T.C. PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇEŞİTLİ TERMOSET ATIKLARLA TAKVİYE EDİLMİŞ EPOKSİ REÇİNE NUMUNELERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATMANUR TUNÇER

DENİZLİ, ŞUBAT- 2025

T.C. PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ÇEŞİTLİ TERMOSET ATIKLARLA TAKVİYE EDİLMİŞ EPOKSİ REÇİNE NUMUNELERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATMANUR TUNÇER

DENİZLİ, ŞUBAT – 2025

Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2023FBE027 nolu proje ile desteklenmiştir. Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

FATMANUR TUNÇER

ÖZET

ÇEŞİTLİ TERMOSET ATIKLARLA TAKVİYE EDİLMİŞ EPOKSİ REÇİNE NUMUNELERİN MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATMANUR TUNÇER PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI (TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ HİLAL CAN)

DENİZLİ, ŞUBAT - 2025

Termosetler, otomotiv, elektronik gibi sektörlerde kullanılan, üretildikten sonra tekrar şekil değiştirmeyen polimer malzeme türüdür. Termosetler ısıtıldıklarında yumuşamadıkları için yeniden şekillendirilmeleri mümkün değildir. Bu nedenle termosetlerin geri dönüşüm oranları oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, termoset atıkların epoksi matris içine takviye eleman olarak kullanımı incelenmiştir. Bu amaçla çekme dayanımı 120 MPa ve 85 MPa olan termoset atıklar toz haline getirilerek, matris içine %3, %6 ve %9 oranlarında eklenmiştir. Sonuç olarak her iki termoset takviye kullanımında da en iyi aşınma performansının %6 oranında takviye ile gerçekleştiği bulunmuştur. Yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarına göre ise, tüm numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri 2,00 ila 2,50 µm aralığında olduğu ve takviyeli numunelerde takviyesiz numunelere göre yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düştüğü saptanmıştır. Sertlik ölçümlerine göre ise, özellikle de 9'ar gram 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde vakumlu ya da vakumsuz halde en fazla sertlik değerine sahip oldukları görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Termoset, Kompozit, Aşınma, Geri Dönüşüm

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF EPOXY RESIN SAMPLES REINFORCED WITH VARIOUS THERMOSET WASTES

MSC THESIS

FATMANUR TUNÇER PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE DEPARTMENT OF METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING (SUPERVISOR: Dr. Lecturer Hilal Can)

DENİZLİ, FEBRUARY 2025

Thermosets are a type of polymer material that does not change shape after production and is used in sectors such as automotive and electronics. Since thermosets do not soften when heated, they cannot be reshaped. For this reason, the recycling rates of thermosets are quite limited. In this study, the use of thermoset wastes as reinforcement elements in epoxy matrix was investigated. For this purpose, thermoset wastes with tensile strengths of 120 MPa and 85 MPa were pulverized and added into the matrix at rates of 3%, 6% and 9%. As a result, it was found that the best abrasion performance was achieved with 6% reinforcement in both thermoset reinforcements. According to the surface roughness measurement results, it was determined that the surface roughness values of all samples were in the range of 2,00 to 2,50 μ m and that the surface roughness values decreased in reinforced samples compared to unreinforced samples. According to the hardness measurements, it was observed that the samples, especially those containing 9 grams of 120 MPa strength additive, had the highest hardness values in vacuum and non-vacuum conditions.

İÇİNDEKİLER

ÖZDE	-	•		
OZETi				
ABSTR	ACT	ii		
ŞEKIL	LISTESI	iv		
TABLO	LISTESI	.vii		
SEMBC	DLLER VE KISALTMALAR	viii		
ONSOZ	, 1	ix		
TEŞEK	KUR	X		
1. GÍRÍ	§	.11		
2. POL	IMER VE KOMPOZIT MALZEMELER	.17		
2.1	Polimer Türleri	.17		
2.2	Termosetler	.22		
2.3	Polimerlere Uygulanan Deneyler ve İlişkin Standartlar	.23		
2.3.1	Çekme Deneyi (ASTM D 638)	.24		
2.3.2	Sertlik Ölçme Deneyi	.25		
2.4	Kompozit Malzemeler	.27		
2.4.1	Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	.27		
2.4.2	Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	.29		
2.5	Termosetlerin Geri Dönüşümü	.33		
3. MAT	ERYAL VE YÖNTEM	.35		
3.1	Matris Malzemenin Özellikleri	.37		
3.2	Takviye Malzemelerin Özellikleri	.37		
4. DEN	EY SONUÇLARI	.44		
4.1	Cekme Deneyi Sonuçları	.44		
4.1.1	Vakumlanmamış numunelerin çekme dayanımı	.47		
4.1.2	Vakumlanmış numunelerin çekme dayanımı	.47		
4.2	Aşınma Testi Sonuçları	.48		
4.2.1	Takviye Durumuna Göre Vakumlamanın Aşınmaya Etkisi	.49		
4.2.2	Yüke Göre Aşınma Testi Sonuçları	.65		
4.2.3	Aşınmanın Tüm Takviye Durumları İçin Değerlendirilmesi	.77		
4.3	Sertlik Ölcüm Sonucları	.81		
4.4	Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları	.83		
4.5	Nem Ölcüm Sonucları	.86		
5. SON	UC VE ÖNERİLER	.89		
6. KAY	NAKLAR	.92		

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1:1985 yılına göre yıllar bazında tüketim miktarının değişim	
grafiği (Biron, 2004)	9
Şekil 2.2: 2018-2050 yılları arasında malzeme gruplarındaki tüketim	
artış oranları (Garside, 2020))
Şekil 2.3: Çekme deneyi (ASTM D 638) standartlarına göre numune	
boyutları (ASTM D 638)	5
Şekil 2.4: Shore A ve Shore D sertlik sınıfları arasında dönüşüm tablosu	
(teknikürünler.com).	5
Sekil 2.5: Kompozit malzemelerin matris ve elyaf fazı görüntüsü	
(Engin, vd., 2015) (Kalavcı, 2021)	7
Sekil 2.6: Nanokompozit malzemelerin oluşumu (Kalaycı, 2021)	3
Sekil 2.7: Elyaf püskürtme yöntemi (tekstilteknik.blogspot.com))
Sekil 2.8: Profil cekme yöntemi (Kalaycı, 2021).	1
Sekil 2.9: Soğuk presleme vöntemi (Han vd., 2012)	2
Sekil 2.10: Enjeksiyon kaliplama (Gokerplast.com.tr)	3
Sekil 2.11: Geleneksel termoset kompozit atık işleme ve geri dönüşüm	
yollarının şematik görünümü (Susa ve diğ., 2019).	4
Sabil 2 1. Ender Creality 2D verses	5
Sekii 3.1: Elidel Cleanty 5D yazici.) 6
Sekii 3.2: Çekine test numunesi ve üretim aşamaları.	ן ג
Sekii 3.5: Aşinina test numunesi ve uretim aşamanarı))
Sekii 3.4: DEBAK Infinasindan annan bakant parçalar	1 1
Sekii 3.5: Toz haline getirilen bakaltilerin tez herritler	1 1
Sekii 3.0: 102 nanne geurnen bakantierin toz boyuttari) n
Sekii 3.7: Deneyler için üretinen numune ornekleri	յ 1
Sekii 3.6: vakumama ortami ve işiemi	I
stendertlerine gäre üretilen eelme numuneleri eizimi	n
Salril 3 10. Colomo tosti vanobilmole join alda adilan düzanak	∠ ר
Sekii 3.10: Çekine testi yapadılmek için elde edilen düzenek	2 2
Şekii 3.11: Oygunamada kunaman aşınına cinazi ve nassas terazi4.) 2
Şekii 3.12: Nikon marka Eclipse LV I SUNL model oplik mikroskop4.	3
Sakil 1 1. Cakma tasti sonrası numunalar	5
Sekil 4 2. Numunelerin ortalama cekme davanımları	, 6
Sakil 4. 3. Vakum yanılmayan numunelerin ortalama çekme	J
dəvənimləri	7
Sakil A A. Vakum vanilan numunelerin ortalama cekme davanımları	2
Sakil 4. 5: 180 m asınma mesafesinde farklı yükler altında kütle kaybı	J
geni 4. 5. 160 ili așilină încearesinăc farni yunici attinua nute nayor	a
Sakil 4 6: 360 m asınma mesafesinde farklı yükler altında kütle kaybı	<i>,</i>
genii 4. 0. 500 ili așinină încearesinde farni yunici attinua nute nayor	h
Sakil 1. 7. 180 m asınma mesafesində farklı vüklər altında haçim	J
y uki τ , τ , 100 ili aşillila iliosatosiluc tatkli yukici attilua ilacilli kaybi grafiği	h
Salil 1 8: 360 m asinma masafasinda farkli väiklar altinda haaim	J
ştrii 7. 0. 500 ili aşınına mesaresinde tarkn yukler altında nacım	

kaybı grafiği.	51
Şekli 4. 9: 180 m aşınma mesafesinde farklı yukler altında SWR	F 1
degeri grafiĝi.	51
Şekil 4. 10: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında SWR	
değeri grafiği.	52
Şekil 4. 11: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle	
kaybı grafiği	53
Şekil 4. 12: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle	
kaybı grafiği	53
Şekil 4. 13: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim	
kaybı grafiği	54
Şekil 4. 14: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim	
kaybı grafiği	55
Şekil 4. 15: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında SWR	
değeri grafiği	56
Şekil 4. 16: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında SWR	
değeri grafiği	56
Sekil 4. 17: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle	
kaybı grafiği.	57
Sekil 4. 18: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle	
kaybı grafiği.	
Sekil 4. 19: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim	
kavbı grafiği.	
Sekil 4. 20: 360 m asınma mesafesinde farklı vükler altında hacim	
, kavbı grafiği.	59
Sekil 4. 21: 180 m asınma mesafesinde farklı vükler altında SWR	
değeri grafiği	60
Sekil 4. 22: 360 m asınma mesafesinde farklı vükler altında SWR	
değeri grafiği	60
Sekil 4. 23: 180 m asınma mesafesinde farklı vükler altında kütle	
kavhı orafiği	61
Sekil 4. 24: 360 m asınma mesafesinde farklı vükler altında kütle	
kavhı orafiği	62
Sekil 4 25: 180 m asınma mesafesinde farklı vükler altında hacim	
kavhı grafiği	63
Sekil 4 26: 360 m asınma mesafesinde farklı vükler altında hacim	
kavhı orafiği	63
Sekil 4 27: 180 m asınma mesafesinde farklı yükler altında SWR	
değeri grafiği	64
Sakil 1 28: 360 m asınma mesafesinde farklı yökler altında SWR	
dečeri grafiči	65
Sakil 4. 20: 180 m kayma mesafesinde 5 N'luk yük altında kütle	05
kavbi	65
Sakil 1 30. 180 m kayma masafasinda 10 Niluk viik altında kütla	03
genn 7. Ju. 100 m kayma mesaresmue 10 N luk yuk alumua kulle	66
Solvil 4 21. 190 m boxima magafasin da 15 N ³ 1.11	00
Jewh	
Kayu	00
Jekii 4. 32: 300 m kayma mesaresinde 5 N luk yuk altında kutle	<u> </u>
Kayol.	
Şekli 4. 33: 360 m kayma mesafesinde 10 N´luk yük altında kütle	

kaybı	68
Sekil 4. 34: 360 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında kütle	
kaybı	69
Sekil 4. 35: 180 m kayma mesafesinde 5 N'luk yük altında hacim	
kavbı	69
Sekil 4. 36: 180 m kayma mesafesinde 10 N'luk yük altında hacim	
kavbı	70
Sekil 4. 37: 180 m kavma mesafesinde 15 N'luk vük altında hacim	
kavbı	71
Sekil 4. 38: 360 m kayma mesafesinde 5 N'luk yük altında hacim	
kavbı	71
Sekil 4. 39: 360 m kayma mesafesinde 10 N'luk yük altında hacim	
kavbı	72
Sekil 4. 40: 360 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında hacim	
kavbı	72
Sekil 4. 41: 180 m kayma mesafesinde 5 N'luk yük altında SWR	73
Sekil 4. 42: 180 m kayma mesafesinde 10 N'luk yük altında SWR.	74
Sekil 4. 43: 180 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında SWR	75
Sekil 4. 44: 360 m kayma mesafesinde 5 N'luk yük altında SWR.	76
Sekil 4. 45: 360 m kayma mesafesinde 10 N'luk yük altında SWR	76
Sekil 4. 46: 360 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında SWR.	77
Sekil 4. 47: 180 m kayma mesafesinde asınmadaki kütle kaybı.	77
Sekil 4. 48: 360 m kayma mesafesinde aşınmadaki kütle kaybı	78
Sekil 4. 49: 15N vük altında asınma islemi sonucu elde edilen yüzev	
görüntüleri	80
Sekil 4, 50: Shore D sertlik ölcüm cihazı	81
Sekil 4, 51: Sertlik ölcüm sonucları grafiği	82
Sekil 4. 52: Bilgisavara bağlanmış yüzey pürüzlülük test cihazı	83
Sekil 4. 53: Yüzev pürüzlülüğü ölcümleri grafiği	83
Sekil 4. 54: Yüzev pürüzlülüğü ölçümleri (x ekseni: ölçüm uzunluğu	
(mm) v ekseni: vüzev profili (um))	84
Sekil 4 55: OHAUS marka MB35 HALOGEN model nem ölcme	
cihazı	86
Sekil 4. 56: OHAUS marka MB35 HALOGEN model nem öleme	
cihazı calışma esnaşından görüntü	86
Sekil 4. 57: 0-100 °C sıcaklıkta 1 dakika boyunca numunelerde	
ölcülen nem değerleri grafiği	87

TABLO LÍSTESÍ

<u>Sayfa</u>

Tablo 2.1: Dünyada çeşitli malzeme türlerinin yıllara göre tüketim	
miktarları (milyon ton) (Biron, 2004)	18
Tablo 2.2: 1985 yılına göre, yıllar bazında tüketim miktarının değişimi	
(Biron, 2004)	19
Tablo 2.3: Çeşitli malzeme gruplarının geri dönüşümleri ile elde edilen ka	r
(Garside, 2020)	20
Tablo 2.4: Çeşitli malzemelerin çekme özellikleri (Biron, 2004)	21
Tablo 2.5: Çeşitli malzemelerin özgül çekme özellikleri (Biron, 2004)	22
Tablo 2.6: Çekme deneyi (ASTM D 638) standartlarına göre numune	
boyutları tablosu (ASTM D 638).	25
Tablo 3.1: Flex epoksinin özellikleri	37
Tablo 3.2: Takviye olarak kullanılan bakalitlerin özellikleri.	38
Tablo 4.1: Numunelere ait özellikler ve sembolleşme	44
Tablo 4.2: Sertlik ölçüm sonuçları (Shore D).	81
Tablo 4.3: 0-100 °C sıcaklıkta 1 dakika boyunca numunelerde ölçülen ner	n
değerleri (%)	87

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

120-3 : 57 g flex epoksi + 3 g Bakelite PF 1110-9005-S2 (120 MPa) **120-6 :** 54 g flex epoksi + 6 g Bakelite PF 1110-9005-S2 (120 MPa) **120-9 :** 51 g flex epoksi + 9 g Bakelite PF 1110-9005-S2 (120 MPa) **3D**: Üç boyutlu **85-3 :** 57 g flex epoksi + 3 g Bakelite PF 6507-9005-S 1 (85 MPa) **85-6 :** 54 g flex epoksi + 6 g Bakelite PF 6507-9005-S 1 (85 MPa) **85-9 :** 51 g flex epoksi + 9 g Bakelite PF 6507-9005-S 1 (85 MPa) **ABS** : Akrilonitril Bütadiyen Stiren ArF: Aramid elvaf **BMC / DMC :** Sıcak pres hamuru CaCO₃ : Kalsiyum karbonat **CF** : Karbon fiber **CTP**: Cam elyaf takviyeli polimer **flex :** Flex epoksi + takviye yok **GF** : Cam elyaf HDPE : Yüksek yoğunluklu polietilen \mathbf{L} : Yol (m) **LGF**: Uzun cam elyaf **P**: Yük (**N**) **PVC**: Polivinilklorür **RTM :** Reçine transfer yöntemi **SMC** : Sıcak pres pestili **SWR** : Spesifik aşınma oranı (Specific Wear Rate) UD: Tek yönlü v120-3 : Vakumlanmış (57 g flex epoksi + 3 g Bakelite PF 1110-9005-S2) (120 MPa) **v120-6** : Vakumlanmış (54 g flex epoksi + 6 g Bakelite PF 1110-9005-S2) (120 MPa) v120-9 : Vakumlanmış (51 g flex epoksi + 9 g Bakelite PF 1110-9005-S2) (120 MPa) **v85-3 :** Vakumlanmış (57 g flex epoksi + 3 g Bakelite PF 6507-9005-S 1) (85 MPa) **v85-6 :** Vakumlanmış (54 g flex epoksi + 6 g Bakelite PF 6507-9005-S 1) (85 MPa) **v85-9 :** Vakumlanmış (51 g flex epoksi + 9 g Bakelite PF 6507-9005-S 1) (85 MPa) **vflex :** Vakumlanmış (flex epoksi + takviye yok) Δm : Kütle kaybı (g) ΔV : Hacim kaybı (mm³) ρ : Yoğunluk (g/cm³)

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı hazırlarken geçirdiğim süreçte, manevi desteğini her an yanımda hissettiğim aileme, bana bu tez çalışmasının konusunun belirlenmesinde, gerçekleştirilmesinde ve her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, teknik ve laboratuvar uygulamalarında gerekli bilgileri edinmemde büyük katkısı olan tez danışmanım, değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hilal CAN'a sonsuz teşekkür ederim.

2023FBE027 numaralı Yüksek Lisans Tez Projesi ile çalışmanın finansal desteğini sağlayan Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Ayrıca Denizli'de faaliyet gösteren DEBAK firmasına çalışmaya katkılarından dolayı teşekkürü borç bilirim.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, bakalit üretiminde yer alan ve Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü danışma kurulunda yer alan DEBAK firması ile işbirliği kurulmuştur.

Sağladıkları destekler için DEBAK'a, bu tez çalışmasının konusunun belirlenmesinde, gerçekleştirilmesinde ve her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, teknik ve laboratuvar uygulamalarında gerekli bilgileri edinmemde büyük katkısı olan tez danışmanım, değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hilal CAN'a, yine bilgi ve deneyimleriyle çalışmam boyunca her türlü destek ve yardımlarından dolayı Doç. Dr. Engin TAN, Doç. Dr. Volkan ONAR ve Arş. Gör. Hasan TÜRKMEN hocalarıma, labaratuvar ortamında bana destek ve yardımcı olan arkadaşlarım yüksek lisans öğrencileri Rüçhan YILDIZ, Buğra SÖKMEN ve Gizem COŞKUN ÖNAY'a ve en önemlisi, bu çalışmayı hazırlarken geçirdiğim süreçte de olduğu gibi her zaman her koşulda bana koşulsuzca güvenen ve destekleyen, manevi desteklerini her an yanımda hissettiğim canım aileme, annem Saime TUNÇER'e, babam Tuncay TUNÇER'e ve canım kardeşim Sudenaz TUNÇER'e sonsuz teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Plastik malzemeler düşük yoğunluğa sahip ve ekonomik olmaları, seri üretilebilmeleri, sessiz çalışabilmeleri ve korozyona dayanıklı olmaları gibi nedenlerle çeşitli makine elemanlarının yapımında kullanılmaktadır. Genel itibarı ile termoplastların daha yaygın kullanımları söz konusu ise de; tutuşma özellikleri ve mekanik özellikleri ile termosetler de özellikle otomotiv parçaları, türbinler, gaz sayaçları gibi yerlerde kullanılmaktadır. Diğer plastik türlerinde olduğu gibi termosetlerde de çeşitli takviye malzemeleri ile güçlendirme yapılmaktadır.

Termosetler kovalent olarak çapraz bağ ile üstün performans göstermelerine karşın, en önemli dezavantajı geri dönüşümlerinin sınırlı olmasıdır. Petrol kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle petrokimya endüstrisi ürünü olan termosetlerin de geri dönüşümleri son yılların popüler alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Termosetlerin geri dönüşümü ile ilgili olarak uygulamada kullanılan teknikler mekanik, termal ve kimyasal işleme şeklinde sıralanabilir. Bununla birlikte, bu yöntemler yüksek enerji gerektirmektedir. Bu esnada termoset matrisin kendisinin geri dönüşümü hesaba katılmaz. Bunun yerine, daha değerli olan lifleri ve dolgu maddelerinin geri alınmasına odaklanılır (Susa ve diğ., 2019).

Kompozit malzeme üretiminde matris malzeme olarak yüksek oranda termoset polimerler kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra takviye elemanı olmaksızın boyutsal kararlılık istenen tencere kulpları, otomotiv iç tasarım parçaları da termosetlerden yapılmaktadır. Malzemelerin tüketimlerine dair öngörüler en fazla oransal artışın polimer malzemelerde olacağı şeklindedir. Polimerlerin hammaddesi olan petrol kaynakları tükenmek üzeredir. Bu nedenle son yıllarda bio-polimerler konusunda çalışmalar süregelmektedir. Bununla birlikte, termoset malzemeler ısı etkisi ile şekillendirildikten sonra yeniden ısıtılarak şekillendirilmeleri mümkün değildir. Avrupa Birliği çevre konusunda polimerlerin geri dönüşümleri konusunda ciddi yaptırımları önümüzdeki yıllarda uygulayacaktır. Bu nedenlerle polimerlerin Mühendislik malzemelerin geri dönüşümü sürdürülebilir sanayi gelişimi ve sürdürebilirlik için çok önemlidir. Metal, cam ve termoplast malzemelerin çoğunluğuna geri dönüşüm uygulanmaktadır. Ancak kompozit malzemelerin birden fazla malzemeden oluşmalarından dolayı takviye elemanları ve matris ayrıştırılması geri dönüşüm işlemlerini zorlaştırmaktadır. Avrupa birliğinde kullanım ömrünü tamamlayan ve hatalı üretim prosesleri sonucunda ortaya çıkan termoset kompozit atıkların miktarının 2015 yılı itibari ile 304.000 tona ulaşacağı raporlanmıştır (Tittarelli F. 2013).

Günümüzde üretim firesi olan ve servis ömrü biten kompozitler geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. CTP kompozit malzemeler genellikle termopolimer ve termoset matrisli olarak iki gruba ayrılmaktadır. Termoset malzemeler, ucuz olmaları, kolay kalıplanabilmeleri, boyutsal kararalılıklarının yüksek olması ve ısı etkisi ile yumuşamamaları nedeniyle uygulamada tercih edilmektedirler. Ancak termoset malzemelerin geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanılmaları, termopolimer malzemelere göre karmaşık ve farklı süreçleri içermesi nedeniyle oldukça sınırlıdır. Bu nedenle termoset malzemelerin geri dönüştürülmesi ve tekrardan kullanılması önem taşımaktadır (Yang vd. 2012, Asmatalu vd. 2014).

Yang vd. (2012), termoset matrisli kompozitlerin kullanıldığı enerji, havacılık ve otomotiv sektörlerinde geri kazanıma yönelik geliştirilerek izlenen yöntemlerden bahsetmişlerdir. Makalede, hatalı üretim süreçleri neticesinde elde kalan ve ömrü biten termoset kompozitlerin atıkların toplanması, ayrıştırılması, geri dönüşüm prosesi ve geri dönüşüm süreçleri açıklanmıştır. Çalışmada geri dönüşüm neticesinde elde edilen ürünlerin birim maliyetlerinin yüksek ve kalitelerinin ise düşük olması nedeni ile ticari açıdan tercih edilmediklerine değinilmiştir. Termoset esaslı kompozitlerin geri dönüşümlerine yönelik çözüm önerileri kolay ve yeni geri malzemeler dönüştürülebilir kompozit üretilmesi, kompoziti olusturan malzemelerin arındırılması ve ayrıştırılmasına yönelik yoğunlaştırılmış geri dönüşüm yöntemlerinin geliştirilmesi, üretimde orjinal fiberlerin yerine geri dönüşüm ürünü fiberlerin kullanılması şeklinde sıralanmıştır.

Conroy ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer (CTP) malzemeden inşaat ve yapı elemanlarında kullanım

amacıyla geri dönüşüm ürünleri üretmişlerdir. Bu kapsamda, ahşap yerine kullanılabilecek, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) matris ve geri dönüşüm CTP fiber takviyeli kirişler incelenmiştir. Üretilen kompozit kirişler, liman yer döşemeleri, kıyı şeritlerinde dalga kıranlar ve tekneler için iskele koruyucu gibi uygulama alanlarında kullanılabilmiştir. Başka bir uygulamada ise öğütülmüş CTP dolgu malzemesi ve ahşap parçacıklarının bir arada kullanımıyla polyester matrisli rögar, ızgara ve pis su kapakları üretilmiştir.

Pickering (2006), termoset kompozitler için uygulanan geri dönüşüm teknolojilerini detaylı bir şekilde sunmuştur. Termoset kompozitlerin geri dönüşümü kimyasal, termal ve mekanik yöntemlerle anlaşılmaktadır. Termal işlem olarak akışkan yataklı yanma, ısıl bozulma ve yanma yöntemleri kullanılır. Kimyasal çözünme işlemi ise kimyasal işlem olarak kullanılmaktadır.

Balıkoğlu vd tarafından uygulanan çalışmada CTP (termoset esaslı cam elyaf takviyeli) polimer plakaların mekanik geri dönüşümü ve tekrar kullanılması incelenmiştir. Geri dönüşüm malzemeleri çeşitli oranlarda BMC (sıcak pres kalıplama) bileşiminde fiber malzemelerin yerine kullanılmıştır. İçerisinde geri dönüştürülmüş cam fiber bulunan numunelerin çekme testleri sonucunda elde edilen değerler orjinal numunelerin değerlerine oldukça yakın bulunmuştur. Mekanik özelliklerdeki düşme %5'ten daha azdır. Geri dönüşüm takviyesi kütlece, %8, 12, 16 olan numunelerin eğilme test sonuçları, içerisinde %100 orijinal cam fiber bulunan numunelerle karşılaştırıldığında eğilme özelliklerinde %10 civarında düşme olduğu belirlenmiştir. Tüm numuneler, (içerisinde %4 geri dönüşüm malzemesi bulunan numune dışında) kabul edilebilecek mekanik performans göstermişlerdir.

Geri dönüşüm için polimer atıklara öğütme, parçalama ve kesme gibi mekanik geri dönüşüm işlemleri uygulanmaktadır. Böylece içerisinde dolgu, fiber ve reçine malzemesi bulunan geri dönüşüm ürünleri elde edilebilmektedir. Atık malzemeler, parçalama ve kesme işlemleri sonunda 50-100 mm tane boyutlarına, öğütmeyle 50 µm-10 mm tane boyutlarına indirilmektedir. Uygulamalarda, SMC (sıcak pres pestili) ve BMC / DMC (sıcak pres hamurları) hatlarından çıkan ve kullanım ömürleri bitmiş ürünlerin mekanik geri dönüşüm çıktıları tekrardan üretilmede kullanılabilir (Derosa vd. 2005a). Sıcak pres pestili geri dönüşüm ürün boyutlarının sınıflandırılması için, Phoenix Fiberglass (Kanada) ve ERCOM (Almanya) firmalarının uygulamaları referans olarak alınabilir (Pickering 2006). ERCOM şirketi SMC (sıcak pres pestili) geri dönüşüm malzemelerini 250 µm-3 mm, 250 µm, 3-20 mm, 3-15 mm olarak sınıflandırırken Phoenix Fiberglass şirketi ise, 12 mm, 3,1 mm, 1,6 mm ve 0,8 mm fiber boyutlarındaki SMC geri dönüşüm ürünlerini üretimde yeniden kullanmaktadır. Palmer (2009) ise, mekanik geri dönüşüm yoluyla elde edilen ürünlerin tane boyutu 0,5 mm ile 2 mm aralığındakileri cam fiber ve 0,5 mm'den düşük olanlarıysa toz dolgu malzemesi olarak kabul etmiştir. Tane boyutlarının küçülmesiyle içerdikleri kütlece % cam miktarları azalan ve reçine miktarı bakımından artan toz dolgu malzemesi üretilmektedir.

Pickering (2006) makalesinde, BMC / SMC geri dönüşüm numunelerinin dolgu malzemesi (silikatlar, kil, kalsit ürünlerinin) yerine kullanılması sonucunda mekanik dayanımlarda %10 oranında azalmanın gerçekleşmesi kabul edilebilir görülmüştür. Ayrıca, BMC ve SMC üretiminde, orijinal fiberler ile birlikte geri dönüşüm cam içeriğinin kullanılması göz önüne alınmalıdır.

Palmer ve vd. (2009), hamur içerisine konulan geri dönüşüm ve orijinal fiberlerin karıştırılma sürelerinin son ürünün mekanik performansına nasıl etkilediğini araştırmıştır. Geri dönüşüm fiberlerin ıslanması ve karışması uygulandıktan sonra karışma süresinin kalanında orijinal fiberlerin sıcak pres hamuruna (DMC) eklenmesi mekanik performans değerlerinde pozitif yönde etki göstermesini sağlamıştır. Orjinal ve geri dönüşüm fiberlerin aynı zamanda karışıma katıldığı numunelere göre, darbe dayanımında %10, eğilme dayanımındaysa %25 oranında artış görülmüştür. Çalışmada %10 oranında geri dönüşüm çıktısı, % ağırlıkça (%100 fiber takviyesi) ve % oransal (% fiber ve % dolgu değerleri) ele alarak 2 farklı durumda orijinal fiberler yerine sıcak pres (DMC) hamuruna eklenmiştir. Numunelerin darbe dayanım ortalaması, % ağırlıkça ve % oransal sayımlanan karışım değerlerinde standart numuneden fazla olduğu görülmüştür. Eğilme modülü değerlerinde %10 azalma gözlenirken, eğilme dayanımları, standart malzemenin % 92-97 arası değerlerinde olduğu ve hafif miktarda azalma olduğu görülmüştür.

Palmer vd. (2010), başka bir uygulamada geri dönüşüm karbon fiber çıktılarını sıcak pres pestili (SMC) numunelerinde orijinal cam fiberler yerine kullanmışlardır. SMC (sıcak pres pestili) içerisinde ağırlıkça %20 karbon fiber geri dönüşüm takviyesi ürünlerin darbe ve eğilme dayanımlarında sırası ile %20 ve %14 azalmaya sebep olmuştur. Eğilme modül değerindeyse % 15 artma olduğu gözlenmiştir.

Bledzki ve Goracy (1994), sıcak pres pestili (SMC) atık malzemeleri, takviye (%35) ve dolgu (%32) oranları aynı kalmak koşuluyla sıcak pres pestili (SMC) ve sıcak pres hamuru (BMC) numunelerinde yeniden kullanmıştır. Sıcak pres hamuru (BMC) hamurunda, 0,2 mm boyutunun altında atık malzemenin ağırlıkça %15 oranında dolgu yerine kullanılması, son malzemenin çekme dayanımında %10 düşmeye, eğilme dayanımındaysa %10 artışa neden olmuştur. Aynı toz atığın ağırlıkça %30 oranında karışıma ilave edilmesiyse ürünün çekme ve eğilme dayanım değerlerinde sırasıyla %31 ve %18 oranında azalmaya sebebiyet vermiştir. Orijinal fiberlerin yerine ağırlıkça % 0,5, 1,25 ve 15 mm tane boyutlarında fiber ağırlıklı atık malzemenin kullanılması sonucunda, eğilme dayanım değeri etkilenmemişken, numunelerin çekme dayanımında yaklaşık %10 azalma görülmüştür. Ağırlıkça %30 değerlerinde geri kazanım fiberlerin, orijinal fiberlerin yerine kullanılmasıyla eğilme dayanımında %17 azalma görülmüştür. Sıcak pres pestili (BMC) ürünlerinde kullanılan dolgu esaslı atık malzeme sadece eğilme dayanım değerlerinde artmaya neden olmuştur. Aynı uygulamada, SMC sıcak pres pestilinde tane boyutu 0,2 mm'nin altında, ağırlıkça %10 oranında veya 0,5 ila 0,2 mm aralığında bulunan geri dönüşüm dolgu malzemesi kullanılmasıyla darbe, eğilme ve çekme dayanımlarında artma görülmüştür. Uygulamalarda, hasar gören sıcak pres hamuru (BMC) ürünlerinde çatlak ilerlemesi, fiber matris geri dönüşüm ara yüzeyinde oluştuğu mikroskobik görüntüler ile belirlenmiştir. Geri dönüşüm ürününde matris ve fiber arasında oluşan bağ kuvvetinin düşük olduğu görülmüştür (Bledzki vd. 1992, Derosa vd. 2003).

Petterson ve Nilsson (1994), SMC pestili içerisinde dolgu malzemesi olarak ağırlıkça %50 / 50 oranında (yarı yarıya) dolgu bazlı ve cam içerikli SMC atıklarını kullanmıştır. Bu atıkların tane boyutları 0,5-1,25 mm aralığında cam içerikli ve 0,2-0,5 mm aralığında dolgu bazlı olacak şekilde belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, üretilen numunelerin eğilme dayanımında %16 oranında artış gözlenmiştir. Aynı çalışmada, sıcak pres (BMC) hamurunda CaCO₃ dolgu malzemesinin tamamının (%100) yerine, 0,5 mm'den büyük tane boyutuna sahip fiber içerikli geri dönüşüm ürünü kullanılmış ve bu durum, numunelerin eğilme dayanım değerlerinde %52 oranında düşüşe sebebiyet vermiştir.

Inoh ve arkadaşları (1994), CaCO₃ dolgu malzemesi yerine kullanılan SMC geri dönüşüm dolgusunun sıcak pres pestili (SMC) ürünlerinde özgül ağırlık değerinin %25 oranından daha düşük olduğunu belirtmiştir. Bu durumun, geri dönüşüm dolgusunun kütlece (%) daha fazla miktarda kullanılmasını gerektirebileceğine dikkat çekmişlerdir. Ayrıca, karışımın viskozite değerlerinin kontrol altında tutulabilmesi için geri dönüşüm dolgusunun ağırlıkça %30'un altında olması gerektiği ifade edilmiştir.

Derosa ve arkadaşları (2005b), çalışmalarında fiber takviyeli geri dönüşüm ürününü, orijinal fiberlerin yerine kullanmıştır. Araştırmada, çeşitli boyutlarda orijinal fiberlerle takviye edilmiş, geri dönüşüm fiber içeren ve takviye elemanı içermeyen numunelerin rijitlik ve eğilme dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. Geri dönüşüm fiber içeren numunelerin eğilme dayanım değerlerinin, orijinal fiber içeren numunelerin eğilme dayanım değerlerinin, orijinal fiber içeren numunelere kıyasla %75 oranında azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, orijinal fiber boyutunun kısalması, rijitlik ve eğilme dayanımında düşüşe neden olduğu bulunmuştur. Orijinal fiber içeren numunelerde fiber miktarının artması, rijitlik ve eğilme dayanım değerlerin kırılma yüzeyleri takviyeli numunelerde bu artış gözlenmemiştir. Numunelerin kırılma yüzeyleri mikroskobik olarak incelendiğinde, çatlak ilerlemesinin geri dönüşüm fiber-matris ara yüzeyinde gerçekleştiği görülmüştür. Geri dönüşüm fiberlerin orijinal fiberlere göre daha kısa olması ve fiber-matris bağ kuvvetlerinin zayıf olması nedeniyle dayanım değerlerinin düştüğü sonucuna varılmıştır.

2. POLİMER VE KOMPOZİT MALZEMELER

Polimer malzemeler, hafif ve gürültüsüz çalışma sağlamaları nedeniyle son yıllarda gittikçe artan kullanım oranına sahiptirler. İlk üretim aşamasında tasarımın hafifletilmesi yanı sıra sistemlerin çalıştırılmasında harcanan enerjinin de azaltılması önemlidir. Ancak polimerlerin kullanımlarını sınırlayan en önemli faktör mekanik özelliklerinin düşük olmasıdır.

Polimerlerin avantajları hafif olmaları (yoğunluk 1,0- 1,4 g/cm³), kimyasallara karşı iyi dayanım göstermeleri ve korozyon direncinin yüksek olması, ısı ve elektrik iletkenliklerinin düşük olması, renklendirilebilir ve boyanabilir olmaları, kolay şekillendirilebilir ve ucuz olmaları şeklinde sıralanabilir. Polimerlerin en önemli dezavantajı ise düşük elastisite modülü, çekme dayanımı, akma sınırı vb mekanik özelliklere sahip olmaları ile birlikte petrol kaynaklı olmaları nedeniyle kaynakların giderek tükeniyor olması ve geri dönüşümlerinin sınırlı olması şeklinde sıralanabilir.

2.1 Polimer Türleri

Başlıca polimer türleri; termopolimerler, termosetler, elastomerler olmak üzere 3 gruptur. (Kalaycı ve diğ., 2021) Bununla birlikte kimi kaynaklarda fluidoplastlar da bir grup olarak ele alınarak polimerler dört grup olarak sınıflandırılmaktadır. (Meran, 2016)

Ayrıca polimerler, zincir yapılarına göre ve bileşiklerinin kaynağına göre olmak üzere farklı sınıflandırmalara da sahiptirler. Zincir yapılarına göre; lineer (doğrusal), dallanmış ve çapraz bağlı şeklinde sınıflandırılır. Bileşiklerinin kaynağına göre sınıflandırmada doğal, sentetik ve yarı sentetik şeklindedir. (Altıntaş, 2013 ve diğ.)

Polimer türlerinde en çok kullanılan grup termoplastlardır. Termoplastların makro molekülleri arasında ağlaşma yoktur. Isıtılarak tekrardan polimer şekillendirilmeleri mümkündür. Her ısıtıldıklarında makro molekül yapıları bir miktar zayıflar. Çözücülerle çözündürülebilirler, ergitilebilirler ve kaynak

edilebilirler. Sıvı (su) emerler. Enjeksiyon ve ekstrüzyon yöntemleri ile son şekli verilir. Enjeksiyon esnasında sonsuz vida ile itilen granüller ısıtıcılar kanalı ile ergitilir ve kalıpta soğutulur.

Termosetlerin makro molekülleri birbirleriyle dar biçimde ağlaşmıştır. Yani makro moleküller arasında atomlar arası en güçlü bağ olan kovalent bağlar vardır. Normal olarak kalıcı bir şekil verilmeleri mümkün değildir. Camsı geçiş sıcaklığının üstünde tamamen elastiktirler. Enjeksiyon ve ekstrüzyon yöntemlerine uygundurlar. Enjeksiyon işleminde sonsuz vida içerisinde hamur haline getirilen karışım kalıpta ısıtılarak ergir ve şekil verilir (Meran, 2016).

Elastomerlerde de makro moleküller termosetlerdeki gibi birbirleriyle ağlaşmıştır. Fakat ağ gözenekleri genişliği bunlarda büyüktür. Camsı geçiş sıcaklığının altında sert/elastiktirler. Kullanım sıcaklıkları Camsı geçiş sıcaklığının üzerinde olmalıdır. Kullanım sıcaklıklarında lastik türü elastiktirler. Ergimezler, çözünmezler, fakat sıvı emerler.

Fluidoplastlar: Normal ortam sıcaklıklarında yerçekimi kuvvetiyle akabilen, çoğunlukla macunumsu, uzayarak akan, yapışkanımsı olan çözücülerde kolay çözünen polimerlerdir.

Tablo 2.1.'de dünyada çeşitli malzemelerin yıllara göre tüketim miktarları verilmiştir. Tablo 2.2'de ise 1985 yılı referans alınarak yıllar bazında malzeme gruplarının tüketim miktarı artışı verilmiştir.

Yıl	Polimer	Çelik	Alüminyum
1970	30	595	10
1975	40	644	13
1980	48	716	16
1985	68	719	17
1990	92	770	19
1995	122	752	20
2000	147	848	24

Tablo 2. 1: Dünyada çeşitli malzeme türlerinin yıllara göre tüketim miktarları (milyon ton)(Biron, 2004).

Yıl	Polimer	Kompozit	Alüminyum	Çelik
1985	100	100	100	100
1990	135	150	112	107
1995	179	160	118	104
2000	216	190	141	115

Tablo 2. 2: 1985 yılına göre, yıllar bazında tüketim miktarının değişimi (Biron, 2004).

Tablolardan görüldüğü üzere polimerler, kullanım miktarı yıllar bazında en fazla artış gösteren malzeme grubudur. Hafif ve mukavemetli malzemelerin geliştirilmesi çalışmalarında kompozit malzemelerin özellikle havacılık ve uzay sanayi, otomotiv sanayinde ön plana çıkması ve kompozit malzemelerin matrislerinin genel olarak polimer olmaları, polimerlerin tüketimlerinin baş faktörüdür.

Şekil 2.1'de yıllara göre malzeme türlerinin tüketimlerindeki artış grafik olarak verilmiştir.



Şekil 2. 1:1985 yılına göre yıllar bazında tüketim miktarının değişim grafiği (Biron, 2004).

Garside (2020) tarafından yapılan çalışmada 2018-2050 yılları arasında malzeme gruplarının tüketim oranlarındaki artışa dair öngörü grafiği Şekil 2.2'de verilmiştir. Tüm malzeme grupları arasında en yüksek artış oranı polimerlerde öngörülmektedir. 2030 yılına kadar polimer tüketiminde % 4,1 oranında artış beklenirken, 2030-2050 yılları arasında ise % 2,4'lük artış beklenmektedir.



Şekil 2. 2: 2018-2050 yılları arasında malzeme gruplarındaki tüketim artış oranları (Garside, 2020).

Tablo 2.3'te çeşitli malzemelerin geri dönüştürülmeleri ile elde edilen kar verilmiştir. Polimerlerin geri dönüşümleri ile birim kütle başına 2 dolar kar elde edilmektedir. Geri dönüşüm maliyeti ilk üretim maliyetinin %33,3'ü kadardır.

Malzeme	İlk Üretim Maliyeti (A)	Geri dönüşüm Maliyeti	Net kar C=A-B	Geri dönüşüm maliyeti/İlk üretim maliyeti
		(B)		B/A
				(%)
	US \$/kg	US \$/kg	US \$/kg	US \$/kg
Çelik	18	4	14	22,2
Alüminyum	91	4	87	4,4
Kağıt	6	1	5	16,7
Polimer	3	1	2	33,3
Cam	12	11	1	91,7

 Tablo 2. 3: Çeşitli malzeme gruplarının geri dönüşümleri ile elde edilen kar (Garside, 2020).

Tablo 2.4'te çeşitli malzemelerin çekme özellikleri verilmiştir. Polimerlerin kullanımını sınırlayan en önemli özellik dayanım değerlerinin düşük olmasıdır.

Malzeme	Çekme Day	anımı (MPa)	Akma Sınırı (MPa)		Elastisite			
	En az	En çok	En az	En çok	Modülü			
				-	GPa			
	Metal Malzemeler							
Çelik	300	1800	200	1700	210			
Titanyum	1000	1000			105			
Alüminyum	75	700	30	550	75			
Magnezyum	85	255	43	190	44			
		Diğer malzem	eler					
Dökme cam	40	300						
Cam elyaf	2000	3500			55-85			
Ahşap	5	16			11			
	P	olimer Kompo	ozitler					
Tek yönlü CF	1800	3000			260			
Tek yönlü ArF	1400	1500			87			
Tek yönlü GF	800	800			28			
SMC CF	280	350			50			
SMC GF	48	285			21			
	Uzun Can	n Elyaf Takviy	eli Polime	rler				
EP LGF	90	90			16			
	Kısa Cam	ı Elyaf Takviy	eli Polimer	ler				
EP GF &	50	100		100	14			
Mineral								
PEEK %30 CF	210	210		210	17			
PEEK &30 GF	165	165			10			
		Saf Polimer	ler					
PEEK	80				4			

Tablo 2. 4: Çeşitli malzemelerin çekme özellikleri (Biron, 2004).

Tablo 2.5'te çeşitli malzemelerin özgül çekme dayanımları verilmiştir. Çeşitli takviyelerin kullanımı ile elde edilen polimer matrisli kompozitlerin dayanım değerlerinin metallere yaklaştığı ve özgül ağırlık başına düşen dayanım değerlerinin ise polimerlerin hafif olması nedeni ile metallere nazaran çok daha yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 2.5). Özgül çekme dayanımı değerlerinde takviyeli polimelerin değerlerindeki bu yükselme özellikle hafifliğin istendiği uzay ve havacılık sanayi, otomotiv sanayi, spor aletleri üretimi gibi alanlarda polimer matrisli kompozitleri vazgeçilmez hale getirmektedir. Bununla birlikte, yağlamasız çalışma, korozyona dayanım gibi avantajlar ile de yağlamasız çalışmanın zorunlu olduğu kağıt ve gıda endüstrisinde kompozit malzemeleri öne çıkarmaktadır.

	Yoğunluk	Özgül çekn	Özgül	
	g/cm ³	Μ	çekme	
				modülü,
				GPa
		En az	En çok	
	Metal	Malzemeler		
Çelik	7,8	38	231	27
Titanyum	4,5	220	222	23
Alüminyum	2,8	27	250	27
Magnezyum	1,75	49	146	25
	Diğer	Malzemeler		
Cam	2,5	16	120	
Ahşap	0,4-0,75	12	21	13-27
	Polimer	Kompozitler		
Tek yönlü CF	1,56	1154	1923	167
Tek yönlü ArF	1,37	1022	1095	64
Tek yönlü GF	1,9	421	421	15
SMC CF	1,5	187	233	33
SMC GF	1,8	27 158		3-12
	Uzun Cam Elya	f Takviyeli Poli	merler	
EP LGF	1,8	50	50	9
	Kısa Cam Elyaf	Takviyeli Poli	merler	
EP GF & mineral	1,9	26	53	5-9
PEEK %30 CF	1,44	146	146	12
PEEK %30 GF	1,52	109	109	7
	Saf I	Polimerler		
PEEK	EEK 1,3		62	3
Epoksi	1,2	58	75	3
Köpüklü Polimerler				
Genişletilmiş &	0,02-0,9	2 17		0,4-0,6
köpüklü polimerler				
ArF: aramid elyaf	CF: karbon	GF: cam LGF: uz		UD: tek
	fiber	elyaf	cam elyaf	yönlü

Tablo 2. 5: Çeşitli malzemelerin özgül çekme özellikleri (Biron, 2004).

2.2 Termosetler

Termoset malzemeler yüksek boyutsal kararlılık göstermeleri nedeniyle son yıllarda otomotiv ve havacılık sanayiinde tercih edilen polimer grubudur. Termosetler, geri dönüşüme uygun olmayan malzemelerdir. Yalnızca bir kez ısıtılıp şekillendirilebilirler. Tekrar ısıtıldıklarında yeniden şekil verilemez ve mevcut şekilleri bozulur. Bu durum, termosetlerin yapılarındaki uzun molekül zincirlerinin çapraz bağlarla birbirine bağlı olmasından kaynaklanır. Bu bağlar, termosetlerin yeniden ısıtıldığında birbirleri üzerinde kaymasını engeller.

Termoset malzemeler genellikle ısı ve basınç etkisiyle son halini alır ve bu özellikleriyle kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılır. Termoset reçineler, inşaat sektöründeki çeşitli yapı elemanları, deniz taşıtları, otomotiv sanayi ve iç mekan mobilyaları gibi pek çok alanda tercih edilmektedir (Chung 2010).

Termosetlerin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Avantajları:

- 1) Daha düşük reçine viskozitesine sahiptirler,
- 2) Düşük imalat sıcaklıklarına sahiptirler,
- 3) Polimerize edildikten sonra mükemmel termal stabiliteye sahiptirler,
- 4) Yüksek kullanım sıcaklıklarına sahiptirler,
- 5) Rijitlikleri fazladır,
- 6) Kimyasal dayanıklılığa ve sürünme direncine sahiptirler,
- 7) Karmaşık istenilen şekiller elde edilebilir,
- 8) Elyafların ıslanması daha kolaydır (Bıkmaz ve Kurnaz, 2019).

Dezavantajları:

Kürlenmeden önce oda sıcaklığında depolanmaları kısa ömürlüdür ve kürlenme süreleri (1-2 saat) uzundur,

- 2) Raf ömürleri daha kısadır,
- 3) Termopolimer malzemelere göre daha uzun sürede şekillendirilirler,
- 4) Kalıpta üretim süreleri uzundur,
- 5) Gevrek (düşük gerilimli) yapıya sahiptirler,
- 6) Standart tekniklerle geri dönüştürülemezler (Bıkmaz ve Kurnaz,

2019).

2.3 Polimerlere Uygulanan Deneyler ve İlişkin Standartlar

Polimer malzemelere uygulanan deneyler aşağıda verilen standartlara göre gerçekleştirilmektedir.

- Çekme Deneyi (ASTM D 638)
- Sertlik Ölçme Deneyleri
 - ✓ Rockwell (ASTM D 785)
 - ✓ Durometre (ASTM D 2240)
 - ✓ Bacrol (AS'I'M D 2583)
 - ✓ Shore
- Eğilme Deneyi (ASTM D 790)
- Gerilme Gevşemesi Deneyi (ASTM D 2991)
- Darbe Deneyleri
 - ✓ Izod Darbe Deneyi (ASTM D 256)
 - ✓ Charpy Darbe Deneyi (ASTM D 256 Method B)
 - ✓ Çekmeli Darbe Deneyi (ASTM D 1822)
 - ✓ Kombine Darbe Deneyi (ASTM D 2463)
- Kayma Dayanımı Deneyi
 - ✓ Kayma Dayanımı Deneyi (ASTM D 732)
 - ✓ Dinamik Kayma Modülü Deneyi (ASTM D 2236-64T)
- Yorulma Deneyi
 - ✓ Eğilme yorulması Deneyi (ASTM D 671)

2.3.1 Çekme Deneyi (ASTM D 638)

ASTM D 638 test yöntemi, 14 mm'ye (0,55 inç) kadar herhangi bir kalınlıktaki malzemeleri test etmek için kullanılabilir. Bununla birlikte, kalınlığı 1,0 mm'den (0,04 inç) daha az film dahil olmak üzere ince levha şeklindeki numuneleri test etmek için de kullanılabilir. Kalınlığı 14 mm'den (0,55 inç) fazla olan malzemeler makine ile azaltılmalıdır. Bu test yöntemi ve ISO 527-1 teknik olarak eşdeğerdir. ASTM D 638 standardına göre çekme deney numunesi boyutları Şekil 2.3'te verilmiştir.

TS EN ISO 527-4'e göre çekme deneyi parçası boyutları ise; dar paralel kenarlı kısmın uzunluğu (L₁) 60 ± 0,5 mm, toplam uzunluk (L₃) \geq 150 mm, uçlardaki genişlik (b₂) 20 ± 0,2 mm, radyüs yarıçapı (R) \geq 60 mm, kalınlık (h) 2– 10 mm, dar kısmın genişliği (b₁) 10 ± 0,2 mm, çeneler arasındaki başlangıç mesafesi (L) 115±1 mm, ölçme uzunluğu (L₀) 50 ± 0.5 mm olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. 3: Çekme deneyi (ASTM D 638) standartlarına göre numune boyutları (ASTM D 638).

Tablo 2. 6: Çekme deneyi (ASTM D 638) standartlarına göre numune boyutları tablosu (ASTM D 638).

Boyutlar 7 mm veya		7	4 mm ve		Toleranslar	
	altı		mm'den	altında		
			14 mm'e			
			kadar			
	Tip	Tip II	Tip III	Tip	Tip V	
	Ĩ	-	-	ĪŶ	-	
W – Dar kesit genişliği	13	6	19	6	3,18	±0,5 (±0,02)
L – Dar bölümün	57	57	57	33	9,53	±0,5 (±0,02)C
uzunluğu						
W ₀ – Genel olarak	19	19	29	19	-	+ 6,4 (+ 0,25)
genişlik, minG						
W ₀ – Genel olarak	-	-	-	-	9,53	+3,18+(0,125)
genişlik, min						
L ₀ – Genel uzunluk, min	165	183	246	115	63,5	maks yok
G – Gage uzunluğuI	50	50	50	-	7,62	$\pm 0,25(\pm 0,010)$
G – Gage uzunluğuI	-	-	-	25	-	$\pm 0,13(\pm 0,005)$
D – Kollar arasındaki	115	135	115	65	25,4	±5 (±0,2)
mesafe						
R – Radyus yarıçapı	76	76	76	14	12,7	$\pm 1(\pm 0,04)$
R ₀ –Dış yarıçap (Tip IV)	-	-	_	25	-	±1 (±0,04)

2.3.2 Sertlik Ölçme Deneyi

Sertlik, bir malzemenin kendisine batırılmak istenen başka bir malzemeye gösterdiği tepkidir. Batırılmak istenen malzemenin daha sert olması lazım ki numunede iz bırakabilsin. Batırılan ucun şekli bırakacağı izi etkilemektedir. Bu nedenle kullanılan uç ve sertlik ölçme yöntemi belirtilmelidir.

2.3.2.1 Sertlik ölçümü

Genel olarak net bir büyüklük olmayan sertlik, malzemenin deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilir. Dayanımı yüksek olan bir malzemenin, dayanımı kendinden daha düşük olan başka bir malzeme üzerinde bırakmış olduğu deformasyon sonucu hesaplanan bir değerdir. Yapılan deney sonucunda deformasyon ne kadar az ise o malzemenin sertliği o derece yüksektir şeklinde yorumlanır. (teknikürünler.com, Meran, 2016, devotrans.com)

Birimi ve boyutu olmayan Shore (Durometre) sertliği, plastik ya da esnek malzemelerin sertliğini değerlendirmek için kullanılan bir sertlik deneyidir. Genel olarak EN ISO 868 standardına göre yapılmaktadır. Plastik malzemeler de genel olarak Shore A ve Shore D sertlik değerleri kullanılmaktır. Genel olarak yumuşak malzemeler olan (kauçuk, silikon kauçuk, lastik, deri, elastomer, vinil, pvc, teflon...) sertliğini ölçmek için Shore A değeri, genel olarak daha rijit malzemeler olan (naylon, polyester, poliamid, poliüretan, ABS, akril, kevlar, polistren, mühendislik plastikleri...) sertliğini ölçmek için Shore D değeri kullanılır. (teknikürünler.com)

Shore sertlik deneyinde, batma ucunun malzemeye ne kadar battığı ölçülmektedir. Batma ucu, standartlarca belirlenmiş bir yaylı sistem tarafından hareket ettirilir ve batırılan malzeme üzerinde battığı mesafe ne kadar az olursa numunenin sertliği o kadar yüksek olur.



Şekil 2. 4: Shore A ve Shore D sertlik sınıfları arasında dönüşüm tablosu (teknikürünler.com).

2.4 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler en az iki ya da daha fazla sayıdaki malzemelerin (metal, seramik ve polimer gibi) farklı yöntemler ve teknikler kullanılarak makro boyutta birleştirilmesiyle ortaya çıkan malzemelerdir. Kompozit malzemeler Şekil 2.5'te gösterildiği gibi genellikle matris ve takviye fazı adı verilen iki ayrı fazdan oluşmaktadır (Bitlisli, 2019) (Kalaycı, 2021).



Şekil 2. 5: Kompozit malzemelerin matris ve elyaf fazı görüntüsü (Engin, vd., 2015) (Kalaycı, 2021).

Kompozit malzemelerde bulunan, matris fazının kompozit malzemeyi bağlayıcı, bir arada tutucu ve birleştirici gibi görevleri mevcuttur. Takviye fazının ise kompozit malzemeye istenen duruma göre; korozyon direnci, basma mukavemeti, aşınma direnci, iletkenlik, esneklik, mukavemet kazandırma gibi birçok görevi mevcuttur (Yastımoğlu, 2017) (Kalaycı, 2021).

Kompozit malzemeler kompoziti oluşturan takviye elemanı ve matris fazına göre kendisine özgü özellikler kazanabilirler. Ayrıca, kompozit malzemeler istenilen özelliklerin yanında üretilebilirlik, işlenebilirlik ve ekonomiklik gibi durumlarda da kolaylık sağlarlar.

2.4.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, takviye elemanına göre, kullanılan uygulama alanına göre, taşıdığı özelliğe göre matris elemanına göre veya yapısına göre gibi birçok yönden sınıflandırılmışlardır.

2.4.1.1 Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

- Elyaf takviyeli kompozit malzemeler,
- Parçacık takviyeli kompozit malzemeler,

• Yapısal takviyeli kompozit malzemeler şeklinde genel sınıflandırma yapılabilir (Kalaycı, 2021).

2.4.1.2 Matris Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeleri matris elemanına göre karbon, polimer, metal ve seramik şeklinde dört ayrı gruba ayırabilir (Kalaycı, 2021). Kompozit malzemelerin matrisleri %65'i termoset polimerler, %35'i termoplastik polimerlerden oluşmaktadır (Termek, 2021).

Yapısal kompozit malzemeler günümüzde gelişen ve ilerleyen teknolojiler sayesinde sürekli gelişmekte ve değişime uğramaktadır. Bu kompozitler günümüzde savunma sanayisi, havacılık uygulamaları, uzay teknolojileri ve sağlık endüstrisi gibi önemli ve değişik alanlarda kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemeler yapılarına göre; katkılı kompozit malzemeler, ileri kompozit malzemeler, nanokompozit malzemeler şeklinde sınıflandırılırlar. Kompozitlerin yapılarına göre türleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir. (Kalaycı, 2021).



Şekil 2. 6: Nanokompozit malzemelerin oluşumu (Kalaycı, 2021).

2.4.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin günümüzde geliştirilmiş birçok üretim yöntemi mevcuttur. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri; istenilen özelliğe, işlenebilirliğine, üretilecek kompozittin yapısına ve maliyetine göre farklılık göstermektedir (Kalaycı, 2021).

2.4.2.1 Elyaf Yatırma Yöntemi

Elyaf yatırma yöntemiyle üretilen kompozitler düşük ve orta hacimli yapılardır. Kompozit plakalar, kaporta, kayık, gemi gibi yapılar bu yöntemle üretilebilmektedir. Elyaf yatırma yönteminin kolay uygulanabilir olması günümüzde sıklıkla kullanılmasına neden olmaktadır. Bu yöntem yapısı gereği uygulaması ve maliyeti ucuz bir yöntemdir. Çünkü kullanılan gereksinimlerin ve malzemelerin maliyetleri düşüktür. Bu yöntem genellikle model ve kalıp yöntemleri için kullanılırlar. Aşağıda bu yönteme örnek gösterilmiştir (Kalaycı, 2021).

2.4.2.2 Reçine Transfer Yöntemi

Kompozit malzemelerin üretimi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi, özellikle havacılık endüstrisinin yüksek standartlarına uygun kompozit parça üretimini sağlayan Reçine Transfer Kalıplama (RTM) yöntemidir.

Büyük hacim ve yüksek basınç altında karmaşık yapılı malzemelerin üretimi için kullanılmaktadır. Bu yöntemde yüksek mukavemet elde etmek mümkündür. Karmaşık şekilli parçalar yüksek dayanım ve iyi yüzey kalitesiyle üretilebilmektedir. Genellikle termoset reçineler kullanılmaktadır. Reçine transfer yönteminde farklı uygulama ve metodlar kullanılabilmektedir. Soğuk veya sıcak şekillendirme kullanılmaktadır. Basma kalıplama yöntemiyle benzerlik göstermektedir (Kalaycı, 2021). Kapalı bir sistem içerisinde üretimin gerçekleştirildiği RTM yöntemi sayesinde insan kaynaklı üretim hataları azaltılmakta ve operatörün kimyasallarla teması en aza indirgenmektedir.

2.4.2.3 Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemiyle kompozit malzeme üretimi el yatırma yöntemiyle benzerlik göstermektedir (Şekil 2.7). Bu yöntemin el yatırma yöntemine göre avantajları; uygulaması daha pratik, karmaşık şekilli yapıları yapmak daha kolay ve üretimi daha hızlı yapmak mümkündür. Genellikle kayıklar, depolar, tanklar ve daha büyük karmaşık şekilli yapılar üretilmektedir. Bu yöntemin kullanılmasının sebepleri; karmaşık parça imalatı, taşınabilir aygıt, kolay ve ekonomiklik özellikleri ön plana çıkmaktadır (Kalaycı, 2021).



Şekil 2. 7: Elyaf püskürtme yöntemi (tekstilteknik.blogspot.com).

2.4.2.4 Helisel Sarma Yöntemi

Helisel sarma yöntemi ile uzun pervaneler, tanklar, roketler, borular ve silindirik yapılar üretiminde kullanılmaktadırlar.

Helisel sarma yöntemi istenilen ve uygulaması yapılan parça ve şekle göre değişiklik göstermektedir. Manuel kontrollü ve bilgisayar kontrollü olmak üzere iki çeşit uygulama yöntemleri vardır. Karmaşık geometrili malzemelerin üretimlerinin kontrolü zordur ve kısmen maliyetlidir (Kalaycı, 2021).

2.4.2.5 Tabakalı Birleştirme Yöntemi

Tabakalı kompozit malzeme üretiminde de farklı yöntemler ve metodlar kullanılmaktadır. Bu yöntemde sıcak presleme ve vakum torbalama gibi metodlar kullanılmaktadır. Bu yöntem literatürde vakum infüzyon yöntemiyle de bilinmektedir.

Tabakalı birleştirme yöntemi ekonomik olup vakum altında uygulama, basınçlı torba ve kalıp ardında yapılmaktadır. Kısa elyaflar, hamur kalıplama ve elyaf kumaş gibi değişik uygulamalara da uygundur. Bu yöntemde oldukça karmaşık parçalar ve yapılar üretmek mümkündür. Pratik ve uygulaması kısmen kolay bir yöntemdir (Kalaycı, 2021).

2.4.2.6 Profil Çekme Yöntemi

Profil çekme yöntemiyle %75'e varan kompozit malzemeler üretmek mümkündür. Bu yöntem pultrüzyon yöntemiyle benzerlik göstermektedir.

Kompozit malzemeyi oluşturan elemanlar iki kalıp arasında sıkıştırılarak sertleştirme işlemleri yapılır. Bu yöntem ile yüksek kaliteli otoklav gövde plakaları üretmek mümkündür (Şekil 2.8) (Kalaycı, 2021).



Şekil 2. 8: Profil çekme yöntemi (Kalaycı, 2021).

2.4.2.7 Soğuk Presleme Yöntemi

Soğuk presleme yöntemi ile kompozit üretiminde genellikle ucuz kalıplar, düşük basınç ve oda sıcaklığında orta hacimli yapılarda kullanılırlar (Şekil 2.9). Bu yöntemde karbon elyaflar ve cam elyaf termoset reçine içerisine kalıplar arasına yerleştirilerek üretim gerçekleştirilir. Elyaf yatırma yöntemiyle benzerlik göstermektedir. Elyaf yatırma yönteminden farklı olarak daha mukavemetli ve düzgün yüzeyli malzemeler üretmek mümkündür (Kalaycı, 2021).



Şekil 2. 9: Soğuk presleme yöntemi (Han vd., 2012).

Soğuk presleme yönteminde kalıp olarak polimer, seramik ve metal kalıplar kullanabilmektedir. Kullanılan reçinelerde viskozitesi düşük olanlar ve oda sıcaklığında sertleşenler tercih edilebilir. Yüksek kalıplama sıcaklık ve basınçları gerekmediği için kısmen uygun ve maliyeti düşük bir yöntemdir. Üretilen kompozit malzemenin yüzey kalitesi ve dayanımı yüksek seviyelerdedir.

2.4.2.8 Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

Enjeksiyon kalıplama yöntemi kısmen maliyetli bir yöntemdir. Makine ve teçhizat ihtiyacı vardır. Ama uygulama bakımından pratik ve hızlı bir yöntemdir. Seri üretimde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir.

Enjeksiyon kalıplama yöntemi (Şekil 2.10) üretilen parça ve kullanılan malzeme çeşidi itibariyle zengin bir üretim tekniğidir. Bu yöntemle birçok polimer, metal alaşım ve kompozit malzemeler iyi yüzey kalitesi ve yüksek mukavemetle üretmek mümkündür. Birçok sektörde ve alanda kullanılan bir yöntemdir (Kalaycı, 2021).


Şekil 2. 10: Enjeksiyon kalıplama (Gokerplast.com.tr).

2.5 Termosetlerin Geri Dönüşümü

Termosetler kovalent olarak çapraz bağ ile üstün performans göstermelerine karşın, sınırlı geri dönüştürülebilir olmaları en önemli dezavantajlarıdır. Petrokimya endüstrisi ürünü olan termosetlerin de petrol kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle geri dönüşümleri son yılların popüler alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Termosetlerin geri dönüşümü ile ilgili olarak uygulamada kullanılan teknikler mekanik, termal ve kimyasal işleme şeklinde sıralanabilir. Bununla birlikte, bu yöntemler yüksek enerji gerektirmektedir. Bu esnada termoset matrisin kendisinin geri dönüşümü hesaba katılmaz. Bunun yerine, daha değerli olan lifleri ve dolgu maddelerinin geri alınmasına odaklanılır. Termoset ürünlerin geri dönüşüm oranlarını artırmak için birçok akademik çalışma içerisinde bağların burulması veya dinamik kovalent bağların kullanılması ile enerji girdisini azaltmaya yönelik çözümler bildirmektedir. Ancak, bu çalışmaların çoğunun endüstriyel uygulama potansiyeli sınırlıdır. Şekil 2.11'de bir geri dönüşüm süreci gösterilmiştir.



Şekil 2. 11: Geleneksel termoset kompozit atık işleme ve geri dönüşüm yollarının şematik görünümü (Susa ve diğ., 2019).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, aşınma ve ASTM D 638-10 standardına göre tip IV çekme deney numuneleri Solidworks programında modellenerek, Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan Ender Creality 3D yazıcılarda numuneler yazdırılmış (Şekil 3.1) ve bu numuneler ile silikon kalıplar oluşturulmuştur. Bu kalıpların üretim aşamaları Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3. 1: Ender Creality 3D yazıcı.



Şekil 3. 2: Çekme test numunesi ve üretim aşamaları. a. Solidworks uygulaması üzerinden çizilen çekme numunesi, b. 3D yazıcıdan yazdırılan çekme numunesi, c. Silikon kalıp oluşturmak için hazırlanan rijit kap, d. Elde edilen silikon kalıp.



Şekil 3. 3: Aşınma test numunesi ve üretim aşamaları. a. 3D yazıcıdan yazdırılan aşınma numuneleri, b. 3D yazıcıdan yazdırılan dikdörtgen kap, c. Dökülen silikon kalıp (yandan görünüm), d. Dökülen silikon kalıp (üstten görünüm).

3.1 Matris Malzemenin Özellikleri

Matris malzeme olarak Resinin Flex epoksi kullanılmıştır. Bu malzemenin özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Fiziksel Özellikler		
Renk (1 = Sarımsı / 5 = Ultra Şeffaf)	4 = Şeffaf	
Sararma Direnci (1 = Zayıf / 5 = Çok Güçlü)	3 = Orta	
Karışım Oranı (Ağırlık Cinsinden)	A:B / 1:1 veya 100:100	
Minimum-Maksimum Uygulama Kalınlığı (20°C)	1 - 20 mm	
Karışımın Çalışma Süresi (25°C / 150 g / Bardakta)	~ 60 dakika	
5 mm Kalınlık; Dokunma Kuruma Süresi (25°C)	~ 8 saat	
5 mm Kalınlık; Sert Kuruma Süresi (25°C)	~ 24 saat	
Final Kuruma (25°C)	7 Gün	
Final Kuruma Sonrası Sertlik (Shore D)	10	
Isı Dayanımı (Final Kuruma Sonrası Normal Şartlarda)	60 - 70 °C	

Tablo 3. 1: Flex epoksinin özellikleri.

3.2 Takviye Malzemelerin Özellikleri

Bakelite Synthetics firmasının Bakelite PF 1110-9005-S2 ve Hexion firmasının Bakelite PF 6507-9005-S1 malzemeleri kullanılmıştır. Bakelite PF 1110-9005-S2 fenolik kalıplama bileşimidir, inorganik dolgulu ve cam elyaf takviyelidir. Bakelite PF 6507-9005-S1 de fenolik kalıplama bileşimidir, inorganik dolgulu ve cam elyaf takviyelidir. Üretici firma tarafından bu özelliklere ilave olarak galvanizlenebilir olması, ısıya dayanıklı, iyi ortam dayanımı, yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılık ve yüksek mekanik dayanım özelliklerine sahip olması avantajları olarak verilmiştir. PF 1110-9005-S2 yakıt pompası parçaları, pistonlar, kasnaklar, vakum pompası parçaları, motor ekipmanları, marş ve yağ kapaklarında kullanılmaktadır. Enjeksiyon kalıplama yoluyla üretim yapılır. Isı dayanımı, yüksek basma dayanımı ve düşük ısıl genleşme katsayısı avantajlarıdır. Bakelite PF 6507-9005-S1 soğutma pompaları, manyetik şalterlerde solenoid şalter kapakları, mekanik ve termal olarak yüksek gerilme altındaki otomotiv parçaları, elektrik motor kapakları, küçük ev aletleri, kasnaklar, geri dönüş gerdirme makaraları, küçük dişliler, yatak parçaları, türbin çarklarında kullanılmaktadır. Takviye malzeme olarak kullanılan bakalitlerin teknik özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Özellik	Birim	Standart	PF1110	PF6507
Yoğunluk	g/cm ³	ISO 1183	2,05	1,6
Görünür yoğunluk	g/cm ³	ISO 60	0,8	0,72
Enjeksiyon kalıplama büzülmesi	%	ISO 2577	0,15	0,2
Enjeksiyon kalıplama sonrası büzülme	%	ISO 2577	0,03	0,15
Çekme dayanımı (5 mm/min)	MPa	ISO 527-1/2	120	85
Elastisite Modülü	MPa	ISO 527-1/2	26000	11000
Basma dayanımı	MPa	ISO 604	375	180
Kayma modülü	MPa	ISO 178	25000	10000
Eğilme dayanımı (2 mm/min)	MPa	ISO 178	240	135
23 °C'de Charpy çentik darbe dayanımı	kJ/m ²	ISO 179-1 eU	13	15
23 °C'de çentikli numune Charpy çentik darbe dayanımı	kJ/m ²	ISO 179-1 eA	4	3,5
8,0 MPa yük altında eğilme sıcaklığı	°C	ISO 75-2	195	170
Yüzey kararlılığı	Ohm		1011	1011
Hacim kararlılığı	Ohm.cm		1012	1012
Kayıp faktörü (100 Hz)	-		0,05	0,1
Bağıl geçirgenlik (100 Hz)	-		6,5	7
Elektrik dayanımı (1 mm kalınlık)	kV/mm	IEC 60243-P1	27,5	21,5
Karşılaştırmalı izleme indeksi	PTI	IEC 60112	225	150
Tutuşabilirlik	Adım/mm	UL 94	V-0/0,8 mm	
23 °C'de 24 saatte su emme	%		0,1	
23 °C'de 24 saatte su emme	mg		7	15

 Tablo 3. 2: Takviye olarak kullanılan bakalitlerin özellikleri.

Denizli'de faaliyet gösteren DEBAK firmasından Bakelite Synthetics firmasının Bakelite PF 1110-9005-S2 ve Hexion firmasının Bakelite PF 6507-9005-S1 malzemelerden üretilmiş parçalar temin edilmiştir. Temin edilen parçalar Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3. 4: DEBAK firmasından alınan bakalit parçalar. a. PF6507 takviye bakalitin (85 MPa) ilk hali, b. PF1110 takviye bakalitin (120 MPa) ilk hali.

DEBAK firmasından alınan parçalar öğütülerek 0,1 mm toz haline getirilmiştir. Toz haline getirilen bakalitler Şekil 3.5'de ve bu tozkarın 50x büyütme ile optik görüntüleri Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3. 5: Toz haline getirilen bakalitler. a. PF6507 takviye bakalitin (85 MPa) toz hali,b. PF1110 takviye bakalitin (120 MPa) toz hali.



Şekil 3. 6: Toz haline getirilen bakalitlerin toz boyutları. a. PF6507 takviye bakalitin (85 MPa) toz hali, b. PF1110 takviye bakalitin (120 MPa) toz hali.

Öğütülen tozların sırasıyla, 85 MPa dayanımdaki bakalitin ortalama 78,09 µm ve 120 MPa dayanımdaki bakalitin ortalama 182,38 µm boyutlarında olduğu ölçülmüştür. Öğütülen tozlar, flex epoksi reçine içine karışımın toplam ağırlığı 60 g olacak şekilde 3, 6 ve 9 g şeklinde ilave edilmiş, çalışma kapsamında çekme ve aşınma test numuneleri için üretilmiş kalıplara dökülmüştür. Böylece ağırlıkça %5, %10 ve %15 takviyeli numuneler üretilmiştir. Elde edilen numuneler Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3. 7: Deneyler için üretilen numune örnekleri. a. Çekme numuneleri, b. Aşınma numuneleri.

Elde edilen numunelerde, kuruma esnasında bir miktar çekme olduğu görülmüştür. Numunelerin kesit alanı 20,62 mm (5,5 mm x 3,75 mm) olarak ölçülmüştür. Bu boyutlar ASTM D638 standardına uygundur.

Hazırlanan numunelerin bir kısmı kalıba döküldükten sonra Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan, BIOMEC marka ECO-260 LAB model vakum cihazına 1400 ml'lik kap ile bağlanarak vakum ortamı oluşturulmuş ve 120 mm.Hg kuvvetinde 10'ar dakika olacak şekilde vakumlama yapılmıştır. Kullanılan vakum cihazı Şekil 3.8'de verilmiştir.





Şekil 3. 8: Vakumlama ortamı ve işlemi. a. BIOMEC marka ECO-260 LAB model vakum cihazı, b. Dikdörtgen saklama kabı bağlanarak oluşturulan vakum ortamı, c. Vakum ortamına bağlanmış vakum cihazı, d. Uygulama esnasında vakum cihazı.

ASTM D638 ve TS EN ISO 527-4 standardına uygun olarak, 115 mm genel uzunlukta, 19 mm genel genişlikte ve 33 mm dar bölüm uzunluğunda, 6 mm dar kesit genişliğinde ve 4 mm kalınlığında olacak şekilde Şekil 3.9'da görülen çekme test numuneleri oluşturulmuştur. Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme Mekanik Laboratuvarında, Fuji marka FJ-A08 model elektronik terazi ile bir düzenek oluşturularak, numune ucuna bağlanan bir kaba 1 l/min debide su eklenerek numunelere çekme testi uygulanmıştır. Eklenen ağırlıklar sonucunda kopmanın gerçekleştiği son kütle kuvvete dönüştürülmüştür. Elde edilen kuvvet değerleri numune kesit alanına bölünerek çekme dayanımı hesaplanmıştır.



Şekil 3. 9: Çekme deneyi (ASTM D 638) tip IV numune boyutları standartlarına göre üretilen çekme numuneleri çizimi.



Şekil 3. 10: Çekme testi yapabilmek için elde edilen düzenek.

10 mm çapında 20 mm uzunluğunda aşınma numuneleri oluşturulmuştur. Farklı aşınma özellikleri için, aşınma testleri pin-on disk aşınma testi kullanılarak yapılmıştır. Aşınma test cihazında ASTMG 99'a göre pin-on disk aşınma testi yapılmıştır. 10 s⁻¹ hızındaki encoderi sayesinde gerçek yüzey sürtünme katsayısını vermektedir. Ayrıca üzerine takılabilen yağlama sistemi sayesinde yağ altında örneklerin aşınma testleri yapılabilmektedir. Ölçümden önce, numuneler, yüzeylerini temizlemek için asetonla temizlenmiştir ve daha sonra 0,001 mg hassasiyette olan RADWAG marka NAS/220/C/2 model bir elektronik terazi kullanılarak tartılmıştır. Aşınma deney cihazında malzemelerin farklı yüklerde (5 N, 10 N, 15 N), 3 m/s kayma hızında, 180 m ve 360 m kayma mesafelerinde aşınma davranışları incelenmiştir. Kullanılan aşınma cihazı ve elektronik terazi Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3. 11: Uygulamada kullanılan aşınma cihazı ve hassas terazi. a. TURKYUS marka aşınma cihazı, b. RADWAG marka NAS/220/C/2 model hassas terazi.

15 N yük altında yapılan aşınma testlerinden elde edilen numunelerden Nikon marka Eclipse LV150NL model optik mikroskop altında görüntüler alınmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3. 12: Nikon marka Eclipse LV150NL model optik mikroskop.

4. DENEY SONUÇLARI

Çalışma esnasında gerçekleştirilen deneylerde toplam 14 farklı türde numuneye ait özellikler ve bu numunelerin sembolleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Vakumlanan numunelerde sembollerin önünde v kodu kullanılırken; termoset takviyenin çekme dayanımı değerinin ardından takviye termosetin gram cinsinden matris içerisine eklenme miktarı tire ile verilmiştir.

Tablo 4. 1: Numunelere ait özellikler ve sembolleşme.

Matris + takviye durumu	Sembol
Flex epoksi + takviye yok	flex
Vakumlanmış (flex epoksi + takviye yok)	vflex
57 g flex epoksi + 3 g Bakelite PF 6507-9005-S1	85-3
54 g flex epoksi + 6 g Bakelite PF 6507-9005-S1	85-6
51 g flex epoksi + 9 g Bakelite PF 6507-9005-S1	85-9
Vakumlanmış (57 g flex epoksi + 3 g Bakelite PF 6507-9005-S1)	v85-3
Vakumlanmış (54 g flex epoksi + 6 g Bakelite PF 6507-9005-S1)	v85-6
Vakumlanmış (51 g flex epoksi + 9 g Bakelite PF 6507-9005-S1)	v85-9
57 g flex epoksi + 3 g Bakelite PF 1110-9005-S2	120-3
54 g flex epoksi + 6 g Bakelite PF 1110-9005-S2	120-6
51 g flex epoksi + 9 g Bakelite PF 1110-9005-S2	120-9
Vakumlanmış (57 g flex epoksi + 3 g Bakelite PF 1110-9005-S2)	v120-3
Vakumlanmış (54 g flex epoksi + 6 g Bakelite PF 1110-9005-S2)	v120-6
Vakumlanmış (51 g flex epoksi + 9 g Bakelite PF 1110-9005-S2)	v120-9

4.1 Çekme Deneyi Sonuçları

Hazırlanan her numune çeşidi için beşer tane olacak şekilde çekme deneyi uygulanmış ve sonuçların ortalaması alınarak değerlendirme yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde çeneye yakın kısımlarda oluşan kırılmalar değerlendirmeye alınmamıştır. Çekme testi sonunda çeşitli numunelerin görünümü Şekil 4.1'de verilmiştir. Numuneler yumuşak bir yapıda olmalarına rağmen gevrek kırılma gösterdikleri gözlemlenmiştir. Uygun olmayan ve değerlendirmeye alınmayan kırılma gösteren deneylere dair görüntüler kırmızı daire ile belirtilmiştir.



Şekil 4. 1: Çekme testi sonrası numuneler; a. flex, b. vflex, c. 85-3, d. v85-3, e. 85-6, f. v85-6, g. 85-9, h. v85-9, i. 120-3, j. v120-3, k. 120-6, l. v120-6, m. 120-9, n. v120-9.



Şekil 4. 2: Numunelerin ortalama çekme dayanımları.

Deneyler sonucunda elde edilen verilere göre, en fazla çekme dayanımı ortalama olarak 2,08 civarında olan flex epoksi numunelerinde gerçekleşmiştir. Sonraki en yüksek dayanım, ortalama olarak 1,62 civarında gerçekleşen 120-3 kodlu numunelerde gerçekleştiği görülmüştür. Vakumlu flex epoksi numunelerin çekme dayanım değerlerinin, 0,05 farkla v85-3, v85-9 ve v120-6 numuneleriyle aynı değerlerde olduğu buradan da vakum etkisindeki numunelerin ortalama olarak aynı değerlerde dayanım gösterdikleri söylenebilir. 85-6 ve 85-9 kodlu numunelerin ortalama çekme dayanımlarının birebir aynı ve 0,02 farkla v85-6 kodlu numunelerin de eş değerde dayanım gösterdiği, buradan da genel olarak bakıldığında, 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesinin gramajı fark etmeksizin ortalama olarak aynı değerlerde çekme dayanımı gösterdiği gözlemlenmiştir.

120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde 85 MPa dayanıma sahip numunelere oranla daha az çekme dayanımı görülmüştür. Genel olarak değerlendirildiğinde ise, katkı maddesi içeren numuneler flex epoksiye göre çekme dayanımında düşüşe neden olmuştur.

Dul ve arkadaşları, Sezer ve arkadaşları gibi vb. çalışmalarda katkı maddesi içeren numunelerde çekme dayanımı değerlerinin arttığını görmüş olsalar bile, Herrera-Franco ve Valadez- Ganzalez (2003), Chen ve ark. (2006), Chacon ve arkadaşları, Evlen ve arkadaşları gibi vb. çalışmalarda katkı maddesi içeren numunelerde çekme dayanımlarında bu çalışmada da olduğu gibi azalma gösterdikleri görülmüştür.

4.1.1 Vakumlanmamış numunelerin çekme dayanımı

Deneyler sonucunda, en fazla çekme dayanıma sahip numunelerin flex epoksi numuneler olduğu, 120-3 kodlu numunelerin flex epoksiden sonra en fazla dayanıma sahip olduğu görülmüştür. 120-9 kodlu numunelerin ise en düşük çekme dayanımına sahip oldukları görülmüştür. Buradan da, 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesinde, takviye mitarı arttıkça çekme dayanımında artış olurken, 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesinde, takviye miktarındaki artışın tersine, çekme dayanımında azalmaya neden olduğu görülmüştür (Şekil 4.3).



Vakumlanmış numunelerin çekme dayanımı

4.1.2

Vakumlama etkisinin genel olarak numunelerin çekme dayanımını, vakumlanmamış hallerine göre daha düşük değerlerde gerçekleşmesine neden olduğu görülmüştür. Özellikle flex epoksi numunelerinin çekme dayanımlarında vakumlanmış hallerinin ortalama olarak 0,73 oranında daha az çıkmasına neden olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca, vakumlanmamış numunelerde katkı maddesi içeren numunelerin flex epoksi numunelerinden daha düşük değerde çekme dayanımına sahip olurlar iken, vakumlanmış numunelerde, özellikle v85-6 kodlu numunelerin ve v120-3 kodlu numunelerin flex epoksi numunelerinden daha yüksek değerde çekme dayanımına sahip oldukları görülmüştür (Şekil 4.4).



Şekil 4. 4: Vakum yapılan numunelerin ortalama çekme dayanımları.

4.2 Aşınma Testi Sonuçları

Hazırlanan her numune çeşidi için üçer tane olmak üzere, 3 m/s ilerleme hızında 60 s ve 120 s olacak şekilde 5, 10 ve 15 N'luk yük altında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Disk üzerine 600 kum yüzey pürüzlülüğüne sahip zımpara kağıdı uygun ölçülerde kesilerek yerleştirilmiştir. Deneyler sonucu ölçülen değerlerin ortalaması alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar sırasında flex epoksi yoğunluğu 1,05 g/cm³ iken, takviye olarak kullanılan termosetlerin yoğunlukları üretici firmaların değerleri olacak şekilde Bakelite PF 6507-9005-S1 için 1,6 g/cm³ ve Bakelite PF 1110-9005-S2 için 2,05 g/cm³ olarak alınmıştır.

Hacim kaybı, aşınma deneylerinin karakterize edilmesinde en yaygın olarak kullanılan parametrelerden biridir. Hacim kaybı (cm³) Eşitlik 1'de verildiği gibi, kütle kaybının (g) yoğunluğa (g/cm³) oranlanması ile bulunmaktadır.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \tag{1}$$

Özgül aşınma oranı (SWR - Specific Wear Rate) ise Eşitlik 2'de verildiği gibi hacim kaybının, yük (N) ve yol (m) ile çarpımına bölünmesi ile bulunur (Erdoğdu ve ark., 2021).

$$SWR = \frac{\Delta V}{P_{XL}} \tag{2}$$

4.2.1 Takviye Durumuna Göre Vakumlamanın Aşınmaya Etkisi

4.2.1.1 Takviyesiz Flex epoksi

Deneyler sonucunda takviyesiz flex epoksiye ait verilerle 180 m'lik aşınma mesafesi için Şekil 4.5 ve 360 m aşınma mesafesi için Şekil 4.6'da verilen grafikler oluşturulmuştur. Şekil 4.6'ya göre, numunelere uygulanan yük arttıkça, kütle kayıplarınında beklenildiği üzere arttığı görülmüştür. Ayrıca vakumlamanın numuneler üzerinde olumsuz yönde etki göstererek kütle kayıplarında artışa neden olduğu görülmüştür. Numuneler içinde bulunan hava kabarcıklarının, numuneler üzerinde olumlu bir etki sağladığı söylenebilir.



Şekil 4. 5: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle kaybı grafiği.

Şekil 4.6' ya göre, 360 m aşınma mesafesinde de numunelere uygulanan yük arttıkça, kütle kayıplarınında arrtış görülmüştür. 180 m aşınma mesafesinde de olduğu gibi vakumlama numunelerin dayanımına olumlu yönde etki göstermiştir.



Şekil 4. 6: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle kaybı grafiği.

Aşınma mesafesi arttınca 10 N yük uygulanan numunelerde kütle kaybı ortalama olarak 2 kat, 15 N yük uygulanan numunelerde ise ortalama olarak 3 kat artış olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak 15 N yük uygulanan numunelerde vakumlama etkisinin neredeyse 2 kat fazla kütle kaybına neden olduğu görülmüştür (Şekil 4.7).



Şekil 4. 7: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim kaybı grafiği.

Flex epoksi numunelerin hacim kayıpları da kütle kayıplarında olduğu gibi yükle doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. 15 N yük altında flex epokside gerçekleşen hacim kaybının, 10 N yük altında vakumlu flex epokside gerçekleşen hacim kaybına eş değer olduğu görülmüştür. Şekil 4.8' e göre, 3 m/s hızla 120 s boyunca aşınma yapıldığında numunelere uygulanan yük arttıkça, hacim

kayıplarında kütle kayıplarıyla aynı oranda olacak şekilde artış görüldüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 8: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim kaybı grafiği.

Aşınma mesafesi arttınca 10 N yük uygulanan numunelerde hacim kaybı ortalama olarak iki kat, 15 N yük uygulanan numunelerde ise ortalama olarak üç kat artış olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak 15 N yük uygulanan numunlerde vakumla etkisinin neredeyse iki kat fazla hacim kaybına neden olduğu görülmüştür (Şekil 4.9).



Şekil 4. 9: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında SWR değeri grafiği.

Yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda oluşan grafiğe bakıldığında, flex epoksi maddeden üretilen numuneler vakumlu da olsa vakumsuz da olsa en fazla SWR değeri 10 N yük altında gerçekleştirilen aşınma sonucunda oluşmuştur (Şekil 4.10).



Şekil 4. 10: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında SWR değeri grafiği.

Yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda oluşan grafiğe bakıldığında, deneyin uygulama mesafesinin artması sonucunda SWR değeri en fazla olan değerin 15 N yük atında aşınma yapılan numunelerde gerçekleştiği görülmüştür.

Her iki mesafe içinde vakumlanmış numunelerin bütün yükler altında vakumlanmamış hallerinden fazla kütle kaybı ve hacim kaybı yaşadıkları dolayısıyla da SWR değerlerinin daha fazla çıktığı görülmüştür.

4.2.1.2 3 gram takviyeli numuneler

3 gram takviyeli numunelere ait verilerle 180 m aşınma mesafesi için oluşturulan grafik Şekil 4.11'de verilmiştir. 3 m/s hızla 60 s boyunca aşınma yapıldığında, katkı maddesi içeren numunelerde de flex epksilerde olduğu gibi yükün artmasıyla her birinde kütle kaybında artış yaşadıkları görülmüştür. Şekil 4.11'de görüldüğü üzere 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde vakumlama etkisinin her yük için doğru orantılı olacak şekilde artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren vakumlanmış numunelerde 120 MPa dayanıma sahipler gibi kütle kaybı yaşamasına neden olurken vakumlanmamış hallerinde 10 N yük altında gerçekleşen aşınma deneylerinde diğer numunelere orala daha fazla kütle kaybı yaşadığı görülmüştür.



Şekil 4. 11: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle kaybı grafiği.

3 gram takviyeli numunelere ait verilerle 360 m aşınma mesafesi için oluşturulan grafik Şekil 4.12'de verilmiştir. Aşınma mesafesi arttığında, katkı maddesi ve aynı şekilde vakumlama durumu fark etmeksizin, 5N ve 10 N yük uygulanan numunelerde hemen hemen aynı oranda kütle kaybı gerçekleştiği görülmüştür. 15 N yük uygulanan numunelerde ise 5 ve 10 N yük uygulanan numunelere oranla yaklaşık olarak 3,5 kat daha fazla kütle kaybına uğradıkları görülmüştür.



Şekil 4. 12: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle kaybı grafiği.

Şekil 4.13'de verilen 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim kaybı grafiği incelendiğinde, numunelerde gerçekleşen hacim kayıplarının aynı mesafede gerçekleşen kütle kayıplarıyla orantılı hacim kaybı yaşadıkları görülmüştür. 85-3 kodlu numunelerin 10 N yük altındaki hacim kayıpları, kütle kayıplarında da olduğu gibi 15 N yük altında gerçekleşen hacim kayıplarına çok yakın değerde olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 13: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim kaybı grafiği.

85-3 kodlu numunelerde 10 N'luk yük altında 5 N yük uygulandığı duruma göre yaklaşık olarak 4 kat artan hacim kaybı oluştuğu, ancak vakumlama yapılması durumunda bu artışın yaklaşık 2 kata düştüğü bulunmuştur. 15 N yük uygulandığı durumda da 85-3 kodlu numunelerin vakumlanma durumunda hacim kaybının vakumsuz haldekinden daha düşük olduğu bulunmuştur. 120-3 kodlu numunelerde ise vakumlama ile hacim kaybı miktarının azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte 120-3 kodlu numunelerde de 15 N'luk yük durumunda vakumlama hacim kaybını çok az bir miktarda da olsa azaltmıştır. Kısa kayma mesafelerinde takviye dayanımının artışının hacim kaybı üzerinde olumlu etkisi olduğu gözlenmiştir.

Şekil 4. 14'de verilen 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim kaybı grafiği incelendiğinde, en fazla hacim kayıplarının katkı maddesinin cinsi fark etmeksizin 15 N yük altında gerçekleştiği görülmüştür. Bunların yanı sıra, her iki katkı maddesinde de vakumlanan numunelerde 5 ve 10 N yük altında gerçekleşen deney sonucunda hacim kayıplarının aynı değerlerde olduğu görülmüştür. 85 MPa dayanıma sahip katkı maddeleri içeren numunelerde hacim kaybının, 120 MPa

dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerden daha fazla olduğu bulunmuştur. Bunun katkı maddesi olarak kullanılan numunelerin dayanım değeri arttıkça eklendiği malzemenin dayanımının artmasına bağlı olduğu söylenebilir. Ayrıca, yükün 15 N'a çıkarılması durumunda hacim kaybının ciddi oranda arttığı görülmüştür. 85-3 ve v85-3 kodlu numunelerde bu artış 3 katı bulurken, 120-3 ve v120-3 kodlu numunelerde artış oranının daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Takviye malzemenin mukavemetindeki artışın daha yüksek kuvvete maruz kalma durumunda olumlu etkisinin arttığı söylenebilir.



Şekil 4. 14: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim kaybı grafiği.

Yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda oluşan SWR değerinin 180 m aşınma mesafesindeki grafiği incelenirse (Şekil 4.15), 85-3 kodlu numunelerin 10 N yük altında 15 N yük altındakine oranla daha yüksek özgül aşınma oranına sahip oldukları görülmüştür. Bununla birlikte, 120-3 ve v120-3 kodlu numunelerde en düşük özgül aşınma oranının 10 N yük altında gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4. 15: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında SWR değeri grafiği.

Yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda oluşan SWR değerinin 360 m aşınma mesafesindeki grafiğinde (Şekil 4.16), 10 N yük altında gerçekleşen deneylerde normal sonuçlar dışında bir sapma oluştuğu ve değerlerin 5 ve 15 N ykler altında normal olduğu 10 N yük altında düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 16: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında SWR değeri grafiği.

4.2.1.3 6 gram takviyeli numuneler

180 metre kayma mesafesinde 6 gram takviyeli numunelere ait kütle kaybı değerleri Şekil 4.17'de verilmiştir. 60 s boyunca 3 m/s hızla aşınma yapıldığında,

flex epoksinin vakumlu halde en fazla 0,09 değerinde, vakumsuz halde en fazla 0,07 değerinde kütle kaybı yaşarken, 6'şar gram katkı maddeleri eklenen numunelerde en fazla vakumsuz halde 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde olduğu ve 0,06 değerininde altında kütle kaybı yaşandığı görülmüştür. Nispeten vakumlu halinde bu değerin 0,05 değerininde altında olacak şekilde kütle kaybı yaşandığı görülmüştür. Eklenen bir diğer katkı maddesi olan ve dayanımı daha yüksek olan 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde ise bu değerlerin daha da azaldığı ve 0,03 değerine kadar düştüğü görülmüştür. Bu durumdan yola çıkarak, flex epoksi içine eklenen katkı maddelerinin, aşınma miktarında azalmalara neden olduğu söylenebilir.



Şekil 4. 17: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle kaybı grafiği.

360 metre kayma mesafesinde 6 gram takviyeli numunelere ait kütle kaybı değerleri Şekil 4.18'de verilmiştir. 15 N yük altında yapılan aşınma değerlerinde 5 ve 10 N yük altında yapılanlara göre, 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerin vakumsuz halde ortalama olarak 6 kat, vakumlu halde ortalama olarak 4 kat olacak şekilde daha fazla kütle kaybı yaşadıkları görülmüştür. 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde ise vakumsuz halde ortalama olarak 3 kat, vakumlu halde ortalama olarak 4 kat olacak şekilde daha fazla kütle kaybı yaşadıkları görülmüştür. Tüm numuneler için 5 ve 10 N yük altında yaklaşık olarak yakın değerde kayıp oluştuğu da görülmüştür.



Şekil 4. 18: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle kaybı grafiği.

6 gram takviyeli numunelere ait hacim kaybı değerleri 180 metre kayma mesafesi için Şekil 4.19'da, 360 metre kayma mesafesi için ise Şekil 4.20'de verilmiştir. Şekil 4.19'a göre, flex epoksinin vakumlu halde en fazla 0,09 değerinde, vakumsuz halde en fazla 0,07 değerinde hacim kaybı yaşarken; 6'şar gram katkı maddeleri eklenen numunelerde en fazla vakumsuz halde 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numuneler de olduğu ve 0,05 değerininde altında kütle kaybı yaşandığı görülmüştür. Eklenen bir diğer katkı maddesi olan ve dayanımı daha yüksek olan 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde ise bu değerlerin daha da azaldığı ve 0,03 değerinin altına kadar düştüğü görülmüştür. Bu durumdan yola çıkarak, flex epoksi içine eklenen katkı maddelerinin, aşınma miktarında olduğu gibi hacim kaybında da azalmalara neden olduğu söylenebilir.





120 s boyunca 3 m/s hızla aşınma yapıldığında, 60 s boyunca yapılan aşınma sonucundan farklı olarak 15 N yük altında yapılan aşınma değerlerinde 5 ve 10 N yük altında yapılan aşınma değerlerinden, 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerin vakumsuz halde ortalama olarak 5 kat, vakumlu halde ortalama olarak 3,5 kat olacak şekilde, 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numuneler de ise vakumsuz halde ortalama olarak 2,5 kat, vakumlu halde ortalama olarak 3 kat olacak şekilde daha fazla hacim kaybı yaşadıkları görülmüştür. Bunun yanı sıra, 120-6 kodlu numuneler dışındaki bütün numunelerde 5 ve 10 N yük altında gerçekleşen hacim kayıpları eş değerlerde olduğu görülmüştür (Şekil 4.20).



Şekil 4. 20: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim kaybı grafiği.

Yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda elde edilen SWR değerleri 180 m aşınma mesafesi için Şekil 4.21'de 360 m aşınma mesafesi için ise Şekil 4.22'de verilmiştir. Şeki 4.21 incelendiğinde, flex epokside en fazla SWR değeri 10 N yük altında 0,035 değeriyle vakumlu flex de gerçekleşirken, 6 gram katkı maddesi bulunan numunelerden en fazla SWR değeri oluşan numunelerin 0,018 değeriyle 85-3 kodlu numuneler de gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumda, katkı maddesi içeren numunelerin SWR değerlerinin en fazla olduğu durumda bile sade flex epoksi maddesinden oluşan numunelerin SWR değerinin yarısı kadar olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra en düşük SWR değerinin 120-6 kodlu numunelerde gerçekleştiği ve flex epoksi numunelerden ortalama olarak 3 kat daha az olduğu ve yine 10 N yük altında gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 4. 21: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında SWR değeri grafiği.

Şekil 4.22 incelendiğinde, 10 N yük altında gerçekleşen SWR değerlerinin 5 ve 10 N yük altındakilerden daha az değerlerde olduğu ve bütün numunelerde ortalama olarak aynı değerlerde çıktığı görülmüştür. Bunların yanı sıra, SWR değerleri, 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde 15 N yük altında, 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde ise 5 N yük altında yüksek değerlerde çıktıkları gözlemlenmiştir. Flex epoksi maddelerin en yüksek SWR değerleri 0,05 değeriyle vakumlu halinde oluşmuşken, 6 gram katkı maddesi içeren numunelerde en yüksek SWR değeri, 0,36 kat daha az olacak şekilde 0,018 ile 85-6 kodlu numunelerde gerçekleştiği ve en yüksek değerde olanda bile azalma gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 4. 22: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında SWR değeri grafiği.

4.2.1.4 9 gram takviyeli numuneler

9 gram takviyeli numunelere ait hacim kaybı değerleri 180 metre kayma mesafesi için Şekil 4.23'de, 360 metre kayma mesafesi için ise Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4. 23: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle kaybı grafiği.

9 gram katkı maddesi içeren numunelerde 3 m/s hızla 60 s aşınma yapıldığında, 15 N yük altında vakumlu flex epoksi malzemede 0,09 değerinde kütle kaybı yaşanırken; 9'ar gram katkı maddesi içeren numunelerde bu değerin en fazla 0,058 civarında olup v85-9 kodlu numunelerde gerçekleştiği ve 0,03 değerinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Bu değerin, 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde 0,04 değerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4. 24: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında kütle kaybı grafiği.

3 m/s hızla, 9 gram katkı maddesi içeren numunelerde, 120 s aşınma yapıldığında, 60 s aşınma yapılan ve 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde yaklaşık 0,06 değerinde gerçekleşen kütle kayıplarının 0,08 değerine çıktığı görülmüştür. 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde ise 0,04 değerine yakın olan kütle kayıplarının vakumlu numunelerde 0,07 değerinin üstünde, vakumsuz numunelerde ise 0,06 değerine çıktığı görülmüştür. Buradan uygulanan süre artıkça vakumlama etkisinde olan numunelerde daha fazla kütle kaybı yaşandığı görülmüştür (Şekil 4.24).

180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim kaybı grafiği incelendiğinde, katkı maddesi içeren numunelerde kütle kaybında olduğu gibi hacim kaybında da düşüş olduğu görülmüştür. Flex epoksi de hacim kaydı 0,08 civarında gerçekleşirken, buna en yakın değer 0,05 civarında gerçekleşen hacim kaybıyla 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde görülmüştür. En yüksek hacim kaybına sahip v85-9 kodlu numunelerde bile 1,6 kat azalma gerçekleştiği görülmüştür. Bu azalma oranı 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde ise 2,5 kata kadar çıktığı görülmüştür (Şekil 4.25).



Şekil 4. 25: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim kaybı grafiği.

Şekil 4.26'da verilen 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim kaybı grafiği incelendiğinde, 3 ve 6 gram katkı maddesi içeren numunelerde de olduğu gibi 9 gram katkı maddesi içeren numunelerde de 5 ve 10 N yük altında gerçekleşen hacim kayıpları eşit seviyelerde gerçekleşirken 15 N yük altında 85 MPa katkı maddesi içeren numunelerde, diğer yüklerin yaklaşık olarak 3,5 kat daha fazla, 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde ise ortalama olarak 2,75 kat daha fazla hacim kaybı yaşandığı görülmüştür. Flex epokside gerçekleşen hacim kayıplarıyla karşılaştırıldığında ise, 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde ortalama olarak 3,85 kat, 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde ortalama olarak 3,85 kat, 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde ortalama olarak 3,85 kat, 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde ortalama olarak 5,4 kat olacak şekilde azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 26: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında hacim kaybı grafiği.

9 gram takviyeli numunelerin farklı yükler altında 180 m kayma mesafesinde SWR değerleri Şekil 4.27'de, 360 m kayma mesafesinde Şekil 4.28'de verilmiştir. Şekil 4.27'de verilen grafik incelendiğinde, SWR değerlerinin yükle orantılı olarak arttığı görülmüştür. İstisna olarak 120 kodlu numunelerde 10 N yük altında SWR değerinin 5 N yük altındaki numunelerden daha düşük olduğu görülmüştür. 85 kodlu numunelerin SWR değerlerinin 5 N ve 10 N yükler için yakın değerlerde olduğu ancak 15 N'luk yük altında bir artışa neden olurken; 120 kodlu numunelerin SWR değerlerinin daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

360 m aşınma mesafesinde, farklı yükler altında, Şekil 4.28'de verilen SWR değeri grafiği incelendiğinde, 10 N yük altında gerçekleşen SWR değerlerinin, 3 ve 6 gram katkı maddesi içeren numunelerde de olduğu gibi 5 ve 15 N yük altındaki değerlerinden az olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, sırasıyla 85-9 ve v85-9 numunelerin 15 N yük altındaki SWR değerleriyle, v120-9 kodlu numunelerin 5 N yük altındaki SWR değerlerine eşit değerlerde oldukları görülmüştür.



Şekil 4. 27: 180 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında SWR değeri grafiği.

Genel olarak bakıldığında ise, 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde en fazla SWR değeri 15 N yük altında gerçekleşen aşınma deneyleri sonucunda elde edilirken, 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde en fazla SWR değeri 5 N yük altında gerçekleşen aşınma deneyleri sonucunda elde edildiği görülmüştür. Son olarak, v85-9 kodlu numuneler ile 120-9 kodlu numunelerin 5 N yük altında gerçekleşen aşınma deneyleri sonucunda elde edilen SWR değerlerinin eş değerlerde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.28).



Şekil 4. 28: 360 m aşınma mesafesinde farklı yükler altında SWR değeri grafiği.

4.2.2 Yüke Göre Aşınma Testi Sonuçları

4.2.2.1 Kütle Kaybı

180 metre kayma mesafesinde elde edilen kütle kaybı değerleri 5 N yük için Şekil 4.29'da, 10 N için Şekil 4.30'da 15 N için ise Şekil 4.31'de verilmiştir. Şekil 4.29'a göre, 5 N'luk yük altında 3 m/s hızla 60 s boyunca aşınma yapıldığında, en çok kütle kaybının vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde olduğu ve ona en yakın kütle kaybının flex epokside olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 29: 180 m kayma mesafesinde 5 N'luk yük altında kütle kaybı.

Şekil 4.30'a göre, en çok kütle kaybının yine vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde olduğu ve ona en yakın kütle kaybının flex epokside gerçekleştiği görülmüştür. Bunun yanı sıra katkı maddeleri bulunan numunelerde kütle kaybının neredeyse yarıya düştüğü, dolayısıyla aşınma dayanımının arttığı görülmüştür.



Şekil 4. 30: 180 m kayma mesafesinde 10 N'luk yük altında kütle kaybı.

15 N'luk yük altında 3 m/s hızla 60 s boyunca aşınma yapıldığında, en çok kütle kaybının vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde olduğu ve ona en yakın kütle kaybının v85-3 şeklinde kodlanmış numunelerde olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.31).



Şekil 4. 31: 180 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında kütle kaybı.

Genel olarak bakıldığında ise, 60 s boyunca uygulanan aşınma deneylerine göre katkı maddelerinin genel bir dayanım sağladığı ve Bakelite PF 1110-9005-S2 adı altındaki katkı maddesinin Bakelite PF 6507-9005-S1 adı altındaki katkı maddesine oranla daha fazla dayanım sağladığı ve kütle kayıplarının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ama buna rağmen katkı maddelerinin gramları arttıkça kütle kayıplarının da arttığı gözlemlenmiştir.

360 metre kayma mesafesinde elde edilen kütle kaybı değerleri 5 N yük için Şekil 4.32'de, 10 N için Şekil 4.33'de 15 N için ise Şekil 4.34'te verilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen Şekil 4.32'ye göre, 5 N'luk yük altında 3 m/s hızla 120 s boyunca aşınma yapıldığında, en çok kütle kaybının 60 s uygulandığındaki gibi vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde olduğu ve ona en yakın kütle kaybının flex epoksiden üretilen numunelerde olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak, bu deneyde v85-3 kodlu numunelerin yine kütle kaybında diğer numunelere göre fazla olduğu ama bu sefer, v120-9 kodlu numunelerinde v85-3 kodlu numuneler kadar kütle kaybı yaşadığı ve bunlara en yakın kütle kaybının, v120-6 kodlu numuneler de yaşandığı görülmüştür.



Şekil 4. 32: 360 m kayma mesafesinde 5 N'luk yük altında kütle kaybı.

10 N'luk yük altında 360 m kayma mesafesinde aşınma yapıldığında, en çok kütle kaybının yine vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde olduğu ve ona en yakın kütle kaybının flex epokside gerçekleştiği görülmüştür. Bunun yanı sıra katkı maddeleri bulunan numunelerde kütle kaybının neredeyse dörtte birine düştüğü dolayısıyla dayanımının arttığı görülmüştür. 85-3 kodlu numunelerin, flex epoksilerden sonra en fazla kütle kaybı yaşadığı gözlemlenmiştir. 120 MPa dayanıma sahip termoset malzemenin 6 ve 9 gram olacak şekilde eklenmiş hallerinin kütle kaybı nerdeyse aynı olup 85 MPa dayanıma sahip termoset malzemenin 3 gram olacak şekilde eklenmiş hallerinin kütle kaybına çok yakın olduğu görülmüştür (Şekil 4.33).



Şekil 4. 33: 360 m kayma mesafesinde 10 N'luk yük altında kütle kaybı.

15 N'luk yük altında 360 m kayma mesafesinde aşınma yapıldığında, flex epoksilerin saf hallerinin en fala kütle kaybı yaşadığı ve yine onlara en yakın kütle kaybının v85-3 kod adlı numunelerde olduğu ve bu numunelerden ortalama olarak 0,005 kadar altında kütle kaybı yaşayarak 85-3 kodlu numunelerin vakumlanmış hallerine eşlik ettiği görülmüştür. Ayrıca v120-3 kodlu numunelerinde 85 MPa dayanıma sahip olan katkı maddeleriyle üretilen numunelere eş değer şekilde kütle kaybı yaşadığı görülmüştür (Şekil 4.34).


Şekil 4. 34: 360 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında kütle kaybı.

Kütle kayıplarının katkı maddeleri içeren numunelerde daha az olduğu gözlenmiştir. Katkı olarak kullanılan termoset malzemelerinin genel bir dayanım sağladığı ve ham hallerindeki dayanım değeri arttıkça içine eklendikleri epoksi malzemenin kütle kayıplarının azalacağı yönünde yorumlanabilir.

4.2.2.2 Hacim Kaybı

180 metre kayma mesafesinde elde edilen hacim kaybı değerleri 5 N yük için Şekil 4.35'de, 10 N için Şekil 4.36'da 15 N için ise Şekil 4.37'de verilmiştir.



Şekil 4. 35: 180 m kayma mesafesinde 5 N'luk yük altında hacim kaybı.

5 N'luk yük altında 180 m kayma mesafesinde aşınma yapıldığında, en çok hacim kaybının yine vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde olduğu ve ona en yakın hacim kaybının flex epokside gerçekleştiği görülmüştür. Bu değerlerde yapılan deneylerde farklılık olarak vakum etkisi çok etkili olamayıp, 85-3 kodlu numunelerin diğer katkı maddeli numunelere oranla neredeyse iki kat daha fazla hacim kaybı yaşadıkları görülmüştür (Şekil 4.35).

10 N'luk yük altında 3 m/s hızla 60 s boyunca aşınma yapıldığında, en çok hacim kaybının vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde olduğu ve ona en yakın hacim kaybının yine flex epokside olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak Bakelite PF 6507-9005-S1 (85 MPa) katkı maddeleriyle hazırlanan numunelerdeki hacim kayıplarının hemen hemen aynı miktarlarda olduğu ve Bakelite PF 1110-9005-S2 (120 MPa) katkı maddeleriyle hazırlanan numunelerden fazla hacim kaybı yaşandığı gözlenmiştir. Bakelite PF 1110-9005-S2 katkı maddeleriyle hazırlanan numunelerde aşınma dayanımının arttığı söylenebilir (Şekil 4.36).



Şekil 4. 36: 180 m kayma mesafesinde 10 N'luk yük altında hacim kaybı.

15 N'luk yük altında 3 m/s hızla 60 s uygulanan aşınma işlemi sonucunda, en fazla hacim kaybının kütle kaybında da olduğu gibi vakumlu flex epoksi yani vflex'te gerçekleştiği görülmüştür. Buna en yakın hacim kaybı v85-3 kodlu numunelerde gerçekleştiği, Bakelite PF 1110-9005-S2 katkı maddelerine sahip numunelerde daha az ve birbirlerine yakın hacim kaybı gerçekleştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.37).



Şekil 4. 37: 180 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında hacim kaybı.

360 metre kayma mesafesinde elde edilen hacim kaybı değerleri 5 N yük için Şekil 4.38'de, 10 N için Şekil 4.39'da 15 N için ise Şekil 4.40'da verilmiştir. Şekil 4.38'e göre 5 N'luk yük altında 3 m/s hızla 120 s boyunca aşınma yapıldığında, en çok hacim kaybının, 60 s uygulandığındaki gibi vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde olduğu ve ona en yakın hacim kaybının flex epoksiden üretilen numunelerde olduğu gözlenmiştir. Katkı maddeli numunelerdeki hacim kayıpları aşağı yukarı aynı miktarlarda olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 38: 360 m kayma mesafesinde 5 N'luk yük altında hacim kaybı.

10 N'luk yük altında 360 mesafesinde aşınma yapıldığında, en çok hacim kaybının yine vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde olduğu ve ona en yakın hacim kaybının flex epokside gerçekleştiği görülmüştür. Bunun yanı sıra katkı

maddeleri bulunan numunelerde kütle kayıplarına istinaden hacim kaybının neredeyse dörtte birine düştüğü dolayısıyla dayanımının arttığı görülmüştür (Şekil 4.39).



Şekil 4. 39: 360 m kayma mesafesinde 10 N'luk yük altında hacim kaybı.

15 N'luk yük altında 360 m kayma mesafesinde aşınma yapıldığında, hacim kayıplarının kütle kayıplarına bağlı olarak, katkı maddeleri içeren numunelerde yine daha az olduğu ve bunlar içinde en fazla hacim kayıplarının cinsi ne olursa olsun, 3'er gram katkı maddesi içeren ve vakumlanmış numunelerde gerçekleştiği gözlenmiştir. Bunlara ek olarak en yakın hacim kaybının v85-3 kod adlı numunelerde olduğu ve 85-3 kod adlı numunelerle aralarındaki hacim kayıplarının yaklaşık olarak 0,005 kadar olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.40).



Şekil 4. 40: 360 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında hacim kaybı.

Buradan yola çıkarak eklenen termoset malzemelerin epoksinin hem kütle kaybında hem de dolayısıyla hacim kaybında azalmalar yaşamasına neden olduğu söylenebilir.

4.2.2.3 SWR Değeri

180 metre kayma mesafesinde elde edilen SWR değerleri 5 N yük için Şekil 4.41'de, 10 N için Şekil 4.42'de 15 N için ise Şekil 4.43'de verilmiştir.

Deneyler ve hesaplamalar sonucunda elde edilen grafiğe göre, 5 N'luk yük altında 3 m/s hızla 60 s boyunca aşınma yapıldığında, SWR değerinde en çok artışın vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde olduğu ve ona en yakın SWR değerinin v85-3 kodlu numunelerde olduğu gözlenmiştir. Flex epoksinin, kütle ve hacim kaybı vakumlu flexden sonra en yüksek olmasına rağmen, SWR değerinde özellikle 85 MPa dayanımlı Bakelite PF 6507-9005-S1 termoset katkı maddesinden oluşan numunelerden düşük değerde çıktığı ama 120 MPa dayanımındaki Bakelite PF 1110-9005-S2 termoset katkı maddesinden oluşan numunelerden biraz da olsa fazla değerde çıktığı gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak, 120 MPa dayanımdaki PF 1110-9005-S2 termoset katkı maddesinin oranı ne olursa olsun vakumlama işlemi sonucunda SWR değerlerinin aynı değerde çıktıkları görülmüştür (Şekil 4.41).



Şekil 4. 41: 180 m kayma mesafesinde 5 N'luk yük altında SWR.

10 N'luk yük altında 180 m kayma mesafesinde aşınma yapıldığında, en çok SWR değerinin yine vakumlu flex epoksiden üretilen numunelerde olduğu ve ona en yakın kütle kaybının flex epokside gerçekleştiği görülmüştür. Bunun yanı sıra katkı maddeleri bulunan numunelerde kütle ve hacim kaybıyla doğru orantılı olarak neredeyse yarıya düştüğü görülmüştür. Bu verilerle yapılan deneylerde, farklılık olarak, 85-3 kodlu numunelerin diğer katkı maddeli numunelere oranla neredeyse 2 kat daha fazla kütle ve hacim kaybı yaşadıkları dolayısıyla da SWR değerlerinin de diğer katkı maddeli numunelere göre daha fazla olduğu ve epoksilerin SWR değerlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.42).



Şekil 4. 42: 180 m kayma mesafesinde 10 N'luk yük altında SWR.

180 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında aşınma yapıldığında, SWR değerinin en fazla olduğu, yine 5 ve 10 N'luk yük altında da olduğu gibi vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde olduğu ve ona en yakın SWR değerinin yine flex epokside olduğu gözlemlenmiştir. Sırasıyla 85-6, 85-9 ve v85-3 şeklinde kodlanan ve Bakelite PF 6507-9005-S1 termoset katkı maddesiyle elde edilen numunelerin SWR değerlerinin aynı değerde olduğu ve Bakelite PF 1110-9005-S2 termoset katkı maddesiyle elde edilen numunelerden daha fazla SWR değerlerine sahip oldukları görülmüştür (Şekil 4.43).



Şekil 4. 43: 180 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında SWR.

Genel olarak bakıldığında ise, 3 m/s hızda 60 s boyunca uygulanan aşınma deneylerine göre, katkı maddelerinin genel bir dayanım sağladığı ve Bakelite PF 1110-9005-S2 adı altındaki katkı maddesinin Bakelite PF 6507-9005-S1 adı altındaki katkı maddesine oranla daha fazla dayanım sağladığı görülmüştür. Kütle kayıplarının dolayısıyla da hacim ve SWR değerlerinin daha az olduğu gözlemlenmiştir.

360 metre kayma mesafesinde elde edilen SWR değerleri 5 N yük için Şekil 4.44'de, 10 N için Şekil 4.45'de 15 N için ise Şekil 4.46'da verilmiştir. Şekil 4.44'e göre, 5 N'luk yük altında 3 m/s hızla 120 s boyunca aşınma yapıldığında, SWR değerinin en fazla olduğu numuneler, 60 s uygulandığındaki gibi vakumlu flex epoksiden üretilen numunelerde olduğu ve ona en yakın SWR değerinin flex epoksiden üretilen numunelerde olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak bu deneyde, v85-3 kodlu numunelerin SWR değerleri diğer numunelere göre fazla olduğu ama bu sefer, v120-6 kodlu numuneler ile v120-9 kodlu numunelerinde v85-3 kodlu numunelere çok yakın SWR değerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 44: 360 m kayma mesafesinde 5 N'luk yük altında SWR.

10 N'luk yük altında 360 m kayma mesafesinde aşınma yapıldığında, SWR değerinin vakumlu flex epoksiden üretilen numunulerde en fazla olduğu ve ona en yakın kütle kaybının flex epokside gerçekleştiği görülmüştür. Bunun yanı sıra katkı maddeleri bulunan numunelerde kütle kaybının neredeyse dörtte birine düştüğü, dolayısıyla da hesaplamalar sonucunda hacim kayıplarında ve SWR değerlerinde de aynı oranda düşüş olduğu görülmüştür. 85-3 kodlu numunelerin, flex epoksilerden sonra en fazla SWR değerinde olduğu hesaplanmıştır (Şekil 4.45).



Şekil 4. 45: 360 m kayma mesafesinde 10 N'luk yük altında SWR.

360 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında aşınma yapıldığında, SWR değerlerinin katkı maddeleri içeren numunelerde yine daha az olduğu ve bunlar içinde vakumlanmış ve 3'er gram katkı maddesi içeren numunelerde en yüksek

SWR değerleri gerçekleştiği gözlenmiştir. Bunlara ek olarak yine en yakın SWR değerinin v85-3 kod adlı numunelerde olduğu ve onu takip eden SWR değerinin 85-3 kodlu numuneler olduğu ve v120-3 kodlu numunelerin SWR değerlerinin 85-3 kodlu numunelere çok çok yakın olduğu görülmüştür (Şekil 4.46).



Şekil 4. 46: 360 m kayma mesafesinde 15 N'luk yük altında SWR.

4.2.3 Aşınmanın Tüm Takviye Durumları İçin Değerlendirilmesi

180 m kayma mesafesinde elde edilen aşınma miktarları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.47'de verilmiştir.



Şekil 4. 47: 180 m kayma mesafesinde aşınmadaki kütle kaybı.

Tüm takviye durumlarına göre aşınma değerlendirilmesine bakılırsa, genel olarak, uygulanan yükün artmasıyla birlikte aşınma miktarlarının da arttığı görülmüştür. Katkı maddelerinin gözle görülür bir azalmaya neden olduğu da gözlemlenmiştir. 120 MPa değerine sahip katkı maddelerinin flex epoksiye oranla aşınma miktarlarını ortalama olarak yarı değerine düşürdüğü gözlemlenmiştir. Buradan da katkı maddesinin dayanım değerinin daha yüksek olmasının aşınma değerlerinde düşüşe neden olacağı görülmüştür.

360 m kayma mesafesinde elde edilen aşınma miktarları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.48'de verilmiştir.



Şekil 4. 48: 360 m kayma mesafesinde aşınmadaki kütle kaybı.

360 m kayma mesafesinde tüm takviye durumlarına göre aşınma değerlendirilmesine bakılırsa, vakumlu fleks epoksinin 15 N yük altında gerçekleşen aşınma miktarı kaybı diğer numuneler ve yüklere göre neredeyse iki kat daha fazla gerçekleştiği görülmüştür. Bunun yanı sıra, genel olarak 15 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda gerçekleşen kütle kayıplarının, 5 ve 10 N yük altında gerçekleşen aşınma deneylerinden bariz olarak fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte 5 ve 10 N yük altında gerçekleşen kayıpların neredeyse aynı değerlerde olduğu görülmüştür. Ek olarak, flex numunelere özellikle de vakumlanmamış haline en yakın kütle kaybının katkı maddesinin cinsi fark etmeksizin vakumlanmış ve 3'er gram katkı maddesi içeren numunelerde 15 N yük altında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Asi, D. (2008) çalışmasında, aynı ortamda, elyaf yoğunluğunun değişmesi durumunda, örme cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aşınma performanslarında olumlu yönde etkiye neden olduklarını görmüştür. Chen ve ark. (2006), PTFE'nin eklenmesi, PA66/PPS karışımının aşınma miktarını büyük ölçüde azaltmıştır demişlerdir. Erdoğdu ve ark. (2021), GNP dolgusu yapmanın aşınma miktarında azalmaya neden olduklarını ve GNP dolgu miktarının %0,5 oranından %1 oranına çıkartılmanın daha iyi aşınma direnci sağladıklarını söylemişlerdir. Bu çalışmalar da göz önüne alındığında, yapılan çalışmada elde edilen verilerin literatürle uyumlu olduğu görülmüştür.

15 N yük altında test edilen numunelerin optik görüntüleri 50x olacak şekilde Şekil 4.49'da verilmiştir.

Görüntüler incelendiğinde, katkı maddesi içeren numunelerde yüzeye gelen katkı maddelerinde (daire içerisinde verilmiştir), aşınma izlerinin görüldüğü, buradan da katkı maddeleri sayesinde numunelerin, epoksi kısımlarının zarar görmesinin engellendiği görülmüştür. Ayrıca, 3 g katkı maddesi içeren numunelerde, katkı maddesinin dayanımı ne olursa olsun numune yüzeylerinde çok fazla partikül görülmediği ama buna rağmen aşınmayı azaltıcı etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Katkı maddeler matris içerisindeki oranı arttıkça, yumuşak yapıdaki epoksilerin yapısını sertleştirdiği ve böylelikle, aşınma esnasında olası sıvanma görülme etkisini azalttığı söylenebilir. 9 gram takviye içeren numunelerin takviye bölgelerinde aşınma izleri daha derin olarak gözlemlenmiştir. Aşınan takviye parçacıklar aşınmayı artıran bir sonuç ortaya koymuş ve dolayısıyla da aşınma izlerinin derinleşmesine yol açmıştır.



Şekil 4. 49: 15N yük altında aşınma işlemi sonucu elde edilen yüzey görüntüleri; a. flex, b. vflex, c. 85-3, d. 85-6, e. 85-9, f. v85-3, g. v85-6, h. v85-9, 1. 120-3, j. 120-6, k. 120-9, l. v120-3, m. v120-6, n. v120-9.

4.3 Sertlik Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada, Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan EN ISO 868 standartına uygun Tronic marka Shore D sertlik cihazı kullanılarak sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Malzemedeki uniformluk tam olarak sağlanamadığı ihtimali göz önünde bulundurularak, hazırlanan her numune çeşidinden iki farklı numune ve her numuneden çeşitli noktalardan olacak şekilde 3 farklı sertlik değeri okunmuştur. Genel görünümden çok fazla sapma gösteren değerler atılmış ve geriye kalan değerlerin ortalaması alınarak sertlik derecesi tayin edilmiştir. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı Shore D sertlik cihazı Şekil 4.50'de ve sertlik ölçüm sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4. 50: Shore D sertlik ölçüm cihazı.

Tablo 4. 2:	Sertlik	ölçüm	sonuçları	(Shore D).	
--------------------	---------	-------	-----------	------------	--

Numune	1	2	3	4	5	6	Ortalama
Flex	20	19	19	20	19	22	19,83
vflex	18	21	18	19	21	19	19,33
85-3	22	21	21	19	20	18	20,17
85-6	27	28	29	32	35	35	31
85-9	42	38	41	39	44	41	40,83
v85-3	23	23	25	26	28	29	25,67
v85-6	34	39	41	38	30	37	36,5
v85-9	37	34	32	37	46	30	36
120-3	23	22	25	37	40	35	30,33
120-6	32	34	34	30	30	33	32,17
120-9	44	46	40	44	44	45	43,83
v120-3	23	25	23	22	24	22	23,17
v120-6	45	55	50	50	54	45	49,83
v120-9	48	57	49	47	48	48	49,5

Ölçümlerin ortalaması sonucunda oluşturulan Şekil 4.51'de verilen grafiğe göre, v120-6 şeklinde kodlanan numunelerin sertliğinin, diğer numunelere göre daha fazla olduğu ancak v120-9 olarak kodlanan numunelerin de sertliklerinin buna çok yakın değerde olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, vakumlama yapılmasının numunelere ekstra sertlik özelliği kattığı görülmektedir.



Şekil 4. 51: Sertlik ölçüm sonuçları grafiği.

Sonuç olarak, epoksi malzemesine hangi katkı malzemesi katılırsa katılsın sertlik değerinde artış olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, katkı malzemesinin dayanımındaki artışın sertliği artırdığı söylenebilir. İstisna olarak v120-3 kodlu numunelerde v85-3 kodlu numunelerden daha düşük sertlik değerinin görülmüş olması, sertlik ölçümünün katkısız kısımlardan alınmış olma ihtimalinden kaynaklanmaktadır.

Susa, A., Chacon ve arkadaşları, Evlen ve arkadaşları, Yaman, S. (2019) gibi vb. çalışmalarda da takviye malzemesi içeren numunelerde sertlik artışı görüldüğü belirtilmiştir. Yapılan çalışmada da, takviye malzeme kullanımının her koşulda takviyesiz duruma göre sertlik değerlerini artırması literatürdeki diğer çalışmalarla uyumludur.

4.4 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Hazırlanan numunelere aşınma deneyi yapıldıktan sonra, 15 N yük altında aşınma yapılan numunelerin yüzeylerinin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Bu deneyde Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan TMTECK-462 marka yüzey pürüzlülüğü cihazında yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır ve ölçüm yapılırken numuneler mengeneye bağlanarak sabitlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı Şekil 4.52'de gösterilmiştir. Her bir numunenin yüzeyinden farklı noktalarda olacak şekilde dört farklı ölçüm yapılmıştır ve ortalama pürüzlülük değeri göz önüne alınmıştır. Ortalama değerlere ait grafikler Şekil 4.53'de, Gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü ölçümlerine ait grafikler Şekil 4.54'te ve verilmiştir.



Şekil 4. 52: Bilgisayara bağlanmış yüzey pürüzlülük test cihazı.



Şekil 4. 53: Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri grafiği.



Şekil 4. 54: Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri (x ekseni: ölçüm uzunluğu (mm), y ekseni: yüzey profili (μm)); a) flex, b) vflex, c) 85-3, d) 85-6, e) 85-9, f) v85-3, g) v85-6, h) v85-9, 1) 120-3, j) 120-6, k) 120-9, l) v120-3, m) v120-6, n) v120-9.

Yapılan yüzey pürüzlülüğü testi ölçüm sonuçları, numunelerin sertlik durumları göz önüne alınarak incelenildiğinde, genel olarak sertlikleri arttıkça yüzey pürüzlülüklerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Fakat katkı maddesi içeren numunelerde özellikle de 9'ar gramlarında yüzey pürüzlülüklerinin normal değerlerin üzerinde olduğu ve sertlikleri artmış olmalarına rağmen, yüzey pürüzlülüklerinin diğer numunelere göre daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni toz takviyenin aşınma esnasında partikül olarak yüzeyden ayrılması ve aşındırıcı toz halinde numuneyi aşındırmasındandır.

Genel olarak bakıldığı zaman, bütün numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin 2,00 ila 2,50 µm aralığında olduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak, v85-9 kod adlı numunelerin ortalama olarak 2,57 µm değerinde olup en fazla yüzey pürüzlülüğüne sahip oldukları gözlemlenmiştir. Her iki takviye malzeme için de, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin 3 gram takviyede olduğu bulunmuştur. Takviye malzemenin oranının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerleri, takviye maddenin aşındırıcı konumuna geçmesi nedeniyle lineer artış göstermektedir. Ayrıca her takviye oranı için 120 kodlu numunelerin 85 kodlu numunelerden daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip oldukları bulunmuştur.

Vakumlanan numunelerde 85 kodlu numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri tüm takviye oranlarında artarken; 120 kodlu numunelerin 9 gram takviyeli olanlarında yüzey pürüzlülüğü değerlerinde bir düşme görülmüştür. Vakumlamanın takviye toz ile matrisin birleşmesini artırdığı sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, katkı maddelerinin yüzey pürüzlülük değerlerini düşürmeye etkisi olduğu fakat takviye miktarının yüzey pürüzlülüğü ölçümünde kritik olduğu sonucuna varılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda takviye malzemenin türüne göre örneğin cam elyaf takviyesinde yüzey pürüzlülüğünde artma görülürken; PTFE katkılı numunelerde azalma görülmüştür (Franklin, 2001). Sert parçacıkların takviye olarak kullanılmasında yüzey pürüzlülüğünün artması beklenirse de yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğünün takviye malzeme kullanımı ile azaldığı görülmüştür. Sertlik değerlerindeki artışla yüzey pürüzlülüğünün düşmesi literatürdeki diğer çalışmalarla uyumludur. (Çantı ve arkadaşları, Evlen ve arkadaşları gibi vb.) Zhang ve ark (2021) yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşük olmasının daha az aşınma ile örtüşmesi ile, katkılı numunelerin düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri ile aşınmada daha düşük kütle kaybına uğramaları da literatürle uyumludur.

4.5 Nem Ölçüm Sonuçları

Bu deneyde, Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 4.55'de gösterilen OHAUS marka MB35 HALOGEN model nem ölçme cihazı kullanılmıştır. 100 °C sıcaklıkta 1 dakika boyunca malzemenin kütlesindeki aazalmanın başlangıçtaki numune kütlesine oranlanması prensibi ile nem ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.56).



Şekil 4. 55: OHAUS marka MB35 HALOGEN model nem ölçme cihazı; a. Dıştan görünüm, b. İç görünümü.



Şekil 4. 56: OHAUS marka MB35 HALOGEN model nem ölçme cihazı çalışma esnasından görüntü; a. Ölçme öncesi, b. Ölçme sonrası.

Numune	1	2	Ortalama	
Flex	0,12	0,18	0,15	
vflex	0,18	0,17	0,175	
85-3	0,29	0,29	0,29	
85-6	0,30	0,30	0,30	
85-9	0,28	0,30	0,29	
v85-3	0,29	0,36	0,325	
v85-6	0,29	0,34	0,315	
v85-9	0,28	0,27	0,275	
120-3	0,40	0,34	0,37	
120-6	0,34	0,29	0,315	
120-9	0,30	0,30	0,30	
v120-3	0,29	0,30	0,295	
v120-6	0,27	0,28	0,275	
v120-9	0,22	0,20	0,21	

Tablo 4. 3: 0-100 °C sıcaklıkta 1 dakika boyunca numunelerde ölçülen nem değerleri

(%).

0-100 °C sıcaklıkta 1 dakika süresince gerçekleştirilen ve Şekil 5.57'de verilen nem ölçüm sonuçlarına göre nemin termoset katkılı numunelerde flexe göre arttığı ve 120-3 kodlu numunelerde en yüksek değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Nem oranlarının her iki katkı maddelerinde de çok yakın olduğu ve vakum etkisinin çok fazla etkilemediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte vakumlanmış numunelerde ve 85 MPa dayanıma sahip termoset katkılı numunelerde 6 g takviye durumunda nem değeri 3 ve 9 g takviyeli olanlara göre daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 4. 57: 0-100 °C sıcaklıkta 1 dakika boyunca numunelerde ölçülen nem değerleri grafiği.

Nuruzzaman ve Chowdhury (2012), Chen ve ark (2018) ve Jagadeesh ve ark (2024) tarafından yapılan çalışmalarda artan nem oranının sürtünme katsayısını azalttığı ve dolayısıyla aşınma miktarında azalmaya neden olduğu bulunmuştur. Yapılan çalışmada takviyesiz numunelere göre takviyeli numunelerin nem değerlerindeki yükselme ile aşınmadaki kütle kaybının azalması literatür ile uyumludur. Bununla birlikte diğer katkı oranlarına göre daha yüksek nem ihtiva eden 120-3 kodlu numunelerde 360 m kayma mesafesinde en düşük aşınma değerlerinin elde edilmiş olması da dikkat çekici bir sonuçtur. Nem miktarı açısından ikinci sırada yer alan 85-3 kodlu numunelerde 15 N yük altında aşınmada daha yüksek kütle kaybının oluşması ise bu numunelerde nemin katkı malzemesinin matristen ayrışmasını kolaylaştırarak aşınmayı artırdığı şeklinde yorumlanabilir. Düşük yük uygulamalarında tüm katkılı numunelerde birbirine yakın kütle kaybı elde edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada geri dönüşümleri oldukça sınırlı olan termoset atıkların ekonomiye kazandırılıması amacıyla flex epoksi içerisinde katkı malzemesi olarak kullanımı incelenmiştir. Toplam kütle 60 g olacak şekilde hazırlanan karışımlarla çekme ve aşınma test numuneleri üretilmiştir. İki farklı termoset türü katkı malzemesi 3, 6 ve 9 gram olacak şekilde takviye olarak kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarına göre, tüm numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri 2,00 ila 2,50 µm aralığındadır. Takviyeli numunelerde takviyesiz numunelere göre yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düştüğü saptanmıştır. Takviyeli numuneler, takviye malzemenin oranına göre değerlendirildiklerinde 3 gramlık takviye durumlarında en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Takviye malzemeye göre değerlendirmede ise; tüm takviye oranları için 120 kodlu numunelerin daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip oldukları bulunmuştur.
- Nem ölçümü yapılan numunelerde takviye içeren numunelerin havadan ve katılaşma esnasında epoksiden nem emdiği ve dolayısıyla nem oranlarının takviyesizlere göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.
- Sertlik ölçüm sonuçlarına göre, her iki katkı maddesinin de sertlik değerlerinin flex epoksi numunelerinin sertliklerinden daha yüksek değerde çıktıkları görülmüştür. Özellikle de 9'ar gram 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde vakumlu ya da vakumsuz halde en fazla sertlik değerine sahip oldukları görülmüştür. Sonuç olarak da katkı maddelerinin numunelere daha fazla dayanım sağladıkları gözelemlenmiştir.
- Çekme testi sonuçlarına göre, vakumlama etkisindeki numunelerin vakumsuz hallerinden daha düşük çekme dayanımına sahip oldukları ama vakumlu haldeki katkı maddesi içeren numunelerin vakumlu flex epoksi

numunelerinden daha yüksek değerde çekme dayanımı gösterdikleri görülmüştür. Vakumsuz 3'er gram 120 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerin 1,62 MPa çekme dayanımı gerçekleşirken bu duruma en yakın 1,44 MPa çekme dayanımıyla vakumlu 6'şar gram 85 MPa dayanıma sahip katkı maddesi içeren numunelerde olduğu görülmüştür.

- Yapılan aşınma deneyleri sonucunda, özellikle 15 N yük altında bakıldığında, katkı maddesi içeren numunelerde aşınma miktarlarının düşüş gösterdiği, özellikle katkı maddesinin dayanım değeri yükseldikçe katkı maddesiyle elde edilen numunelerin aşınma miktarlarında azalma olduğu görülmüştür. Bu değerler özellikle 180 m kayma mesafesinde çok net bir şekilde görülmektedir. Aşınma mesafesi arttıkça doğal olarak beklenildiği üzere aşınma miktarlarında da artış görülmüştür.
- Genel olarak bakıldığında ise vakum etkisinin aşınma miktarlarında artışa neden olduğu görülmüştür. Buradan da yola çıkarak numune içerisindeki hava kabarcıklarının numuneye aslında olumlu yönde etki sağladığı söylenebilir.

Çalışma sonucunda sunulabilecek öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Çalışmada flex (yumuşak) epoksi kullanılmıştır. Bu yüzden, epoksinin yapısı çekme test cihazının çene yükleri için fazla yumuşak gelmiştir. Bu durum göz önüne alınarak, flex epoksi yerine diğer epoksi türlerinin kullanılarak veriler kıyaslanabilir.
- Numuneler, termoset katkı maddeleri 3, 6 ve 9 gram olacak şekilde hazırlanmıştır ve özellikle aşınma testlerinde en iyi sonuç 6 gram olarak hazırlanan numunelerde elde edilmiştir. Bu durum göz önüne alınarak 4, 5 ve 7 gram katkı maddesi içerecek şekilde hazırlanan numunelerde çalışma yapılabilir.
- Bu çalışmada aşınma testi kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Çeşitli yağlama durumları ve yağlayıcı türleri ile aşınma deneyleri incelenebilir.

- Numuneler vakum ortamında 10 dakika olacak şekilde tutulmuştur. Vakum ortamında daha uzun veya daha kısa süre bekletme durumlarında aşınma değerleri ve diğer mekanik özelliklerin değişimleri incelenebilir.
- Nem ölçüm testleri bir dakika boyunca yapılmıştır. Daha uzun sürelerde nem ölçüm testi gerçekleştirilerek nem oranları kıyaslanabilir.

6. KAYNAKLAR

Altıntaş, A, Organik Kimya – Polimerler Ders Notu, Ankara Üniversitesi, (2013).

Arıcıoğlu, M.K., Mert, B., SOYDAN, Y., ''Polimer Malzemelerin Mekanik Analiz Yöntemleri, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4.Cilt 1. ve 2. Sayfa 51-58, (2000).

Asi, D., Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aşınma performansının incelenmesi, Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2008).

ASTM D 638-10, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, (2014).

Bikmaz, H., "Örgü yapılı sürekli karbon fiber takviyeli polimer kompozitin katı partikül erozyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli Üniversitesi, (2019).

Biron, M., Thermosets and Composites, Elsevier, [e-kitap], https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=gim_ibLyxJAC&oi=fnd&pg=P P1&dq=thermosets&ots=YhLhHbhTg6&sig=vpUKavKLXUQG2AwMVeHZLRL a0xM&redir_esc=y#v=onepage&q=thermosets&f=true, p. 2,4,5,7 (2004).

Bitlisli, B., ve Yazıcı, M., Araç Zirhlamada Kullanilankompozitmalzemeleribalistik Performanslarini incelenmesi (Vol. 24). Https://Doi.Org/10,17482/Uumfd.494262, (2019).

Bledzki, A. K., Kurek, K., & Barth, C. H., *Development of a thermoset part with SMC reclaim*. ANTEC 92-Shaping the Future Conference, 1:1558-1560, (1992).

Bledzki, A. K., Goracy, K., *The use of recycled fibre composites as reinforcement for thermoset*. Mech. of Comp. Mat., 29(4):352-356, (1994).

Chacón, J. M., Caminero, M. A., García, E. and Núñez, P. J., "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection", *Materials & Design*, c. 124, ss. 143-157, (2017).

Chen, Z., Liu, X., Lu, R., *Mechanical and tribological properties of PA66/PPS blend.*, III. Reinforced with GF. J Appl Polym Sci; 102: 523–529, (2006).

Chen, Z., He, X., Xiao, C., & Kim, S. H., *Effect of humidity on friction and wear*— *A critical review*. Lubricants, 6(3), 74, (2018).

Conroy, A., Halliwell, S., & Reynolds, T., Composite recycling in the construction industry. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *37*(8), 1216-

1222, (2006).

Çantı, E., Aydın, M. ve Yıldırım, F., "Production and characterization of composite filaments for 3D printing", *Politeknik Dergisi*, c. 21, sayı 2, ss. 397-402, (2018).

Derosa, R., Telfeyan, E., Gaustad, G., Mayes, S., *Strength and Microscopic Investigation of Unsaturated Polyester BMC Reinforced with SMC-Recyclate. J. of Thermoplas. Comp. Mat.*, 18(4): 333-349 (2005b.).

Dul, S., Fambri, L., Pegoretti, A., "Fused deposition modelling with ABS–graphene nanocomposites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, c. 85, ss. 181-191, (2016).

Engin, K. E., Koyuncu, T., and Lüle, F., *Production Of Different Composite Materials And Determination Of Some Technical Properties*. Anadolu Journal Of Agricultural Sciences, 30(1), 43. Https://Doi.Org/10,7161/Anajas.2015.30,1.43-50, (2015).

Erdem, N., Erdoğan, Ü. H., & Akşit, A., *Nanokompozipolipropilefilamentlerin NanoComposite Polypropylene Filaments*. Tekstil Ve Mühendis, 69, (2015).

Erdoğdu, Y. E., & Temiz, Ş., Doğal Elyaf Takviyeli Grafen Nanoplatelet Dolgulu Epoksi Matrisli Kompozitlerde Abrazif Aşınma. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(1), 440-449, (2021).

Evlen, H., Erel, G. ve Yılmaz, E., "3 boyutlu yazıcı tasarımı ve yazdırma doluluk oranının mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi", *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, c. 2 sayı 1, ss. 23-31, (2018).

Evlen, H., Erel, G. ve Yılmaz, E., "Açık ve kapalı sistemlerde doluluk oranının parça mukavemetine etkisinin incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, c. 21, sayı 3, ss. 651-662, (2018).

Evlen, H., Özdemir, M. A. and Çalışkan, A., "Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri", *Politeknik Dergisi*, (2019).

Franklin, S. E., "Wear experiments with selected engineering polymers and polymer composites under dry reciprocating sliding conditions.", *Wear*, 251(1-12), 1591-1598 (2001).

Garside, M., *Global consumption growth rate of selected materials* 2018-2050 May 27, (2020).

Han, S., Jin, X., Wang, J., Costa, F., Bendickson, R., Kaczmarczyk, M., "The numerical analysis and validation of compression molding process.", SPE

Automotive and Composites Divisions - 12th Annual Automotive Composites Conference and Exhibition 2012, *ACCE 2012: Unleashing the Power of Design*, *3(April)*, 827–839, (2012).

Herrero-Franco, P.J., Valadez- Ganzalez, A., Mechanical properties of continuous natural fibre- reinforced polymer composites, *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, 35(3):339-345 (2003).

https://avesis.ktu.edu.tr/resume/downloadfile/maslan?key=afbc57ff-7f75-4158-ae15-07731e345760 (Erişim Tarihi: 20.01.2023)

https://www.bakelite.com Bakelite PF 1110-9005-S2 Technical Data Sheet (Erişim Tarihi: 20.06.2024)

https://devotrans.com/tr/nedir/shore-sertlik-olcumunedir.html#:~:text=Shore%20sertlik%20%C3%B6l%C3%A7%C3%BCm%C3%B C%2C%20bir%20malzemenin,malzemenin%20uygunlu%C4%9Funu%20belirle mek%20amac%C4%B1yla%20kullan%C4%B1l%C4%B1r. (Erişim Tarihi: 01.11.2024)

https://gokerplast.com.tr/enjeksiyon-kaliplama/ (Erişim Tarihi: 16.02.2024)

https://www.hexion.com Bakelite PF 6507-9005-S1 Technical Information (Erişim Tarihi: 20.06.2024)

https://www.materialdatacenter.com/ms/de/Bakelite/Hexion/Bakelite%C2%AE+P F+6507/a701c8a5/295 (Erişim Tarihi: 20.06.2024)

https://www.materialdatacenter.com/ms/de/Bakelite/Hexion/Bakelite%C2%AE+P F+1110/1e22385e/295 (Erişim Tarihi: 20.06.2024)

https://resininresin.com/product/flex-clear-flexible-epoxy-resin/?v=ebe021079e5a (Erişim Tarihi: 14.05.2024)

https://www.statista.com/statistics/1114860/global-consumption-growth-rate-selected-materials/ (Erişim Tarihi: 24.01.2023)

https://www.teknikurunler.com/shore-sertliginedir/#:~:text=Shore%20sertlik%20de%C4%9Feri%2C%20bir%20malzemenin,il e%20yap%C4%B1lan%20bask%C4%B1%20sonucunda%20%C3%B6l%C3%A7 %C3%BCl%C3%BCr. (Erişim Tarihi: 31.10.2024)

https://tekstilteknik.blogspot.com/p/kompozit-uretim-yontemleri.html (Erişim Tarihi: 16.02.2024)

Inoh, T., Yokoi, T., Sekiyama, K. I., Kawamura, N., Mishima, Y., *SMC Recycling Technology. J. Thermoplas. Comp.* 7(1): 42–55, (1994).

Jagadeesh, P., Rangappa, S. M., & Siengchin, S., Friction and wear analysis of basalt micro-filler loaded various epoxies and esters based thermoset polymer composites. *Journal of Building Engineering*, *86*, 108927, (2024).

Kalaycı, A., ''Havacılık uygulamaları için bor katkılı termoset kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerinin geliştirilmesi'', *Ondokuz Mayıs Üniversitesi*, (2021).

Kazemi, M., Kabir, S. F., & Fini, E. H., State of the art in recycling waste thermoplastics and thermosets and their applications in construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105776, (2021).

Kurnaz, U., ''Çok katlı poliamid kompozit borunun extrüzyon ile üretiminde alev uygulamasının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi'' (Master's thesis, *Sakarya Üniversitesi*), (2019).

Meran, C., Yüksel M., *Malzeme Bilgisi*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları, MMO/545/3, Ankara, (2016).

Mullins, M., Liu, D., & Sue, H., "Mechanical properties of thermosets", *Thermosets (Second Edition)*, 35-68. https://doi.org/10,1016/B978-0-08-101021-1.00002-2, (2018).

Nuruzzaman, D. M., & Chowdhury, M. A., Friction and wear of polymer and composites. *Composites and their properties*, 299-330, (2012).

Palmer, J., "Mechanical Recycling of Automotive Composites for Use as Reinforcement in Thermoset Composites", PhD Thesis, *University of Exeter*, May, (2009).

Palmer, J., Ghita, O. R., Savage, L., Evans, K. E., 'Successful closed-loop recycling of thermoset composites.", *Comp. Part A*, 40:490–498, (2009).

Palmer, J., Savage, L., Ghita, O.R., Evans, K.E., "Sheet molding compound (SMC) from carbon fibre recyclate.", *Comp. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(9):1232-1237, (2010).

Papadakis, N., "Designing composite wind turbine blades disposal recycling and reuse", *in: V. Goodship (Ed.), Management, Recycling and Reuse of Waste Composites, WP and CRC Press, Cambridge, UK*, 443–457. ISBN 978184569462, (2010).

Petterson, J. And Nilsson, P., "Recycling of SMC and BMC in Standard Processing Equipment.", *J. Thermoplas. Compos.* 7(1): 56–63, (1994).

Pickering, S. J., "Recycling technologies for thermoset composite materials current status.", *Comp. Part A*, 37:1206–1215, (2006).

Sezer, H. K., Eren, O., Börklü, H. R. and Özdemir, V., "Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c. 34, sayı. 2, ss. 663-674, (2018).

Susa, A., Blaauw, R., Molenveld, Knoop, K., R. J. I., 'A Review on the Potential and Limitations of Recyclable Thermosets for Structural Applications", *Polymer Reviews*, 60:2, 359-388, DOI: 10,1080/15583724.2019.1673406, (2020).

Termek, H., ''Nano Katkılı Biyokompozitlerin Otomotiv Malzemelerinde Kullanılması'', Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2021).

Yaman, S., "3B yazıcı ile üretilen Pla40Abs60 malzemesinin termal ve mekanik özelliklerinin deneysel incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).

Yang, Y., Boom, R., Irion, B., Heerden, D., Kuiper, P., Wit, H., "Recycling of composite materials", *Chem. Eng. and Process.*, 51:53–68, (2012).

Yastımoğlu, F., & Özkan, A., ''Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı'', *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56–66. Https://Dergipark.Org.Tr/Tr/Pub/Dubited/İssue/27453/289129, (2017).

Yılmaz, O., ''Polimer malzemelerin ekstrüzyonunun deneysel ve sayısal olarak incelenmesi'', Doktora tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2007).

Zhang, K., Liu, K., Gao, T., Qiao, Y., Zhang, Y., Liu, X., ... & Ye, J., "The unrecognized importance of roughness directionality to polymer wear.", *Wear*, 486, 204084, (2021).