



**BAZALT TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERDE ABRASİV
AŞINMA VE SÜRTÜNME DAVRANIŞLARI**

Fatih ŞAHİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2017

Fatih ŞAHİN tarafından hazırlanan “BAZALT TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERDE ABRASİV AŞINMA VE SÜRTÜNME DAVRANIŞLARI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Adem ÇİÇEK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Hakan DİLİPAK

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 19/10/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fatih ŞAHİN

19/10/2017

BAZALT TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN ABRASİV AŞINMA VE SÜRTÜNME DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Fatih ŞAHİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2017

ÖZET

Son yıllarda daha iyi mekanik, fiziksel ve tribolojik özelliklere sahip yeni malzemeler elde etmek için birçok araştırma yapılmaktadır. Bu tezde, bazalt takviyesinin mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisini görmek için bazalt kumaş takviyeli epoksi kompozit malzemeler incelenmiştir. Basma testi, üç noktalı eğilme testi, sertlik testi ve darbe testi ağırlıkça %0, %40 ve %60 bazalt kumaş içeren kompozit malzemeler üzerinde yapılmıştır. Belirtilen oranlarda hazırlanan bazalt kumaş takviyeli kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları; aşınma yüzeyinde silikon karbür (SiC) yerleştirilen disk üzeri pim deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma ve sürtünme deneyleri, oda sıcaklığında, 80 rpm, 140 rpm ve 200 rpm hızlarda, 5N, 10 N ve 15N yük uygulanarak farklı mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Farklı hız, mesafe ve yüklerin uygulandığı kompozit numunelerle aşınma oranı Taguchi L27 tasarımı uygulanarak test edilmiştir. Sürtünme katsayısı ise Taguchi L9 tasarımı ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde, aşınma oranları ve sürtünme katsayısının tahmininde regresyon denklemi kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar göstermektedir ki; hacimsel aşınma miktarı üzerine en büyük etki malzeme cinsi ve bunu da uygulanan yük takip etmiştir. Hız ve kayma mesafesinin etkisi ise az olmuştur. Deneysel sonuçlar; artan yük ve mesafede hacimsel aşınma oranının azaldığını fakat orta devirde aşınma oranının arttığını göstermiştir. Abrasif aşınma ve sürtünme deneylerine gelince, katkısız epoksinin abrasiv aşınma ve sürtünme direncinin zayıf olduğu ama bazalt katkısı ile bu dezavantajın ortadan kalktığı saptanmıştır. Sürtünme katsayısının bazalt içeriği ile arttığı görülmekte iken en yüksek sürtünme katsayısı ise ağırlıkça %60 bazalt içeren kompozitte gözlenmiştir. Bunun dışında, varyans analizi, sürtünme katsayısının yüke çok bağımlı olduğunu, malzeme cinsi ve kayma hızının arasında büyük fark olmadığını göstermiştir. Sürtünme katsayısı üzerine; uygulanan yükün katkı payı %73,4; malzeme cinsi ve kayma hızının katkı payının ise sırasıyla %12,2 ve %12,59 olduğu gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 91417

Anahtar Kelimeler : Epoksi, bazalt, kompozit, sürtünme, aşınma, mekanik, yük, hız, kayma mesafesi

Sayfa Adedi : 93

Danışman : Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

FRICITION AND ABRASIVE WEAR BEHAVIOUR OF BASALT FABRIC
REINFORCED EPOXY COMPOSITES

(M. Sc. Thesis)

Fatih ŞAHİN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2017

ABSTRACT

In recent years, there have been several researches in finding new materials to obtain better mechanical, physical and tribological properties. In this thesis, in order to see effects of adding basalt reinforcements on the mechanical and tribological behaviors, basalt fabric reinforced composites were studied. Mechanical characterizations such as compression test, flexural test, hardness test and impact test were carried out on the epoxy based composites containing 0 wt.%, 40 wt.% and 60 wt.% basalt fabrics. The wear and friction behaviour of composites were conducted in a pin-on-disc type of wear testing machine against the water proof silicon carbide (SiC) abrasive paper. Wear and friction tests were performed at 80 rpm, 140 rpm and 200 rpm rotational speeds under 5N, 10N and 15N loads using different distances at room temperature. Taguchi L27 array was designed to find out the effect of material types, sliding speed, load and sliding distance on the wear rate. Furthermore, Taguchi L9 array was designed to determine friction coefficients. In evaluation of results, regression equations were also developed for the prediction of wear and friction coefficient of the tested samples. Experimental results showed that material type was found to be the most effective one on the volumetric wear rates, followed by load. Sliding speed and sliding distance had lower effects. Experimental results indicated that increasing loads and distance decreased wear rates, but at medium speed wear rates increased. As for the case of abrasive wear and friction experiment results, wear and friction resistance of pure epoxy was insufficient, but coefficient of friction increased with increasing basalt contents. Coefficient of friction increased with the content of basalt and maximum coefficient of friction was obtained with 60 wt.% basalt content. Moreover, analysis of variance revealed that coefficient friction was largely depended upon load, followed by material type and sliding speed without big differences. In terms of friction coefficient, it could be observed that load, ($P=73,4\%$) had a significant effect on basalt content ($P=12,59\%$), which was followed by the speed ($P=12,20\%$), which had an insignificant effect.

Science Code : 91417

Key Words : Composite, basalt, friction, wear, load, speed, sliding distance

Page Number : 93

Supervisor : Prof. Mahmut İZCİLER

TEŞEKKÜR

Bu tez, geliştirilmesi ve kullanılması Türkiye sanayisi ve bilim seviyesi için önemli olduğuna inandığımız, kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik davranışlarını incelemeye yönelik faydalı bir çalışma olduğunu düşünüyorum. Tüm dünyada hızla gelişen ve artık sıklıkla kullanılan bu malzemelerin geliştirilmesinin ve bu tez benzeri yapılan çalışmaların hem ekonomimize hem de sanayi ve bilimdeki bilgi birikimimize(know-how) katkı sağlayacağını umuyoruz.

Tezin hazırlanmasında danışmanım olan Prof. Dr. Mahmut İzçiler hocamın yardım, katkı ve destekleri için teşekkürlerimi sunarım. Tezin çalışmasında, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren hem hocam hem de babam Prof. Dr. Yusuf Şahin'e teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her alanında sonsuz destek ve sevgisiyle yanımda olan annem Fatma Şahin'e; hayat arkadaşım, eşim, arkadaşım ve en güçlü destekçim Celale Şahin'e; doğduğumdan beri maddi ve manevi desteğiyle, sevgisiyle, her zaman yanımda olan, sendelediğimde arkamda duran biricik ablam Doç. Dr. Şule Şahin Onat'a sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım. Unutmadan, bu tez henüz okuma bilmeseler de oğlum Yusuf Mirza, kızlarım Zeynep Reyhan ve Fatma B. Feyza'ya ithaf olunur.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Bazalt.....	5
2.1.1. Termoset polimerleri.....	8
2.1.2. Termoplastik polimerleri.....	9
2.1.3. Biyo çözümler polimerler.....	10
2.1.4. Bazalt kompozitlerin endüstride kullanımı.....	10
2.2. Kompozit Malzemeler.....	11
2.2.1. Giriş.....	11
2.2.2. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler.....	13
2.2.3. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler.....	13
2.2.4. Kompozitlerin üretimi.....	14
2.3. Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	17
2.3.1. Sertlik testi.....	17
2.3.2. Üç noktalı eğilme testi.....	18

	Sayfa
2.3.3. Basma direnci ve basma testi.....	18
2.3.4. Darbe testi.....	20
2.4. Sürtünme ve Aşınma.....	22
2.4.1. Sürtünme.....	23
2.4.2. Aşınma.....	26
3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	31
4. MATERYAL VE METOT.....	43
4.1. Numunenin Hazırlanması.....	43
4.2. Mekanik Testler.....	44
4.2.1. Sertlik testi.....	44
4.2.2. Üç nokta eğilme testi.....	46
4.2.3. Basma testi.....	48
4.2.4. Darbe testi.....	49
4.2.5. Kompozit malzemelerin mekanik davranışları.....	51
4.3. Aşınma Deneyi.....	52
4.4. Deneysel Tasarım.....	56
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	63
5.1. Mikroyapı.....	63
5.2. Aşınma Deneyi.....	64
5.2.1. Ağırlık kaybı sonuçlarına göre aşınma deneyi analizi.....	65
5.2.2. Aşınma oranı sonuçlarına göre aşınma deneyi analizi.....	68
5.2.3. Kontrol faktörlerinin belirlenmesi.....	71
5.2.4. Varyans analizi.....	72
5.2.5. Doğrulama deneyleri.....	73

	Sayfa
5.2.6. Üç boyutlu aşınma etki grafikleri.....	74
5.3. Sürtünme.....	76
5.3.1. Sürtünme - zaman eğrileri.....	79
5.3.2. Sürtünme kuvvetinde varyans analizi.....	82
6. SONUÇLAR.....	83
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	91
DİZİN.....	92

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazaltın kimyasal içeriği.....	5
Çizelge 2.2. E-cam ve bazalt elyafların özellikleri.....	7
Çizelge 2.3. Termoplastik ve bazalt kompozitlerin mekanik özellikleri.....	9
Çizelge 3.1. Mekanik testler literatür çalışma özeti.....	40
Çizelge 3.2. Tribolojik deneyler literatür çalışması özeti.....	42
Çizelge 4.1. Sertlik testi sonuçları.....	45
Çizelge 4.2. Üç noktalı eğilme testi sonuçları.....	47
Çizelge 4.3. Aşınma deneyleri için kontrol faktörleri.....	58
Çizelge 4.4. L27 (313) tasarımı.....	59
Çizelge 4.5. Sürtünme katsayısı deneyleri için kontrol faktörleri.....	60
Çizelge 5.1. Bazalt takviyeli epoksi kompozitlerin aşınma deneyi sonuçları.....	65
Çizelge 5.2. Sinyal/gürültü oranı karşılık tablosu.....	71
Çizelge 5.3. Ortalama ağırlık oranı karşılık cevap tablosu.....	72
Çizelge 5.4. Bazalt epoksi bazlı kompozitlerin varyans analizi sonuçları.....	73
Çizelge 5.5. Doğrulama deneyleri ve hesaplanan değerlerle karşılaştırılması.....	74
Çizelge 5.6. Bazalt takviyeli epoksi bazlı kompozitlerin sürtünme katsayısı sonuçları.....	77
Çizelge 5.7. Varyans analizi.....	82

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Airbus A350 uçağında kompozit malzeme oranı.....	2
Şekil 2.1. Bazalt elyaf üretim sistematığı.....	6
Şekil 2.2. Basınçlı infiltrasyon metodu.....	15
Şekil 2.3. Elle kalıplama yöntemi ile kompozit üretimi.....	15
Şekil 2.4. Vakumlu paketleme yöntemi.....	16
Şekil 2.5. Üç nokta eğilme testi gösterimi.....	18
Şekil 2.6. Darbe testi prensibi.....	21
Şekil 2.7. Sürtünme kuvveti ve katsayısı.....	23
Şekil 2.8. Tribolojik sistem ve elemanları.....	27
Şekil 2.9. Aşınma türleri.....	29
Şekil 2.10. Abrasif aşınma üzerine etki eden faktörler.....	30
Şekil 4.1. Sertliğin elyaf içeriği ile değişimi.....	46
Şekil 4.2. Üç noktalı eğilme testi sonuçları.....	47
Şekil 4.3. Basma testi sonuçları.....	49
Şekil 4.4. Darbe testi sonuçları.....	51
Şekil 4.5. Disk üzeri pim deney cihazının şematik gösterimi.....	53
Şekil 5.1. Kontrol parametrelerinin ağırlık kaybı üzerine etkileri.....	67
Şekil 5.2. Kontrol parametrelerinin aşınma oranı üzerine etkileri.....	68
Şekil 5.3. Aşınma miktarının normal dağılım eğrisi ve aşınma miktarında oluşan hata.....	70
Şekil 5.4. Bağımlı değişkenlerin ortalama ağırlık kaybı üzerine etkilerinin 3 boyutlu değişim grafiği.....	75
Şekil 5.5. Ana kontrol faktörlerinin sürtünme katsayısı üzerine etkisi.....	78
Şekil 5.6. Sürtünme esnasında teorik değere karşılık gelen hata oranları.....	79

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Saf epoksinin farklı yükler altında sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi.....	80
Şekil 5.8. Bazalt katkılı epoksinin sabit yük altında sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi.....	80
Şekil 5.9. Bazalt katkılı epoksinin farklı yükler altında sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi.....	81

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Elle kalıplama yöntemi ile üretilen bir tekne.....	16
Resim 4.1. Bazalt elyaf kumaş.....	43
Resim 4.2. Kompozit deney numuneleri.....	44
Resim 4.3. Sertlik ölçme cihazı.....	45
Resim 4.4. Basma testi cihazı.....	48
Resim 4.5. Darbe test cihazı.....	50
Resim 4.6. Numunelerin darbe cihazına yerleşimi.....	50
Resim 4.7. Aşınma deney cihazı.....	54
Resim 4.8. Takometre ile ölçülen hızlar.....	55
Resim 4.9. Hassas terazi.....	56
Resim 5.1. Bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozitin enine kesitini gösteren elektron mikroskop altında alınan düşük büyütmedeki mikro yapısı.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Ar	Argon gazı
⁰C	Derece santigrat
N	Newton
kN	Kilo newton
N₂	Azot gazı
rpm	Dakikadaki devir sayısı
SiC	Silisyum karbür
SiO₂	Silisyum oksit
%	Yüzde
Pa	Paskal
MPa	Mega paskal
GPa	Giga paskal
gr	Gram
cm³	Santimetre küp
$\sigma_{m,a}$	Akma gerilmesi
F_a	Akmaya neden olan yük
A₀	Orijinal kesit alanı
$\sigma_{b,g}$	Gerçek basma gerilmesi
P	Yük
L	Uzunluk
D	Çap
d	İz çapı
G	Ağırlık
h	Yükseklik
cos	Açının kosinüs değeri
μ	Sürtünme katsayısı
m	Metre

Simgeler**Açıklamalar**

mm	Milimetre
µm	Mikrometre
nm	Nano metre
J	Joule
m/s	Metre/saniye hız birimi
mm³/Nm	Aşınma oranı birimi
dB	Desibel-S/G oranı birimi
dev/dak	Dakikadaki devir sayısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ANOVA	Varyans Analizi
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
BF40	Ağırlıkça %40 Bazalt İçeren Kompozit Numune
BF60	Ağırlıkça %60 Bazalt İçeren Kompozit Numune
CNG	Basınçlandırılmış Doğalgaz
DIN	Alman Standart Organizasyonu
EP	Epoksi
HRB	Rockwell B sertlik birimi
HV	Vickers sertlik birimi
ISO	Uluslararası Standart Organizasyonu
LDPE	Düşük Yoğunluktaki Polietilen
PEEK	Polieter eter keton
PVDF	Polivinilidenflorid
PMMA	Polimetil Methakrilet
PLA	Polilaktik Asit
PTFE	Polietraflorüretilen
S/G	Sinyal Gürültü Oranı
TEM	Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM-Scanning Electron Microscope)

1. GİRİŞ

Endüstri ve bilim dünyası her zaman üretilecek yeni ve daha iyi malzemeler bulmak için arayış içerisinde. Daha ucuz, daha az aşındırıcı ve daha çevre dostu malzemelerin geliştirilmesi için birçok üretim birimi araştırma geliştirme faaliyetleri içerisinde bulunmaktadır [1]. Mevcut malzemelerin yetersiz kalması, daha hızlı üretim ve daha ekonomik malzeme bulma gereksinimleri, kullanıcılardan gelen şikayetler ve daha dayanıklı ürün gereksinimleri yeni malzemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler ve bu tip gereksinimler mevcut mühendislik malzemelerin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuş ve alaşımların yetersiz kalması kompozit malzemelerin geliştirilmesini hızlandırmıştır.

İki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro-düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler kompozit malzemeler olarak adlandırılır. Kompozit malzemeler güçlü mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde neredeyse tüm endüstri kollarında sıklıkla kullanılmaktadır [2]. Bir kompozit malzeme, genelde düşük modül ve dayanıma sahip reçine veya metalik matris ana fazı ile bunun içinde dağılmış daha az oranda kullanılan tali fazı olan takviye elemanından oluşmaktadır [3]. Takviye elemanı genellikle fiber formunda (karbon fiberler, cam fiberler ve bazalt fiberler) olup matrisin sertliğini ve dayanımını arttırmak için farklı oran, şekil ve dizilimde ilave edilmektedir. Kompozit malzemeler, iyileştirilmiş mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 1.1’de Airbus marka A350 serisinde kullanılan malzemelerin sınıflandırılması görülmektedir. Hava ve uzay teknolojisinde sahip olduğu yüksek dayanım ve düşük özgül ağırlığa sahip kompozit malzemeler diğer geleneksel malzemelere oranla giderek artan oranlarda kullanılmaktadır. Bu uçak serisinde toplam malzemelerin %53’ü kompozit malzemelerden oluştuğu görülmektedir [3]. Aynı zamanda düşük sürtünme ve aşınma dirençleri uçaklarda ve diğer dinamik ortamlarda daha uzun süre dayanıma sahip ve daha güvenilir olmaları sebebiyle daha artan oranlarda tercih edilmekte ve sürekli geliştirilmektedir.



Şekil 1.1. Airbus A350 uçağında kompozit malzeme oranı [3]

Kompozit malzemelerin bazı dezavantajları bulunmakta olup, bunların en aza indirgenmesi için çalışmalar devam etmektedir. Kompozit malzemelerin maliyetlerinin yüksekliği, işlenme ve üretim zorlukları bunlardan birkaçıdır. Bazalt son zamanlarda araştırmalara konu olan en önemli takviye elemanlarından biridir.

Bazalt volkanik lavların soğumasıyla oluşan taşlardır ve yerkürenin üçte birinin bazalt olduğu tahmin edilmektedir. Bu yüzden bazalt bol ve oldukça ucuz bir takviye elemanıdır. Bununla birlikte bazalt inert ve doğal bir takviye elemanıdır [4]. Bu yüzden bazalt katkılı malzemeler, çevre dostudur ve tehlikeli değildir. Yapılan analizlerde bazaltı oluşturan ana unsurun SiO_2 ve Al_2O_3 olduğu görülmüştür. Bazalt taşlarından üretilen elyafların ciddi mekanik ve fiziksel özellikleri birçok takviye malzemesinin yerine kullanılmasını sağlamıştır. E-cam elyafları gibi takviye malzemeleri ile kıyaslandığında, hem kolay üretim süreci hem de ucuz olması sebebiyle bazalt elyafları avantajlı konuma gelmiştir [2, 4]. Yapılan deneysel çalışmalarda bazalt takviyeli kompozit malzemelerin E-cam fiber takviyeli kompozit malzemelere oranla daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür [2, 7, 9]. Bununla birlikte bazalt elyaflar, hammadde kompozisyonu, konveksiyon ve termal radyasyonu önleyen çok miktarda mikro gözenekler sayesinde yanmaz. Bu yüzden termal yalıtımda ve pasif yangın koruma uygulamalarında kullanılabilir. Yüksek kimyasal dirence sahiptir [5]. Ayrıca çok düşük sıcaklıkta -200°C ve yüksek sıcaklıkta $600-800^\circ\text{C}$ de kullanılabilirler. Bununla birlikte termal kararlılığı cam elyaflara göre daha iyidir ve kütle kaybı cam elyaflara göre daha azdır. Termal ısı kararlılığı bu derece iyi olmasının ana nedeni kristalizasyon yapısı ve kompozisyonu ile ilgilidir.

Bazalt elyaflar uygun özellikleri sayesinde özellikle de yüksek korozyon direnci ile kimya

endüstrisinde, aşınma sürtünme elemanı olarak otomotiv endüstrisinde, takviye elemanı olarak inşaat sektöründe, yüksek ısıda çalışan otomobil katalizörü yalıtımında, yangın koruma ve dirençten dolayı CNG tanklarına kullanılmaktadır.

Bazalt kumaş takviyeli kompozit malzemeler, mükemmel performansı, yüksek dayanım, mükemmel kimyasal kararlılığı ve aşınmaya dirençleri sayesinde, tribolojik uygulama alanlarında uzay, havacılık, otomobil ve birçok sektörde kullanılmaktadır [6].

Malzemelerin uygun tasarımlarda ve işlevlerde kullanılması özelliklerinin bilinmesi ile mümkündür. Mekanik ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi malzemenin kullanım alanlarının geliştirilmesi, kullanım ömrünün artması ve güvenilirliğinin daha iyi olması anlamına gelir.

Bu tez için yapılan deneysel çalışmalarda, matris malzemesi olarak iyi termal ve mekanik özelliklere sahip epoksi kullanılmıştır. Epoksi reçine endüstride sahip olduğu güçlü mekanik ve yapışma karakteristiği sayesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Buna ilaveten iyi kimyasal direnci ve yüksek sıcaklıktaki davranışı nedeniyle kullanımı oldukça yaygındır [7]. Boyama ve kaplamalarda, elektrik elektronik donanımların içinde, deniz taşıtlarında ve hatta uzay araçlarında kullanılmaktadır [8]. Kompozit malzemelerde güçlü bir matris malzemesi olan epoksi reçine içine takviye elemanı olarak karbon, cam elyaflar katılabildiği gibi metal parçacıklar da takviye elemanı olarak son yıllarda eklenmiştir [10]. Bunlarla birlikte bu tezin konusu olan bazalt fiber ya da kumaşlarda takviye elemanı olarak epoksi reçine ile kullanılmaktadır. Epoksinin dezavantajı aşınma davranışının diğer malzemelere oranla kötü oluşudur.

Aşınma, kullanılan malzemelerin yüzeylerinden, daha çok mekanik olarak etkileyen enerjiler ve mekanik etkiler ile küçük parçacıkların ayrılması, kütsel kayıp olarak tanımlanmaktadır. Aşınmada iki yüzey birbiri ile temas ettiğinde, malzeme yüzeylerinde etkileşim olur. Bu etkileşimler ise malzeme türüne, geometrisine, yüzey karakteristiğine ve diğer şartlara bağlıdır. Bu nedenle birçok araştırmacı polimerlerin aşınma direncini iyileştirmek ve yeni malzemeler geliştirmek için çalışmalar yapmaktadır. Aşınma endüstride istenmeyen bir olaydır ve aşınmanın sebep olduğu kayıplar nedeniyle yeni malzeme arayışları gündeme gelmiştir. Aşınma endüstride abrasiv, kuru, yorulma ve korozyon aşınması olarak görülmektedir. En yüksek aşınma abrasiv aşınma türünde meydana

gelmektedir.

Yapılan literatür çalışmalarında, bazalt takviyeli elyaflar ile oluşturulan kompozitlerin mekanik özellikleri ve aşınma/sürtünme davranışlarına ilişkin yapılan bilimsel çalışmaların, diğer malzemelere oranla daha az olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışmada; takviye elemanı olarak ağırlıkça %0, %40 ve %60 oranlarında bazalt kumaş içeren epoksi matrise sahip basma kalıplama yöntemi ile üretilmiş olan deney malzemeleri üzerinde mekanik testler ve aşınma deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar, bu konuda yapılan diğer bilimsel çalışmaların sonuçlarından da faydalanılarak deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Bazalt

Son yıllarda akademik ve endüstriyel dünyanın doğal elyafla güçlendirilmiş kompozitlere odaklandığı görülmektedir. Bu tüm doğal elyaflar arasında özellikleri açısından en çok ilgi gören bazalt olmuştur.

Bazalt; 500°C-1700°C ergime sıcaklığına erişmiş soğuyan lavlardan kaynaklı volkanik kayalarda bulunan doğal bir mineraldir. Ona özellikleri veren ve kristalizasyonuna neden olan sertleşme /tavlama işlemine bu sıcaklıkların sebep olduğu düşünülmektedir. Bazaltın ana içeriği, SiO₂ ve Al₂O₃'den oluşmakta olup oranları ve diğer içerikler Çizelge 2.1'de verilmiştir [11].

Çizelge 2.1. Bazaltın kimyasal içeriği

İçerik	% Ağırlık
SiO ₂	42,43-55,69
Al ₂ O ₃	14,21-17,97
Fe ₂ O ₃	10,80-11,68
CaO	7,43-8,88
MgO	4,06-9,45
Na ₂ O	2,38-3,79
TiO ₂	1,10-2,55
K ₂ O	1,06-2,33

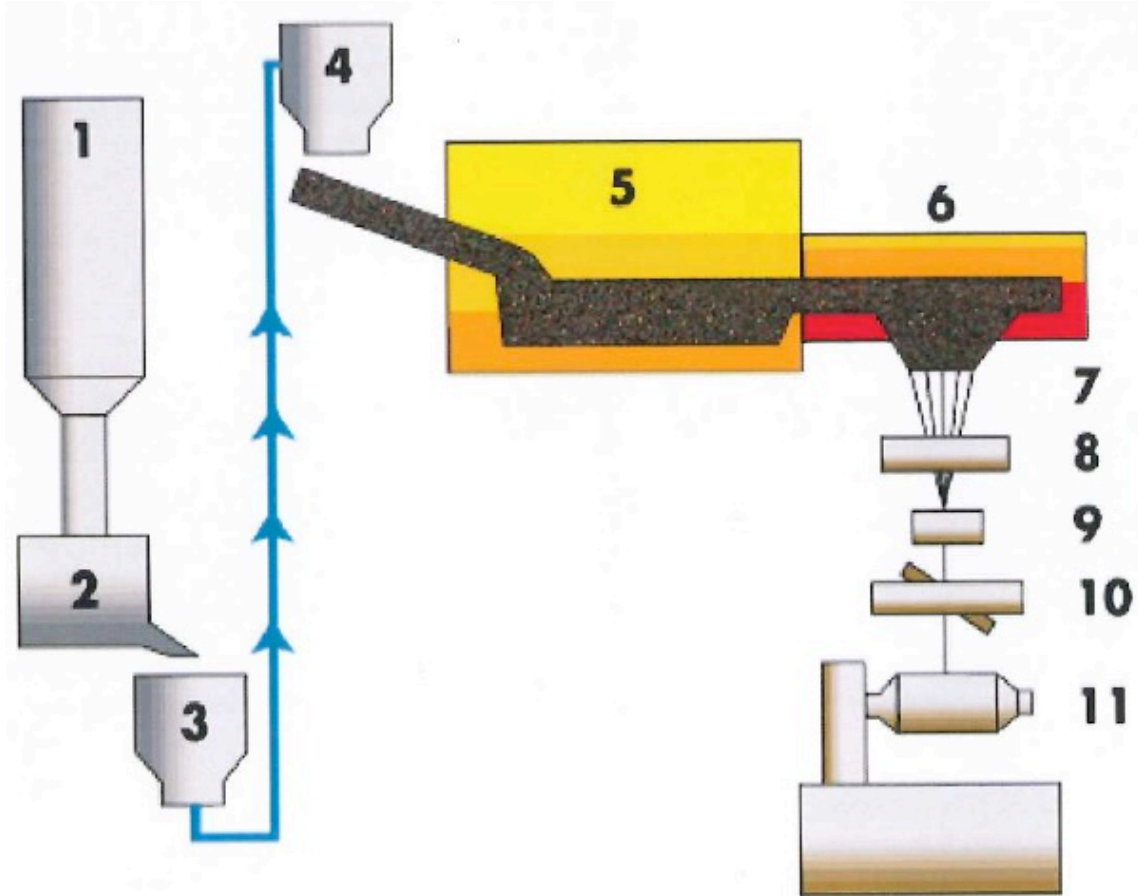
Bazalt elyaflar ilk olarak 1953-1954 yıllarında Moskova Araştırma Enstitüsünden geliştirilmiş olup fakat ilk üretimi 30 yıl sonra 1985'de Ukrayna'da gerçekleştirilmiştir.

Üretim süreci cam elyafları ile benzer olmasına rağmen daha az enerji tüketildiği için ve hiçbir katkı maddesi gerekmediği için daha ucuz olmaktadır [7]. Hammadde olarak volkanik kayalar kullanılarak fırında 1400°C-1500°C sıcaklıkta eritilmesi ve eritilen maddenin platinyum/radyum pota taraklarından geçirilmesi ile bazalt elyaflar elde edilir.

Sürekli döngü denilen bu yöntem takviye elemanını kırılmış ya da sürekli elyaflar

formunda oluşturabilir. Hiçbir katkı kullanmadan ve tekil üretim süreci maliyetler anlamında ciddi avantajlar sunar [12].

Üretimi çekme metodu ile olmaktadır ve cam elyafların üretim metoduna benzemektedir. Üretim şeması Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



1) Silo, 2) Yükleme istasyonu, 3) İletim sistemi, 4) Harman verme, 5) İlk eritme bölümü, 6) Sıcaklık kontrollü ikincil eritme, 7) Tel oluşturma yatağı 8) Büküklük yatağı, 9) Bükücü, 10) Elyaf çekme istasyonu, 11) Otomatik sarım istasyonu

Şekil 2.1. Bazalt elyaf üretim sistematığı

Bazalt elyaflarının çok kullanımı sağlığa zararlı mı sorusunu akıllara getirmiştir. Asbest ile benzer kompozisyonlara sahip olsalar da farklı morfolojileri ve yüzey özellikleri sayesinde bazalt daha güvenilir görünmektedir. Kogen [13] ve McConnel [14] makalelerinde farelere asbest ve bazalta maruz bırakmış, bazaltın güvenli olduğuna dair sonuçlar elde etmiştir. Kopma testleri sonucu incelendiğinde asbestlere ve diğer malzemelere oranla bazalt elyafların bütünlüğünü koruduğu yapılarının bozulmadığı görülmüştür. Asbest gibi

malzemeler ise mikron parçacıklara ayrılır ve solunum yoluyla vücuda zarar verecek seviyededir. O nedenle de hem Türkiye’de hem de Avrupa’da 2002 yılından itibaren yasaklanmıştır. Bununla beraber, yapılan çalışmalar bazalt elyafların yapısal olarak farklı özellikler sergilediğini ve sağlık açısından risk oluşturmadığını göstermektedir.

Bazalt takviyeli kompozitlerin deniz, otomotiv spor donanımları ve inşaat sektörlerinde sık kullanılan cam takviyeli kompozitlere ciddi bir alternatif olmasının ana nedenlerinden biri daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasıdır [7, 9, 15]. Deniz araçlarında ve uygulamalarında E-cam takviyeli kompozit malzemeler ile oluşturulan hibrit kompozitlerin sadece cam takviyeli kompozitlere oranla daha iyi mekanik özellik gösterdiği çalışmalarda görülmektedir [4]. Çizelge 2.2’de E-camı ve Bazalt elyaflarının mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır [4].

Çizelge 2.2. E-cam ve bazalt elyafların özellikleri

E-camı ve Bazalt Elyaf özellikleri karşılaştırması			
	Birim	E-cam	Bazalt
Yoğunluk	g/cm ³	2,56	2,8
Elastik Modülü	GPa	76	89
Çekme Dayanımı	GPa	1,4-2,5	2,8
Uzama	%	1,8-3,2	3,15
Spesifik Elastik Modülü	GPa/g/cm ³	30	31,78
Spesifik Çekme Dayanımı	GPa/g/cm ³	0,5-1	1

Bununla birlikte bazalt elyaflar, hammadde kompozisyonu ve konveksiyon ve termal radyasyonu önleyen çok miktarda mikro gözenekler sayesinde yanmaz, bu yüzden termal yalıtım ve pasif yangın koruma uygulamalarında kullanılabilir. Yüksek kimyasal dirence sahiptir [5]. Ayrıca çok düşük sıcaklıkta – 200 °C ve yüksek sıcaklıkta 600-800°C de kullanılabilirler. Bununla birlikte termal kararlılığı cam elyaflara göre daha iyidir ve kütle kaybı cam elyaflara göre daha azdır [6]. Termal ısı kararlılığı bu derece iyi olmasının ana nedeni kristalizasyon yapısı ve kompozisyonu ile ilgilidir. Yüksek demir oksit içeriği sebebiyle, kristalizasyon demir katyonları ile elyaf yüzeyinde döngüsel yapı fazı oluşturması bazalt elyafları ısıya dayanımlı malzemeler haline getirmiştir [12].

Yüksek dayanım, iyi mukavemet ve elastik davranışlar sürekli bazalt elyafları geleneksel

cam elyaflara karşı iyi bir alternatif haline getirmiştir [7]. E-cam elyaflar, kısa bazalt elyaflar ve üç farklı sürekli bazalt elyafların çekme testi sonucuna göre; sürekli bazalt elyafların çekme dayanımı, kısa bazalt elyaf takviyeli kompozite ve E-cam takviyeli kompozite göre daha düşüktür. Sürekli bazalt elyaflar cam elyaflarla yaklaşık aynı çekme dayanımına sahipken kısa bazalt elyaflar daha az dayanıklıdır.

Bazalt elyafların mekanik dayanımının; yüzey kusurları, yapısal hatalar ve safsızlıklar gibi yüzey heterojenliği ile direk ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu farklılıklar mekanik özellikleri teorik değerlerden çok daha düşürdüğünü göstermektedir. Bu amaçla yapılan hibrit kaplamaların yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını ve çekme kuvvetini iyileştirdiğini göstermektedir.

2.1.1. Termoset polimerleri

Son yıllarda bazalt elyafları epoksi, polyester ve vinil ester gibi termoset polimerlerinde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır [7,8]. Özellikle mekanik özellikleri, nem alma direnci, aşındırıcı sıvılara direnci, dayanıklılığı ve ürün çeşitliliği sayesinde epoksi termoset polimerleri içinde en çok tercih edilen olmaktadır. Epoksi reçine diğerlerine kıyasla daha pahalıdır ama daha iyi mekanik özellik göstermektedir, ayrıca nem tutmaya, aşındırıcı sıvılara ve çevresel etkilere karşı daha dirençlidir. Bununla birlikte uzaması daha az olmaktadır, örneğin vinil ester uzaması %12 iken epoksi reçine %5'den daha azdır. Fakat deniz suyu direnci karşılaştırıldığında vinil ester epoksi oranlar daha iyi davranışlar sergilemektedir. Metalik ve metalik olmayan yüzeylere iyi yapışması tercih edilen özellikleri arasındadır [16].

Epoksiler iki ya da daha fazla peroksit içeren bileşenlerden oluşurlar. Polifenol'ün ve epikloridin ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilirler. Epoksilere uygulanan kür işlemleri ile yüksek sıcaklıklara dayanımı 150-200°C'a artırılabilir. Büzülmesi %2'den azdır.

Avantajları:

1. Kopma mukavemetleri yüksektir.
2. Elyaf yapılarda yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.
3. Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
4. Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.

5. Düşük ve yüksek sıcaklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.

Dezavantajları:

1. Polyesterle karıştırıldığında pahalıdırlar.
2. Polyestere oranla yüksek viskoziteye daha az uygundur.

Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerde kullanılabilme nedeniyle, uçak yapısında da yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Genellikle karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar.

2.1.2. Termoplastik polimerleri

Polipropilen ve polietilen, termoplastik matrisleri içinde en çok kullanılan matrislerdir. Poliamid 6 ile yapılan bazalt kompozitlerin de yüksek çekme dayanımı gösterdiği görülmüştür. Termoplastik kompozitler esnektir, güçlüdür ve iyi fiziksel-mekanik özellikler gösterirler [17]. Bazı termoplastik malzemelerle yapılan testlerden alınan sonuçlar Çizelge 2.3'te gösterilmiştir [18].

Çizelge 2.3. Termoplastik ve bazalt kompozitlerin mekanik özellikleri

Termoplastik[Polivinilidenflorid (PVDF) ve polimetil methakrilet (PMMA)] ve bazalt kompozitlerin mekanik özellikleri					
Testler	Birim	PVDF/ PMMA	PVDF/PMMA/ %10 Bazalt	PVDF/PMMA/ %20 Bazalt	PVDF/PMMA / %30 Bazalt
Çekme dayanımı	MPa	37,2	50,4	62,4	54,7
Uzama	%	24,2	5,8	5,4	3,6
Kopma dayanımı	MPa	40,7	85,2	101,7	93,8
Erime sıcaklığı	⁰ C	167,4	167,1	166,9	116,8

2.1.3. Biyo çözünür polimerler

Bazalt malzemesi biyo çözünür değildir fakat doğadaki bazalt taşlarından üretildiği için doğal bir malzeme olarak sınıflandırılmaktadır. Bu yüzden bazalt elyaf takviyeli biyo çözünür polimer kompozitleri “çevreye dost malzemeler” olarak tasnif edilebilir. Bu matrisler arasında PLA polilaktik asit en iyi seçeneklerden biri olarak durmaktadır. Nedeni ise yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi ve normal plastiklere oranla daha kısa sürede doğada ayrışmasıdır. Doku tamiri için üretilen kompozitte, yapılan çalışmalar bazalt elyafların PLA matrisi içinde düzgün dağılım gösterdiğini ve bunun mekanik özellikleri ciddi oranda iyileştirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte bazalt elyafların polimer ayrışma hızını yavaşlatabileceğini ve asit ayrışmasını etkisizleştirebileceği belirtilmiştir. Yapay ortamda, bazalt elyaflarının kemik hücrelerinin davranışlarına ciddi etki etmediği ve kemik hücreleri ile uyumlu olduğunu göstermiştir [12].

2.1.4. Bazalt kompozitlerin endüstride kullanımı

Bazalt elyaflar uygun özellikleri sayesinde özellikle de yüksek korozyon direnci ile kimya endüstrisinde, aşınma sürtünme elemanı olarak otomotiv endüstrisinde, inşaat sektöründe takviye elemanı olarak, yüksek ısıda çalışan otomobil katalizörü yalıtımında, yangın koruma ve dirençten dolayı CNG tanklarına kullanılmaktadır.

Bazalt kompozitler, arabalarda tavan döşemesinde sıkça kullanılmaktadır. En önemli avantajı araba üreticileri tarafından önemsenen geri dönüşüm olabilmesidir. Aynı zamanda fren disklerinde ve debriyaj balatalarında 2-3 kat daha uzun kullanım ömrü, aşınmadan, yüksek ve daha sabit sürtünme faktörü, şok direnci, yüksek sıcaklıkta çalışabilme, kimyasal direnç, düşük su emilimi ve çevreye duyarlı olması nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır [12].

Bazalt kompozitler arabaların yapısal kısmında ekstrüze profiller ya da çubuk donatılarda çeliği ve cam elyaf malzemelerin iyi bir alternatifidir. Avantajları çelikten daha hafif ve daha sağlam olması, doğal olarak alkali, asit ve pasa dirençli olması, neme dayanıklı, elyaflar gibi özel kaplamaya ihtiyaç duymaması, betonla aynı termal genişleme katsayısına sahip olması, rotlar ve beton ile yüzey arasındaki boşluğu ve kalınlığı düşürmesi, istenilen uzunluğa normal aletlerle kolayca kesilmesi, yalıtkan olması, deniz ortamına uygun olması ve korozyonun önemli olduğu kimyasal tesislere uyumlu olmasıdır.

Bazalt elyaflar yeterli termoset reçineler için karbon yerine kullanılarak deprem dirençli bina noktalarında kullanılabilir. Binalarda kullanılan bazalt takviyeli kompozitler yapıp donmaya dirençli, güçlü, ayrılmaya dirençli, darbelere dirençli, geçirgenlik özellikleri iyi, şoklara karşı dirençli, çatlaklara dirençli hale getirmektedir. Bazalt elyaflar polipropilen ve poliakrilonitril elyaflara göre daha ucuz ve beton içinde kolay dağılma ve termal özellikleri sayesinde daha kullanışlıdır. Yangına yüksek dayanım zamanı 60-120 saniye ile bina içi uygulamalarda kullanılabilir. Bazalt üreticileri, rüzgar santralleri kanatları için %30 daha güçlü, %15-20 daha sağlam ve %8-10 daha hafif olan bazalt takviyeli kompozitleri cam elyaf takviyeli kompozitlere daha iyi bir alternatif olduğunu savunmaktadırlar [12].

Spor donanımları içinde bazalt takviyeli kompozitler su kayaklarında, araba ve motosiklet dış parçalarında, bisikletlerde, kanolarda, kayaklarda, küreklerde, tenis racketlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Kilogramı yaklaşık 5 dolara satılan bazalt elyaflar, kilogramı 15 dolara satılan cam elyaflara göre daha iyi takviye elemanıdır [12].

Üretim süreci cam elyaflara benzeyen bazalt elyaflar, üretilirken herhangi bir katkıya ihtiyaç duymazlar ve daha az enerji gereksinimi vardır. Bu ve benzeri sebeplerden bazalt elyaflar gelecekte birçok endüstride aranan malzeme olacaktır [12].

2.2. Kompozit Malzemeler

2.2.1. Giriş

Kompozit malzemeler son yıllarda önemi giden artan bir alan olmakla birlikte, ilk kullanımı II. Dünya savaşı esnasında mevcut konvansiyonel malzemelerin tek başlarına teknoloji karşısında belli ihtiyaçlara cevap veremez hale gelmesi ile başlamış ve o zamandan beri de bu malzemelerin üretimi ve mekanik, tribolojik, fiziksel ve benzeri özellikleri üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri genişleyerek devam etmektedir. Kompozit malzemelerin bu kadar hızlı gelişmesi ve tutulmasının ana nedeni malzemelerde yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastik modülü/yoğunluk oranı elde etmek olmuştur. Bu nedenle de birçok uygulama alanlarında kullanımları hızla artmaktadır. Kompozit malzemeler, belirli uygulama alanları için üstün özellikler elde etmek amacıyla belli özel yapılandırmada değişik fazdaki malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşan malzemelerdir, bu yüzden çok fazlı malzeme olarak da adlandırılırlar. Kompozit malzeme; iki ya da daha fazla sayıdaki,

aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro-düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Karbon elyafli plastikler, otomobil lastikleri ve karbür uçlu takımlar bunlara örnek olarak gösterilebilir. Bir kompozit malzeme, düşük modül ve dayanıma sahip reçine veya metalik matris ana fazı ile bunun içinde dağılmış daha az oranda kullanılan tali fazı olan takviye elemanından oluşmaktadır. Ancak, moleküler ve atomsal düzeyde birleştirilen malzemeler veya alaşımlar mikroskobik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak sınıflandırılmaz. Örnek; çelikteki krom ve vanadyum bir karışım oluşturur ve bir kompozit değildir. Çünkü yapı, mikroskobik olarak homojendir. Fakat karbür uçlu takımlar, yumuşak kobalt metal matris içine sert karbürlerin yerleştirilmesi parçacıklı bir kompoziti oluşturur.

Takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar ya da kumaşlar, kılcal kristaller, kırılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu, gelen yükü taşımak ve matrisin sertlik ve dayanımını artırmaktır. Matrisin görevi ise elyaflara yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için kompoziti bir arada tutmanın yanında çoğu takviye elemanları çok gevrek ve kırılgan olduğundan onların yüzeylerini dış ve çevresel etkilere karşı korumaktır. Ayrıca plastiklik ve süneklik üstünlüğü ile elyaflarda kırılgan çatlakların yayılmasını önler. Plastik deformasyonlar ve çatlaklar varsa elyaflara paralel olarak yönlerini değiştirir. Ayrıca kompozit malzemeler matris malzemesine göre; plastik, metal ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere de üç ana guruba ayrılırlar. Kompozit malzeme ince tek bir tabaka oluşturan matris malzemesi içine elyaflar, kılcal kristaller veya parçacıklardan veya değişik tabaka katmanlarından oluşan tabakalı kompozitler de oluşabilir. Kompozit malzemelerde; genellikle kendi başlarına elde edilemeyen, bileşenlerinin en iyi özelliklerinin bir malzemede toplanması önemli avantaj meydana getirir. Kompozit malzeme üretilmesi ile aşağıdaki bazı özellikler sağlanabilmektedir. Bunlar genel olarak şöyle sıralanabilir:

- a) Yüksek dayanım,
- b) Yüksek sertlik,
- c) Yüksek yorulma dayanımı,
- d) Mükemmel aşınma direnci,
- e) Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- f) İyi korozyon direnci,

- g) İyi termal ve ısı iletkenliği,
- h) Düşük ağırlık,
- i) Çekicilik ve estetik görünümü.

Bütün bu özellikler aynı zamanda oluşmaz ve herhangi bir uygulama için böyle bir gereksinime ihtiyaç da yoktur. Özellikleri bilinen bileşenlerden yararlanılarak bir kompozit malzemenin bazı özellikleri örneğin, yoğunluk, elastik modülleri ve çekme dayanımları hesaplanabilir [3].

2.2.2. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitlerde, yumuşak ve sünek matris içine sert dayanıklı elastikliği yüksek elyaflar ilave edilir ve böylece çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım özellikleri iyileştirilir. Matris malzemesi kuvveti elyaflara aktararak yumuşaklık ve tokluk özelliği sağlarken elyaf uygulanan yükün çoğunu taşımaktadır. Çöktmeyle sertliği artırılmış kompozitlerin aksine, kompozitin dayanımı hem oda hem de yüksek sıcaklıklarda artırılır. Bu takviyeli kompozitlerde oldukça değişik takviye elemanları kullanılmaktadır. Elyaflar, örme veya şerit fitil şeklinde olabilmekle beraber tabakalar halinde yönlü elyaflar da kullanılabilir. Sürekli elyafları çok yönlü takviyelendirebilmek için çoklu filamentler halinde veya dokunmuş örgü halinde kalıp içerisine yerleştirilir. Ön ısıtmadan sonra metal veya alaşımı sıvı metal emdirme veya infiltrasyon metodu ile emdirilerek üretilmektedir. Bu işlem, genellikle de metal matrisli kompozitlere uygulanmaktadır. Beton yapılarda çelik tel çubuğun girmesi, polimer matris içine katılan cam elyaf takviyeli kompozitler, ulaşım ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır. Boron ve grafit elyaflarda polimerlere göre üstün özellikler sağlarlar [3].

2.2.3. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

Parçacıklarla takviyeli kompozitlerde; tek veya iki boyutlu makroskobik parçacıkların veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik parçacıkların matris ile oluşturdukları malzemeler olup ortalama gömülen parçacık boyutu 1µm'den büyük ve elyaf hacim oranı %25'den fazla kullanılmamaktadır. En çok kullanılan parçacıklar Al_2O_3 ve SiC'den oluşan seramiklerdir. Burada yük, elyaf ve matris tarafından birlikte taşınır ve özellikler yine izotropiktir. Bu kompozitler; dayanımı iyileştirmekten ziyade beklenilmeyen alışılmışın

dışında birleştirilmiş özellikler elde etmek için tasarlanmaktadır. Bu kompozitler; metal, seramik ve polimerlerin birleşiminden oluşabilirler. Sert metal uçlar ve beton da örnek olarak verilebilir [3].

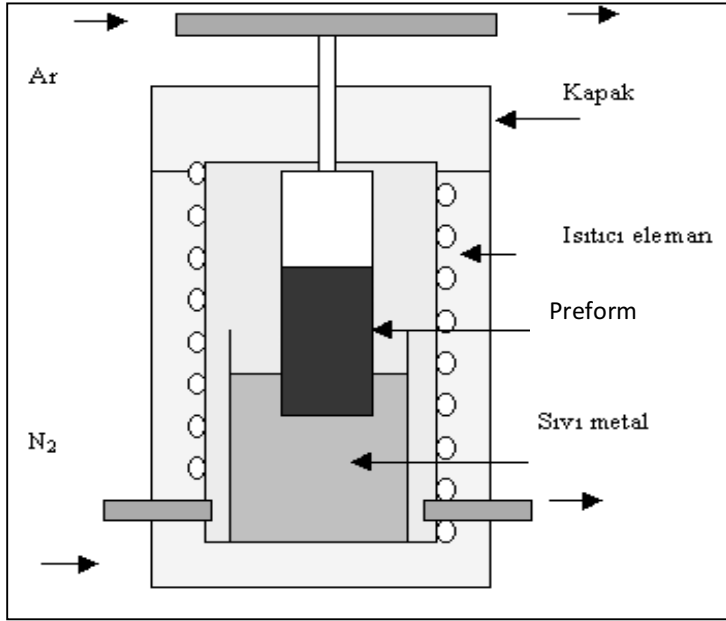
2.2.4. Kompozitlerin üretimi

Kompozitlerin üretim yöntemleri, takviye elemanı olan elyafa, matrise, parça şekline ve istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere göre belirlenir. Üretim teknikleri sıvı hal ve katı hal üretim teknikleri olmak üzere temelde iki yönteme ayrılır.

Sıvı metal emdirilmesi tekniği genelde metal matrisli kompozitlerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılır. Bu metotta önce istenilen şekilde uygun bağlayıcı kullanılarak ön şekil hazırlanır. Hazırlanan bu model kalıp içine yerleştirilir ve ergimiş metal enjekte edilerek ön şekile sıvı metal emdirilerek üretim gerçekleştirilir. Emdirilme işlemi basınç altında da yapılabilir.

Sıkıştırılmalı veya sıvı dökme tekniğinde takviyeden oluşturulmuş preform veya yatağa sıvı alaşım hidrolik basınç altında emdirilmektedir. Sıvıyı soğutma etkisinden kaçınmak için kalıp, preform ve zımba ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır. Takviye preform veya yatağı içerisindeki hava boşlukları veya kalıp ile takviye arasındaki boşluklara zamansız sıvı penetrasyonu tehlikesini azaltmak için kalıp boşluğu içerisine sızdırmaz şekilde yerleştirilir.

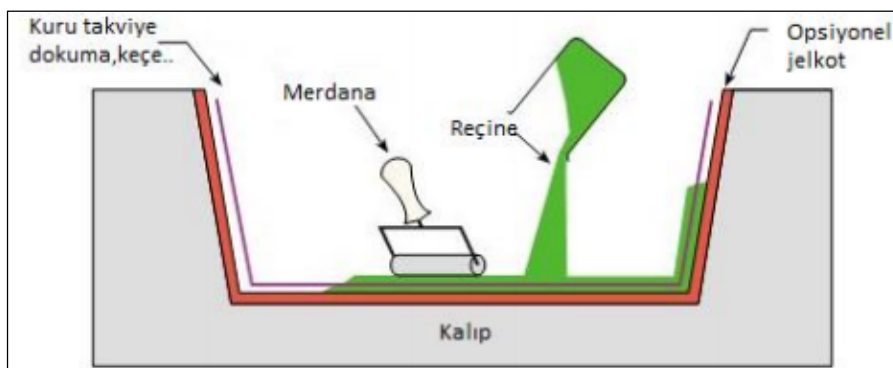
Basınçlı infiltrasyon tekniğinin sıkıştırma dökümden farkı, sıvının preform veya yatak içerisine bir zımba ile değil de basınçlı soygaz ile itilmesidir. Bu şekildeki bir sistem Şekil 2.2.'de şematik olarak gösterildiği gibi, bir ucu basınç ünitesi içerisine yerleştirilmiş pota içerisindeki sıvı metale daldırılmıştır. Diğer ucu normal atmosfer veya vakuma bağlanmış ve içerisinde takviye malzeme bulunan bir silindirden meydana gelmektedir. Takviye geçişi engelleyecek şekilde silindir içerisine yerleştirilir. Silindir içerisindeki bu parçacıklar sıvı metale daldırılır veya başka bir yerde ön ısıtmaya tabi tutulur.



Şekil 2.2. Basıncılı infiltrasyon metodu

Plazma püskürtme tekniğinde püskürtülecek alaşım, indüksiyon fırınında ergitilir ve potaya basınç uygulanır. Ergimiş alaşım püskürtülürken aynı zamanda parçacıklı elyaflar atomize edilmiş sıvı içerisinde enjekte edilerek önceden ısıtılmış alt katman üzerine çökeltir ve toplayıcı üzerinde katı bir çökelti oluşur. Soğuduktan sonra kaplanmış çökelmiş çubuk haddelenmesi için göbekten çıkartılır. Bu metot, alüminyum gibi ergime noktası nispeten düşük olan metallere uygulanmalıdır

Polimer takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan yöntemlere gelince, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, bu tezde kullanılan elle kalıplama denilen üretim sürecine yöntemine göre bir kalıba elle yerleştirilen elyaf kumaşlara bir rulo veya fırça yardımıyla reçinenin emdirilmesi yöntemine göre üretilmiştir.



Şekil 2.3. Elle kalıplama yöntemi ile kompozit üretimi

birleştirilebilir.

2.3. Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Malzemelerin uygun tasarımlarda ve işlevlerde kullanılması, özelliklerinin bilinmesi ile mümkündür. Malzemelerin bu özellikleri yapısıyla ilgilidir. Kullanımda olan birçok malzeme mesela bir uçak kanadında kullanılan alüminyum alaşımı ya da otomobil aksında kullanılan çelik kuvvetlere ya da yüklere maruz kalır. Bu durumlarda malzemenin ve deformasyona yol açmayacak ve kırılmaya neden olmayacak tasarım elemanlarının özelliklerini bilmek gereklidir. Malzemenin mekanik davranışı onun tepkisine veya deformasyona neden olacak uygulanan yük ve kuvvet arasındaki ilişkiyi yansıtır.

Malzemelerin mekanik özellikleri kullanma koşulları ile mümkün olduğunca aynı durumlarda yapılan laboratuvar testleri ile belirlenir. Uygulanan yük, süresi ve bununla birlikte aynı çevresel koşullar testler yapılırken dikkate alınır. Üreticileri, malzeme tüketicileri, araştırma organizasyonları ya da devlet kurumları gibi çeşitli taraflar mekanik özellikler hakkında bilgi sahibi olmak isteyebilir. Sonuç olarak testlerin yapılma ve sonuçlarının yorumlanmasında tutarlılıkların olması gerektiği kaçınılmazdır. Bu tutarlılıklar standartlarla sağlanmıştır [19].

2.3.1. Sertlik testi

Yapılışının basit olması ve malzemeye hasar vermemesi nedeniyle malzeme üzerinde yapılan en genel mekanik testlerden biri sertlik testidir. Ayrıca, bir malzemenin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasında paralel bir ilişki de bulunmaktadır ve bu sayede diğer bazı özellikler hakkında fikir edinilebilmektedir. Örneğin çeliklerde, çekme mukavemeti sertlik değeri ile orantılıdır. Dolayısıyla yapılan basit bir sertlik testi sonucunda o malzemenin mukavemet değerleri hakkında da fikir edinilebilir. Sertlik izafi bir ölçü olup, malzemelerin sürtünmeye, kesilmeye, çizilmeye ve plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tarif edilir [20]. Bilimsel anlamda ise malzemelerin yer değiştirme (dislokasyon) hareketine karşı gösterdiği direnç olarak tarif edilir.

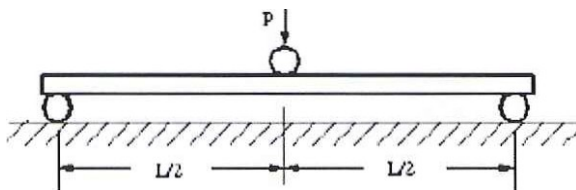
Sertlik ölçme genellikle, konik veya küresel standart bir ucun malzemeye batırılmasına karşı malzemenin gösterdiği direnci ölçmekten ibarettir. Birçok sertlik ölçme testi bulunmakla

beraber, bu testleri sonuçları arasında matematiksel ilişkiler mevcut olup bir değerden diğerine geçiş yapılabilir. Sertlik ölçümleri yapılırken, yöntem ne olursa olsun numune üzerinde birkaç ölçüm yapıp bunların ortalaması alınmalıdır.

Brinell sertlik değeri (BSD): Belirli çapta bir bilye ile bir malzemenin yüzeyine belirli bir süre bastırarak suretiyle meydana getirilen kalıcı izin büyüklüğü ile ilgili bir değerdir. Brinell sertlik değeri, bilye üzerine uygulanan yükün numune yüzeyi üzerinde elde edilen küresel yüzey alanına bölünerek belirlenir. Brinell yönteminin haricinde, endüstride ve bilim dünyasında Rockwell sertlik ölçme yöntemi, Vickers sertlik ölçme yöntemi ve mikro sertlik ölçme yöntemi de kullanılmaktadır.

2.3.2. Üç noktalı eğilme testi

Eğilme, iki desteğe serbest olarak oturtulan genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir parçanın yön değiştirmeksizin ortasına bir eğilme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değiştirmesidir. Eğilme testi malzemelerin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. Enine yük taşıyan kiriş gibi elemanlar eğilmeye maruz kalırlar. Kirişin her bölgesine eğilme momentleri meydana gelir. Bu da eğilme gerilmesi ile alakalıdır. Sabit veya değişken yükleme şartlarında, elâstik deformasyon sahasında çubuğun dayandığı en fazla eğilme yükü bulunur. Eğilme testi ile malzemenin elastisite modülü, eğilme moment, eğilme dayanımı ve en yüksek sehim miktarı tespit edilir. Üç nokta eğilme testi gösterimi Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5. Üç nokta eğilme testi gösterimi

2.3.3. Basma direnci ve basma testi

Basma gerilmesine maruz kalan malzemelerin temel mekanik özelliği basma testi ile belirlenir. Basma testleri çekme makinelerinde yapılır ve işlem itibarı ile çekme testinin

tersidir. Homojen bir malzemede gerçek gerilme-birim şekil değişimi için çekme ve basma durumları aynıdır. Basma gerilmesine maruz kalan malzemeler genellikle gevrek malzemelerdir. Basma testi sırasında numunenin kesit alanı sürekli olarak büyüdüğü için boyun oluşumu yoktur. Basma testi bilhassa gevrek ve yarı gevrek malzemelerin sünekliğinin hassas bir şekilde belirlenmesinde kullanılır. Basma numunelerinde önemli bir değişken, numunenin boy/çap oranıdır. Bu oranın çok büyük olması durumunda bükülme problemi ortaya çıkar. Basma testi, çekme testinin yapıldığı cihazlarda basma plakaları arasına yerleştirilen numuneye basma kuvveti uygulanarak gerçekleştirilir.

Basma testi ile elde edilen şekil değişimi ve dayanım büyüklüklerinin tanımları genellikle çekme testindekilere benzer. Basma testinde de basma yükünün orijinal kesit alanına bölünmesiyle mühendislik basma gerilmesi hesaplanır. Burada da akmaya neden olan yükün numunenin test öncesi orijinal kesit alanına bölünmesiyle akma gerilmesi hesaplanır.

$$\sigma_{m,a} = F_a/A_0 \quad (2.1)$$

Çekme testinde olduğu gibi belirgin akma noktası göstermeyen malzemelerin akma gerilmesi, mühendislik basma diyagramı üzerinde %0,2'lik plastik deformasyona neden olan gerilme değeri alınarak hesaplanır. Metalik malzemelerin çekme ve basma testleri ile elde edilen akma gerilmesi değerleri birbirine eşittir.

Basma testi sırasında gerçek kesitin (A_i) giderek büyüdüğü dikkate alınırsa, gerçek basma gerilmesi ($\sigma_{b,g}$), çekme testine benzer şekilde;

$$\sigma_{b,g} = F_i/A_i \quad (2.2)$$

yardımıyla bulunur.

Metalik malzemelerin gerçek çekme ve basma diyagramları birbirinin aynısıdır. Ancak, mühendislik çekme ve basma diyagramları, plastik bölgede birbirinden farklıdır. Bu bölgede mühendislik basma gerilme değerleri mühendislik çekme gerilmesi değerlerinden daha fazladır.

Basma testi ile malzemelerin sünekliği veya deformasyon kabiliyeti % şekil değiştirme oranı

ile belirlenir. Basmada malzemenin sünekliği, genel olarak numune yüzeyinde ilk görülebilir çatlağın teşekkül ettiği deformasyon miktarı olarak tayin edilir.

Bunu yaparken karşılaşılan en büyük zorluk, numune ile plakalar arasındaki sürtünmeden kaynaklanan şişme veya fıçı oluşumudur. Bu durumda homojen olmayan deformasyon meydana gelir ve elde edilen değerlerin güvenilirliği azalır. Bunu önlemek için uygulanan yöntem ara yüzeyin yağlanması ve bu sayede sürtünme etkisinin en aza indirilmesidir.

2.3.4. Darbe testi

Darbe dayanımı, malzemenin yüksek hızdaki stres altında kırılmaya karşı direnci olarak tanımlanır [21]. Malzemenin dinamik yüklere karşı kırılma enerjisini belirlemek için yapılmaktadır. Malzemenin darbelere karşı dayanma direnci, malzemenin kullanım süresi için veya tasarlandığı özel amaç için temel gereksinimlerden biridir. Tasarımlarda darbe etkisi sıklıkla karşılaşılan tasarım değişkenidir. Mesela silindir cıvata başları kırılmadan belli miktardaki enerjiyi depolayabilecek özellikte olmalıdır. Statik testlerde, enerji emme kapasitesi dayanım olarak isimlendirilmiş ve kopma dayanımı olarak tanımlanmıştır. Dinamik yüklerde ise benzer dayanım kavramı darbe testi ile belirlenmektedir. Genellikle bir malzemenin darbe direnci enerjisi (tokluğu) ile sünekliği arasında bir ilişki vardır. Fazla süneklik göstermeyen malzemelerin (%1-2'in altında) darbe dirençleri de düşüktür. Bir malzemenin çekme (gerilme)-uzama eğrisi altında kalan alan ne kadar fazla ise o malzeme o kadar çok darbeye karşı direnç gösterecektir. Bununla birlikte malzemenin darbe direncine malzemenin sıcaklığının, bileşiminin etkisi, haddeleme yönünün etkisi, üretim yönteminin etkisi, ısıl işlemin etkisi, yüzeyinin belli metotlarla sertleştirilmesinin, tane büyüklüğünün ve mikro yapısının etkisi vardır.

İlk kez 1896'da B.Russell artık kırılma enerjisi fikrini ortaya atmış ve sarkaçlı kırılma testini tertiplemiştir. Russell'ın başlangıçtaki testleri çeltiksiz numunelerdi. 1897'de Fremont yay yüklü makine ile aynı testi gerçekleştirmiştir. 1901'de ise Georges Charpy Russel'in yöntemini geliştirmiş, çeltikli numuneler ile standardize edilmiş bir metot sunmuştur.

Darbe testi numunelerin hazırlanması ve testin gerçekleştirilmesi ile ilgili birçok test normu tanımlanmıştır.

Charpy Testleri (ISO 179-1, ASTM D 6110)

Izod Testleri (ISO 180, ASTM D 256, ASTM D 4508) ve Çıkma Kirişlerde Çentiksiz Darbe

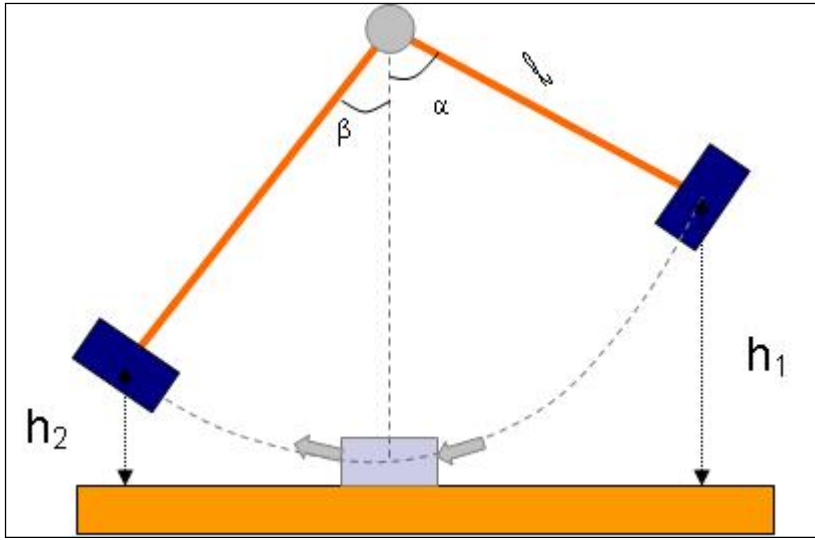
Testleri (ASTM D 4812)

Darbeli Çekme Testleri (ISO 8256 ve ASTM D 1822)

Dynstat Darbeli Eğme Testleri (DIN 53435)

Bunlardan en yaygın olanları Charpy ve Izod testleridir. Temel prensip aynıdır. Charpy test numunesi yatık olarak, Izod test numunesi dik olarak darbe test cihazına yerleştirilir. Çentik sünek malzemelerde kırılmayı kolaylaştırmak amacıyla kullanılırken kırılğan malzemelerde çentik yapılmaz.

Bu testin temel prensibi Şekil 2.6'da görülen l uzunluğundaki bir sarkacın ucundaki belli bir G ağırlığına sahip çekicinin belli bir h_1 yüksekliğinden darbe testi yapılacak numuneyi kırması için serbest bırakılması ile birlikte numune kırıldıktan sonraki sarkacın çıktığı yükseklikten h_2 yararlanılarak kırılma enerjisinin bulunmasıdır.



Şekil 2.6. Darbe testi prensibi

Serbest bırakılmadan önce sarkacın sahip olduğu potansiyel enerji $G.h_1$ iken numune kırılıp sarkaç serbest kalan sarkacın son ulaştığı yükseklikteki potansiyel enerjisi $G.h_2$ olmuştur. Bu durumda kırılma enerjisi (KE) şu formülle hesaplanır:

$$KE = Gxh_1 - Gxh_2 \quad (2.3)$$

Yükseklikleri sarkaç boyu olan ve bilinen l değeri kullanarak yazılacak olursa formül

$$KE = G \times \ell \times (\cos\beta - \cos\alpha) \quad (2.4)$$

G = Sarkacın ağırlığı (kg)

ℓ = Sarkacın ağırlık merkezinin, sarkacın salınım merkezine uzaklığı (m),

h = Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m),

h_1 = Sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m),

α = Düşme açısı (derece),

β = Yükseliş açısı (derece)

olarak ifade edilebilir. Burada β salınım açısı ve h_2 yüksekliği ne kadar az gerçekleşirse kırılan o malzemenin ne kadar çok darbe direnci ya da yüksek tokluk gösterdiğini anlarız.

2.4. Sürtünme ve Aşınma

Sürtünme teknikte, birbiriyle temasta olan ve birbirine göre izafi hareket yapan ya da yapma eğiliminde olan iki cismin harekete karşı gösterdikleri direnç olarak tanımlanır. İki cisim arasındaki izafi hareketi meydana getirmek isteyen kuvvete karşı, cisimlerin temas yüzeyleri arasında hareketi engelleyen ve sürtünme kuvveti olarak tanımlanan bir karşı kuvvet oluşur. Birbirlerine temas eden yüzeyler arasında izafi hareket yoksa statik sürtünmeden bahsedilir. İzafi hareket iki cisim yüzeyleri arasında mevcutsa bu durumdaki sürtünmeye dinamik veya kinetik sürtünme denir. Sürtünme kuvveti sabit değildir ve sürtünme katsayısına bağlıdır ve bu katsayının değişimiyle beraber değişir. İzafi hareket yapan cisimlerin söz konusu yüzeyleri arasına yağlayıcı bir madde konulup konulmaması açısından sürtünme, (a) kuru sürtünme, (b) sıvı sürtünme ve bu (c) iki sürtünme türü arasında kalan sınır sürtünme olmak üzere üç durumda incelenir [22].

Aşınma yüzey ile sürtünen cisim arasındaki hareket nedeniyle genellikle malzeme kaybıyla eşlik eden yüzeye verilen hasar olarak tanımlanır. Abrasif aşınma sert yüzey boyunca kuvvet uygulanarak sert parçacıklara neden olmalıdır. İki yüzeyli aşınmada, aşınma bir yüzeyin pürüzlülüğü olan diğer yüzey üzerinde kaymasıyla gerçekleşir [23]. Aşınma miktarı malzemenin türüne, sürtünen yüzeylerin biçimine, sürtünme koşullarına ve çevrenin kimyasal etkilerine bağlıdır. Abrasif aşınma, aşınma türleri arasında en önemlisi olarak bilinir, çünkü tüm aşınma maliyetinin %64'ünü oluşturur. Bu yüzden abrasiv aşınma

hakkında birçok çalışma yapılmaktadır.

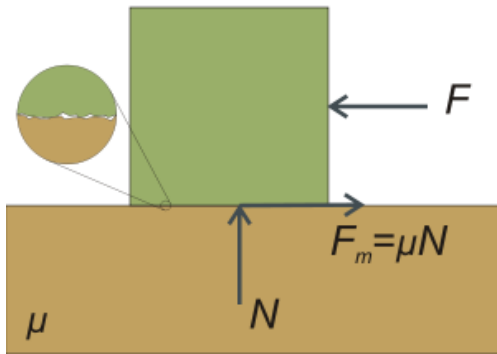
2.4.1. Sürtünme

Sürtünme katsayısı

İki malzeme birbirine temas edecek şekilde yerleştirilirse, malzemelerin birbiri üzerinde kaymasını sağlamak için uygulanan kuvvete dik yönde olacak şekilde, bir sürtünme kuvveti (direnç) oluşur. Kaymayı başlatan kuvvet (F_s) ile temas yüzeyine etki eden kuvvet (N) arasında,

$$F_s = \mu_s \cdot N \quad (2.5)$$

bağıntısı mevcuttur. Burada μ_s , statik sürtünme katsayısıdır.



Şekil 2.7. Sürtünme kuvveti ve katsayısı

Malzemelerin herhangi birine teğetsel bir kuvvet uygulanırsa, iki durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda, teğetsel kuvvete rağmen cisimler birbiri üzerinde kaymaz, yani hareket edemezler. Bu durumda hareket olanağı olmadığından yüzeyler arasında "statik sürtünme" denilen bir direnç oluşur ve Newton kanununa göre F_s sürtünme kuvveti teğetsel sürtünme kuvvetine eşit ve ters yöndedir.

Kavrama ve fren gibi sürtünme ile çalışan sistemlerde gerçekte bu sürtünme hali mevcuttur. Diğer durumda ise, F_t teğetsel kuvvetin etkisi altındaki yüzeyler birbiri üzerinde kayarlar. Kinetik veya dinamik sürtünme denilen bu halde, F_s sürtünme kuvveti F_t teğetsel

kuvvetinden daha küçüktür ve harekete ters yöndedir. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, kaymanın başlamasıyla birlikte sürtünme kuvvetinde bir azalma görülür ve bu durumda,

$$F_s = \mu_k \cdot F_n \quad (2.6)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada μ_k ($< \mu_s$) kinetik sürtünme katsayısıdır.

Kinetik sürtünme katsayısı, statik sürtünme katsayısından daha küçük değerdedir. Bunun sebebi, dinamik haldeki yüzeylerde bulunan küçük çıkıntılar statik haldeki gibi yapışmak için gerekli zaman bulamazlar. Bu nedenle geçilmesi gereken temas alanı azalır. Eşitlik 2.5 göz önüne alınacak olursa μ_k değeri μ_s 'ye göre daha küçük değer alacaktır. Kayma durur durmaz, sürtünme temas yüzeylerini n çok az büyümesine müsaade eder ve burada, yayınma mekanizması bağların kuvvetlenmesini sağlar. Böylece sürtünme katsayısı yeniden μ_s değerine ulaşır [22].

Pratikte sürtünme denilince akla gelen kinetik sürtünmedir ve aşınmada, enerji kaybı ve sıcaklık artışı gibi olaylar sürtünme nedeniyle oluşmaktadır. Bu açıklamaya bağlı olarak, uygulama alanlarını göz önünde bulundurarak, sürtünmenin hem istenen hem de istenmeyen bir olay olduğu söylenebilir. Fren, kavrama ve sürtünmeli çarklar gibi makine elemanlarında istenilen bir olay olduğu için sürtünme artırılmaya çalışılır. Oysa diğer izafi hareket yapan bütün sistemlerde, sürtünme istenmeyen bir olaydır ve azaltılması istenir [22].

Yüzey pürüzlülüğü ve gerçek temas alanı

Tornalanmış veya eş çalışmış malzemelerin yüzeyleri mikroskop altında incelenecek olursa yüzeylerinde çok sayıda girinti ve çıkıntıların yani pürüzlülüklerin olduğu görülür. Yüzeyler parlatıldığında veya talaşlı işleme tabi tutulduğunda pürüzlülüklerde azalma olur. Fakat yine de yüzeyler pürüzlülükler bulunur. Ne kadar hassas işlenmiş veya parlatılmış olursa olsunlar, iki yüzey birbiriyle temas ettiğinde, gerçek temas bir takım pürüzlülüklerin birbirine temas ettiği noktalarda oluşur. Bu durumda yüzeye etki eden yük, sadece pürüzlülüklerin birbirlerine değdiği noktalardan desteklenir ve yüzey alanının küçük bir kısmı yükü taşır [22].

Kayma sürtünmenin kuralları

Genellikle birçok uygulamaya uyan asıl (veya konvansiyonel) sürtünmenin iki temel kuralı vardır. Bu kurallar Amonton kuralları olarak bilinir. Leanordo Da Vinci ondan 200 yıl önce bu kuralları açıklamıştır.

İkinci kural; sürtünme kuvveti (veya sürtünme katsayısı) temas halindeki cisimler arasında görünen temas alanından bağımsızdır. Bu yüzden fiziksel boyutuna bakmadan iki cismin sürtünme katsayısı aynıdır [23].

Bu iki kurala bazen üçüncü bir kural eklenir. Bu da, kinetik sürtünme kuvveti (veya sürtünme katsayısı) hareket bir defa başladığında kayma hızından bağımsızdır. Coulomb statik ve kinetik sürtünme arasında açık bir ayrım yapmıştır. Bu üç kural tamamen deneyseldir [23]. Fakat özellikle uygulanmış veya çevre ile tepki sonucu oluşmuş yüzey filmleri olan malzemelerde sürtünme katsayısı yükün bir fonksiyonu olarak sabit kalmayabilir. Yüzey pürüzlülüğünün artması aşınma tozlarının miktarının fazla olmasının sürtünmeyi azalttığına inanılmaktadır [23]

Sürtünme katsayısı polimerler gibi yumuşak malzemeler ve çok düzgün ve temiz yüzeyler için sabit kalmayabilir (bu durumda gerçek temas alanı görünen temas alanına eşittir). Örneğin, otomobil tekerleğinin cadde üzerindeki sürtünme katsayısı tekerlek genişliğinin büyümesi ile artar [23].

Kinetik sürtünme katsayısı kayma hızının bir fonksiyonu olarak genellikle negatif eğimlidir. Sürtünme-hız eğrilerinin eğimi her zaman azdır. Sürtünme katsayısının hızla değişimi çok azdır. Kayma hızındaki değişiklikler kesme hızını değiştirir, bu da malzeme çiftlerinin mekanik özelliklerini etkileyebilir. Birçok metal ve metal olmayan (özellikle polimerler) malzemelerin mukavemetleri yüksek kesme hızlarında daha yüksektir. Bu da daha küçük gerçek temas alanı ve kuru sürtünmede daha düşük sürtünme katsayısına neden olur. Diğer taraftan yüksek normal basıncı ve yüksek kayma hızı ara yüzey sıcaklığını artırır, bu da birçok malzemenin mukavemetini düşürür ve sıvı tabaka içindeki viskoz kuvvetler tarafından belirlenen düşük bir sürtünme değeri oluşur [23].

Özetle, ilk iki kural birçok durumda uygundur. Şunu vurgulamak gerekir ki, verilen bir çift

malzemenin kayması için verilen işlem şartları altında (sıcaklık, nem, normal yük ve kayma hızı) μ katiyen sabittir. Birçok malzeme kuru ve yağlamalı temaslardaki statik ve kinetik sürtünme katsayılarında normal yük, kayma hızı ve görünen alana bağımlılık gösterir. Bu yüzden verilen bir değer dikkatle kullanılmalıdır [23].

Bowden ve Tabor [24] kayma temasındaki iki metalde mevcut temas noktalarında yüksek basıncın oluştuğunu bunun da yerel kaynamaya neden olduğunu ve bu yüzden oluşan temasların sonradan yüzeylerin rölatif kayması ile paylaşıldığını ileri sürmektedir. Daha sonra pürüzlerin kaynaklanmasının gerekmediği fakat metal ve seramiklerin sürtünmesinde pürüzler arasında sadece iç adezyonun yeterli olacağı tartışılmıştır. Yüzeyler arasındaki gerçek temas alanında (pürüz teması) oluşan adezyonu yenmek için sürtünme enerjisine (veya kuvvet) ilaveten, hareket boyunca temas yüzeylerinin mikro boyuttaki deformasyonu için de enerjiye ihtiyaç vardır. Yüzeylerden birinin pürüzleri (şayet farklı malzemeler ise sert olanı) diğerini plastik deformasyon ile çizer, bu makro boyuttaki deformasyon (oluk açma) için enerjiye ihtiyaç vardır. Viskoelastik malzemelerde (polimerler gibi) deformasyon kuvveti, elastik histerisiz kayıplarından ortaya çıkar. Bu teoriler, ilk önce Bowden ve Tabor tarafından ileri sürülmüştür ve metal ve seramiklerin sürtünmesinde en çok kabul gören teorilerdir. Metal ve seramiklerde enerji kaybının baskın mekanizması plastik deformasyondur. Ara yüzeylerin elastik deformasyonu boyunca çok az bir enerji kaybı vardır. %0,1-10 (genellikle %1'den az) bir enerji kaybı titreşimler ile oluşabilir. Mühendislik ara yüzeylerinde deformasyon, öncelikle elastik olsa bile biraz plastik deformasyon da oluşur. Deformasyon türünü ihmal etsek, hareket boyunca adhesif bağların kırılması için enerjiye ihtiyaç vardır [23].

Deneylerdeki sürtünme katsayısı yük hücre sensörü tarafından ölçülen sürtünme torkundan elde edilir ve bilgisayar ekranından edinilmektedir.

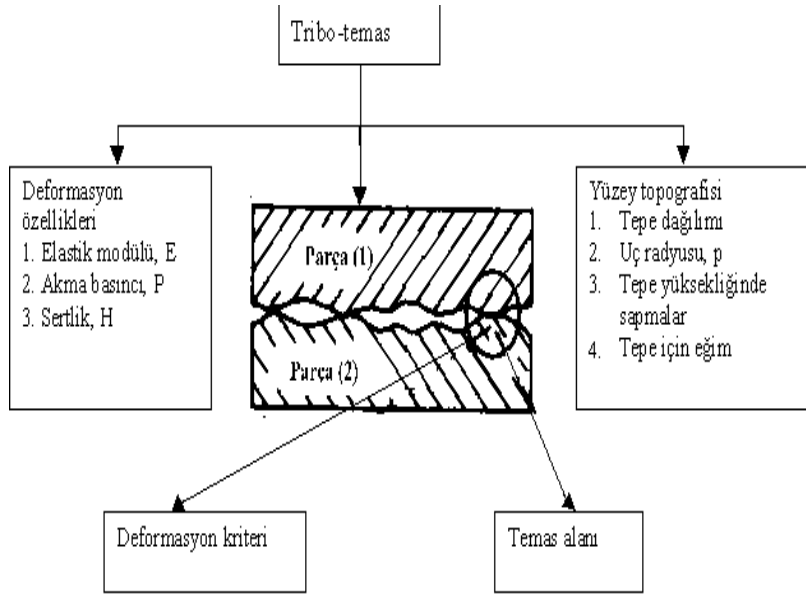
2.4.2. Aşınma

Aşınma; kimyasal ve/veya mekanik etkilerle istenmeyen malzeme kaybı olarak tanımlanır. Bir aşınma sisteminde;

- a) Ana malzeme (aşınan)
- b) Karşı malzeme (aşındıran)

- c) Ara malzeme
- d) Yük
- e) Hareket,

aşınmanın temel unsurlarıdır. Bu unsurların oluşturduğu sistem teknikte "Tribolojik Sistem" olarak adlandırılır. Şekil 2.8'da tribolojik sistemin elemanları gösterilmiştir. Tribolojik sistemin iki bileşene ayrılabilir. Birincisi deformasyon özellikleri olan Elastik modül, akma basıncı ve sertlik iken; ikincisi yüzey topografisi olup tepe dağılımı, tepe şekli, uç radyüsü ve tepe eğilimi gibi bileşenleri içerir.



Şekil 2.8. Tribolojik sistem ve elemanları

ASTM (American Society for Testing and Materials-Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu) tarafından yapılan tanıma göre aşınma; yüzey ve karşı malzeme arasında hareketten oluşan ve genellikle yüzeyde malzeme kaybının eşlik ettiği malzeme yüzeyindeki hasardır. Aşınma türleri; (a) abrasiv aşınma, (b) kuru aşınma, (c) yorulma aşınması, (d) erozyon aşınması ve (e) korozyon aşınmasıdır. Son zamanlardaki tribolojik çalışmalara göre abrasiv aşınma endüstrideki en fazla miktarda malzeme kaybına neden olan aşınma türüdür [16, 25].

Abrasif aşınma: Abrasif aşınma iki yüzeyden birinin çok sert ve yüzeyin pürüzlü olduğu şartlarda oluşan bir aşınmadır. Benzer davranış çok sert aşınma ürünlerinin ve yabancı parçacıkların daha yumuşak yüzeyi kazıması ve çizmesiyle de görülmektedir. Mohs sertlik

gösteriş çizelgesine göre fark edilebilir bir abrasiv etki için malzemelerden birinin diğerinden %10 daha fazla sert olması gerekir [22].

Aşınma türlerinden abrasiv aşınma vanalarda, dişlilerde, pompalarda, sıcak ve şoka maruz kalan çelik millerin boyun rulmanlarında, salmastra ve contalarda sıklıkla karşılaşılır [16].

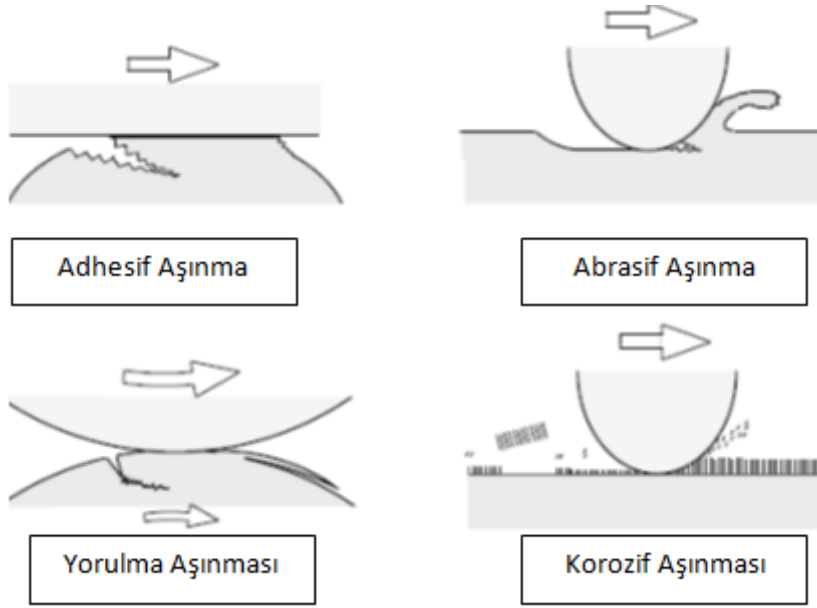
Kuru aşınma: Yapışma aşınması olarak da bilinir. Bu tür aşınma iki malzemenin birbiri üzerinde hareket etmesi sırasında metalik birleşimlerin oluşumu ve daha sonra kayma sonucunda küçük parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelir. Eğer bir yüzey diğer bir yüzey üzerinde hareket halinde ise, kaynamanın olduğu bölgeler tamamen veya kısmen parçalanır. Ortaya çıkan malzeme aşınma ürünü oluşturarak düşebilir veya yüzeyler arasında kalırsa abrasiv aşınmaya sebep olabilir [22].

Yorulma aşınması: Malzemeler de oluşan diğer aşınma türü yorulma aşınmasıdır. Yorulma aşınması ısı ve mekanik olmak üzere iki şekilde oluşur. Isıl yorulmaya tekrarlı ısıtma ve soğutma neticesinde malzemede değişken gerilmelerin ve aşırı ısıl gradyanın oluşması sebep olur. Mekanik yorulmaya ise malzemeye uygulanan tekrarlı gerilmeler neden olur.

Erozyon aşınması: Erozyon aşınması kat parçacıklar içeren bir akışkanla bağlı hareket ve temas halinde olan katı bir yüzeyden malzeme kaybı erozyon aşınmasıdır [22].

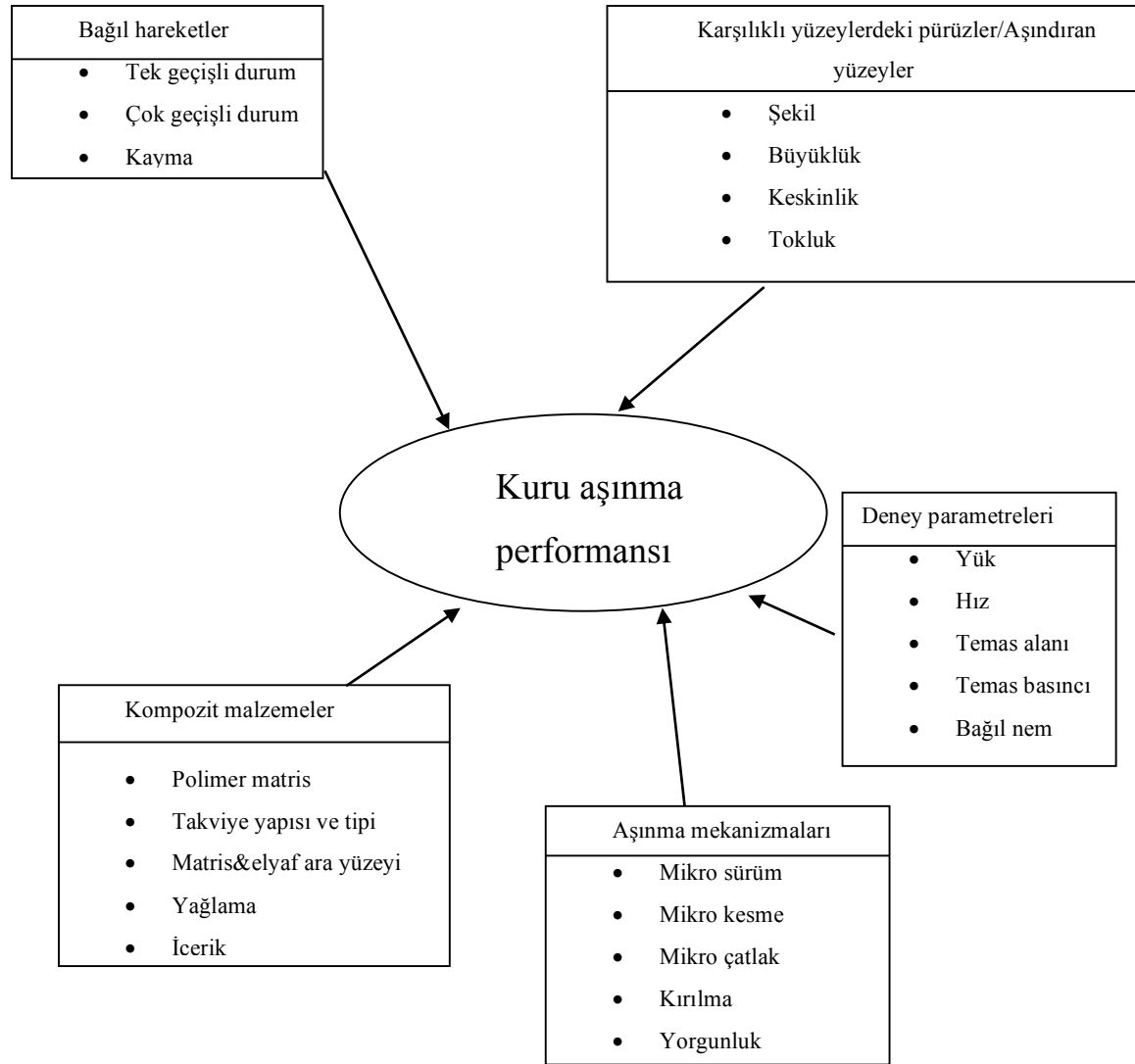
Korozif aşınması: Korozyon aşınması kimyasal ve elektrokimyasal tepkimenin çevresel olarak fazla olması durumunda meydana gelen bir aşınma şeklidir. Oksitleyici aşınma bir korozif aşınma şeklidir, oksijenle kimyasal tepkime veya baskın bir oksitleyici ortamın olması durumunda görülür [22].

Aşınma türleri Şekil 2.9'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Aşınma türleri

Deneylerde aşınma oranları, ağırlık farkından hesaplanan gram olarak aşınma miktarının hacminin bulunması ve bunun uygulanan kuvvet ve aşınma mesafesine bölünmesi ile bulunmaktadır [6, 26]. Aşınma direnci ise aşınma oranının tersidir. Yorulma mekanizması dışında bütün mekanizmalardaki aşınma malzeme kaybıyla meydana gelir [23]. Şekil 2.10'da özet olarak aşınmaya etki eden tüm faktörler özet olarak bir arada gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Abrasif aşınma üzerine etki eden faktörler

3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Düşük maliyet ve iyi mekanik özellikler, kompozit malzemelerde bazalt takviye elemanına olan ilgisini artırmış; bu konuda yeterli çalışmanın olmaması ve endüstride cam elyaflar kadar yaygın olmaması da konu ile ilgili araştırmaların artmasına neden olmuştur. Bu bölümde bazalt kumaş takviyeli kompozitlerle ilgili yapılan çalışmaların özeti verilmiştir.

Lopresto ve diğerleri [15] 300 mm x 300 mm boyutlarındaki bazalt elyaflarla cam elyafları plastik matris içinde vakum çanta yöntemi ile üretilip, çekme ve basma testleri ile bükme ve kayma gerilimini karşılaştırmışlardır. Deneyler sonucunda, bazalt elyaflar e-cam elyaflara oranla %16 daha yüksek dayanıma sahip olduğu rapor edilmiştir. Bazalt takviyeli kompozitlerin çekme, bükme ve basma elastik modülü değerleri e-cam elyaflara göre %35 ila %42 oranlarında daha yüksek çıkmıştır.

Yapılan eğilme testi sonrasında farklı cam elyaf takviyeli kompozitlerde malzemenin üst tarafında hasar varken, bazalt takviyeli kompozit örneğinde malzemenin alt tarafında hasar oluşması her iki malzemenin farklı hasar mekanizmasına sahip olduğunu göstermektedir. Bazalt takviyeli kompozitlerin e-cam elyaflarına göre %11 daha fazla enerji emdiği ettiği gözlenmiştir. Çarpma testi sonrası, E-cam malzemedeki bazalta göre daha geniş hasar alanı tespit edilmiştir. Deneylerin sonuçlarında bazalt takviyeli kompozit e-cam takviyeli kompozite oranla daha iyi mekanik sonuçlar göstermiştir.

Rajkumar ve diğerleri [7] ise yaptıkları çalışmada epoksi matris içinde farklı oranlarda bulunan bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımını, bükme dayanımını ve darbe testi sonrası enerji emilimlerini incelemişlerdir. Bunun için 300 mm X 300 mm X 3 mm ebatlarında test örneği ile %35-65; %40-60 ve %45-55 ağırlık oranlarında elyaf-matris oranlarındaki üç test örneği ile testler yapılmıştır. Malzeme 107 Pa basınçla 80°C sıcaklıkta 4 saat boyunca hazırlanmıştır. Çekme testi ASTM D3039, bükme testi ASTM D790, darbe testi ise ASTM D256 standartlarına uygun gerçekleştirilmiştir. Sonuçlardan 45:55 oranına sahip numunenin daha fazla bükme ve darbe dayanımına sahip olduğu fakat oran arttıkça yapışma etkisinden dolayı çekme dayanımının azaldığı görülmüştür.

Preto[2], bazalt takviyeli polyester matrise sahip kompozitler üzerine yaptığı çalışmada çekme testi, basma testi, bükme testi ve kayma gerilmesi testlerini ASTM standartlarına göre

sırasıyla 250mmx25mm; 140mmx25mm; 140mmx25mm; 150mmx75mm boyutlu numunelere uygulamış ve sonuçlarını tartışmıştır. Deney sonucunda çekme stresinin 291,1 MPa, çekme modulusünde 14,3 GPa çıktığını, basma gerilmesinin 95,2 MPa çıktığını basma modülü değerlerinin 18,7 ve 18,8 GPa çıktığını belirtmişlerdir. Üç noktalı eğilme testi sonucunda ise bükme gerilmesi 350,9 MPa elastik modülü 13,1 GPa çıkmıştır. Kayma gerilmesi değeri ise 42,5 MPa olarak not edilmiştir.

Beken ve diğerleri [9] ise izoftalik polyester matrisli e-cam ve bazalt takviyeleri kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine yaptıkları çalışmalarında çekme, üç nokta eğilme ve darbe testlerini uygulamışlardır. ASTM standartlarına göre 250 mm x 25 mm boyutlarındaki numuneye uygulanan çekme testinde cam elyafli kompozitlerin 45,10 MPa ve 67,23 MPa; bazalt elyafli kompozitlerin 61,41 MPa ve 61,42 MPa dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Kompozitlerin yüzde elyaf hacim oranı eşitlendiğinde ise ince çaplı bazalt elyafın kalın çaplı bazalt elyaf içeren kompozitlerden %41,7; ince takviyeli cam elyaf içeren kompozitlerden %41,8 ve kalın çaplı cam elyaf içeren kompozitlerden %113,2 daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca SEM fotoğrafları incelendiğinde kopmanın e-camı takviyeli kompozitte elyaf-matris ara yüzeyinde meydana geldiği, bu nedenle e-camı takviyeli kompozitlerde ara yüzey bağlantısının zayıf olduğu yorumu yapılabilir. Bazalt takviyeli kompozitte ise kırık kesitte elyafların üzerinde matris kaplı olması kırılmanın matriste gerçekleştiği ve ara yüzey bağlantısının kuvvetli olduğu şekilde yorumlanabilir. E-camı kompozitlerin bazalt takviyelilere göre daha düşük mekanik özellikler sergilemesinin nedenleri arasında söz konusu ara yüzey uyumsuzluğu ve bunu neden olduğu zayıf ara yüzey bağlantısı yer alabilir.

Eğilme testi sonuçlarına göre cam elyaf takviyeli kompozitlerde 212,77 MPa ve 266,45 MPa olan dayanım, bazalt elyaflarda 206,30 MPa ve 214,58 MPa olmuştur. Eşit elyaf hacmine göre karşılaştırma yaptığımızda ince yapıli bazalt elyafların kalınlara oranla %16,9, ince cam elyaflara oranlar %62,5 ve kalın cam elyaflara oranla %119,6 yüksek olduğu görülmüştür.

Darbe testi sonuçlarına göre bazalt elyaf takviyeli kompozitler 143,07 MPa ve 142,32 MPa darbe mukavemetine sahipken; cam elyaf takviyeli kompozitler 139,27 MPa ve 76,47 MPa darbe mukavemetine sahip çıkmışlardır. Sonuçta, elde edilen mukavemet değeri artan elyaf hacim oranı ile artarken, elyaf kalınlığına göre değışiklik gösterdiği belirlemiştir. Tüm testlerde bazalt takviyeli kompozitler daha iyi mekanik davranış göstermiştir.

Fiore ve diğerleri [12] yaptıkları çalışmada cam-bazalt epoksi hibrit kompozitlerin deniz sektöründe uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Bazaltın inert ve doğal olmasından dolayı deniz suyu ortamına dayanıklı olması, eğilme testi ve çekme testi ile mekanik özelliklerini araştırmaya yönlendirmiştir. Yedi ayrı örnekte altı katlı kompozitin her katının ve tamamının bazalt takviyeli olmasının örneklendirildiği numunelerde eğilme testi sonucuna göre cam katmanı tek yönlü bazalt ile değiştirildiğinde %23 oranın daha düşük eğilme dayanımı elde edilmiştir. İki dış katmanı bazalt elyaflarla değiştirince eğilme mukavemetinde %44 lük bir artış elde edilmiştir. Yapılan çekme testinde cam katmanı bazalt elyafı ile değiştirince çekme mukavemetinde %14 ila %17,3 arasında bir iyileşme sağlandığı görülmüştür. Eğme dayanımında olduğu gibi dış katmanların bazalt elyafı ile değişimi çekme dayanımını %45 oranında arttırmıştır. Geminin yatay yüzeyinde cam elyaf katmanlarda stres 150MPa ile 260MPa arasında iken bazalt takviyede 90 MPa ile 150 MPa olarak gözlenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki hibrid kompozitler, bazalt elyaf ve cam elyafına kıyasla daha üstün özelliklere sahiptir ve bot üretiminde kullanılabilir.

Khan ve diğerleri [17], polipropilen matrise sahip kısa hintkeneviri ve kısa e-cam takviyeli kompozitlerin üretimi ve özelliklerini araştırmışlardır. Tarım kaynaklı takviye malzemelerin Hint keneviri gibi hem çevreye dost hem de insan vücudu ile uyumlu ve daha ucuz olması bu konuda yapılan çalışmaları arttırmıştır. Yapılan çekme testi sonrasında polipropilen için çekme dayanımı 21MPa iken kısa kenevir elyaf takviyeli kompozitte 32 MPa ve kısa e-cam elyaf kompozit için 31 MPa olarak tespit edilmiştir. Eğilme dayanımı ise sırayla 28 MPa, 38 MPa ve 3 MPa olarak bulunmuştur. Yapılan darbe testinde polipropilenin darbe dayanımı 4,47 MPa iken, kısa kenevir elyaf takviyeli kompozitin 18 MPa ve kısa cam elyaf takviyeli kompozitinkinin 18,5 MPa olduğu belirlenmiştir. Su çekim oranları karşılaştırıldığında ise kenevirin bu konuda e-cam elyafına göre çok zayıf olduğu görülmüştür. Yapılan teste göre kenevirin toprakta kaybolma hızı e-cam elyafına göre çok daha hızlı olmaktadır. 12 hafta sonra kenevir dayanımını %22 oranında kaybederken, cam elyaf kompoziti %3,2'sini kaybettiği ortaya çıkmıştır.

Harish ve Jagannatha [1] yaptıkları çalışmada karbon ve cam elyaflarla güçlendirilmiş epoksi hibrid polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. % 0, %15, %30, %45 ve %60 oranında cam elyaf ve aynı oranlarda karbon elyaf çaprazlanarak karıştırılıp elde edilen epoksi kompozitte, sertlik testi sonrası karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitin diğer iki kompozite göre daha yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmüştür. %60

Karbon elyaf takviyeli kompozit %60 cam takviyeli kompozite göre %14,29; %30 karbon %30 cam elyafları içeren hibrid kompozite göre %23 daha fazla sertliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan çekme testi sonucunda %60 karbon elyaf takviyeli kompozit %60 cam elyaf içeren kompozite oranla %65,24; %30 karbon ve %30 cam elyafları içeren hibrid kompozite oranlar %38,01 daha yüksek dayanım gösterdiği tespit edilmiştir. Yapılan kopma testi sonucunda da benzer sonuçlar alınmıştır. Ayrıca yapılan süneklilik testinde karbon lif takviyeli kompozitlerin cam elyaflara kıyasla daha fazla uzamaya sahip olduğu görülmüştür.

Natarajan ve Balasubramanya [8] yaptığı çalışmada cam elyaf takviyeli modifiye edilmiş epoksi kompozitlerin mekanik ve biçimsel özelliklerini araştırmışlardır. Testlerde epoksi matris ile polimetilmetakrilat ve poli(akrilonitril butadien) kauçuk ile modifiye edilmiş epoksi matris kullanılmıştır takviye elemanı e-cam elyafıdır. ASTM D3039'a göre yapılan çekme testinde modifiye edilmiş matris 40MPa iken cam elyaf ile güçlendirilmiş modifiye edilmiş kompozit 180 MPa dayanıma sahip çıkmıştır. Darbe testinde ise modifiye edilmiş matris 70 J/m darbe enerjisine sahipken cam elyaf ile güçlendirilmiş modifiye edilmiş kompozit 600 J/m darbe enerjisine sahip çıkmıştır. Bükme dayanımı modifiye edilmiş matriste 100 MPa iken cam elyaf ile güçlendirilmiş modifiye edilmiş kompozit 200 MPa olmuştur. Test edilen numunelerde yapılan SEM incelemesinde, cam elyaf takviyeli kompozit numunelerinde takviye elemanı ve matris arasında daha iyi yapışma/bağlanma gözlenmiş, bunun güçlü ara yüz bağlantısını sağladığı belirtilmiştir.

Zhan [27] ve diğerleri yaptıkları çalışmada nano parçacıklar (nano-SiO₂, nano TiO₂ ve nano CaCO₃) ile doldurulmuş karbon elyaf takviyeli kompozitlerde sürtünme ve aşınmayı incelemişlerdir. Polimerler ve polimer matrisli kompozitler zayıf termal dengeye ve aşınma direncine sahip olduklarından bu özellikleri iyileştirmek için karbon elyaf takviye elemanları ile güçlendirilmiş, daha yüksek dayanım ve daha iyi termal dayanım elde edilmiştir, fakat kırılgenlik ve aşınma direnci problemi çözilememiştir.

Bunlar için inorganik nano parçacıklar kompozite ilave edilmiş bunların çekme dayanımını %63, %56 ve %7 oranında arttığı, aşınma oranını %40, %31 ve %20 oranında düşürdüğü görülmüştür. Bununla birlikte SEM incelemesinde nano parçacıklar katılmamış numunedeki aşınmış yüzeylerin daha pürüzlü ve kıymık parçalı olduğu gözlenmiştir. Silisyum oksit katılan numune en düşük sürtünme katsayısını göstermişken, kalsiyum karbonat takviyeli kompozit numunesi en iyi sürtünme direncine sahip olmuştur. Farklı sıcaklıklarda yapılan

deneyler sıcaklık arttıkça, özellikle çözülmenin ve yapışmanın azaldığı 180 °C üzerinde aşınma oranlarının ciddi bir yükseliş göstermiştir.

Zhang ve diğerleri [28] yapmış oldukları çalışmada, kayma hızı ve uygulanan kuvvetin sürtünme ve aşınmaya etkisini araştırmışlardır. Yüksek performansa sahip Polietereterketon (PEEK) termoplastığı deney numunesi olarak kullanılmıştır. 1N kuvvet altında hızın 0,2 m/s'den 1,4 m/s'ye artırılması ile sürtünme katsayısında monoton bir artış gözlenmiştir. 9N kuvvetle yapılan deneylerde en yüksek salınımı 0,8 m/s hızda yapılan deneyde elde edilmiştir. 9N kuvvet altında hızın 0,2 m/s den 1,1 m/s ye artırılması ile sürtünme katsayısında artış meydana gelmiştir. Aynı kuvvette hızın 1,1m/s'den 1,4 m/s'ye çıkmasıyla sürtünme katsayısında artış gözlenmiştir. 5N kuvvette ise paralel olarak hızda 0,8 m/s ye kadar sürtünme katsayısında artış sonra azalış görülmüştür. Öte yandan 9N kuvvet altında aşınma oranı 1,1m/s hızdan 1,4 m/s hıza kadar ciddi düşüş göstermiştir. Yüzey incelemesi yapıldığında aşınma yolunun düz olmadığı parabolik olduğu görülmüştür. Kesme dayanımının sürtünme kuvvetine katkıda bulunduğu söylenilebilir. Yüksek yükte malzemenin viskoelastik davranışı sürtünme-aşınma davranışına etkilidir. Sürtünme sıcaklığının ince yüzeyde(100nm) etkili olduğu için, uygulanan yüksek kuvvetin malzemenin aşınma sürtünme davranışına ciddi bir etkisi olmadığı görülmüştür. Fakat uygulanan az kuvvetin ütüleme etkisine neden olduğu için aşınma sürtünme davranışlarına etkisi olduğu belirtilmiştir.

Wang ve diğerleri[6] yaptıkları çalışmada kısa bazalt elyafla takviye edilmiş polimid kompozitlerde sürtünme ve aşınmayı blok üzeri halka türü aşınma cihazı ile araştırmışlar. Aşınan yüzey SEM ile analiz edilmiş, kısa elyaf içeriği, yük ve kayma hızı araştırılmıştır. Numune poliamid tozlarının ve kısa bazalt tozlarının karıştırılıp 380°C'lik kalıpta 40 MPa basınçta 70 dakika bekletilmesi ile üretilmiştir. Sürtünme deneyleri düşük ve hızlı 0,431 m/s ve 0,862 m/s olarak gerçekleştirilmiştir. 30 mm x 7 mm x 6mm boyutlarındaki numuneler 120 dakika boyunca 200 N ila 500 N arasında kuvvetlere tabi tutularak deney gerçekleştirilmiştir. Deneyden önce tüm yüzeyler 0,2 mikron ortalama pürüzlülük elde edilene kadar temizlenmiştir. Sürtünme deneyleri boyunca örnekler sabit, çelik çember tek yönlü örneklerle karşı döndürülmüştür. Sürtünme kuvveti şaftta bulunan uzama ölçer ile ölçülmüştür. Aşınma oranı birim yük ve kayma uzunluğu tarafından aşınan hacim olarak tanımlanmıştır. Ağırlıkça %5 bazalt elyaf içeren kompozitteki sürtünme katsayısının ciddi bir şekilde düştüğü görülmüştür. Bazalt elyafların oranı artarken aşınmadaki azalma trendi

%20 içerik oranına kadar devam etmiştir. Sürtünme katsayısında ise %10 bazalt içeriği sonrası azalma görülmüştür. Yüksek bazalt elyaf oranında kırılmış bazalt elyaflarının yüzeyde görülmeye başlandığı gözlenmiştir. Sürtünme katsayısı ve aşınma oranının yük arttıkça azaldığı görülmektedir. Uygulanan yük arttırıldıkça, bazı büyük parçacıkların, yassı kıymıkların yüzeyden koptuğu ve yüzeyde yağlayıcı vazifesi gördüğü görüldüğü rapor edilmiştir. Yüksek hızda hem aşınma oranının hem de sürtünme katsayısının düştüğü anlaşılmıştır. Nedeni ise kayma hızının arttırılması ile yüzey kontak zamanının azalması nedeniyle tutucu-yapışma noktaların oluşması için yeterli zaman olmamasıdır.

0,431 m/s hız ve 200N kuvvet ile yapılan deneyin sonucunda normal polimid, %10 bazalt elyaf içerikli polimid kompozit ve %30 bazalt elyaf içerikli polimid kompozit örneklerinin SEM görüntüleri incelendiğinde normal polimidin yüzeyince ciddi deformasyonlar ve mikro çatlaklar bulunduğu, karşıt yüzeydeki paslanmaz çelik çemberde ise ciddi miktarda polimid malzeme olduğu görülmüştür. Bu saf polimid malzemesinin yüksek sürtünme katsayısının sonucudur. %10 içerikli bazalt elyaf içerikli Poliamid kompozitteki kavlama ve dökülmenin çok daha az olduğu belirgin bir plastik deformasyon oluşmadığı gözlenmiştir. %30 içerikli bazalt elyaf içerikli Poliamid kompozitte ise yüzeyde ciddi bazalt elyaf parçacıklarının bulunduğu bazalt elyaf ve Poliamid arasında yapışmanın adezyon türü olmadığı gözlenmiştir.

Thakur ve Chauhan [29] vinilester kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan mikro boyutlu hafif agrega parçacıkların sürtünme aşınma davranışına katkısını incelemiştir. 10N, 30N, 50N ve 70 N kuvvetler 1,88 m/s; 3,14 m/s; 4,39 m/s ve 5,65 m/s hızlarla kuru koşullarda aşınma ve sürtünme performansları ölçülmüştür. Toz parçacıkların kompozisyonu şu şekildedir SiO_2 -55%, Al_2O_3 -34%, Fe_2O_3 -1,5%, TiO_2 -1,2%. Birinci numune sadece vinilester iken, ikinci numune %2 parçacık katkılı, üçüncü numune %6, dördüncü numune %10 ve beşinci numune %15 parçacık katkılıdır. Deney sonuçlarına göre tüm numunelerde yük arttıkça sürtünme katsayısı düşerken, tüm deney koşullarında sürtünme katsayısı saf vinilesterde en fazla, en çok katkının olduğu dördüncü ve beşinci numunelerde en az olmuştur. Yükün ve hızın arttırılması yüzeyde sıcaklık artışına neden olmaktadır. Bu da bağlarda zayıflamaya ve matriste kayba sürtünme katsayısında düşüşe neden olur. Keza transfer film de sürtünme ve aşınma davranışında önemli etkiye sahiptir.

Aşınma oranlarına bakacak olursak, saf vinilesterde yük artınca aşınma oranı azaldığı, hızın artmasıyla da aşınma oranının azaldığı görülmektedir. Parçacık katkılı kompozitlerde de

uygulanan yükün artmasıyla aşınma oranının azaldığı görülmektedir. En yüksek aşınma oranının saf vinilesterde 5,65 m/s hızla 10N kuvvet uygulanması ile elde edildiği, en düşük aşınma oranı ise %15 parçacık katkılı numuneye 5,65 m/s hız ve 70 N kuvvet uygulandığında elde edildiği görülmüştür. Dolayısıyla agrega parçacıkların aşınma özelliklerini iyileştirdiği söylenebilir. Vinilester ve kompozitleri aşınma oranları uygulanan kuvvet ve hızdan daha az etkilenmiştir. Uygulanan yük, aşınma ve sürtünme davranışlarına kayma hızından daha etkilidir. Numunelerin SEM incelemesi sonucunda parçacık katkılı numunelere artan yükler ve artan hızlar uygulandığında numunenin yüzeyinde ciddi deformasyonlar olduğu gözlenmiştir. Üretilen sürtünme ısısı yüzden ısısal bir yumuşama sağladığı ve talaş şeklinde aşınma parçacıklarının matrise gömüldüğü koruyucu tabaka oluşturdıkları gözlenmiştir. Saf vinilester yüzeyinin çatlak ve daha az aşınan parçacık görülmüştür.

Akıncı ve diğerleri [30] düşük yoğunluktaki polietilen(LDPE) kompozitlerin bazalt ile takviye edilmesi ile elde edilen kompozitte aşınmayı çalışmışlar ve bazalt oranının artırılması ile aşınma oranlarını $2,596 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'den $6,8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye düşüğünü test etmişler. Bazaltın güçlendirici olarak eklenmesi hem polimerlerin sürtünme ve aşınma davranışlarını daha da iyileştirmiş hem de mekanik özelliklerini güçlendirmiştir. Bunun için %10, %30, %50 ve %70 oranlarında bazalt içeren LDPE matrisli kompozitleri oda koşullarında 5N, 10N ve 20N yüklerle 0,5 m/s, 1m/s ve 1,5 m/s kayma hızlarıyla test etmişler. Sonuçta aşınma oranlarının düşmesi ile birlikte sürtünme katsayısının da %30 bazalt içeriğine kadar 0,51'den 0,13'e düşüğünü görmüşler. Sürtünme katsayısı %30'dan sonra sabit gitmiştir. Aynı zamanda bazalt içeriğinin artmasının malzemesini sertliğini 45,5 HRB'den 68,7 HRB'ye çıkarttığı ve basma mukavemetini de arttırdığı görülmüştür. Yapılan yüzey incelemesinde saf LDPE'de aşınan yüzeyin daha az pürüzlü olduğu görülürken, bazalt ile güçlendirilmiş kompozitlerin yüzeyinin bazalt parçacıklarının görüldüğü daha büyük talaş parçalarını oluşturduğu gözlenmiştir.

Öztürk ve diğerleri [31] ise yüksek sürtünmenin yaşandığı debriyaj balataları ve fren disklerinde uygulanmak üzere bazalt ve seramik elyaflar ile güçlendirilmiş hibrid kompozitin aşınma ve sürtünme performansını incelemişler. Hacimsel olarak %10 oranında seramik ile %0 ila %40 oranına kadar bazalt ile güçlendirilmiş kompozit numunelerinde barite ve bronz, plaster ve grafit gibi dolgu malzemeleri kullanılmıştır. Elyafın katılması yoğunluğu düşürürken, %30 toplam elyaf oranına kadar eğilme ve kayma dayanımını

arttırmıştır. Basma dayanımı ise elyaf oranı ile birlikte artma göstermiştir. 625N yükle 3,2 m/s, 6,7 m/s, 9,7 m/s ve 12,8 m/s hızları numunelere uygulanmış, bazalt oranının artmasıyla sürtünme katsayısının arttığı görülmüştür. Kayma süresinin artması ile birlikte sürtünmeden kaynaklanan sıcaklık artışı görülmüş fakat 350°C ye kadar sürtünme katsayısında ciddi bir artış olmamıştır. Yapılan SEM incelemesinde kayma hızının arttırılması ile matrisin yumuşaması ve kömürleşme olmasıyla elyaf matris bağlarının kopması ve elyaf kırılması gözlenmiştir. Aynı zamanda daha yüksek kayma hızı ve elyaf içeriği aşınma yüzeyinde oluşan parçacıkların büyümesine ve daha büyük aşınmaya sebep olduğu gözlenmiştir. Aşınma oranlarına bakıldığında beklenildiği gibi hızın arttırılmasıyla aşınma hızının arttığını görülmektedir. Aynı zamanda sürtünme katsayısının uygulanan yük artarken düştüğü de gözlemlenmiştir. Bu artan yükün pim ile disk arasındaki mesafeyi azaltmasıyla açıklanabilir. Kayma hızının ve disk sıcaklığının artması aşınma oranının artmasına neden olur oysa uygulanan kuvvet artınca aşınma oranı düşer. Aşınan parçacıkların büyüklüğü aşınma oranı ile artar. Kayma hızının artması ve sıcaklığın artması aşınma oranının artmasına fakat yük artarken düşmesine neden olur.

Zhang ve diğerleri [32] ise yaptıkları çalışmada grafit ve nano SiO₂ ile doldurulmuş bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin sürtünme aşınma davranışlarını araştırmışlar, grafit kullanılan bazalt elyafli kompozitlerin nano SiO₂'e göre daha iyi sürtünme ve aşınma davranışları sergilediğini gözlemlemişler. Hem grafit hem nano SiO₂ içeren kompozitlerin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Yapılan deney sonunda saf bazalt kompozit 0,4 sürtünme katsayısına sahipken bazalt silisyum oksit 0,3, bazalt grafit 0,22 ve bazalt, grafit ve silisyum oksit kompoziti 0,18 olarak belirlenmiş benzer sıralama aşınma oranlarında gözlenmiştir.

Yapılan Taramalı Elektron Mikroskopu incelemesinde saf bazalt kompozitin matris elyaf bağlarının koptuğu ve yapışmanın zayıflığı nano silisyum oksit katkısını bağları güçlendirdiği fakat sökülen elyafların yüzeyde görüldüğü, fakat silisyum oksit ve grafitli bazalt kompozitlerin daha az elyaf kopması ile birlikte silisyum oksit ve grafitlerin oluşturduğu sinerji sayesinde daha güçlü yapı gözlenmektedir. Aynı şekilde aşınma yüzeyleri incelendiğinde grafit ve silisyum oksit tozları katkılı bazalt kompozitin yüzeyinin daha az pürüzlü ve daha az bazalt elyaf deformasyonuna sahip olduğu gözlenmektedir. Yüksek hız ve kuvvette gerçekleştirilen deneyde bu kompozitteki transfer filminin daha ince, daha düzgün ve daha yapışkan olduğu gözlenmiştir.

Wang ve diğerkleri [33] yaptıkları çalışmada polietraflorüretilen (PTFE) matrisinde karbon ve bazalt elyaflar ile güçlendirilmiş kompozitlerin pompalar, hidrolik türbinler, gemilerin şaft rulmanları, vanalar, dişliler gibi sulu çalışma ortamlarında kullanımlarında aşınma ve sürtünmeyi incelemişlerdir. Mekanik özellikleri cam elyaflardan daha iyi olan bazı özellikleri karbon elyaflardan iyi çoğu özelliği yakın olan bazalt elyaflı matrisler ucuz olmaları nedeniyle çokça tercih edilmektedir. Deney sonuçlarında yüzeyler incelendiğinde karbon elyaflın bazalt elyafa oranla ara yüz bağlantısının daha kuvvetli olduğu bulunmuştur. Kuru koşullara kıyasla sulu ortamda tüm sürtünme katsayılarının daha düşük çıktığı görülmekle birlikte, bazalt elyaf takviyeli kompozitin saf malzemeye kıyasla daha az karbon takviyeli kompozitin ise çok daha az olduğu görülmüştür. Aşınma oranlarında ise bazalt takviyeli kompozitin su etkisinden kaynaklı yüksek aşınma oranına sahip olduğu görülmüştür.

Su ve diğerkleri yaptığı çalışmada [26], bazalt takviyeli ve cam takviyeli kompozit malzemelerin mekanik ve abrasiv aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Cam ve bazalt takviyeli kompozit malzemelerden oluşan numunelere mekanik özellikler arasındaki farkı görmek için çekme, basma, sertlik testleri uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre tüm mekanik testlerde çekme, basma sertlik testlerinde bazalt takviyeli kompozit malzemenin cam takviyeli kompozit malzemeye oranla daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Aşındırma deneyleri disk üzeri pim tipi deney cihazı ile sabit 200 rpm hız ile 5N, 10N ve 15N yük altında gerçekleştirmişlerdir. Aşındırma deney sonucunda aşınma mesafesinin artması ile aşınma oranı düşmektedir. Bunun nedeni abrasiv tane boyutunun daha pürüzsüz ve daha az etkili olmasıdır. Bazalt takviyeli kompozit, cam takviyeli kompozite göre daha az aşınmıştır.

Sonuç olarak; yapılan literatür taramasını bazalt takviyeli kompozit malzemelerde yapılan mekanik testler ve sonuçları ile tribolojik deneyler ve sonuçları olarak iki kısımda incelemek mümkündür. Çizelge 3.1'de özeti verilen çalışmalarda epoksi ya da polyester matris üzerine E-cam ve bazalt takviyeli kompozitlerin tamamında e-cam takviyeli kompozitlerin bazalt takviyeli kompozitlere oranla daha az mekanik özellik gösterdiği gözlenmiştir. Yapılan çekme, basma, bükme ve darbe testlerinde bazalt takviyeli kompozitin daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca farklı bazalt takviye oranlarında yapılan çalışmada bazalt oranları bir noktaya kadar arttırıldığında mekanik özellikler iyileşirken, belli bir noktadan sonra bağların zayıflaması nedeniyle mekanik özelliklerde düşme

gözlenmiştir.

Çizelge 3.1. Mekanik testler literatür çalışma özeti

Çalışma zamanı	Matris malzemesi	Takviye Elemanı	Yapılan çalışmalar
2003	Polyester	Biyolif ve cam hibrit	Çekme testi
			Eğme testi
			Darbe testi
2007	Polipropilen	Kendir/cam hibrit	Eğme testi
2010	Epoksi	E-cam ve bazalt hibrit	Eğme testi
			Darbe testi
2011	Epoksi	E-cam ve bazalt	Çekme testi
			Eğme testi
2011	Epoksi	E-cam ve bazalt	Çekme testi
			Basma testi
			Eğme testi
			Darbe testi
2011	Polyester	Cam ve bazalt	Çekme testi
			Eğme testi
2012	Polipropilen	Kenevir ve bazalt	Çekme testi
			Eğme testi
			Darbe testi
			Sertlik testi
2012	Polyester	Bazalt	Çekme testi
			Basma testi
			Eğme testi
			Darbe testi
2012	Polyester	Bazalt	Çekme testi
			Basma testi
			Eğme testi
			Darbe testi
2012	Polimer	E-cam ve Bazalt	Çekme testi
			Darbe testi
2013	İzoftalik polyester	E-cam ve bazalt	Çekme testi
			Eğme testi
			Darbe testi

Çizelge 3.1. (devam) Mekanik testler literatür çalışma özeti

Çalışma zamanı	Matris malzemesi	Takviye Elemanı	Yapılan çalışmalar
2013	Epoksi	E-cam ve MoS ₂	Çekme testi
			Sertlik testi
			Eğme testi
2013	Epoksi	Cam ve bazalt	Çekme testi
			Basma testi
			Sertlik testi
2014	Epoksi	E-cam	Çekme testi
			Eğme testi
			Darbe testi
2014	Epoksi	Bazalt	Çekme testi
			Eğme testi
			Darbe testi
2015	Epoksi	Karbon/cam hibrit	Çekme testi
			Sertlik testi

Literatür çalışması sonuçlarında göre yapılan tribolojik deneylerin özeti Çizelge 3.2'de görülmektedir. Bu sonuçlara göre bazalt ile takviye edilmiş polimer matrisli kompozit malzemelerin artan bazalt oranı ile aşınma oranlarının ve sürtünme katsayısının arttığı gözlenmiştir.

Çizelge 3.2. Tribolojik deneyler literatür çalışması özeti

Çalışma zamanı	Matris malzemesi	Takviye Elemanı	Yapılan çalışmalar
2006	Polimer	Karbon elyaf ile nano parçacıklar	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2006	Phenolic reçine	Karbon elyaf ile nano parçacıklar	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2007	Phenolic reçine	Seramik /bazalt/barit/grafit	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2008	Polimid	Bazalt	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2008	PEEK		Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2008	PTFE	Nano parçacıklar	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2008	Poliamid	Bazalt	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2009	Epoksi	Karbon ile grafit	Aşınma oranı
2010	Phenolic reçine	Bazalt ile grafit&SiO ₂	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2010	Naylon	Karbon ve MoS ₂	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2012	Vinilester	Metal parçacıklar(cenosphere)	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2012	Polietilen	Bazalt	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2013	Epoksi	Cam ve bazalt	Aşınma oranı
2013	Epoksi	Cam ile Al ₂ O ₃	Aşınma oranı
2013	Epoksi	E-cam ile MoS ₂	Aşınma oranı
2013	Epoksi	E-cam ve bazalt	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2014	PTFE	Karbon ve bazalt	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı
2016	Epoksi	Cam, bazalt, Polytetrafluoroethylene ve grafit	Aşınma oranı
2016	PTFE/PEI	Bazalt	Aşınma oranı
			Sürtünme katsayısı

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Numunenin Hazırlanması

Ana matris SR 8500 epoksi reçine ve 1/3 oranında katılan sertleştirici SR 8601 Sicomin Marsilya, Fransa firmasından tedarik edilmiştir. Bazalt elyaf kumaşlar MC Technics, Vise, Belçika firmasından tedarik edilmiştir. Numuneler bazalt elyafların Resim 4.1'de görülen örgü yapılı bazalt kumaş kullanılarak epoksi ile kalıplanarak ile üretilmiştir. Bazalt kumaşlar bazalt fiberlere oranla daha yüksek yapısal düzen ve sıklığa sahiptir ve bu da kompozitlerin hem boylamasına hem de enine mekanik dayanımı arttırdığı görülmüştür [6].



Resim 4.1. Bazalt elyaf kumaş

Bu tezde kullanılan kompozit malzeme elle kalıplama adı verilen üretim yöntemine göre üretilmiştir. Bir kalıba elle yerleştirilen elyaf kumaşlara bir rulo veya fırça yardımıyla reçinenin emdirilmesi yöntemiyle bu üretim gerçekleştirilmiştir.

Bu üretim yönteminde, 75 MPa basınçla 24 saat boyunca oda sıcaklığında (23°C) kalıp boyunca elde edilen örgü yapı kumaştaki 13 sıra ile kalıba uygulanır. Bazalt elyaf 15 µm çapındadır. Proses sonrası 80°C sıcaklıkta 24 saat boyunca ısıtma işlemi uygulanır. Bu işlem sonrası malzeme soğumaya bırakılır. Daha sonra test yapılacak numuneler istenilen ölçüde 150mm x 150mm x 5mm büyüklüğünden yapılacak teste göre su jeti ile kesilmiştir.



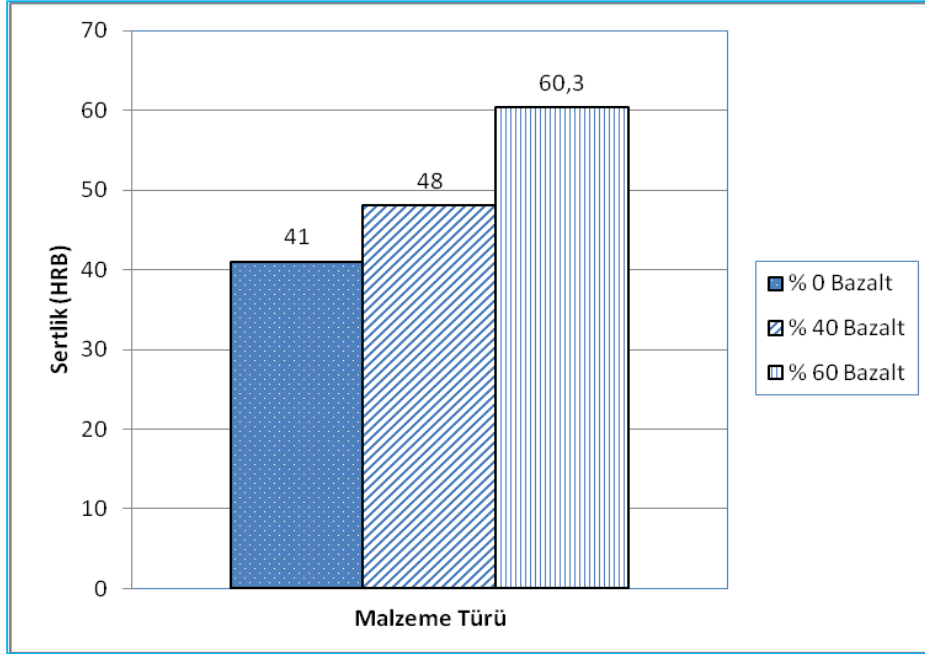
Resim 4.3. Sertlik ölçme cihazı

%0, %40 ve %60 ağırlık oranında takviye elemanı olarak bazalt kumaş içeren epoksi reçine matris malzemeli kompozit test numuneleri sertlik testleri Rockwell B test metodu ile gerçekleştirilmiştir. Farklı takviye elemanı içeren malzemeler üzerinde testler üçer kez tekrarlanmış ortalamaları alınarak değerlendirme yapılmıştır. Testler sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. %0 bazalt içeren yani epoksi matris malzemesinin sertlik değeri 41 HRB çıkmıştır. Matrise eklenen %40 ağırlığındaki bazalt takviye elemanı sertlik değerini %17 arttırmış ve 48 HRB olmuştur. %60 ağırlık oranında eklenen bazalt kumaş takviye elemanına sahip olan numunelerin sertliği 60,3 HRB olarak bulunmuştur. Matris malzemesi olan epoksi reçinenin yani %0 bazalt içeren numunelere oranla sertlik %47 oranında artmıştır. Ağırlıkça %60 içeren numuneler %40 bazalt içeren numunelere oranla ise %25 daha fazla sertliğe sahip çıkmıştır.

Çizelge 4.1. Sertlik testi sonuçları

Testler	Test malzemesi sembolü	Ağırlıkça bazalt içeriği (%)	Sertlik, HRB
1	EP	0	41
2	BF40	40	48
3	BF60	60	60,3

Test sonuçları epoksi malzemeye eklenen bazalt miktarının artışı, sertliği de belli oranda arttırdığını göstermiştir. Test numunelerinin sertliklerindeki artış Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Sertliğin elyaf içeriği ile değişimi

Yapılan literatür çalışmasında [30] bazalt içeriğinin %0’dan %70 oranlarına artmasının numunelerin sertliğini 45,5 HRB’den 68,7 HRB’ye çıkarttığı görülmüştür.

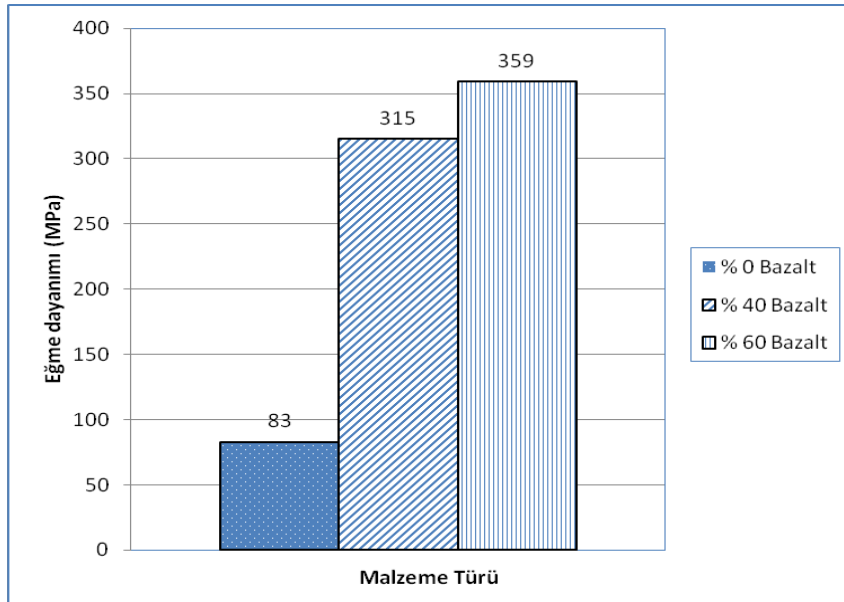
4.2.2. Üç nokta eğilme testi

%0, %40 ve %60 bazalt kumaş takviye elemanı içeren 10 mm x 20 mm boyutlarındaki kompozit malzeme numunelerinin eğilme mukavemetleri 50kN çekme kapasitesine sahip Instron 3369 cihazında yapılarak belirlenmiştir. ASTM D790 standardı kullanılmıştır. Farklı oranda takviye elemanı içeren test numuneleri üzerinde, üç nokta eğilme testi üçer kez tekrarlanmış, bu üç değerın ortalaması değerlendirmeye alınmıştır. Yapılan test sonrasında elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Üç noktalı eğilme testi sonuçları

Testler	Test malzemesi sembolü	En fazla kuvvet (MPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Bazalt içeriği (%)
1	EP	352	83	0
2	BF40	739	315	40
3	BF60	990,4	359	60

Sonuçlar incelendiğinde; epoksi malzemenin yani %0 bazalt içeriğine sahip test numunesinin eğilme dayanımı 83 MPa çıkmıştır. Epoksi matrise %40 oranında eklenen bazalt kumaşın malzemenin eğilme dayanımını 315 MPa'a çıkardığı görülmektedir. Matrise eklenen %40 oranındaki bazalt malzemenin eğilme dayanımını 2,79 kat arttırdığı, yani 3,79 katına çıkardığı görülmüştür. Benzer şekilde matrise eklenen ağırlıkça %60 bazalt takviye elemanı epoksi reçinenin eğilme dayanımını 359 MPa'a çıkarmıştır. Dolayısıyla takviye elemanı malzemenin eğilme dayanımını 3,32 kat arttırmış, mevcut eğilme dayanımını 4,32 kata çıkartmıştır. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi %60 bazalt içeren test numunesinin eğilme dayanımı %40 bazalt içeren numunenin eğilme dayanımından %14 daha fazla çıkmıştır. Buna göre artan takviye elemanı oranı da numunenin eğilme dayanımını arttırmıştır.



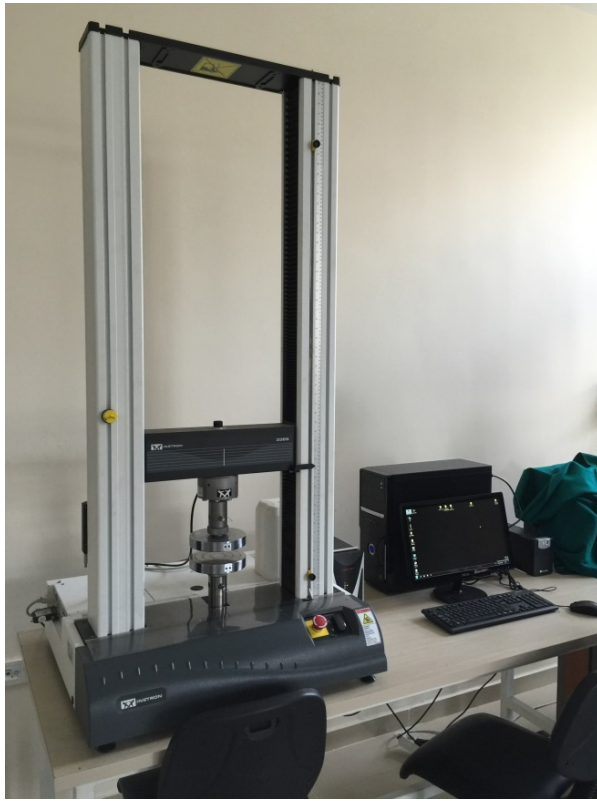
Şekil 4.2. Üç noktalı eğilme testi sonuçları

Benzer şekilde %50 oranında bazalt içeren polyester matrise sahip kompozitler üzerine yapılan bir çalışmada [2] üç noktalı eğilme testi sonucunda eğilme dayanımının 350,9 MPa olduğunu görülmüştür. Bu sonuçlar tarafımızdan elde edilen sonuçlarla uyumludur. Yapılan

diğer bir çalışmada [9] ise bazalt takviye oranı %5 oranında artınca eğilme dayanımının %16,9 oranında arttığı gözlenmiştir.

4.2.3. Basma testi

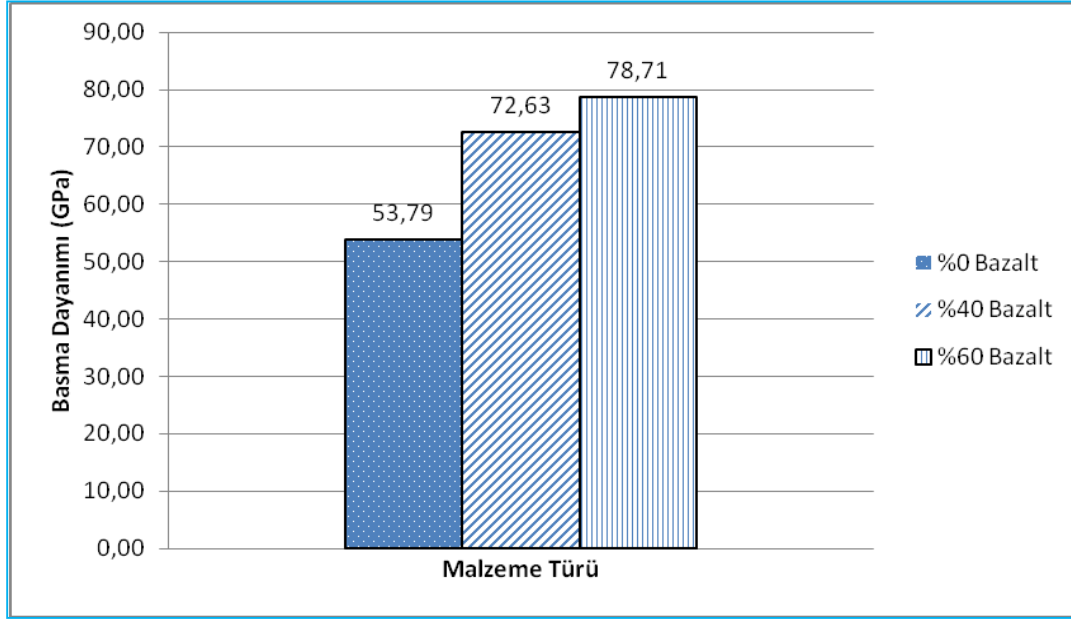
Numunelerin basma mukavemetleri, Resim 4.4'te gösterilen 50kN çekme kapasitesine sahip Instron 3369 cihazında yapılmıştır. Basma testi için test prosedürü ASTM D3410 standardı olarak uygulanmıştır.



Resim 4.4. Basma testi cihazı

%0, %40 ve %60 bazalt elyaf takviye malzemesi içeriğine sahip üç ayrı kompozit malzeme için test üçer kez tekrarlanmıştır. Sonuçlar test cihazının bağlı olduğu bilgisayarda kurulu programdan alınmıştır. Bulunan test sonuçları Şekil 4.3'de gösterilmiştir. %0 bazalt içeriğine sahip numunelerin basma testi sonrasında ortalama basma modülü 53,79 GPa olmuştur. %40 Bazalt içeren numuneler basma testi sonrasında ortalama 72,63 GPa basma modülü sonucu ortaya çıkmıştır. %60 bazalt içeriğine sahip kompozit malzemeler basma testi sonrasında 78,71 GPa basma modülüne sahip olduğu görülmüştür. Beklenildiği gibi bazalt içeriği arttığında kompozitin basma dayanımı artmıştır. %40 bazalt içeren kompozit

hiç bazalt içermeyen epoksi malzemeye oranla %35 daha fazla basma dayanımına sahip olmuştur. %60 bazalt içeren kompozit malzeme bazalt içermeyen epoksi malzemeye %46 daha fazla basma modülüne sahip olmuştur. %60 bazalt içeren numune %40 bazalt içeren numuneye oranla %8 daha fazla basma modülüne sahip olmuştur. Sonuç olarak beklenildiği gibi bazalt oranı artınca basma dayanımında ciddi bir artış görülmüştür.

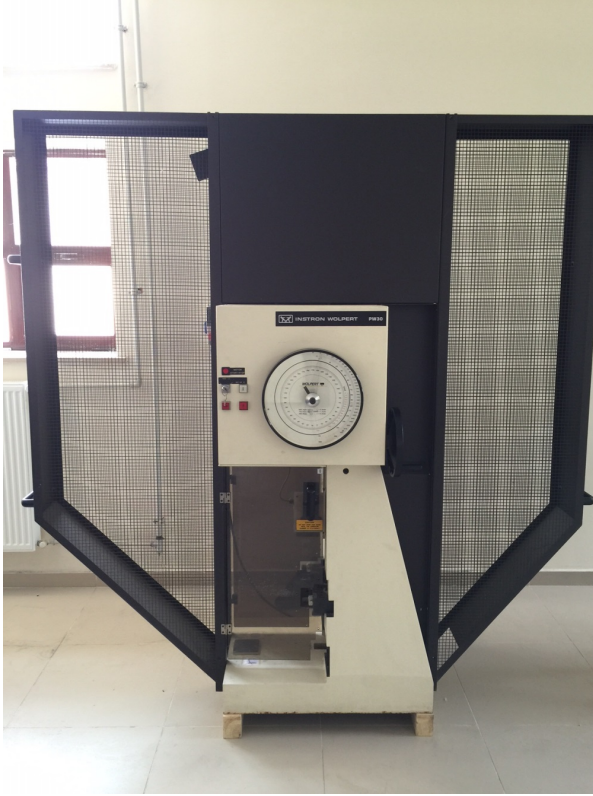


Şekil 4.3. Basma testi sonuçları

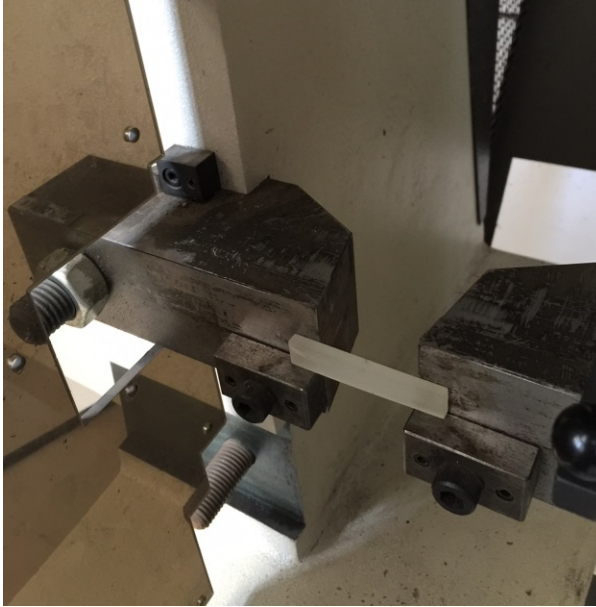
Daha önce yapılmış olan bir çalışmaya göre [31] bazalt oranının %10'dan %30'a artmasının basma dayanımını 114 MPa'dan 222 MPa'a arttırdığı görülmüştür. Bunun muhtemel sebebinin uygulanan üretim metodu, uzun elyaf ya da elyaf içeriğinin artmasından kaynaklanmış olduğu düşünülmektedir.

4.2.4. Darbe testi

Darbe testi, Resim 4.5'te gösterilen 150 J darbe uygulama kapasiteli Instron-Wolpert PW30 test cihazında yapılmıştır. ASTM D256 standardına göre testler gerçekleştirilmiştir. 20 mm x 100 mm boyutundaki numuneler yatay olarak orta noktaları darbe çubuğuna gelecek biçimde Resim 4.6'da gösterildiği şekilde yerleştirilir ve sonrasında test cihazının kapısı kapatılarak cihaz çalıştırılır. Darbe çubuğunun hareketi ile test yapılır ve test sonucunda ekranda görülen enerji değeri not edilir.

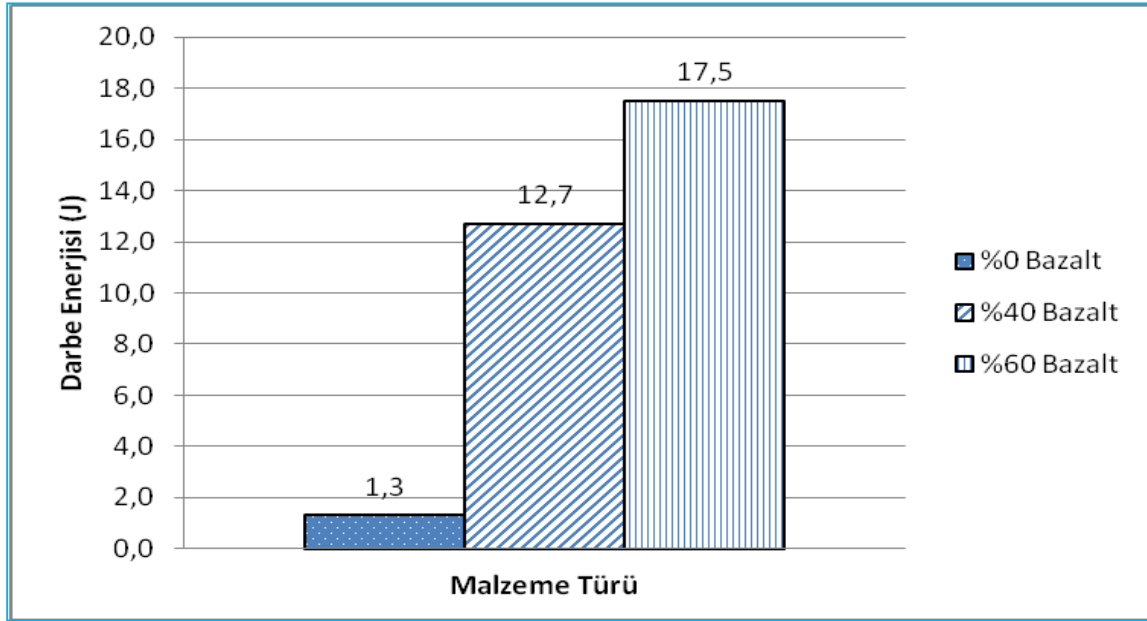


Resim 4.5. Darbe test cihazı



Resim 4.6. Numunelerin darbe cihazına yerleşimi

%0, %40 ve %60 bazalt kumaş takviye elemanı içeren kompozit malzemelerin her biri için darbe testi beşer tekrarlı Instron-Wolpert PW30 test cihazında yapılmıştır. Test sonuçları Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Darbe testi sonuçları

Bazalt içermeyen epoksi malzeme ile yapılan darbe testinde 1,3J değer verirken %40 bazalt içeren malzemeler ortalama 12,7J darbe enerjisine sahip olmuştur. %60 bazalt içeren numuneler ortalama 17,5J darbe enerjisine sahip çıkmıştır. Bazalt içeriği artınca darbe dayanımında ciddi bir artış ortaya çıkmıştır. %40 bazalt içeren numuneler hiç bazalt içermeyen epoksi numunelerin 9,7 katı darbe enerjisine sahiptir. %60 bazalt içeren kompozit numuneler, %40 bazalt içeren kompozit numunelerden %37 daha fazla darbe enerjisine sahip çıkmıştır. Sonuç olarak epoksi malzemelere eklenen bazalt takviye elemanın numunenin darbe dayanımını ciddi ölçüde arttırdığı görülmüştür. Kompozit malzemenin içeriğindeki arttırılan bazalt oranının darbe dayanımını arttırdığı görülmüştür. Benzer şekilde yapılan literatür çalışmasında bazalt içeriği artan numunelerin darbe dayanımlarının arttığı görülmüştür [9]. %35, %40 ve %45 oranında bazalt içeriğe sahip kompozit numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda bazalt oranı arttıkça darbe dayanımının 0,23 J'dan 0,6 J'a çıktığını göstermiştir. Başka bir ifade ile matris içerisindeki seramik faz arttığından dolayı darbe direncinde de artış gözlenmiştir.

4.2.5. Kompozit malzemelerin mekanik davranışları

Tokluk bir malzemenin kırılmadan önce sönümlendiği enerjinin bir ölçüsüdür. Tokluğun en basit ölçme yöntemi darbe testidir. Cisimlerin darbeye dayanıklılığı malzemenin atom bağları ile yakından ilişkilidir. Seramikler gibi gevrek malzemelerin toklukları, sünek

malzemelere oranla daha düşüktür. Bu tez içinde yapılan testler göstermektedir ki epoksi malzemeye seramik takviye elemanı eklendikçe malzemenin tokluk değerinde artış gözlenmektedir. Bu durum ilk etapta yukarıda yazılan açıklamalardaki seramik malzemenin daha düşük tokluk değerine sahip olduğu ve daha gevrek olduğu yönündeki ifadeye ters düşüyor gibi görünse de sebebi kompozit malzeme tanımıyla açıklanabilir. Daha önce de ifade edildiği gibi kompozit malzemeleri; iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı guruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro-düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak tanımlamıştık. Burada da görüldüğü gibi gevrek malzeme matris içine eklendiğinde iyi özellik olarak matrisin tokluk arttırmış daha iyi bir malzeme elde edilmiştir.

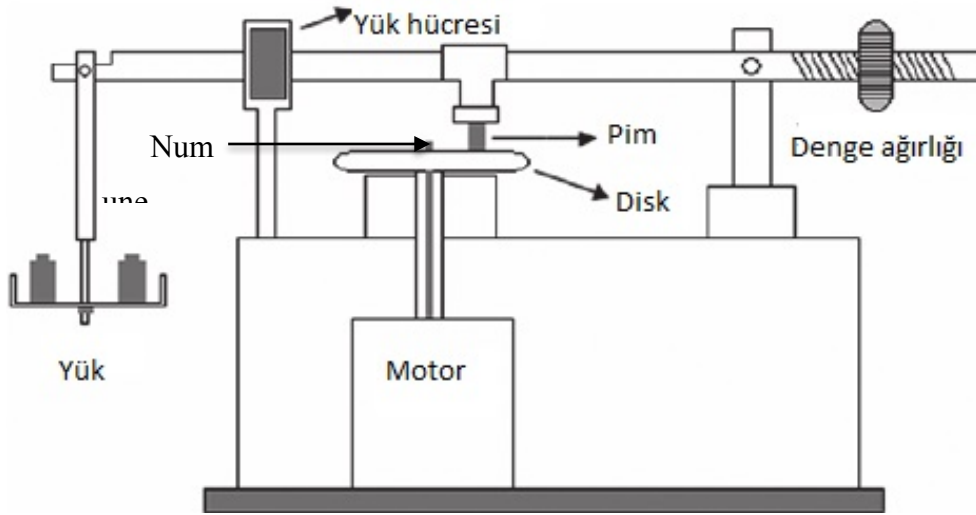
Takviye elemanı olan elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının nedenlerinden biri de boy/çap oranı arttıkça matris malzeme tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artmasıdır. Bununla birlikte, elyafların ince çaplı olarak üretilmeleri ile, büyük kütleli yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenlerle takviye elemanı olan elyaflar, malzemelerin tokluğu artarak, üstün mekanik özellikler göstermişlerdir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mekanik özelliklerini etkileyen diğer önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyeleriyle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarsa ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür.

Kompozit malzemelerde tokluğu arttıran bazı mekanizmalar mevcuttur. Bunlardan biri de yük transferidir. Yük transferi ile tokluğun artırılmasının temel prensibi matrisin hasar uğraması anında yükün fiberler tarafından taşınmasıdır. Diğer bir mekanizma da çatlak saptırma olarak bilinen çatlakın partiküllere ulaştığında partikülü kıramayıp yön değiştirmesi ve böylece enerjisinin azalması prensibine dayanır.

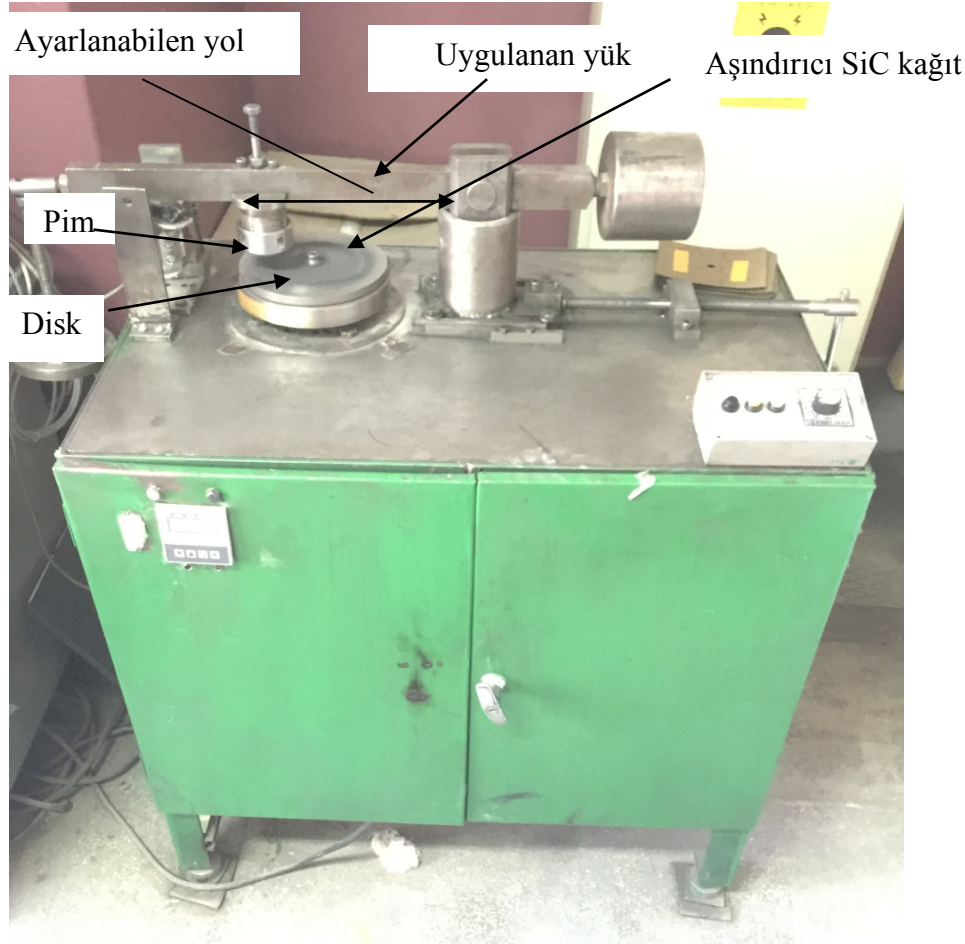
4.3. Aşınma Deneyi

Numunelerin aşınma deneyleri; Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Triboloji laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri, Şekil 4.5'de sistematığı gösterilen disk üzeri pim geometrisinde yapılmıştır. Yatay olarak dönel

harekete sahip 160 mm çapındaki çelik levha üzerine 500 elek(grid) parça boyutuna sahip olan SiC zımpara kağıdı sabitlenmiştir. Pim rotor üzerinde 9 cm genişliğe yerleştirilmiştir. Numune boyutları 5mm x 5mm x 5mm'dir. Yük şekilde belirlenen yük hücresi noktasından uygulanmıştır. Temasın sürekliliği için tezgaha enine ilerleme hareketi verilmiştir. Gerekli mesafeyi elde edinceye kadar işleme devam edilmiştir Numuneler üzerine farklı yükler sabit bir kayma hızında uygulanmıştır. Numuneler her bir yük şartında taze abrasiv kâğıt üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir deney şartı için en az 3 numune üzerinde deney tekrarlanmış tüm sonuçlar istatistik programı aracılığı ile yorumlanmıştır. Deney cihazı, Resim 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Disk üzeri pim deney cihazının şematik gösteri



Resim 4.7. Aşınma deney cihazı

Üretilen epoksi matrisli kompozit malzemelerinin sürtünme ve aşınma performansını tespit etmek için disk üzeri pim deney cihazında aşınma deneyleri yapılmış ve numunelerin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarları belirlenmiştir. Üç farklı yük ve üç farklı sürtünme hızında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Her bir deney sırasında yeni bir silisyum karbür aşındırıcı (500 elek) kullanılmıştır. Disk her defasında aseton ile silinerek aşındırıcı diske monte edilmektedir.

Abrasiv aşınma testinde, numunelere 5N, 10N ve 15N'luk yükler uygulanmıştır. Devir sayısı (hız) 80 rpm, 140 rpm ve 200 rpm sırasıyla 0,3768 m/s, 0,6594 m/s ve 0,942 m/s hızlara karşılık gelmektedir. Deney cihazının hızı Resim 4.8 a,b,c'de görülen takometre ile belirlenmiştir. Her bir hızın karşılık takometre değeri Resim 4.8.'de gösterilmiştir.



a) 80 rpm, 0,3768 m/s hız



b) 140 rpm, 0,6594 m/s



c) 200 rpm, 0,942 m/s

Resim 4.8. Takometre ile ölçülen hızlar

Deneyler sırasında meydana gelen ağırlık kayıpları hesaplanmış ve aşınan yüzeyler görüntülenerek numuneler aşınma açısından karakterize edilmiştir. Her bir deney şartı ve numune için 3 adet ölçüm yapılmıştır. Ağırlık kayıpları Resim 4.9’da gösterilen Precisa marka 0,0001 gr hassasiyetli hassas terazi ile yapılmıştır. Her bir deney için deney öncesi ve sonrası numuneler tartılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir.



Resim 4.9. Hassas terazi

4.4. Deneysel Tasarım

Bir deneyin tasarlanması, basit olarak deneyde izlenecek sıra(yol) olarak tanımlanır. Deneysel tasarımlar veri toplamadaki hatayı azaltmaya yardım eder. Deney tasarımı, süreci ya da sistemi etkileyen faktörler (değişkenler) üzerinde değişiklikler yaparak süreç ya da

sistem tepkisinin gözlenmesini sağlayan testler serisidir. Deneyde kullanılacak faktörlerin tiplerinin belirlenmesi deneyin planlamasını doğrudan etkileyeceğinden dolayı büyük önem taşımaktadır. Deneyi etkileyen faktörler bu çalışmada yük, kayma mesafesi, hız ve malzeme türü gibi kontrol edilebilen faktörlerdir.

Deneysel bir çalışmada en iyi çıktı sistematik bir yaklaşım uygulandığı zaman elde edilir. Farklı çalışmalar için farklı parametreler ve değişkenler olmasına rağmen genel olarak deneysel çalışmada;

- Problemin tanımı,
- Bağımlı ya da yanıt değişkenin seçimi,
- Bağımsız parametrelerin seçimi,
- Bağımsız parametrelerin seviyelerinin belirlenmesi ve etken düzeylerinin nasıl birleştirileceği basamaklarını içerir.

Deneysel tasarım; alınan gözlemlerin sayısı, deney sırası, kullanılacak rastgeleleştirme yöntemi ve deneyi tanımlayan matematik model temel bileşenlerinden oluşur. Bu tezde Taguchi modelleme tekniği kullanılmıştır. Ürün ve süreç tasarımında kalitenin geliştirilmesi konusunda en önemli katkıyı yapan Genichi Taguchi Japonya'nın endüstriyel ürün ve süreç geliştirmesinde 1940 sonlarından beri aktif olarak yer alan bir Japon makine mühendisidir. Ağırlıklı olarak istatistiksel kavram ve araçlara, özellikle istatistiksel deney tasarımına dayalı kalite geliştirme için hem felsefe hem de yöntem bilim geliştirmiştir. Temel parametrelerin daha verimli bir şekilde seçilmesini sağlamak, harcanan zamanı ve malzemeyi azaltmak için Taguchi tekniği yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu metot; maliyet, kalite ve performans tasarımlarını optimize etmek için basit, verimli ve sistematik bir metottur. Bu metotla bir ürün geliştirme veya işlemin, çalışma koşullarının mühendislik optimizasyonunu; (a) sistem tasarımı, (b) parametre tasarımı, (c) tolerans tasarımı ve benzeri bir yaklaşım içerisinde çözebilmeyi amaçlar [3].

Parametre tasarımı

Bu tasarımının amacı; kalite karakteristiklerini geliştirmek için süreç parametre değerlerini optimize etmek ve en uygun süreç parametreleri altında ürün parametre değerlerini

tanımlamaktır. Taguchi tekniğinin kullanılma nedeni, çıktı değerinin hedefte ve en az değişiklikle sağlanmasıdır. Parametre tasarımı;

- Kalite karakteristiklerinin (bağımlı parametreler) ve tasarım parametrelerinin (bağımsız parametreler) belirlenmesi,
- Tasarım parametreleri ve etkileşimlerinin seviyelerinin belirlenmesi,
- Uygun bir lineer grafik ya da ortogonal dizinin belirlenmesi,
- Bu parametrelerin uygun seviyelerinin yerleştirilmesi, deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi,
- Deneysel sonuçlar aracılığıyla S/G oranlarının hesaplanması, sonuçların analiz edilmesi,
- Optimal tasarım parametrelerinin seçilmesi,
- Doğrulama testlerinin yapılması aşamalarından oluşur.

Bu işlem sırası takip edilerek parametre tasarımı gerçekleştirilir. İlk olarak, sistem tasarımı kısmında yapılan problemin tanımına göre bağımlı parametreler ve bağımsız parametrelerin ne olacağına karar verilir. Eğer sonucu etkileyecek parametre sayısı fazla ise etkisi az olacağı düşünülenler ihmal edilir. Yine deney maliyetleri göz önünde bulundurularak, deney parametrelerinin sayısı artırılır ya da azaltılır. Seviyeler arasındaki farklar eşit bir şekilde azalmalı ya da artmalıdır. Deney seviyeleri bir faktörün alabileceği alt ve üst limit değerleri göz önünde bulundurularak belirlenir.

Aşınma miktarı ve aşınma oranını bulmak için yapılan aşınma deneylerinde kontrol faktörleri, bunların seviyeleri ve kodlanmış değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Bu çizelgede de gösterildiği gibi üç seviye seçilmiştir.

Çizelge 4.3. Aşınma deneyleri için kontrol faktörleri

Sembol	Kontrol parametreleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Malzeme	HRB	%0 Bazalt	%40 Bazalt	%60 Bazalt
B	Yük	N	5	10	15
C	Kayma mesafesi	m	35	70	125
D	Kayma hızı	m/s	0,375	0,66	0,94

Aşınma miktarı ve aşınma oranı için yapılan deney tasarımında öncelikle etkileşimli oldukları tahmin edilen faktörler dikkate alınarak ilgili kolona atanmıştır. Bu çalışmada 4 parametrelili ve 3 seviyeli bir matematik model seçilmiş (L27) ve Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Bu çizelgede birinci sütun malzeme türü, ikinci sütun yükü, üçüncü ve dördüncü sütun bunların etkileşimini, beşinci sütun kayma mesafesini ve altıncı devir sayısını göstermektedir

Çizelge 4.4. L27 (3^{13}) tasarımı

Deney sırası	1	2	1*2 (3)	4	5	6	9
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	2
5	1	2	2	2	2	2	3
6	1	2	2	2	3	3	1
7	1	3	3	3	1	1	3
8	1	3	3	3	2	2	1
9	1	3	3	3	3	3	2
10	2	1	2	3	1	2	2
11	2	1	2	3	2	3	3
12	2	1	2	3	3	1	1
13	2	2	3	1	1	2	3
14	2	2	3	1	2	3	1
15	2	2	3	1	3	1	2
16	2	3	1	2	1	2	1
17	2	3	1	2	2	3	2
18	2	3	1	2	3	1	3
19	3	1	3	2	1	3	3
20	3	1	3	2	2	1	1
21	3	1	3	2	3	2	2
22	3	2	1	3	1	3	1
23	3	2	1	3	2	1	2
24	3	2	1	3	3	2	3
25	3	3	2	1	1	3	2
26	3	3	2	1	2	1	3
27	3	3	2	1	3	2	1

Sürtünme katsayısını bulmak için yapılan deneylerdeki kontrol faktörleri, bunların seviyeleri ve kodlanmış değerleri Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Bu çizelgede de gösterildiği gibi üç seviye seçilmiştir.

Çizelge 4.5. Sürtünme katsayısı deneyleri için kontrol faktörleri

Sembol	Kontrol parametreleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Malzeme	HRB	%0 Bazalt	%40 Bazalt	%60 Bazalt
B	Yük	N	5	10	15
C	Kayma hızı	m/s	0,375	0,66	0,94

Sürtünme katsayısı için yapılan deney tasarımında öncelikle etkileşimli oldukları tahmin edilen faktörler dikkate alınarak ilgili kolona atanmıştır. Bu araştırmada 3 parametrelili ve 3 seviyeli (L9) matematik modeli seçilmiştir.

Taguchi'nin optimizasyonunda S/G çeşidi sayısı fazla olmakla beraber bunlardan en yaygın olarak kullanılan üç tanesidir. Bunlarda: (a) Daha küçük daha iyi (S/G), (b) Daha büyük daha iyi (S/G), (c) Nominal daha iyi (S/G) şeklindedir.

Bu yaklaşımda da; ortalamayı ve varyasyonu olabildiğince küçültmek istenen problemlerde kullanıldığı için bizim çalışmamızda bu yaklaşım seçilmiştir. Daha küçük daha iyi ölçütüne göre S/G oranı;

$$S/G = -10 \log_{10} \times \sum \frac{y_i^2}{n} \quad (4.1)$$

formülü ile hesaplanır. Burada:

y_i Ölçüm sonuçlarının toplamının karesi

n ise toplam ölçüm sayısıdır.

Tasarım parametrelerinin en uygun parametrelerinin belirlenmesinden sonra son adım kalite karakteristiklerini geliştirmek ve tahmin etmek için tasarım parametrelerinin en uygun

seviyesini bulmaktır. Tahmini S/G oranı Eş. 4.1 yardımı ile tasarım parametrelerinin en uygun seviyesi bulunabilir: Buda;

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^o (\hat{\eta}_i - \eta_m) \quad (4.2)$$

Burada;

η_m , ortalama S/G oranının toplamı,

$\hat{\eta}_i$, en uygun seviyedeki S/G oranın ortalamasını,

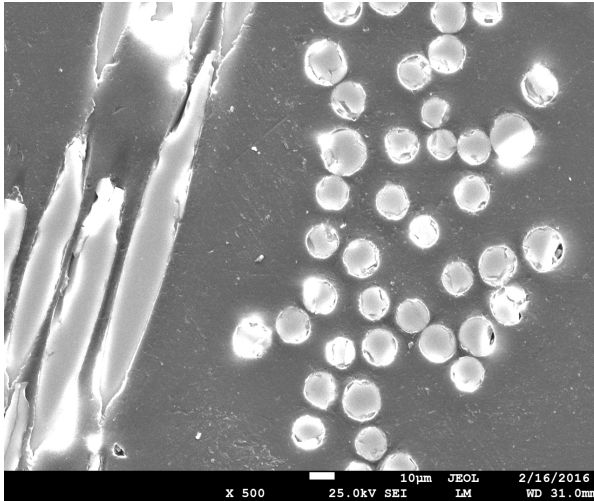
o , kalite karakteristiklerini etkileyen ana tasarım parametrelerin sayısıdır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Mikroyapı

Bazalt elyaf kumaşlar ile kalıp presleme metodu ile ağırlıkça %0, %40 ve %60 içerikli olarak üretilen epoksi polimer bazlı kompozitlerin mikro-yapısını incelemek amacıyla enine kesitler alınmıştır. Bu küçük parçalar, standart zımpara kağıtları ile 600 elek, 900 elek ve 1200 elekler ile taşlanmış ve daha sonrada 3 µm elmas pasta ile parlatılmıştır.

Resim 5.1’de ağırlıkça %40 bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozitin mikro yapısı düşük büyütmede (x500) gösterilmiştir. Düşük ölçekteki Taramalı Elektron Mikroskobu/TEM (Scanning Electron Microscope/SEM) görüntüsü hem elyaf dağılımını hem de boyuna elyaf yerleşimini göstermektedir. Burada elyaflar hem enine hem de boyuna doğrultuda oluşan dağılımını içermektedir (Resim 5.1). Bu fotoğraf, TEM’de ikinci (secondary) elektron demetinden alınmıştır. Yapı içerisinde elyafların düzgün olarak dağılım gösterdiği söylenebilir. Buna ilaveten, elyaf kesitinde bazı küçük ölçekte kırık ve çatlamların var olduğu gözlenmektedir. Bun durum muhtemeldir ki; bazalt elyaf ile epoksi arasındaki ara yüzey bağının yeterli derecede olduğunun bir göstergesi sayılabilir. Ayrıca, yapı içerisinde gözle görülebilir gözenekler de gözlenmemiştir.



Resim 5.1. Bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozitin enine kesitini gösteren elektron mikroskop altında alınan düşük büyütmedeki mikro yapısı

5.2. Aşınma Deneyi

Deneysel çalışmalarda bazalt kumaş takviyeli epoksi kompozit malzemenin farklı bazalt takviyesine sahip numuneler üzerinde farklı deney parametrelerinin etkisini görmek amacıyla aşınma kayıpları araştırılmıştır. Yük, kayma mesafesi, kayma hızı ve malzeme cinsi gibi ana parametreler yanında etkileşimler de dikkate alınarak L27 Taguchi deney planı seçilmiştir. Disk üzeri pim türü deney cihazından farklı deney şartlarında elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Bu deneyde dört farklı parametrenin etkisi incelenmiştir. Sonuçlar ağırlık kaybı metoduna göre hesaplanmış olup her bir deney üç defa tekrarlanarak ortalama değerler alınmış ve hem ağırlık kaybı (gr) hem de ortalama aşınma miktarı (mm^3/Nm) hesaplanmıştır. Ağırlık kaybı ve aşınma oranları sinyal/gürültü oranına dönüştürülmüştür. Bu değerler Çizelgenin yedinci ve son kolonlarında yer almaktadır. Ağırlık kaybı metoduna göre bu sonuçlar göstermektedir ki en büyük etkiyi kayma mesafesi ve bunu da uygulanan yük takip etmiştir. Kayma hızının ve malzeme türünün etkisinin daha az olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.1. Bazalt takviyeli epoksi kompozitlerin aşınma deneyi sonuçları

Deney numarası	Bazalt takviye oranı (%)	Yük (N)	Kayma mesafesi (m)	Devir sayısı (rpm)	Ağırlık kaybı (g)	Sinyal/gürültü oranı (Ağırlık kaybı)	Ortalama aşınma oranı (mm ³ /Nm)	Sinyal/Gürültü oranı (Aşınma oranı)
1	0	5	37	80	0.063	24.0824	0.278154322	11.1143
2	0	5	75	140	0.235	12.5868	0.754220391	2.4500
3	0	5	125	200	0.301	10.4143	0.426225088	7.4072
4	0	10	37	140	0.321	9.8618	0.718935041	2.8662
5	0	10	75	200	0.256	11.8250	0.429499165	7.3408
6	0	10	125	80	0.184	14.6970	0.140035892	17.0752
7	0	15	37	200	0.165	15.6609	0.282219794	10.9883
8	0	15	75	80	0.165	15.6693	0.182311331	14.7837
9	0	15	125	140	0.235	12.5786	0.126588872	17.9521
10	40	5	37	140	0.055	25.2561	0.183830741	14.7116
11	40	5	75	200	0.119	18.4861	0.160731182	15.8780
12	40	5	125	80	0.201	13.9318	0.193121055	14.2834
13	40	10	37	200	0.069	23.2482	0.153869102	16.2570
14	40	10	75	80	0.167	15.5249	0.161738772	15.8237
15	40	10	125	140	0.288	10.8091	0.124069533	18.1267
16	40	15	37	80	0.180	14.8958	0.197126416	14.1051
17	40	15	75	140	0.155	16.2086	0.096950436	20.2690
18	40	15	125	200	0.404	7.8745	0.155010161	16.1928
19	60	5	37	200	0.079	22.1026	0.217438927	13.2533
20	60	5	75	80	0.111	19.1249	0.139690869	17.0966
21	60	5	125	140	0.170	15.3822	0.127287057	17.9043
22	60	10	37	80	0.106	19.4574	0.140863128	17.0241
23	60	10	75	140	0.159	15.9508	0.136143172	17.3201
24	60	10	125	200	0.243	12.2914	0.154258378	16.2350
25	60	15	37	140	0.258	11.7609	0.143787373	16.8456
26	60	15	75	200	0.286	10.8666	0.140580534	17.0415
27	60	15	125	80	0.419	7.5619	0.127594432	17.8834
ORTALAMA DEĞER					0.200	15.12	0.22564	14.37885

5.2.1. Ağırlık kaybı sonuçlarına göre aşınma deneyi analizi

Şekil 5.1.a)'da epoksi bazlı kompozitlerde ana parametrelerin ortalama ağırlık kaybı üzerine etkileri gösterilmiştir. Buna göre ağırlık kaybının üzerine; kayma mesafesi, uygulanan yük ve devir sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı fakat bazalt oranının %40 olan numunelerde

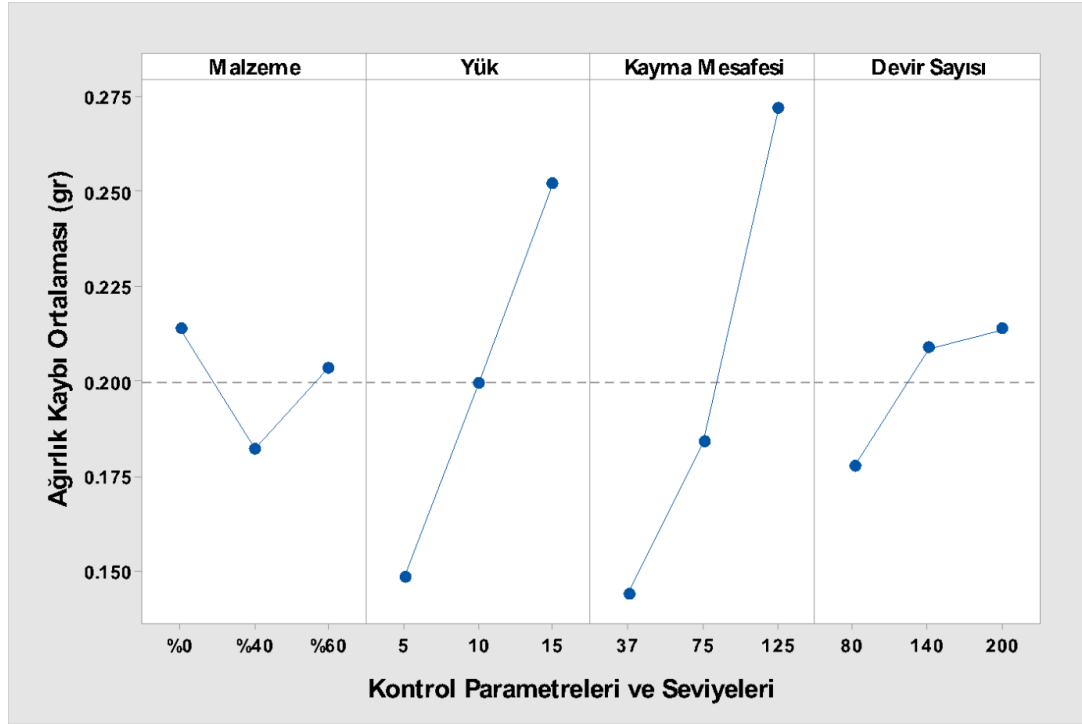
daha düşük ağırlık kaybı ortaya çıktığı gözlenmiştir. Ancak malzeme türünün, bazalt ağırlık oranının ve devir sayısının etkisinin düşük olduğu görülmüştür. En büyük etkiyi kayma mesafesi göstermektedir. Kullanılan SiC tanelerinin daha dirençli olduğunu test edilen malzemelerin ise daha zayıf olduğu göstermektedir. Çünkü SiC sertliği (2700 HV) iken bazalt takviyeli kompozitlerin sertliği ise 60,3 HRB=108 HV olduğu görülmektedir. Bu durum Eşitlik 5.1’de verilen Archard aşınma denklemine uygundur.

$$V = \frac{k \times L \times D}{H} \quad (5.1)$$

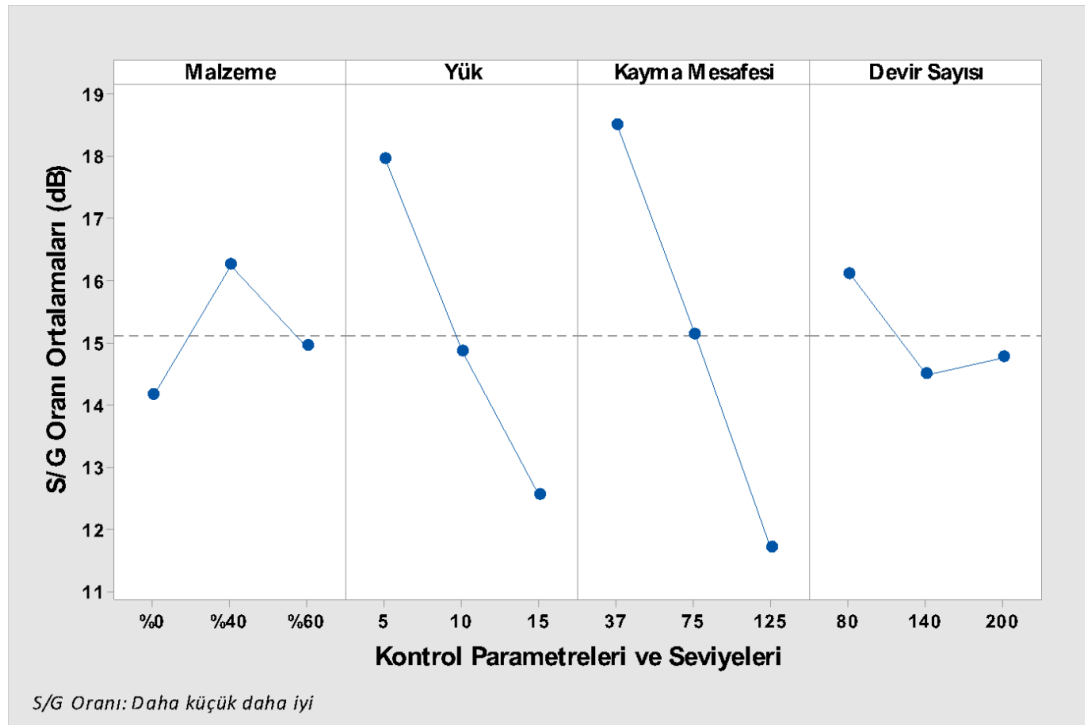
Bu denklemde;

V, malzemenin hacimsel kaybını (mm³),
 L, uygulanan yükü (N),
 D, kayma mesafesini (m),
 k, sabit aşınma katsayısını,
 H ise malzemenin sertliğini göstermektedir.

Şekil 5.1. b)’de test edilen kompozit numunelerin ana faktörlerin Sinyal/Gürültü oranları verilmiştir. Burada bulunan deneysel sonuçlar S/G oranına dönüştürülmüştür. Bu çalışmada verilen malzemelerin aşınma dirençleri araştırıldığından dolayı Taguchi metodunda uygulanan “en düşük en iyi” kalite karakteristiği dikkate alınmıştır. Her bir deney parametreleri için S/G oranları Eş. 4.2 denklemi ile hesaplanmıştır. Bu grafikten açık şekilde görülmektedir ki en büyük S/G oranı kayma mesafesinde gözlenirken en düşük S/G oranı ise devir sayısında ortaya çıkmıştır.



a) Ortalama ağırlık kaybı

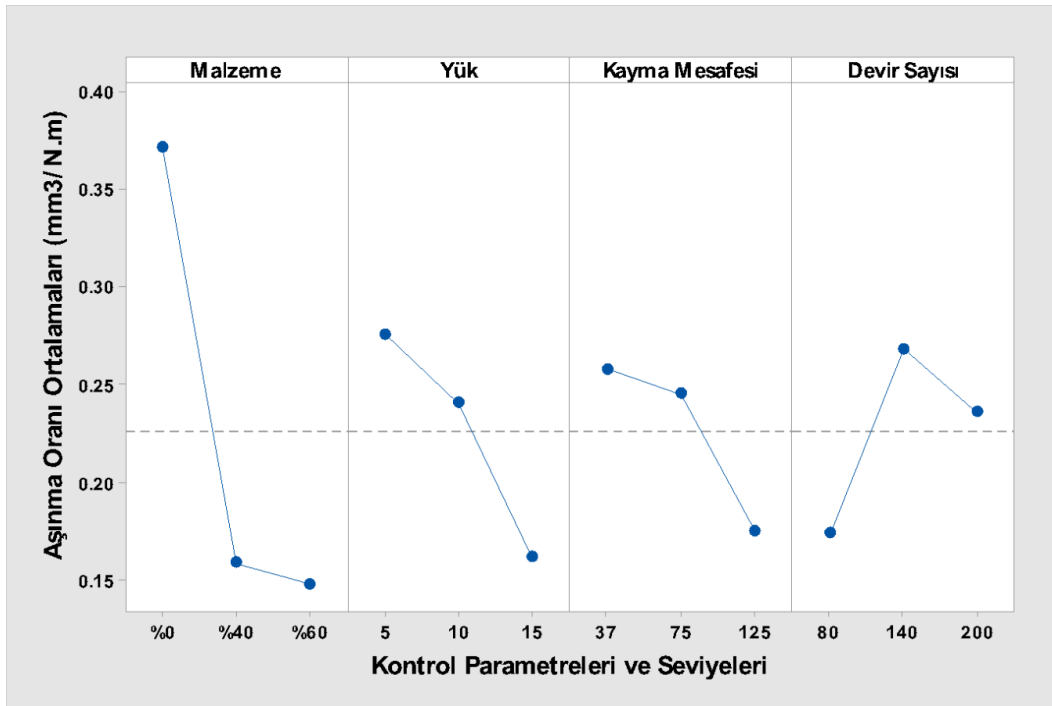


b) Sinyal/Gürültü oranı(dB)

Şekil 5.1. Kontrol parametrelerinin ağırlık kaybı üzerine etkileri

5.2.2. Aşınma oranı sonuçlarına göre aşınma deneyi analizi

Aynı malzemelerin Şekil 5.2’de aşınma oranları ortalamalarının kontrol parametreleri üzerine değişimi verilmiştir. Grafikte ortalama aşınma oranı üzerine malzeme türünün daha etkin olduğu bunu uygulanan yük ve devir sayısı takip ettiği gözlenmiştir. Karşılık disk üzerindeki SiC’e karşı (sertleştirilmiş çelik disk) %60 içerikli epoksi kompozit daha iyi direnç göstermektedir. Bunun sebebi daha çok elyaf demetin olması halinde diskin batma yeteneği azalmakta olmasıdır. Fakat matris ile batma yeteneğinin daha etkili olduğu dolayısı ile daha çok malzeme kaybına yol açtığı görülmektedir. Diğer iki faktörde ise aynı eğilim ortaya çıkmıştır. Malzeme türü bazalt içeriği, yük ve hız arttıkça aşınma miktarının azaldığının fakat malzeme türünün daha etkin olduğunu göstermiştir. Burada ortaya çıkan uygun değer parametreler %60 bazalt takviyeli kompozit, 15N, 125 m ve 80 devir/dakika olarak tespit edilmiştir.

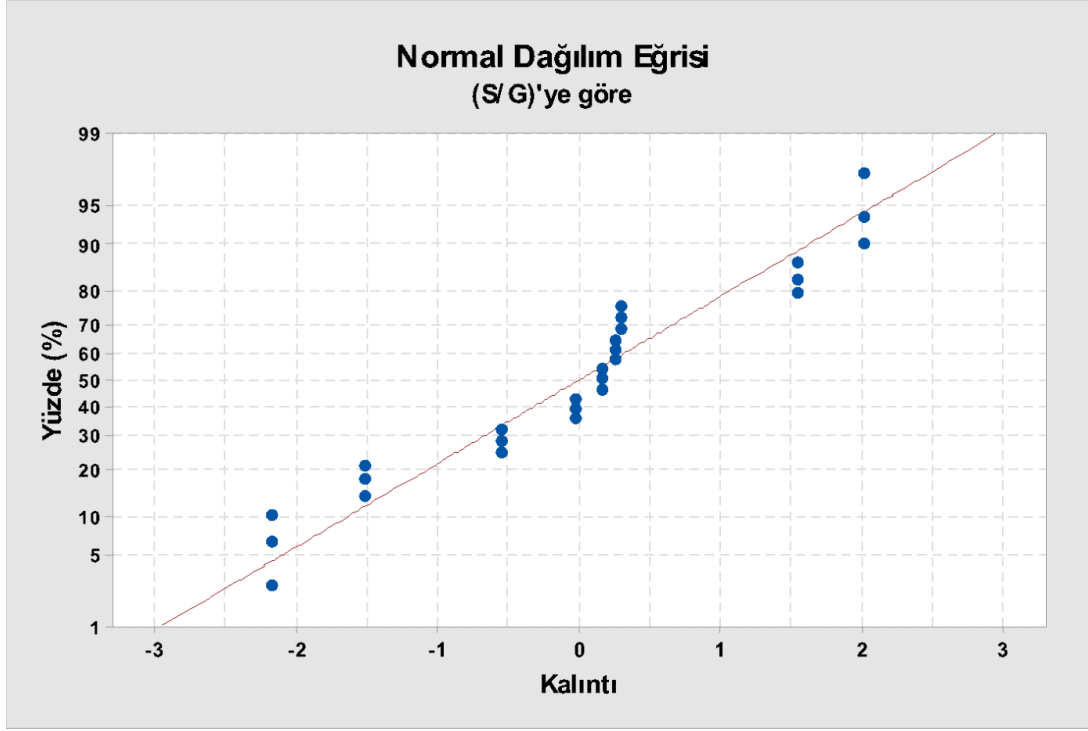


Şekil 5.2. Kontrol parametrelerinin aşınma oranı üzerine etkileri

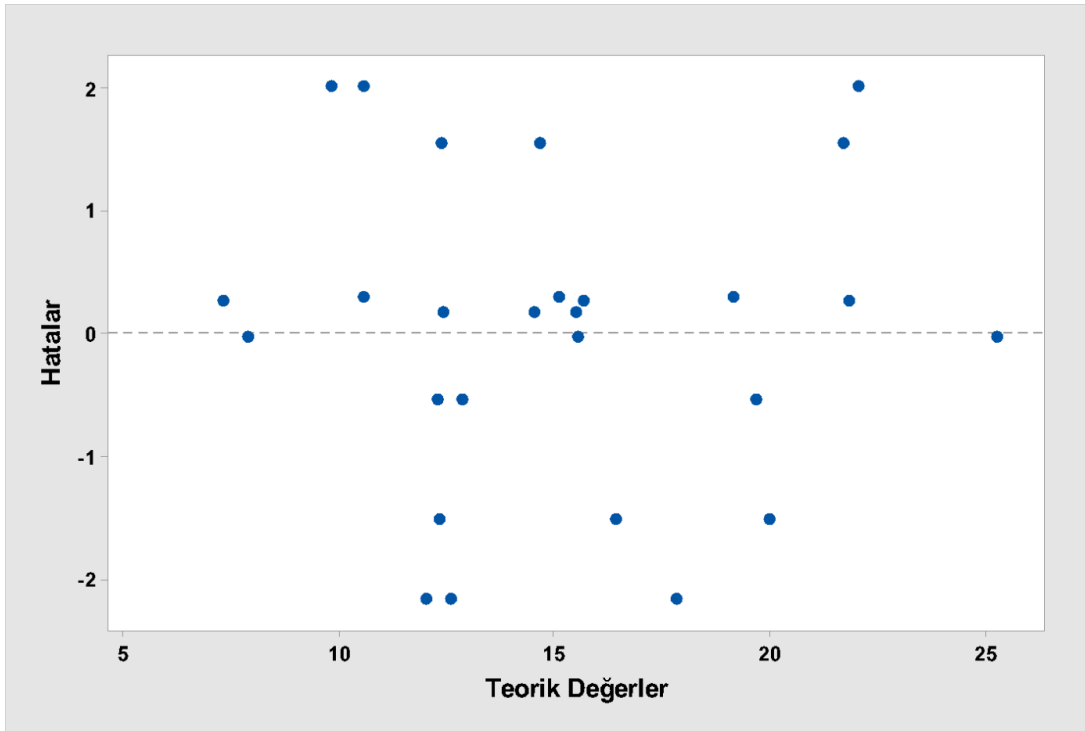
Daha önce yapılan bir çalışmada [6] bazalt elyafların oranı artarken aşınmadaki azalma trendi %20 içerik oranına kadar devam etmiştir. Sürtünme katsayısında ise %10 bazalt içeriği sonrası azalma görülmüştür. Yaptığımız çalışmada da benzer şekilde aşınmadaki azalma trendi %40 içeriğe kadar devam etmiş sonra artma meydana gelmiştir. Sürtünme katsayısı ve aşınma oranının yük arttıkça azaldığı görülmektedir. Yaptığımız deney

sonuçlarında da benzer sonuçlar elde edilmiş olup, Şekil 5.2’de görüldüğü gibi aşınma oranı yük arttıkça azalmıştır. Bunun nedeninin uygulanan yük arttırıldıkça, bazı büyük parçacıkların, yassı kıymıkların yüzeyden koptuğu ve yüzeyde yağlayıcı vazifesi gördüğü şeklinde açıklanabilir. Orta hızda aşınma oranının arttığı anlaşılmıştır. Fakat daha sonra artan hızla aşınma oranının tekrar düştüğü görünmektedir. Bunun muhtemel sebebi kırılan elyaf liflerin yüzey içine gömülmesinden ve direnç göstermesinden kaynaklanmış olabilir. PEEK malzemelerde yüzey incelemesi yapıldığında aşınma yolunun düz olmadığı parabolik olduğu görülmüştür. Yüksek yükte malzemenin visko elastik davranışı sürtünme-aşınma davranışına etkilidir [28].

Şekil 5.3. a) ve b)’de aşınma miktarının normal dağılım eğrisi ve bağımsız parametrelerin etkisi olarak kalıntılar-hatalar grafiği gösterilmiştir. Bu eğrilerde verilerin doğru boyunca normal dağılımdan göstermiştir. Kalıntılar teorik ve deneysel ölçümlerden hesaplanmıştır. Teorik ve ölçüm arasındaki fark kalıntı olarak adlandırılır. Kalıntı dağılımlarının normal olduğu görülmüştür. Burada ortaya çıkan kalıntı oranı ± 2 aralığındadır. Yapılan deneylerde kalıntılar pozitif ve negatif tarafta hemen hemen eşit olarak yayıldığı gözlenmektedir.



a) Aşınma miktarının normal dağılım eğrisi



b) Aşınma miktarında oluşan hata birikintileri

Şekil 5.3. Aşınma miktarının normal dağılım eğrisi ve aşınma miktarında oluşan hata

Teorik değerler ile hata dağılımı da Şekil 5.3'de gösterilmiş olup S/G oranında hata değişim

oranı yaklaşık %2 oranında olduğu görülmektedir.

5.2.3. Kontrol faktörlerinin belirlenmesi

Yapılan Taguchi analizi ile elde edilen Sinyal/Gürültü oranı ve ortalama oranı karşılık tablosu Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te verilmiştir. Bu çizelgeye göre, seviyeler arasında çok fark oluşmuşsa bu daha etkili olduğunu göstermektedir. En etkili kontrol faktörleri ise en yükseği ile en düşük değer arasındaki fark belirlenerek bulunmuştur. Bu bulunan değer bu cevap tablosunun alt kısmında da etki derecesi olarak belirtilmiştir.

Çizelge 5.2'de elde edilen sonuçlar aynı zamanda Minitab istatistik programı aracılığıyla S/G oranına dönüşüm yapılmıştır. Çizelge 5.2'de, Sinyal/Gürültü oranı için oluşturulan karşılık tablosuna göre aşınma oranına en çok etki eden faktör kayma mesafesi olarak bulunmuştur. Diğer etki eden faktörler sırasıyla uygulanan yük, malzeme türü ve hız olarak belirlenmiştir. Bu tablolardaki son satır etki derecelerini açık şekilde göstermektedir. Çizelge 5.3'e göre; malzeme kaybı üzerine en çok etki eden faktör kayma mesafesi ve sonra sırasıyla uygulanan yük, kayma hızı ve malzeme türü olarak belirlenmiştir. Buna göre ana parametreler için en uygun değerleri belirlenir. Optimum ağırlık miktarı sırasıyla A2, B1, C1 ve D1 değerleridir.

Çizelge 5.2. Sinyal/Gürültü oranı karşılık cevap tablosu

Seviyeler	Malzeme türü, A (HRB)	Uygulanan yük, B (N)	Kayma mesafesi, C (m)	Devir sayısı, D, (rpm)
1	14.15	17.93	18.48	16.11
2	16.25	14.85	15.14	14.49
3	14.94	12.56	11.73	14.75
Fark	2.10	5.37	6.75	1.62
Sıralama	3	2	1	4

Çizelge 5.3. Ortalama ağırlık oranı karşılık cevap tablosu

Seviye	Malzeme türü (HRB)	Uygulanan yük (N)	Kayma mesafesi (m)	Devir sayısı (rpm)
1	0.2139	0.1481	0.1439	0.1773
2	0.1820	0.1997	0.1837	0.2085
3	0.2035	0.2518	0.2717	0.2135
Fark	0.0319	0.1037	0.1278	0.0363
Sıralama	4	2	1	3

Bu çalışmada en büyük etkiyi kayma mesafesi (fark=0,1278) ve bunu uygulanan yük (fark=0,1037) takip etmiştir. Daha düşük etkiyi ise devir sayısı (fark=0,0363) ve malzeme türü (fark=0,0319) sırasıyla göstermiştir. Ana parametreler için en uygun değerleri ise sırasıyla kayma mesafe 1, yük 1, hız 1 ve malzeme 2 takip etmiştir.

5.2.4. Varyans analizi

Bu çalışmada kalite karakteristiği üzerine hangi tasarım parametresinin daha etkili olduğunu tespit etmek amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Bu Çizelgede; serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (KT), kareler ortalaması (KO), Fisher sabiti(F) ve katkı faktörü (P) değerlerini göstermektedir. F tasarım parametresi, ortalama karelerin sapmasının ortalama hataların oranı olarak hesaplanır. Bu tasarım %95 güvenirlik %5 hata payına göre analiz yapılmıştır. Tüm kontrol faktörleri için F değerleri hesaplanmış ve çizelge değeri de verilmiştir. Çizelgede son kolon her bir faktörün katkı seviyesini göstermektedir. Bu çizelgenin son sütununda ise toplam değişim üzerine katkı oranları hesaplanmış değerleri verilmiştir % ile ifade edilir. Şayet her bir faktörün etki değeri meydana gelen hata miktarından düşükse bu ihmal edilebilir olduğunu gösterir. Serbestlik derecesi faktör sayısından bir çıkartılarak hesaplanır. Kontrol faktörleri yanında etkileşimler de dikkate alınmıştır. Bu şekilde hem ana parametreler hem de etkileşimler arasında en uygun olanı en düşük olan prensibinden faydalanarak en uygun değerler tespit edilmiştir.

Bu Çizelge göstermektedir ki en büyük etki kayma mesafesi %31,49 katkıya sahip olduğu, bunu uygulanan yük %19,79 oranında katkıyla takip etmektedir. Bunu da farklı bazalt içerikli numuneyi ifade eden malzeme türü ve uygulanan yük etkileşimi %19,31 katkı

oranıyla göstermiştir. En düşük etkiyi ise %1,95 ile malzeme türü ve %2,83 ile hız takip etmektedir. R^2 değeri %91,9 bulunmuştur (Çizelge 5.4). Varyans analizi sonuçları ile ortalama ağırlık oranı çizelgesinin benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.

Çizelge 5.4. Bazalt epoksi bazlı kompozitlerin varyans analizi sonuçları

Kaynak	Serbestlik derecesi (SD)	Kareler toplamı (KT)	Ayarlanmış kareler toplamı (AKT)	Kareler ortalaması (KO)	F_{hes}	$F_{çiz}$	P	P(%)
Malzeme türü, A	2	0,004770	0,004770	0,002385	0,72	5,14	0,524	1,95
Uygulanan yük, B	2	0,048399	0,048399	0,024199	7,32	5,14	0,025	19,79
Kayma mesafesi, C	2	0,077018	0,077018	0,038509	11,64	5,14	0,009	31,49
Hız, D	2	0,006944	0,006944	0,003472	1,05	5,14	0,407	2,83
A x B	4	0,047240	0,047240	0,011810	3,57		0,081	19,31
A x C	4	0,018098	0,018098	0,004525	1,37		0,348	7,4
A x D	4	0,022247	0,022247	0,005562	1,68		0,271	9,09
Artık hata	6	0,019844	0,019844	0,003307				8,11
Toplam	26	0,244560						100

5.2.5. Doğrulama deneyleri

Bu deneylerde son yapılması gereken aşama; doğrulama deneylerini gerçekleştirmektir. Bu da en uygun tasarım parametresi seçilerek yapılır. Optimum tasarım parametre değerleri ana faktörlere göre yukarıdaki kısımda bulunmuştur.

Çizelge 5.3'teki yanıt çizelgesindeki ortalama ağırlık kaybı esas alınarak bulunan en uygun değerler malzeme için A2, yük için B1, kayma mesafesi için C1 ve devir sayısı için D1 değerleri alınmıştır.

S/G oranına karşılık gelen ağırlık kaybı Bölüm 4'te bulunan Eş. 4.2 kullanılarak yanıt

tablosundaki değerler ile hesaplanır.

$$T=0,2+(0,182-0,2)+(0,1481-0,2)+(0,1439-0,2)+(0,1773-0,2)$$

$$T=0,0513 \text{ gr}$$

Çizelge 5.1, aşınma deneyi sonuçları çizelgesinden ortalama ağırlık kaybı 0,200g değeri T_m olarak alınmıştır. Eşitlik 4.2’de etkili ana parametreler ile birleştirilerek yerine konularak teorik değer 0,0513 gr hesaplanmıştır. A2, B1, C1 ve D1 optimize edilen şartlar ile deneyler tekrarlanmış ve 0,054 gr bulunmuştur. Elde edilen değerler birbirine yakın olarak ortaya çıkmıştır. Hata payı hesaplanmış olup %5,26 hata payı elde edilmiştir. 10 numaralı deneyde de benzer sonuçlar elde edilmiş olup hata payı % 7,21 elde edilmiştir. Dolayısı ile bu değerler kabul edilebilir değerler arasında bulunmaktadır. Doğrulama deneyleri sonuçları ve hesaplanan değerlerle karşılaştırılması Çizelge 5.5’te verilmiştir.

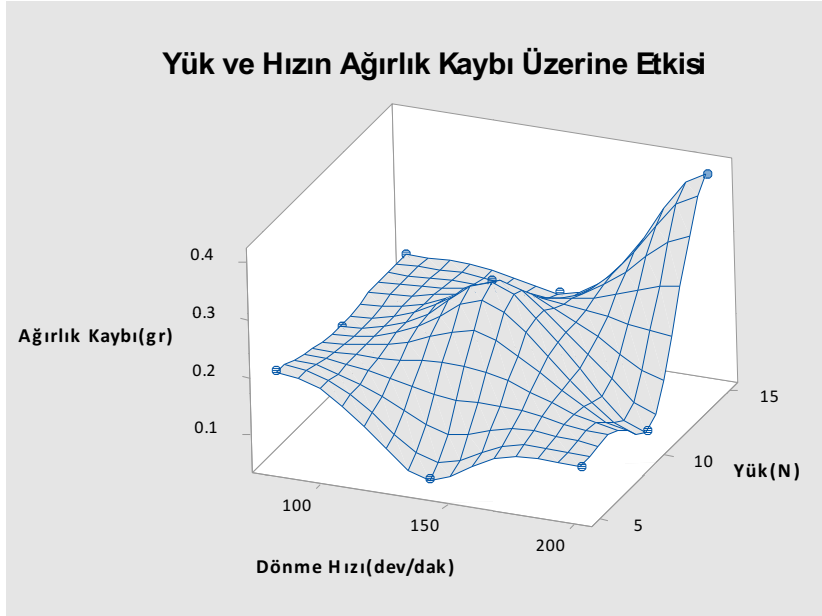
Çizelge 5.5. Doğrulama deneyleri ve hesaplanan değerlerle karşılaştırılması

Deney şartları	Deneysel Sonuçlar	Hesaplanan Değerler	Fark (g)	Hata Payı (%)
	A2 B1 C1 D1	A2 B1 C1 D1		
Deney 1	0,054	0,0513	0,0027	6,23
Deney 2	0,056	0,0513	0,0037	

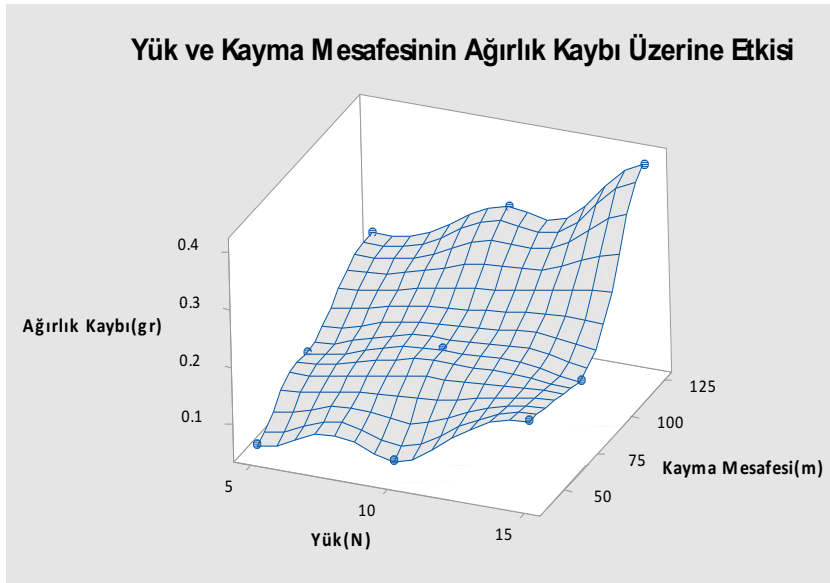
5.2.6. Üç boyutlu aşınma etki grafikleri

Şekil 5.4’te bağımlı değişkenlerin ortalama ağırlık kaybına etkilerinin yüzey grafiği olarak gösterimi verilmiştir. Hız ve uygulanan yük etkileşiminin gösterildiği Şekil 5.4. a)’da, en düşük ortalama ağırlık kaybının 140 devir/dakika hız ve 10 N kuvvet altında gerçekleştiği görülmüştür. Bununla birlikte, yükün artması ile batma derinliği artmaktadır bunun da ortalama ağırlık kaybını arttığı görülmüştür. Şekil 5.4. b), ağırlık kaybının 5N ve 75 m kayma mesafesinde en az olduğunu göstermektedir ve kayma mesafesinin 125 m’ye artması ile ağırlık oranının ciddi bir şekilde arttığı görülmüştür. Bunun nedeni büyük ihtimalle SiC aşındırıcı kağıttaki parçacıkların keskinlik derecesinin numunelerdeki ağırlık kaybını arttırması olmaktadır. Şekil 5.4. c)’de hız ve mesafe etkileri en az aşınma kaybının, hızın arttırılması ve kayma mesafesinin arttırılması ile oluştuğunu gösterir. Bunun nedeninin aşındırıcı ve kompozit numuneler arasında transfer tabakasının oluşması sonucu olduğu

düşünülebilir. Bu sonuç önceki ana sonuç etkilerini doğrulamaktadır.

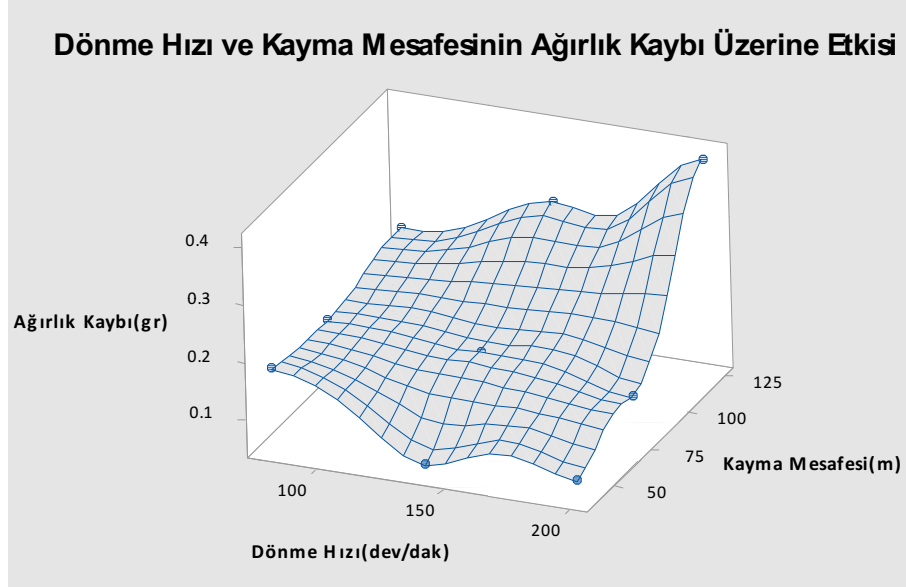


a) Yük ve hızın ağırlık kaybı üzerine etkisi



b) Yük ve kayma mesafesinin ağırlık kaybı üzerine etkisi

Şekil 5.4. Bağımlı değişkenlerin ortalama ağırlık kaybı üzerine etkilerinin 3 boyutlu değişim grafiği



c) Hız ve kayma mesafesinin ağırlık kaybı üzerine etkisi

Şekil 5.4. (Devam) Bağımlı değişkenlerin ortalama ağırlık kaybı üzerine etkilerinin 3 boyutlu değişim grafiği

5.3. Sürtünme

Birbiriyle temasta olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan elemanlar arasındaki harekete karşı ortaya çıkan direncin “sürtünme” olduğu bilinmektedir. Zaman, enerji ve maddi kayıplara yol açtığından dolayı yeni kompozitlerin tasarlanması ve davranışların belirlenmesi çok önem arz etmektedir. Bazalt takviyeli epoksi bazlı kompozitlerin SiC abrasiv kağıtlara karşı elde edilen sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı sonuçları Çizelge 5.6’da gösterilmiştir. Bu deneylerde; bu polimer bazlı kompozitlerin sürtünme davranışları incelenmiştir. Bu tabloda ölçülen sürtünme kuvvetleri en az iki kuvvet ölçümü yapılmış olup bunların ortalama değeri alınarak tabloya dâhil edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan bu 3 malzeme için sürtünmenin zamana göre değişim grafikleri elde edilmiştir. Katkısız epoksinin aşınma ve sürtünme direncinin zayıf olduğu ama bazalt katkısı ile bu dezavantajın ortadan kalktığı saptanmıştır. En düşük sürtünme katsayısının ise epoksi ana malzemesinde olduğu bunu da 40 % içerikli polimer kompozitin takip ettiği gözlenmiştir. Ayrıca, kompozitler arasında da en yüksek sürtünme katsayısını %60 içerikli kompozitler göstermiştir. Bunun sebebinin takviye elemanı oranı arttıkça malzeme içerisinde sert liflerin ve parçacıkların kırılması, çatlaması ve zamanla kütleden koparak aşındırıcı ile iş parçası arasındaki ara yüzeye girerek yapışmasından ve daha sonra kütleden kopmasından ileri gelmektedir. Malzeme türüne göre genel sürtünme katsayısına bakılacak olursa; EP, B40 ve

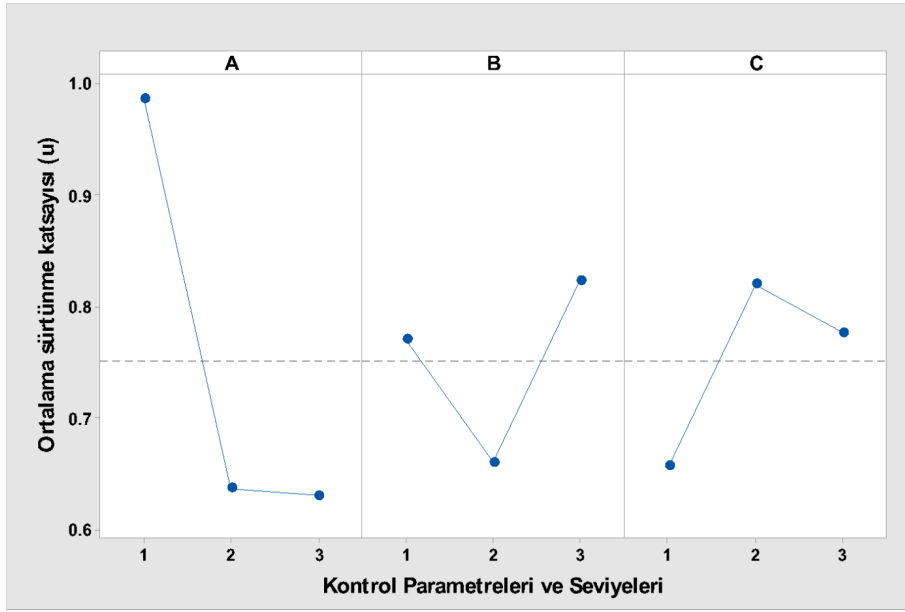
B60 takviyeli epoksi kompozitlerde sırasıyla 0,77; 0,66 ve 0,82 olarak elde edilmiştir (Çizelge 5.6). Epoksde 0,77 olmasının nedeni elbette yapışma bileşeninin etkin olmasından kaynaklanmış olabilir, %40 içerikli kompozitte sürtünme katsayısının düşmesi ise seramik fazının daha düşük sürtünme katsayısına sahip olmasından kaynaklanırken %60 içerikli kompozitte artış göstermiş olmasının nedeni de tamamen elyaf demetinin kırılmasından ve yüzeyde oluşturduğu tahribattan dolayı ve morfolojiden kaynaklanmış olduğu sanılmaktadır.

Çizelge 5.6. Bazalt takviyeli epoksi bazlı kompozitlerin ölçülen ve hesaplanan sürtünme katsayısı sonuçları

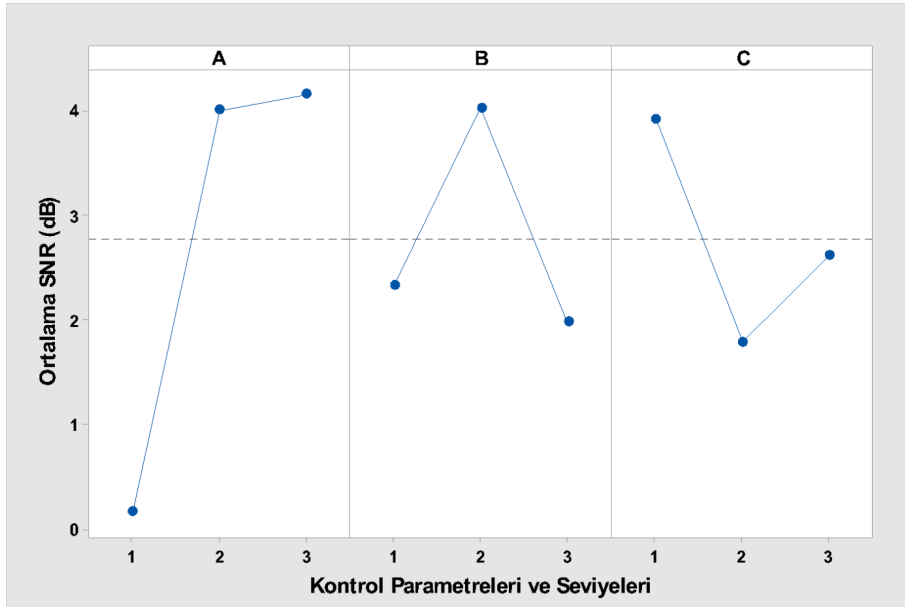
Deney No	Uygulanan yük, A (N)	Malzeme Cinsi, B	Devir sayısı, C (devir/dak)	Ortalama sürtünme katsayısı (μ)	Sürtünme katsayısı (μ)	SNRA (dB)	Teorik sürtünme katsayısı (μ)	Fark (%)
1	5	EP	80	4,42	0,88	1,1103	0,911	3,40
2	5	B40	140	4,8	0,96	0,3545	0,964	0,41
3	5	B60	200	5,6	1,12	-0,9843	1,084	3,32
4	10	EP	140	7,6	0,76	2,3837	0,724	4,97
5	10	B40	200	5,4	0,54	5,3521	0,571	5,43
6	10	B60	80	6,1	0,61	4,2934	0,614	0,65
7	15	EP	200	10,3	0,67	3,4785	0,674	0,59
8	15	B40	80	7,12	0,48	6,3751	0,444	8,11
9	15	B60	140	11,2	0,74	2,6153	0,771	4,02
	Ortalama sürtünme katsayısı				0,75	Hata, %		3,43

Şekil 5.5. a) ve b)'de ana kontrol faktörlerinin sürtünme katsayısı üzerine ortalama ağırlık kaybı ve S/G oranlarının etkileri gösterilmiştir. Bu deney sonuçları arasında en büyük etkiyi uygulanan yük, kayma hızı ve malzeme türü sırasıyla göstermiştir. Çünkü A1 ile A3 arasındaki fark 0,356 oluşurken B3 ile B2 arasındaki fark 0,163 iken C2 ile C1 arasındaki fark ise 0,163 olarak ortaya çıkmıştır. Fakat en uygun parametreler ise A3 B2 C1 şartlarında oluşmuştur. Bunun anlamı sürtünme üzerine en iyi şartların yükün 15N uygulanması, B40 katkılı epoksi kompozitin 140 dev/dak'da çalışması halinde oluşmuş demektir. Bu sonuçlar daha önce elde edilen çalışmaları desteklemektedir. Çünkü yük arttıkça ara yüzeyde oluşan sıcaklık artmakta ve bu da kompozit malzemede ara yüzey bağının zayıflamasına ve daha sonra matrisle elyafın ayrılmasına ve matrisin kaybına neden olmasından ileri gelmiş olabilir [29]. Şekil 5.5. b)'de ise ortalama sürtünme katsayılarına karşılık gelen S/G oranları şeklinde gösterilmiştir. Bu sonuçlar ortalama değer neticesinde elde edilen sonuçların zıttı şeklinde gerçekleşmiştir, çünkü ortalama değerler gerçek ölçülen değerlerin en-küçük, en-iyi esas

alınırken burada gösterilen değerlerde ise Sinyal/Gürültü (S/G) oranını göstermektedir ki bu da en-büyük, en-iyi karakterizasyonu alınmaktadır. Şekil 5.6'da ise sürtünme deneyinde teorik sürtünme değerine karşılık meydana gelen hatalar gösterilmiştir. Bu şekilde de görüleceği gibi 0' hattı esas alınacak olursa bu doğrunun üzerinde ve altında oluşan sayısal değerler dikkate alındığında %5'den daha düşük oranda oluştuğu söylenebilir. Bunun anlamı, sonuçların yeterli derecede doğru tahmin edilebileceğini göstermektedir.

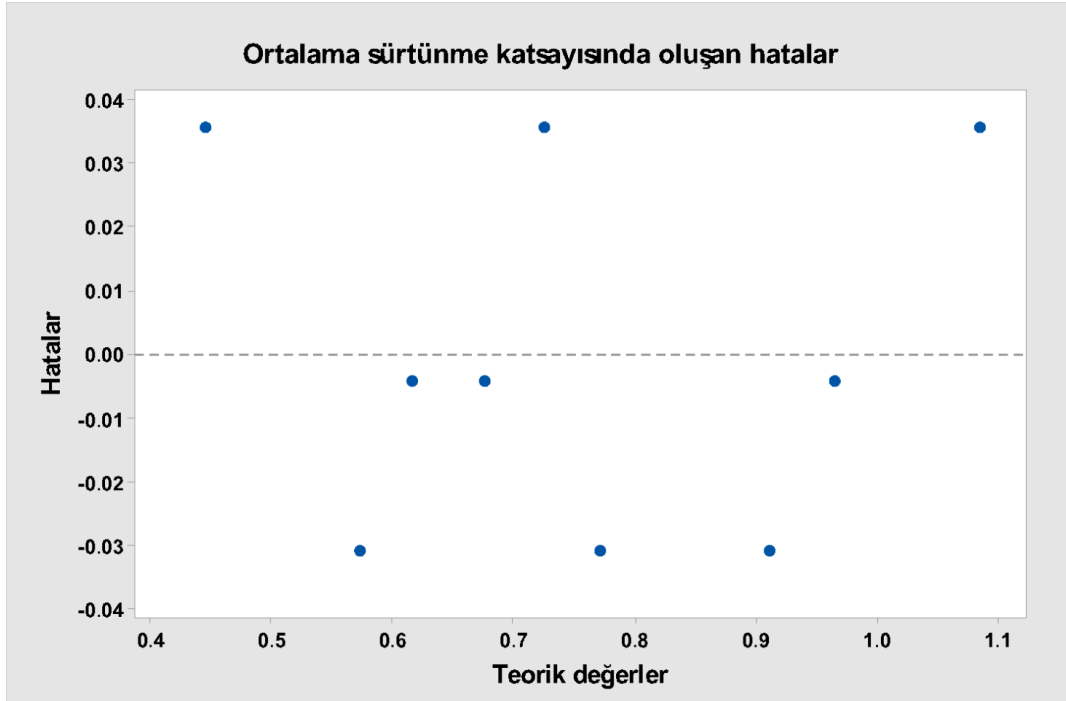


a) Sürtünme katsayısının kontrol parametrelerine göre değişimi,



b) S/G oranının değişimi

Şekil 5.5. Ana kontrol faktörlerinin sürtünme katsayısı üzerine etkisi

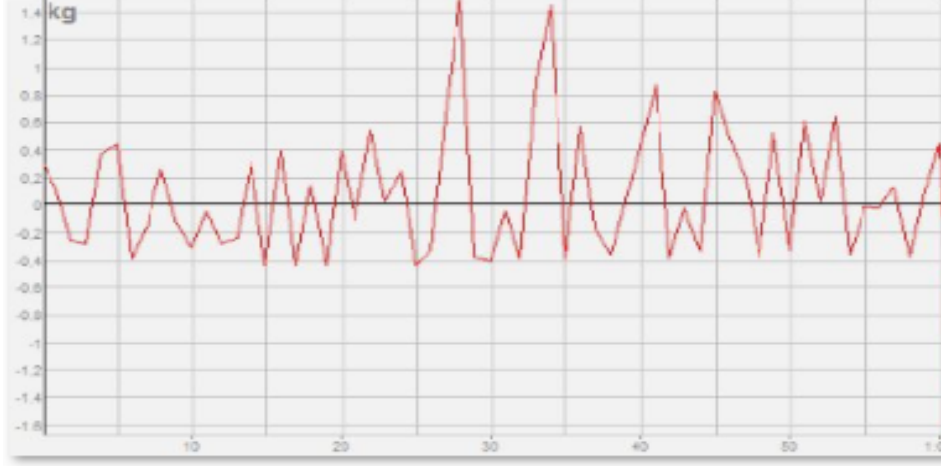


Şekil 5.6. Sürtünme esnasında teorik değere karşılık gelen hata oranları

5.3.1. Sürtünme - zaman eğrileri

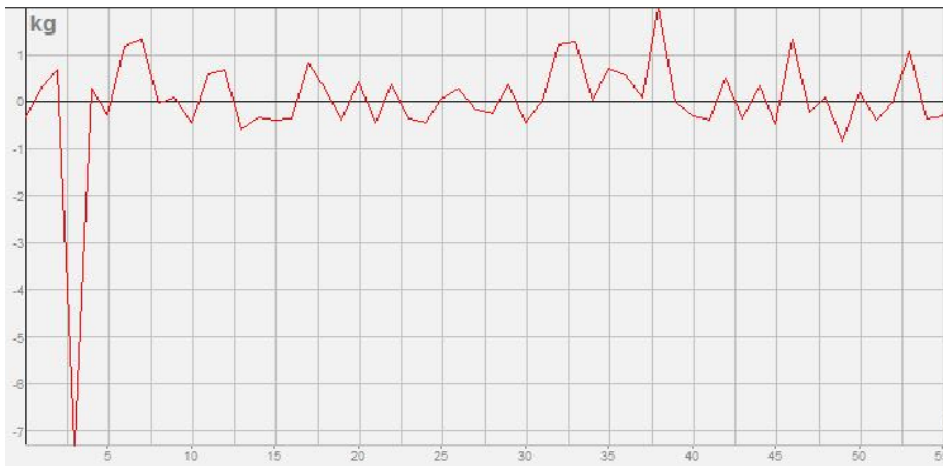
Burada yapılan deneysel çalışmalarda üç tür malzeme, ana matris olarak EP polimer ve kompozitler olmak üzere araştırma yapılmıştır. Epoksi dâhil B40 takviyeli epoksi kompozit ve B60 takviyeli epoksi kompozitler farklı deney şartlarında deney esnasında sürtünme kuvvetleri ölçülmüş olup gerekli grafikler elde edilmiştir. Matris, B40 katkılı ve B60 katkılı kompozitler üzerinde oluşan kuvvetler ölçülmüş olup sırasıyla Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9’da gösterilmiştir. Bu grafiksel şekillerin incelemesinden anlaşılabileceği üzere, en düşük sürtünme katsayısı %40 bazalt takviyeli kompozitte ($\mu=0,48$) 8 numaralı deneydedir nedeni ise 15 N yük, 80 devir/dak ile birleşmiş bunu yine B40 takviyeli kompozitte ($\mu=0,54$) 5 numaralı deney şartlarında elde edilmiştir. Fakat en fazla sürtünme katsayısı ise bazalt katkılı fakat %60 içerikli kompozitte ($\mu=1,12$) 3 numaralı deneyde gözlenmiştir ve bunu ise B40 ($\mu=0,96$) iki numaralı deney şartları takip etmiştir. B60 katkılı kompozitte yüksek olması normaldir çünkü elyaf kırılmasının oluşması, yerinden sökülmesi ve yüzey topografisini bozmasından ileri gelmekte olduğundan abrasiv bileşenin burada etkin olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.7’de saf epoksi matrisin düşük yük altında zamana göre sürtünme kuvvetinin değişimi gösterilmiştir. Düşük yük altında yapılan deneyde oluşan kuvvet ortalaması yaklaşık 4,45N olarak ölçülmüştür. Bu grafikte başlangıçta sürtünme kuvveti düşük iken zamanla bir kaç noktada 1,4 N’a çıktığı görülmektedir bu muhtemelen sert parçacıkların

yapışma sonucu kırılmalarından kaynaklanmıştır, bazı dalgalanmalar olsa da kararlı davranış olarak adlandırılabilir.



Şekil 5.7. Saf epoksinin farklı yükler altında sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi (5N yük altında ve 80 dev/dak)

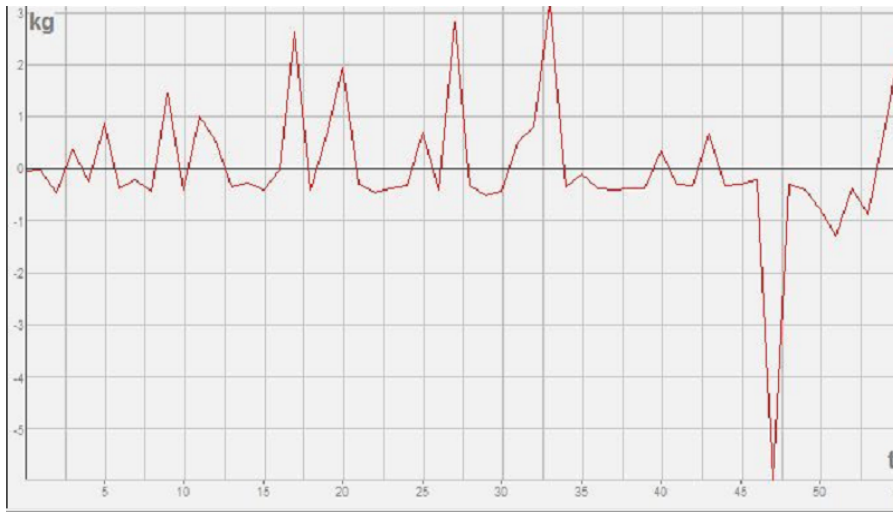
Şekil 5.8’de bazalt katkılı epoksinin sabit yük altında sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi gösterilmiştir. Burada deneyler; B40, 15N ve 80 dev/dak ile gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde meydana gelen sürtünme kuvveti artmış olup yaklaşık 7-8 N aralığına ulaştığı gözlenmiştir. Bunun sünek ve yumuşak epoksi matris içerisine gömülen yüksek sertlik ve sağlamlığa sahip olan bazalt liflerinin olmasından, dolayısı ile daha kararlı davranmasından ileri geldiği sanılmaktadır.



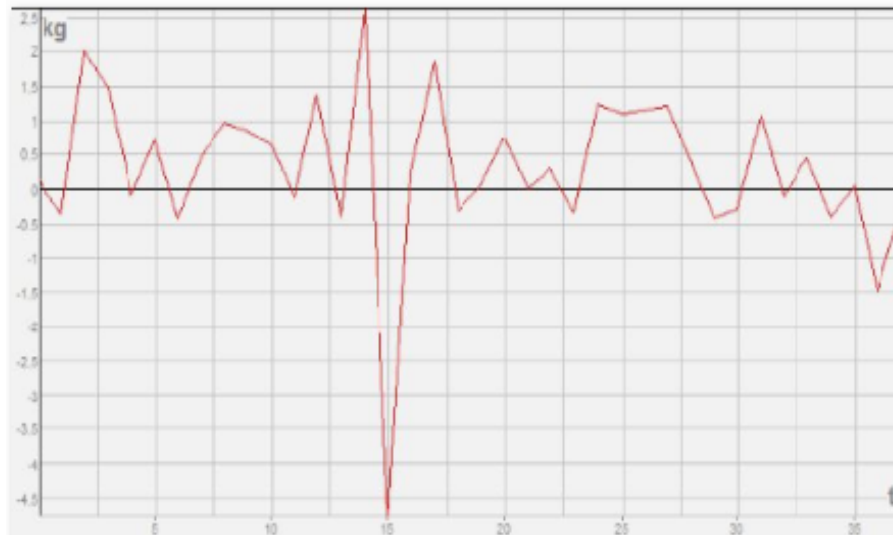
Şekil 5.8. Bazalt katkılı epoksinin sabit yük altında sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi (Deney no:8; B40, 15N ve 80 dev/dak)

Bazalt katkılı epoksinin farklı yükler altında sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi

Şekil 5.9. a) ve b)'de gösterilmiştir. Buradaki deneylerde öncelikle Şekil 5.9. a)' da; B60 numunesi 10N, 80 dev/dak şartlarında yapılmışken Şekil 5.9. b) ise B60 numunesi, 15N ve 140 dev/dak da gerçekleştirilmiştir. 10N yük altında oluşan kuvvetlerde biraz daha kararlılık göze çarparken ve sürtünme kuvveti daha düşük (yaklaşık 7N) elde edilmişken, 9 numaralı deneyde sürtünme kuvvetinin yaklaşık 10-11N'a çıktığı görülmektedir. Bu da fazla yüklemelerde SiC'den yapılmış olan abrasivlerin daha çok elyaf demetine hasar vermiş olmasından kaynaklı olabilir. Başka bir deyimle, yükün azalması demek, sivri abrasiv uçların daha az derinlikte hasara yol açması demektir.



a) B60, 10N



b) B60, 15N

Şekil 5.9. Bazalt katkılı epoksinin farklı yükler altında sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi

5.3.2. Sürtünme kuvvetinde varyans analizi

Sürtünme katsayısı ile ilgili olarak da varyans analizi yapılmış olup Çizelge 5.7’de gösterilmiştir. Bu tabloda gösterildiği gibi, en büyük etki yine yük (A) tarafından ortaya çıkmıştır fakat B ve C arasında çok büyük fark ortaya çıkmadığı görülmektedir. Her bir faktörün toplam içerisindeki katkısı tablonun son sütununda yer almıştır. Buradan görüleceği gibi, A (P=73,4%), B (12,20%) ve C (12,59%) olarak belirlenmiştir. Ayrıca, R-Sq değerinin %98 olarak ortaya çıkması ilişkilerin anlamlı olduğunu da doğrulamaktadır.

Çizelge 5.7. Varyans analizi

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ayarlanmış Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	P (%)
A	2	0,249756	0,249756	0,124878	36,97	0,026	73,4
B	2	0,041622	0,041622	0,020811	6,16	0,140	12,20
C	2	0,042956	0,042956	0,021478	6,36	0,136	12,59
Hata	2	0,006756	0,006756	0,003378			1,81
Toplam		0,341089					100

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada; ağırlıkça %0, %40 ve %60 bazalt kumaş takviye içeren basma kalıplama tekniği ile üretilmiş epoksi bazlı kompozit malzemeler üzerinde mekanik testler ve tribolojik deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu tez üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci aşamada, mekanik testlerin ilgili ASTM standartına göre yapılmıştır. Bu testler sertlik testi, basma testi, üç noktalı eğilme testi ve darbe testinden oluşmaktadır. İkinci aşamada; disk üzeri pim deney aparatı aracılığıyla tribolojik (sürtünme ve aşınma) deneyleri farklı şartlarda yapılmıştır. Aşınma ve sürtünme deneyleri Taguchi yöntemi ile tasarlanmış; aşınma deneyleri L 27 deneysel tasarım planına göre ve sürtünme deneyleri L 9 deneysel tasarım planına göre yapılmıştır. Üçüncü aşamada ise aşınma ve sürtünme deneyleri ile ilgili olarak giriş ve çıkış parametreleri arasında ilişkiyi belirlemek amacıyla regresyon ilişkisini kurulmuş ve doğrulama deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir.

Mekanik testlerin sonuçları

- a) Bazalt takviyeli kompozitlerde bazalt içeriği arttıkça numunelerdeki sertlik artmıştır. %60 bazalt içeren numune, matris malzemesi olan epoksi reçinenin yani %0 bazalt içeren numunelere oranla sertlik %47 oranında artmıştır. Ağırlıkça %60 içeren numuneler %40 bazalt içeren numunelere oranla ise %25 daha fazla sertliğe sahip olmuştur.
- b) Yapılan basma testi neticelerinde bazalt kumaş oranı arttıkça basma dayanımının arttığı görülmüştür. %40 bazalt içeren kompozit hiç bazalt içermeyen epoksi malzemeye oranla %35 daha fazla basma dayanımına sahip olmuştur. %60 bazalt içeren kompozit malzeme bazalt içermeyen epoksi malzemeye %46 daha fazla basma modülüne sahip olmuştur. %60 bazalt içeren numune %40 bazalt içeren numuneye oranla %8 daha fazla basma modülüne sahip olmuştur.
- c) Üç noktalı eğilme testine göre numunelerdeki bazalt kumaş takviyesi arttıkça numunelerdeki eğilme dayanımı artmıştır. Matrise eklenen %40 oranındaki bazalt malzemenin eğilme dayanımını 2,79 kat arttırdığı yani 3,79 katına çıkardığı görülmüştür. %60 bazalt takviyeli numunelerdeki takviye elmanı malzemenin eğilme dayanımını 3,32 kat arttırmış, mevcut eğilme dayanımını 4,32 kata çıkartmıştır. Bununla birlikte %60 bazalt içeren test numunesinin eğilme dayanımı %40 bazalt içeren numunenin eğilme dayanımından %14 daha fazla çıkmıştır.

- d) Yapılan darbe testi sonucunda numunelere eklenen bazalt takviyesinin diğer mekanik testlerde olduğu gibi darbe dayanımını ciddi şekilde arttırdığı görülmüştür. %40 bazalt içeren numuneler hiç bazalt içermeyen epoksi numunelerin 9,7 katı darbe enerjisine sahiptir. %60 bazalt içeren kompozit numuneler, %40 bazalt içeren kompozit numunelerden %37 daha fazla darbe enerjisine sahip çıkmıştır. %60 bazalt içeren numuneler ise hiç bazalt içermeyen numunelere göre 13,4 kat daha fazla darbe enerjisine sahip olmuştur.

Aşınma ve sürtünme deneyi sonuçları:

Yapılan aşınma deneylerinde malzeme cinsi, hız, kayma mesafesi ve yük olmak üzere dört farklı parametrenin etkisi incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, ağırlık kaybı metoduna göre hesaplanmış olup her bir deney üç defa tekrarlanarak ortalama değerler alınmış ve hem ağırlık kaybı (g) hem de ortalama aşınma oranı (mm^3/Nm) hesaplanmıştır. Bu sonuçlar ağırlık kaybı üzerine; kayma mesafesi, uygulanan yük ve devir sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı fakat bazalt oranının %40 olan numunelerde daha düşük ağırlık kaybı ortaya çıkmıştır. Ancak malzeme türünün, bazalt ağırlık oranının ve hızın etkisinin düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, ağırlık kaybı üzerine en büyük etkinin kayma mesafesi olduğunu göstermektedir ve bunu da uygulanan yük takip etmiştir. Devir sayısının etkisi daha az olduğu görülmüştür. Bunun muhtemel sebebi üretimi yapılan kumaşların matris içindeki yerleşimi tabakalı bağ oluşturduğu için ayrılmasının güç olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Fakat hacimsel aşınma oranı sonucuna göre; yük ve hız arttıkça aşınma miktarının azaldığı fakat yükün daha etkin olduğunu göstermiştir. Burada ortaya çıkan en uygun parametreler %60 bazalt takviyeli kompozit, 15N, 125 m ve 80 devir/dakika olarak tespit edilmiştir.

Sinyal/gürültü analiz sonuçları en büyük etkiyi malzeme cinsinin, bunu yük ve kayma hızı takip ettiğini göstermiştir. Sinyal/gürültü oranının malzeme cinsi, yük ve kayma hızı ile doğrusal olarak arttığını göstermiştir. Ancak devir artışı ile ters orantılı olarak azaldığı ortaya çıkmıştır.

Yapılan varyans analizi sonucunda en büyük etki kayma mesafesi %31,49 katkıya sahip olduğu, bunu uygulanan yük %19,79 oranında katkıyla takip etmektedir. En düşük etkiyi ise %1,95 ile malzeme türü ve %2,83 ile hız takip etmektedir. Yanıt tablosundaki ortalama

ağırlık kaybı esas alınarak bulunan en uygun değerler malzeme için A2 yani %40 içerikli bazalt, yük için B1 5 N, kayma mesafesi için C1 37 metre ve devir sayısı için D1 80 rpm değerleri alınmıştır.

Yapılan sürtünme deneylerinde, belirtilen oranlarda hazırlanan bazalt kumaş takviyeli kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları; aşınma yüzeyinde silikon karbür (SiC) yerleştirilen disk üzeri pim deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Abrasif aşınma ve sürtünme deneyleri, oda sıcaklığında, 80 rpm, 140 rpm ve 200 rpm hızlarda, 5N, 10 N ve 15N yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Farklı hızlar ve yükler uygulanan kompozit numunelerle sürtünme katsayısı deneyleri Taguchi L9 tasarımı ile gerçekleştirilmiştir. Sürtünme katsayısına etki eden faktörler ANOVA ile belirlenmiştir.

Katkısız epoksinin aşınma ve sürtünme direncinin zayıf olduğu ama bazalt katkısı ile bu dezavantajın ortadan kalktığı saptanmıştır. Ayrıca, kompozitler arasında da en yüksek sürtünme katsayısını %60 içerikli kompozitler göstermiştir. Bunun sebebinin takviye elemanı oranı arttıkça malzeme içerisinde sert liflerin ve parçacıkların kırılması, çatlaması ve zamanla kütleden koparak disk ile numune arasındaki ara yüzeye girerek yapışmasından ve daha sonra kütleden kopmasından ileri gelmektedir. Malzeme türüne göre genel sürtünme katsayısına bakılacak olursa; EP, B40 ve B60 takviyeli epoksi kompozitlerde sırasıyla 0,77; 0,66 ve 0,82 olarak elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı ile ilgili olarak da yapılan varyans analizinde, sürtünme katsayısına etki eden en büyük faktörün yük olduğu diğer faktörlerin etkisinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Bu konu ile ilgili bundan sonra yapılacak çalışmalar için şunlar önerilebilir:

1. Bazalt takviyeli kompozit malzemelerin diğer özelliklerinden olan yorulma ve korozyon direnci hakkında çalışmalar yapılabilir.
2. Kuru kayma şartlarının diğer değişkenleri olan sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri konularında çalışılabilir.
3. Aşınma ve sürtünme deneyleri yağlama ile ve sulu ortamda gerçekleştirilebilir.
4. Deneysel sonuçları ve parametreler, yüzey cevap metodu (RSM) ve sinir ağları (neural network) metodu gibi metodlar kullanılarak yorumlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Jagannatha, T.D. and Harish, G. (2015). Mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced epoxy hybrid polymer composites. *International Journal of Mechanical Engineering & Robotics Research*, 4(2), 131-137.
2. Preto, R. (2011). Mechanical behavior of basalt fiber reinforced composites. Department of Mechanical Engineering, Instituto Superior Tecnico, Lisboa, Portugal.
3. Sahin, Y. (2015), *Kompozit Malzemelere Giriş* (3.Baskı). Türkiye: Seçkin Yayıncılık.
4. Fiore, V., Di Bella, G. and Valenza, A. (2011). Glass-basalt/epoxy hybrid composites for marine applications. *Materials and Design*, 32, 2091-2099.
5. Manikandan, V., Jappes, J.T. W., Kumar, S.M.S. and Amuthakkannan, P. (2012). Investigation of the effect of surface modification on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites. *Composites:Part B*, 43, 812-818.
6. Wang, Q., Zhang, X. and Pei, X. (2010). Study on the friction and wear behavior of basalt fabric composites filled with graphite and nano-SiO₂. *Materials and Design*, 31, 1403-1409.
7. Rajkumar, S. and Marimuthu, K. (2014). Experimental research on the fundamental mechanical properties of basalt fiber reinforcement with epoxy. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(11), 17505-17511.
8. Natarajan, K. and Balasubramanya, P. C. (2014). Study of mechanical and morphological properties of glass fiber reinforced modified epoxy composites. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(1), 23-29.
9. Gümölcine, T., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z. ve Ünal, A. (2013). İzofталık polyester matrisli sürekli e-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine deneysel bir çalışma. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, (5), 104-115.
10. Bloom, P.D., Baikerikar, K.G., Anderegg, J.W. and Sheares, V.V. (2003). Fabrication and wear resistance of Al-Cu-Fe quasicrystal-epoxy composite materials. *Materials Science and Engineering A*, 360, 46-57.
11. Daek, T., Chigany, T. (2009). Chemical Composition and mechanical properties of basalt and glass fibres- a comparision. *Textile Research Journal*, 79, 645-651.
12. Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G. and Valenza, A. (2015). A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B*, 74, 74-94.
13. Kogan, F.M. and Nikitina, O.O.V. (1994). Solubility of chrysotile asbestos and basalt fibres in relation to their fibrogenic and carcinogenic action. *Environmental Health Perspectives*, 102, 205-206.

14. McConnel, E.E., Kamstrup, O., Musselman, R., Hesterberg, T.W., Chevalier, J., Miller, W.C. and Thevenaz, P. (2008). Chronic inhalation study of size-seperated rock and slag wool insulation fibres in Fisher 344/N rats. *Inhalation Toxicology*, (6), 571-614.
15. Lopresto, V., Leone, C. and De lorio, I. (2011). Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic. *Composites: Part B*, 42, 717-723.
16. Suresha, B., Siddaramaiah, Kishore, Seetharamu, S. and Kumaran, P.S. (2009). Investigation on the influence of graphite filler on dry sliding wear and abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites. *Wear*, 267, 1405-1414.
17. Khan, N., Roy J.K., Akter, N., Zaman, H.U., Islam T. and Khan R.A. (2012). Production and properties of short jute and short E-glass fiber reinforced polypropylene-based composites. *Journal of Composite Materials*, (2), 40-47.
18. Song, J., Liu, J., Zhang, H., Yang, W., Chen, L. and Zhong, Y. (2014). PVDF/PMMA/Basalt fibre composites; morphology, melting and christolization, structure, mechanical properties and heat resistance. *Journal of Applies Polymer Science*, 131, 40494.
19. Callister, W. D. (2013). *Materials Science and Engineering*, USA: John Wiley & Sons.
20. Sun, L., Yang, Z. and Li, X. (2008). Tensile and tribological properties of PTFE and nanoparticles modified epoxy-based polyester fabric composites. *Materials Science and Engineering*, 497, 487-494.
21. Mishra, S., Mohanty, A.K., Drzal, L.T., Misra, M., Parija, S., Nayak, S.K. and Tripathy, S.S. (2013). Studies on mechanical performance of biofibre/glas reinforced polyester hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 63, 1377-1385.
22. Yılmaz, F. (1997). *Sürtünme ve Aşınma*, 9th International Metallurgy and Materials Congress, İstanbul, Türkiye.
23. Raju, B.R., Suresha, B., Swamy, R.P. and Kanthaju, B.S.G. (2013). Investigation on mechanical and tribological behaviour of particulate filled glass fabric reinforced epoxy composites. *Journal of Minerals and Materials Charecterizatiun and Engineering*, (1), 160-167.
24. Bowden, F. P. and Tabor, D. (1950). *The Friction and Lubrication of Solids*. United Kingdom : Oxford Press.
25. Chairman, C.A. and Babu, S.P.K. (2013). Mechanical and wear behaviour of glass and basalt fabric reinforced epoxy composites. *Journal of Polymer Science*, 1130, 120-130.
26. Su, F., Zhang, Z., Wang, K., Jiang, W., Men, X. and Liu, W. (2006). Friction and wear properties of carbon fabric composites filled with nano- Al_2O_3 and nano- Si_3N_4 . *Composites: Part A*, 37, 1351-1357.
27. Su, F., Zhang, Z. and Liu, W. (2006). Mechanical and tribological properties of carbon fabric composites filled with several nano-particulates. *Wear*, 260, 861-868.

28. Zhang, G., Zhang, C., Nardin, P., Li, W.Y., Liao, H. and Coddet, C. (2008). Effects of sliding velocity and applied load on the tribological mechanism of amorphous poly-ether-ether-ketone (PEEK). *Tribology International*, 41, 79-86.
29. Chauhan, S. and Thakur, S. (2012). Effect of micro size cenosphere particles reinforcement on tribological characteristics of vinylester composites under dry sliding conditions. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, (11), 938-946.
30. Akıncı, A., Yılmaz, Ş., Şen, O. (2012). Wear behaviour of basalt filled low density polyethylene composites. *Applied Composite Materials*, 19, 499-511.
31. Öztürk, B., Arslan, F. and Öztürk, S. (2007). Hot wear properties of ceramic and basalt fiber reinforced hybrid friction materials. *Tribology International*, (40), 37-48.
32. Zhang, X., Pei, X. and Wang, Q. (2009). Friction and wear properties of polyimide matrix composites reinforced with short basalt fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 111, 2980-2985.
33. Wang, J., Chen, B., Liu, N., Han, G. and Yan, F. (2014). Combined effects of fiber/matrix interface and water absorption on the tribological behaviors of water-lubricated polytetrafluoroethylene-based composites reinforced with carbon and basalt fibers. *Composites: Part A*, 59, 85-92.
34. Izciler M., and Çelik, H. (2000). Abrasive Wear Behavior of Different Heat Treated Boron Alloyed High Chromium cast Iron Grinding Balls. *Material Processing Technology*, 105, 237-245.
35. Izciler, M. and Muratoglu, M. (2003). Wear Behaviour SiCp Reinforced 2124 Al Alloy Composite on RWAT System. *Materials Processing Technology*, 132, 67-72.
36. Izciler, M., and Tabur, M. (2006). Abrasive Wear behaviour of 8620 Different Case Depth Gas Carburized Gear Steel. *Wear*, 260, 90-98.
37. Sabet, S.M.M.M., Akhlagh, F. and Eslami-Farsani, R. (2012, July). *Production and optimization of aluminum-basalt composites by hand lay-out technique*. Proceedings of the world Congress on Engineering, London, UK.
38. Sahin, Y. (2015). Wear analysis of polyamide based on a statistical approach. *International Journal of Materials and Product Technology*, 54, 108-124.
39. Wang, J., Gu, M., Songhao, B. and Ge, S. (2003). Investigation of the influence of MoS₂ filler on the tribological properties of carbon fiber reinforced nylon 1010 composites. *Wear*, 255, 774-779.
40. Todici, A., Nedeljkovic, B., Cikara, D. and Ristovic, I. (2011). Particulate basalt-polymer composites characteristics investigation. *Materials and Design*, 32, 1677-1683.
41. Antonova, M., Surfonkova, A., Hussainovaa, I., Goljandina, D. and Miklib, V. (2012). Effect of basalt addition on tribological performance of FeCrSiB HVOF coatings,

Estonian Journal of Engineering, 18(3), 211-220.

42. Bushan, B. (1999). *Principles of Applications of Tribology*, New York: John Wiley&Sons, 245-252.
43. Sudheer, M., Madhyastha, N.K., Amanna, M.K., Jonthan, B. and Jayaprakash, K.M. (2013). Mechanical and abrasive wear behaviour of metal sulphide lubricant filled epoxy composites. *Polymer Science*, 42-50.
44. De Rosa, I.M., Marra, F., Pulci, G., Santulli, C., Sarasini, F., Tirillo, J. and Valente, M. (2011). Post-impact mechanical characterisation of E-glass/basalt woven fabric interply hibrid laminates. *Express Polymer Letters*, 5(5), 449-459.
45. Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M., Antunes, F.V. and Costa, J.D.M. (2007). Flexural behaviour of hybrid laminated composites. *Composites Part A*, 38, 1612-1620.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ŞAHİN, Fatih
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.09.1980, Kaman
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (505) 649 73 34
 e-mail : sahinfatih@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /İmalat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Marmara Üniversitesi /Makina Mühendisliği	2003
Lise	Bahçelievler Deneme Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Mirza Mühendislik&Danışmanlık	Tehlikeli Madde Danışmanı
2008-2016	Türkiye Petrolleri A.O.	Uzman Mühendis
2006-2008	Elektrik Üretim A.Ş.	Makina Mühendisi
2004-2006	Danone Türkiye	Proje Mühendisi
2003-2004	Teklas Kauçuk	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Şahin, F. and İzçiler, M. (2016). Abrasive wear behaviour of basalt reinforced epoxy composites by Taguchi method. *Maşınşünaslıq Azerbaijan Technical University*, 5(1), 49-56.

DİZİN

A

Abrasif · iv, 8, 27, 32, 33, 35, 44, 60, 61, 83, 87, 89, 94
 ağırlık kaybı · 71
 Amonton · 30
 aşınma · iv, 5, 7, 8, 13, 15, 17, 27, 30, 31, 32, 33, 34,
 35, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 60, 61, 63, 71, 72, 73,
 75, 76, 77, 78, 81, 83, 92, 93, 94
 aşınma oranı · iv, 43, 44, 75, 76, 93
 aşınma oranları · iv, 42, 71, 94

B

basma dayanımı · 55
 Basma deneyi · iv, 23, 24, 45, 46, 54, 55
 bazalt · iv, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 36,
 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51,
 52, 53, 54, 55, 58, 66, 68, 70, 71, 72, 73, 75, 79, 80,
 83, 84, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96
 bazalt kumaş · iv, 36, 49, 51
 Brinell · 22

Ç

çekme · 10, 12, 13, 17, 21, 22, 23, 24, 25, 36, 37, 38,
 39, 40, 44, 45, 53

D

Darbe dayanımı · 25
 darbe direnci · 25, 27
 dayanım · 5, 7, 12, 15, 16, 17, 24, 25, 37, 39
 disk üzeri pim · iv, 44, 60, 92, 94

E

E-cam · 6, 11, 12, 36, 45, 46, 47

Eğilme · 23, 37, 53
 eğilme dayanımı · 23, 53, 92
 eğilme deneyi · 23
 eğilme gerilmesi · 23
 elyaf · 10, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 21, 36, 37, 38, 39, 40,
 41, 43, 44, 47, 49, 52, 55, 56, 70, 75, 76, 84, 87, 89
 elyaflar · 6, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 19, 36, 38,
 43, 44, 70
 epoksi · iv, 7, 8, 12, 36, 38, 39, 45, 49, 50, 51, 53, 55,
 58, 61, 70, 71, 72, 73, 75, 80, 83, 84, 87, 88, 92, 93,
 94

H

hız · iv, 30, 41, 42, 44, 61, 62, 64, 75, 78, 79, 80, 81,
 93, 94

K

kayma hızı · 30, 31, 40, 43, 66, 68, 71, 78, 94
 kayma mesafesi · 64, 71, 73, 78, 79, 80, 93, 94
 kırılma enerjisi · 25, 26
 kompozit · iv, vi, 5, 6, 7, 11, 16, 17, 18, 20, 21, 36, 38,
 39, 40, 41, 43, 44, 45, 47, 50, 51, 53, 55, 58, 61, 71,
 73, 75, 81, 84, 87, 92, 93, 94, 95
 Kontrol faktörleri · 65, 66, 68, 79
 korozyon direnci · 7, 14, 17, 95

M

malzeme türü · 64, 66, 78, 79, 84, 94
 matris · 5, 7, 16, 17, 18, 36, 37, 39, 43, 44, 45, 49, 50,
 51, 58, 75, 87, 88, 92, 93
 mekanik · iv, vi, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 21,
 22, 23, 30, 31, 33, 36, 37, 38, 39, 42, 44, 45, 49, 92,
 93, 96
 mukavemet · 12, 22, 38

P

polimer · 14, 18, 39, 47, 70, 83, 87

R

reçine · 5, 7, 16, 20, 21, 50

regresyon · iv, 92, 94

Rockwell · 22, 51

S

sarkacın · 26, 27

sertlik · iv, 16, 17, 22, 32, 33, 39, 44, 45, 46, 50, 51, 52, 88, 92

SiC · iv, v, 18, 60, 73, 75, 81, 83, 89, 94

Sinyal/Gürültü oranı · 74, 78

Sinyal/Gürültü oranları · 73

sünek · 17, 26, 88

sürtünme · iv, 5, 7, 8, 15, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 61, 76, 83, 84, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 94, 95

Sürtünme katsayısı · iv, 28, 29, 30, 41, 42, 47, 48, 61, 76, 83, 87, 94

T

Taguchi · iv, v, 64, 65, 68, 71, 73, 78, 92, 94, 100

takviye elemanı · 6, 7, 8, 12, 15, 18, 39, 41, 51, 53, 58, 83, 94

Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) · 70

tasarım · 21, 23, 25, 64, 65, 68, 69, 79, 80, 92

V

varyans analizi · iv, 79, 80, 90, 94

Vickers · 22

Y

yük · iv, 17, 18, 22, 23, 29, 31, 40, 42, 43, 44, 60, 61, 64, 71, 73, 75, 76, 78, 79, 80, 81, 84, 87, 88, 89, 90, 93, 94, 95

yüzey pürüzlülüğü · 29



GAZİ GELECEKİR...