve kontrolü için yapılan araştırmaları daha da artırmıştır [49].

Korozyonun oluşması birden fazla sebeple gerçekleşebilir. Bazı korozyon oluşumları ve çeşitleri şu şekilde sıralanabilir,

- Korozyona uğrayan yüzeyden düzenli ve eşit şekilde metal kaybı olarak tanımlanabilen düzgün korozyon,
- Ortamdaki çukurlaşma veya yarıklardan dolayı metal kaybının çoğunun ayrı alanlarda gerçekleştiği lokal korozyon,
- Yüksek sıcaklık korozyonu,

- Belirli bakteri veya mikropların korozyon atağına yol açacak tortular üretmesiyle oluşabilen mikrobiyal korozyon,
- Elektrolit içindeki farklı iletkenler arasında oluşan elektriksel temas kaynaklı galvanik korozyon,
- Gerilme korozyonu,
- Atmosferik korozyon [49,50].



Şekil 4.5. Gerilim hücreleri nedeniyle oluşan koroziv aşınma [49]

Korozyondan kaçınmak ve korozyonu önlemek adına birçok koruyucu metot geliştirilmiştir. Bunlar arasındaki en koruyucu önlem, uygulamada kullanılacak en uygun malzemeyi seçmek ve kullanılan malzemenin yapısına hakim olmaktır. Bunun için korozyona dirençli birçok alaşım geliştirilmiştir. Yüksek alaşımli paslanmaz çelikler veya atmosferik korozyona dirençli siper çelikleri bunlara örnek olarak verilebilir. Diğer koruyucu önlemler arasında, aşındırıcı ortama karşı koruyucu kaplama veya astar uygulamaları, inhibitör kullanımı, boyama işlemleri, elektrokimyasal reaksiyonlar için katodik veya anodik korumaların kullanımı sayılabilir [50].

5. LİTERATÜR TARAMASI

5.1. Takviye Elemanı Olarak Kullanılan Cam Elyafın Aşınmaya Etkisi

Demir ve diğ. çalışmalarında, cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf cinsinin, yükün, kayma hızı ve mesafesinin aşınmaya etkilerini incelemişlerdir. Uygulama sonrasında karbon elyaf katkılı kompozitlerdeki kütle kaybının cam elyaf katkılı kompozitlere göre daha fazla olduğu ve uyguladıkları tüm koşullarda sürtünme katsayısının cam elyaflı kompozitlerde daha düşük olduğu belirlenmiştir [51].

Larsen ve diğ. çalışmalarında, cam elyaf, karbon/ aramid dokuma, PTFE partikül ve CuO partikül takviyeli kompozitler arasında yaptığı araştırmada bu malzemelerdeki numunelerin farklı yük ve hızlar altındaki aşınma miktarlarını incelemiştir. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin, karbon/aramid takviyeli kompozit malzemenin aşınma direncine kıyasla daha kararlı olduğu sonucunu elde etmiştir [52].

Pıhtılı ve Tosun çalışmasında, cam elyaf takviyeli polyester kompozitler ile takviyesiz polyester reçinelerin aşınma özellikleri karşılaştırılmıştır. Disk aşınma test cihazı kullanılarak, farklı hız (500 ve 710 rpm) ve yüklerde (500 ve 1000g) yapılan deneyler sonucu cam elyaf takviyeli kompozitin aşınma direnci düz polyester reçineye göre daha yüksek çıkmıştır [53].

Yetgin ve diğ. çalışmasında, cam elyaf ve kauçuk katkılarının PA6 polimerinin özelliklerine katkısı incelenmiştir. PA6 polimerinin mekanik, termal ve tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışmada aşınma testleri 0,5 m/s ve 1,0 m/s kayma hızları ile 20-40N yük aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında PA6 polimerine eklenen %30 oranındaki cam elyaf ve kauçuk malzemelerinden cam elyaf, sürtünme katsayısını %11 düşürürken, kauçuk %8,9 düşürmüştür [54].

Aydın çalışmasında, CTP (Cam elyaf takviyeli polimer kompozit) malzemeler ile C20, C30 ve C40 olmak üzere 3 farklı dayanım sınıfında beton numunelerinin Böhme aşınma testlerine karşı sonuçlarını kıyaslamıştır. Çalışmada, CTP

malzemenin boy kayıplarına göre aşınma oranı tüm beton dayanım sınıflarından daha düşük çıkmıştır [55].

Mohan ve diğ. çalışmasında, tantalum niobium carbide (Ta/NbC) ve tungsten carbide gibi partikül dolgulu cam elyaf takviyeli kompozitlerin abrazyon aşınma dirençleri incelenmiştir. Dolgulu ve dolgusuz kompozitler karşılaştırıldığında dolgulu kompozitlerin dolgusuz kompozitlere göre daha düşük hacimde aşınma oranına sahip olduğu belirtilmiştir [56].

Chand ve diğ. çalışmasında, E-cam takviyeli polyeester kompozit malzemelerin dolgulu ve dolgusuz olması durumlarında abrazyon aşınma davranışını ele almışlardır. Çalışmada aşındırıcı malzeme olarak 100-200 ile 200-300 µm aralığındaki boyutlara sahip silis kumu kullanılmıştır. Uygulanan yük ile aşındırıcı partikül boyutlarının kompozitlerin aşınma hacmini artırdığı gözlemlenirken, sabit yük ve 200-300 µm boyutundaki partiküllerde abrazyon aşınmanın, artan kayma hızıyla azalma gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca kompozitteki cam elyaf takviyesinin aşınma direncini arttırdığı gözlemlenmiştir [57].

Feyzullohoğlu çalışmasında, CTP kompozit malzemenin farklı reçine ve çekme katkıları ile oluşturulan konfigürasyonlarının abrazyon aşınma davranışlarını incelemiştir. Çalışmasında, içerik olarak ortoflatik polyeester reçine ve izoflatik reçineli numuneler kıyaslanmıştır ve sonuç olarak ortoflatik reçineli kompozit numunelerin izoflatik reçinelilere nazaran aşınma dayanımının daha iyi olduğu belirtilmiştir [58].

İlhan ve Feyzullohoğlu çalışmasında, farklı hız ve yük uygulamalarında, farklı dolgu ve reçinelerin CTP malzemelerin aşınma davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. 100 rpm ve 200 rpm hızlarında 10N ve 20N etkileri altında yapılan adhezif aşınma deneyleri sonucunda, düz ortoflatik polyeester reçineye cam kürecik ilavesinin aşınma oranını düşürdüğü ortaya konulmuştur [59].

Kishore ve diğ. çalışmasında, 500m'den 6km'ye kadar değişen kayma mesafelerinde aşınmaya maruz kalan cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin SEM görüntülerine dayalı sonuçlarını ele almışlardır. Uzun çalıştırma durumlarında ara yüz ayrımı fark edilen çalışmada daha kısa çalıştırmalarda ise matris döküntü ve cam elyaf

parçalanmalarına rastlanmıştır. Aşınmış yüzeylerin göze çarptığı çalışmada ayrıca yükün ve hızın aşınma kaybı üzerindeki etkisi de incelenmiştir [60].

Quintelier ve diğ. çalışmasında, cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin 10mm/s sabit hızda ve 60 ile 600N arasında değişen yükler altında aşınma davranışını incelemiştir. Sürtünme koşullarında, dönen bir disk ve pim ile oluşturulmuş bir makinede gerçekleşen sürtünme ve aşınma testleri, SEM görüntüleri incelenerek sonlandırılmıştır. Sürtünme kuvvetinin fiber yönüne bağlı olduğunu, paralel yönlendirmenin daha düşük sürtünmeye, enine yönlendirmenin ise daha yüksek sürtünmeye sebep olacağını belirtmiştir. Sürtünme kuvvetinin, aşınma yüzeyindeki ince polimer filmin üretimine bağlı olmasıyla birlikte bu filmin sürtünme kuvvetini azaltıcı etkisinden bahsedilmiştir [61].

5.2. Farklı Çevresel Koşulların CTP Kompozitlerin Aşınmasına Etkisi

Chakraverty ve diğ. çalışmasında, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozitlerin deniz suyuna daldırılıp sonrasında oluşan kimyasal ve fiziksel bağların detaylarını, mekanik özelliklerin varyasyonlarını, ortaya çıkan arıza mekanizmalarını incelemiştir. On sekiz katlı GFRP numunelerin iki aylık aşamalarla toplam bir yıl deniz suyuna batırıldığı deneysel çalışmada laminer kayma gerilimi, kopma gerilimi ve elastiklik modülü gibi mekaniksel özelliklerin daldırma süresinin artmasıyla bozulma eğilimi sergilediği görülmüştür. Bunun yanı sıra tuzlu suyun etkisiyle SEM fotoğraflarında da görüntülenen delik, matris çatlaması ve çizilmesi, lif kırılması gibi yüzey problemlerinin ortaya çıktığı belirlenmiştir [62].

Shaofeng ve diğ. çalışmasında, cam elyaf kompozitlerin deniz suyu altında yağlayıcılık performansını ele almışlardır. Testler deniz suyu altında, cam elyaf kompozit malzemeler ile düz numunelerin 800, 1000, 1200 ve 1400 d/dk disk altında aşınmaya maruz bırakılması ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, tüm dönme hızlarında cam elyaf kompozitlerin yağlayıcılık performansının daha iyi olduğunu göstermiştir [63].

Han ve diğ. çalışmasında, deniz ortamı altında epoksi malzemenin aşınma ve kırılma performansını artırmaya yönelik deneyler yapmışlardır. Saf epoksi ile katkı ile geliştirilmiş epoksi kompozit malzemeleri deniz suyuna 7 gün ve 30 gün süreyle

daldırarak sonuçları yorumlamışlardır. Saf epoksiye kıyasla, epoksinin korozyon direncini artıran katkı malzemesinin etkisiyle, katkılı kompozitin tuzlu suya daldırmanın artmasıyla birlikte sürtünme katsayısının düştüğü sonucuna varmışlardır. [64].

Literatürde hızlandırılmış yaşlanmaya maruz bırakılmış cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin aşınma davranışı ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Fakat Park ve diğ. çalışmasında, hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz bırakılmış CTP ile güçlendirilmiş beton kirişlerin mekanik özelliklerini, eğilme ve sünekliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda CTP takviyesinin çelik takviyeye göre dayanıklılığı olumlu etkilediği ortaya konmuştur. CTP malzemenin, göçme aşamasında daha yüksek mukavemet gösterdiği ve eğilme dayanımında önemli bir iyileşmeye yol açtığı belirtilmiştir [65].

Aynı zamanda Syed ve diğ. çalışmasında, polyester kompozitlerin termal ve kimyasal yaşlandırmaya maruz bırakıldıktan sonraki mekanik özelliklerini incelemiştir. 200°C sıcaklıkta 2 ve 4 saat beklettikleri kompozit malzemelerin gerilme mukavemetinde azalma gözlemlenmiştir [66]. Yine aynı çalışmada dolgulu polyester kompozitlerin nitrik asit, hidroklorik asit, asetik asit gibi farklı asit çözeltilerinde bekletildikten sonraki ağırlık kayıplarını incelemiştir [66].

Syed ve diğ. çalışmasında, dolgulu kompozit malzemelerin su yaşlanmasına maruz bırakarak mekaniksel özelliklerindeki değişimi incelemiştir. Çalışma, numuneleri 24 saat boyunca damıtılmış oda sıcaklığındaki suya ve aynı zamanda kaynar suya daldırılıp, 2 ve 4 saat bekletilerek yapılmıştır. Sonuç olarak kompozit malzemenin mekanik özelliklerindeki yüzde azalma, oda sıcaklığındaki suda yaşlandırmaya kıyasla, kaynar suda daha fazla olarak belirtilmiştir [66].

Singh ve diğ. çalışmasında, sulu koşullarda elyaf takviyeli kompozitin sulu çalışma ortamında aşınma davranışlarını incelemiştir. Farklı yüklerde (50-80N) ve kayma mesafelerinde gerçekleştirilen testlerin sonuçlarını gözlemek için SEM görüntüleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda kayan ara yüzler arasına nüfuz eden suyun yağlama, sürtünme ve aşınma oranını azaltma etkisi gösterdiği belirtilmiştir [67].

Yousif ve El-Tayeb çalışmasında, iki farklı test tekniği kullanarak ıslak temas koşullarında cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzemenin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelemişlerdir. 30N ila 100N arasında yüklerle uygulanan deney sonuçlarında cam elyafın yönelimi ve test tekniklerinin kompozitin aşınma performansını etkilediği belirtilmiştir. Sonuç olarak ortamdaki suyun varlığının pürüzlülük değerini artırdığı ve abraziv aşınmayı meydana getirdiği gözlemlenmiştir [68].

Sumer ve diğ. çalışmasında, cam elyaf takviyeli kompozitin kuru kayma ve suyla yağlanmış ortamda tribolojik davranışını incelemiştir. Dönen AISI D2 disk ve üzerindeki pin mekanizmasıyla yapılan test sonuçlarında, suyun yağlayıcı olarak kullanıldığı ortamdaki sürtünme katsayısı ve aşınma oranının kuru ortamdakinden daha düşük olduğu kaydedilmiştir [69].

Agrawal ve diğ. çalışmasında, cam elyaf takviyeli epoksi reçinenin üç farklı ortamda gösterdiği aşınma davranışlarını incelemiştir. Kuru ortam, yağlı sıvı sürtünme ortamında ve kayan gaz ortamında gerçekleştirilen deneyde inert gaz içinde sürtünme katsayısı değerinin maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Sıvı sürtünme ortamında ise temas yüzeyinde oluşan transfer film tabakası ile minimum sürtünme katsayısı elde edildiği gözlemlenmiştir [70].

Kısa ve diğ. çalışmasında, elyaf takviyeli kompozit malzemeleri farklı çevresel koşullara maruz bırakarak aşınma davranışlarını incelemişlerdir. 0, 100 ve 200 gün süreyle güneş ışığına bırakılan kompozit numunelerde uygulanan yükün artmasıyla, aşınma miktarlarındaki artışın 200 gün süre güneşe maruz kalan numunede diğerlerine kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Aynı yük altında güneşe maruz bırakılma süresindeki artışla birlikte aşınma miktarı da artmış olduğu belirtilmektedir [71].

Kısa ve diğ. çalışmasında, 0, 100 ve 200 gün süre boyunca su altında bıraktıkları kompozit numuneleri farklı yükler altında aşınmaya tabi tutmuştur. Her üç süreç için de uygulanan yük miktarının artışı, aşınma miktarında artışa neden olmuştur. Bunun yanı sıra, aynı yük altında su altında bırakılma süresindeki artış ile birlikte aşınma miktarında da artış gözlemlenmiştir [71].

Nuruddin çalışmasında, cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzemenin farklı koşullarda, farklı reçine tiplerine göre aşınma dirençlerini mukayese etmiştir. Çalışmada polyester, vinil ester reçineler kullanılmıştır. Ayrıca kalıplanmış CTP, tuzlu su altında 60°C sıcaklıkta 2 ay yaşlandırılmış CTP ve pultrüde edilmiş numuneler kıyaslanmıştır. Sonuçlarda polyester reçinenin aşınma direnci açısından diğer reçinelere kıyasla en iyi performansı gösterdiği belirtilmiştir. Bu deney sonucunda, açık deniz platformunda çeliğe alternatif olarak CTP malzemenin kullanımının mümkün olduğu gösterilmektedir [72].

Amaro ve diğ. çalışmasında, cam elyaf takviyeli epoksi kompozitin hidroklorik asit ve sülfirik asit çözeltisi olmak üzere iki farklı asit çözeltisi içine daldırılarak mekanik özellikleri açısından değişimlerini incelemiştir. Asit ortamının kompozitlerin eğilme ve darbe mukavemetinde önemli ölçüde etki gösterdiğini ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini gözlemlemiştir [73].

6. MALZEME VE YÖNTEM

6.1. Malzeme

Cam elyaf takviyeli polyester kompozit numunelerin üretimi tez çalışmasında kullanılmak üzere Sami Tongün Cam Elyafı Polyester Ürünleri A.Ş. tarafından gerçekleştirilmiştir. CTP kompozit ürünler hammadde karışımı hazırlandıktan sonra 140°C sıcaklık ve 150 bar basınç altında sıcak pres kalıplama yöntemi ile 3 dakika süreyle üretilmiştir. Kompozit malzemede takviye elemanı olarak cam elyaf (CE) kullanılmıştır. Kullanılan cam elyafların çapları 13 µm, uzunlukları ise 12mm'dir. Numuneler 20x20x4 mm plakalar halinde üretilmiş olup, aşınma deneyleri öncesi cihaza uygun olarak kesilmiştir. Numunelerde matris malzemesi olarak ortoflatik polyester ve izoflatik polyester kullanılmıştır. Ortoflatik polyester kolay erişilebilirliği ve fiyat performans oranının yüksek olması sebepleriyle en çok kullanılan reçine çeşididir. İzoflatik polyester ise kimyasallara ve aşındırıcı çevrelere dayanımı diğer polyesterlere kıyasla daha iyi olan reçine çeşididir. CTP malzemelerin üretimi esnasında hacimde yaşanan ve sonuçta malzemenin performansını düşüren çekme gerilmelerini azaltmak için çekme katkıları kullanılmaktadır. Buradaki CTP numunelerin üretiminde polistiren ve plastifiyan çekme katkısı kullanılmıştır. Dolgu malzemesi olarak cam kürecik (CK) kullanılmıştır.

Elektrik yalıtkanlıklarının iyi olmasıyla bilinen polistiren çekme katkısı, boyutsal kararlılıkları iyi, düşük maliyetli, kolay şekillendirilebilen malzemelerdir. Kullanım alanları geniş olan polistiren hortum, otomobil parçaları ve elektrik düğmeleri gibi birçok yerde kullanılmaktadır. Çözücü ve yağlardan kolay etkilenirler [74].

Plastifiyanlar çekme katkıları ise genel olarak kompozit malzemelere fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla eklenmektedirler. Aynı zamanda malzemenin işlenebilirlik özelliklerini arttırmada etkilidir ve yanmazlık özelliğini arttırmaları.

Bu tez çalışmasında kullanılan numunelerin kimyasal bileşimi Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. CTP kompozit numunelerin kimyasal bileşimleri

Numune	Matris Malzemesi	Takviye Malzemesi	Dolgu Malzemesi
N1	%20 Ortoflatik polyester + %8 Polistiren	%16 CE	%56 CaCO ₃
N2	%20 Ortoflatik polyester + %8 Plastifiyen	%11 CE	%5 CK + %56 CaCO ₃
N3	%20 İzoflatik polyester + %8 Plastifiyen	%28 CE	%44 CaCO ₃
N4	%20 Ortoflatik polyester %8 Plastifiyen	%18 CE	%54 CaCO ₃
N5	%20 Ortoflatik polyester + %8 Plastifiyen	%11 CE	%61 CaCO ₃

Numunelerin malzeme yapısında kullanılan Tablo 6.1’deki bileşenlerle birlikte yapıda kullanılan diğer dolgu malzemesi kalsiyum karbonattır (CaCO₃). Doğada oldukça yaygın bulunan kalsiyum karbonat dolgu malzemesi en çok kullanılan inorganik maddelerden birisidir.

Bu çalışmada dolgu malzemesi olarak kullanılmasının nedenlerinden biri düşük maliyete sahip olmasının yanı sıra kompozit malzemeye iyi yüzey bitirme özelliği, yüksek darbe direnci, tokluk özelliği gibi özellikler katmasıdır. Ayrıca malzemeye aşındırıcı bir etkisi de yoktur.

6.2. Yöntem

6.2.1. Yoğunluk ölçümü

Çalışmada kullanılacak numunelerin yoğunluk ölçümleri Şekil 6.1’de gösterilen AND GR-200 analitik hassas terazi cihazı ile yapılmıştır. Kullanılan bu cihazın aynı zamanda yoğunluk ölçüm özelliği de bulunmaktadır.



Şekil 6.1. AND GR-200 yoğunluk ölçüm cihazı [75]

6.2.2. Sertlik ölçümü

Malzemenin plastik deformasyona, çizilmeye, aşınmaya, kesilmeye veya delinmeye gösterdiği direnç olarak tanımlanan sertlik, malzemenin dayanımını etkileyen bir değerdir. Bu çalışmada aşınma miktarlarının sertlik değeri ile ilişkilendirilmesi adına numune yüzeylerine sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Sertlik ölçümler ASTM D 2583 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin barcol sertlik ölçümleri Şekil 6.2.'de gösterilen sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır.

Fiberglas, alüminyum ve alaşımları, pirinç, bakır ve sert plastikler gibi birçok malzemenin sertlik ölçümünde kullanılan bu taşınabilir cihaz, malzemeye iğne ucunun batırılmasıyla basınç uygulayarak ölçüm alır. Sertlik derecesini 0 ila 100 birim arasında derecelendirerek göstergeden okunur.

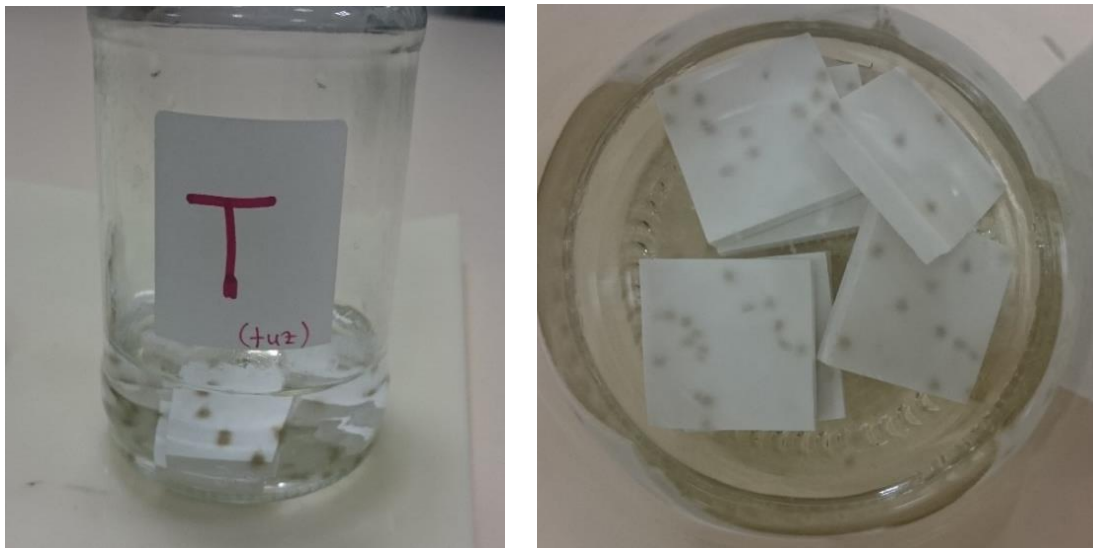


Şekil 6.2. Barcol sertlik ölçüm cihazı [76]

6.2.3. Numunelerin maruz bırakıldıkları farklı çevresel koşullar

6.2.3.1. Tuzlu su ortamı

Yoğunluk ve sertlik ölçümleri yapılmış olan CTP numuneler, Her bir numune çeşidinden 6 adet olmak üzere tuzlu su ortamında 12 ay bekletilmiştir (Şekil 6.3.). %5 tuzlu su çözeltisi 300 gr suya 15 gr tuz oranında karıştırılarak oluşturulmuştur. 12 ay bekleme süresinden sonra kurumaya bırakılmıştır. Tamamen kurduğundan emin olduktan sonra her bir numuneden ikişer adedine aşınma testi uygulanmıştır.

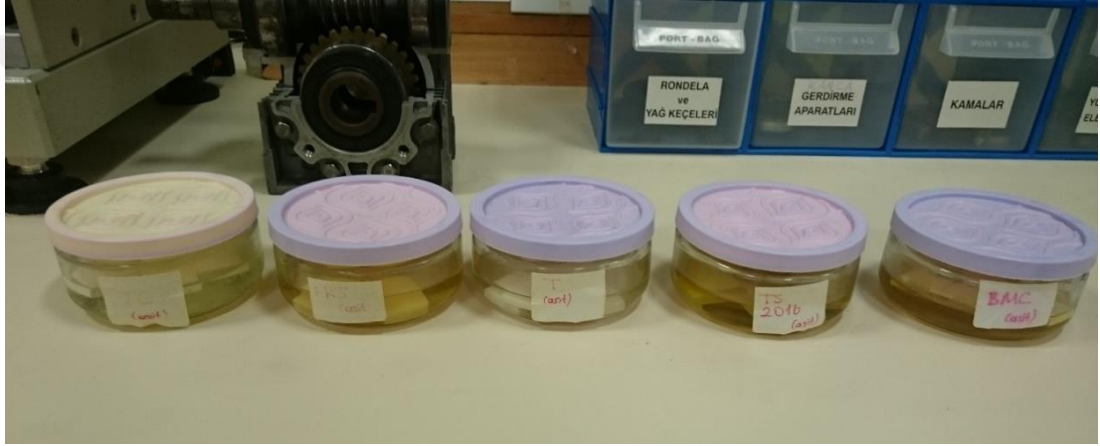


Şekil 6.3. Tuzlu su ortamında bekleyen CTP numuneler

6.2.3.2. Asit ortamı

CTP numunelerinin, asitli ortama maruz bırakıldıklarında aşınma dayanımlarında nasıl bir değişiklik görüldüğünü gözlemlemek için 6 ay süre boyunca asit çözeltisinde bekletilmiştir. Numuneler 0,3M HNO₃ nitrik asit ortamında 6 ay bekledikten sonra arındırılarak aşınma testine tabi tutulmuştur.

Literatürde asit ortamında bulunan CTP malzemelerin aşınma davranışı ile ilgili pek fazla çalışma bulunmamaktadır. Kimya endüstrisi gibi alanlarda kullanılan bazı parçaların aside maruz kaldıkları bilinmekte ve aşınma etkisi araştırılmaktadır.



Şekil 6.4. Asit ortamında bekletilen CTP numuneler



Şekil 6.5. Asit ortamından alınıp arıtılmış numuneler

6.2.3.3. Hızlandırılmış yaşlandırma

Hızlandırılmış yaşlandırma, kompozit malzemeyi etkileyen olumsuz çevre şartlarının, malzeme özellikleri üzerine etkisini incelemek adına gerçekleştirilmiştir. Yaşlandırma, genellikle bir malzemenin ömrünü hızlandırılmış şekilde belirlemek için gerçekleştirilen yapay bir prosedürdür.

Bu çalışmada CTP numuneleri hızlandırılmış yaşlandırma işlemine maruz bırakmak için numuneler klasik bir etüv fırınında 70°C’de 96 saat boyunca bekletilmiştir. Yaşlandırma işlemi sonrası normal ısısına dönmesi beklenen numuneler aşınma test cihazına uygun boyutlarda kesilerek teste tabi tutulmuştur.

6.2.3.4. Termal çevrim

CTP kompozit malzemeler, diğer birçok malzeme gibi kullanım koşullarına göre sıcak veya soğuk ortamlara maruz kalabilmektedirler. Bu çalışmada kompozit numunelere, değişken sıcaklıktaki çalışma ortamında kullanılmaları durumunda aşınmaya olan etkisini incelemek adına termal çevrim uygulanmıştır.

CTP numuneler 0°C’deki suya daldırılıp hemen ardından 100°C’deki suya daldırılmıştır. Bu işlem 100 çevrim tekrarlanıncaya kadar devam etmiştir.

6.2.3.5. Ultraviyole (UV) ışını

UV ışınları, ışının şiddetine ve dalga boyuna bağlı olarak, kompozit malzemelerde polimer moleküllerini uyarma ve life hasar verme etkisi gösterebilir. Bu etki malzemenin lif tipine, inceliğine ve kimyasal yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Literatürde çok fazla örneği bulunmayan UV ışınlarının aşınmaya etkisini incelemek için CTP numuneler 300 saat boyunca UV ışını etkisine maruz bırakılmıştır. Uygulamada Şekil 6.6.’de gösterilen ATC-L120 model UV ışık kabini kullanılmıştır. Bu kabin BS950, DIN6173 ve M&S C1/C2 standartlarını desteklemektedir.



Şekil 6.6. ATC-L120 UV ışık kabini

6.2.3.6. Hidrotermal yaşlandırma

CTP numuneler kuru ortamda yaşlandırmaya maruz bırakıldığı gibi, aynı etüv fırınında sıvı ortamda, su dolu hazne içerisinde hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır. Numuneler 70°C sıcaklıktaki suyun içerisinde, 8 hafta süre ile bekletilmiştir. Kurutulduktan sonra ise aşınma testi uygulanmıştır.

Literatürde CTP malzemelerin hidrotermal yaşlandırmaya maruz kaldıkları aşınma çalışmalarına rastlanmamaktadır. Bu çalışma ile, çalışma koşulu olarak su ile temasta olan ve yüksek sıcaklığa maruz kalan CTP malzemeyle üretilmiş parçaların aşınma dayanımı açısından fikir edinilebilir.

6.2.3.7. Kuru sürtünme aşınma deneyleri

Aşınma testleri, işlem görmemiş ve diğer çevresel koşullara maruz bırakılmış CTP numunelerin kuru sürtünme deneyleri ASTM G 77 standardında 500 d/d ve 60 N normal yük altında 2 saat test edilmiştir.

6.2.3.8. Sıvı sürtünme aşınma deneyleri

Bundan önceki durumlarda işlem görmemiş ve farklı çevresel koşullara maruz bırakılmış CTP numuneler kuru sürtünme ile aşınma testine tabi tutulmuştur. Bu çalışmada ise aşındırıcı sisteme yağ eklenmesiyle sıvı sürtünme uygulanmıştır. Çalışmada aşınma süresi 1 saat, devir sayısı 500 d/d ve uygulanan normal yük ise 20N'dur.

Sıvı sürtünmeye maruz bırakılan numunelerden, aşınma testi sonrası en doğru ağırlık verisini alabilmek için yüzeylerdeki yağlardan arındırma işlemleri uygulandı. CTP numuneler kalıntılarında temizlenmesi için öncelikli olarak ultrasonik temizleme cihazında yağ sökücü solüsyon kullanılarak temizlendi. Ultrasonik temizleme cihazı olarak Şekil 6.7.'da görülen "VWR Ultrasonic Cleaner USC-TH" kullanılmıştır.



Şekil 6.7. Ultrasonik temizleme cihazı

Sonrasında daha iyi yağ çıkarma işlemi için hekzan kimyasal bileşiği ile hekzan uygulaması yapıldı. Bu işlem yaklaşık 5 saat süreyle gerçekleştirildi. Yağdan arınma işleminden sonra numuneler kurutulup ağırlıkları ölçülüp kaydedildi.

Farklı makine parçalarında kullanılmak üzere tercih edilebilen CTP malzemenin yağlanması ve mineral yağlarla temasta olması durumunda sıvı ortamlarda gösterdiği aşınma direncini çalışma sonucunda görebiliriz.

Aşınma testi öncesi her bir numunenin Şekil 6.8.'te gösterilen 0.0001 g hassasiyetli Precisa 125A hassas tartı ile ölçümü yapılmıştır. Aşınma testleri esnasında sürtünme kuvvet değerleri her yarım saatte bir kaydedilmiştir.

Deney sonrası numuneler, sürtünmeden kaynaklı ısınmadan dolayı, normal sıcaklığına dönmesi için ağırlık ölçümü öncesi en az 2 saat bekletilmiştir. Ağırlık ölçümü yapılan numunelerin deney öncesi kütlesiyle farkları hesaplanıp kaydedilmiştir. Her bir çevresel koşul sınıfı için, her bir malzemedan ikişer, toplamda 80 numune teste tabi tutulmuştur.



Şekil 6.8. Hassas terazi

Aşınma testleri, Phoneix Tribology Ltd. tarafından üretilen Şekil 6.9.'de görülen TE 53 Slim model aşınma test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz ASTM G 77 standardına uygun olarak üretilmiş olup hız kapasitesi 50-850 d/d'dir.

Cihazın yükleme işlemi, numune tutucusunun üst kısmına dayanmış olan yük kolunun uç kısmına cihazın kapasitesine uygun yük asılması ile gerçekleştirilir. Cihazın yükleme aralığı ise 50-750 N'dur.



Şekil 6.9. Çok amaçlı aşınma test cihazı [77]



Şekil 6.10. Aşınma testi sonrası CTP numuneler

6.2.3.9. Aşınma sonrası numune yüzey görüntüsü alma

Aşınma oranları hesaplanan numunelerin en son aşamada aşınma yüzeylerini görüntülemek ve yorumlamak amacıyla görseller çekilmiştir. Özel bir test laboratuvarında sertlik ölçüm cihazı olarak kullanılan Duravision 20 G5 modeldeki çok yönlü cihazın (Şekil 6.11.) yüksek büyütme özelliğiyle görüntüler alınmıştır. Cihaz 14 kademeli zoom özelliğine sahip olup, deneysel çalışmalardaki numunelerin görselleri 150x zoom ile görüntülenmiştir.

Numunelerin aşınma yüzey görsellerinin büyük çoğunluğu 40µm yakınlıktan alınmıştır. Bazı numunelerde net görüntü elde edilememesi sebebiyle 200µm yakınlıktaki görselleri kullanılmıştır.



Şekil 6.11. Görüntü almada kullanılan cihaz
Duravision 20 G5

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Kompozit malzemeler, özellikle savunma sanayi, balistik, havacılık, zırh, uçak gövdesi gibi ağırlığın çok kritik seviyede olduğu alanlarda kullanımı yaygın bir malzemedir. Hafifliğin sağlanması ise malzemenin içeriği, katkısı ve bu doğrultuda oluşan yoğunluğu ile doğrudan alakalıdır. Bunun yanı sıra maliyet açısından malzemeyi uygun fiyatlı tutmak da yoğunluğa bağlı olabilir. Bu doğrultuda kompozit malzemelerin yoğunluklarının, çeşitli takviye elemanları ve dolgu malzemeleri ile düşürülmesi hedeflenir. Tablo 7.1.'de çalışmada kullanılan farklı takviye malzemeleri ile dolgu ilavesi içeren numunelerin yoğunlukları verilmiştir.

Tablo 7.1. CTP numunelerin yoğunluk değerleri

Numune	Yoğunluk (g/cm ³)
N1	1,84
N2	1,68
N3	1,68
N4	1,70
N5	1,77

Tablodaki veriler incelendiğinde, en düşük yoğunluk değeri N2 ve N3 numunelerinde eşit şekilde gözlemlenmektedir. N2 numunesinin yoğunluğundaki düşüşün sebebi içeriğindeki cam küre dolgu ilavesi olarak gösterilebilir. N3 numunesindeki yoğunluğun düşüşünün yüksek cam elyaf takviyesine bağlı olduğu düşünülmektedir. Cam elyaf takviye oranındaki farkların yoğunluğa etkisini incelersek N4 ve N5 numunesindeki aynı kimyasal bileşene ek olarak %11 ve %18 oranlarını kıyaslayabiliriz. %18 cam elyaf takviyeli N4 numunesi, %11 cam elyaf takviyeli N5 numunesine kıyasla yoğunluğu daha düşüktür. Kompozitlerdeki çekme katkısının yoğunluğa etkisi üzerine kıyaslama yapıldığında, plastifiyen çekme katkılı N4 numunesinin yoğunluğunun polistiren çekme katkılı N1 numunesinden daha düşük olduğu görülmektedir. Fakat farklı orandaki takviye malzemesi sebebiyle

kesin bir kaniya varılamamaktadır. Aynı şekilde plastifiyen çekme katkılı N5 numunesinin, polistiren içeren N1 numunesinden daha düşük yoğunluklu olduğu görülmektedir. Yine farklı oranlardaki takviye malzemesi, yoğunluk farkının çekme katkısından mı yoksa cam elyaf oranından mı olduğu bilinmemektedir. Tek başına dolgu malzemesi olarak kullanıldığında yoğunlukta düşüşü sağlayan cam kürecik, N2 ile N5 numuneleri arasında kıyaslama yapıldığında da kullanıldığı numunenin yoğunluk değerini azalttığı görülmektedir.

7.2. Barcol Sertlik Ölçüm Sonuçları

Numunelerin barcol sertlik değerleri tablo 7.2.'de görülmektedir. Her bir numunenin ölçümler sonucu sertlik değeri eşit çıkmıştır.

Tablo 7.2. CTP numunelerin barcol sertlik değerleri

Numune	Barcol sertlik değeri
N1	85
N2	85
N3	85
N4	85
N5	85

Literatürde cam elyaf takviyesinin artışının CTP kompozit malzemelerin sertlik değerlerini iyileştirdiği görülmüştür [78]. Bu çalışmada literatürden farklı olarak kullanılan numunelerdeki farklı miktardaki cam elyaf takviyesi numunelerin sertlik değerlerini değiştirmemiştir. Bunun sebebi malzemelerin aynı zamanda farklı içerikteki matris malzemelerin veya farklı çekme katkılarının etkisi olabilir.

Yine literatürde cam kürecik dolgu ilavesinin ortoflatik polyeester reçinelerin sertlik değerini çok değiştirmedeği görülmüştür [79]. Çalışmada literatürde benzeri görüldüğü gibi cam kürecik dolgu malzemesinin sertlik değerine çok etkisinin olmadığı görülmektedir.

7.3. Aşınma Test Sonuçları

Yapılan ön çevresel koşul çalışmaları sonrası yapılan aşınma testleri bu bölümde numune bazlı ve çevresel koşul bazlı olarak numuneler üzerinden değerlendirilecektir. Test numunelerinin sürtünme katsayıları, ağırlık kaybı olarak ele alınan aşınma miktarları ve aşınma oranları incelenecektir.

Numunelerin aşınma oranlarını elde edebilmek için, test esnasında maruz kaldıkları ve belli sürelerde kaydedilen sürtünme kuvvetlerinin ortalaması hesaplanmıştır. Denklem 7.1'deki formülden yola çıkarak her bir numunenin ortalama sürtünme katsayısı hesaplanmıştır.

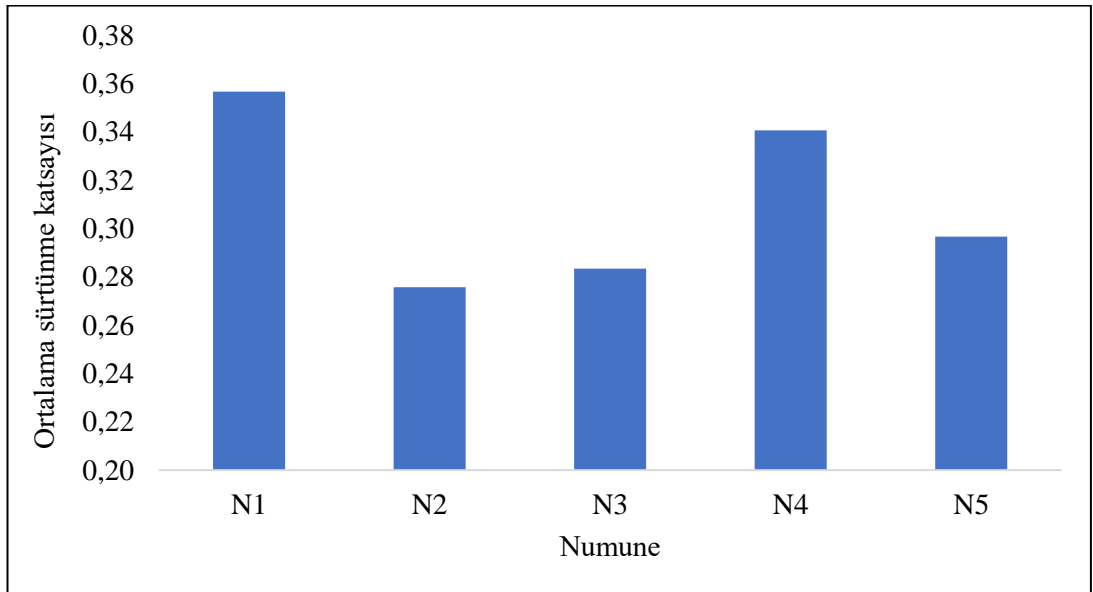
$$\mu = \frac{F_S}{F_N} \quad (7.1)$$

μ = sürtünme katsayısı

F_S = Sürtünme kuvveti (N)

F_N = Normal kuvvet (N)

İşlem görmemiş numunelerin sabit yük ve hız altında ortalama sürtünme katsayı değerleri Şekil 7.1'de verilmiştir.



Şekil 7.1. İşlem görmemiş numunelerin ortalama sürtünme katsayı değerleri

Şekil 7.1. incelendiğinde 60N'luk sabit yük ve 500d/d sabit hız altında yapılan kuru sürtünme deneyinde en yüksek ortalama sürtünme katsayısı N1 numunesinde, en düşük sürtünme katsayısı ise N2 numunesinde görüldü. N1 numunesinin sürtünme katsayı değerinin yüksek çıkmasının nedeni olarak, içeriğinde bulunan polistiren çekme katsayısı gösterilebilir.

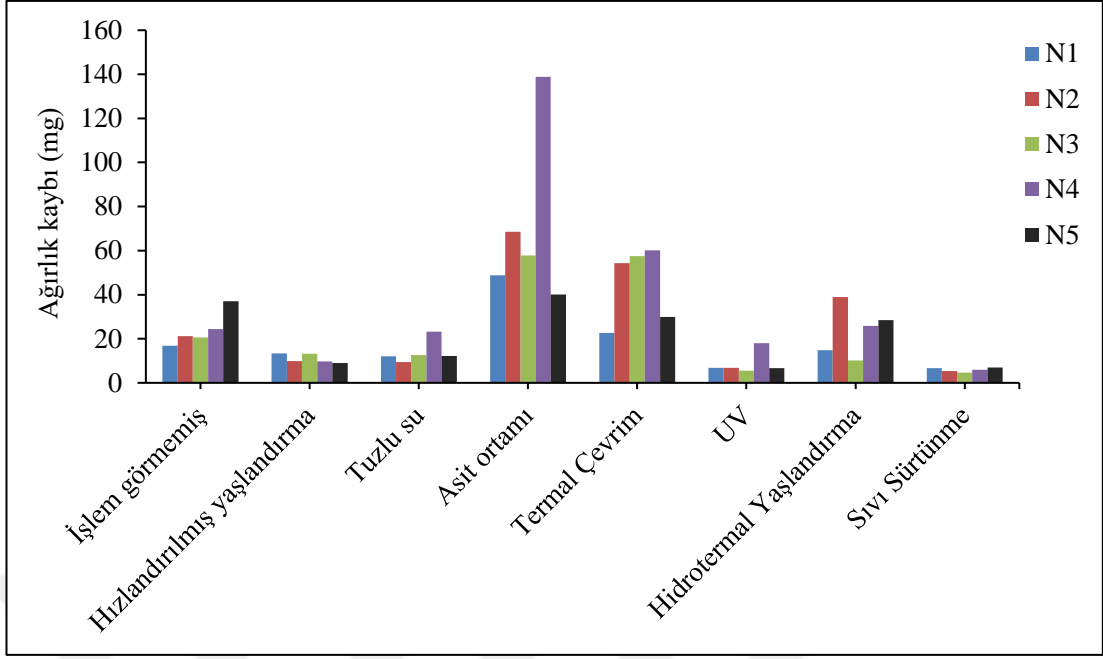
N2 ve N5 numunelerini kıyasladığımızda N2 numunesinin ortalama sürtünme katsayısının N5 numunesine nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. N2 numunesinin yapısındaki cam kürecik dolgu malzemesi ortalama sürtünme değerlerini olumlu yönde etkileyerek düşürdüğü görülmektedir.

Literatürde cam elyafın, sürtünme davranışlarını iyileştirme özelliğinden bahsedilmektedir. Bu çalışmada da cam elyaf ve cam kürecik kullanımının sürtünme özelliklerine olumlu etki gösterdiği görülmektedir. Fakat cam elyaf takviyesinin optimum oranda kullanılmadığı ve fazla kullanıldığı durumlarda sürtünmeye olumsuz yansıdığı N4 ve N5 numunesini kıyasladığımızda görülmektedir. N4 numunesindeki fazla cam elyaf takviyesi, ortalama sürtünme katsayısında artışa sebep olmuştur.

Diğer bir dikkat çeken nokta ise, en fazla takviye malzemesi bulunduran numunenin N3 numunesi olmasına rağmen, sürtünme katsayısının, daha az takviye malzemesine sahip numunelere oranla daha düşük olmasıdır. Bu durum, N3 numunesinin diğer numunelerden farklı olarak, yapısında kullanılan izoflatik polyesterle de açıklanabilir.

Bu çalışmada, N2 numunesinde olduğu gibi doğru oranlarda kullanılan CE takviyesinin malzemenin sürtünme davranışında olumlu etki gösterdiği ve cam kürecik dolgu kullanımının da düşük sürtünmeyi sağladığı görülmektedir.

Aşınma testi öncesi ağırlıkları ölçülen tüm numunelerin, aşınma testi sonrası tekrar ağırlık ölçümü yapılarak, aşınma miktarı ağırlık kaybı olarak kaydedilmiştir. CTP numunelerin aşınma miktarı, Şekil 7.2.'de verilmiştir.



Şekil 7.2. CTP numunelerin aşınma sonrası ağırlık kayıpları

Şekil 7.2. incelendiğinde işlem görmemiş numunelere yapılan aşınma sonucunda ağırlık kaybı en fazla olan numunenin N5 numunesi olduğu görülmektedir. En az ağırlık kaybı ise N1 numunesinde gerçekleşmiştir. N1 numunesinin yapısındaki polistiren çekme katkısı, ağırlık kaybının az olmasında etkili olmuştur. N2 numunesindeki ağırlık kaybının N5 numunesiyle kıyaslandığında daha az olmasının sebebi, N2 numunesinin yapısındaki cam kürecik olarak görülmektedir. Garg çalışmasında [80] ve diğer literatür örneklerinde de belirtilen cam kürecik dolgusunun aşınmayı azaltıcı etkisi, bu çalışmadaki işlem görmemiş numunelerdeki ağırlık kayıplarına bakıldığında da görülmektedir. Hızlandırılmış yaşlandırma uygulanmış numunelerde ise ağırlık kaybı en çok N1 numunesinde görülürken, en az N5 numunesinde görülmüştür. Genel olarak bakıldığında hızlandırılmış yaşlandırma ortamı tüm numunelerde aşınma miktarını, ağırlık bazında düşürmüştür. Sonuçlar gösteriyor ki hızlandırılmış yaşlandırma etkisi N5 numunesi üzerinde diğer numunelerle kıyaslandığında daha olumlu etki göstermiştir. Tuzlu su ortamı da hızlandırılmış yaşlandırma etkisinde olduğu gibi tüm numunelerde ağırlık kaybında iyileştirme etkisi göstermiştir. Tuzlu su ortamında en az ağırlık kaybına uğrayan numune N2 numunesidir. Asit ortamında tüm CTP numunelerin aşınma miktarı artmıştır. Termal çevrime maruz kalmış numunelerden N5 numunesi dışında tüm numunelerin aşınma miktarı, ağırlık bazında artmıştır. Tüm numunelerin ağırlık

kayıplarında artma görülürken istisnai olarak N5 numunesinin ağırlık kaybı nispeten düşmüştür. N1 ve N4 numuneleri kıyaslandığında termal çevrime girmiş numunelerden N1 numunesinin ağırlık kaybı N4 numunesine göre daha azdır. Bunun sebebi olarak N1 numunesinin yapısındaki polistiren çekme katkısı gösterilebilir.

UV ortamındaki numunelere bakıldığında ağırlık kayıplarının azaldığını ve N3 numunesinin UV ortamından daha az etkilendiği görülmüştür. Diğer numunelerden farklı olarak yapısında izoflatik polyester kullanılan N3 numunesinin UV ortamından daha az etkilenmesi bu duruma bağlanabilir. Hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalan numunelerden N2 numunesi ağırlık kaybının en çok görüldüğü numunedir. N5 numunesi ile kıyaslandığında N2 numunesindeki cam kürecik dolgusunun ağırlık kaybını azaltıcı etkisi hidrotermal yaşlandırma uygulanan koşulda görülmemektedir. Sıvı sürtünme ile yapılan deneyde ise tüm numunelerin ağırlık kayıplarında oldukça olumlu bir etki gösterdiği gözlemlenmiştir.

Aşınma testleri sonucu, hassas tartı kullanılarak ağırlık kayıpları kaydedilen numunelerin aşınma oranları Denklem 7.2'deki formül ile hesaplanmıştır.

$$W = \frac{\Delta M}{\rho \cdot L \cdot F_N} \quad (7.2)$$

Bu denklemde,

W = aşınma oranı ($m^3/Nm \times 10^{-14}$)

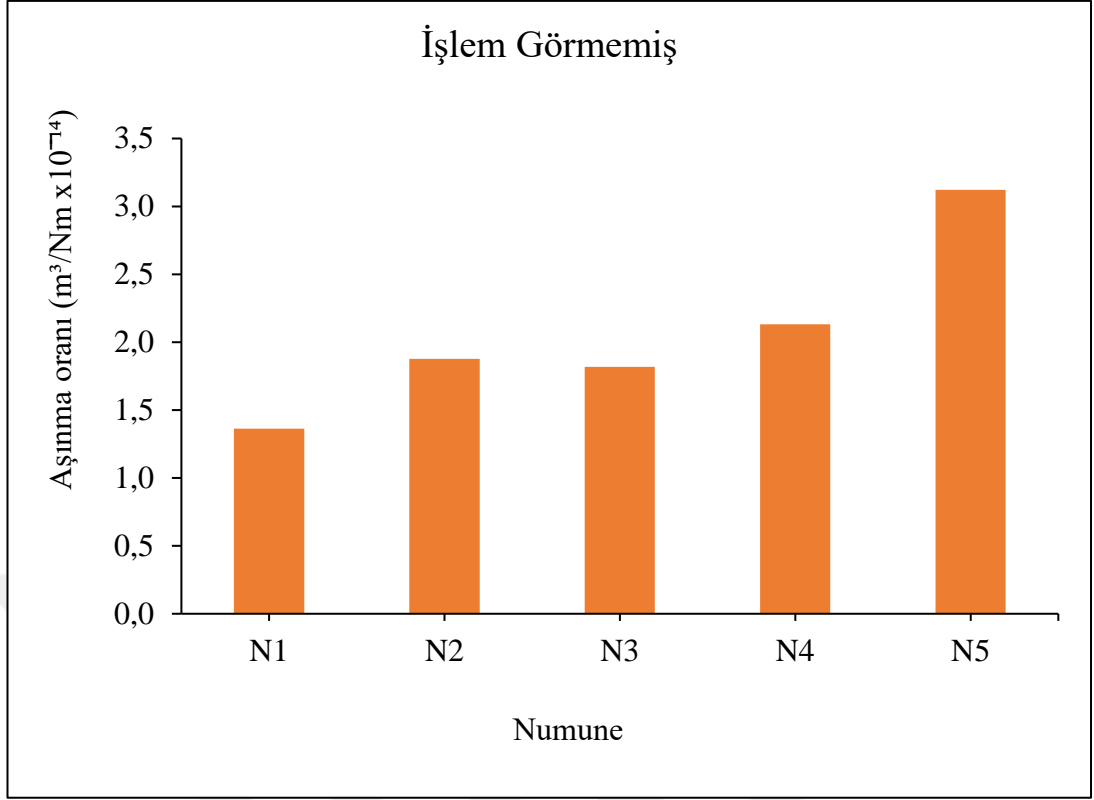
ΔM = ağırlık kaybı (gr)

ρ = yoğunluk (gr/m^3)

L = kayma mesafesi (11200 m)

F_N = normal yük (kuru sürtünme deneylerinde 60N, sıvı sürtünme deneylerinde 20N'dur.)

İşlem görmemiş ve farklı çevresel koşullara maruz bırakılmış her bir numune hesaplamalar sonrası aşınma oranları mukayese edilerek kayıt altına alınmıştır. İşlem görmemiş numunelerin sabit yük ve hız altında ölçülen değerler sonucu hesaplanan aşınma oranları Şekil 7.3.'te görülmektedir.

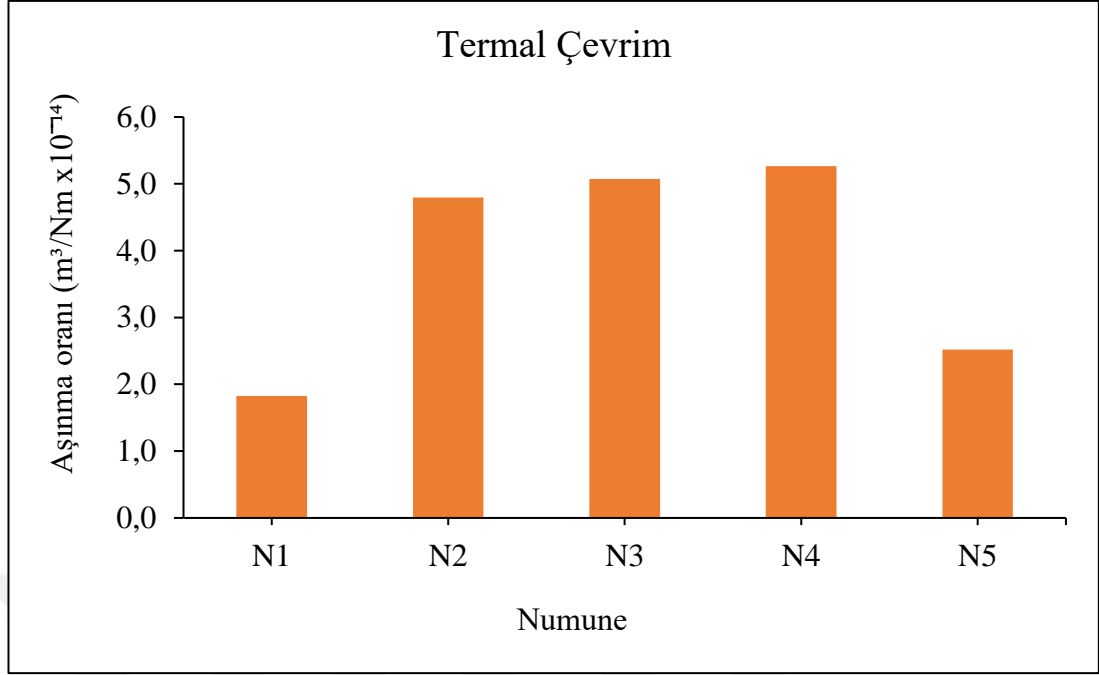


Şekil 7.3. İşlem görmemiş CTP numunelerin aşınma oranları

Şekil incelendiğinde 500 rpm sabit hız ve 60N yük altındaki işlem görmemiş numuneler arasında aşınma oranı en yüksek olan numune N5 iken en az aşınmaya uğrayan numunenin N1 olduğu görülmektedir.

İşlem görmemiş N2 numunesi ile N5 numunesi arasındaki %5 cam kürecik dolgusu farkı N2 numunesinin aşınma oranının düşük olmasına etki etmiştir. Bu bilgiden yola çıkarak cam kürecik dolgusunun aşınma direncini artırıcı etkisinden söz edebiliriz.

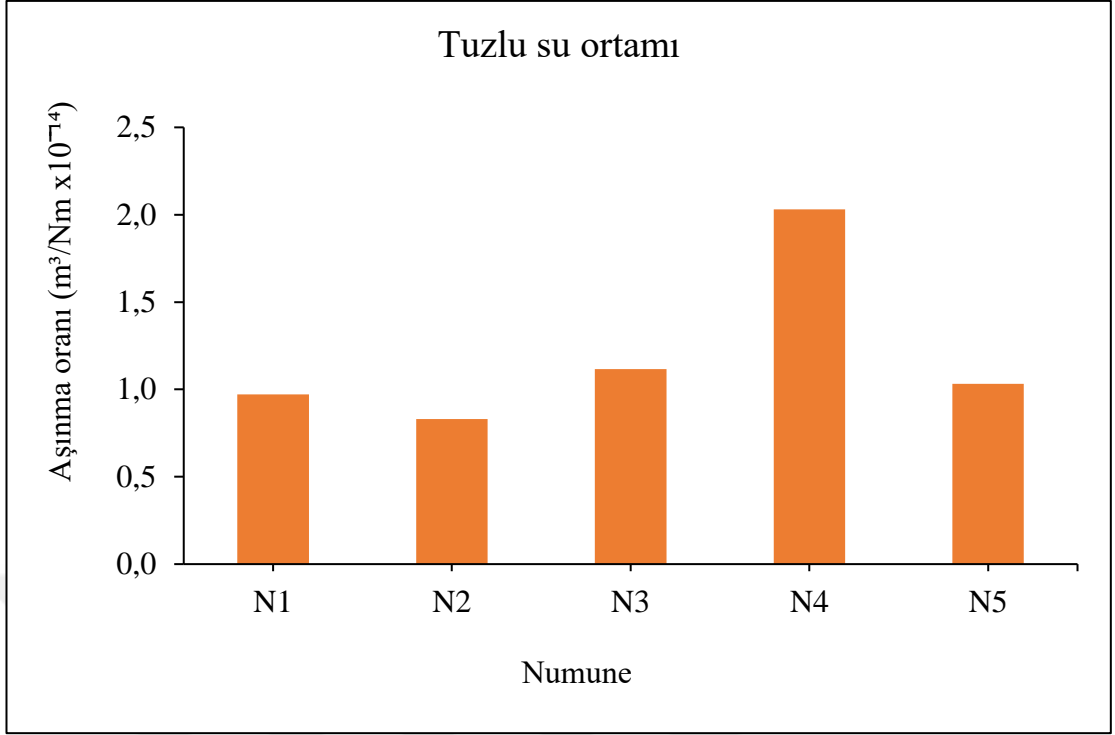
N4 ile N5 numunesi arasındaki takviye malzemesi farkına bakıldığında ise, cam elyaf takviyesi miktarı arttıkça aşınma oranında düşüş görülmektedir. Cam elyaf takviyesinin doğru oranda kullanılması aşınma direncini etkilemiştir ve en iyi aşınma oranının %20 ortoflatik polyester ve %8 polistiren matris malzemesi ile %16 cam elyaf takviyeli N1 numunesine ait olduğu görülmektedir.



Şekil 7.4. Termal çevrime maruz kalmış numunelerin aşınma oranları

0°C'deki suya ve hemen ardından 100°C'deki suya daldırılıp, 100 çevrim tekrar gören numunelerin, test sonrasında aşınma oranları kıyaslanmıştır ve sonuçlar Şekil 7.4.'te verilmiştir. Termal çevrim sonrası değerlere baktığımızda aşınma oranı değeri en az olan numune N1 olarak görülmektedir. Aşınma oranı değerleri işlem görmemiş malzeme değerleriyle kıyaslandığında termal çevrim işleminin aşınma oranlarında artışa neden olduğu ve malzemelerin genel olarak aşınma dirençlerinde düşüş yaşandığı gözlemlenmektedir. Numunelerin işlem görmemiş aşınma değerleriyle kıyaslandığında termal çevrimden en az etkilenen numunenin N5 numunesi olduğu görülmektedir. Termal çevrimden en çok etkilenen numune ise, işlem görmemiş ilk aşınma oranıyla kıyaslandığında N3 numunesidir. Numuneler arasındaki en yüksek elyaf katkı malzemesine sahip olmasına rağmen N3 numunesinin en çok etkilenen numune olması diğerlerinden farklı olarak kullanılan izoflatik polyestere bağlı olabilir.

Literatürde cam elyaf takviyeli kompozitlerin çok yüksek ve çok düşük ısıdaki farklı koşullar altında aşınma direnci ile ilgili araştırma bulunmamaktadır. Fakat kompozit malzemelerin kaynar su ve daha düşük suya maruz bırakıldıklarında mekanik özelliklerinde düşüş yaşadığı yapılan çalışmalarda görülmüştür [81].



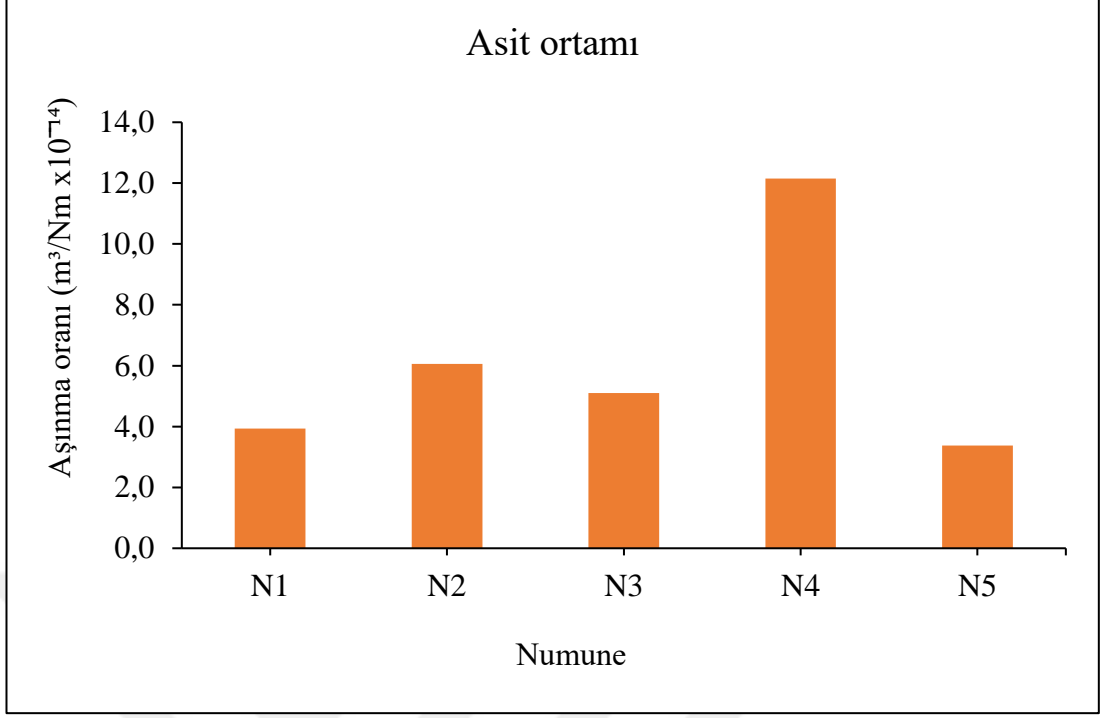
Şekil 7.5. Tuzlu su ortamında bekletilmiş CTP numunelerin aşınma oranları

12 ay süre boyunca tuzlu su ortamında bekletilmiş CTP numunelerin tamamen kurutulup sonrasında aşınma testi uygulanarak, aşınma oranları kaydedilmiştir. Tuzlu su ortamında bekletilen numunelerin aşınma oranları Şekil 7.5.'te görülmektedir.

İşlem görmemiş numunelerin aşınma oranlarına bakıldığında tuzlu suyun numuneler üzerinde aşınma direncini artırıcı etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Değerlere bakıldığında aşınma direnci en yüksek olan numunenin N2, en düşük olan numunenin ise N4 olduğu görülmektedir. N2 numunesinin içeriğindeki cam kürecik katkısının buradaki aşınmaya olumlu etkisi olduğu söylenebilir.

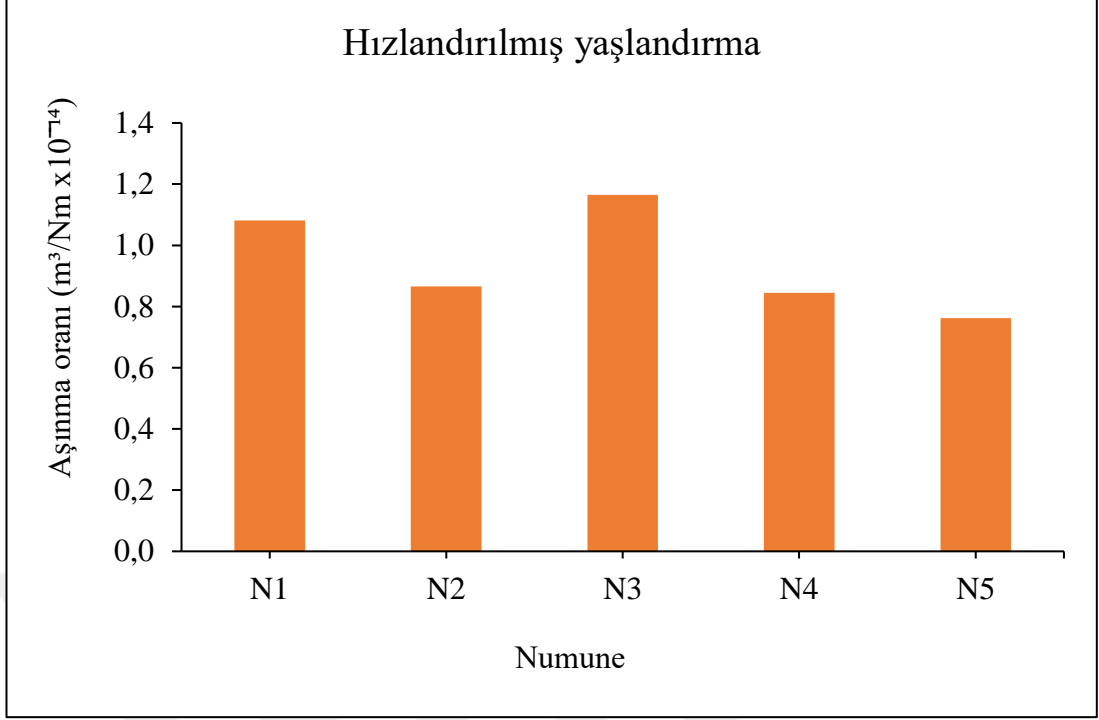
Literatürde tuzlu su ortamının CTP malzemelerin aşınma davranışları üzerindeki etkisi ile ilgili çalışmalara rastlanmasa da katkılı kompozit malzemelerin, katkısız malzemelere oranla tuzlu su ortamında uzun süreli bekleme karşı aşınma dirençlerinin daha yüksek olduğu yapılan bazı araştırmalarda görülmüştür [64].



Şekil 7.6. Asit ortamına maruz kalmış numunelerin aşınma oranları

0,3M HNO₃ nitrik asit ortamında 6 ay bekletilen CTP numunelerin aşınma oranları Şekil 7.6.'da görülmektedir. Asit ortamında bekleyen numunelerde, aşınma deneyi öncesinde de gözle görülür bir şekilde tahribat gözlemlenmiştir. Kaydedilen aşınma oranlarına bakıldığında ise asit çözeltisinin numunelerin aşınma direnci üzerinde oldukça ciddi etkisi olduğu görülmektedir. Her numune için aşınma oranlarında yükselme meydana gelmiştir.

Asit ortamında en az aşınma oranına sahip numuneler birbirine yakın değerlerle N1 ve N5 numunesidir. Cam elyaf takviye oranının asit ortamındaki aşınma direncine etkisi, değerlere bakıldığında net bir şekilde analiz edilememektedir. Burada yapılan değerlere bakıldığında %18 oranındaki cam elyaf takviyesi olan N4 numunesinin, %11 oranındaki cam elyaf takviyeli N5 numunesinden daha fazla aşındığı görülmektedir. Elyaf miktarı ile aşınma oranı arasında asit deneyleri çerçevesinde net ilişki kurulabilmesi için daha detaylı çalışmalar gerçekleştirilebilir. Fakat aşınma ortamının kompozit numuneler üzerinde olumsuz aşınma davranışı ve yüzey bozulumu etkisi, benzer çalışmalarda da görüldüğü gibi aşıkardır [82,83].



Şekil 7.7. Hızlandırılmış yaşlandırma uygulanan numunelerin aşınma oranları

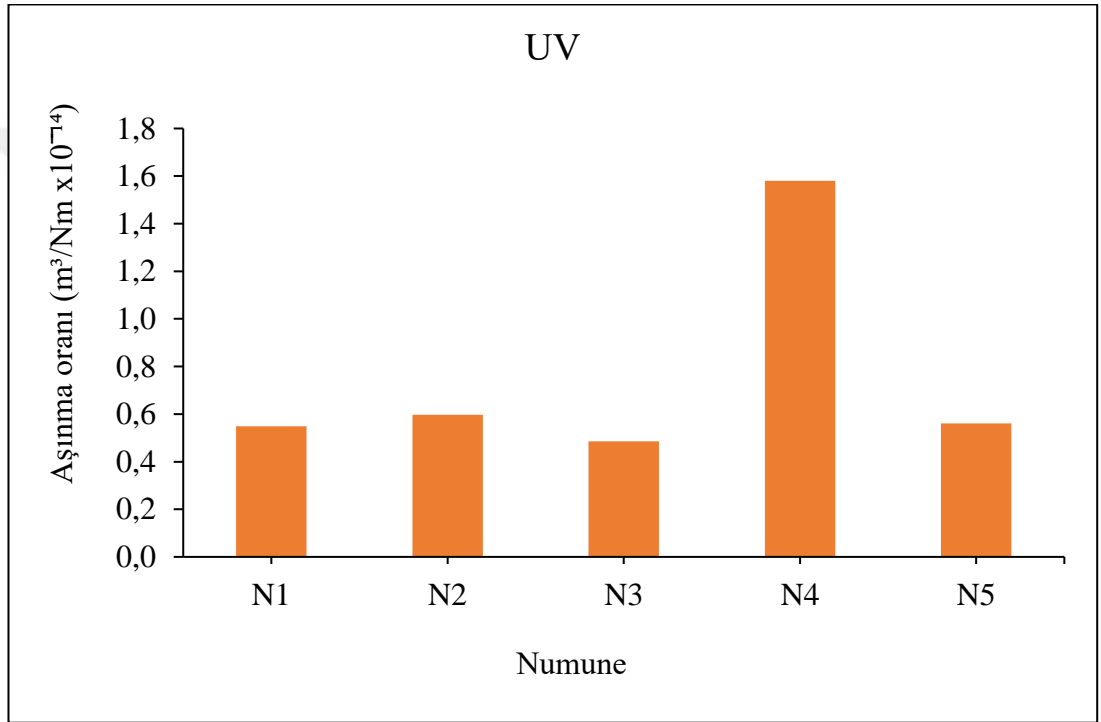
70°C’de 96 saat boyunca hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz bırakılan numunelerin aşınma oranları Şekil 7.7.’de görülmektedir. Numunelerin aşınma oranlarına bakıldığında ve işlem görmemiş numunelerin aşınma oranlarıyla kıyaslandığında, her bir numunede, hızlandırılmış yaşlandırma işleminin, numunelerin aşınma dirençlerini arttırdığı görülmektedir. N3 ve N4 numuneleri kıyaslandığında izoflatik polyester matrisine sahip N3 numunesinin aşınma direncinin, ortoflatik polyester matrisine sahip N4 numunesinin aşınma direncinden daha düşük olduğu görülmektedir.

Uzun süre sıcaklığın izoflatik polyesteri ortoflatik polyesterden daha fazla etkilediği söylenebilir. N2 ve N5 numunesindeki %5 cam kürecik dolgu malzemesinin, hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz bırakılan numunelerin aşınma direncine çok fazla etkisinin olmadığı görülmektedir.

Literatürde hızlandırılmış yaşlandırmanın aşınma direncine etkisi ile ilgili benzer çalışmalara rastlanmamıştır. Yine de hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz kalmış malzemelerdeki CTP katkısının, eğilme, süneklilik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerinde olumsuz yönde etkisinin olduğu çalışmalarla gösterilmiştir [65,84].

Literatürde kompozit malzemenin aşınma özelliği üzerinde UV ışınlarının etkisi üzerine çalışmalara rastlanmamıştır. Fakat yine literatürde bilinir ki, UV ışınlarının kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine, maruz kalma süresine ve maruz bırakılan sıcaklığa bağlı olarak olumsuz yönde etkisi mevcuttur.

Bu deneysel çalışmada CTP numuneler 300 saat boyunca UV ışını etkisine maruz bırakılmıştır. Devamında uygulanan aşınma deneyi sonuçlarında Şekil 7.8.'de numunelere ait aşınma değerleri görülmektedir.

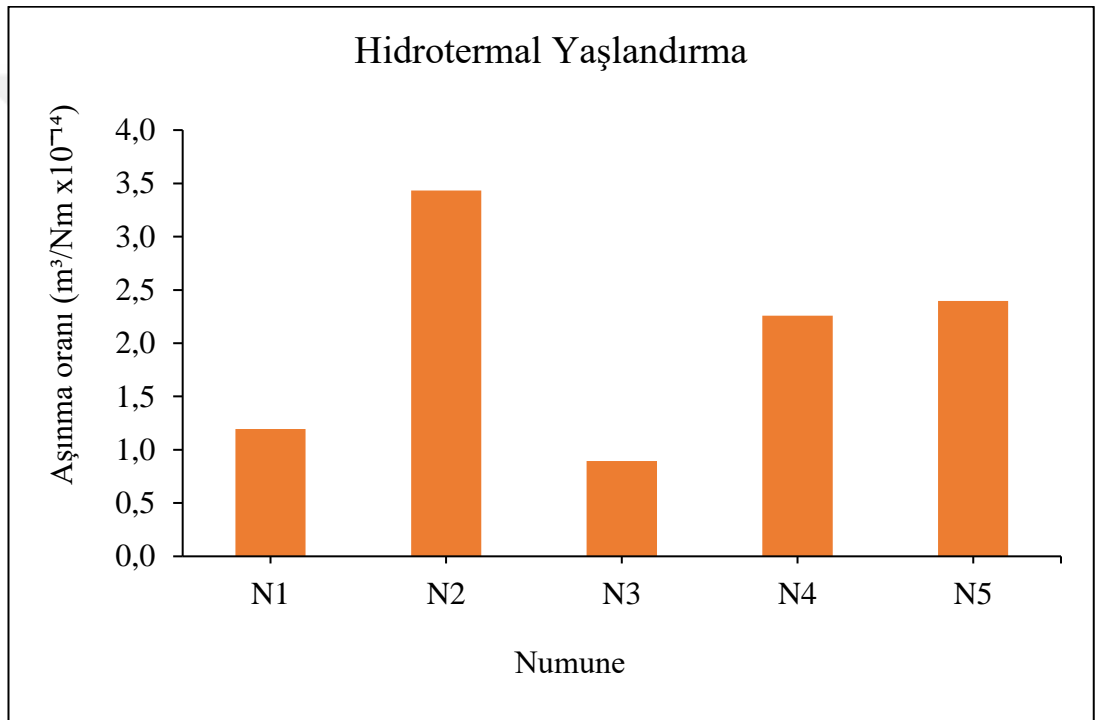


Şekil 7.8. UV ışınına maruz bırakılan CTP numunelerin aşınma oranları

Aşınma oranları değerlerine bakıldığında UV ışınına bırakılan numuneler arasında aşınma oranı en yüksek olan numune N4 numunesidir. Plastifiyen katkı malzemesi kullanılan ve %18 doğru oranda cam elyaf takviyesi kullanılması N4 numunesinin UV ışınına karşı aşınma dayanımını arttırdığı düşünülmektedir. Aşınma oranı daha düşük olan N1 numunesiyle kıyaslandığında, polistiren katkı malzemesinin plastifiyen katkı malzemesine göre UV ışınına karşı daha dirençli olduğu söylenebilir. Cam elyaf katkısı yüksek olan N3 numunesinin en düşük aşınma oranına sahip olması, cam elyaf takviyesinin UV ışınının olumsuz etkisine direnci arttırdığı söylenebilir. N2 ve N5 numunesindeki cam kürecik dolgu malzemesinin UV etkisindeki numunelerin aşınma direncine çok fazla etkisinin olmadığı görülmektedir.

UV ışınının kompozit malzemelerin aşınma direncine etkisi üzerine daha kapsamlı ve derin deneysel çalışmalar yapılması ile literatürdeki bu boşluk kapatılabilir.

Otomotiv, havacılık, deniz uygulamaları gibi alanlarda aktif kullanılan kompozitlerin, bu ortamlarda maruz kaldıkları sıcaklık ve nem parametrelerine karşı ömrünün ve dayanıklılığının geliştirilmesi için hidrotermal yaşlandırma deneylerine başvurulur. Bu deneysel çalışmada numuneler 70°C sıcaklıktaki suyun içerisinde, 8 hafta süre ile bekletilmiştir. Deney sonrası aşınma testi yapılan numunelere ait aşınma oranları Şekil 7.9.'da gösterilmiştir.



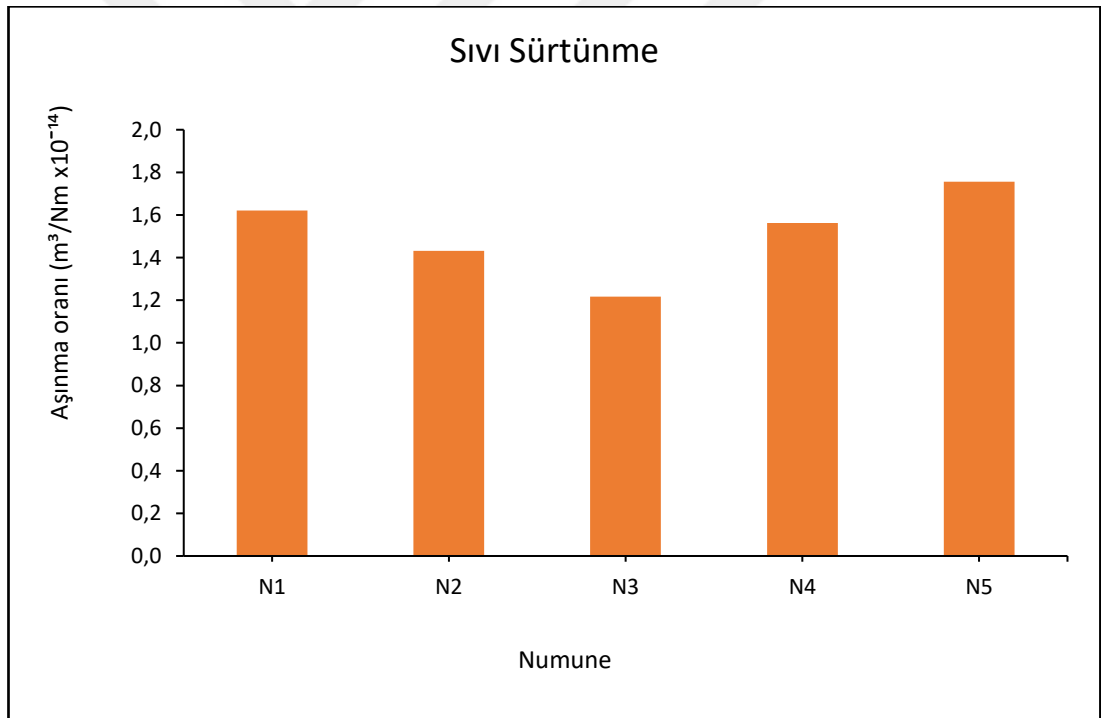
Şekil 7.9. Hidrotermal yaşlandırma sonrası numunelerin aşınma oranları

Deney sonrası aşınma direnci en yüksek numune N3 numunesi iken, hidrotermal yaşlandırma sonrası aşınma oranı en yüksek numune N2 numunesidir. Değerlere bakıldığında görüyoruz ki cam elyaf oranındaki artış ile nem ve yüksek sıcaklık ortamında malzemenin aşınma direncinde de artış gözlemlenmiştir. Yine N1 ve N4 numunelerinin kıyaslanması sonrası, N1 numunesindeki polistiren katkı payının aşınmaya etkisinin, plastifiyen katkı malzemesinin aşınmaya etkisinden daha olumlu olduğu söylenebilir. Yine N4 numunesi ile N3 numunesi karşılaştırıldığında, N3 numunesinin aşınma direncinin yüksek oluşu, cam elyaf oranının fazla oluşuyla birlikte izoflatik polyester matris malzemesinin hidrotermal yaşlandırmadan daha az

etkilenmesine de bağlanabilir. İzoflatik polyester ile ortoflatik polyester matris malzemelerinin hidrotermal yaşlandırmaya karşı dayanımlarını konusunda daha fazla kıyas yapabilmek için daha ayrıntılı deneysel çalışmalar yapılabilir.

N2 numunesindeki %5 oranındaki cam kürecik dolgusuna rağmen N5 numunesinin aşınma direncinin daha yüksek olması, buradaki aşınmaya cam kürecik malzemenin iyileştirici etkisinin olmadığı görülüyor.

Literatürde hızlandırılmış yaşlandırmanın malzemelerin kayma mukavemeti, eğilme modülü, taşıma mukavemeti gibi mekanik özelliklerine olumsuz yönde etkileri bilinmektedir. Bu çalışmada numunelerin aşınmasına etkisi numune bazlı olarak ya etkilememiştir ya da az miktarda olumsuz etkilemiştir. Aşınma üzerine hidrotermal yaşlandırmanın etkisi için literatürde yeterli çalışmaya rastlanmamıştır.



Şekil 7.10. Sıvı sürtünme sonrası numunelerin aşınma oranları

Şekil 7.10.'da sıvı sürtünme deneyi sonrası aşınma oranlarını numune bazlı olarak görebiliriz. Sıvı sürtünme deneyinde aşınma direnci en yüksek olan numune N3 numunesidir. Cam elyaf takviyesinin diğer numunelere göre daha fazla olması, cam elyaf oranının aşınma direncini yükseltmesinden kaynaklı olabilir.

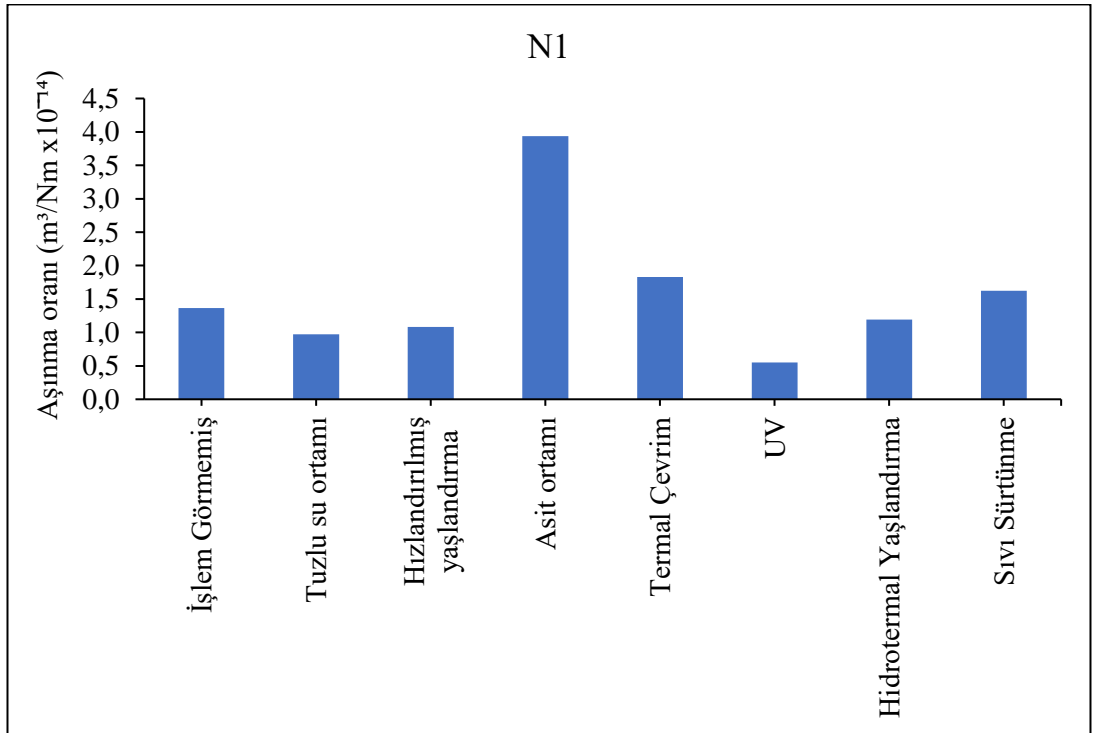
N5 numunesi sıvı sürtünme sonucu aşınma oranı en yüksek numunedir. Sonuçlar gösteriyor ki cam elyaf oranı arttıkça aşınma direnci de artmıştır.

N2 ve N5 numunesindeki aşınma oranları kıyaslandığında cam kürecik takviyesinin N2 numunesinin aşınma direncini yükseltici özellik gösterdiği görülmektedir. Literatürde bahsi geçen cam kürecik malzemenin iyi yağlayıcı olma özelliği, bu deneysel çalışmada da sıvı sürtünme deneyinde gösterilmiştir.

Yine literatürde ortoflatik reçineli numunelerin izoflatik reçineli numunelerden daha iyi aşınma dayanımına sahip olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır [58].

Bu deneyde izoflatik polyester ile ortoflatik polyester karşılaştırmasında farklı çevresel etkenlerde farklı sonuçlar gösterdiği görülmektedir. Bu kıyaslamada daha sağlıklı veriler için, daha ayrıntılı ve net ve içeriğinin sadece reçine malzemesine dayandırıldığı çalışmalar yapılmalıdır. Yine bu çalışmada cam elyaf katkısının yüksek olduğu N3 malzemesinde izoflatik polyester kullanıldığını da belirtmek gerekebilir.

Farklı çevresel koşullar baz alınarak, tüm numunelerin aşınma değerleri kıyaslandıktan sonra, numune bazlı olarak çevresel koşulların numunelerin aşınma oranları üzerindeki etkilerini, tablolardan görebiliriz.



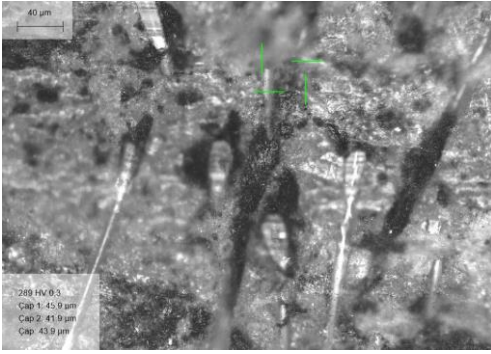
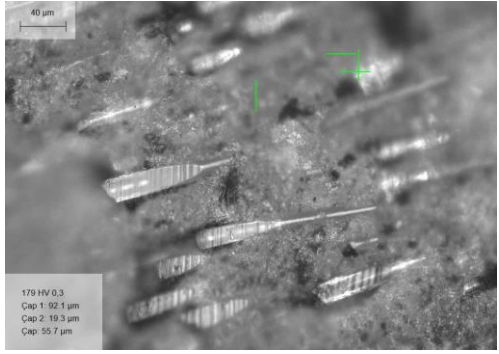
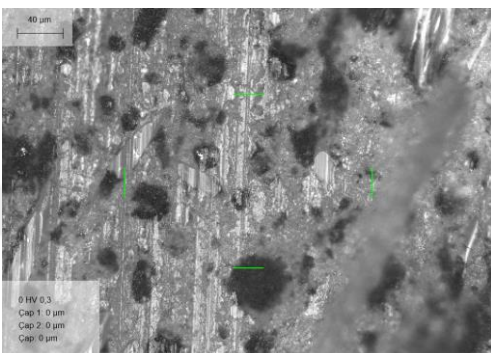
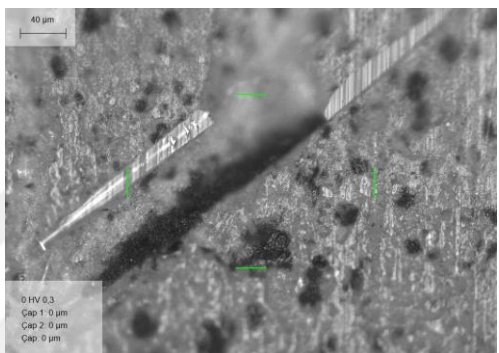
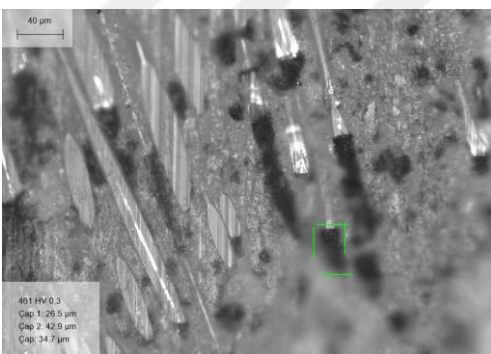
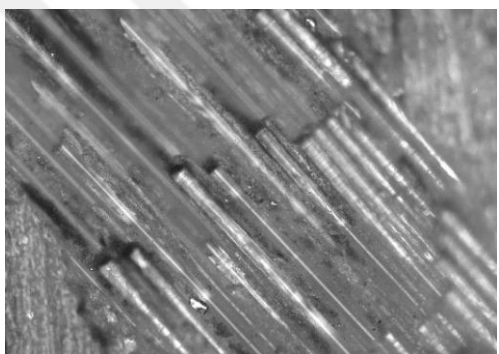
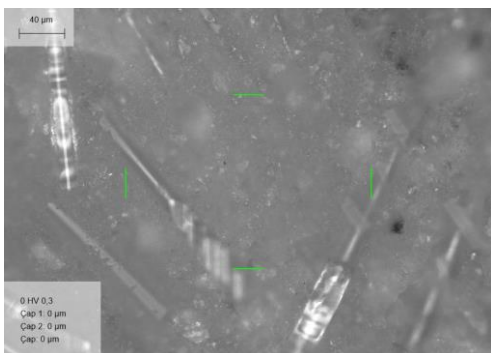
Şekil 7.11. N1 numunesinin farklı çevresel koşullardaki aşınma oranları

N1 numunesinin farklı çevresel koşullardan aşınma oranları kapsamında ne oranda etkilendiği Şekil 7.11.'deki grafikten görülebilir. İşlem görmemiş deney sonuçlarıyla kıyaslandığında aşınma dayanımını arttıran çevresel koşulların tuzlu su ortamı, hızlandırılmış yaşlandırma, UV ve hidrotermal yaşlandırma olduğu görülmektedir.

Termal çevrim N1 numunesinin aşınma oranını arttırarak aşınma dayanımını düşürmüştür. Aynı şekilde asit ortamı da numunenin aşınma oranını oldukça arttırmıştır.

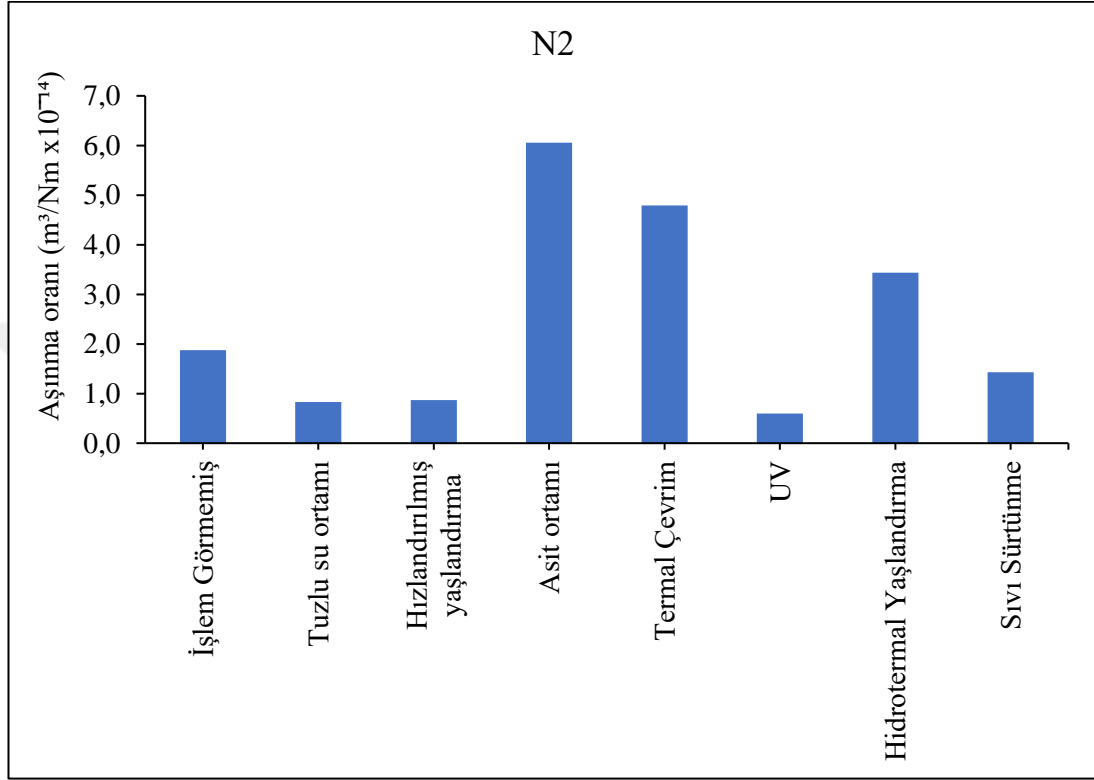
Sıvı sürtünme ise uygulanan normal yükün (20N), diğer koşullarda bekletilen numunelere uygulanan yükten (60N) farklı olması sebebiyle diğer çevresel koşullarla kıyaslamaya alınmamış olup yalnız farklı numunelerin sıvı sürtünme koşulunda birbirleriyle kıyaslanması yapılmıştır. Sıvı sürtünmenin diğer çevresel koşullarla kıyaslanamama durumu, diğer numunelerin çevresel koşul aşınma grafiklerinde de geçerlidir.

Tablo 7.3. Farklı koşullardaki N1 numunelerinin mikroskop görüntüleri

İşlem görmemiş		Tuzlu su ortamı	
Hızlandırılmış yaşlandırma		Termal çevrim	
UV		Hidrotermal yaşlandırma	
Sıvı sürtünme			

Tablo 7.3'te farklı çevresel koşullardaki N1 numunelerine aşınma yüzeylerinden alınan 150x görüntü örnekleri görülmektedir. Aşınma izleri ve aşınma sonrası ortaya çıkan elyaflar, aşınma izlerinde gözlenmektedir. Aşınmanın daha az olduğu

hızlandırılmış yaşlandırma ve UV ortamına ait numune görsellerinde aşınma izleri daha ince ve yüzeysel görülmektedir. Sıvı sürtünme uygulanmış numunede aşınma izleri oldukça incedir. Aşınma oranının daha az olduğu sıvı sürtünme numunelerinin yüzey görselleri de düşük aşınma miktarını desteklemektedir.



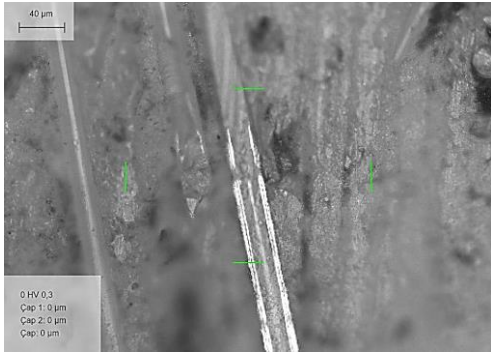
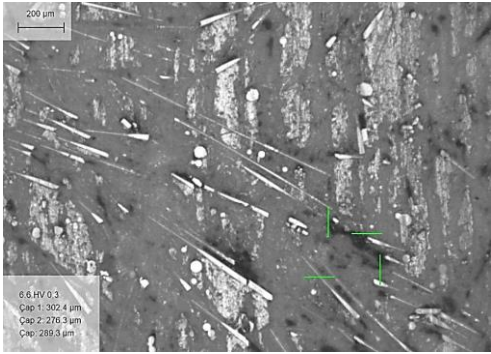
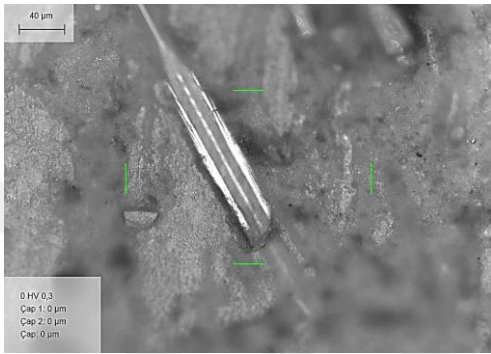
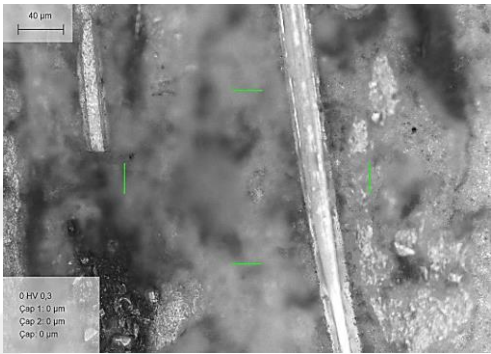
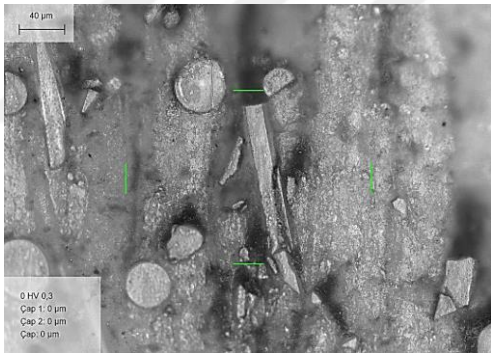
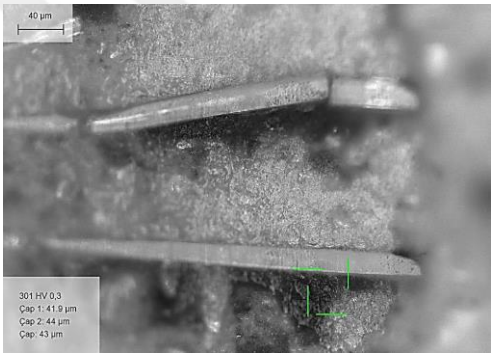

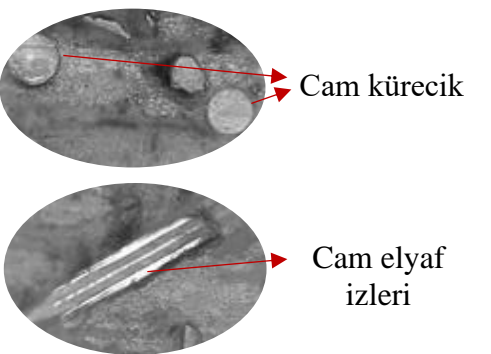
Şekil 7.12. N2 numunesinin farklı çevresel koşullardaki aşınma oranları

N2 numunesinin farklı çevresel koşullara maruz bırakılmış numunelerine ait aşınma oranları Şekil 7.12’de görülmektedir.

N2 numunesi UV ortamında bekletildikten sonra aşınma testine maruz bırakılmış ve en az aşınma oranına UV ortamında ulaşmıştır. UV ortamıyla birlikte tuzlu su ve hızlandırılmış yaşlandırma ortamları N2 numunesinin aşınma dayanımına olumlu yönde etki etmiştir.

Asit ortamı diğer tüm numunelerde olduğu gibi N2 numunesinin aşınma dayanımını azaltıcı etki gösterirken yine termal çevrim ve hidrotermal yaşlandırma da aşınma dayanımını olumsuz etkilemiştir.

Tablo 7.4. Farklı koşullardaki N2 numunelerinin mikroskop görüntüleri

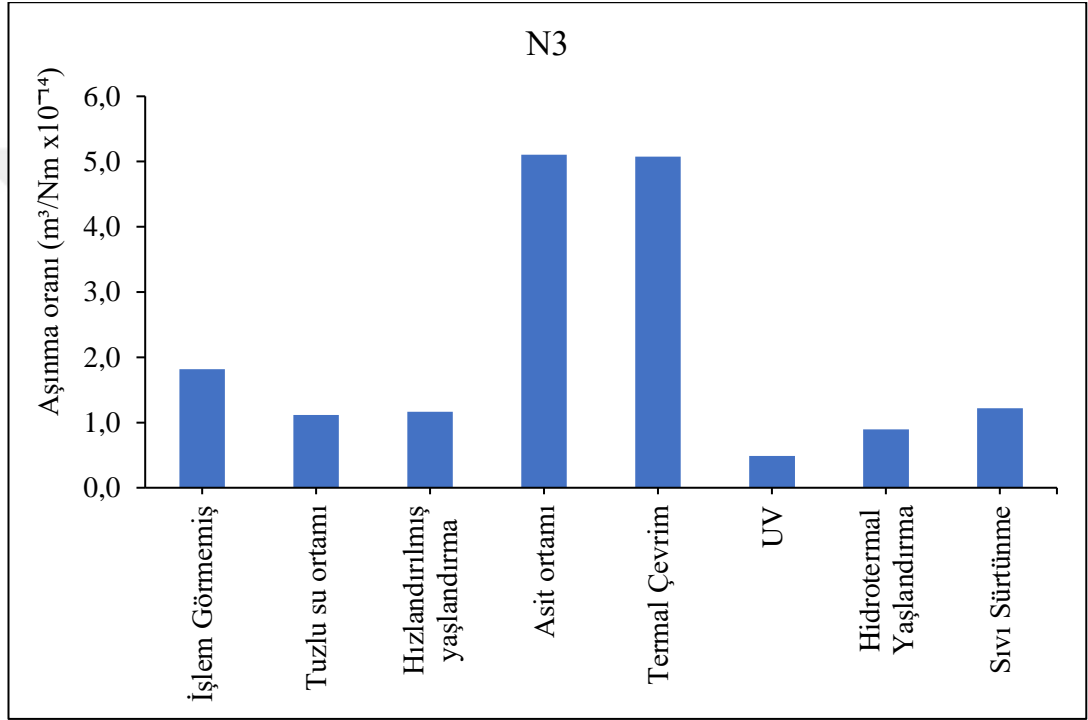
<p>İşlem görmemiş</p> 	<p>Tuzlu su ortamı</p> 
<p>Hızlandırılmış yaşlandırma</p> 	<p>Termal çevrim</p> 
<p>UV</p> 	<p>Hidrotermal yaşlandırma</p> 
<p>Sıvı sürtünme</p> 	 <p>Cam kürecik</p> <p>Cam elyaf izleri</p>

Tablo 7.4.'te N2 numunesine ait yüzey görüntüleri görülmektedir. Tuzlu su ve UV ortamı gibi aşınmanın daha az olduğu ortamlara ait izler daha inceyken burada termal çevrim ve Hidrotermal yaşlandırmaya ait aşınma izleri nispeten kalın görülmektedir.

Termal çevrime maruz bırakılmış numunenin aşınma yüzeyindeki aşınma izlerindeki beyazlığın yoğun olması, yüksek aşınma oranı sonrası elyaf izleri ile yorumlanabilir.

Yine tuzlu su ortamında bekletilmiş numunelerin aşınma oranı bilgisiyle kıyaslandığında düşük aşınma miktarını destekler niteliktedir.

Aynı şekilde sıvı sürtünme deneyi uygulanan numunedeki izlerin daha yüzeysel ve seyrek olduğu görülmektedir.



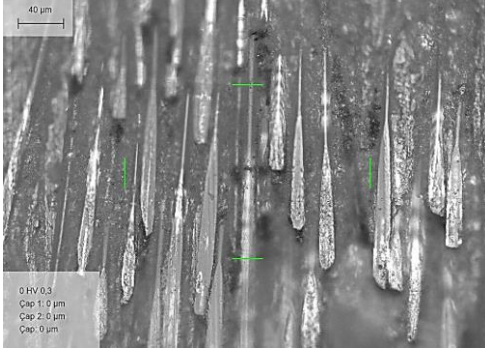
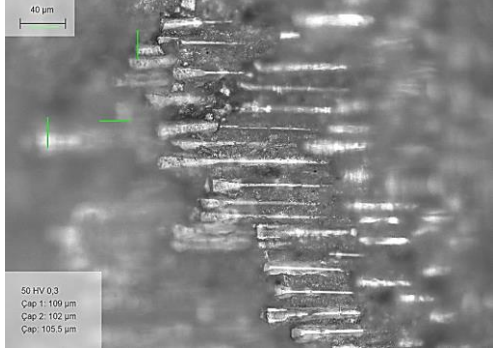
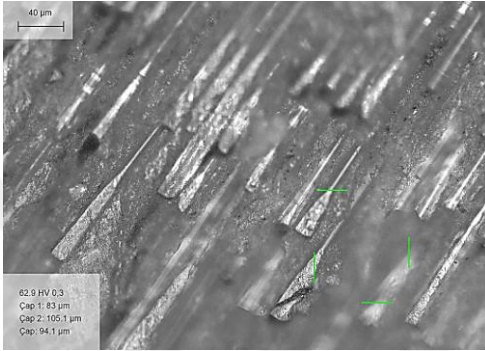

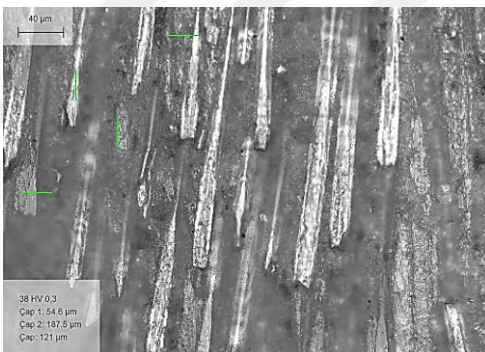
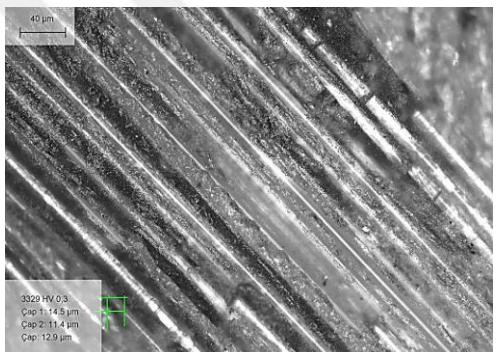
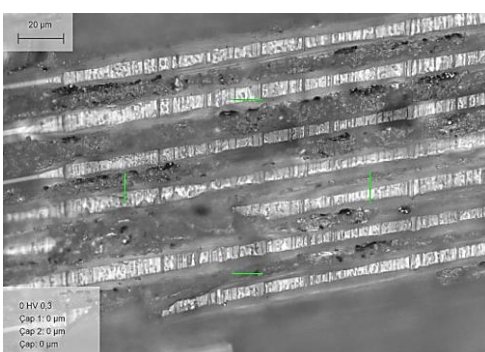
Şekil 7.13. N3 numunesinin farklı çevresel koşullardaki aşınma oranları

Farklı çevresel koşullara maruz bırakılmış numunelerden N3 numunesinin aşınmadan en az etkilendiği ortam UV ortamıdır.

Aşınma dayanımının en yüksek olduğu UV ortamının yanı sıra tuzlu su ortamı, hızlandırılmış yaşlandırma ve hidrotermal yaşlandırma aşınma dayanımını arttırarak olumlu etki göstermiştir.

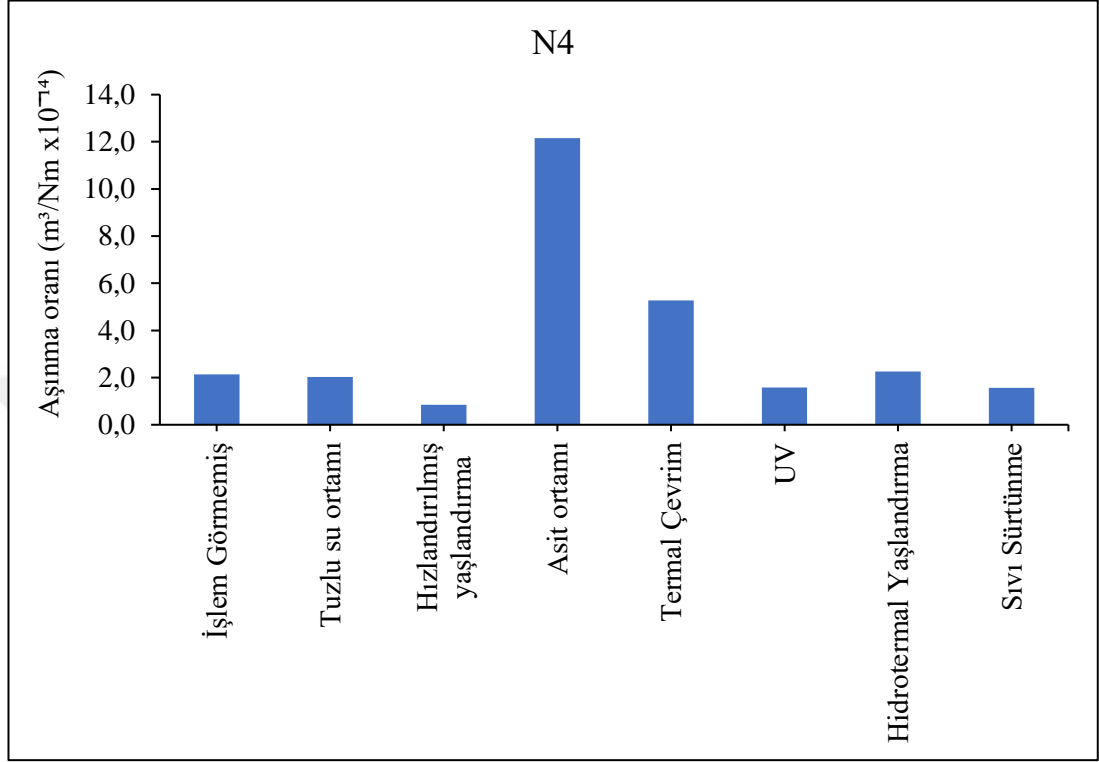
Asit ortamı ve termal çevrim ise aşınmayı arttırıcı etki göstererek N3 numunesinin aşınma dayanımını azaltmıştır.

Tablo 7.5. Farklı koşullardaki N3 numunelerinin mikroskop görüntüleri

İşlem görmemiş		Tuzlu su ortamı	
Hızlandırılmış yaşlandırma		Termal çevrim	
UV		Hidrotermal yaşlandırma	
Sıvı sürtünme			

N3 numunesine ait mikroskop görüntüleri Tablo 7.5.'te her bir çevresel koşul için görülmektedir. Tuzlu su ortamı, hızlandırılmış yaşlandırma ve hidrotermal yaşlandırma ortamlarındaki numunelere ait görsellerde görüldüğü gibi aşınma

oranının az olduğu numunelerde aşınma izleri incedir. Aşınma oranının yüksek olduğu termal çevrim numunesinin izlerinin diğerlerine kıyasla daha yoğun olduğu gözlemlenmektedir.




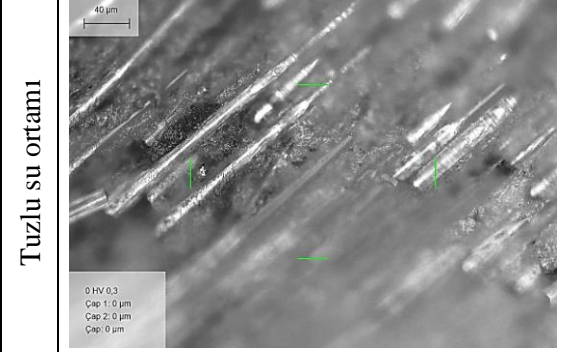
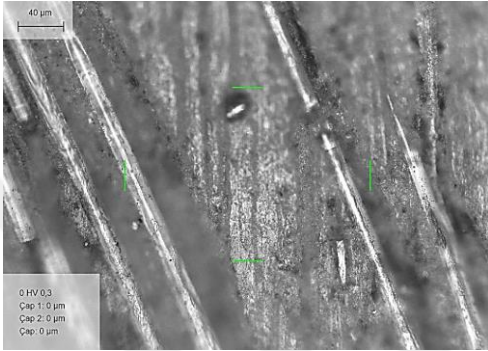
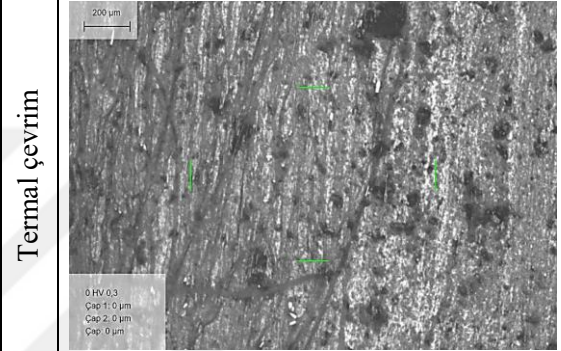
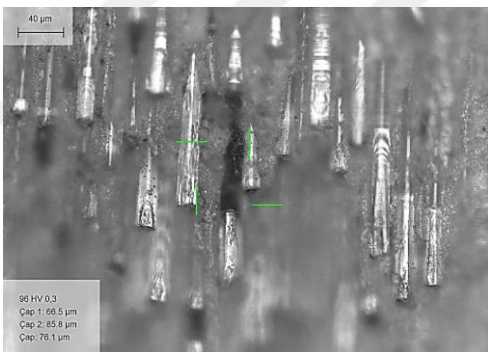

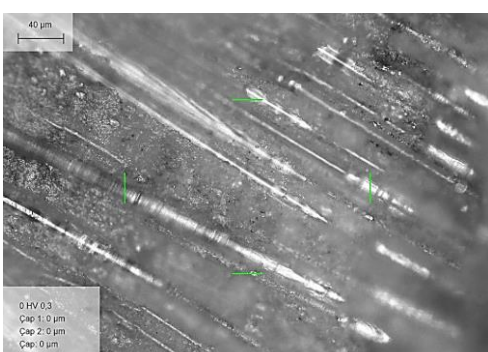
Şekil 7.14. N4 numunesinin farklı çevresel koşullardaki aşınma oranları

N4 numunesine ait aşınma oranları her bir çevresel koşul için Tablo 7.14.'te gösterilmektedir.

Tabloyu incelediğimizde N4 numunesinin aşınma dayanımını olumlu etkileyen ortamlar arasında hızlandırılmış yaşlandırma, tuzlu su ortamı ve UV ortamı bulunmaktadır.

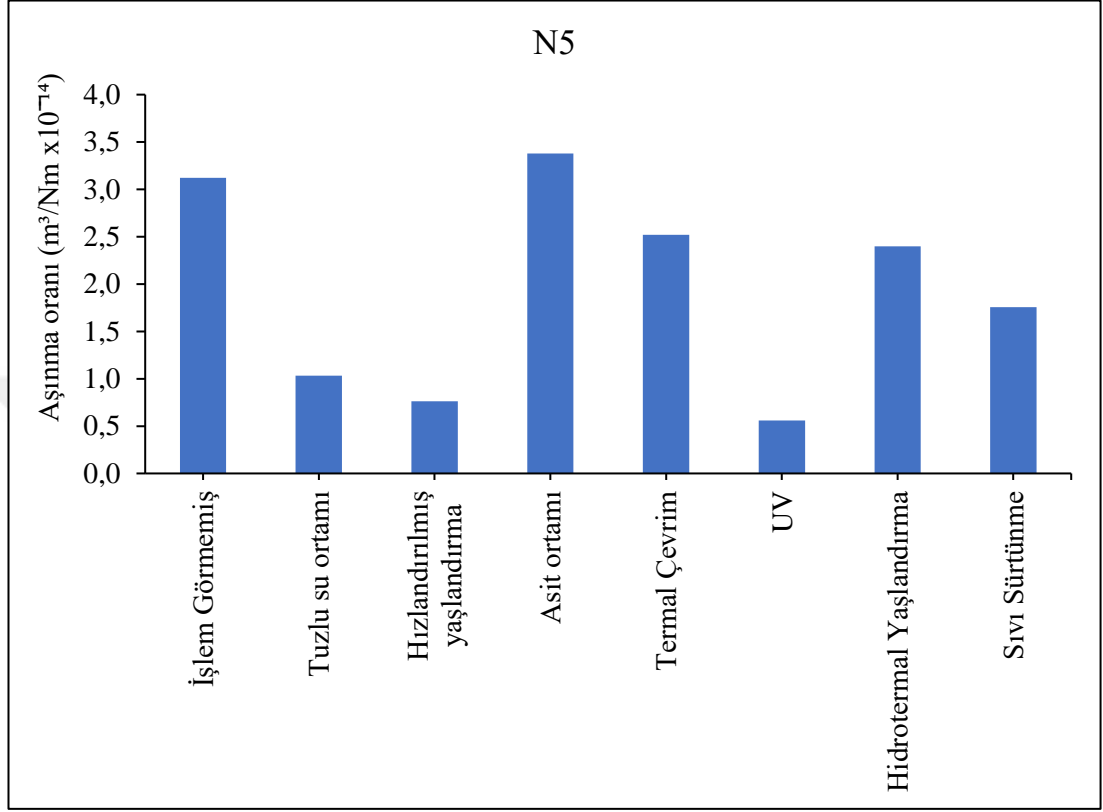
Hidrotermal yaşlandırma neredeyse işlem görmemiş numunenin aşınma oranına yakın fakat az bir farkla daha fazla aşınma miktarına sahiptir. Bununla birlikte yine asit ortamı aşınma direncini düşüren bir etki göstermiştir. Termal çevrim de asit ortamı gibi numunenin aşınma oranını arttırmış ve dayanımı azaltmıştır.

Tablo 7.6. Farklı koşullardaki N4 numunelerinin mikroskop görüntüleri

İşlem görmemiş		Tuzlu su ortamı	
Hızlandırılmış yaşlandırma		Termal çevrim	
UV		Hidrotermal yaşlandırma	
Sıvı sürtünme			

N4 numunesine ait görseller Tablo 7.6.'da verilmiştir. N4 numunesinin aşınma dayanımını arttıran ve aşınma oranlarının daha düşük olduğu tuzlu su ve hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz bırakılmış numunelerde ince aşınma izleri görülmektedir.

Yüksek aşınma oranına sahip termal çevrime maruz bırakılmış numunenin ise asit ortamındaki numunelerde olduğu gibi net görseller elde edilemediği için 200 µm mesafeden görüntüsü alınabilmiştir.


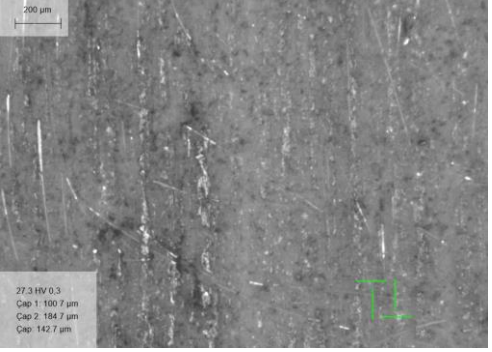
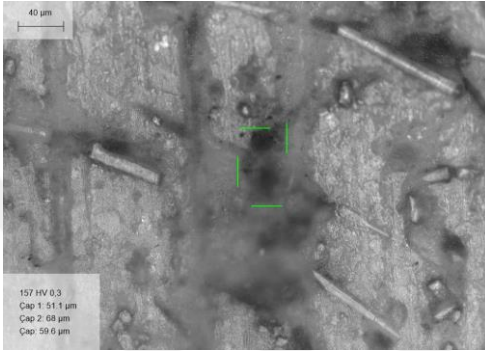
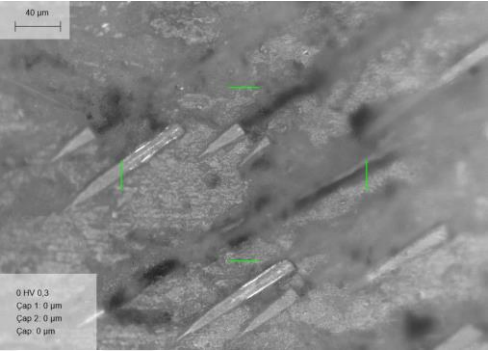
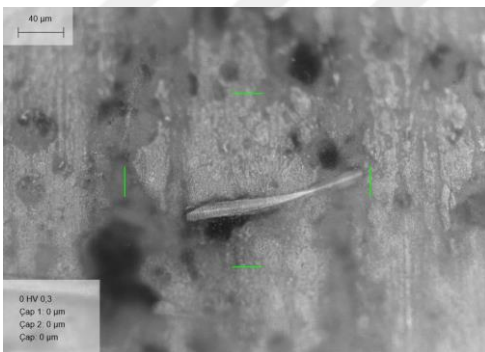

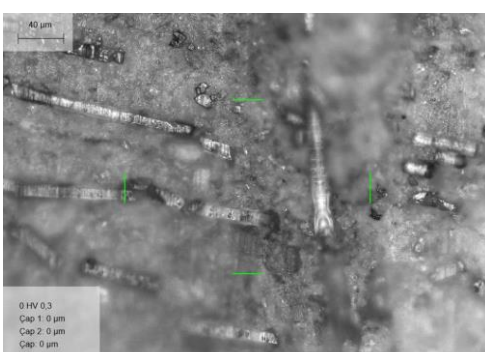


Şekil 7.15. N5 numunesinin farklı çevresel koşullardaki aşınma oranları

N5 numunesine ait aşınma oranları Şekil 7.15.'te görüldüğü üzere her bir çevresel koşula göre verilmiştir. N5 numunesinin aşınma dayanımını arttıran ve numunenin bu koşullarda da aşınmaya direnç gösterdiği çevresel şartlar UV ortamı, tuzlu su ortamı, hızlandırılmış yaşlandırma, termal çevrim ve hidrotermal yaşlandırma değildir.

Görülüyor ki N5 numunesi asit ortamı dışında her bir çevresel koşulda aşınmaya karşı dayanım göstermiştir. Asit ortamı ise diğer tüm numunelerde olduğu gibi aşınma dayanımına olumsuz etki göstermiştir.

Tablo 7.7. Farklı koşullardaki N5 numunelerinin mikroskop görüntüleri

İşlem görmemiş		Tuzlu su ortamı	
Hızlandırılmış yaşlandırma		Termal çevrim	
UV		Hidrotermal yaşlandırma	
Sıvı sürtünme			

Tablo 7.7.'de N5 numunesinin her bir farklı koşul için aşınma yüzeylerine ait görselleri görülmektedir. Mikroskop görüntülerinde görüldüğü gibi görsellerdeki aşınma izleri diğer çevresel ortamlara maruz bırakılan numunelerin yüzeylerindeki aşınma izlerine

kıyasla daha ince ve daha seyrekler. Aşınma izleri incelendiğinde derin olmayan görseller elde edilmiştir ve elyaf izleri belirgin değildir. Görsellerden de anlaşıldığı üzere N5 numunesi farklı ortamlar karşısında aşınma dayanımı göstermiştir ve aşınma oranlarında azaltıcı etki göstermiştir

Numune bazlı tablolara bakıldığında genel olarak tuzlu su ortamının, numunelerin aşınma davranışına olumlu yönde etki ettiği görülmektedir. Yine hızlandırılmış yaşlandırma ile CTP malzemelerin aşınma dirençlerinde artış görülerek aşınma oranlarında düşüş yaşanmıştır. Asit ortamı ise tüm numunelerde aşındırıcı etki göstererek, ciddi oranda aşınma dayanımını azaltarak aşınmada artışa neden olmuştur.

Termal çevrim ile sıcak ve soğuk ortama maruz bırakılan CTP numunelerin aşınma dirençlerinde N5 numunesi hariç diğer tüm numunelerde düşüş görülmüştür. Literatürde hakkında çalışmaya rastlanmayan UV etkisinin, malzemelerin mekanik özelliklerine olumsuz etkisi bilinmektedir ancak bu deneysel çalışmada aşınma direncinin UV deneyi sonrası işlem görmemiş numunelerin aşınma değerleriyle karşılaştırıldığında aşınmaya dayanımını iyileştirme etkisi görülmüştür. UV ışınlarının CTP malzemelerin aşınma davranışına etkisi ile ilgili daha kapsamlı ve derin çalışmalar yapılabilir.

Hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmış malzemelerin bir kısmında (N2 ve N4) aşınma oranında artış ve bir kısmında (N1, N3 ve N5) ise aşınma oranında azalma görülmüştür. Nem ve yüksek sıcaklıktan etkilenmeleri aşınma oranlarına bakılarak farklı kimyasal bileşene sahip numunelerde farklı etki oluşturmuştur. N1 ve N4 numunesi karşılaştırılacak olunursa N1 numunesinde farklı olarak kullanılan polistiren katkısının hidrotermal yaşlandırmadan olumsuz etkilenmediği ve aşınma dayanımına katkı sağladığı söylenebilir. Hidrotermal yaşlandırmanın olumlu etki gösterdiği bir diğer numune olan N3'e baktığımızda izoflatik polyester malzemenin bu koşul altında aşınma dayanımında etkili olduğu söylenebilir.

Sıvı sürtünme deneyinde yağlamanın, partiküller arası kaymayı kolaylaştırıcı etkisi ile aşınma direncini artırıcı özelliği tüm numunelerde gözlemlenmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu deneysel çalışmada farklı çevresel koşullara maruz bırakılmış CTP kompozit numunelerin aşınma dayanımları incelenmiştir. Farklı cam elyaf takviye oranlarının, farklı çevresel ortamların kompozit malzemelerin tribolojik özelliklere etkisi gözlemlenmiştir.

Sıcak pres kalıplama yöntemi ile üretilen numuneler için deney ortamları hazırlanırken CTP numunelerin farklı çevresel koşullarda gösterdikleri aşınma davranışlarıyla ilgili literatür araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki deneysel sonuçlara bakıldığında saf epoksili polyester kompozitlerin, katkılı epoksili polyester kompozitlere kıyasla aşınma dayanımının daha yüksek olduğu görülmektedir. Farklı çevresel ortamlarda yine dolgulu kompozitin, dolgusuz kompozite göre daha düşük hacimsel aşınma oranlarına sahip olduklarından bahsedilmektedir. Literatürde kompozitlerde kullanılan reçine malzemelerinin aşınma dayanımına etkisi ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda, ortoflatik reçineli kompozitlerin izoflatik reçineli kompozitlere nazaran aşınma direncinin daha yüksek olduğu söylenmektedir [58].

Farklı çevresel koşullar çerçevesinde bakıldığında ise literatürde tuzlu su ortamında bekletilmiş kompozit numunelerin, çeşitli katkı malzemeleriyle aşınma direncinin artırılabilirdiği bilgisine rastlanmaktadır [64]. Asit çözeltisi, çalışma koşullarına göre asitli ortama maruz kalmada malzemelerin diğer birçok mekanik özelliklerinin etkilendiği gibi aşınma dayanımının da olumsuz etkilendiği bilinmektedir. Hızlandırılmış yaşlandırma, termal yaşlandırma gibi testler, günlük hayatta kompozitlerin maruz kaldığı ağır çalışma koşullarında mekanik, kimyasal ve fiziksel etkisine yorum getirmemize katkı sağlayan testler olmuştur. Literatürde hızlandırılmış yaşlandırma ve suda yaşlandırmanın malzemelerin eğilme, çekme gibi mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği, suda yaşlandırmanın matriste boşlukların oluşumuna ve matris malzeme ile elyafın arasındaki boşlukların artmasına sebep olduğuna değinilmiştir [65,84].

Sıvı sürtünme ve yağlamanın kompozit malzemelerin kayan ara yüzleri arasına girerek sürtünme ve aşınma etkisini azalttığı, literatürde yapılan çalışmalar ve araştırmalarda belirtilmiştir [70].

Diğer çevresel koşullardan UV etkisi, literatürde CTP malzemelerin maruz kaldığı süre ve sıcaklık artışıyla orantılı olarak çekme, eğilme ve yorulma gibi mekanik özelliklerinde azalma görüldüğü sonucuna varılmıştır. Fakat UV maruziyetinin CTP malzemelerin aşınma davranışı üzerindeki etkisi ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada farklı çevresel koşullara maruz bırakılmış numunelerin bu koşullarda değişen aşınma direncini kıyaslamak adına ilk önce işlem görmemiş CTP numuneler aşınma testine tabi tutulmuştur. Sonrasında ise farklı çevresel koşullar altında numunelerin aşınma dirençleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalara dayanarak elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- İşlem görmemiş numunelerin aşınma oranları kıyaslandığında polistiren katkı malzemesi, plastifiyen katkı malzemesine göre aşınma dayanımına daha fazla katkıda bulunmuştur.
- İşlem görmemiş CTP numunelerden, cam kürecik dolgu malzemesi kullanılan numunenin, aynı oranda matris malzemesi (%20), elyaf takviyesi (%11) ve çekme katkısı (%8 plastifiyen) kullanılmış olan numuneye göre aşınma dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Cam kürecik dolgu malzemesi aşınma oranının azalmasında etkili olmuştur.
- Aynı oranda matris malzemesi (%20) ve çekme katkısı (%8 plastifiyen) bulunan numunelerden %18 cam elyaf takviyesi bulunan numunenin aşınma oranı, %11 cam elyaf takviyeli numuneye kıyasla daha düşüktür. Doğru oranda kullanıldığında cam elyaf takviyesi aşınma dayanımında artırıcı etki göstermiştir.
- İzoflatik ve ortoflatik polyester etkisini karşılaştırdığımızda, ilgili malzemelerin takviye oranları farklı olduğu göz önünde bulundurularak, izoflatik polyester kullanılan CTP numunenin aşınma oranının daha düşük olduğu görülmüştür.
- İşlem görmemiş numuneler içinde N1 numunesi aşınma oranı en düşük CTP numunedir.

- Tuzlu suda bekletilmiş numunelerden, ortoflatik polyester malzemeli, %8 plastifiyen çekme katkılı ve %5 cam kürecik katkılı N2 numunesi en az aşınma oranına sahip numunedir.
- Tuzlu suda bekletilmiş numunelerin aşınma oranları işlem görmemiş numunelerle kıyaslandığında, tuzlu suya maruz kalmış numunelerin aşınma oranları daha düşüktür.
- Yine tuzlu su ortamında polistiren çekme katkısı, plastifiyen çekme katkısından daha fazla aşınmaya dayanım göstermiştir.
- Termal çevrim uygulanmış numuneler arasında, ortoflatik polyester ve polistiren matris malzemeli ve %16 cam elyaf takviyeli N1 numunesi aşınma oranı en düşük numune olmuştur. Doğru orandaki cam elyaf takviyesi ile polistiren çekme katkısı soğuk ve sıcak çevre ortamına karşı aşınma dayanımını artırmıştır.
- Termal çevrime maruz kalan numunelerden, cam kürecik takviyeli malzemenin aşınma oranına bakıldığında cam kürecik dolgusunun aşınmaya dayanımı artırıcı etkisi gözlemlenmemiştir.
- Termal çevrim genel olarak tüm numuneler üzerinde aşınmayı artırıcı etki göstermiştir.
- Asit ortamı tüm CTP numunelerin yapısında tahribata yol açarak aşınma oranlarını oldukça yükseltmiştir.
- Polistiren çekme katkısı, asit ortamındaki numunede, plastifiyen çekme katkılı numuneye göre aşınma dayanımını artırıcı etki göstermiştir.
- Asit çözeltisinde bekletilmiş numunelerden N5 numunesi aşınma oranı en düşük numune olmuştur.
- Hızlandırılmış yaşlandırma işlemi, CTP numunelerin hepsi üzerinde aşınmayı azaltıcı etki göstermiştir.
- Hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz bırakılmış tüm numuneler arasında N5 numunesi en az aşınma oranına sahip numunedir.
- Hidrotermal yaşlandırmaya maruz kalan numuneler içerisinde aşınma dayanımı en fazla olan numune, yapısında diğer ortoflatik polyester matris malzemeli numunelerden farklı olarak izoflatik polyester barındıran N3 numunesidir.
- Hidrotermal yaşlandırma numunelerin aşınma oranları üzerinde, herhangi bir işlem görmeden kuru sürtünmeye maruz kalmış numunelerle kıyaslandığında değişken

etki göstermiştir. Çoğu numunede aşınma oranını azaltıcı etki gösterirken N2 numunesinin aşınma oranının artmasına neden olmuştur. Bu artış, diğer numunelerden farklı olarak N2 numunesindeki cam küre dolgu malzemesi etkisi olarak yorumlanabilir.

- UV etkisine maruz kalmış numunelerden aşınma oranı en düşük numune N3 numunesidir. İzoflatik polyester matris malzemesinin UV ışınlarına dayanımı bu çalışmada olumlu sonuçlanmıştır. Daha detaylı çalışmalarla desteklenebilir.
- Tüm CTP numunelerin UV ortamına maruz bırakıldıktan sonra yapılan aşınma oranları, işlem görmemiş numunelerle kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmüştür.
- UV ortamında bırakılmış polistiren çekme katkılı numune, plastifiyen çekme katkılı numuneye kıyasla daha az aşınmıştır.
- Sıvı sürtünme deneyinde, CTP malzemelerin yüzeyler arasında ince katman halinde oluşan yağlama etkisiyle, tüm numunelerde aşınma dayanımını iyileştirici etki göstermiştir.
- En düşük yoğunluk değeri N2 ve N3 numunesinde görülmüştür. Cam kürecik dolgu malzemesi CTP malzemenin yoğunluk değerini azaltıcı etki göstermiştir.

Tablo 8.1. Numunelerin çevresel koşullar

ÇEVRESEL ŞARTLAR	KOMPOZİT NUMUNE				
	N1	N2	N3	N4	N5
İşlem Görmemiş	5	3	4	2	1
Tuzlu Su	4	5	2	1	3
Hızlandırılmış Yaşlandırma	2	3	1	4	5
Asit	4	2	3	1	5
Termal Çevrim	5	3	2	1	4
UV	4	2	5	1	3
Hidrotermal Yaşlandırma	4	1	5	3	2
Sıvı Sürtünme	2	4	5	3	1
Toplam puan	30	23	27	16	24

Kompozit numunelerin farklı çevresel koşullara göre aşınma miktarları baz alınarak puanlama ile kıyaslanması Tablo 7.8.'de verilmiştir. Bu tabloda, bir çevresel koşulda 5 numune aşınma miktarlarına göre en az aşınan malzeme 5 puan ve en çok aşınan malzeme 1 puan olmak üzere 1-5 arası puanlanmıştır.

Tüm bu sonuçlar ve grafikler ele alındığında genel olarak farklı çevresel koşullara dayanımı diğer numunelere göre daha iyi olan ve Tablo 7.8.'e göre toplamda en çok puana sahip olan numune N1 numunesi olmuştur. N1 numunesinin yapısındaki polistiren katkı malzemesi, diğer numunelerdeki plastifiyen katkı malzemesine kıyasla aşınma dayanımını arttırdığı söylenebilir. %20 ortoflatik polyester matris malzemesine sahip N1 numunesinin yapısındaki cam elyaf takviye oranı ise %16'dır. Doğru oranda kullanıldığında cam elyaf takviyesinin aşınma oranını azaltıcı etkisi görülmektedir. N4 numunesi ise çevresel koşullardan daha fazla etkilenerek aşınma oranı daha fazla olan numunedir. %20 ortoflatik polyester malzeme içeriği ve %8 plastifiyen katkı malzemesi barındıran N4 numunesinin cam elyaf oranı %18'dir. Nispeten cam elyaf oranı daha fazla olan numunede plastifiyen katkısı aşınma dayanımına polistiren katkı malzemesine kıyasla olumlu etki gösterememiştir.

Yine çalışmalar gösteriyor ki tuzlu su ortamı en çok N4 numunesini etkilerken en az N2 numunesini etkilemiştir. Hızlandırılmış yaşlandırmadan en az etkilenen numune N5 numunesiyken en çok aşınma oranına N3 numunesi sahiptir. Termal çevrime maruz bırakılmış numunelerden en çok etkilenen N4 numunesi ve dayanımı en yüksek olan numune N1 numunesidir. Hidrotermal yaşlandırma N2 numunesini en çok etkilerken, N3 numunesi en az etkilenen numunedir. Asit ortamı genel olarak tüm numunelerde olumsuz etki oluşturmuş, en çok N4 numunesi etkilenmiş, en az ise N5 numunesi etkilenmiştir. UV ortamı en çok N4 numunesini etkilemiştir, en az ise N3 numunesi etkilenmiştir.

Deneysel çalışmalar sonrası, gözlemlenen sonuçları ele alarak çıkarılabilecek öneriler aşağıda belirtilmiştir.

- CTP malzemelerdeki farklı cam elyaf oranlarının net bir şekilde incelenip farklı çevresel koşullara maruz bırakılmasıyla, cam elyaf oranının etkisi daha detaylı incelenebilir.
- İzoflatik polyester ve ortoflatik polyester ile birlikte farklı polyester çeşitlerinin çevresel koşullarda gösterdiği mekanik ve tribolojik performanslar incelenerek malzeme özellikleri daha fazla geliştirilebilir.
- UV ortamının aşınmaya etkisi daha farklı dolgu ve katkı içerikli CTP malzemelerle incelenerek literatüre katkı sağlanabilir.

- CTP malzemelerin hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakıldığında mekanik ve termal özelliklerinin incelendiği çalışmalara kıyasla daha az bulunan tribolojik davranışları ile ilgili daha fazla çalışma gerçekleştirilebilir.
- Asit ortamında bırakılmış CTP malzemelerin farklı dolgu malzemeleriyle aşınma davranışları incelenebilir.
- Farklı çevresel koşullara maruz kalmış CTP malzemenin farklı yük, hız ve kayma mesafelerinde gösterecekleri aşınma performansları incelenerek özellikleri daha fazla geliştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Johnson Todd., *History of Composites*, Thoughtco.com, <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>, (Ziyaret tarihi: 17 Haziran 2018).
- [2] Seymour R.B., Deanin R.D., *History of Polimeric Composites*, 1st ed., VSP, Netherlands, 1987.
- [3] <http://compositeslab.com/composites-101/history-of-composites/> (Ziyaret tarihi: 11 Mayıs 2020)
- [4] Pul M., Çalın R., Çıtak R., Şeker U., Düşük Takviyeli MgO-Al Kompozitlerin Vakumlu İnfiltrasyonunda Takviye Oranının İnfiltrasyon Davranışına Etkisi, *Journal of Polytechnic*, 2009, **12**(3), 173-177.
- [5] Jiping Bai, *Advanced Fibre-reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*, 1st ed., Woodhead Publishing, UK, 2013.
- [6] <http://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2017/05/Kompozitin-Tarihi.pdf> (Ziyaret tarihi: 11 Mayıs 2020).
- [7] http://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2018/11/CTP_Teknolojisi.pdf (Ziyaret tarihi: 17 Mayıs 2020)
- [8] <https://www.compositesworld.com/articles/nanotechnology-into-the-realm-of-real> (Ziyaret tarihi: 17 Mayıs 2020).
- [9] <https://www.mar-bal.com/applications/history-of-composites/> (Ziyaret tarihi: 17 Mayıs 2020)
- [10] Bagherpour S., Polyester, Editors: Saleh El-Din H, Fibre Reinforced Polyester Composites, *InTech*, DOI: 10.5772/48697.
- [11] Kaya İ. A., Kompozit Malzemeler ve Özellikleri, *Putech & Composites*, 2016, **29**, 38-45.
- [12] <http://www.kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2011/11/kompozit-malzemeler-ders-notlari-osman-unal.pdf> (Ziyaret tarihi: 22 Mayıs 2020)
- [13] Razmi A., *Kompozit Parçaların Çeşitli Yapıştırılmalı Bağlantı Tasarımlarının Karşılaştırılması*, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2011, 299092.
- [14] Şahin, Y., *Kompozit Malzemelere Giriş*, 2. Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2006.

- [15] E. Wintermantel, ... T.N. Goehring, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 1st ed., Pergamon, Oxford, 2001.
- [16] Jawaid M., Thariq M., Saba N., *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 1st ed., Woodhead Publishing, UK, 2018.
- [17] Zor M., *Kompozit Malzeme Mekaniği*, Dokuz Eylül Üniversitesi Ders Notları, 2018.
- [18] Kaw K.A., *Kompozit Malzeme Mekaniği*, 1.baskı, Efil Yayınevi, Ankara, 2014.
- [19] Ersoy Y.H., *Kompozit Malzeme*, 1.basım, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2001.
- [20] Soo-Jin Park, Min-Kang Seo, *Interface Science and Technology*, 1st edition, Academic Press, San Diego, 2011.
- [21] Genç Ç., Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Üretim Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 197858
- [22] <http://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2017/05/Bitirme-Tezi.pdf> (Ziyaret tarihi: 26 Mayıs 2020)
- [23] Granalo J., *Chromafusion Architectural Decorative Glass Products Expand Design Opportunities for Laminated Glass*, Arch. Laminated Glazing News, 1995.
- [24] Davey N., *A History of Building Materials*, 2nd ed., Phoenix House, Londra, 1965.
- [25] http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/documentation/SP_Composites_Guide.pdf (Ziyaret tarihi: 26 Mayıs 2020)
- [26] Wallenberger F.T. Ed., *Structural Silicate and Texturizing Silica Glass Fibers, Advanced Inorganic Fibers Processes, Structures, Properties, Applications*, 1st. ed., *Kluwer Academic Publishers*, Berlin, 1999.
- [27] Eastes WL, Hofman D.A., and Wingert J.W., *Boron-Free Glass Fibers*, 1998, U.S. Patent 5,789,329, *United States Patent*.
- [28] Ömercikoğlu A., *Metal Katmanlar İçeren Hibrit Katmanlı Kompozit Plakaların Anlık Basınç Yükü Altındaki Dinamik Cevabının İncelenmesi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2009, (<http://hdl.handle.net/11527/4776>).
- [29] 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.

- [30] Seydibeyoğlu Ö.M., Mohanty K.A., Misra M., Ceramic Fibers, Editors: Seydibeyoğlu Ö.M., Mohanty K.A., Misra M., *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, 1st ed., Woodhead Publishing, Cambridge, 187-207, 2017.
- [31] <https://www.bekaert.com/-/media/Files/Download-Files/BFT/White-papers/Whitepaper-1--Metal-fiber-technology-EN.pdf> (Ziyaret tarihi: 31 Mayıs 2020)
- [32] Wicaksono S.T., ... Ardhyanta H., Effect of Calcium Carbonate on The Tensile and Density Properties of Kenaf/Polyester Hybrid Composite, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, DOI:10.1088/1757-899X/546/4/042019
- [33] <https://www.indoglassbeads.com/fiilers-for-resins.htm> (Ziyaret tarihi: 31 Mayıs 2020)
- [34] Bhatnagar A., *Lightweigh Ballistic Composites: Military and Law-enforcement Applications*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2006.
- [35] Glaeser A.W., *Materials For Tribology*, 1st ed., Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1992.
- [36] Günaydın E., *Polimer Matrisli Karbon Nanotüp- Cam elyaf Takviyeli Kompozitlerde Çarpma Sonrası Basma Özelliklerinin İncelenmesi*, On Dokuz Mayıs Üniversitesi, 2018, 513585.
- [37] Yılmaz N.A., *PVC Kaplı Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Sakarya, 2018, 518584.
- [38] <http://www.moldedfiberglass.com/> Technical Design Guide for FRP Composite Products and Parts, (Ziyaret tarihi: 06 Haziran 2020).
- [39] Mazumdar K.S., *Composite Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering*, 1st ed., CRC Press, Florida, 2001.
- [40] Stachowiak W.G., Batchelor W. A., *Engineering Tribology*, 3rd edition, Butterworth-Heinemann, UK, 2005.
- [41] Mckeen W.L., *Fatigue and Tribological Properties of plastics and Elastomers*, 2nd edition, Elsevier, 2010.
- [42] Yamaguchi Y., *Tribology of Plastic Marterials: Their Characteristics and Applications to Sliding Components*, 1st ed., Elsevier, 1990.
- [43] Fischer A., Bobzin K., *Friction, Wear and Wear Protection*, 1st ed., Wiley-VCH, Germany, 2009.

- [44] Blau PJ. Wear testing. In: Davis JR, editor. *Metals handbook desk edition*. 2nd ed., Cleveland, OH, ASM International, 1998.
- [45] Neale M.J., *The Tribology Handbook*, 2nd ed., Butterworth-Heinmann, Oxford, 1995.
- [46] Taktak Ş., *Plazmada nitrülenmiş Ti-6Al-4V alaşımının difüzyon kinetiği ve aşınma davranışının incelenmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2002, 129132.
- [47] Bağcı M., *Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi*, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2010, 276337.
- [48] Affonso A.O.L., *Machinery Failure Analysis Handbook*, 1st ed., Gulf Publishing Company, Houston, 2006.
- [49] Roberge R.P., *Corrosion Engineering: Principles and Practice*, 1st ed., The McGraw-Hill, USA, 2008.
- [50] Schweitzer A.P., *Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes and Preventative Methods*, 1st ed., CRC Press, Boca Raton, 2010.
- [51] Demir E.M., Çelik H.Y., Kılıçkap E., Cam ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Elyaf Cinsinin, Yükün, Kayma Hızı ve Mesafesinin Abrasiv Aşınmaya Etkisi, *Politeknik Dergisi*, 2019, **22**(4), 811-817.
- [52] Larsen, T.Ø., Andersen, T.L., Thorning, B. and Vigild M.E., The Effect of Particle Addition and Fibrous Reinforcement on Epoxy-Matrix Composite for Severe Sliding Conditions, *Wear*, 2008, **264**(9), 857-868.
- [53] 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**(3), 367-370.
- [54] Türkmen E., Yetgin H.S., Gülesen M., Investigation of Properties of Glass Fiber and Rubber Filled PA6 Polymer, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2017, **4**(2), 15-23.
- [55] Aydın F., GFRP Profil Aşınma Performansının Klasik Beton Aşınma Özellikleri ile Karşılaştırılması, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2017, **21**(5), 893-898.
- [56] Mohan N., Mahesha C.R., Rajaprakash B.M., Erosive Wear Behaviour of WC Filled Glass Epoxy Composites, *Procedia Engineering*, 2013, **68**, 694-702.
- [57] Chand N., Naik A., Neogi S., Three-body abrasive wear of short glass fibre polyester composite, *Wear*, 2000, **242**(1), 38-46.

- [58] Feyzullahoğlu E., *The Investigation of Effects of Polyester Resins and Tensile Additives on Abrasive Wear of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites*, International Science and Technology Conference (ISTEC-2018), Paris, 2018.
- [59] İlhan R., Feyzullahoğlu E., The Wear of Glass Fiber Reinforced Polyester Composite Materials at Different Loads and Speeds, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2018, **5**(1), 259-266.
- [60] Kishore, Sampathkumaran P., Seetharamu S., Murali A., Kumar R.K., On The SEM Features of Glass-Epoxy Composite System Subjected To Dry Sliding Wear, *Wear*, 2001, **247**(2), 208-213.
- [61] Quintelier J., Baets De P., Samyn D., Hamelrijck Van D., On the SEM Features of Glass-polyester Composite System Subjected To Dry Sliding Wear, *Wear*, 2006, **261**(7), 703-714.
- [62] Chakraverty A.P., Mohanty U.K., Mishra S.C., Satapathy A., Sea Water Ageing of GFRP Composites and The Dissolved Salts, *IOP Publishing*, 2015, **75**(1), 012029.
- [63] Shaofeng W., Dianrong G., Liang Y., Chen B., Experimental Study on Influence of Dimples on Lubrication Performance of Glass Fiber-Epoxy Resin Composite Under Natural Seawater Lubrication, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, **30**, 110-117.
- [64] Han W., Chen S., Campbell J., Zhang X., Tang Y., Fracture Toughness And Wear Properties Of Nanosilica/Epoxy Composites Under Marine Environment, *Materials Chem. and Phys.*, 2016, **177**, 147-155.
- [65] Park Y., Kim H.Y., Lee S., Long-Term Flexural Behaviors of GFRP Reinforced Concrete Beams Exposed to Accelerated Aging Exposure Conditions, *Polymers*, 2014, **6**(6), 1773-1793.
- [66] Syed A.M., Siddaramaiah, Syed T.R., Investigation on Physico-Mechanical Properties, Water, Thermal and Chemical Ageing of Unsaturated Polyester/Turmeric Spent Composites, *Plastics Technology and Engineering*, 2010, **49**, 555-559.
- [67] Singh N., Yousif B.F., Rilling D., Tribological Characteristics of Sustainable Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites under Wet Adhesive Wear, *Tribology Transactions*, 2011, **54**(5), 736-748.
- [68] Yousif B.F. and El-Tayeb N.S.M., Wear And Friction Characteristics of CGRP Composite Under Wet Contact Condition Using Two Different Test Techniques, *Wear*, 2008, **265**, 856–864.
- [69] Sumer M., Unal H. and Mimaroglu A., Evaluation of Tribological Behaviour of PEEK Composite Under Dry Sliding and Water lubricated Conditions, *Wear*, 2008, **265**(7), 1061-1065.

- [70] Agrawal S., Singh K.K., Sarkar P.K., A Comparative Study of Wear and Friction Characteristics of Glass Fibre Reinforced Epoxy Resin, Sliding Under Dry, Oil-Lubricated and İnert Gas Environments, *Tribology International*, 2015, **96**, 217-224.
- [71] Kısa M., Özen M., Değirmenci D., Demircan G., Dirilmiş M., Çevresel Etkilere Maruz Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışı, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2017, **1**, 54-59.
- [72] Nuruddin M.F.M., *The Performance of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Under Abrasive Condition*, Universiti Teknologi Petronas, 2014.
- [73] Amaro A., Reis P., Neto A.M., Santos M.C., Effect Of Different Acid Solutions On Glass/Epoxy Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2013, **32**(14), 1018-1029.
- [74] Smith W.F., *Material Science and Engineering*, 1st ed., McGraw-Hill Education, USA, 1993.
- [75] <http://laboratuar.kocaeli.edu.tr/tozmetalurjilab/index.php?c=Altyapi> (Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2021).
- [76] <https://www.karkimya.com.tr/tr/urunler/sertlik-elastikiyet-darbe-dayanimi/barcol-sertlik-testi> (Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2021).
- [77] <https://www.karkimya.com.tr/tr/urunler/sertlik-elastikiyet-darbe-dayanimi/barcol-sertlik-testi> (Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2021)..
- [78] 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.
- [79] İlhan R., *Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozit Malzemelerin Tribolojik Özellikleri*, Kocaeli, 2018, 521825.
- [80] 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.
- [81] Jafari A., Ashrafi H., Bazli M., Ozbakkaloglu T., Effect of Thermal Cycles on Mechanical Response of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer Profiles of Different Geometries, *Composite Structure*, 2019, **223**, 110959.
- [82] Valinoti C.A., Neves G.B., Silva M.E., Maia C.L., Surface Degradation Of Composite Resins by Acidic Medicines and Ph-Cycling, *J Appl Oral Sci.* 2008, **16**(4), 257–265.
- [83] Münchow A.E., Ferreira C.A ect., Effect Of Acidic Solutions On The Surface Degradation Of A Micro-Hybrid Composite Resin, *Brazilian Dental Journal*, 2014, **25**(4), 321-326.

- [84] Kuram E., Cam Elyaf Katkılı Poli(oksümetilen) Kompozitinin Laboratuar Ortamında ve Suda Yaşlandırılması Sonucunda Mekanik, Reolojik ve Morfolojik Özelliklerindeki Değişimler, *Gazi University Journal of Science*, 2018, **6**(4), 721-728



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Elmacıoğlu M.**, Feyzullahoğlu E., Fidan, S., Farklı Çevresel Koşullarda Çalışan Cam Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri, 3. *Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, Kocaeli, 278-279, 4-5 Mayıs 2018.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2011 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümünden 2016 yılında, ayrıca Makine Mühendisliği Çift Anadal programından 2017 yılında mezun oldu. 2017-2021 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2018 yılından beri askeri elektronik ekipman üreticisi olan Nicomatic A.Ş.’de Ar-Ge Mühendisi olarak görev almaktadır.

