

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

**POLİMER ESASLI FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN TRİBOLOJİK VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Neslihan ÖZSOY

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Abdullah MİMAROĞLU

Mayıs 2015

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

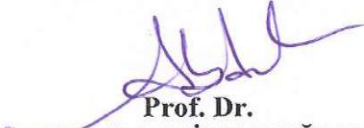
**POLİMER ESASLI FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN TRİBOLOJİK VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

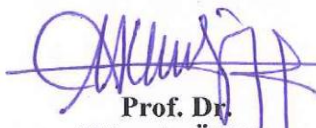
DOKTORA TEZİ


Neslihan ÖZSOY

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 08/ 05 /2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Abdullah MİMAROĞLU
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Hüseyin ÜNAL
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Erdal KARADENİZ
Üye

Prof. Dr.
Ferruh ÖZTÜRK
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Tülin ŞAHİN
Üye


BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Neslihan ÖZSOY

08/ 05 /2015

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyip bana destek olan danışman hocam sayın Prof. Dr. Abdullah MİMAROĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez izleme komitemde bulunan hocalarım sayın Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL'a ve Yrd. Doç. Dr. Erdal KARADENİZ'e teşekkür ederim. Ayrıca katkılarından dolayı Doç. Dr. Akın AKINCI'ya minnettarlığımı sunarım. Çalışmamın numune hazırlıklarında bana yardımcı olan Teknisyen ağabeyim Metin GÜNAY'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam süresince bana maddi, manevi verdiği destekten dolayı eşim, hayat arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Murat ÖZSOY'a ve çalışmam sırasında dünyaya gelen, beni zor zamanlarımda bile güldüren, umut olan canım yavrularım İpek ve Ömer'e en içten dileklerle minnettarlığımı sunarım. Ayrıca bugünlere gelmemde büyük emeği olan ve beni hiç yalnız bırakmayan anneme, babama ve ağabeyime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca lisansüstü eğitimim boyunca beni destekleyen TÜBİTAK BİDEB'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAPK) tarafından 2014-01-06-001(BAP), 2010-50-02-003 (FBDTEZ), 2010-01-06-005 (BAP) numaralı projeler ile desteklendi.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xiv
ÖZET.....	xviii
SUMMARY	xix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	2
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	20
BÖLÜM 2.	
POLİMER KOMPOZİTLER.....	23
2.1. Polimer Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	25
2.2. Polimer Kompozitlerin Tribolojisi	27
2.2.1. Sürtünme	28
2.2.2. Aşınma.....	30
2.2.2.1. Aşınma mekanizmaları	32
2.2.2.2. Aşınmada polimerik malzemelerin davranışı	37
BÖLÜM 3.	
DENEY TASARIMI	40
3.1. Taguchi Metodu.....	41
3.1.1. Taguchi'nin sinyal/gürültü oranları	42

3.2. Uygun Ortogonal Düzenin Seçilmesi.....	43
3.3. Varyans Analizi.....	45
3.4. Doğrulama Deneilerinin Yapılması	49

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve TRİBOLOJİK DENEY SONUÇLARININ

ANALİZİ.....	50
4.1. Malzemeler ve Kompozit Üretimi.....	50
4.2. Mekanik Deneiler	52
4.2.1. Çekme deneileri.....	53
4.2.1.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin çekme deneileri	55
4.2.1.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin çekme deneileri	61
4.2.2. Üç nokta eğme deneileri.....	65
4.2.2.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin eğme deneileri.....	66
4.2.2.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin eğme deneileri.....	72
4.2.3. Darbe deneileri	76
4.2.3.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin darbe deneileri	77
4.2.3.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin darbe deneileri	78
4.2.4. Sertlik deneileri	79
4.2.4.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin sertlik deneileri	79
4.2.4.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin sertlik deneileri	80
4.3. Sürtünme ve Aşınma Deneileri.....	81
4.3.1. Kırpıntı takviyeli kompozitler.....	84
4.3.1.1. Saf epoksi.....	84
4.3.1.2. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitler.....	87
4.3.1.3. Cam kırpıntı takviyeli kompozitler.....	90
4.3.1.4. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitler	92
4.3.1.5. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitler	94
4.3.2. Elyaf takviyeli kompozitler.....	97
4.3.2.1. Cam elyaf takviyeli kompozitler	97
4.3.2.2. Karbon elyaf takviyeli kompozitler	100
4.3.2.3. Keten iplik takviyeli kompozitler	102

4.4. Tribolojik Deney Sonuçlarının Analizi	104
4.4.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin analizleri	104
4.4.1.1. Saf epoksi.....	104
4.4.1.2. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitler.....	109
4.4.1.3. Cam kırpıntı takviyeli kompozitler.....	113
4.4.1.4. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitler	117
4.4.1.5. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitler	121
4.4.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin analizleri.....	125
4.4.2.1. Cam elyaf takviyeli kompozitler	125
4.4.2.2. Karbon elyaf takviyeli kompozitler	129
4.4.2.3. Keten iplik takviyeli kompozitler	132
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	138
5.1. Mekanik deneylerinin değerlendirilmesi.....	138
5.2. Tribolojik Deneyler Sırasında Temas Yüzeylerindeki Sıcaklık Değişimi	147
5.3. Tribolojik Davranışların Değerlendirilmesi	150
5.4. Aşınan Yüzeylerin SEM İncelemeleri	154
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	158
6.1. Sonuçlar.....	158
6.2. Öneriler.....	159
KAYNAKLAR.....	161
ÖZGEÇMİŞ	169

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a	: Faktörlerin düzey sayısı
A_i	: A_i seviyesindeki gözlemlerin toplamı
A_r	: Toplam gerçek alan
ANOVA	: Analysis of variance
ASTM	: Amerikan test ve malzemeler derneği
$(AXB)_i$: A ve B faktörlerinin i . koşulu altındaki verilerin toplamı
b	: Numune genişliği
c	: Etkileşim faktörlerinin kombinasyon sayısı
CuO	: Bakır oksit
d	: Çap
d	: Toplam deney sayısı
d	: Numune kalınlığı
D	: Numunenin merkezindeki maksimum çökme
E_B	: Eğilmedeki elastiklik modül
F	: F testi
F_A	: A faktörüne ait F değeri
F_k	: Kinetik sürtünme kuvveti
F_s	: Sürtünme kuvveti
G.A	: Güven aralığı
GKT	: Genel Kareler toplamı
HRC	: Rockwell sertliği
k	: Faktör sayısı
K	: Aşınma sonucu kopma olasılığı
KT_A	: A faktörüne ait kareler toplamı
KT_{AXB}	: A ve B faktörlerinin etkileşim faktörüne ait kareler toplamı
KT_e	: Hata kareler toplamı

L	: Ortogonal dizi
L	: Destekler arası mesafe
m	: Yük-sehim grafiğindeki lineer bölgenin eğimi
MPa	: Megapascal
MS	: Karelerin ortalaması
N	: Normal kuvvet
N	: Toplam gözlem sayısı
n	: Dairesel bağlantı sayısı
n	: Gözlem sayısı
$\hat{\eta}$: Tahmin edilen S/N oranı
nA_i	: A_i seviyesi altındaki gözlem sayısı
P	: iki yüzeye birlikte baskı uygulayan normal kuvvet
P	: P değeri
p	: sertlik
PTFE	: Politetrafloraetilen
S	: Kayma mesafesi
S	: Standart sapma
S^2	: Örneklem varyansı
SS	: Kareler toplamı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SiC	: Silisyum karbür
T	: Tüm gözlemlerin toplamı
\bar{T}	: Seçilen faktör-seviye kombinasyonundaki faktörlerin tüm seviyelerinin ortalaması
V	: Aşınan hacim
Y	: Gözlem değeri
\bar{Y}	: Gözlem değeri ortalaması
Y_i	: i . gözlem sayısı
S/G veya S/N	: Sinyal gürültü oranı
Sd_A	: A faktörünün serbestlik derecesi
sd_e	: Hata serbestlik derecesi
sd_T	: Ortalamaya ait serbestlik derecesi

V_e	: Hata varyansı
v_1	: Faktörün serbestlik derecesi
Δm	: Ağırlık kaybı
α	: Anlamlılık düzeyi
ε	: Zorlanma
μ	: Sürtünme katsayısı
μ_s	: Statik sürtünme katsayısı
μ_k	: Kinetik sürtünme katsayısı
σ	: Gerilme
ρ	: Yoğunluk
x	: Kayma mesafesi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Çalışmanın genel kapsamı	22
Şekil 2.1. Takviye tipine göre kompozitler	23
Şekil 2.2. Gerilme-şekil değiştirme grafiğinde matris, kompozit ve elyafın davranışı	24
Şekil 2.3. Elyaf yönlenmesi ve çekme dayanımı arasındaki ilişki	26
Şekil 2.4. Sürtünme kuvvetinin gösterimi.....	28
Şekil 2.5. Sürtünme çeşitleri	30
Şekil 2.6. Aşınma safhaları	31
Şekil 2.7. Şematik kayma sürtünme ve aşınma test modelleri: a) Pim-disk, b) Pim-levha, c) Pim-silindir, d) İtme pulları (thrust washers), e) Pim-kovan (pim-into-bushing), f) Levha-silindir, g) İki disk, h) Levha-kayış	32
Şekil 2.8. Aşınma mekanizmaları	33
Şekil 3.1. Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu	44
Şekil 4.1. Numune kalıpları (a) Mekanik numuneler için üretilen kalıp (b) Aşınma numuneleri için hazırlanan kalıp	51
Şekil 4.2. Elle yatırılan karbon elyaf takviyeli kompozit üretimi.....	51
Şekil 4.3 Kırpıntı takviyeli kompozitler için çekme numunesi boyutları	54
Şekil 4.4. Elyaf takviyeli kompozitler için çekme numunesi boyutları (a) 0° tek yönlü numuneler (b) 90° tek yönlü numuneler (c) 0/90 çift yönlü numuneler.....	54
Şekil 4.5. Bambu kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	55
Şekil 4.6. Bambu kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü eğrileri.....	56
Şekil 4.7. Cam kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	57

Şekil 4.8. Cam kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü eğrileri.....	57
Şekil 4.9. Karbon kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	58
Şekil 4.10. Karbon kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü eğrileri.....	59
Şekil 4.11. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	60
Şekil 4.12. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü eğrileri	60
Şekil 4.13. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri	61
Şekil 4.14. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre çekme dayanımı, elastiklik modülü eğrileri.....	62
Şekil 4.15. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	63
Şekil 4.16. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	63
Şekil 4.17. Keten iplik takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	64
Şekil 4.18. Keten iplik takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre çekme dayanımı, elastiklik modülü eğrileri.....	65
Şekil 4.19. Üç nokta eğme deneyinin uygulanışı.....	66
Şekil 4.20. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri	67
Şekil 4.21. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri.....	67
Şekil 4.22. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri	68
Şekil 4.23. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri.....	69

Şekil 4.24. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri	69
Şekil 4.25. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri.....	70
Şekil 4.26. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri	71
Şekil 4.27. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri.....	71
Şekil 4.28. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri	72
Şekil 4.29. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri.....	73
Şekil 4.30. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri	73
Şekil 4.31. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri.....	74
Şekil 4.32. Keten iplik takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri	75
Şekil 4.33. Keten iplik takviyeli kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri.....	76
Şekil 4.34. Darbe numunesi boyutları.....	76
Şekil 4.35. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin darbe dayanımları	77
Şekil 4.36. Elyaf takviyeli kompozitlerin darbe dayanımları	78
Şekil 4.37. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin sertlik değerleri	80
Şekil 4.38. Elyaf takviyeli kompozitlerin sertlik değerleri	81
Şekil 4.39. Örnek aşınma numuneleri	82
Şekil 4.40. Çalışmada kullanılan pin-disk aşınma cihazı.....	83
Şekil 4.41. Saf epoksi deneylerinde sıcaklık değişimi	85
Şekil 4.42. Saf epoksi disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	86
Şekil 4.43. Bambu kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi	88

Şekil 4.44. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	89
Şekil 4.45. Cam kırpıntı kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi	91
Şekil 4.46. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	92
Şekil 4.47. Karbon kırpıntı kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi.....	93
Şekil 4.48. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	94
Şekil 4.49. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi	95
Şekil 4.50. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	97
Şekil 4.51. Cam elyaf takviyeli kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi	98
Şekil 4.52. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	99
Şekil 4.53. Karbon elyaf takviyeli kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi.....	100
Şekil 4.54. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	101
Şekil 4.55. Keten iplik takviyeli kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi.....	103
Şekil 4.56. Keten iplik takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	104
Şekil 4.57. Saf epoksiye ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri	105
Şekil 4.58. Saf epoksiye ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri.....	107
Şekil 4.59. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri	110
Şekil 4.60. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri.....	111
Şekil 4.61. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri	114
Şekil 4.62. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri	115

Şekil 4.63. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri	118
Şekil 4.64. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri	119
Şekil 4.65. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri	122
Şekil 4.66. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri	123
Şekil 4.67. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri	126
Şekil 4.68. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri	127
Şekil 4.69. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri	130
Şekil 4.70. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri	131
Şekil 4.71. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri	134
Şekil 4.72. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri	135
Şekil 5.1. Kompozitlerin takviye oranına ve yönlenmeye göre çekme dayanımları	138
Şekil 5.2. Kompozitlerin takviye oranına ve yönlenmeye göre elastisite modülleri.....	140
Şekil 5.3. Kompozitlerin takviye oranına ve yönlenmeye göre eğme dayanımları	141
Şekil 5.4. Kompozitlerin takviye oranına ve yönlenmeye göre eğilme modülleri.....	143
Şekil 5.5. Kompozitlerin takviye oranına ve yönlenmeye göre darbe dayanımları	144
Şekil 5.6. Kompozitlerin takviye oranına ve yönlenmeye göre sertlik değerleri	146

Şekil 5.7. Kompozitlere ait 40N yük ve 1 m/s hız şartlarında aşınma deneyleri boyunca disk yüzey sıcaklık değişimleri	148
Şekil 5.8. Kompozitlere ait 40N yük ve 1 m/s hız şartlarında aşınma deneyleri boyunca pin yüzey sıcaklık değişimleri	149
Şekil 5.9. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri	155
Şekil 5.10. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri	155
Şekil 5.11. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri	156
Şekil 5.12. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri	156
Şekil 5.13. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri	157
Şekil 5.14. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri	157

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Malzemeler ve özellikleri	50
Tablo 4.2. Mekanik deney planı.....	52
Tablo 4.3. Taguchi'ye göre L9 ortogonal dizini	82
Tablo 4.4. Deney malzemelerinin bulk (yığınsal) yoğunlukları	84
Tablo 4.5. Saf epoksiye ait deneysel sonuçlar	85
Tablo 4.6. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar	87
Tablo 4.7. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar	90
Tablo 4.8. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar	92
Tablo 4.9. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar	95
Tablo 4.10. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar	98
Tablo 4.11. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar.....	100
Tablo 4.12. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar.....	102
Tablo 4.13. Saf epoksiye ait deneysel sonuçlar ve sinyal/gürültü oranları.....	105
Tablo 4.14. Saf epoksiye ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu	105
Tablo 4.15. Saf epoksiye ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu	106
Tablo 4.16. Saf epoksi deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları	107
Tablo 4.17. Saf epoksi deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları.....	108
Tablo 4.18. Saf epoksi için doğrulama deney sonuçları	108
Tablo 4.19. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar	109
Tablo 4.20. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu.....	109
Tablo 4.21. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu.....	110

Tablo 4.22. Bambu kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları	111
Tablo 4.23. Bambu kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları.....	112
Tablo 4.24. Bambu kırpıntı takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları....	113
Tablo 4.25. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar	113
Tablo 4.26. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu.....	113
Tablo 4.27. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu.....	114
Tablo 4.28. Cam kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları	115
Tablo 4.29. Cam kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları.....	116
Tablo 4.30. Cam kırpıntı takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları.....	116
Tablo 4.31. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar	117
Tablo 4.32. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu.....	117
Tablo 4.33. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu.....	118
Tablo 4.34. Karbon kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları	119
Tablo 4.35. Karbon kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları.....	120
Tablo 4.36. Karbon kırpıntı takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları ...	120
Tablo 4.37. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar	121
Tablo 4.38. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu.....	121

Tablo 4.39. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu.....	122
Tablo 4.40. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları.....	123
Tablo 4.41. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları.....	124
Tablo 4.42. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları	125
Tablo 4.43. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar	125
Tablo 4.44. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu	125
Tablo 4.45. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu.....	126
Tablo 4.46. Cam elyaf takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları	127
Tablo 4.47. Cam elyaf takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları	128
Tablo 4.48. Cam elyaf takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları	128
Tablo 4.49. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar	129
Tablo 4.50. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu	129
Tablo 4.51. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu.....	130
Tablo 4.52. Karbon elyaf takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları	131
Tablo 4.53. Karbon elyaf takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları.....	131
Tablo 4.54. Karbon elyaf takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları.....	132
Tablo 4.55. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar	133

Tablo 4.56. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu	133
Tablo 4.57. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu	134
Tablo 4.58. Keten iplik takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları	135
Tablo 4.59. Keten iplik takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları	136
Tablo 4.60. Keten iplik takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları	136
Tablo 5.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin sürtünme katsayılarının saf epoksiye göre % değişimi	150
Tablo 5.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin sürtünme katsayılarının saf epoksiye göre % değişimi	151
Tablo 5.3. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin aşınma oranlarının saf epoksiye göre % değişimi	152
Tablo 5.4. Elyaf takviyeli kompozitlerin aşınma oranlarının saf epoksiye göre % değişimi	153

ÖZET

Anahtar kelimeler: Epoksi Kompozit, Triboloji, Mekanik Özellikler, Taguchi Yöntemi

Bu çalışmanın amacı kırıntı ve elyaf takviyeli epoksi esaslı kompozitler üreterek tribolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesidir. Çalışmada kullanılan malzemeler epoksi matrisi, takviye olarak ise; cam elyaf kırıntı, karbon elyaf kırıntı, hindistan cevizi kabuğu lifi, bambu kırıntı, tek yönlü karbon elyaf kumaş, tek yönlü cam elyaf kumaş ve keten ipliktir. Kırıntı takviyeler ağırlıkça %6 ile %50 aralığında, elyaflar ise yönlenme olarak 0°, 90° ve 0/90 olarak seçilmiştir. ASTM standartlarına göre hazırlanan numuneler mekanik özelliklerini incelemek için, çekme, üç nokta eğme, darbe ve sertlik deneylerine tabi tutulmuşlardır. Tribolojik davranışları incelemek için pim disk deney düzeneği kullanılarak sürtünme katsayısı ve aşınma oranları elde edilmiştir. Tribolojik deneyler Taguchi'nin L9 ortogonal dizinine göre planlandı. Deneyler normal oda koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Seçilen parametreler hız (0,6, 0,8, 1 m/s), yük (20, 30, 40 N), katkı oranı/yönlenme olmak üzere üç seviyede incelenmiştir. Sinyal/ gürültü oranı için "en küçük, en iyi" kriteri kullanılmıştır. Sonuçlar ANOVA ile değerlendirilmiştir. Aşınan yüzeylerin optik ve SEM yüzey görüntüleri incelenmiştir.

Birinci bölümde literatür incelemelerine yer verilmiştir. İkinci bölümde polimer kompozitler, sürtünme ve aşınma prensiplerine yer verilmiştir. Üçüncü bölümde deney tasarımı adı altında Taguchi prensibi ve varyans analizine yer verilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalar ve tribolojik deneylerin analizlerine yer verilmiştir. Beşinci bölümde ise deneysel sonuçlara ve sonuçların değerlendirilmesine yer verilmiştir. Son olarak altıncı bölümde genel sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.

INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER BASED FIBER REINFORCED COMPOSITES

SUMMARY

Keywords: Epoxy Composite, Tribology, Mechanical Properties, Taguchi Method

In this study the mechanical and tribological performance of epoxy composites were investigated. The epoxy was used as matrix material and chopped E-glass fiber, chopped carbon fiber, coconut shell fiber, chopped bamboo, unidirectional carbon fiber, unidirectional E-glass fiber and flax fiber were used as reinforcement. Chopped materials were added in 6-50% by weight ratio. Unidirectional materials were fabricated in the directions of 0°, 90° and 0/90. The samples were prepared according to the ASTM standards. The mechanical properties were investigated by tensile, three point bending, impact and hardness tests. Pin on disc test apparatus were used to obtain coefficient of frictions and wear rates of the composites. The tribological tests were conducted according to Taguchi's L9 orthogonal array. Tests were carried out at atmospheric conditions, the parameters were sliding speed (0.6, 0.8, 1 m/s), load (20, 30, 40 N) and weight percentage of reinforcement/orientation. "The smaller is the better" criteria was used for the signal/noise ratio. The results were evaluated by ANOVA. The worn surfaces were analysed using optical and SEM techniques.

Chapter one consists of literature review. Chapter two consists of polymer composites, principles of friction and wear. Chapter three consists of principle of Taguchi and analyses of variance. Chapter four consists of experimental studies and analyses of tribological tests. Chapter five consists of experimental results and evaluations of the results. Finally, chapter six consists conclusions and further work.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Polimer malzemeler, son 25-30 yıl içerisinde önemli gelişmeler göstererek günlük yaşantımızda ve endüstrinin hemen her dalında kullanılan malzemeler haline gelmişlerdir. Polimerler, yapıları gereği çelik ve diğer konvansiyonel malzemelerden farklıdır ve onların avantajlı yanları ön plana çıkartılarak kullanım alanları giderek genişlemektedir.

Polimer ve polimer kompozitlerin başlıca hedefleri en az çelik kadar mukavemetli, olabildiğince hafif, yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanıklı ve ekonomik malzeme üretimidir. Günümüzde ileri mühendislik malzemelerinin kullanımında hiç şüphesiz otomotiv sektörü en büyük payı almaktadır. Otolarda çeşitli plastik malzemelerin kullanımı ağırlıkça % 10-15 civarında ise de tamponlar gibi bazı özel uygulamalarda plastik kompozitler rakipsizdir.

Malzeme yerine göre mukavemet, esneklik, hafiflik, çevre şartlarına (nem, güneş ısınları, gibi) dayanıklılık, darbe dayanımı, sertlik gibi günlük yaşamda kullanılan terimlerle ifade edilen özellikler yanında daha bilimsel bir dille ısıl genişleme katsayıları, yorulma, çatlama ve kırılma, çekme, eğme dayanımları ve benzeri değerlerin uygunluğu aranır. Bütün istenen özellikleri tek bir metal, seramik veya polimer malzeme bulmak son derece ender rastlanan bir olaydır.

Çeşitli mühendislik uygulamalarında metallerin yerini tercihen kullanılan polimer kompozitler sadece hafiflik, mekanik dayanım gibi özellikler değil, insan dokuları ile uyum sağlayan ve sertlik derecesi ayarlanabilen yapay doku ve organlar gibi uygulamaların dışında “optik elyaf” ve basınç ile elektrik üretebilen ”piezo elektrik” özellikli ve istenildiği gibi işlenebilen özel sistemlerin yapımında da metal ve seramik malzemelerin yerlerine kullanılmaktadır.

Termoset matris malzemelerin üretiminde kullanılan malzeme tipleri; epoksi, polyester, vinilester ve fenolik reçinelerdir. Gelişmiş kompozitlerin üretiminde ise genellikle epoksi reçinesi kullanılmaktadır.

Polimer matrisli kompozitler, sürtünme ve aşınmanın söz konusu olduğu birçok uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin, vites kutuları, contalar, frenler, protez bağlantıları, mil yatakları. Polimer matrisli kompozitlerin diğer kompozitlere nazaran tercih edilmelerinin sebepleri; kolay işlenebilirlikleri, yüksek mukavemet/yoğunluk oranı ve kimyasal dayanıklılığıdır. Bunun yanı sıra polimer matrisli kompozitler kuru sürtünme şartlarında bile düşük sürtünme katsayılarına sahiptirler. Bu özellikten, yağlayıcı kullanımının uygun olmadığı durumlarda faydalanılabilir.

Buna rağmen polimer matrisli kompozitlerin tribolojik davranışları hakkında yeterli bilgi yoktur. Bu yüzden, farklı tipte takviyeler ve kompozisyonların farklı koşullardaki tribolojik davranışlarının belirlenmesine ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada; tüm bunlar göz önüne alınarak üretilen çeşitli katkılı epoksi kompozitlerin, mekanik ve tribolojik özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

1.1. Literatür Araştırması

Polimer malzemeler genel olarak termoset ve termoplastik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Polimerler; düşük mekanik dayanım, yumuşaklık, belli sıcaklık aralıklarında kullanılabilme gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Buna karşılık polimerler; kolay şekillenme, düşük yoğunluk, kimyasal maddelere dayanım, karmaşık geometrilere biçimlenme, düşük ısı iletimi, ucuzluk, korozyona uğramama, estetik görünüm, düşük elektrik iletimi, esneklik (kauçuklar için elastikiyet) gibi avantajlara sahiptir. Bu tip özelliklerinden dolayı polimerler kompozit üretiminde sıkça kullanılmaktadır.

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde birleşmesine denir. Kompozit malzeme, kendisini oluşturan malzemelerin her birinden farklı

özelliklere sahip bir bileşik malzemedir. Kompozit malzemeler genellikle matris malzemesine göre polimer, metal ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üçe ayrılırlar.

Polimer matrisli kompozitlerde, matris malzemesi için en çok kullanılan malzeme termoset esaslı malzemelerdir. Termosetler mukavemet ve sıcaklığa karşı dayanımları yönünden termoplastiklerden daha üstündür.

Termoplastik matrisler termoset plastik matrislerin aksine geri dönüşüm olan malzemelerdir. Bu malzemelere üretimin sonunda da ısıtma soğutma yapıp tekrar hazır hale getirilebilir.

Bu çalışmada termoset matris olan epoksi matris ele alınmıştır. Üretilen kompozitlerin tribolojik özellikleri incelenmiştir. Triboloji sürtünme, aşınma ve yağlamayı inceleyen bilim dalıdır.

Sürtünme, temas halinde olan iki nesne arasında oluşan ve hareketi engellemeye çalışan kuvvettir. Aşınma ise sürtünme etkisiyle malzemelerde oluşan malzeme ve kütle kaybıdır.

İstatistiklere göre makine elemanlarının ortalama %70'inin hurdaya ayrılma sebebi aşınmadır. Aşınmanın sonucu olarak meydana gelen malzeme kayıpları, aşınan parçaların yenileriyle değiştirilmesi zorunluluğu, makinelerin bakım- onarım faaliyetleri için harcanan zaman ve emek ve bu faaliyetler için istihdam edilen teknik personel göz önüne alındığında her yıl milli sermayeye oldukça büyük yükler getirmektedir. Mühendisler her türlü makine konstrüksiyonunda aşınmanın etkilerini dikkate almak zorundadırlar.

Aşınma mekanizmaları genel olarak adhesiv, abrasif, yorulma ve korozyon aşınması olarak gruplandırılabilir. Aşınmayı etkileyen faktörler arasında; yük, hız, malzeme özellikleri, kompozitlerde katkı türleri ve oranları, aşınma mesafesi, ortam şartları (sıcaklık, nem gibi) sayılabilir.

Polimer kompozitlerin tribolojik ve mekanik özellikleri literatürde birçok araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalarda sıklıkla başvurulan Taguchi deney tasarım yöntemi ve ANOVA da aşınma deneylerinde kullanılmıştır.

Aşağıda polimer kompozitlerle ilgili aşınma çalışmalarının özetleri görülmektedir.

Raju ve arkadaşları [1], alümina dolgunun (ağırlıkça %0, 5, 7,5) cam elyaf kompozitlerin mekanik ve aşınma özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Aşınma deneylerini pin on disk cihazında 320 ve 600 yüzey pürüzlülüğü boyutuna sahip zımpara kâğıdına karşılık sabit 175 rpm ve sabit 10 N yük altında 7,5, 15, 22,5 ve 30m mesafelerde gerçekleştirmişlerdir. Kompozitlere alümina ilavesinin aşınma dayanımını, çekme dayanımını ve sertliği arttırdığını belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra yüzey pürüzlülüğü boyutu arttıkça aşınma miktarının da arttığını gözlemlemişlerdir.

Visconti ve arkadaşları [2], kuru sürtünme şartları altında kompozit malzemelerin yumuşak çelik yüzeye karşı aşınma davranışı araştırmışlardır. Araştırılan kompozit malzemeler cam örgü dokuma takviyeli üç farklı matris sistemden oluşmaktadır: epoksi reçine, silika tozu dolgulu epoksi reçine ve tungsten karbit tozu dolgulu epoksi reçine. Epoksi reçineyi %6'lık hacimsel oranda tozlarla karıştırmışlardır. Üç katmanı elle yatırma metoduyla üretmişlerdir. Sürtünme testlerini, üç katmandan kesilen numunelerle pin on disk test cihazında gerçekleştirilmişlerdir. Deneyleri 20, 30, 50 N yük altında 3, 5, 7, 9, 11 m/s hızlarda sabit 2 saat boyunca gerçekleştirmişlerdir. Tüm malzemelerde yük arttıkça aşınma miktarının da arttığını ve en iyi aşınma dayanımının tungsten karbür dolgulu malzemelerde olduğunu belirtmişlerdir. Bunun sebebi de yüksek kayma hızı ve yüklerde temas eden yüzeylerin arasında abrasif aşınma mekanizması söz konusu olur. Bu gibi durumlarda kompozit malzemeye sert tozlar ilave etmek aşınma dayanımını artırır.

Pıhtılı [3], reçine içeriğinin (epoksi, polyester) cam örgü fiber takviyeli kompozit malzemelerin aşınması üzerindeki etkisini incelemiştir. 0,39 ve 0,557 m/s hızlarında 5 ve 10 N yükleri altında blok on şaft test cihazında kuru şartlarda deneyleri gerçekleştirmiştir. Epoksi matrisli kompozitlerin polyester matrisli kompozitlerle

karşılaştığında daha az aşındığını gözlemlemiştir. Epoksi matris polyestere göre daha iyi aşınma dayanımına sahiptir. Ayrıca artan yük ve hızla aşınma kaybı artmıştır. Bunun ana sebebi de malzeme yüzey sıcaklığının artan yük ve hızla artış göstermesidir.

Nasir ve Azizan [4], E-camı elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Elyaf türü olarak kırpıntılı ve örgü tipini seçmiştir. Deneilerini pin on disk cihazıyla 10-30 N arası yüklerde, 0,033-1,022 m/s hızlarda gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak örgü tipi elyafli kompozitlerin aşınma dayanımlarının daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Basavarajappa ve Ellangovan [5], silisyum karbür ve grafit dolgulu cam-epoksi kompozit numunelerin kuru aşınma karakteristiklerini pin on disk cihazında incelemiştir. Özgül aşınma oranını hız, yük ve yolun fonksiyonu olarak belirlemiştir. Grafit oranı hacimce sabit %5, silisyum karbür oranı ise %5 ve %10 olmak üzere elle yatırma metoduyla kompozit üretmişlerdir. Deneileri 20, 40, 60, 80, 100 N yük altında; 2,72, 4,08, 5,44, 6,8, 8,6 m/s hızlarda ve 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 m kayma mesafesinde gerçekleştirmişlerdir. Dolgu maddesine sahip kompozitlerin en iyi aşınma direncine sahip olduklarını gözlemlemiştir. Yükün özgül aşınma üzerinde diğer iki parametreye göre daha etkin olduğunu belirtmişlerdir. Artan yükle beraber ara yüzeyde ısınma gerçekleşmiştir.

Suresha ve arkadaşları [6], ürettikleri kompozit malzemelerin tribolojik özelliklerini değişen yük (30 N, 50 N, 70 N) ve kayma hızlarında (3, 3,5, 4, 4,5, 5 m/s) pin on disk tipi aşınma cihazıyla 5000 m sabit kayma mesafesinde incelemiştir. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin aşınmasında iki inorganik dolgunun etkisi, silisyum karbür ve grafit parçacıkları, kuru kayma koşulları altında incelemiştir. Artan yük ve kayma hızı durumlarında daha yüksek aşınma kaybı kaydetmişlerdir. Grafit dolgulu cam elyaf kompozitlerin, diğer iki kompozite göre (SİC dolgulu ve dolgunsuz) yük ve kayma hızlarındaki değişim ne olursa olsun daha düşük sürtünme katsayısı gösterdiğini belirtmişlerdir. Bunun da sebebi grafit dolgunun katı yağlayıcı gibi davranmasıdır.

Larsen ve arkadaşları [7], epoksi esaslı cam elyaf örgülü ve karbon/aramit hibrit örgülü kompozitlerin sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Elle yatırma yöntemiyle hazırladıkları numunelerde hacimce %44 fiber kullanarak; 7,7x5x15 mm boyutlarında, elmas uçla kesmişlerdir. Deneyleri pin on disk cihazında çelik (100Cr6) diske karşı gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları temas basınç değerleri: 0,25, 0,50, 1 (MPa), kayma hızı: 1, 3, 6 (m/s) dir. Yapılan deneyler sonucunda karbon aramitli kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısının %35 oranda düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni karbon fiberlerin yağlayıcı etkisi rolünün olmasıdır. Cam elyaf kompozitlerin aşınma oranının karbon/aramit kompozitlere göre 22 kat kadar yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bunun olası nedeni aramit fiberlerin epoksidede mikro çatlakları kısıtlayıcı etkisinin olmasıdır.

Yaşar ve Arslan [8], elyaf olarak silan kaplanmış sürekli cam elyaf (E-camı), matris olarak da polyeester kullanmak suretiyle sıcak presleme yöntemiyle kompozit üretimi yapmışlardır. Ürettikleri bu kompozitlerde elyaf hacim oranı ve elyaf doğrultusunun tribolojik özelliklere etkileri incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda en iyi aşınma dayanımı elyaflara paralel doğrultuda ve %15 elyaf hacim oranında elde etmişlerdir. Bu durum, farklı elyaf konumları için aşınma mekanizmalarının farklı olması ile açıklanabilir. Kayma hızı ve yüzey basıncı arttıkça, sürtünme katsayısı ve özgül aşınma hızının azaldığını gözlemlemişlerdir.

Suresha ve arkadaşları [9], $[0^\circ/90^\circ]$ s ve çok yönlü yönlenmiş karbon-epoksi kompozitlerin sürtünme ve kuru kayma aşınma davranışı blok on roller test düzeneği kullanarak incelemişlerdir. Karbon-epoksi kompozitlerin $[0^\circ/90^\circ]$ kayma yönüne paralel ve zıt yüzeylerde kuru kayma aşınma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. İki farklı yükleme (92, 192 N) ve çeşitli kayma hızları (0,5, 1, 1,5, 2 m/s) için kompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınması incelenmiştir. Artan kayma hızı/yüklemeye aşınma kaybının doğrusal olarak arttığı gözlenmiştir. Kompozit aşınmasının karşıt yüzeye malzeme transferiyle birlikte gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Kumaresan ve arkadaşları [10], karbon kumaş elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde SiC dolgusunun (ağırlıkça %0, 5, 10) tribolojik özelliklere etkilerini incelemişlerdir.

Elle yatırma yöntemiyle ürettikleri kompozitlerin aşınma deneylerini pin on disk cihazında farklı yük (25, 50, 75 N), farklı hız (2, 3 m/s) ve mesafelerde (1000, 5000, 8000 m) yapmışlardır. Ayrıca sertlik ölçümü ve çekme deneylerini de gerçekleştirmişlerdir. Kompozitlerde SiC dolgu miktarındaki artışın çekme dayanımını ve sertliği arttırdığını gözlemlemişlerdir. Aşınma deneylerinde yük ve hızın artışının aşınma kaybını da arttırdığını belirtmişlerdir.

Suresha ve arkadaşları [11], pin on disk deney düzeneği kullanarak karbon örgü-epoksi kompozitleri ve cam örgü-epoksi kompozitleri tribolojik özellikler açısından karşılaştırmışlardır. Deneyleri 20, 40, 60, 80 N yük altında; 2, 3, 4, 5 m/s hızlarda altında sabit 5000 m mesafede gerçekleştirmişlerdir. Kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışları incelendiğinde, yük veya uygulanan hıza bakılmaksızın karbon-epoksi kompozitlerinin cam-epoksi kompozitlere göre daha düşük sürtünme ve daha düşük aşınma kaybı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Suresha ve arkadaşları [12], grafit dolgulu karbon kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin kuru sürtünme ve iki elemanlı abrasif aşınma davranışını incelemişlerdir. Pin on disk cihazında yapılan çalışmalarda 25, 50, 75 ve 100 N yük altında sabit kayma mesafesi 6000 m kullanmışlardır. Deneylerde 3, 4, 5, 6 m/s hızları kullanmışlardır. Kuru sürtünme şartlarında artan yük ve hızın aşınma oranını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Grafit dolgu içerikli kompozitlerde mükemmel aşınma davranışları gözlemlemişlerdir. %5 ve %10 grafit içeren kompozitlerden özellikle %10luk numunelerin aşınma oranının düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang ve arkadaşları [13], epoksi matrise kısa karbon elyaf (CF), grafit, politetraflorüretilen (PTFE) ve nano-TiO₂ gibi çeşitli dolgular ekleyerek aşınma özelliklerini blok on ring cihazında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda epoksiye takviye ettikleri dolguların aşınma dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir. Polimer kompozitlerde kısa karbon fiberlerin aşınma dayanımında önemli etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Larsen ve arkadaşları [14], epoksi matrisli cam elyaf örgülü, karbon/aramit hibrit örgülü, PTFE parçacıklı, nano boyutta CuO parçacıklı kompozitlerin aşınma deneylerini pin on disk cihazında 0,25, 0,5, 1 MPa basınçlar altında 1, 3, 6 m/s hızlarda gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda disk yüzeyindeki sıcaklık değişimini de gözlemlemişlerdir. Deneylerde numuneleri diske göre paralel/anti paralel ve normal/paralel olarak aşındırmışlardır. Paralel/anti paralel pozisyonda aşınma dayanımının daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Karbon/aramit kompozitlerin aşınma davranışlarının cam kompozitlere göre daha üstün olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun da sebebi karbon fiberlerin yağlayıcı etkisidir. Ayrıca cam fiberlerin kendi doğal yapılarından abrasif özelliğe sahiptirler. Bunun yanısıra aramit fiberlerin epoksi içindeki mikro çatlakları engelleyici davranışındır. Saf epoksiye PTFE ve CuO ilavesinin aşınmayı arttırdığını, karbon/aramit kompozitlerde ise çok az seviyede iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Nirmal ve arkadaşları [15], bambu fiber takviyeli epoksi kompozitlerin aşınma özelliklerini pin on disk cihazında incelemişlerdir. Rasgele dağılmış, paralel ve antiparalel olmak üzere numunelerde farklı yönelmeler kullanmışlardır. 10x10x20 mm boyutlarında numuneler kuru sürtünme şartlarında oda sıcaklığı ve nem ortamında incelenmiştir. Disk malzemesi olarak paslanmaz çelik (ASTM B611, 1250 HB) kullanmışlardır. Deneyleri 30 N yük altında 1-4 km kayma mesafesi aralığında, 1,70, 2,22, 2,83, 3,96 m/s kayma hızlarında gerçekleştirmişlerdir. En iyi aşınma ve sürtünme performansının antiparalel kompozitlerde olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunu paralel daha sonra da rasgele dağılımlı numuneler izlemiştir. Antiparalel fiberler ara yüzeyle pürüzlülüğü minimize ettiğinden ara yüzey sıcaklık farkı bakımından da en iyi performansı göstermişlerdir.

Rao ve arkadaşları [16], hindistan cevizi kabuğu lifi katkılı epoksi kompozitlerin aşınma davranışlarını pin on disk cihazında, Taguchi metoduyla L9 ortogonal dizine göre incelemişlerdir. Hindistan cevizi kabuğu lifine benzolasyon işleminin aşınma davranışı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde yük (10, 15, 20 N), disk dönüş miktarı (200, 300, 400 rpm), fiber oranını (ağırlıkça %10, 20, 30) değişken parametre olarak kullanmışlardır. Sonuç olarak yükün en etkin faktör olduğunu, işlem görmüş

hindistan cevizi kabuğu lifine sahip kompozitlerin aşınma dayanımının daha iyi olduğunu ve katkı oranı arttıkça dayanımın arttığını belirtmişlerdir.

Shalwan ve Yousif [17], doğal elyaflarla takviyelendirilmiş polimerik kompozitlerin tribolojik ve mekanik özelliklerini içeren literatürü inceleyerek çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Doğal elyaflı polimerik kompozitlerin yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğunu bunu önlemek için grafit dolgu kullanılarak yağlayıcı özelliğinden faydalanılabileceğini belirtmişlerdir. Kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri arasında belirgin bir bağlantı olmadığını gözlemlemişlerdir. Kompozitlerin performansını etkileyen en önemli faktörün matriks ve elyafların tam olarak bağlanamama sorunu olduğunu belirtmişlerdir. Doğal elyaflara yapılan NaOH işleminin bu sorunu azalttığını belirtmişlerdir.

Bir malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme dayanımı, eğme dayanımı, darbe dayanımı ve sertlik gibi özellikleri incelenir. Bu çalışmada da üretilen kompozitlerin bu özellikleri uygun standartlara göre test edilmiştir.

Aşağıda benzer malzemelerin mekanik özellikleriyle ilgili yapılan çalışmalardan örnekler yer almaktadır.

Okubo ve arkadaşları [18], son zamanlarda ekolojik amaçlarla kompozit üretiminde kullanılan bambu fiberler ve bunların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Matriks malzemesi olarak polipropilen kullanmışlardır. Çekme deneyleri sonucunda bambu fiberlerin neredeyse literatürle karşılaştırdıklarında, cam fiberlerinkine eşit olan çok özel bir mukavemete sahip olduğunu göstermişlerdir.

Zaman ve arkadaşları [19], hindistan cevizi fiberlerinin polimer kompozitlerde katkı olarak kullanımının düşük maliyetleri ve yüksek mekanik özelliklerinden dolayı arttığını belirtmişlerdir. Polyester reçine ve hindistan cevizi fiberinden (hacimce %5, %10, %15) oluşan kompozitlerin mekanik özelliklerini (çekme testi) ve dinamik karakteristiklerini (modal test) incelemişlerdir. Kompozitte fiber oranı arttıkça çekme

dayanımında azalma gözlemlenmiştir. Bunun da nedeni fiber ve matrisin birbiriyle tam olarak tutunamamasıdır.

Sarki ve arkadaşları [20], hindistan cevizi kabuğu tozu takviyeli (ağırlıkça %10, %20) epoksi kompozitler üretilen mekanik özelliklerini incelemiştir. Takviye oranı arttıkça çekme dayanımının arttığını buna karşılık darbe dayanımının saf epoksiyle karşılaştırıldığında azaldığını belirtmişlerdir.

Singh ve arkadaşları [21], farklı boyut (600-850, 425-600, 300-425, 212-300 μ) ve oranlarda (%20, 30, 40) hindistan cevizi kabuğu tozuyla takviyelendirdikleri epoksi kompozitlerin çekme, eğme ve su emme özelliklerini incelemiştir. Katkı oranı arttıkça çekme dayanımı azalırken, eğme de en iyi performansı %30 oranında elde ettiklerini belirtmişlerdir. Su emme kapasitesinin de katkı oranı arttıkça arttığını çalışmalarını sonucu görmüşlerdir.

Sapuan ve arkadaşları [22], epoksi reçineli hindistan cevizi kabuğu dolgu parçacıklı kompozitlerin çekme ve eğilme davranışlarını incelemiştir. Deneysel olarak %5, %10 ve %15 dolgu oranına sahip kompozitleri kullanmışlardır. Dolgu parçacıkların oranı arttıkça çekme ve eğilme mukavemetinde iyileşme görmüşlerdir.

Bhaskar ve Singh [23], hindistan cevizi kabuğu parçacıklı (ağırlıkça %20, 25, 30, 35) epoksi kompozitler üretilen yoğunluk ve çekme dayanımı özelliklerini incelemiştir. Katkı oranı arttıkça yoğunluğun düştüğünü bunun sebebinin de karışımın birbiriyle tam olarak bağ kuramaması sonucu oluşan boşluklar olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda çekme dayanımının da düştüğünü gözlemlemiştir. Mukavemeti arttırmak için epoksi ve fiberler arasındaki bağ dolgularla artırılabilir.

Girisha ve arkadaşları [24], hindistan cevizi kabuğu lifi ve sisal takviyeli epoksi hibrit kompozitlerin suya batırma testlerini yaparak su absorbe etme miktarlarını ve mekanik özelliklerini (çekme ve eğme) incelemiştir. Ağırlıkça %20, %30 ve %40 oranlar kullanmışlardır. Fiber oranı arttıkça su absorbe etme özelliğinin arttığını

belirtmişlerdir. Kuru numunelerle yaş numuneleri mekanik olarak karşılaştırdıklarında kuru olanların daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Reis [25], doğal fiberlerle takviye edilmiş epoksi kompozitlerin mekanik karakterizasyonunu araştırarak sentetik fiberler yerine kullanılabilirliğini incelemiştir. Araştırdığı doğal fiberler; hindistan cevizi, şeker kamışı ve muzdur. Hindistan cevizi kırılma ve eğilme bakımından mükemmel bir katkı olduğunu belirtmiştir. Şeker kamışının kırılma özelliklerine bakıldığında alternatif olabileceğini görmüştür. Muzun ise mekanik olarak iyi bir fiber olmadığını gözlemlemiştir.

Kumar [26], bambu takviyeli (ağırlıkça %0, 10, 15, 20, 25, 30) epoksi kompozitlerin çekme, eğilme ve sertlik gibi mekanik özelliklerini incelemiştir. Deneyler sonucunda belli bir miktara kadar (%25) bambu takviyesinin mekanik özellikleri iyileştirdiğini sonrasında ise düştüğünü belirtmiştir. En iyi performansın %25 katkılı kompozitlerde görüldüğünü belirtmiştir.

Rao ve arkadaşları [27], bambu-cam fiber(kırpıntı tabaka halinde) katkılı hibrit epoksi kompozitlerin eğilme ve basma özelliklerini incelemişlerdir. Kompozitlerde ağırlıkça bambu/cam oranını 0/40 arasında farklı oranlarda kullanmışlardır. Ayrıca bambu fiberlerde alkali işleminin etkisini incelemişlerdir. Cam fiber içeriği arttıkça mukavemette iyileşme görmüşlerdir. Alkali ile işlem görmüş bambularla yapılan kompozitlerin mukavemeti arttırdığını belirtmişlerdir.

Ojaswi Panda [28], tez çalışmasında epoksi matrisli, bambu ve cam elyaf takviyeli hibrit kompozitler üreterek bu kompozitlerin çekme ve eğme gibi mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Ağırlıkça farklı oranlarda (%5, %10, %15) ve farklı boylarda bambu fiber (0,5, 1, 1,5 cm) kullanarak cam fiber boyunu (1,2 mm) ise sabit tutarak hazırladığı karışımları kalıpta kürlenmeye bırakmıştır. Deneyler sonucu en iyi performansı %15cam (0,5 cm) %5 bambu fiberden oluşan kompozitlerde gözlemlemiştir.

Abdul Khalil ve arkadaşları [29], literatürdeki bambu fiber takviyeli kompozitlerdeki son gelişmeleri özetlemişlerdir. Üretim metodolojisi, polimerik matrisli bambu fiberlerin özellikleri ve uygulamadaki kullanım alanlarını incelemişlerdir.

Biswas [30], farklı oranlarda bambu takviyeli (ağırlıkça %0, 15, 30, 45) epoksi kompozitler üreterek mekanik özelliklerini incelemiştir. Ayrıca fiber takviyesini %45 te sabit tutarak %0, 5, 10, 15 oranda SiC ilaveli ürettikleri kompozitleri de incelemiştir. %30'a kadar bambu kompozitlerde takviye oranı arttıkça mekanik özelliklerin iyileştiğini gözlemlemiştir. SiC dolgulu kompozitlerin sertliklerinin daha yüksek olduğunu belirtmiştir.

Kongkeaw ve arkadaşları [31], bambu fiber takviyeli (ağırlıkça %20) epoksi kompozitlerin çekme özelliklerini incelemişlerdir. Beş farklı fiber uzunluğuna (2, 4, 6, 8, 10 mm) sahip kompozit örnekleri kullanmışlardır. Fiber boyu arttıkça mukavemetin arttığını gözlemlemiştir.

Verma ve Chariar [32], bambu-epoksi lamine kompozitlerin çekme, basma, eğilme gibi mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Beş katman kullanarak üç türlü yönlenmede (0, 0/45, 0/90) kompozit üretmişlerdir. Çekme, basma ve eğme mukavemetinin en iyi 0 yönlenmiş kompozitlerde gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Santulli ve arkadaşları [33], elle yatırma yöntemini kullanarak farklı boyutlarda keten fiber (0,2, 0,9, 2,3 mm) takviyeli epoksi matrisli lamineler (250×25×10) mm üretmişlerdir. Üç nokta eğme deneyi ve darbe testleri gerçekleştirmişlerdir. Laminelerde ağırlıkça max fiber içeriği 0,2 mm için % 31, 0,9 mm için %55 ve 2,3 mm için %56 kullanmışlardır. Karşılaştırma yapmak için E-camı/epoksi lamineleri de aynı yöntemle %67 oranında fiber kullanarak üretmişlerdir. Ayrıca e-camı(2/3)/keten(1/3) hibrit epoksi kompozitler de üreterek karşılaştırma yapmışlardır. Keten fiber uzunluğu bakımından en yüksek dayanımları 0,9 mm içeren kompozitlerde elde etmişlerdir. Darbe dayanımının da en iyi performansı e-camı/epoksi kompozitler gösterirken hibrit kompozitlerin ikinci sırada yer aldığını belirtmişlerdir.

Liu ve Hughes [34], keten örgü takviyeli epoksi kompozitlerde tekstil iplik yoğunluğu, dokuma konfigürasyonu ve yönlenmesinin kırılma davranışı ve kırılma tokluğu üzerine etkilerini incelemişlerdir.

Muralidhar [35], çok katmanlı (2 katmanlı ve 4 katmanlı) keten elyaf örgülü epoksi kompozitlerin çekme ve basma deneylerini gerçekleştirmiştir. Yönlenmelerde $[0]_2$, $[0]_2$, $[0/90]_4$ ve $[0/45]_4$ konfigürasyonlarını kullanmışlardır. $[0]$ yönlenmeli kompozitlerin daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Liang ve arkadaşları [36], keten/epoksi ve cam/epoksi kompozitlerle ilgili yapılmış yorulma davranışı içeren çalışmaları incelemişlerdir.

Ramnath ve arkadaşları [37], cam elyaf dokuma tabakalar arasına abaka ve jüt fiberleri takviye ederek elle yatırma yöntemiyle epoksi kompozitler üretmişlerdir. Kompozitleri teker teker ve hibrit olmak üzere takviyelendirerek çekme, eğme, darbe, kayma gibi mekanik deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Hibrit kompozitlerin genel olarak en iyi performansı gösterdiğini ancak yüksek darbe dayanımı istenen yerlerde abaka kompozitlerin kullanılabilceğini belirtmişlerdir.

Saniee ve arkadaşları [38], E-cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin çekme deneylerini farklı zorlanma hızlarında ($0,0001-0,11 \text{ s}^{-1}$) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kompozitlerde elyaf yönlenme konfigürasyonu olarak $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ seçerek $[\pm\alpha]_s$ şeklinde numuneler üretmişlerdir. Çalışmaları sonucunda zorlanma hızı arttıkça çekme dayanımı ve elastisite modülünün arttığını belirtmişlerdir. En iyi performansı 0° yönlenmeli kompozitlerde izlemişlerdir.

Sathishkumar ve arkadaşları [39], cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerle ilgili çalışmaları incelemişlerdir. Araştırmaları sonucunda kompozitlerdeki elyaf oranı arttıkça darbe özelliklerinin iyileştiğini, aşınma, çekme ve eğme dayanımlarının arttığını belirtmişlerdir.

Taguchi metodu, üründe ve proseste, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım metodudur. Aşınma deneylerinde çok sayıda faktör incelenmek istendiğinde deney sayısı oldukça artmaktadır. Her bir deneyin en az üç tekrarı yapıldığını da düşünürsek zaman ve maliyet kaybı oldukça büyüktür. Deneysel tasarıma farklı bir yaklaşım getiren Taguchi metodu aşınma deneylerinde sıkça başvurulan bir metot haline gelmiştir.

Rout ve Satapathy [40], cam fiber takviyeli pirinç çeltiği dolgulu epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini ve erozif aşınma sonuçlarını incelemiştir. Deneyleri Taguchi metoduna göre modellemiştir. 4 faktörlü 4 seviyeli L16 ortogonal dizinini kullanmışlardır. Sonuçlarda darbe hızının, dolgu içeriğinin, çarpma açısının, erozif boyutunun aşınmayı belirgin olarak etkilediğini gözlemlemiştir. Dolgu takviyesiyle sertlik, çekme modülü, darbe enerjisi ve erozif aşınma direnci gibi özelliklerin iyileştiğini, çekme ve eğme değerlerinin ise azaldığını gözlemlemiştir.

Basavarajappa ve arkadaşları [41], SiC ve grafit parçacık katkılı cam elyaf takviyeli epoksi kompozitleri elle yatırma yöntemiyle üreterek tribolojik özelliklerini pin on disk aşınma cihazında kuru sürtünme şartlarında incelemiştir. Yük (20, 40, 60 N), hız (3, 4, 5 m/s) ve yolun (1000, 2000, 3000 m) aşınmaya etkisini üç seviyede incelemiştir. Deneyleri Taguchi metoduyla L₂₇ dizinine göre planlamışlardır. SiC ve grafit dolgu takviyesinin aşınma dayanımını arttırdığını gözlemlemiştir. Bunun yanı sıra çalışmalarında yükün aşınma üzerinde en etkin faktör olduğunu ANOVA ile göstermişlerdir.

Siddhartha ve Gupta [42], iki yönlü cam elyaf ve kırpıntı E-camı fiber takviyeli epoksi kompozitlerin 5 farklı (15, 20, 25, 30, 35) yüzde oranında üretmişlerdir. Kompozitlerin sertlik, çekme, eğme, darbe gibi mekanik özelliklerini incelemiştir. Üretilen kompozitlerin üç elemanlı abrasif aşınma davranışlarını farklı yük (2,5, 5, 7,5, 10, 12,5 kgf), katkı oranı, hız (0,48, 0,72, 0,96, 1,20, 1,44m/s), yol (50, 60, 70, 80, 90 m), abrasif boyutu (125, 210, 355, 420, 600 µm) koşulları altında incelemiştir. Taguchi'nin

deneysel tasarım planı ve varyans analizi kullanarak abrasif aşınma karakteristiklerini analiz etmişlerdir. L_{25} ortogonal dizinini seçmişlerdir. Kırpıntı cam elyaf takviyeli numunelerin iki yönlü cam elyaf takviyeli kompozitlere göre abrasif aşınma şartlarında daha iyi sonuç gösterdiğini belirtmişlerdir. Aşınan kompozit numunelerin yüzey morfolojilerini SEM ile incelemişlerdir. Mekanik özellikler açısından iki yönlü cam elyaf takviyeli kompozitlerin kırpıntı takviyeli kompozitlerden daha iyi performansa sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Agarwal ve arkadaşları [43], farklı oranlarda SiC dolgu ilavesinin cam kırpıntı (%20) takviyeli epoksi kompozitlerdeki özgül aşınma oranına etkisini incelemişlerdir. Üç elemanlı abrasif aşınma deneylerini dolgu oranı (ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20), abrasif parçacık büyüklüğü (125, 250, 375, 500, 625 μm), normal yük (20, 40, 60, 80, 100 N), aşınma mesafesi (50, 60, 70, 80, 90 m) ve hız (48, 72, 96, 120, 144 cm/s) gibi değişen çeşitli faktörlerle gerçekleştirmişlerdir. Deneyleri tasarlarken Taguchi L_{25} ortogonal dizinini kullanmışlardır. Kompozitlere SiC ilavesinin aşınma miktarını azalttığını belirtmişlerdir. Bunun nedeni fiber-dolgu etkileşimi ve dolgunun kompozit içindeki düzgün dağılımının aşınma oranını azaltıcı etkisidir. ANOVA sonuçlarına göre abrasif parça büyüklüğü ve dolgu miktarının aşınma üzerinde en etkili faktörler olduğunu gözlemlemişlerdir.

Biswas ve Xess [44], kırpıntı bambu fiber ve cam fiberlerle takviyelendirdikleri hibrit epoksi kompozitlerin erozif aşınma deneylerini Taguchi'nin L_{16} ortogonal dizinine göre gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde çarpma hızı (35, 45, 55, 65 m/s), takviye oranı (ağırlıkça %0, 15, 30, 45), çarpma açısı (45°, 60°, 75°, 90°), mesafe (55, 65, 75, 85 mm), aşındırıcı sıcaklığı (35, 70, 105, 140 °C) gibi parametreleri incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda en yüksek erozif aşınmanın saf epoksidede, en düşük aşınmanın da %15 katkılı kompozitlerde meydana geldiğini belirtmişlerdir. Saf epoksidede yüksek aşınma zamanla özelliklerini yitirmeye başlayıp erime eğilimi göstermesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca bütün faktörlerin aşınma üzerinde etkili olduğunu en az çarpma açısının etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Ramesh ve Suresha [45], karbon dokuma takviyeli epoksi kompozitlere farklı miktarlarda Al_2O_3 ve MoS_2 dolgu ilave ederek oluşturdukları kompozitlerin abrasif aşınma deneylerini pin on disk cihazıyla gerçekleştirmişlerdir. Deneyleri Taguchi L18 ortogonal dizisine göre dolgu tipi (Al_2O_3 , MoS_2), ağırlıkça dolgu miktarı (%0, %5, %10), yüzey pürüzlülüğü boyutu (80, 150, 320), yük (5, 10, 15 N), mesafe (10, 20, 30m) gibi beş faktörlü olarak planlamışlardır. Faktörlerin aşınma üzerindeki etkilerini belirlemek için ANOVA'ya başvurmuşlardır. Sonuçlara göre dolgu miktarının en etken faktör olduğunu belirtmişlerdir. Dolgulu kompozitlerin aşınma performanslarının dolgusuz olanlara göre daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Subbaya ve arkadaşları [46], karbon dokuma takviyeli epoksi kompozitlere farklı oranlarda silisyum karbür dolgu ekleyerek tribolojik özelliklerdeki değişimleri incelemişlerdir. Deneyleri Taguchi'nin L_9 ortogonal dizisine göre tasarlamışlardır. İki elemanlı abrasif aşınma testlerini pin on disk cihazında dört proses parametresiyle; dolgu oranı (ağırlıkça %0, %5, %10), abrasif parça büyüklüğü (80, 150, 320), yük (5, 10, 15 N) ve yol (25, 50, 75 m) gerçekleştirmişlerdir. SiC dolgu ilavesinin aşınma dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Biswas ve arkadaşları [47], farklı ağırlıkta kırmızı çamur dolgulu (alüminada meydana gelen katı atık) bambu elyaf ve cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitleri elle yatırma yöntemiyle üretmişlerdir. Bu kompozitlerin çekme, eğme, darbe gibi mekanik özelliklerini inceleyerek karşılaştırmışlardır. Kompozitlerin Taguchi deney tasarımıyla L_{27} ortogonal dizisine göre katı parçacık erozyon testlerini gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde 3 seviyeli 6 değişken (darbe hızı, fiber miktarı, sıcaklık, çarpma açısı, mesafe, erozif parça büyüklüğü) incelemişlerdir. Mekanik özellikler bakımından cam elyaf kompozitlerin çok daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşılık erozif performans açısından bambu elyaf kompozitlerin daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Prakash Tudu [48], hindistan cevizi lifi (ağırlıkça %30, %40, %50) takviyeli epoksi kompozit üretmiş ve erozif aşınma davranışını analiz etmek için Taguchi'nin deneysel tasarım yaklaşım metodunu izlemiştir. 4 faktörlü (erozif parça boyutu, darbe hızı,

çarpma açısı, fiber miktarı) 3 seviyeli değişkenler kullanmıştır. Deneyle sonu malzeme değişkenlerinin aşınma hızını etkilediğini belirtmiştir.

Sudheer ve arkadaşları [49], örgü cam elyaf (ağırlıkça %50) ve potasyum titanat (ağırlıkça %2,5, 5, 7,5) içeren hibrit epoksi kompozitlerin aşınma performansını pin on disk cihazıyla, deneylerini Taguchi metoduna göre planladıkları L_{27} dizinine göre araştırmışlardır. Deneylede hız (2,5, 5, 7,5 m/s), yük (30, 60, 90 N), potasyum titanat katkı oranını üç seviyede incelemişlerdir. ANOVA sonuçlarına göre aşınma oranı üzerindeki en etkin faktörün hız olurken, sürtünme katsayısı üzerindeki baskın faktörün ise dolgu oranının olduğunu belirtmişlerdir.

Renukappa ve arkadaşları [50], montmorillonit dolgulu epoksi nano kompozitlerin tribolojik özelliklerini pin on disk cihazını kullanarak Taguchi metoduyla tasarladıkları deneylerle belirlemişlerdir. Deneylede L_9 ortogonal dizinini kullanarak hız (0,5, 1, 1,5 m/s), yük (10, 20, 30 N), dolgu oranı (ağırlıkça %0, %2, %5), yol (1000, 2000, 3000 m) gibi faktörleri incelemişlerdir. Analizler sonucunda aşınma oranı üzerinde en etkili faktörün yol olduğunu, en iyi aşınma dayanımına sahip kompozitlerin ise %5 katkı olanların olduğunu belirtmişlerdir.

Siddharta ve arkadaşları [51], TiO_2 (ağırlıkça %10, %20) takviyeli epoksi (homojen ve kademeli) kompozitlerin çekme, eğme, darbe gibi mekanik deneylerini ve pin on disk cihazıyla aşınma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Aşınma deneylerini Taguchi metoduna göre tasarlayarak L_{27} dizinine göre dört faktörü (hız, katkı oranı, yol, yük) üç seviyede incelemişlerdir. Kademeli olarak üretilen kompozitlerde TiO_2 takviyesindeki artışın mekanik özelliklerin de iyileşmesinde çarpıcı bir şekilde neden olduğunu gözlemlemişlerdir. ANOVA sonuçlarına göre yükün homojen kompozitlerin aşınmasında en etkin faktör olduğunu, kademeli kompozitlerde ise yolun etken faktör olduğunu belirtmişlerdir.

Sudheer ve arkadaşları [52], potasyum titanat dolgulu epoksi kompozitlerin tribolojik davranışlarını Taguchi'nin L_{27} ortogonal dizinine göre planladıkları deneylerle gerçekleştirmişlerdir. Pin on disk cihazıyla gerçekleştirdikleri deneylerde değişken

olarak hız (0,5, 0,75, 1 m/s), dolgu oranı (%5, 10, 15), yol (500, 1000, 1500 m) ve yükü (10, 20, 30 N) seçmişlerdir. Deneyler sonrası ANOVA analizine göre aşınma üzerindeki en etkili faktörün yük olduğunu belirtmişlerdir.

Basavarajappa ve Chandramohan [53], metal matrisli kompozitlerin pin on disk aşınma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deneylerin planlamasını Taguchi tekniğini kullanarak yapmışlardır. 4 değişkeni (yük, kayma hızı, kayma mesafesi, takviye yüzdesi) 3 seviyede L_{27} ortogonal dizinine göre incelemişlerdir. Araştırmalarında ANOVA'ya başvurmuşlardır. Ayrıca regresyon analizi de yapmışlardır. Mesafenin aşınma üzerinde en baskın faktör olduğunu belirtmişlerdir.

Kumar ve arkadaşları [54], alüminyum metal matrisli kompozitlerin aşınma hızı ve sürtünme kuvvetini optimize etmişlerdir. Numunelerin tribolojik davranışlarını incelemek için pin on disk aşınma testleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyleri Taguchi tekniğine göre yürütmüşlerdir. Deneyler için kayma hızı (1,256, 2,090, 3,056 m/s), yük (19,6, 29,4, 39,2 N) ve kayma mesafesini (600, 1200, 1800 m) parametre olarak seçmişlerdir. Araştırmayı L_{27} ortogonal dizisine göre 27 testten gerçekleştirmişlerdir. En uygun parametrik durumu belirlemek için sinyal/gürültü analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Tribolojik parametrelerin çoklu fonksiyonel optimizasyonunda Harrington'un fonksiyonel metodunu uygulamışlardır. Tahmini modeli teyit etmek için doğrulama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Aşınma oranı üzerinde mesafenin etkin olduğunu, sürtünme katsayısı üzerinde ise yükün etkin olduğunu belirtmişlerdir.

Prasat ve arkadaşları [55], hibrit metal kompozitlerin (alüminyum/uçucu kül/grafit) aşınma üzerine yük (9,81, 19,62, 29,43 N), kayma hızı (2, 3, 4 m/s), katkı oranı (ağırlıkça %3, %6, %9) gibi parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. Taguchi metodunu kullanarak deneylerin dizaynını gerçekleştirmişlerdir. L_{27} ortogonal dizinini seçmişlerdir. Deneyleri pin on disk cihazıyla gerçekleştirmişlerdir. Parametrelerin aşınma üzerine etkisini sinyal/gürültü oranı ve varyans analizi kullanarak araştırmışlardır ve çoklu regresyon modeli ile birbirleri arasındaki bağıntıyı oluşturmuşlardır. Yükün aşınma üzerindeki en etkili faktör olduğunu belirtmişlerdir.

Köksal ve arkadaşları [56], alüminyum esaslı kompozitlerde kayma hızı (1,83, 3,40, 4,71 m/s), normal yük (10, 20, 40 N), kayma mesafesi (500, 1000, 2000 m) ve takviye oranı (ağırlıkça %0, %10, %30) parametrelerini göz önüne alarak Taguchi metoduyla aşınma hızı tahminini modeli geliştirmişlerdir. Değişken olarak hız, yük, yol, katkı oranını üç seviyeli olarak seçmişlerdir. Deneyle pin on disk cihazında gerçekleştirmişlerdir. Deney tasarımında $L_9 (3^4)$ ortogonal dizinini kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre normal yük ve takviye oranının özgül aşınmayı etkileyen en büyük parametre olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca test parametrelerinin optimal kombinasyonlarını tahmin etmişlerdir. Katkı oranı arttıkça aşınma dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Aşınma üzerinde en etkili faktörün yük olduğunu belirtmişlerdir.

Şahin [57], %15 SiC partikül takviyeli alüminyum alaşımlı kompozitleri toz metalürjisi kullanarak hazırlamıştır. Abrasif tane boyutu (140, 70, 20 μm), yük (10, 20, 30 N), yol (18, 36, 54 m) ve malzeme sertliğinin (78, 70, 61 HV) aşınma davranışına etkisini Taguchi yaklaşımına göre pin on disk cihazıyla araştırmıştır. Deney tasarımında $L_9 (3^4)$ planını kullanmıştır. Varyans analizi kullanarak hangi tasarım parametresinin, kompozitlerin aşınma davranışında daha çok etkili olduğunu incelemiştir. Abrasif tane büyüklüğünün abrasif aşınmada en büyük etki oluşturduğunu sonuçlarda göstermiştir.

Şahin [58], %10 SiC partikül takviyeli alüminyum alaşım kompozitlerinin abrasif parça büyüklüğü (50, 100 μm), takviye büyüklüğü (50, 100 μm), yük (5, 15 N) ve kayma mesafesine (18, 36 m) göre Taguchi metodunu kullanarak aşınmasını modellemiştir. L_{16} ortogonal dizinini kullanmıştır. Numunelerin iki elemanlı abrasif aşınma davranışını pin on disk cihazı kullanarak incelemiştir. 50 ve 100 μm parçacıklı kompozitlerin optimum test parametrelerini belirlemek için ortogonal dizi, sinyal/gürültü oranı ve varyans analizi kullanmıştır. Abrasif tane büyüklüğünün abrasif aşınmada en büyük etki oluşturduğunu sonuçlarda göstermiştir. Ardından da katkı oranının geldiğini belirtmiştir. Kayma hızı ve yük etkisinin ihmal edilebilir olduğunu belirtmiştir.

Radhika ve arkadaşları [59], %3 grafit ve %9 alümina katkılı AlSi10Mg alaşımlarda aşınma üzerine yük (10, 20, 30 N), hız (1, 2, 3 m/s) ve sıcaklığın (50, 100, 150 °C) etkisini incelemiştir. Deneyleeri Taguchi'nin L₉ ortogonal dizinine göre planlamışlardır. ANOVA sonuçlarına göre aşınma üzerinde en etkili faktörü yük olarak bulmuşlardır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Literatür incelemesi sonucunda günümüzde kompozit malzemelerin çok önemli bir yere sahip olduğuna ve polimerik kompozitlerin hayatımızın birçok alanına girdiği görüldü. Bu yüzden bu malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirme yönünde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Sonuç olarak matris malzemesi, katkı malzemesi türü, boyutu ve oranı, uygulanan yük, hız, sıcaklık, çalışma koşulları gibi faktörlerin kompozitlerin performansında etkili olduğu görüldü. Mekanik özellikler bakımından güçlü olan karbon elyaf ve cam elyafın epoksi bazlı kompozitlerde çoğunlukla kullanıldığı gözlemlendi. Bu yüzden bu çalışmada da bunlara yer verilmiştir. Ayrıca geri dönüşümün önem kazandığı çağımızda doğal elyaf kullanımı da oldukça yaygınlaştı. Çalışma da bambu, hindistan cevizi kabuğu ve keten ipliğe yer verilerek literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Polimer matrisli kompozitlerin günümüzde sanayide özellikle makine imalatı, havacılık sanayi, spor aletleri, uzay endüstrisi, otomotiv sektörü gibi alanlarda kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Genellikle dinamik sistemlerde kullanımlarından dolayı metal sürtünmesine maruz kalmaktadırlar. Bu sebeple bu çalışmada polimer matrisli kompozitlerin hem mekanik hem de aşınma davranışları incelenerek en iyi performansa sahip polimer matrisli kompozit belirlendi.

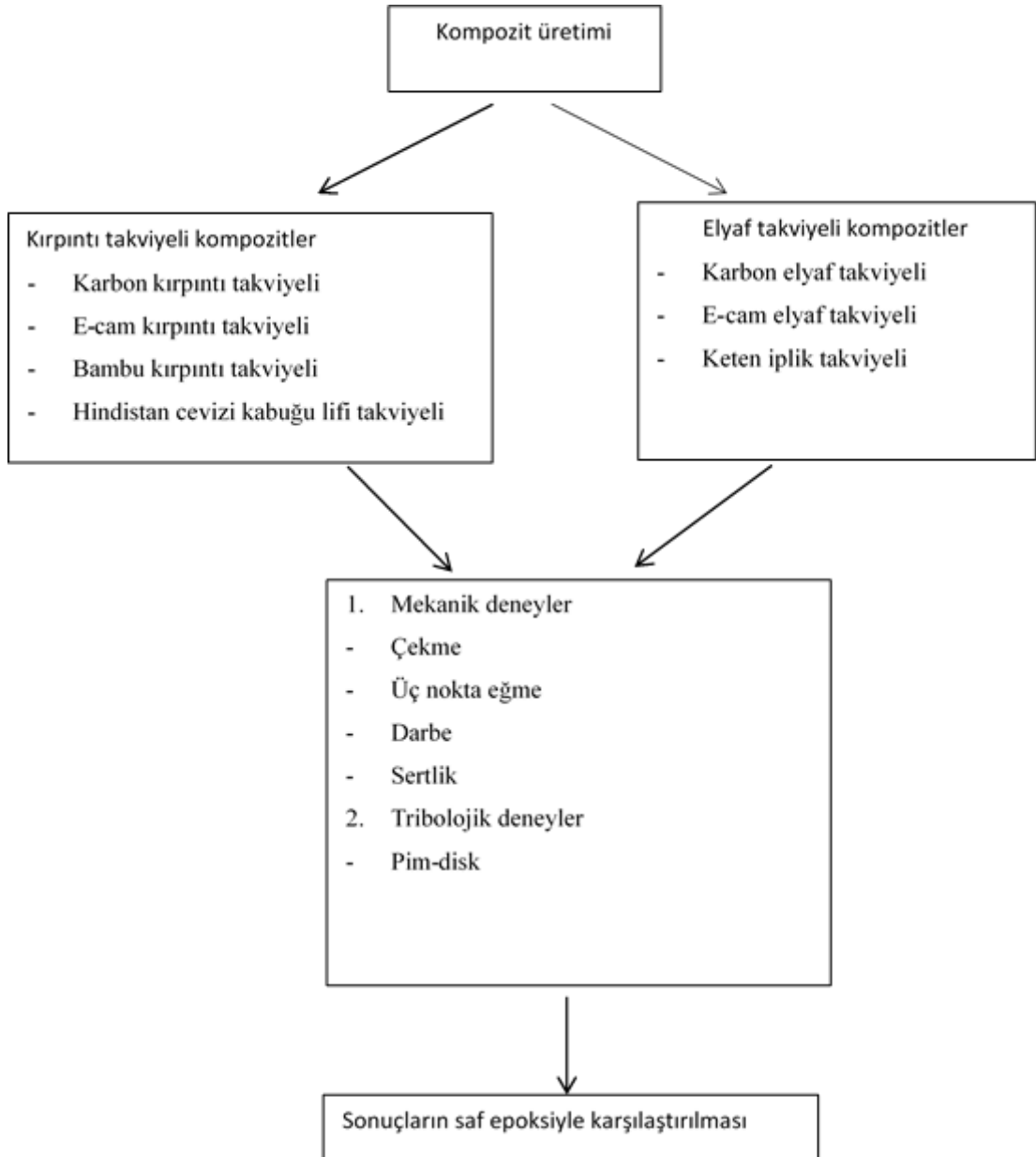
Literatürde aşınma deneyleri sırasında ortaya çıkan sıcaklık artışıyla ilgili çalışmalarda eksiklik olduğu ve bu konunun incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Çalışmada matris olarak kullanılan epoksi reçineler çapraz moleküler yapılarına bağlı olarak çok iyi tribolojik özelliklere sahip değildir. Buna karşılık epoksiler birçok

malzemeye güçlü yapışma özelliği, iyi mekanik ve elektriksel özellik, yüksek kimyasal ve termal direnç gibi aranan özelliklere sahiptir. Bu açıdan bakıldığında epoksi esaslı kompozitlerde iyi tribolojik özellikleri elde etmek önemlidir. Bunun için doğru takviye elemanı seçimi, doğru kompozisyonlar oluşturmak gerekmektedir.

Takviye elemanı olarak karbon fiber elyaf, cam fiber elyaf, karbon kırpıntı, cam kırpıntı, bambu kırpıntı, hindistan cevizi kabuğu lifi, keten iplik gibi malzemeler seçilip; eğme, çekme, sertlik ve darbe gibi mekanik özellikler ve pin on disk aşınma testleri yapılarak tribolojik özelliklerinin incelenmesi hedeflendi. Aşınma deneylerinde, sıklıkla başvurulan Taguchi deney tasarım metodu kullanılmıştır. Bu metot sayesinde faktörler ve seviyelerinin etkileri belirlendi. Varyans analizi yapılarak faktörlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerindeki etkileri belirlendi. Ayrıca aşınma deneyleri sırasında pinden ve diskten belirli aralıklarla sıcaklık alınarak, zamanla sıcaklık değişimi kaydedilmiştir.

Çalışmanın genel kapsamı şekil 1.1’de görülmektedir.



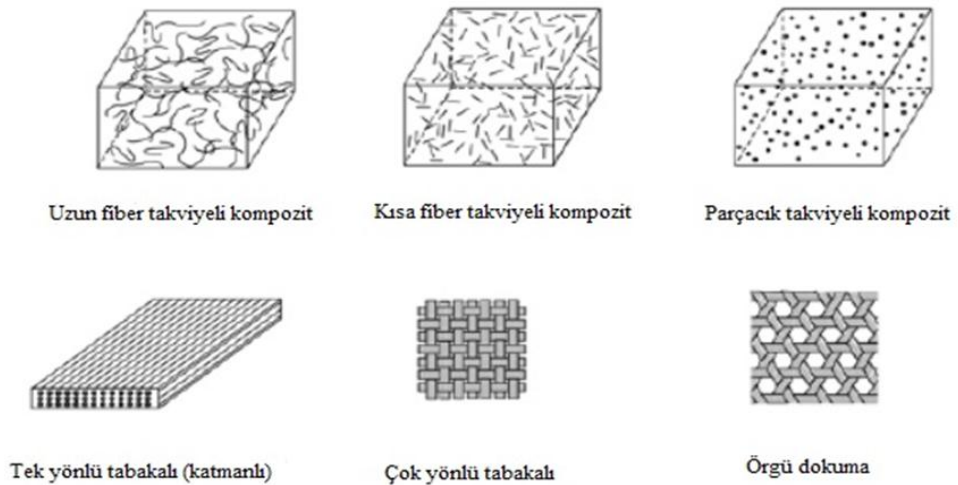
Şekil 1.1. Çalışmanın genel kapsamı

BÖLÜM 2. POLİMER KOMPOZİTLER

İleri teknoloji uygulamalarında özel ve sıra dışı özelliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu uygulamalar özellikle havacılık, sualtı, biyomühendislik ve taşımacılık endüstrilerinin ihtiyaçlarıdır. Örneğin uçak mühendisleri artan bir şekilde düşük yoğunluklu, yüksek dayanımlı, rijit aşınma ve darbeye dayanıklı ve aynı zamanda korozyona uğramayacak yapısal malzemelere ihtiyaç duyarlar.

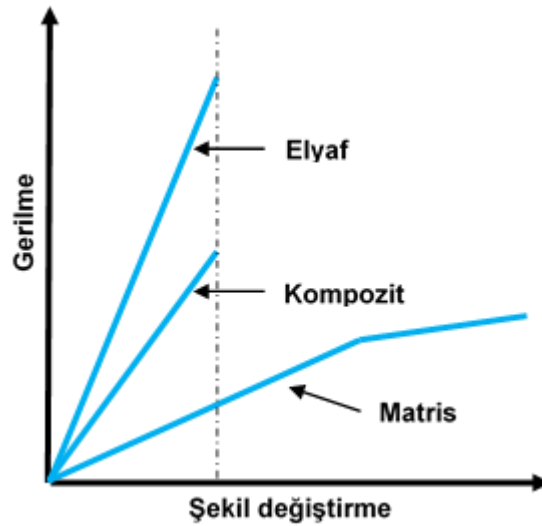
Kompozit malzeme, her iki bileşene ait özelliklerin birleşimiyle daha iyi özellikte kombinasyonlarının elde edildiği çok fazlı bir malzeme olarak düşünülebilir. Ancak bazı özelliklerde iyileşme sağlanırken, bazılarında kötüleşeceği göz önünde tutulmalıdır.

Kompozitler genel olarak parçacık takviyeli, elyaf takviyeli ve yapısal olarak üç ana gruba ayrılabilir [60].



Şekil 2.1. Takviye tipine göre kompozitler

En basit kompozit malzeme, takviye edici ve matris adları verilen iki bileşenden oluşur. Takviye edici, kompozitin mekanik dayanıklılığında sorumludur ve dayanıklılığı artırıcı etkisi çoğu kez kompozit içerisindeki hacmi %10'unu geçtiğinde gözlenmeye başlar. Kompozitin matris bileşeni, takviye maddesini bir arada tutma yanında takviye ediciyi dış etkilerden korur, ayrıca kompozitin şeklini belirler. Bir kompozitin kullanım sıcaklığı matrisin kullanım sıcaklığı ile sınırlıdır. Matris malzeme kompozit boyunca sürekli faz halindedir, takviye edici genellikle kompozitin kesikli fazıdır. Örnek takviye edici olarak elyafın dayanım üzerine etkisi şekil 2.2'de görülmektedir. Katkısız haldeyken matrisin gerilme değeri düşükken elyaf takviyesiyle kompozit üretimi sonucu gerilme değerinde artış gözlenmektedir.



Şekil 2.2. Gerilme-şekil değiştirme grafiğinde matris, kompozit ve elyafın davranışı [61]

Polimerik kompozitler; korozyona dirençli, uzun süreli kullanımlara yatkın, işlenmeleri kolay, hafif, karmaşık geometrilerde biçimlendirilebilen, birim kütle başına yük taşıma özellikleri yüksek malzemelerdir. Havacılık ve askeri amaçlı, uzay uygulamaları, otomobil sanayi, spor malzemeleri, deniz araçları gibi sektörlerde kullanılır [62].

2.1. Polimer Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Malzemelerin mekanik yükler altındaki davranışlarına mekanik özellikler adı verilir. Mekanik özellikler esas olarak atomlar arası bağ kuvvetlerinden kaynaklanır. Ancak bunun yanında malzemenin içyapısının yani mikroyapının da etkisi vardır. Bu sayede içyapıyı değiştirerek aynı malzemede farklı mekanik özellikler elde etmek mümkün hale gelir.

Termoplastikler yapıları gereği, belli sıcaklıklara kadar boyutlarını korurlar ve camı geçiş sıcaklığına yakın sıcaklıklarda yumuşamaya başlarlar. Bu nedenle matris malzeme açısından yetersizdirler. Termosetler, termoplastiklerden daha iyi matris malzemeleridir ve endüstride, lif takviyeli kompozitlerin hazırlanmasında daha çok termoset polimerlerden yararlanılır.

Çekme deneyi sırasında termoplastiklerde akmadan sonra, boyun verme olur, kesit daralır, molekül zincirlerinin yumakları açılır, çekme doğrultusunda yönlendirilir ve birbirine yaklaşır. Boyun vermeden sonra, Van der Waals bağları etkisini artırır ve molekül zincirleri daha sıkı tarzda bağlanır ve dayanım artar.

Termosetler her sıcaklıkta gevrek davranış gösterir. Elastomerler ise doğrusal olmayan elastik deformasyona uğrar.

Kompozit üretiminde kullanılacak termoset polimer genelde, içerisine sertleştirici, katkı ve dolgu maddeleri karıştırılmış düşük viskoziteli ve düşük mol kütleli sıvı halindedirler. Bu karışıma uygulamada termoset reçine (kısaca reçine) adı da verilir. Kompozit yapımının ilk aşamasında takviye amacıyla kullanılacak lifler reçine ile ıslatılır. Liflerin ıslatılması, reçinenin doğrudan lif üzerine sürülmesi veya liflerin reçine banyosundan geçirilmesi gibi tekniklerle yapılır.

İkinci aşamada çapraz bağlanma tepkimeleri gerçekleştirilir ve reçine sert ağ yapılı termoset polimere dönüşür. Böylece, termoset polimer matris içerisine takviye edici liflerin gömülü olduğu bir kompozit ürün elde edilir.

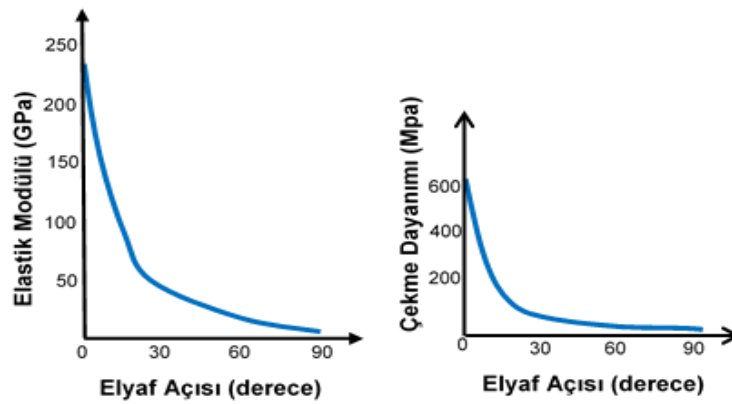
Dıştan yapılan yüklemeleri kompozitin lif bileşeni karşılar, polimer matris ise enerjiyi liflere aktarır.

Termoset matrisli kompozitlerin üretiminde epoksiler, fenolikler, doymamış polyesterler, vinil esterler, termoset poliimitler, polibenzimidazololler kullanılabilir. En önemli ticari matris termosetler ise doymamış polyesterler, epoksiler ve fenoliklerdir.

Kompozitlerde lifler ve farklı geometrilere tanecikler takviye amacıyla kullanılır. Liflerin boyları, kesitlerinden belirgin olarak büyüktür. Tanecikli takviye edicilerin ise üç yöndeki boyutları yakındır ve belirgin farklılık bulunmaz.

Lif takviyeli polimerik kompozitlerde korozyon söz konusu değildir, ayrıca malzeme yorulması metallerdeki kadar hızlı gelişmez. Genel bir kural olarak kompozitlerin mekanik dayanımı içlerindeki lif miktarı arttıkça yükselir, lif oranı belli bir değere ulaştıktan sonra azalmaya başlar. Bunun nedeni, lif artışına bağlı olarak kompozit içerisindeki polimer miktarının azalmasıdır. Polimer, kompozit içerisindeki oranı belli bir değer altına düştüğünde matris işlevini kaybeder ve lifleri bir arada tutamaz.

Lif takviyeli kompozitlerin özellikleri yönlenebilir. Örneğin bir kompozitte çekme dayanımı ve modülü tek yönde 0° iken en yüksek seviyede, 90° de en düşük değere sahiptir. Bu kural hemen hemen tüm fiziksel ve mekanik özelliklerde geçerlidir [63].



Şekil 2.3. Elyaf yönlenmesi ve çekme dayanımı arasındaki ilişki [61]

Lif-polimer değme yüzeyinin artması, lif-polimer etkileşimleri arttırarak kompozit içerisinde yük (enerji) dağılımını kolaylaştırır. Bu nedenle aynı kütlede ince ve kalın liflerle takviye edilen kompozitlerden, ince liflerle takviye edileni daha dayanıklıdır.

Lif takviyeli polimerik kompozitler hazırlanırken lifler açısından dikkat edilmesi gereken noktalar:

- Lifin mekanik özellikleri
- Lif miktarı
- Lifi yönlenme biçimi
- Lif kalınlığı
- Lif çeşitleri; cam lifler, karbon lifler, aramit lifler, bor lifleri vs.

Polimerik kompozitlerin hazırlanmasında takviye amacıyla lifler dışında, tanecikli malzemeler de kullanılır. Bunlar arasında karbonatlar, kil, mika, silikatlar, mikroküreler, tarımsal atıklar, metal tozları veya parçaları, pudra sayılabilir.

Tanecik takviye ediciler ucuzdurlar, kompozitlerinin yapımı kolaydır. Ancak mekanik özellikleri zayıftır [62].

2.2. Polimer Kompozitlerin Tribolojisi

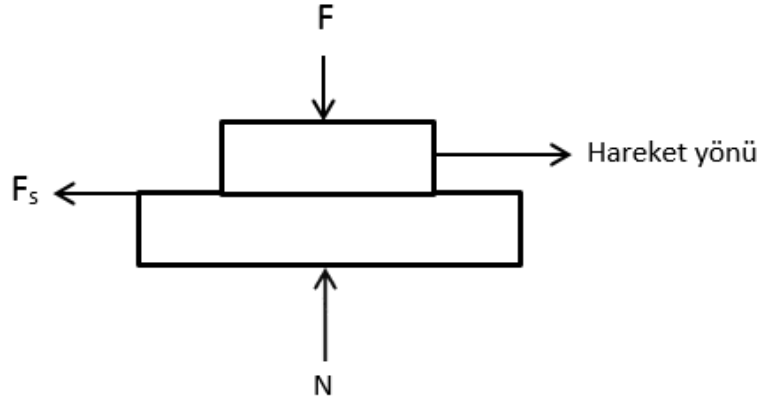
Sürtünme, aşınma ve yağlama ile bunların birbirlerinden etkileşimlerini inceleyen bilim dalı triboloji adı altında incelenmektedir [64].

Tribolojik iyileştirmeler sonucunda sağlanan kazanımlar:

- Düşük sürtünme direncinden dolayı, enerji ihtiyacının azalması,
- Sistemdeki sıcaklık artışının dolayısıyla soğutma ihtiyacının azaltılması,
- Aşınma miktarının azalmasıyla, eleman ve sistem ömrünün uzaması,
- Bakım masraflarının azalması,
- Gürültünün engellenmesi.

2.2.1. Sürtünme

Sürtünme, temas halindeki iki yüzey arasında harekete ters yönde meydana gelen kuvvettir [68]. Sürtünme temel olarak kuru ve sıvı sürtünme olarak ayrılabilir. Kuru sürtünme isminden de anlaşılacağı gibi iki kuru yüzey arasında meydana gelir. Sıvı sürtünme ise sıvı içinde sürtünen tabakalar arasında gerçekleşir.



Şekil 2.4. Sürtünme kuvvetinin gösterimi

Sürtünme katsayısı sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranıdır ve boyutsuzdur.

$$\text{Sürtünme katsayısı} \rightarrow \mu = \frac{F_s}{N} \quad (2.1)$$

Burada, F_s sürtünme kuvveti N normal kuvveti göstermektedir.

Sürtünme katsayısı, temas yüzeylerine, sıcaklığa, sürtünen malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Sürtünme kuvveti sürtünen yüzeylerin büyüklüğüne bağlı değildir.

Sürtünme, statik ve kinetik sürtünme olarak ikiye ayrılabilir. Birbiriyle temas halinde olan iki yüzey arasındaki statik sürtünme kuvveti uygulanan kuvvetle zıt yönlüdür ve aşağıda verilen değere sahip olabilir:

$$F_s \leq \mu_s N \quad (2.2)$$

Burada μ_s ile gösterilen katsayı statik sürtünme katsayısı, N de tepki kuvvetidir. Cisim tam kayma sınırındaysa sürtünme kuvveti maksimum değerini alır ve denklemin eşitlik hali geçerli olur. Statik sürtünme kinetik sürtünmeye eşit ya da daha büyük olabilir.

Sürtünme kuvveti aşınma hakkında da bilgi verebilir. Hareket eden bir cisme etki eden kinetik sürtünme kuvveti, cismin hareketine zıt yöndedir ve aşağıda verilen değerdedir:

$$F_k = \mu_k N \quad (2.3)$$

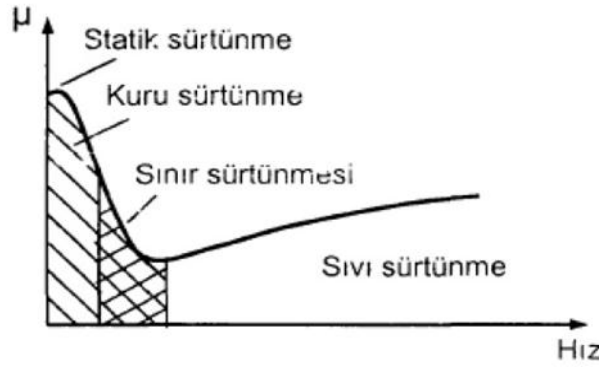
Burada μ_k kinetik sürtünme katsayısıdır [65].

Yüksek hızlarda sürtünmede bir azalma meydana gelmektedir. Yüzeyde bulunan oksit tabakası sürtünme davranışını etkiler.

Sürtünmeyi en aza indirmek için yüzeyler arasındaki kayma mümkün olduğunca kolay hale getirilmelidir. Bunun için;

- Atom-atom temasını önleyecek şekilde yatak yüzeyine basınç uygulamak,
- Kaymayı kolaylaştırmak için yağlama yapmak gerekir.

Katı haldeki iki cismin birbirleri ile teması sonucu kuru sürtünme oluşmaktadır. Temas yüzeyleri moleküler bir tabaka ile kaplanmışsa sınır sürtünmesi, her iki yüzey de sıvı yağlayıcı bir film ile ayrılmışsa sıvı film sürtünmesi oluşur. Şekil 2.5'te sürtünme katsayısı ve hıza bağlı sürtünme çeşitleri görülmektedir.



Şekil 2.5. Sürtünme çeşitleri

2.2.2. Aşınma

Birbirine göre bağıl hareket yapan iki yüzey arasında mekanik etkileşim sonucu meydana gelen hasara aşınma denir.

Makinalarda ortaya çıkan arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının kullanım dışı kalmalarının en önemli sebeplerinden birisi, hatta en önemlisi aşınmadır. Sürtünme katsayıları aynı olan malzeme çiftlerinin, aşınma oranları arasında çok büyük farklılıklar olabilmektedir. Genel olarak aşınma problemi, sürtünme probleminden çok daha karmaşık bir yapıdadır. Sürtünme yüzeyleri arasında, değişik türde aşınma mekanizmaları oluşmakta ve bu aşınma mekanizmaları yalnız başlarına etkili olabilecekleri gibi ikili ve genellikle birçoğu aynı şartlarda ve eş zamanlı olarak ortaya çıkabilmektedir.

Bir aşınma mekanizmasında birden fazla çeşit mekanizma tipi gözlenebilir.

Aşınma ölçümlerinde çoğunlukla hacim kaybı yerine daha kolay ölçülebildiğinden kütle kaybı kullanılır. Mühendislikte aşınma ölçümleri için yalnızca hacim, kütle ya da boyut kullanılmaz. Bunların dışında ömür, titreşim seviyesi, pürüzlülük, görünüş, sürtünme seviyesi, yüzey çatlağı derecesi gibi parametreler de kullanılır.

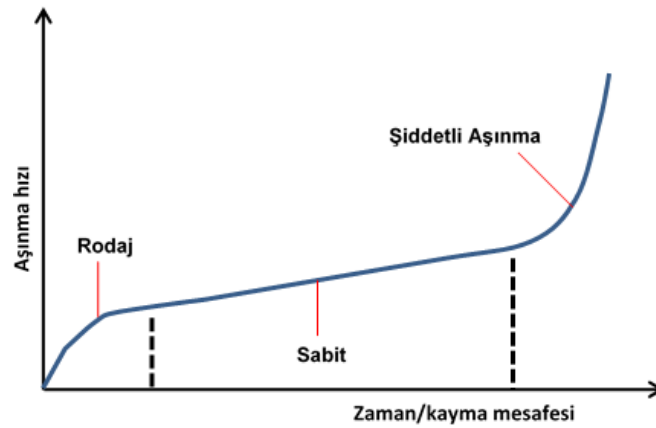
Aşınma zamanla gelişen ve ani oluşan diye ikiye ayrılmaktadır.

Zamanla oluşan aşınma üç safhadan oluşmaktadır:

I. aşama rodaj olup aşınma hızının yükselerek arttığı bölümdür. Bu aşama parçaların birbirine alıştığı aşamadır. Aşınmayı azaltmak için bu aşamaya özel yağlar kullanılabilir. Yüksüz ya da normal hızdan daha düşük hızlarda çalışılarak ta bu safha gerçekleştirilebilir.

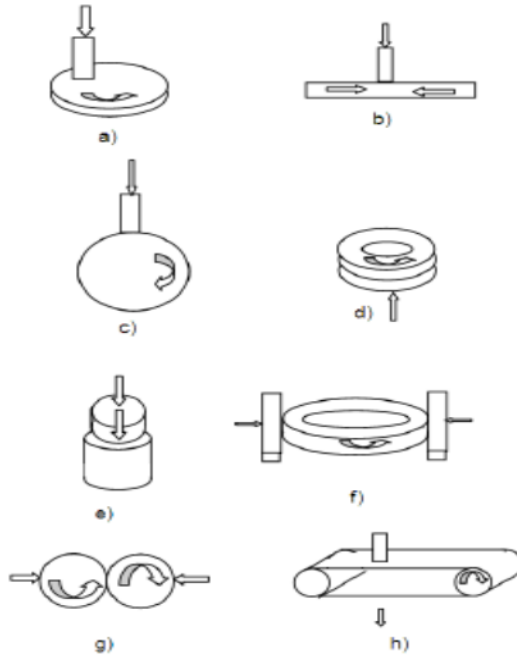
II. aşamada kararlı durum söz konusudur ve aşınma hızı sabittir. Artık malzemeler birbirine alışmıştır.

III. aşamada ise hasar meydana gelene kadar aşınma hızı artarak devam eder.



Şekil 2.6. Aşınma safhaları

Aşınmanın gerçek sistemlerde belirlenmesinin zorluğu, bir kısmı standartlaştırılan model cihazların geliştirilmesine yol açmıştır. Model cihazlarda tribo-sistemi oluşturan unsurların, gerçek sisteme uygun şekilde oluşturulması amaçlanır. Parametrelerin kolayca kontrol edilebilmesi ve değiştirilebilmesi, deney sonuçlarının tekrarlanabilir olması bu cihazlardan beklenen özelliklerdir. Kayma sürtünme ve aşınma test cihazı modelleri tribolojik prensiplere göre şekil 2.7’de şematik olarak özetlenmiştir.



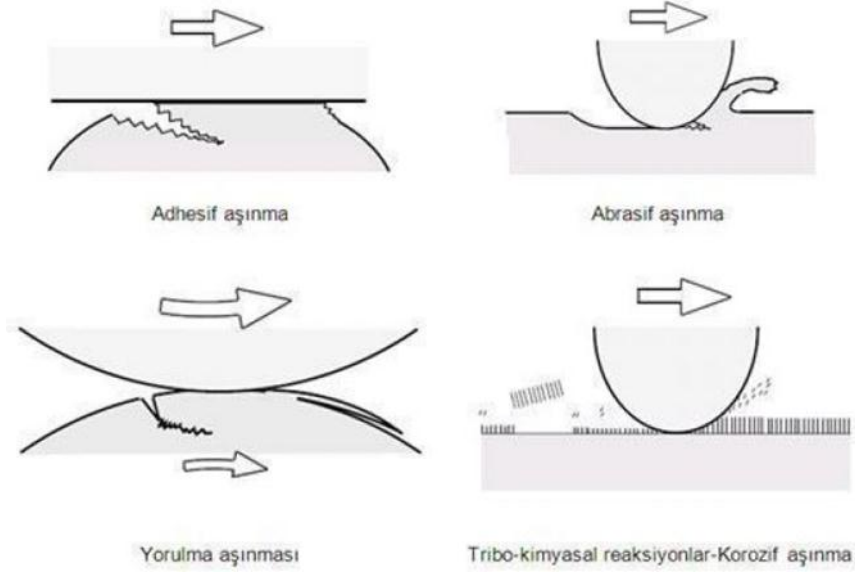
Şekil 2.7. Şematik kayma sürtünme ve aşınma test modelleri: a) Pim-disk, b) Pim-levha, c) Pim-silindir, d) İtme pulları (thrust washers), e) Pim-kovan (pim-into-bushing), f) Levha-silindir, g) İki disk, h) Levha-kayış [66]

Model aşınma cihazlarıyla yapılan testlerin amaçları genellikle şöyle sıralanabilir: sistem elemanlarının verimini, ömrünü, güvenilirliğini, fonksiyonunu, bakım yapılabilirliğini belirlemek, kalite kontrolü yapmak, malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarını belirlemek, malzeme kayıplarının araştırılması, yeni malzeme veya sürtünme ve aşınma azaltıcı yöntemlerin geliştirilmesi [66].

2.2.2.1. Aşınma mekanizmaları

Aşınma temas yüzeylerinde dış etkiler altında oluşan fiziksel ve kimyasal değişmelerin sonucunda ortaya çıkar. Pratikte birçok aşınma mekanizması vardır.

Aşınma mekanizmaları şekil 2.8’de görüldüğü gibi başlıca adhezyon, abrazyon, korozyon ve yüzey yorulması olarak gruplandırılır.



Şekil 2.8. Aşınma mekanizmaları

Adhezyon ya da adhezif aşınmada; birbirine temas eden iki yüzey belirli bölgelerde biri diğerine yapışır ya da birleşir. İki yüzey birbirine göre bağıl hareket ederken bu yüzeylerden malzeme kaldırarak aşınma oluşur.

Mühendislikte temas alanının hesaplamak için elemanların makro geometrisi ya da kontürleri kullanılır. Bu genellikle elastik ya da plastik deformasyona bağlı geometrik proje veya modellerle yapılır. Örneğin, Hertz kontak teorisi temastaki sadece gerilme seviyelerini hesaplamak için değil, temas bölgesinin boyutunu bulmak için kullanılır. Bu yaklaşımlarda yüzeyler pürüzsüz kabul edilir. Ancak gerçekte yüzeyler daima belli derecede pürüzlü olur. Bu nedenle gerçek kontak durumu ile makro metotların durumu farklıdır. Gerçek temas alanı genellikle görünen alandan daha küçüktür. Pratikte oran 10^{-4} alınabilir.

Deneysel gözlemlerle uyumlu olan adhezif aşınmanın matematiksel modeli:

$$A_r = \frac{n\pi d^2}{4} \quad (2.4)$$

A_r : toplam gerçek alan, n : dairesel bağlantı sayısı, d : çap

Tribolojide yaygın olarak tüm bağlantıların plastik deformasyona uğradığı kabul edilir. Bu durum da;

$$A_r = \frac{P}{p} \quad (2.5)$$

eşitliği ile verilir.

P: iki yüzeye birlikte baskı uygulayan normal kuvvet, p : sertlik

İki eşitlik birleştirildiğinde:

$$n = \frac{4P}{\pi p d^2} \quad (2.6)$$

elde edilir.

Bir birim mesafede bağlantıların oluşum sayısı:

$$N = \frac{n}{d} = \frac{4P}{\pi p d^3} \quad (2.7)$$

olur.

Adhezif aşınma sonucu bağlantıdaki kopma olasılığı K ise, birim kayma mesafesinde adhezif aşınma oluşturan bağlantı sayısı:

$$M = KN = \frac{4P}{\pi p d^3} \quad (2.8)$$

Adhezif aşınma parçasının hacmi $\frac{\pi d^3}{12}$, hacimsel aşınma debisi (hızı) $\frac{dV}{dx}$, V aşınan hacim, x kayma mesafesi, $\frac{dV}{dx} = \frac{\pi d^3}{12}$ integrasyon alınıp, birleştirildiğinde adhezif aşınma için:

$$V = \frac{K}{3p} Px \quad (2.9)$$

bağıntısı elde edilir.

Bu eşitlik ilk olarak Archard tarafından geliştirilmiştir. Burada K olasılıktır ve 1'den büyük olamaz.

Uygulamada kabul edilebilir aşınma davranışı için K 'nın 10^{-5} değeri ya da daha düşük değeri gereklidir. İki malzeme birbirine ne kadar benzerse adhezyon o derece güçlü olur. Bunun sonucu olarak farklı malzemelerin K değeri aynı ya da eş olanlara göre daha düşüktür.

Düşük yüzey enerjileri düşük adhezyonla sonuçlanır.

Polimerler ve seramikler çoğunlukla metallere daha düşük yüzey enerjisine sahip olduğundan bu malzemeler arasındaki K değerleri metallere olandan daha düşüktür. Aynı zamanda metal yüzeylerde oksit, yağlayıcı ve kir bulunması yüzey enerjisini düşürür ve K değeri düşer.

K değeri bağlantılardaki yükün dağılımından da etkilenir. Bağlantılardaki ortalama basınç azalan yüklerle azaldığından yük düştükçe bağlantıların yüzdesi artma eğilimi gösterir.

Özet olarak adhezif aşınma modeli için ana faktör olasılık faktörü K 'dir. Bu faktör malzeme çifti uyumluluğu, yüzey enerjisi, yağlama, pürüz kontağının yapısı ve yük dağılımıyla değişir. K değeri sertlik arttıkça düşer.

Sert parçacıkların veya tümseklerin yol açtığı aşınmaya abrasif aşınma denir. Abrasif aşınma için abrazyon ve erozyon terimleri kullanılır. İki yüzey söz konusu olduğunda aşınma abrazyon olarak nitelendirilir.

İki elemanlı abrazyonda tümsekler ya da yüzeydeki sert partiküller aşınmaya neden olur. Üç elemanlı abrazyonda partiküller bağlı değildir, yüzeyler arasındadır. Talaş kaldırma, kumlama ve öğütme iki elemanlı abrazyona örnektir. Erozyonda ise tek yüzey vardır.

Abrazif aşınmada aşağıdaki eşitlik kullanılabilir. Burada S kayma mesafesini belirtmektedir.

$$V = KPS \quad (2.10)$$

İki elemanlı abrasif aşınma durumlarında K değeri üç elemanlıya göre daha yüksektir. Bunun nedeni üç elemanlı aşınmada abrasif parçacığın serbest olması ve her zaman aşınmaya neden olmamasıdır.

Abrasif parçacık büyüdükçe K değeri de büyür.

Büyük partiküller yeni partiküller oluşturabileceğinden hasara daha fazla neden olur. Küçük partiküllerin kenarları ise aşınma sonucu yuvarlanabilir.

Yağlama abrazyonu artırıcı etkiye sahiptir. Abrasif mekanizmada aşınma artıklarının tıkanmasını önler. Ara yüzeyde sıvı yağlayıcının varlığı aşınma atıklarının yüzeyden yıkanarak uzaklaşmasına ve koruma etkisinin düşmesine neden olur [67].

Yorulma aşınması, temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösterir. Olay özellikle rulmanlar, dişli çarklar, kam mekanizmaları gibi makine elemanlarında, yani yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde ortaya çıkar ve esas olarak bir malzeme yorulması sonucudur.

Korozyon aşınmasında yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, özellikle kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine elemanların yüzeyleri bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar oluştururlar. Değişken yük

altında bu sert tabaka kırılır ve sert parçacıklar düşerek aşınma parçacıklarını meydana getirir [68].

2.2.2.2. Aşınmada polimerik malzemelerin davranışı

Aşınma ve sürtünmeye maruz malzemelerin iyi tribolojik özellikler yanında, başka özelliklere de sahip olması beklenir: yorulma ve basma dayanımının iyi, ısıl genleşme katsayısının küçük, ısıl iletim katsayısının, şekil verilebilme yeteneğinin ve aşınma dayanımının iyi olması gibi.

Polimerik malzemeler, çok düşük sürtünme katsayılarına sahiptirler; bazı tribolojik şartlarda aşınmaya karşı çok yüksek direnç gösterirler, özgül ağırlıkları oldukça düşüktür ($0,9-2,2 \text{ g/cm}^3$). Oksidasyon ya da korozyona karşı dayanıklı malzemelerdir ve oldukça kolay şekillendirilebilirler. Küçük miktarlarda toz ya da diğer partikülleri yatak yüzeyine absorbe edebilirler, böylece abrasif aşınma önlenmiş ve sessiz çalışma sağlanmış olur. Elastik deformasyon kabiliyetinin yüksek oluşu titreşimlerin sönümlenmesini ve sessiz çalışmayı sağlar. Özellikle dinamik yüklemelerde sönümleme özelliği dolayısıyla, karşı elamanın da dinamik zorlanmasını ve aşınma hızını düşürür.

Polimerlerde sürtünme ve aşınmayı azaltma çalışmaları, sürtünme elemanlarının aşınma dayanımlarının artırılması üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Polimerlerde aşınmaya dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi, sürtünme yüzeylerinin aşınmaya daha dayanıklı malzemelerle kaplanması, sürtünme elemanlarının malzeme açısından doğru seçilmesi, aşınma yüzey bölgesi ve malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi söylenebilir.

Bu amaçla yapılacak çalışmalar:

- Aşınmaya karşı polimerik elamanları güçlendirmek için, karışıma yağlama özelliği olan madde karıştırmaktır: Grafit tozları polimerlerle bileşime girerek hem

sürtünme hem de aşınımı azaltır. Grafit tozları yüksek sıcaklık aşınımı gerektiren uygulamalarda kullanılır. Grafit tozları kısmen sulu ortamlarda etkindirler. Grafit aynı zamanda bir dolgu maddesi gibi hareket ederek, kalıp içerisinde malzemenin katılaşması sırasında meydana gelebilecek çekintileri azaltır.

- Dolgu maddeleri aynı zamanda temel malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi yanında yeterli mekanik özelliklerin muhafaza edilmesi amaçlanır ve birbirinden bağımsız düşünülemez. Bu amaçla polimerlere aşınmaya karşı dirençli liflerle takviye edilmelidirler.

Cam, karbon ve aramid lifleri gibi lifler aşınmaya karşı dayanım ve benzer mekanik nitelikler geliştirir. Standart cam lifleri reçine çevresini iyi bir şekilde çevreler. Bununla birlikte cam zerrecikleri ve kaba kesilmiş cam lifleri, 20'den az (L/D) aspect oranıyla gerçek anlamda aşınmayı arttırır.

Diğer taraftan karbon lifleri temas eden yüzeylerin aşınımını azaltır. Takviyeli karbon lif kompozitleri için aşınma faktörü cam lifleriyle takviye edilmiş kompozitlerden daha azdır.

Aramid liflerinin aşınma dirençleri karbon liflerinden daha iyidir. Aramid lif takviyeli kompozitlerin temas yüzey aşınmaları karbon lif kompozitlerinin temas yüzey aşınmalarından daha küçüktür. Aramid-lif kompozitlerinin sürtünme katsayısı karbon lifleriyle yapılan kompozitler ve cam lifiyle yapılan kompozitlerin tam ortasındadır [69].

Polimerlerde baskın aşınma mekanizmaları; adhezif, abrasif ve yorulmadır. Birçok plastiğin sert yüzeye karşı sürtünmesi sırasında plastiğin yüzeye yapışması sonucu transfer film meydana gelmektedir. Transfer film oluşumu sürtünme ve aşınma açısından önemli faktördür. Transfer film yağlayıcı etkisi göstererek sürtünme katsayısını düşürür [70].

Polimerlerde sürtünme direnci, uygulanan normal kuvvetin yanında kayma hızına ve sıcaklığa bağlı olarak önemli ölçüde değişiklikler göstermektedir. Polimer-polimer

veya daha sık rastlanan şekliyle polimer-metal sürtünmesi, metal-metal sürtünmesinden oldukça farklı bir yapıdadır. Bu farklılık büyük ölçüde polimerlerin viskoelastik karakterinden ileri gelmektedir. Polimerik malzemelerin sürtünme davranışlarını belirleyen önemli bir faktörde elastisite modülü ile sertlik oranıdır (E/H). Bu oran pürüzlerin temas noktalarındaki şekil değişim karakterinin önemli bir göstergesidir. Metallerde bu oran ≥ 100 iken, polimerlerde 10 civarındadır [64].

BÖLÜM 3. DENEY TASARIMI

Deney tasarımı, 1920' lerde istatistik biliminin babası sayılan İngiliz istatistikçi Sir Ronald Fisher tarafından, tarım alanında araştırmalar yaparken bulunmuş ve geliştirilmiştir. Fisher ayrıca, deney verilerinin analizi için bugün klasik sayılan "Varyans Analizi" (ANOVA) yöntemini de geliştirmiştir. Yöntem, kısa bir süre içinde, Amerika'da tarım sektöründe üretimin geliştirilmesi için yoğun olarak uygulanmış ve Amerika'nın bu alanda dünyada lider konumuna gelmesine büyük katkıda bulunmuştur. Tarım alanında, çeşitli gübre ve dozları ile iklim koşullarının ve sulama düzeylerinin çeşitli ürünlere olan etkilerini belirlemek üzere uygulanmıştır.

Deney tasarımı, daha sonra kimya ve ilaç sektörlerinde de uygulanmış olmasına rağmen, imalat sektöründeki uygulamaları 1970'lere kadar son derece kısıtlı kalmıştır. Amerika'da imalat sektörü 1980'lerin başında, deney tasarımı Japon kalitesinin nedenlerini araştırırken yeniden keşfetmiştir. Deney tasarımı, o tarihlerde Japonya'da profesör Genichi Taguchi önderliğinde yoğun ve etkili olarak uygulanmaktaydı. Taguchi deney tasarımına kurumsal yenilikler getirmemiştir. Ancak üretimdeki uygulamalarda yenilikler yapmış ve başarılı uygulamalarla yöntemin imalat sektöründe kabul görmesini sağlamıştır [71].

Deney tasarımı, değişik koşullarda bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni nasıl etkilediğini araştırmak için gerekli tasarımları hazırlayan ve çözümlmelerini veren istatistik dalıdır.

Deney tasarımı; belirlenmiş bir tasarım matrisine göre; proses üzerinde etkili olması muhtemel proses değişkenlerinin sistematik olarak değiştirilerek, bir deneyim veya bir takım sıralı deneylerin gerçeleştirilmesi yöntemidir. Değişik koşullar altında elde edilen sonuçlar aşağıdakilere ulaşabilmek amacı ile değerlendirilir:

- Test edilen değişikliklerin içinde etkili olanların tamamlanması,
- Belli bir aralıkta değişkenlerin çeşitli seviyelerinin etkilerinin ölçülenmesi,
- Prosesin mevcut durumda işleyişinin daha iyi anlaşılması,
- Birtakım etkenlerin ve etkileşimlerin karşılaştırılması.

Bu yöntemin ürün veya proses geliştirme çevriminin başlarında uygulanması aşağıdakiler gibi bir çok fayda sağlar:

- İyileştirilmiş proses çıktıları,
- Nominal veya hedef değer etrafındaki değişkenliğin azaltılması,
- Toplam geliştirme süresinin düşürülmesi,
- Toplam maliyetin azaltılması [72]

3.1. Taguchi Metodu

Çoklu değişkenler içeren bir deneyde olası tüm koşulları tanımlama ve araştırma tekniğine deney tasarımı denilmektedir. Literatürde bu tekniğe faktöryel dizayn adı da verilmektedir [73].

Taguchi, deneysel tasarıma farklı bir bakış açısıyla deney sayısını azaltarak zaman ve maliyet kaybını azaltmıştır. Taguchi deney tasarımına göre öncelikle faktörler ve birbirleriyle etkileşimleri belirlenir. Daha sonra faktörlerin seviyeleri seçilerek en uygun ortogonal diziye atanır. Belirlenen plana göre deneyler gerçekleştirildikten sonra sonuçlar irdelenir ve duruma göre doğrulama deney veya deneyleri gerçekleştirilir.

Taguchi'nin deneysel tasarım adımları;

- Değerlendirilecek faktör ve etkileşimlerin seçilmesi,
- Faktör düzeylerinin seçilmesi,
- Uygun ortogonal düzenin seçilmesi,
- Faktör veya etkileşimlerin kolonlara atanması,

- Testlerin yapılması,
- Sonuçların analiz edilmesi,
- Doğrulama deneylerinin yapılması.

3.1.1. Taguchi'nin sinyal/gürültü oranları

Deney tasarımı 1930'larda Sir Ronald Fisher tarafından geliştirilmiş olmasına rağmen, deney tasarımı, varyasyonun azaltılması için ilk uygulayan Taguchi'dir. Taguchi, deney tasarımında analiz değişkeni ya da performans kriteri olarak kullanılması amacıyla, bir dizi, adına "sinyal/gürültü oranı" denilen, kriter tanımlamıştır.

Taguchi, varyasyonu azaltmak amacıyla, deney tasarımında performans kriteri olarak kullanılmak üzere, sinyal/gürültü oranı olarak adlandırılan bir dizi istatistik geliştirmiştir. Taguchi, uygulamadaki problemleri, hedefin türüne göre üçe ayırmış ve her biri için farklı bir sinyal/gürültü oranı tanımlamıştır.

Standart sapma S , örneklem varyansı S^2 'nin pozitif kareköküdür. Varyansın S^2 'nin formülü

Y : Gözlem Değeri

\bar{Y} : Gözlem Değeri Ortalaması

N : Gözlem Sayısı

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum Y - \bar{Y} \quad (3.1)$$

olarak hesaplanır.

a) En Küçük – En İyi

Bu tür problemlerde, kalite değişkeni Y 'nin hedef değeri sıfırdır. Bu durumda sinyal/gürültü oranı şöyle tanımlanmaktadır:

$$S/G \text{ Oranı} = -10 \log(\sum Y^2/n) \quad (3.2)$$

b) En Büyük – En iyi

Bu durumda Y'nin hedef değeri sonsuzdur ve sinyal/ gürültü oranı aşağıdaki tanımlanmaktadır:

$$S/G \text{ Oranı} = -10\log[\Sigma(1/Y^2)/n] \quad (3.3)$$

c) Hedef Değer – En İyi

Bu tür problemlerde, Y için belli bir hedef değer (örneğin, ürün boyutları gibi) verilmiştir. Bu durumda,

$$S/G \text{ Oranı} = 10\log(Y^2 / S^2) \quad (3.4)$$

Her üç problemde de, amaç S/G oranını maksimize etmektir.

Bununla beraber bütün S/G oranları aşağıdaki özelliklere sahiptir [72]:

- a) S/G oranı, gürültü faktörleriyle neden olunan sistem yanıtındaki değişkenliği gösterir.
- b) S/G oranı ortalamanın düzeltilmesinden bağımsızdır. Bu ölçüm (metrik) hedef eğer değişse bile kalitenin tahmininde faydalı olacaktır.
- c) S/G oranı nispi kaliteyi ölçer; çünkü karşılaştırma amaçları için kullanılmaktadır.
- d) S/G oranı, ürün kalitesinde pek çok faktörün etkileri analiz edildiği zaman kontrol faktörleri etkileşimi gibi gereksiz karmaşıklıklara neden olmaz.

3.2. Uygun Ortogonal Düzenin Seçilmesi

Ortogonal dizinin kullanımı sadece Taguchi'ye mahsus değildir. Ancak Taguchi, kullanımları basitleştirmiştir. Ortogonal dizinin ilk kullanılması, 1930'lu yıllarda, İngiltere'de Fisher tarafından olmuştur. Ortogonal dizi, dengelenmiş dizi anlamında kullanılmaktadır.

Şekil 3.1’de Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu görülmektedir.

		SEVIYE SAYISI												
		2		3		4		5						
PARAMETRE SAYISI	P=2	S=2	L4	P=2	S=3	L9	P=2	S=4	L' 16	P=2	S=5	L25		
	P=3	S=2		P=3	S=3		P=3	S=4		P=3	S=5			
	P=4	S=2		P=4	S=3		P=4	S=4		P=4	S=5			
	P=5	S=2		P=5	S=3	P=5	S=4	P=5		S=5				
	P=6	S=2	L8	P=6	S=3	L18	P=6	S=4	L' 32	P=6	S=5	L50		
	P=7	S=2		P=7	S=3		P=7	S=4		P=7	S=5			
	P=8	S=2		P=8	S=3		P=8	S=4		P=8	S=5			
	P=9	S=2	P=9	S=3	P=9		S=4	P=9		S=5				
	P=10	S=2	L11	P=10	S=3	L27	P=10	S=4	L' 32	P=10	S=5	L50		
	P=11	S=2		P=11	S=3		P=11	S=5						
	P=12	S=2	L16	P=12	S=3		L36	P=12		S=5	L' 32		P=12	S=5
	P=13	S=2		P=13	S=3	P=13		S=5						
	P=14	S=2		P=14	S=3	P=14		S=5						
	P=15	S=2		P=15	S=3	P=15		S=5						
	P=16	S=2	L32	P=16	S=3	L36	P=16	S=5	L' 32	P=16	S=5			
	P=17	S=2		P=17	S=3		P=17	S=5						
	P=18	S=2		P=18	S=3		P=18	S=5						
	P=19	S=2		P=19	S=3		P=19	S=5						
	P=20	S=2		P=20	S=3		P=20	S=5						
	P=21	S=2		P=21	S=3		P=21	S=5						
	P=22	S=2		P=22	S=3		P=22	S=5						
	P=23	S=2		P=23	S=3		P=23	S=5						
	P=24	S=2		L32				L36				L' 32		
	P=25	S=2												
	P=26	S=2												
	P=27	S=2												
	P=28	S=2												
	P=29	S=2												
	P=30	S=2												
	P=31	S=2												

Şekil 3.1. Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu [73]

Taguchi, çok sayıda deneysel durumu açıklamak için ortogonal dizileri oluşturmuştur. Ortogonal dizinin en önemli özelliği, birçok faktörün en az sayıda test edilmesi ve faktör seviyelerini eş zamanlı olarak değiştirme yapmaya olanak sağlamasıdır. Ortogonal diziler problemin özelliğine göre, 2 kademeli, 3 kademeli, 2 ve 3 kademeli olarak belirlenmektedir. Ortogonal dizilere tasarım matrisi de denilmektedir. Genel gösterimi;

d : Toplam deney sayısı,

a : Faktörlerin düzey sayısı

k : Faktör sayısı

L : Ortogonal diziyi olmak üzere,

$L_d(a)^k$ ya da L_d şeklinde ifade edilmektedir.

Genel olarak kullanılan diziler 2 seviyeliler için L4, L8, L16 ve L32 ve 3 seviyeliler için L9, L18 ve L27 dizileri olmaktadır. Dizilerin seçimi düzey sayısı ve toplam serbestlik derecesine göre yapılmaktadır. Ortogonal dizi, ürün ortalaması ve varyansında etkili olan birçok faktörle aynı anda ve daha kısa sürede çalışmayı sağlamaktadır. Ortogonal dizinler tam faktöriyel tasarım gereği (2^k veya 3^k) çok sayıda yapılması gereken denemeleri büyük oranda azaltmaktadır.

Ortogonal dizinin seçiminde faktör gurubunun toplam serbestlik derecesine bakılır. Faktör gurubunun serbestlik derecesi, tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri toplamına eşittir. Toplam serbestlik derecesi dizilerden hangisine uygunsa o tercih edilir. Toplam serbestlik derecesine 1 eklendiğinde deneme sayısına eşitse uygunluk sağlanır. Toplam serbestlik derecesi deneme sayısından büyük veya eşitse bir üst dizi uygundur [74].

3.3. Varyans Analizi

Varyans analizi (Analysis of Variance: ANOVA), ikiden fazla örnekten elde edilen ortalamaların birbirlerinden farklılıklarını test etmeyi sağlayan analiz yöntemidir [75]. Varyans analizine F testi de denmektedir.

Varyans analizi sayesinde gerçekleştirilen deneyler sonucuna göre faktörlerin performans üzerinde ne kadar etkili olduğuna karar verilir.

Varyans analizine ait formüller;

$$GKT = KT_A + KT_B + KT_{AB} + KT_e : \text{Genel kareler toplamı} \quad (3.5)$$

$$GKT = [\sum_{i=1}^N y_i^2] - \frac{T^2}{N} : \text{Tüm verilerin kareleri toplamı} \quad (3.6)$$

$$KT_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_1}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} : \text{A faktörünün kareleri toplamı} \quad (3.7)$$

$$KT_{AxB} = \left[\sum_{i=1}^c \left(\frac{(AxB)_i^2}{n_{(AxB)_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} - KT_A - KT_B : \text{Ave B etkileşimi kareler toplamı} \quad (3.8)$$

$$KT_e = KT_T - KT_A - KT_B - KT_{AXB} \quad (3.9)$$

Burada;

GKT: Genel Kareler Toplamı

KT_A : A faktörüne ait kareler toplamı

KT_{AXB} : A ve B faktörlerinin etkileşim faktörüne ait kareler toplamı

KT_e : Hata kareler toplamı

N : Toplam gözlem sayısı

Y_i : i. gözlem değeri

T : Tüm gözlemlerin toplamı

k_A : A faktörünün kademe sayısı

A_i : A_i seviyesindeki gözlemlerin toplamı

n_{A_i} : A_i seviyesi altındaki gözlem sayısı

c : Etkileşim faktörlerinin kombinasyon sayısı

$(AXB)_i$: A ve B faktörlerinin i. koşulu altındaki verilerin toplamı.

Varyans analizini yapabilmek için serbestlik derecesine ihtiyaç duyulmaktadır.

$$Sd_T = Sd_A + Sd_B + Sd_{AXB} + Sd_e \quad (3.10)$$

Burada;

Sd_T : Toplam serbestlik derecesi

Sd_A : A faktörünün serbestlik derecesi

Sd_{AXB} : $A \times B$ faktörünün serbestlik derecesi

Sd_e : Hata serbestlik derecesi

Toplam serbestlik derecesi deneme sayısının bir eksiğidir.

$$Sd_T = N - 1$$

Bir faktör ya da sütunun serbestlik derecesi de seviye sayısının bir eksiğidir.

$$Sd_A = k_A - 1$$

Etkileşimin serbestlik derecesi ise etkileşim faktörlerinin serbestlik dereceleri çarpımıdır.

$$Sd_{AxB} = (Sd_A).(Sd_B) \quad (3.11)$$

Hata serbestlik derecesi, toplam serbestlik derecesinden tüm faktör ve etkileşimlerinin serbestlik derecelerinden çıkarılması ile bulunmaktadır.

$$Sd_e = Sd_T - Sd_A - Sd_B - Sd_{AxB} \quad (3.12)$$

Varyans değerinin hesaplanması, varyans analizi tablolarıyla yapılmaktadır. Faktörlerin varyansları; faktörlerin kareler toplamının serbestlik derecesine bölümüdür.

$$V_A = \frac{KT_A}{Sd_A}: A \text{ faktörü için örnek varyans formülü} \quad (3.13)$$

Hata varyansı da hata kareler toplamının serbestlik derecesine bölümüdür. Hatayı kontrol edilemeyen faktörler ve ölçüm yanlışlıkları oluşturmaktadır.

$$V_e = \frac{KT_{Ae}}{Sd_e} \quad (3.14)$$

Varyans analizi tablosu oluşturulduktan sonra, F testi hangi faktörlerin önemli olduğunu gösterir. F testi uygulanırken hesaplanan F değerleriyle, istenen güven düzeyindeki F_{tablo} değerleri karşılaştırılır. F değeri tablodaki değerden büyükse $1-\alpha$ güvenle kabul edilir. Varyans analizi (ANOVA) tablosundan elde edilen F değeri, faktör ya da etkileşim varyansının hata varyansına oranıdır.

$$F_A = \frac{V_A}{V_e}: A \text{ faktörüne ait F değeri} \quad (3.15)$$

$$F_{tablo} = f_{\alpha, v_1, v_2} \quad (3.16)$$

$$F_{tablo} = f_{\alpha, v_1, v_2}$$

α : Anlamlılık düzeyi

v_1 : Faktörün serbestlik derecesi

v_e : Hata serbestlik derecesi

ANOVA tamamlandıktan sonra önemli faktörler ve etkileşimler belirlenir, sonuçlar yorumlanır. Ortalamanın tahmin edilmesi, tahmin edilen ortalamanın etrafında güven aralığının belirlenmesi kullanılan metotlardır. Ortalamanın tahmin edilmesi, kombinasyondaki faktör seviyelerinin ortalama değerleri,

$$\mu_{A_1B_2} = A_1 + B_1 - (N - 1)\bar{T} \quad (3.17)$$

n = Belirlenen faktör-seviye kombinasyondaki faktör sayısı

\bar{T} Seçilen faktör-seviye kombinasyonundaki faktörlerin tüm seviyelerinin ortalamasıdır.

Tahmin edilen ortalama etrafında güven aralığı,

$$G.A. = \sqrt{F_{\alpha, sd_T, sde} \cdot V_e} \left[\left(\frac{1}{n_{eff}} \right) + \left(\frac{1}{r} \right) \right] \quad (3.18)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1+c} \quad (3.19)$$

Burada:

c : μ bulunurken kullanılan tüm faktörlerin toplam serbestlik derecesi

r : Yapılan doğrulama deneyi sayısı

sd_T : Ortalama ait serbestlik derecesi olup daima 1'dir.

sde : Hata serbestlik derecesi

V_e : Hata varyansı

N : Deney sayısı

$G.A.$: Güven aralığı

$\mu - G.A. \leq \text{performans karakteristiği değeri} \leq \mu + G.A$ [76].

3.4. Doğrulama Deneylerinin Yapılması

Deney analiz sonucunda seçilen en iyi şartlar altında tekrarlanmaktadır. En iyi şartları belirleyerek yapılan deney doğrulama deneyidir. Deney sonucunda bulunan faktör-seviye kombinasyonu en iyi performans karakteristiği değerine ulaştırırsa istenen durum gerçekleşmiş ve deney amacına ulaşmış olur.

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve TRİBOLOJİK DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ

Bu bölümde çalışmada kullanılacak epoksi esaslı kompozit malzemelerin üretimi, numune hazırlıkları yanı sıra mekanik deneyler ve tribolojik deneylere yer verilmektedir. Kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla çekme, üç nokta eğme, darbe ve sertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Tribolojik özellikleri incelemek amacıyla pim-disk aşınma cihazıyla deneyler gerçekleştirilerek, sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Tribolojik deneyler Taguchi metoduna göre tasarlanmış ve ANOVA sonuçlarına göre yorumlanmıştır. Ayrıca aşınan yüzeylerin optik ve SEM görüntüleri incelenmiştir.

4.1. Malzemeler ve Kompozit Üretimi

Çalışmada matriks malzemesi olarak epoksi kullanılmıştır. Epoksiye üretici firmanın belirttiği, ağırlıkça 100:40 oranında sertleştirici (MGS H285) ilave edilmiştir. Katkı malzemesi olarak ise karbon kırpıntı, cam kırpıntı, bambu kırpıntı, hindistan cevizi kabuğu lifi, karbon elyaf, E-cam elyaf ve keten iplikten oluşmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 4.1’de görülmektedir.

Tablo 4.1. Malzemeler ve özellikleri

Malzemeler	Özellikler	Ticari Kodu	Tedarik
Epoksi reçine	Bisphenol A	MGS L285	Dost Kimya
Karbon kırpıntı	6 mm (boy), 0,05 mm (genişlik)	02.60.6.01	Dost Kimya
Cam kırpıntı	6 mm (boy), 0,1 mm (genişlik)	DE1	Cam Elyaf Sanayi A.Ş.
Bambu kırpıntı	5-6 mm (boy), 0,2 mm (genişlik)	-	Özkaraaslan Bambu Mobilya İmalat
Hindistan cevizi kabuğu lifi	2-3 mm (boy), 0,05 mm (genişlik)	Tropical Bioterra	Canpet.net
Karbon elyaf	Tek yönlü, 300gr/m ²	02C300UD.05	Dost Kimya
E-cam elyaf	Tek yönlü, 236 gr/m ²	L300E10A	Telateks Tekstil Ürünleri Sanayi ve Tic. A.Ş.
Keten iplik	Ne 6/1	-	Nilas Keten

Kırpıntı takviyeli kompozitler, epoksiye belli oranlarda kırpıntı ilave edilip homojen karışım elde edildikten sonra özel tasarlanan kalıplara dökülerek preslendi. 60 °C’de 2 saat etüvde bekletildikten sonra 24 saat oda sıcaklığında kürlenmesi için bekletilmiştir. Kalıplardan biri mekanik diğeri de tribolojik deneylerde kullanılacak numunelere uygun olarak tasarlanmıştır. Şekil 4.1’de deney numunelerinin üretiminde kullanılan kalıpların resimleri görülmektedir.



Şekil 4.1. Numune kalıpları (a) Mekanik numuneler için üretilen kalıp (b) Aşınma numuneleri için hazırlanan kalıp

Elyaf ve iplikle üretilen kompozitlerde ise elle yatırma yöntemine başvurulmuştur. Kalıp ayırıcı sürülen yüzeye yatırılan tek yönlü elyaf katmanlar arasına epoksi rulo fırça yardımıyla emdirilmiştir. Bu sayede hava kabarcıklarının oluşumu da önlenmiştir. Bu işlem istenen kalınlık elde edilene kadar tekrarlanmıştır. 24 saat külendikten sonra numuneler standartlara uygun boyutlarda kesilmiştir. Şekil 4.2’de elle yatırma yöntemiyle üretime örnek görülmektedir.



Şekil 4.2. Elle yatırılan karbon elyaf takviyeli kompozit üretimi

Keten iplikle kompozit üretimi için özel çerçeve üretilmiştir. İplik bu çerçeveler etrafında sarılarak standartlardaki kalınlığa göre katmanlandırılarak aralarına epoksi döküldü. Daha sonra numune boyutlarına uygun olarak kesilmiştir.

Tribolojik testler için kırpıntı deney numuneleri 6 mm çapında 30 mm uzunluğunda pin numuneler için tasarlanan kalıpta üretilmiştir. Elyaf katkılı numuneler elle yatırma yöntemiyle üretilerek, 6x6x3 mm³ boyutlarında kesilerek pine yapıştırılmıştır.

4.2. Mekanik Deneyler

Mekanik deneyler, çekme, üç nokta eğme, darbe ve sertlikten oluşmaktadır. Her bir deney için 5 tekrar yapılarak ortalaması alınmıştır. Deneyler normal oda koşullarında 22°±2 ve nem %50±2 civarında gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.2’de mekanik deney plan tablosu görülmektedir. Tabloda; numuneler, deney standartları ve parametreleri görülmektedir.

Tablo 4.2. Mekanik deney planı

Numuneler	Çekme (standart/çene hızı)	Üç nokta eğme (standart/deney hızı)	Darbe (standart/çekiç enerjisi)	Sertlik (standart)
Saf epoksi	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
%6 karbon kırpıntı takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
%8 karbon kırpıntı takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
%10 karbon kırpıntı takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
%10 cam kırpıntı takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
%30 cam kırpıntı takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
%50 cam kırpıntı takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
%6 bambu kırpıntı takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
%8 bambu kırpıntı takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol

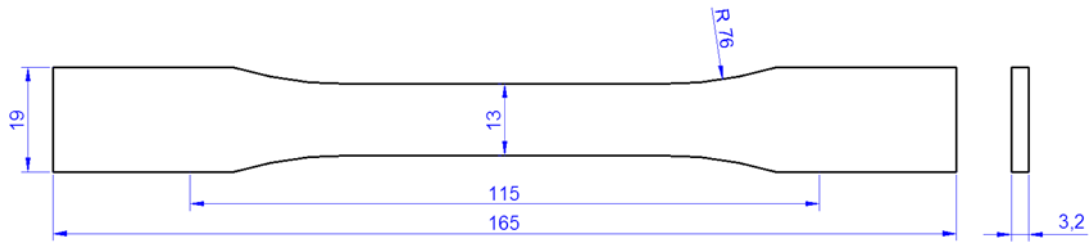
Tablo 4.2. Devamı: Mekanik deney planı

% 10 bambu kırpıntı takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
%6 hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
%8 hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
%10 hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit	ASTM D638-10, 5mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
0° yönlenmeli karbon elyaf takviyeli kompozit	ASTM 3039, 2mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 22 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
90° yönlenmeli karbon elyaf takviyeli kompozit	ASTM 3039, 2mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
0/90 yönlenmeli karbon elyaf takviyeli kompozit	ASTM 3039, 2mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 22 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
0° yönlenmeli cam elyaf takviyeli kompozit	ASTM 3039, 2mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 22 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
90° yönlenmeli cam elyaf takviyeli kompozit	ASTM 3039, 2mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
0/90 yönlenmeli cam elyaf takviyeli kompozit	ASTM 3039, 2mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 22 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
0° yönlenmeli keten iplik takviyeli kompozit	ASTM 3039, 2mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
90° yönlenmeli keten iplik takviyeli kompozit	ASTM 3039, 2mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol
0/90 yönlenmeli keten iplik takviyeli kompozit	ASTM 3039, 2mm/dak	ASTM D790-10, 2mm/dak	ASTM D4812, İzod, 5,5 J çekiç	ASTM D-2583 Barcol

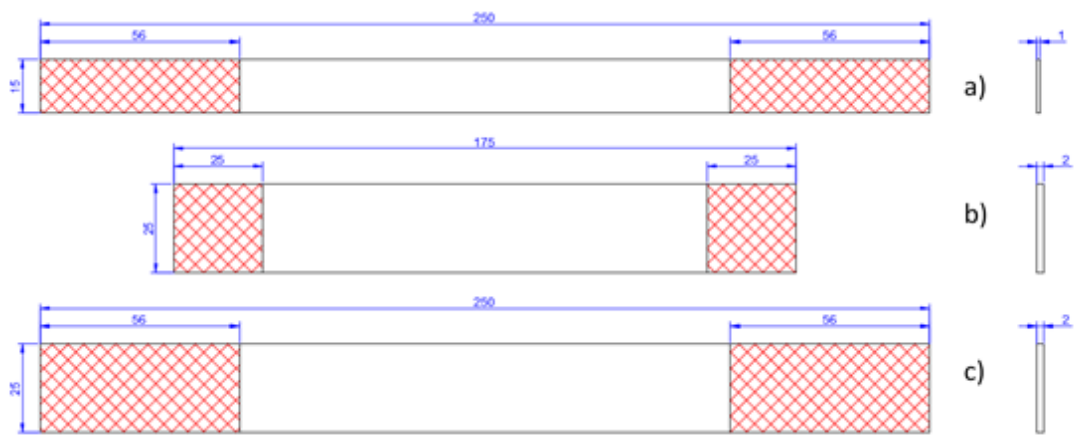
4.2.1. Çekme deneyleri

Çekme deneyleri Zwick Roell marka test cihazında kırpıntı katkılı numuneler için ASTM D638-10 [77] standardına, diğer numuneler için ise ASTM 3039 [78] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir deney beş kez tekrar edilerek

ortalaması alınmıştır. Deneysel kırpıntı kompozitlerde standartta belirtildiği gibi 5 mm/dakika, elyafli ve iplikli kompozitlerde ise 2 mm/dakika hızında gerçekleştirilmiştir. Elyaf takviyeli numunelerin çeneden kaymasını engellemek için standartlara uygun destek parçaları numunelere yapıştırılmıştır. Çekme deneyleri sonucu kompozitlerin çekme dayanımı, elastiklik modülü ve % birim şekil değişimi değerleri bulunmuştur. Mühendislik değerleri gerçek değerlere çevrilmiştir. Şekil 4.3 ve 4.4'te çekme numunelerinin boyutları görülmektedir.



Şekil 4.3 Kırpıntı takviyeli kompozitler için çekme numunesi boyutları



Şekil 4.4. Elyaf takviyeli kompozitler için çekme numunesi boyutları (a) 0° tek yönlü numuneler (b) 90° tek yönlü numuneler (c) 0/90 çift yönlü numuneler

Elde edilen mühendislik değerleri;

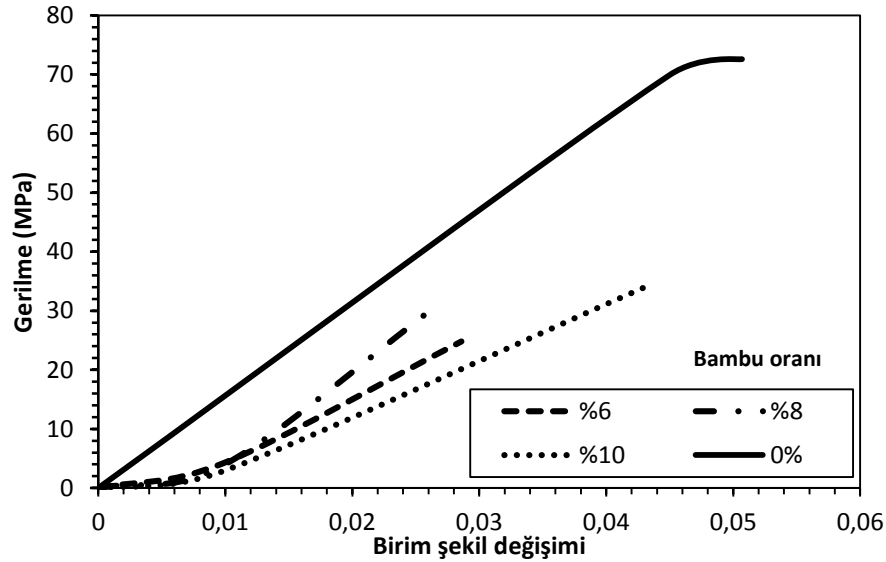
$$\sigma_g = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4.2)$$

ifadeleri yardımıyla gerçek değerlere çevrilmiştir. Burada σ_g gerçek gerilme, ε_g , gerçek birim şekil değişimini ifade etmektedir.

4.2.1.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin çekme deneyleri

Şekil 4.5'te bambu kırpıntı katkıli kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri görülmektedir. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin gerilme değerlerinin saf epoksiye göre daha düşük değerde olduğu gözlemlendi. Ağırlıkça %6 bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerde en yüksek gerilme değeri 25 MPa civarında iken, %8 için yaklaşık 31 MPa, %10 için ise 34 MPa değerleri ölçüldü.

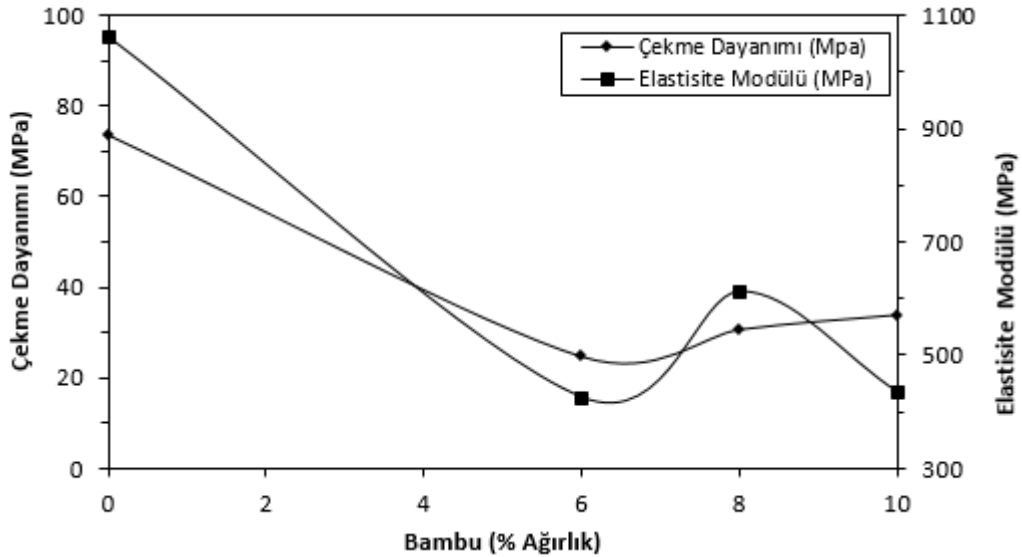


Şekil 4.5. Bambu kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değişimi Eğrileri

Saf epoksi için 73,5 MPa olan çekme dayanımı, %6 bambu takviyesiyle %66 oranında, %8 bambu takviyesiyle %58 oranında, %10 bambu takviyesiyle %54 oranında düşüş gösterdi. Katkı oranı arttıkça gerilmede artış olduğu ancak bunun kayda değer seviyelerde olmadığı görüldü. Saf epoksiye göre üretilen kompozitlerin dayanımlarının daha düşük olması takviyelerle birlikte malzemenin gevrekleşmesidir.

Şekil 4.6'da bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastisite modülü eğrileri görülmektedir. Kompozit malzemelerin elastisite

modülü de çekme dayanımı da saf epoksiye göre daha düşük değerlerde gözlenmektedir. En yüksek elastisite modülü %8 takviyeli kompozitte 612 MPa değerindedir. Buna karşılık %6 ve %10 bambu kırpıntı katkıli kompozitlerin elastisite modülleri sırasıyla 425 ve 434 MPa değerinde birbirine yakın olarak ölçüldü.



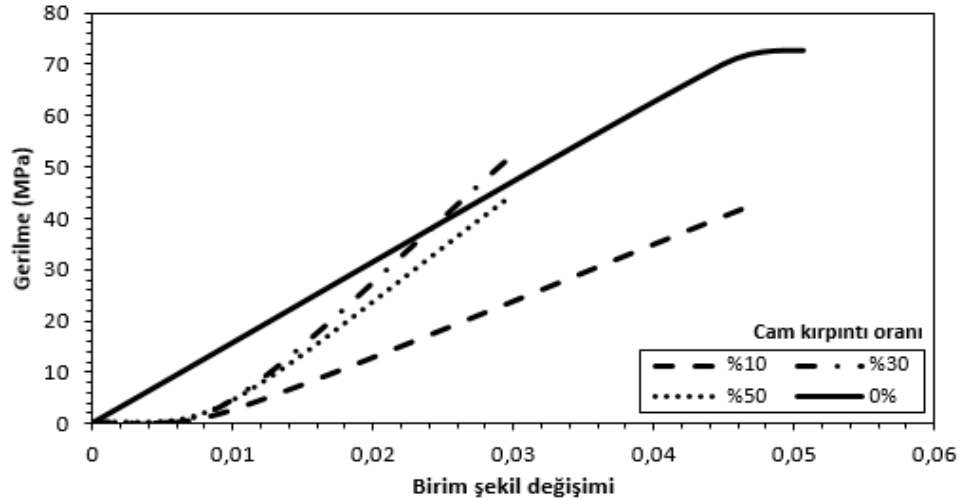
Şekil 4.6. Bambu kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü eğrileri

Saf epoksi için 1060 MPa olan elastisite modülü %6 bambu takviyesiyle %60 oranında, %8 bambu takviyesiyle %42 oranında, %10 bambu takviyesiyle %59 oranında düşüş gösterdi.

Çekme dayanımı değerleri ise birbirine yakın olmakla beraber katkı oranı arttıkça artış gösterdi. Değerlerde çok büyük farklılıklar olmamasının sebebi katkı oranları arasında %2-4 gibi küçük miktarlar olmasıdır.

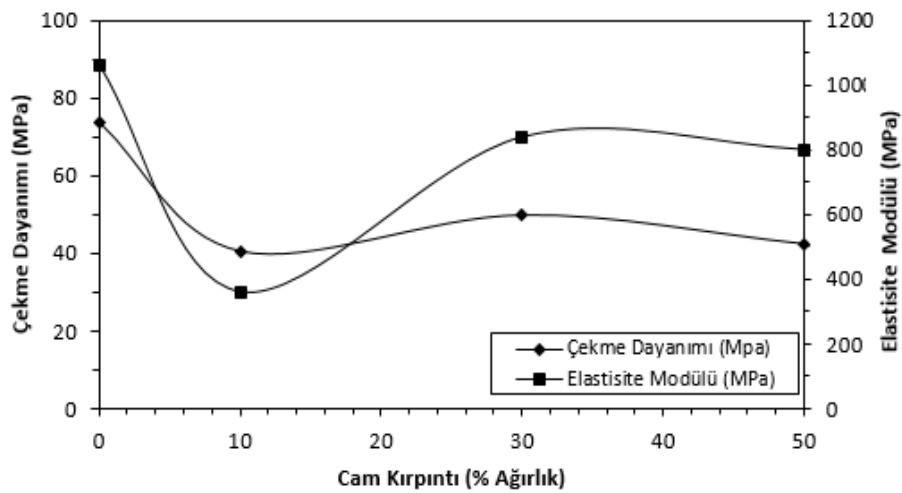
Şekil 4.7'de cam kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri görülmektedir. Saf epoksiyle karşılaştırıldığında gerilme değerlerinin daha düşük seviyelerde olduğu gözlemlendi. En iyi performans %30 katkı oranına sahip kompozitlerde 51 MPa olarak ölçüldü. Daha sonra sırasıyla %50 ve %10 katkıli kompozit takip etti. Normal şartlarda katkı oranı arttıkça dayanımın artması beklenir. Ancak bu değerlerin de bir optimumu vardır. Burada cam kırpıntının fazla

ilavesi ile matrisin bağlayıcı özelliğinin yetersiz kaldığı görülmektedir. Saf epoksiye cam kırıntı takviyesi ile eğriler daha belirgin olarak lineerleşerek özellikleri gevrek malzeme özelliğine yaklaşmaktadır. Cam kırıntı takviyesi ile dayanımın iyileşmemesinin nedeni fiberlerin kompozit mukavemetini arttırabilmesi için sürekli olması gerektiğindedir.



Şekil 4.7. Cam kırıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.8’de cam kırıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastisite modülü eğrileri görülmektedir. Şekilden çekme dayanımının katkı oranındaki değişimden fazla etkilenmediği görülmektedir.



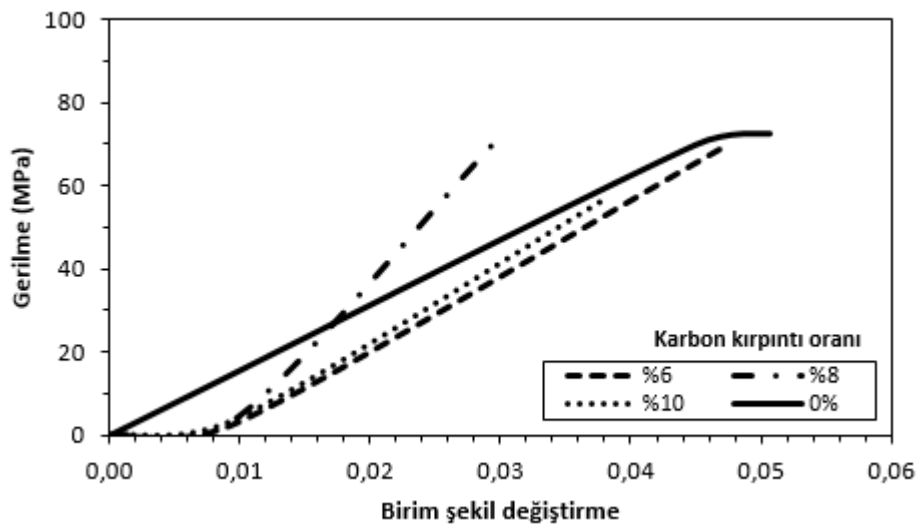
Şekil 4.8. Cam kırıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastisite modülü eğrileri

Saf epoksi için 73,5 MPa olan çekme dayanımı, %10 cam kırpıntı takviyesiyle 42 MPa'a %42 oranında, %30 cam kırpıntı takviyesiyle 51 MPa'a %32 oranında ve %50 cam kırpıntı takviyesiyle 43 MPa'a %41 oranında düşüş gösterdi.

Elastisite modülüne bakıldığında epoksiye cam kırpıntı takviyesinin elastisite modülünü düşürdüğü görülmektedir. Saf epoksinin elastisite modülü 1060 MPa iken, %10 kırpıntı katkılı kompozitte 360 MPa, %30 katkılı kompozitte 839 MPa, %50 katkılı kompozitte 800 MPa değerindedir.

Saf epoksi için 1060 MPa olan elastisite modülü, %10 cam kırpıntı takviyesiyle %66 oranında, %30 cam kırpıntı takviyesiyle %21 oranında ve %50 cam kırpıntı takviyesiyle %24,5 oranında düşüş gösterdi.

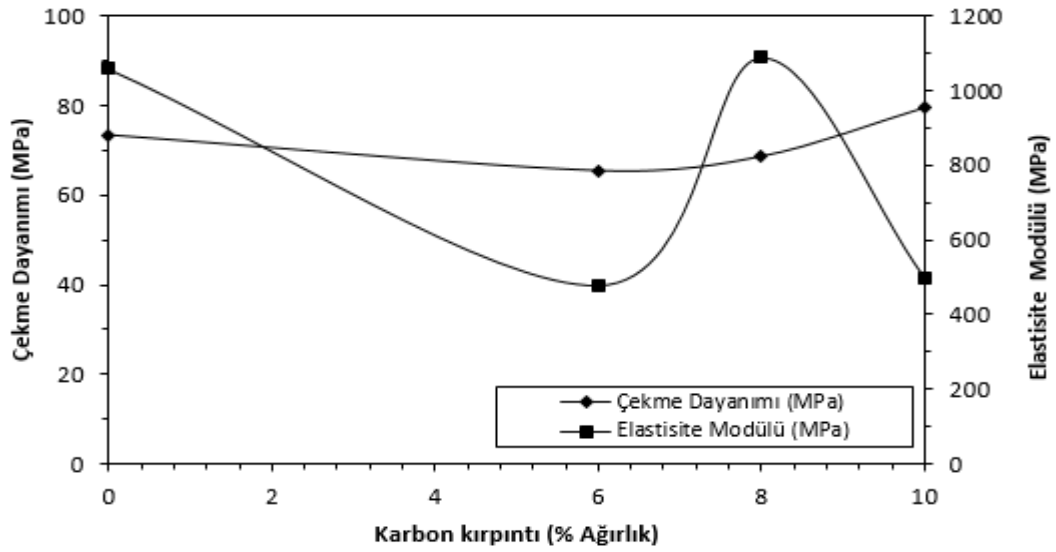
Şekil 4.9'da karbon kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri görülmektedir. Karbon kırpıntı takviyesiyle saf epoksinin çekme dayanımında fazla değişiklik olmadığı görülmektedir. Saf epoksidede 73,5 MPa olan çekme dayanımı, %6 katkı oranı için %7 oranında düşüşle 68,544 MPa, %8 katkı oranı için %4'lük düşüşle 70,761 MPa, %10 katkı oranı için %22'lik düşüşle 57,04 MPa olarak ölçüldü.



Şekil 4.9. Karbon kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

%8 karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin en fazla gevrek davranış gösterdiği görülmektedir. Karbon kırpıntı takviyesi ile dayanımın iyileşmemesinin nedeni fiberlerin kompozit mukavemetini arttırabilmesi için sürekli olması gerektiğindedir.

Şekil 4.10'da karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastisite modülü eğrileri görülmektedir.

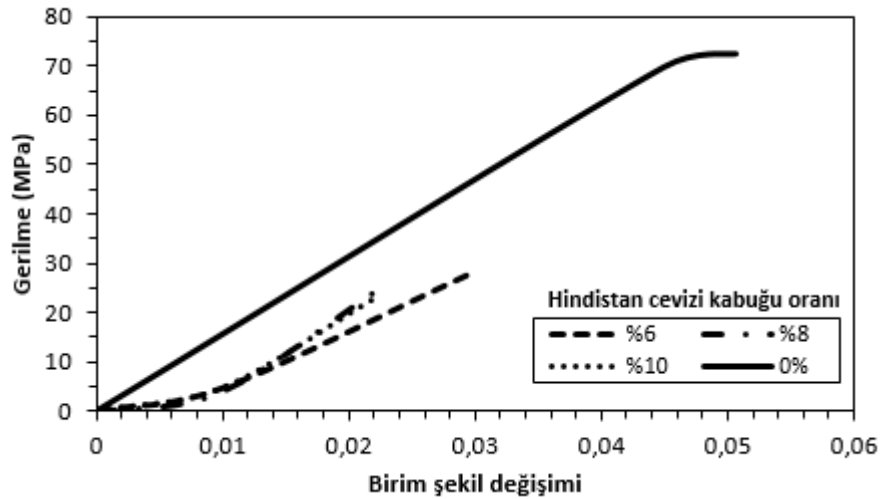


Şekil 4.10. Karbon kırpıntı takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü eğrileri

%6 karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin elastisite modülü 478 MPa iken, %8 karbon kırpıntı takviyede 1090 MPa, %10 katkı oranı içinse 498 MPa'dır.

Saf epoksiye göre karbon kırpıntı takviyesiyle elastisite modülü sırasıyla %6 ve %10 karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerde %55 ve %53 oranında azalırken; %8 takviye oranında yaklaşık %3 oranında artış göstermektedir.

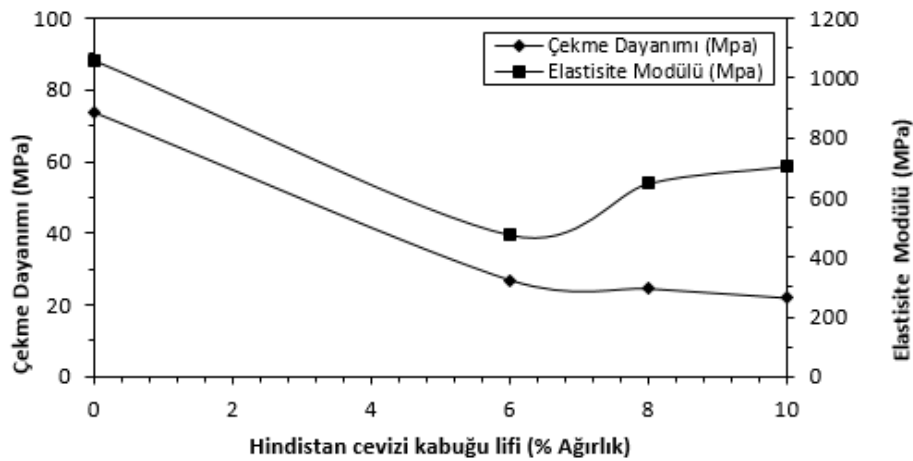
Şekil 4.11'de hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri görülmektedir. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin saf epoksiye göre çok daha düşük çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Kompozitlerdeki hindistan cevizi kabuğu lifi oranı arttıkça birbirlerine yakın değerler olmakla birlikte dayanımın düştüğü gözlemlendi.



Şekil 4.11. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

Saf epoksiye göre, çekme dayanımı %6 katkıli kompozit için %63 düşüşle 27 MPa, %8 için %66,5 düşüşle 24,6 MPa, %10 için %70 düşüşle 22 MPa değerindedir. Takviye oranı arttıkça çekme dayanımındaki düşüş oranının da arttığı görülmektedir.

Şekil 4.12'de hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastisite modülü eğrileri görülmektedir.



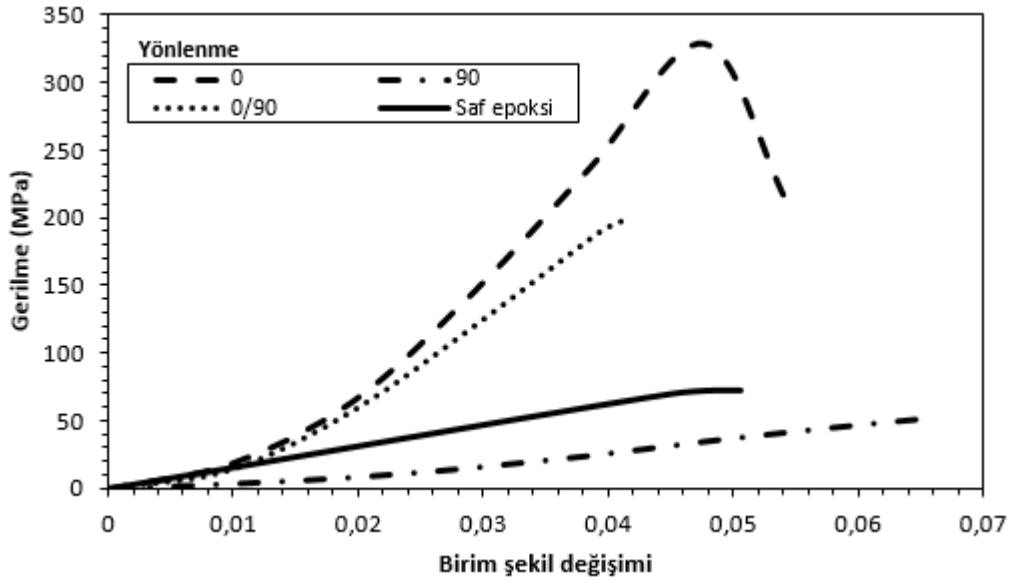
Şekil 4.12. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli epoksi kompozitlerin katkı oranına göre çekme dayanımı, elastisite modülü eğrileri

Takviye oranı arttıkça elastisite modülünün arttığı görülmektedir. Elastisite modülü %6 takviye için 476 MPa, %8 için 648 MPa, %10 için de 705 MPa olarak ölçüldü. Saf

epoksinin elastisite modülüne nazaran takviye oranına göre sırasıyla %55, %39 ve %34 oranında azalma gözlenmektedir.

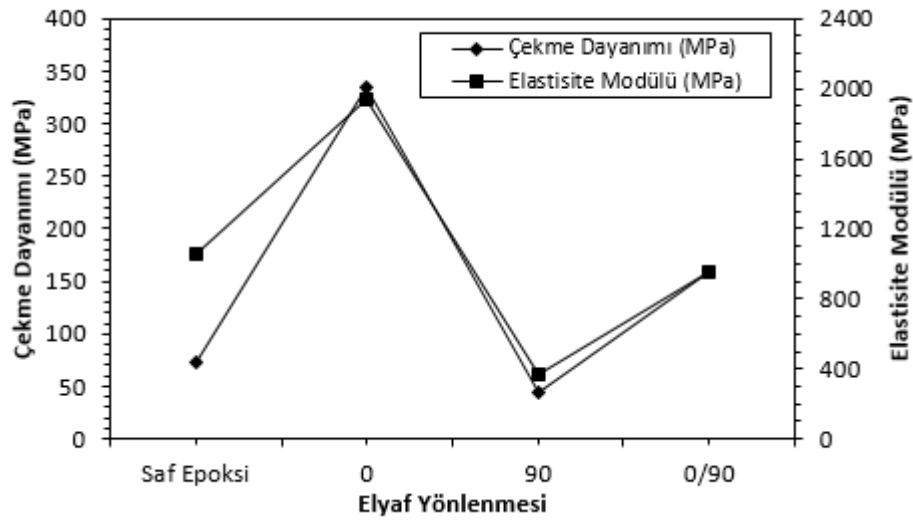
4.2.1.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin çekme deneyleri

Şekil 4.13'te cam elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenme durumuna göre gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri görülmektedir. En yüksek gerilme değeri 0° tek yönlü kompozitlerde elde edilmiştir. En düşük gerilme değeri ise 90° tek yönlü kompozitlerde izlenmiştir. Bunun sebebi 0° elyaf doğrultusunda yani boylamasına çekme gerçekleşmektedir. Bu şekilde dayanım elyaf boyu tarafından kontrol edilmektedir.



Şekil 4.13. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Şekil 4.14'te cam elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenme durumuna göre çekme dayanımı, elastisite modülü eğrileri görülmektedir. Deneyler sonucu çekme dayanımında 0° yönlene kompozitler için 335MPa, 90° için 45,5 MPa ve 0/90 için 158 MPa değerleri elde edilmiştir. Bu değerler saf epoksinin 73,5 MPa olan çekme dayanımıyla karşılaştırıldığında sırasıyla %383 oranında artış, %38 oranında düşüş ve %53 oranında artış şeklindedir.

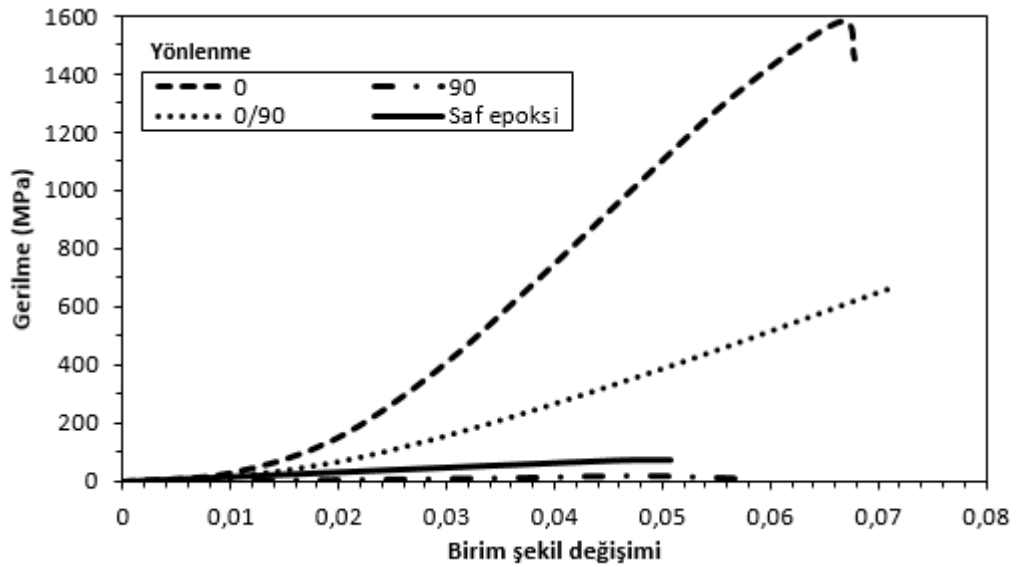


Şekil 4.14. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre çekme dayanımı, elastiklik modülü eğrileri

Kompozitlerin elastisite modülü değerleri ise 0° için 1940 MPa, 90° için 370 MPa ve 0/90 için 950 MPa şeklindedir. Saf epoksinin 1060 MPa olan elastisite modülü 0° yönlenmeli kompozitlerde %83 oranında artarken, 90° yönlenmeli kompozitlerde %65 oranında azalmakta, 0/90 yönlenmelilerde ise %10 oranında azalmaktadır.

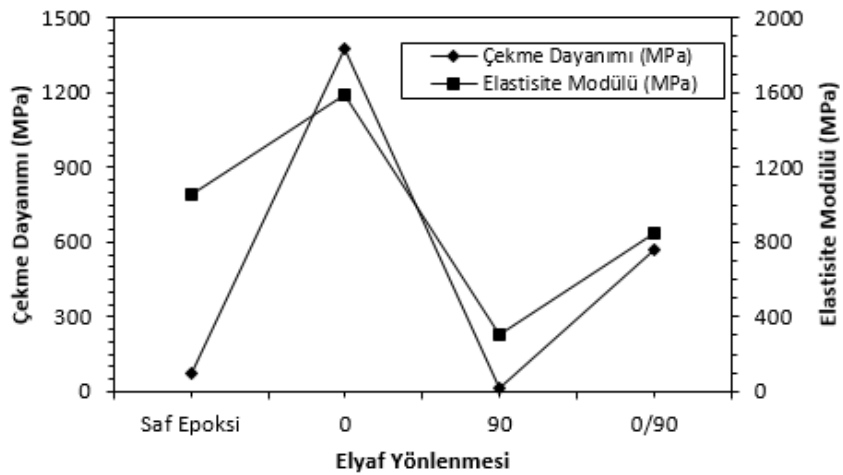
Görüldüğü gibi kompozitler 0° yönünde en üstün özelliklere sahiptir. Bunun da nedeni bu yönde dayanımı elyaf boyunun kontrol etmesidir.

Şekil 4.15'te karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenme durumuna göre gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri görülmektedir. En yüksek gerilme değeri 0° tek yönlü kompozitlerde elde edilmiştir. En düşük gerilme değeri ise 90° tek yönlü kompozitlerde izlenmiştir. Bunun sebebi 0° elyaf doğrultusunda yani boylamasına çekme gerçekleşmektedir. Bu şekilde dayanım elyaf boyu tarafından kontrol edilmektedir.



Şekil 4.15. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

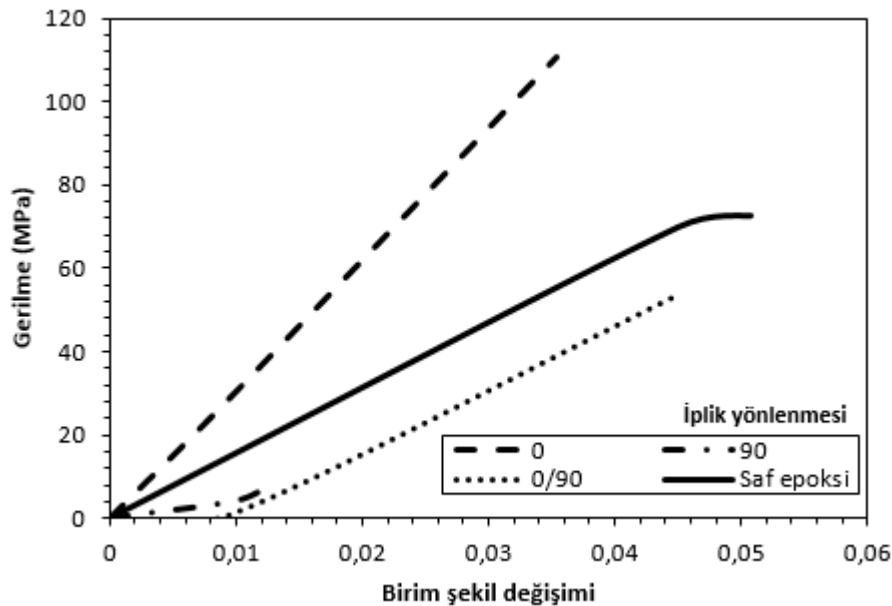
Şekil 4.16'da karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenme durumuna göre çekme dayanımı, elastisite modülü eğrileri görülmektedir. Deneysel sonucu çekme dayanımında 0° yönlenen kompozitler için 1380 MPa, 90° için 10,6 MPa ve 0/90 için 568 MPa değerleri elde edilmiştir. Saf epoksinin çekme dayanımıyla karşılaştırıldığında sırasıyla; %1777 artış, %85 azalma, %672 artış şeklindedir.



Şekil 4.16. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

Kompozitlerin elastisite modülü değerleri ise 0° için 1590 MPa, 90° için 302 MPa ve 0/90 için 848 MPa şeklindedir. Saf epoksinin elastisite modülüyle karşılaştırıldığında sırasıyla; %50 artış, %71 azalma, %20 azalma şeklindedir.

Şekil 4.17’de keten iplik takviyeli kompozitlerin yönlenme durumuna göre gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri görülmektedir.



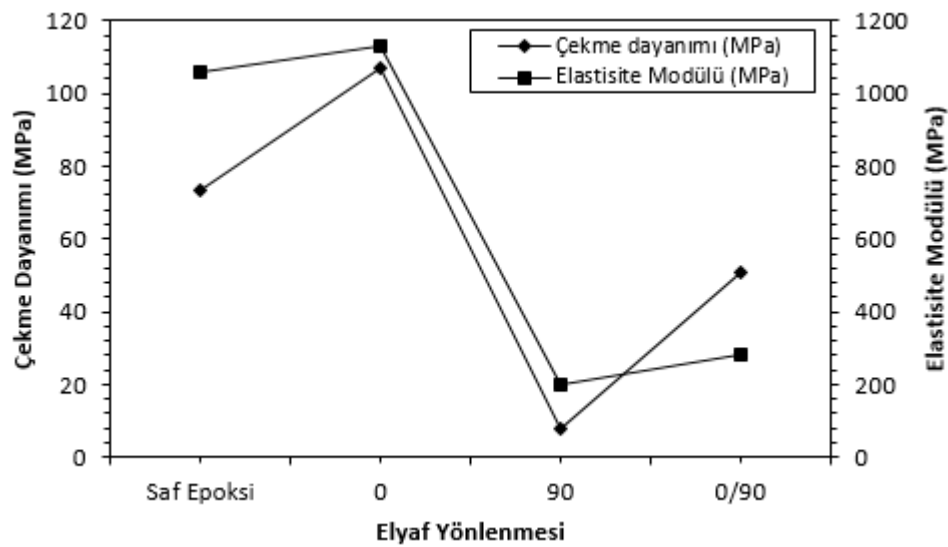
Şekil 4.17. Keten iplik takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

En yüksek gerilme değeri 0° tek yönlü kompozitlerde elde edilmiştir. En düşük gerilme değeri ise 90° tek yönlü kompozitlerde izlenmiştir. Bunun sebebi 0° elyaf doğrultusunda yani boylamasına çekme gerçekleşmektedir. Bu şekilde dayanım elyaf boyu tarafından kontrol edilmektedir. Katkının saf epoksiye göre sadece 0° yönünde iyileştirme sağladığı görülmektedir.

Şekil 4.18’de keten iplik takviyeli kompozitlerin yönlenme durumuna göre çekme dayanımı, elastisite modülü eğrileri görülmektedir. Deneyler sonucu çekme dayanımında 0° yönlü kompozitler için 107 MPa, 90° için 8 MPa ve 0/90 için 50,9 MPa değerleri elde edilmiştir. Saf epoksinin çekme dayanımıyla karşılaştırıldığında, 0° yönlü keten iplik takviyeli kompozitlerin çekme dayanımında %45,5 artış, 90°

yönlenen kompozitlerde %89 azalma ve 0/90 yönlenmede %30 azalma gerçekleşmektedir.

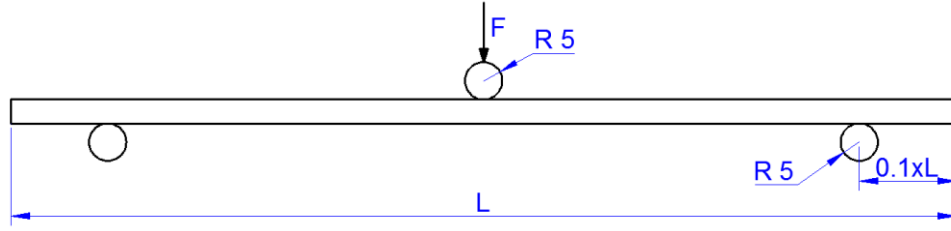
Kompozitlerin elastisite modülü değerleri ise 0° için 1130 MPa, 90° için 200 MPa ve 0/90 için 284 MPa şeklindedir. Elastisite modülü değerleri saf epoksininkiyle kıyaslandığında; 0° yönlenmeli kompozitlerde %6 artış, 90° yönlenmelilerde %81 azalma, 0/90 yönlenmelilerde %73 azalma şeklindedir.



Şekil 4.18. Keten iplik takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre çekme dayanımı, elastiklik modülü eğrileri

4.2.2. Üç nokta eğme deneyleri

Üç nokta eğme deneyleri Zwick Roell marka test cihazında ASTM D790-10 [79] standardına göre yapılmıştır. Deney hızı 2 mm/dak'dır. Her bir deney beş kez tekrar edilerek ortalaması alınmıştır. Deneyler standarda göre plastik deformasyon başladığı anda otomatik olarak durdurulmuştur. Şekil 4.19'da üç nokta eğme deneyinin uygulaması görülmektedir. Kırpıntı takviyeli numuneler 12,7x127x3,2 mm³ boyutlarındayken, elyaf takviyeli kompozitler 12,7x70x3,2 mm³ boyutlarındadır.



Şekil 4.19. Üç nokta eğme deneyinin uygulaması

Üç nokta eğme deneyine göre eğilme gerilmesi,

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (4.3)$$

ifadesine göre hesaplanmıştır. Burada σ , gerilme, F , yük (N), L , destekler arası mesafe (mm), b , numune genişliği (mm), d , numune kalınlığı (mm) olmaktadır.

Eğilme modülü,

$$E_B = \frac{mL^3}{4bd^3} \quad (4.4)$$

ifadesine göre hesaplanmıştır. Burada E_B eğilmedeki elastiklik modülü (MPa), L , destekler arası mesafe (mm), b , numune genişliği (mm), d , numune kalınlığı (mm), m , yük-sehim grafiğindeki lineer bölgenin eğimi olmaktadır.

Eğilme zorlanması,

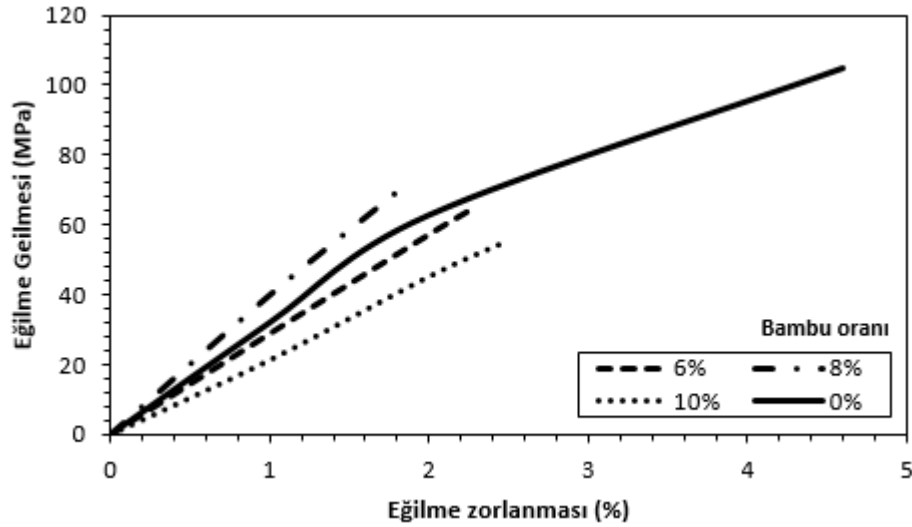
$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (4.5)$$

ifadesine göre hesaplanmıştır. Burada, zorlanma ε (mm/mm), D , numunenin merkezindeki maksimum çökme, d , numune kalınlığı (mm), L , destekler arası mesafe (mm) olmaktadır.

4.2.2.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin eğme deneyleri

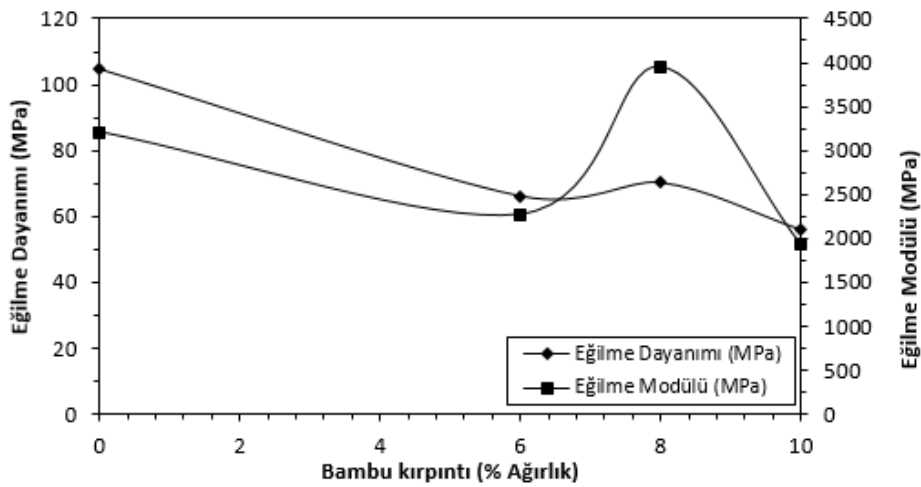
Şekil 4.20'de bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere

kompozit içinde artan dolgu oranıyla birlikte gerilme azalır, eğriler lineerleşmektedir. Bu durum eklenen dolguların matrisi gevrekleştirdiğini göstermektedir.



Şekil 4.20. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri

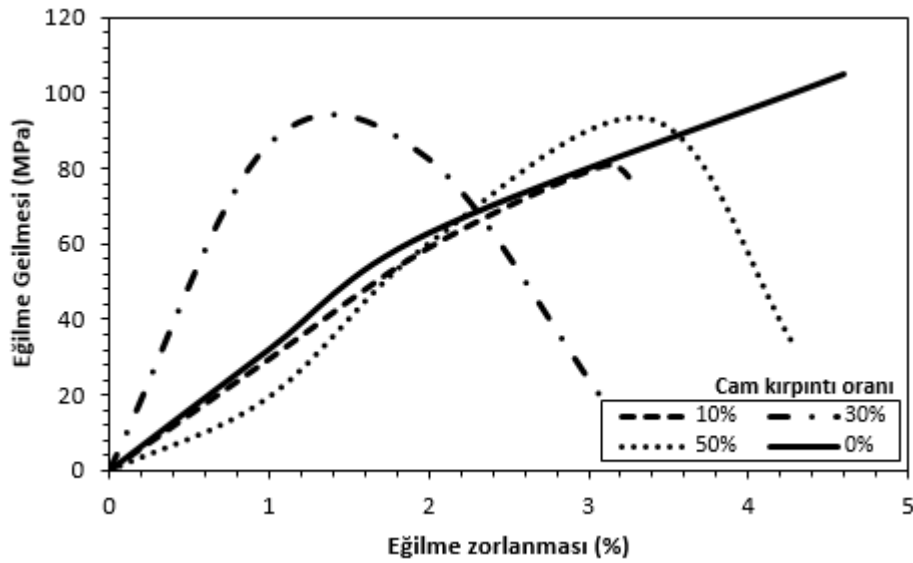
Şekil 4.21’de bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri görülmektedir. Eklenen bambu kırpıntı ile birlikte saf epoksinin eğilme dayanımı düşmektedir. Saf epoksinin eğilme dayanımı 105 MPa iken, %6 bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerde %39’luk düşüşle 66,2 MPa, %8 takviyelilerde %33’lük düşüşle 70,3 MPa, %10 takviyelilerde ise %47’lik düşüşle 55,9 MPa değerindedir.



Şekil 4.21. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri

Eğilme modülü değerleri ise saf epoksi için 3210 MPa iken, %6 bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerde %29'luk düşüşle 2270 MPa, %8 takviyelilerde %18'lik artışla 3950 MPa, %10 takviyelilerde ise %40'luk düşüşle 1926 MPa değerindedir.

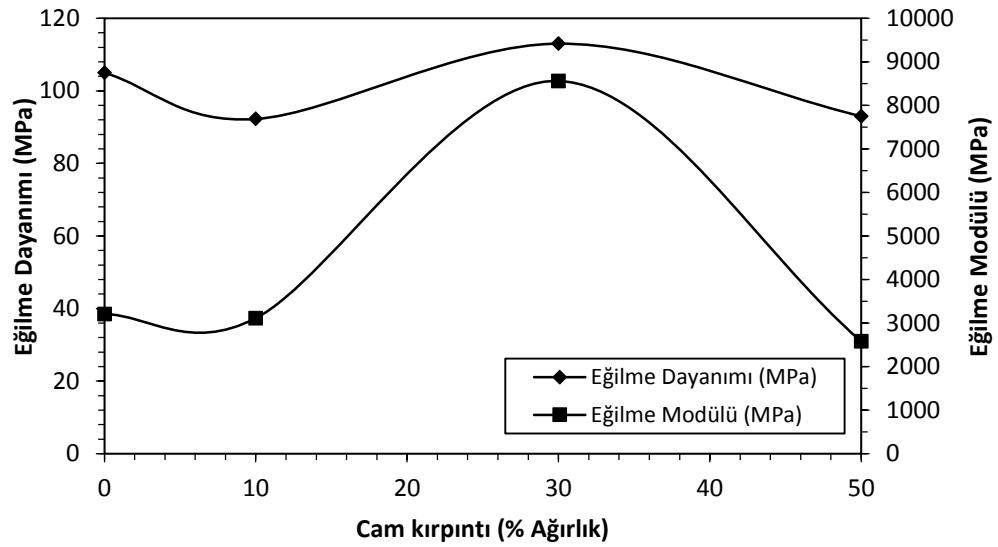
Şekil 4.22'de cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.22. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri

%10 takviyeli kompozit saf epoksiye benzer bir profil izlerken %30 ve %50 takviyeli kompozitlerin maksimum bir değere çıkıp daha sonra deformasyona uğradığı görülmektedir.

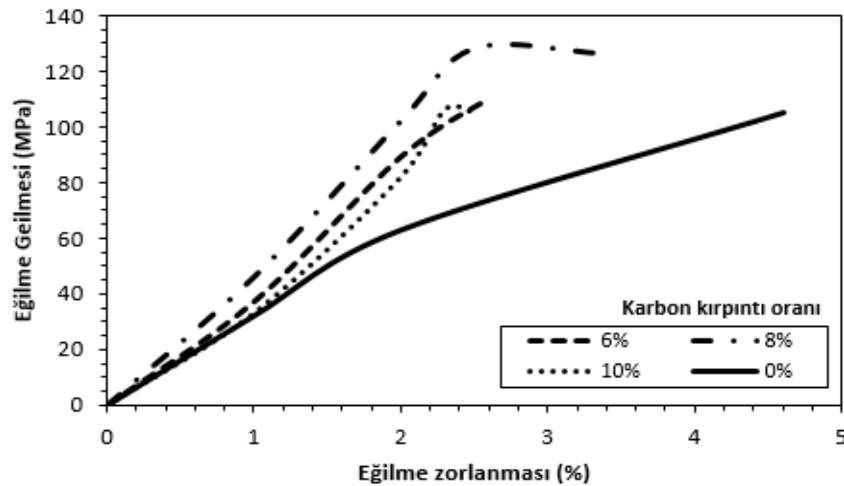
Şekil 4.23'te cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri görülmektedir. Eğilme dayanımları %10 cam kırpıntı takviyeli kompozitlerde 92,25 MPa, %30 takviyelilerde 113 MPa ve %50 takviyelilerde 93 MPa değerindedir. Cam kırpıntı takviyesiyle eğilme dayanımında katkı oranına göre sırasıyla, %12 azalma, %8 artış ve %11 azalma izlendi.



Şekil 4.23. Cam kırıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri

Eğilme modülü ise %10 cam kırıntı takviyeli kompozitlerde 3113 MPa, %30 takviyelilerde 8560 MPa ve %50 takviyelilerde 2580 MPa değerindedir. 3210 MPa olan saf epoksinin eğilme modülüne göre sırasıyla; %3 azalma, %166 artma ve %19 azalma meydana geldi.

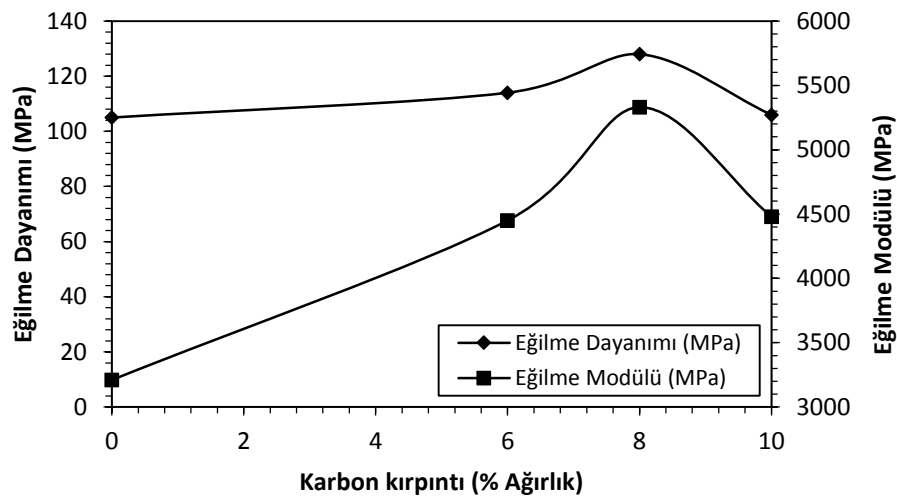
Şekil 4.24'te karbon kırıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.24. Karbon kırıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri

Karbon kırpıntı takviyesinin eğilme dayanımını arttırdığı görülmektedir. %10 takviye seviyesinde epoksinin bağlayıcılığı yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle karbon kırpıntı için optimum katkı değeri %8 civarında olmalıdır.

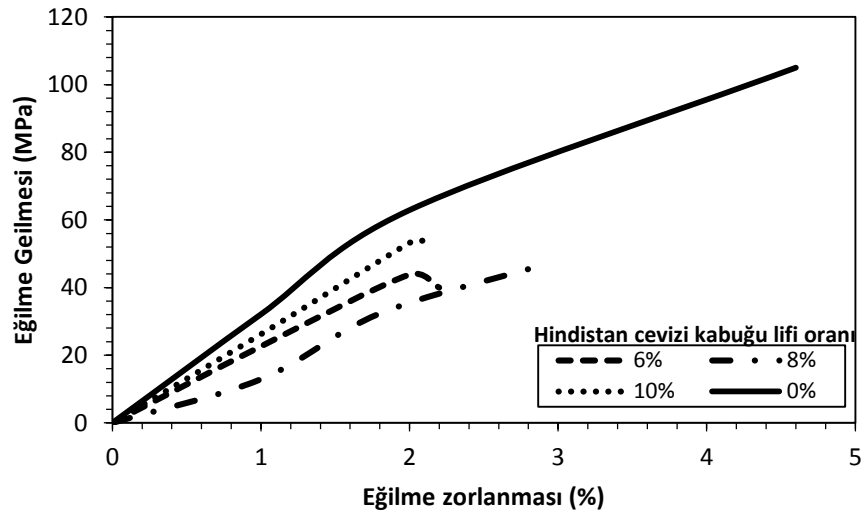
Şekil 4.25'te karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri görülmektedir. Saf epoksiyle karşılaştırıldığında; %6 takviyeli kompozitlerde eğilme dayanımı %8 artışla 114 MPa, %8 takviyelilerde %22 artışla 128 MPa ve %10 takviye için %1 artışla 106 MPa değerindedir.



Şekil 4.25. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri

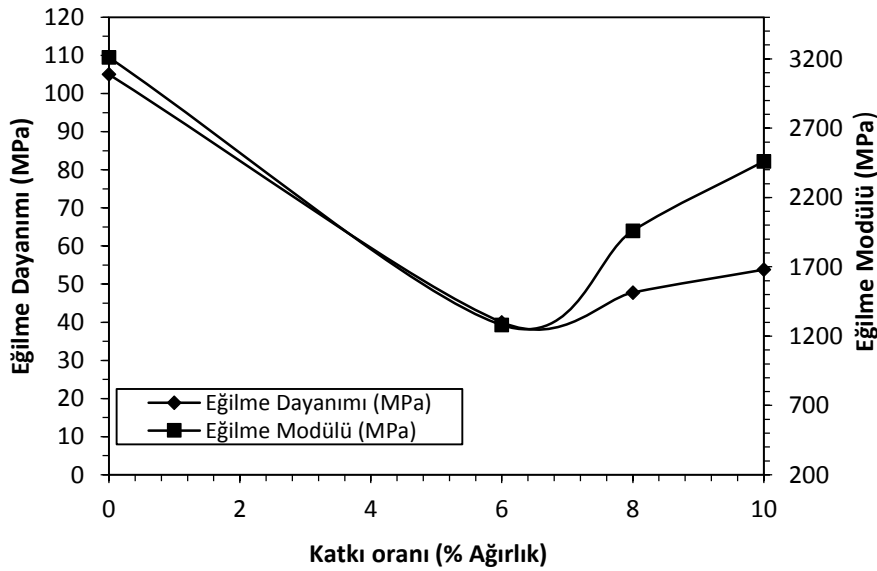
Eğilme modülleri ise %6 takviye oranında 4450 MPa, %8 takviyede 5330 MPa ve %10 takviyede 4480 MPa değerindedir. Saf epoksiye göre eğilme modülleri sırasıyla %39, %66 ve %40 oranında arttı.

Şekil 4.26'da hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri görülmektedir. Takviyeli kompozitlerin eğilme performanslarının saf epoksinin altında olduğu görülmektedir. Takviye oranı %10'a çıkartıldığında eğrinin saf epoksiye yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 4.26. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri

Şekil 4.27'de hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri görülmektedir. %6 takviyeli kompozitlerde eğilme dayanımı 105 MPa değerinden %62 azalmayla 40 MPa, %8 takviyeli kompozitlerde %54 azalmayla 47,8 MPa, %10 takviyeli kompozitlerde ise %49 azalmayla 53,8 MPa olarak ölçüldü.

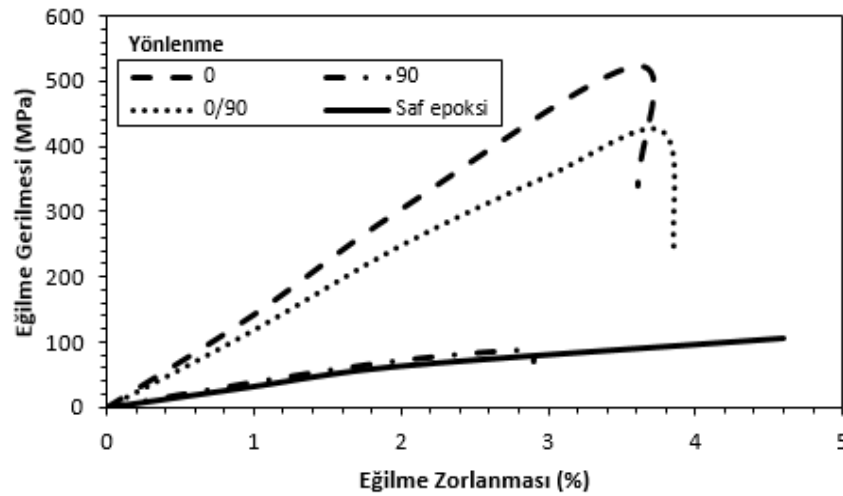


Şekil 4.27. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri

Eğilme modülü değerleri ise 3210 MPa olan saf epoksi değerine göre; %6 takviyelilerde %60 azalmayla 1280 MPa, %8 takviyelilerde %39 azalmayla 1960 MPa ve %10 takviyelilerde %23 azalmayla 2460 MPa değerindedir.

4.2.2.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin eğme deneyleri

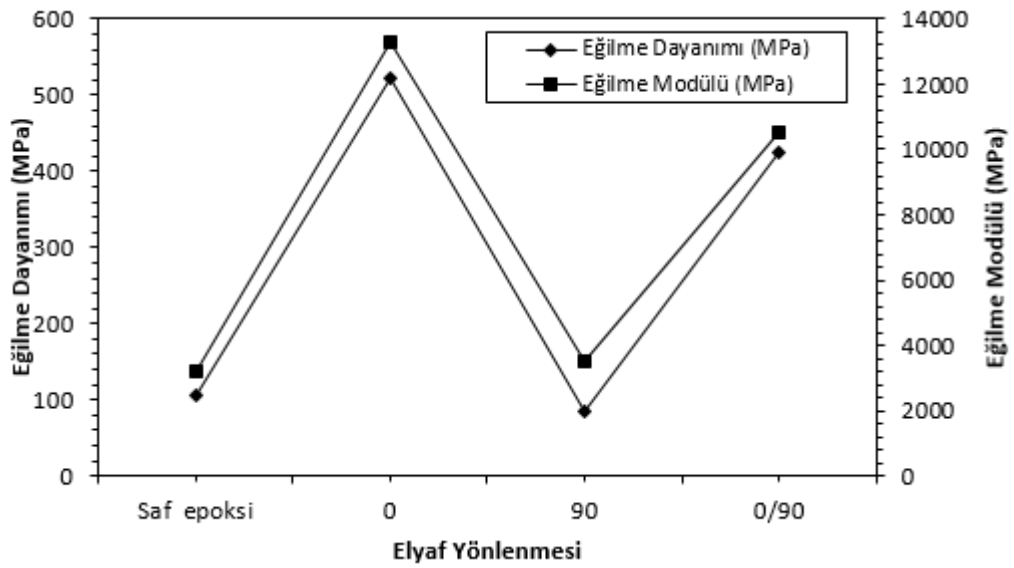
Şekil 4.28'de cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.28. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri

Çekme deneylerinde olduğu gibi en iyi performans 0° yönlenmeli kompozitlerde elde edilmiştir. Bunu 0/90 ve 90° yönlenmeli kompozitler takip etti. 90° yönlenen kompozitlerin eğrileri saf epoksiyle hemen hemen aynı gibidir.

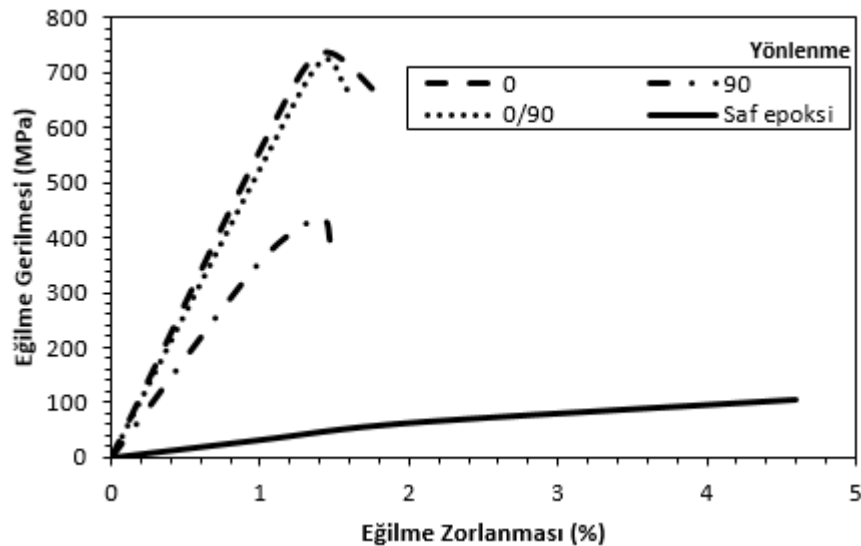
Şekil 4.29'da cam elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri görülmektedir. Kompozitlerin eğilme dayanımları 105 MPa olan saf epoksinin eğilme dayanımına göre; 0° yönlenme için %397 artışla 522 MPa, 90° yönlenen için %18 azalmayla 86 MPa, 0/90 için %303 artışla 424 MPa değerindedir.



Şekil 4.29. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri

Eğilme modülleri ise sırasıyla 13300, 3510 ve 10500 MPa değerindedir. 3210 MPa olan saf epoksinin eğilme modülüne göre sırasıyla; %314 artış, %9 azalma ve %227 artış gerçekleşmektedir.

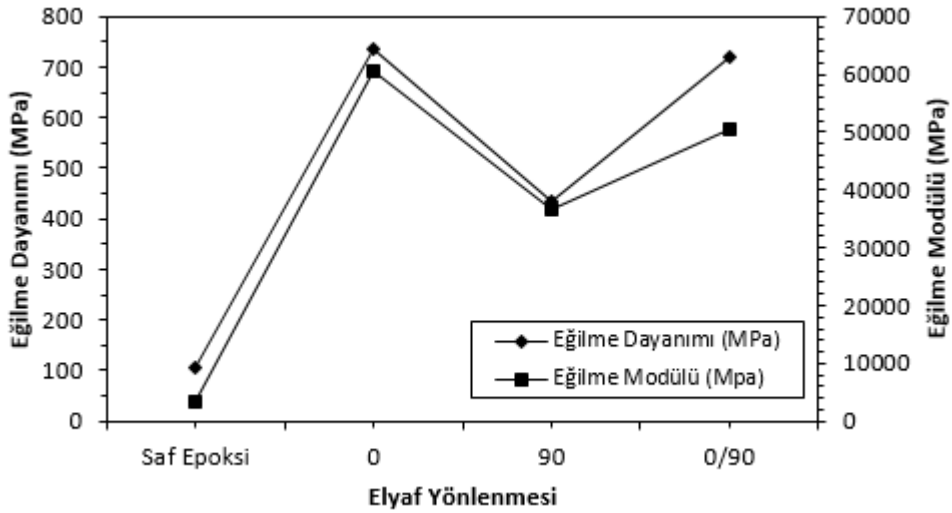
Şekil 4.30'da karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.30. Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri

Eğilme gerilmesi eğrilerine bakıldığında 0° yönlene ve 0/90 yönlene kompozitlerin eğilme davranışları birbirlerine çok yakındır. 90° yönlene kompozitlerde ise saf epoksiden fazla olmakla beraber daha düşük eğilme performansı gözlenmektedir. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin saf epoksiye göre eğilme dayanımı bakımından çok daha üstün olduğu görülmektedir.

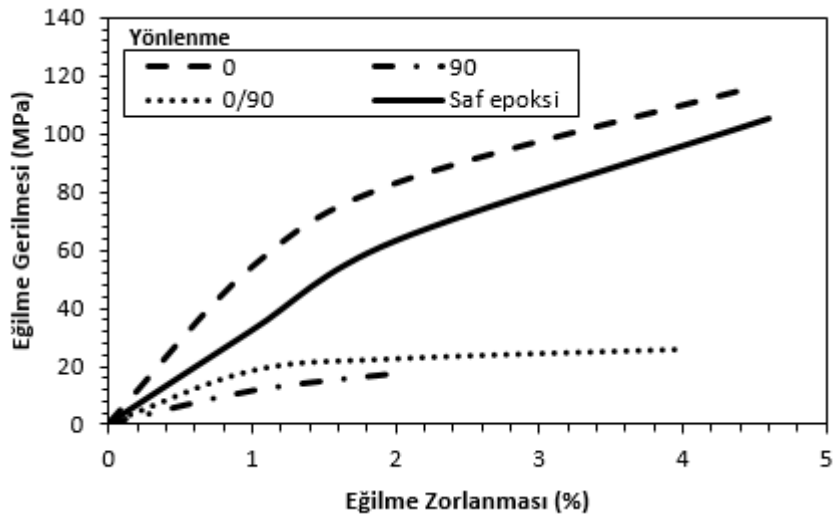
Şekil 4.31’de karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.31. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri

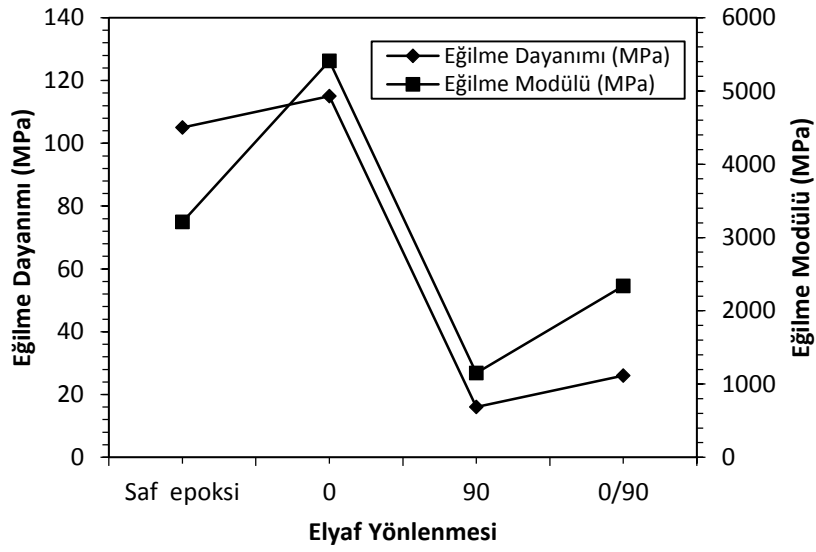
Kompozitlerin eğilme dayanımlarına bakıldığında 0° yönlene için 736 MPa, 90° için 436 MPa ve 0/90 yönlene kompozitler için 720 MPa değerindedir. Saf epoksiyle karşılaştırıldığında sırasıyla; %600, %315, %585 gibi çok yüksek oranlarda iyileşme gerçekleşti. Eğilme modülleri ise sırasıyla %1786’lık artışla 60550 MPa, %1037’lik artışla 36500 MPa ve %1470’lik artışla 50400 MPa’ dır.

Şekil 4.32’de keten iplik takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri görülmektedir. Eğilme gerilmesi eğrilerine bakıldığında 0° yönlene ve saf epoksi birbirlerine yakın profiller izlemektedir. En düşük performans 90° yönlene kompozitlerde olup bunu 0/90 izlemektedir.



Şekil 4.32. Keten iplik takviyeli epoksi kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri

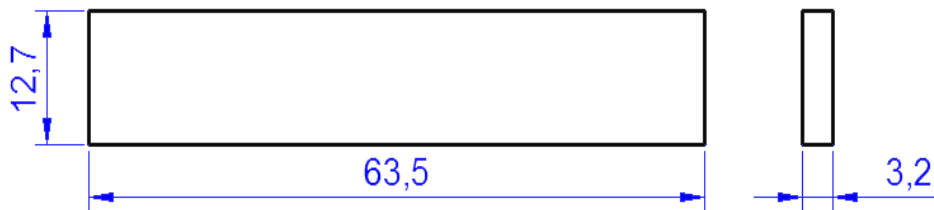
Şekil 4.33'te keten iplik takviyeli kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri görülmektedir. Kompozitlerin eğilme dayanımlarına bakıldığında 0° yönlenen için 115 MPa, 90° için 16 MPa ve 0/90 yönlenen kompozitler için 26 MPa değerindedir. Saf epoksinin eğilme dayanımıyla karşılaştırıldığında sırasıyla; %9 artış, %84 düşüş ve %75'lik düşüş meydana geldi. Eğilme modülleri ise sırasıyla %68 oranında artarak 5410 MPa, %64 oranında azalarak 1150 MPa ve %27 oranında azalarak 2340 MPa değerlerinde ölçülmüştür.



Şekil 4.33. Keten iplik takviyeli kompozitlerin yönlenmeye göre eğilme dayanımı, eğilme modülü eğrileri

4.2.3. Darbe deneyleri

Darbe deneyleri AOB marka test cihazında ASTM D4812-11 [80] standardına göre yapılmıştır. Deneylerde numuneler Izod'a göre yani dikey olarak konumlandırılmıştır. Her deney için beş tekrar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.34'te darbe numunesinin boyutları görülmektedir. Başlangıçta en düşük enerjili çekiçle deneme yapılmıştır. Eğer bu çekiç numuneyi kırmıyorsa bir üst enerjiye sahip çekiçle tekrar deneme gerçekleştirilmiştir. Darbe enerjisi potansiyel enerji farkından hesaplanmıştır.

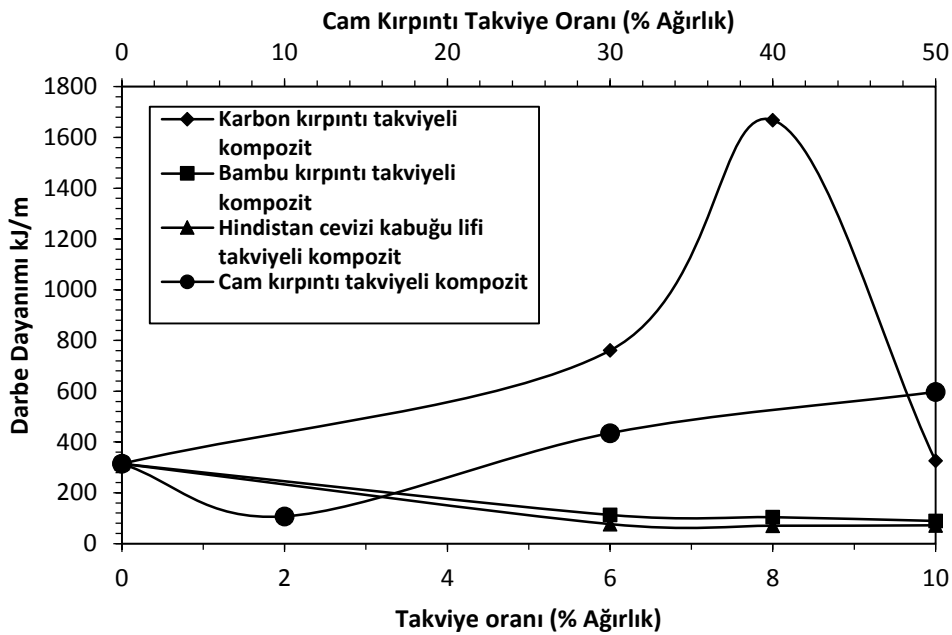


Şekil 4.34. Darbe numunesi boyutları

Kırpıntı takviyeli kompozitlerde ve keten iplik takviyeli kompozitlerde 5,5 J enerjili çekiçle deneyler gerçekleştirilmiştir. Karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin 0° ve 0/90 yönlenmeli durumlarında 22 J enerjili çekiç kullanılırken, 90° yönlenmeli numunelerde 5,5 J enerjiye sahip çekiç kullanılmıştır.

4.2.3.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin darbe deneyleri

Şekil 4.35'te kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına karşılık darbe dayanımı değerleri görülmektedir. Eğriden de görüldüğü üzere bambu takviye oranı arttıkça darbe dayanımında azalma meydana gelmektedir. Saf epoksinin darbe dayanımı 314,313 J/m değerinde iken, %6 bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerde %64 oranında düşüşle 112,773 J/m, %8 takviyelilerde %67 oranında düşüşle 103,938 J/m ve %10 takviyelilerde %71 oranında düşüşle 89,062 J/m değerindedir.



Şekil 4.35. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin darbe dayanımları

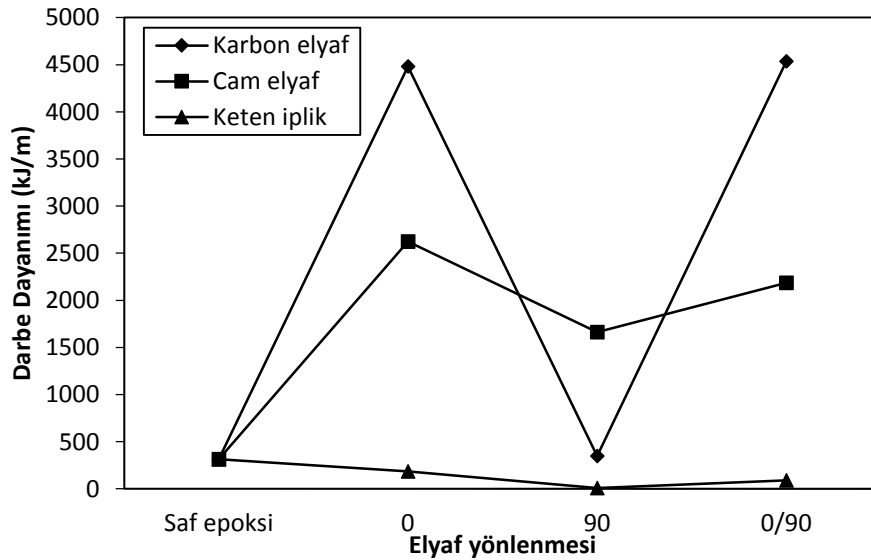
Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin darbe deneyi eğrilerine bakıldığında; saf epoksinin darbe dayanımı 314,313 J/m değerinde iken, %75'lik düşüşle %6 hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerde 76,585 J/m, %8 takviyelilerde %77 oranında düşüşle 71,875 J/m ve %10 takviyelilerde %78'lik düşüşle 70,343 J/m değerindedir. Görüldüğü gibi değerler birbirine yakın olmakla birlikte en yüksek darbe dayanımı %6 takviyeli kompozitlerde gerçekleşti. Saf epoksinin hindistan cevizi kabuğu lifi ile takviyelendirilmesiyle orantılı olarak darbe dayanımının düşmesine sebep olduğu görülmektedir.

Cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin darbe deney eğrilerine bakıldığında; saf epoksida 314,313 J/m olan darbe dayanımı, %10 takviyeli kompozitlerde 107,062 J/m değerine düşerken, %30 takviyeyle %38 oranında artarak 435,073 J/m'ye, %50 takviyede ise %90 oranında artarak 597,390 J/m değerine yükselmektedir.

Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin darbe deney eğrilerine bakıldığında; %6 karbon kırpıntı takviyesi 314,313 J/m olan epoksinin darbe dayanımını %142 oranıyla 760,734 J/m'ye arttırmaktadır. %8 takviyede ise en yüksek darbe dayanımı %430 oranında artışla 1668,5 J/m değeriyle elde edilmektedir. %10 takviyede ise %3 oranında artan dayanım 326,156 J/m değerinde olmakla kayda değer bir artış göstermemektedir. Bu da tıpkı çekme ve eğme dayanımlarında olduğu gibi takviyede optimum değer aşıldığı ve epoksinin bağlayıcılığının yetersiz kaldığını göstermektedir.

4.2.3.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin darbe deneyleri

Şekil 4.36'da elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenmeye karşılık darbe dayanımı değerleri görülmektedir.



Şekil 4.36. Elyaf takviyeli kompozitlerin darbe dayanımları

Cam elyaf takviyeli kompozitlerde saf epoksinin performansı ile karşılaştırıldığında; 0° için darbe dayanımı %735'lik artışla 2624,219 J/m, 90° için %429'luk artışla 1663,657 J/m, 0/90 için %595'lik artışla 2185,289 J/m değerindedir. Görüldüğü üzere eğilme ve çekme dayanımlarına benzer şekilde en iyi performans 0° yönlenmeli kompozitlerde, en düşük performans ise 90° yönlenmeli kompozitlerde elde edilmiştir.

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde darbe dayanımları 0° için %1326'lık artışla 4481,25 J/m, 90° için %11'lik artışla 349,617 J/m, 0/90 yönlenme için %1342'lik artışla 4534,667 J/m değerindedir. Bu kez en iyi dayanım 0/90 yönlenmeli kompozitlerde görülmektedir.

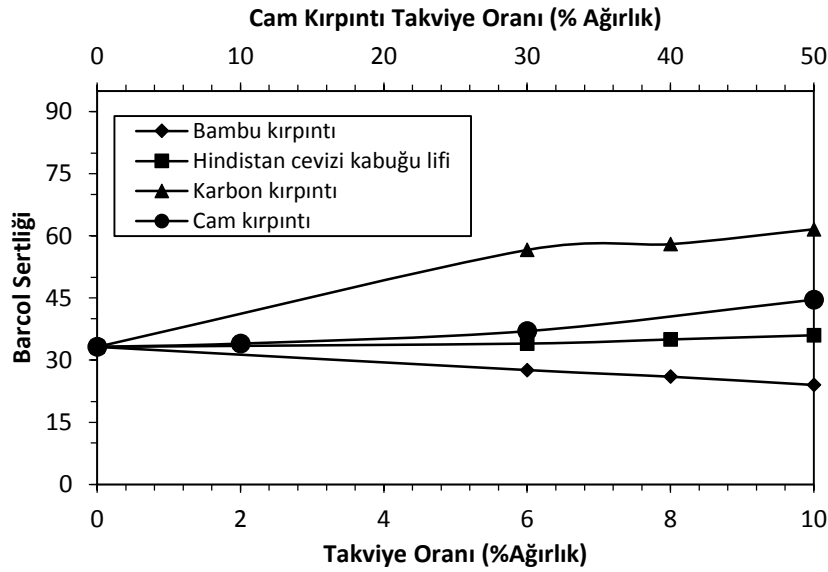
Keten iplik takviyeli kompozitlerde darbe dayanımları saf epoksinin altında kalmakla beraber, 0° için %40 oranında azalma 186,437 J/m, 90° için %97 oranında azalma 10,06 J/m ve 0/90 için %71 oranında azalmayla 90,875 J/m değerindedir. Kendi içinde en iyi dayanım 0° yönlenmeli kompozitlerde izlendi.

4.2.4. Sertlik deneyleri

Malzemelerin sertliği ASTM D-2583 [81] standardına göre Barcol sertlik cihazıyla SUBOR Boru San. ve Tic. A.Ş.'de ölçüldü. Ölçümlerde 5 tekrar yapılarak ortalaması alınmıştır.

4.2.4.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin sertlik deneyleri

Şekil 4.37'de kırpıntı takviyeli kompozitlerin katkı oranına göre sertlik değerleri görülmektedir. Bambu kırpıntı takviyesiyle sertlik azalma eğilimine girmektedir. Saf epoksinin 33,2 olan sertlik değerinin %6 bambu takviyesiyle %16 düşüşle 27,6 değerinde, %8 takviyeyle %21 düşüşle 26 değerinde, %10 takviyeyle %27 düşüşle 24 değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.37. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin sertlik değerleri

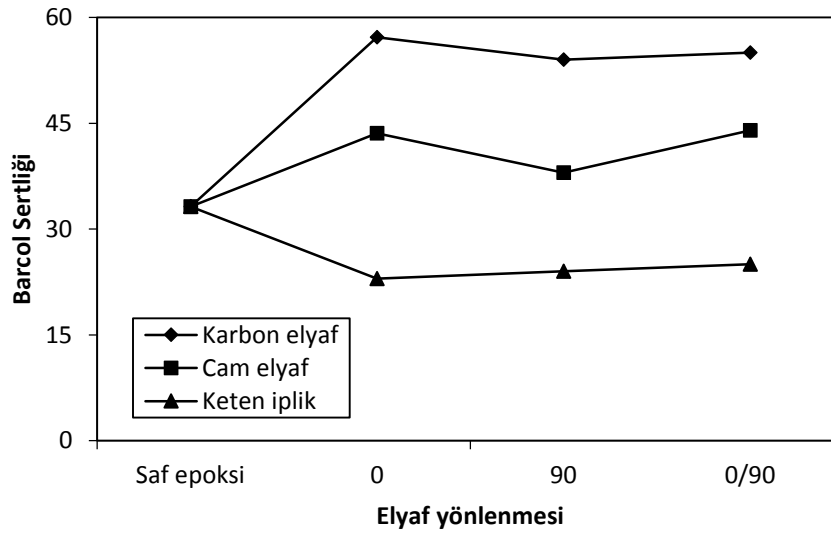
Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyesiyle sertlik değerinde fazla bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Sertliğin, %6 hindistan cevizi kabuğu lifi takviyesiyle %2 artışla 34 değerinde, %8 takviyeyle %5 artışla 35 değerinde %10 takviyeyle %8 artışla 36 değerinde olduğu görülmektedir. Takviye oranı arttıkça sertlik te artmaktadır.

Karbon kırpıntı takviyesi arttıkça sertliğin artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Sertliğin, %6 karbon kırpıntı takviyesiyle %70 artışla 56,6 değerinde, %8 takviyeyle %74 artışla 58 değerinde %10 takviyeyle %85 artışla 61,6 değerinde olduğu görülmektedir.

Cam kırpıntı oranı arttıkça sertliğin artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Sertliğin, %10 cam kırpıntı takviyesiyle %2 artışla 34 değerinde, %30 takviyeyle %11 artışla 37 değerinde, %50 takviyeyle %34 artışla 44,6 değerinde olduğu görülmektedir.

4.2.4.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin sertlik deneyleri

Şekil 4.38'de elyaf takviyeli kompozitlerin yönlenmeye göre sertlik değerleri görülmektedir. Cam elyafta sertliğin, 0° yönlene kompozitlerde %31 artışla 43,6 değerinde, 90° yönlene kompozitlerde %14 artışla 38 değerinde, 0/90 yönlene kompozitlerde %32 artışla 44 değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.38. Elyaf takviyeli kompozitlerin sertlik değerleri

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde sertliğin, 0° yönlene kompozitlerde %72 artışla 57,2 değerinde, 90° yönlene kompozitlerde %62 artışla 54 değerinde, 0/90 yönlene kompozitlerde %65 artışla 55 değerinde olduğu görülmektedir.

Keten iplik takviyeli kompozitlerde sertliğin, 0° yönlene kompozitlerde %30 düşüşle 23 değerinde, 90° yönlene kompozitlerde %27 düşüşle 24 değerinde, 0/90 yönlene kompozitlerde %24 düşüşle 25 değerinde olduğu görülmektedir.

4.3. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri

Sürtünme ve aşınma deneyleri pin disk aşınma cihazında ASTM G99 [82] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.39'da aşınma numuneleri görülmektedir. Disk malzemesi olarak 60 HRC sertliğinde EN 19 çelik disk kullanılmıştır. Deney öncesi numune yüzeyi zımpara ile parlatılarak diskle tam olarak temas sağlanmıştır. Ayrıca disk ve pin yüzeyi asetonla temizlendi. Her deney en az üç kez tekrar edilerek ortalama değerler alınmıştır.



Şekil 4.39. Örnek aşınma numuneleri

Deneyle Taguchi'nin L9 ortogonal dizisine göre tasarlanmıştır. Yalnızca saf epokside üçüncü parametre olmadığından yani katkı oranı sabit olduğundan dizin kullanılmadı. Tablo 4.3'te A, B, C faktörler, 1, 2, 3 seviyeler olmak üzere örnek bir L9 ortogonal dizinin tablosu görülmektedir.

Tablo 4.3. Taguchi'ye göre L9 ortogonal dizini

Deney numarası	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Tasarım parametresi olarak hız, yük, yönlenme ya da katkı oranı kullanılmıştır. Her bir parametre için üç farklı seviye belirlendi. Analizlerde Taguchi'nin sinyal/gürültü oranında "en küçük en iyi" kriteri kullanılmıştır. Analizler %90 güven aralığında gerçekleştirilmiştir.

Deneyle sabit 1000 m kayma mesafesinde, 0,6, 0,8, 1 m/s hızlarında ve 20, 30, 40 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Deneyle normal oda şartlarında yapılarak, deney esnasında disk yüzeyinden kızılötesi termometre ile sıcaklık değişimi alınarak bilgisayar aracılığı ile kaydedilmiştir. Ayrıca pin yüzeyinden de belirli aralıklarla

sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Şekil 4.40'ta deneylerin gerçekleştirildiği pin-disk aşınma cihazının resmi görülmektedir.



Şekil 4.40. Çalışmada kullanılan pin-disk aşınma cihazı

Pin numuneler, deney öncesi ve sonrasında $\pm 0,1$ mg hassasiyetinde Radwag marka terazide tartılarak ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Ayrıca aynı teraziyle numunelerin kuru ve saf sudaki ağırlıklarına göre yoğunluk ölçümü denklem 4.6'ya göre gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.4'te kompozit numunelerin bulk (yığınsal) yoğunlukları görülmektedir.

$$\rho = m_{kuru} / (m_{kuru} - m_{yaş}) \quad (4.6)$$

Burada, ρ yoğunluk (gr/cm^3), m_{kuru} (gr) havadaki kütle, $m_{yaş}$ (gr) saf su içindeki kütle olmaktadır.

Elde edilen bu verilerle denklem 4.7 aracılığı ile aşınma oranı hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma oranı} = \frac{\Delta m}{\rho S} \quad [\text{mm}^3/\text{m}] \quad (4.7)$$

Burada ağırlık kaybı Δm (gr), ρ yoğunluk (gr/cm^3), S kayma mesafesi (m)'dir.

Tablo 4.4. Deneş malzemelerinin bulk (yığınsal) yoğunlukları

Numune çeşidi	Yoğunluk (gr/cm ³)
Saf epoksi	1,165
%6 Karbon kırpıntı katkılı epoksi kompozit	1,023
%8 Karbon kırpıntı katkılı epoksi kompozit	1,141
%10 Karbon kırpıntı katkılı epoksi kompozit	1,188
%6 Bambu kırpıntı katkılı epoksi kompozit	1,142
%8 Bambu kırpıntı katkılı epoksi kompozit	1,089
%10 Bambu kırpıntı katkılı epoksi kompozit	1,058
%6 Hindistan cevizi kabuğı lifi katkılı epoksi kompozit	1,140
%8 Hindistan cevizi kabuğı lifi katkılı epoksi kompozit	1,142
%10 Hindistan cevizi kabuğı lifi katkılı epoksi kompozit	1,130
%10 Cam kırpıntı katkılı epoksi kompozit	1,189
%30 Cam kırpıntı katkılı epoksi kompozit	1,312
%50 Cam kırpıntı katkılı epoksi kompozit	1,465
0° Tek yönlü karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit	1,334
90° Tek yönlü karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit	1,334
0° /90° Çok yönlü karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit	1,214
0° Tek yönlü cam elyaf takviyeli epoksi kompozit	1,43
90° Tek yönlü cam elyaf takviyeli epoksi kompozit	1,43
0° /90° Çok yönlü cam elyaf takviyeli epoksi kompozit	1,42
0° Tek yönlü keten iplik takviyeli epoksi kompozit	1,2
90° Tek yönlü keten iplik takviyeli epoksi kompozit	1,2
0° /90° Çok yönlü keten iplik takviyeli epoksi kompozit	1,1

4.3.1. Kırpıntı takviyeli kompozitler

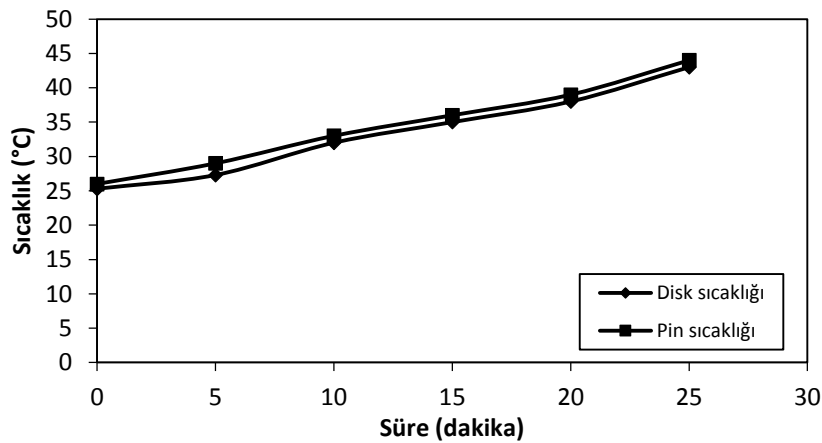
4.3.1.1. Saf epoksi

Öncelikle saf epoksiye ait deneyler yapılmıştır. Deneş sonuçları ve sinyal gürültü oranları tablo 4.5'te görölmektedir. Deneşler 27 °C-30 °C sıcaklık aralığında ve %65-%85 nem koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlardan da görüleceğı gibi daha düşük hız ve yük altında yapılan deneylerde aşınma oranı daha düşük değerlerde ölçüldü. Buna karşılık sürtünme katsayısı artan yük ve hızla azalma gösterdi. Bunun nedeni sürtünmeyle ısınan yüzeyin yağlayıcı etkisi göstermesidir.

Tablo 4.5. Saf epoksiye ait deneysel sonuçlar

Yük (N)	Hız(m/s)	Aşınma Oranı(mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı
20	0,6	0,024460	1,08297
20	0,8	0,066300	1,12041
20	1,0	0,105307	0,94457
30	0,6	0,138221	0,86819
30	0,8	0,157060	0,79195
30	1,0	0,234303	0,82225
40	0,6	0,268075	0,80953
40	0,8	0,349566	0,84123
40	1,0	0,351626	0,77139

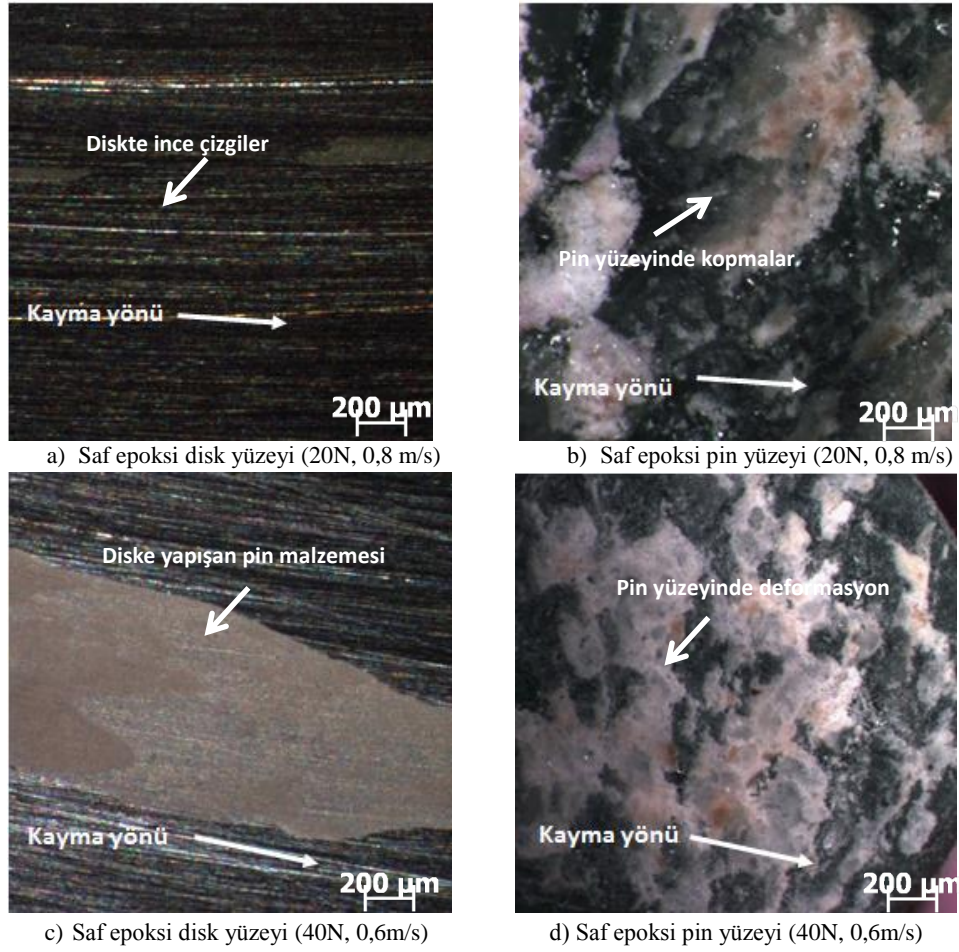
Şekil 4.41’de saf epoksi deneylerinde ölçülen disk ve pin sıcaklık değişimleri verilmektedir. Diskte ölçülen sıcaklık değişimi 17,7 °C pinde ölçülen sıcaklık değişimi ise 18 °C’dir. Bu yüksek sıcaklık değişimleri de pinin ısınarak yumuşamasına ve görüldüğü gibi sonra da koparak diske yapışmasına sebep olmaktadır (Şekil 4.42c). Bu nedenle de yüksek sürtünme katsayıları ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.41. Saf epoksi deneylerinde sıcaklık değişimi

Saf epoksinin tribolojik performansına bakıldığında mekanik deneylerde olduğu gibi düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Bu nedenle farklı katkıları ilave edilerek oluşturulan kompozitlerle tribolojik dayanım artırılmaya çalışılmıştır.

Şekil 4.42’de saf epoksiye ait disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.42a’da 20N yük ve 0,8 m/s hız altında disk yüzeyinde kayma yönünde oluşan ince çizgiler görülmektedir. Şekil 4.42b’de 20N yük ve 0,8 m/s hız altında pin yüzeylerinde kopmalar izlenmektedir.



Şekil 4.42. Saf epoksi disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

Artan yükte beraber kopan pin parçalarının disk ve pin arasında kalarak disk yüzeyine yapışmanın meydana geldiği şekil 4.42c'de 40N yük ve 0,6 m/s hız altında görülmektedir. Şekil 4.42d'de aşınan pin yüzeyi 40N yük ve 0,6 m/s hız altında görülmektedir. Pin yüzeyindeki deformasyon şiddetli aşınmanın kanıtıdır. Saf epoksi deneylerinde genel olarak abrasif aşınma mekanizmaları izlenmiştir. Bu durumu ölçülen yüksek aşınma oranları da desteklemektedir.

Ayrıca sıcaklık artışıyla yumuşayarak pinden kopan parçacıklar disk yüzeyine yapışarak adhezif aşınmaya sebep olarak, diskin pürüzlenmesine ve sürtünme katsayılarının artmasına neden olmaktadır. Bu sonucu disk ve pin yüzeyinden alınan ve şekil 4.41'de gösterilen sıcaklık ölçümleri de desteklemektedir. Ölçümlerde yüksek sıcaklık değerlerine rastlanmıştır.

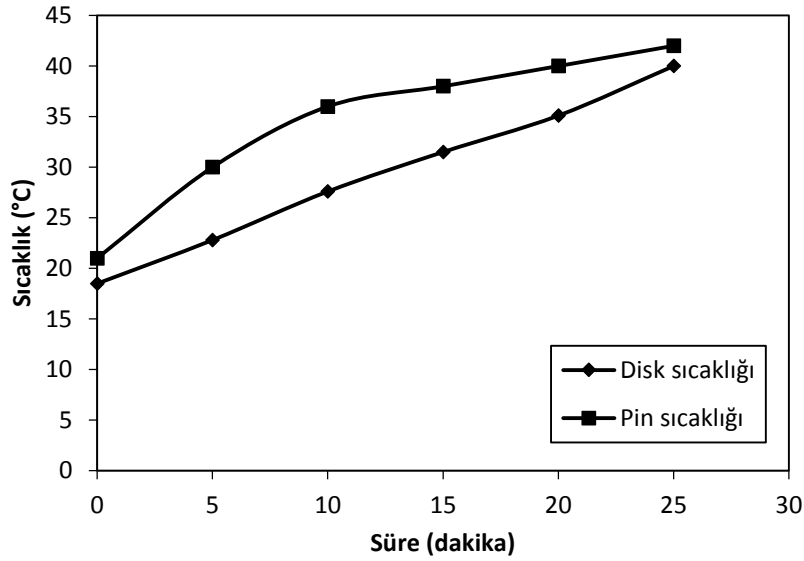
4.3.1.2. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitler

Tablo 4.6’da bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait Taguchi L9 ortogonal dizinine göre planlanan pin on disk deneylerinden elde edilen aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Deneyler 20 °C-25 °C sıcaklık aralığında ve %30-%50 nem koşullarında gerçekleştirilmiştir. Genel olarak tablo değerleri karşılaştırıldığında, saf epoksiye bambu kırpıntı takviyesinin aşınma oranını düşürdüğünü ancak sürtünme katsayısı üzerinde fazla değişikliğe sebep olmadığı görülmektedir.

Tablo 4.6. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar

Yük (N)	Hız (m/s)	Katkı (%)	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı
20	0,6	6	0,003108	0,870364
20	0,8	8	0,001422	0,824852
20	1	10	0,002111	0,791369
30	0,6	8	0,094733	0,970903
30	0,8	10	0,107786	0,98017
30	1	6	0,168165	0,923824
40	0,6	10	0,069747	1,061386
40	0,8	6	0,195905	1,102588
40	1	8	0,163836	1,140232

Şekil 4.43’te bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin deneylerinde ölçülen disk ve pin sıcaklık değişimleri verilmektedir.

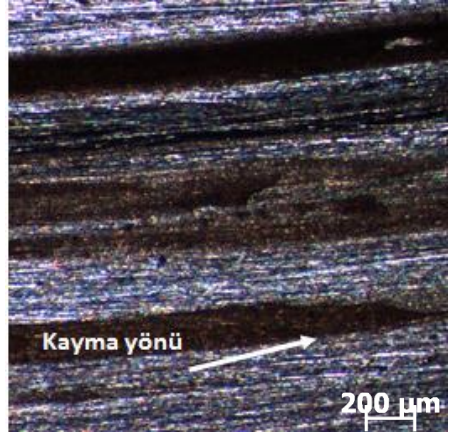


Şekil 4.43. Bambu kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi

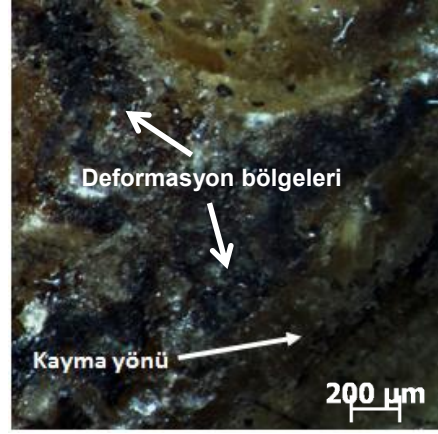
Diskte ölçülen sıcaklık değişimi 21,5 °C pinde ölçülen sıcaklık değişimi ise 20 °C'dir. Bu yüksek sıcaklık değişimleri de pinin ısınarak yumuşamasına ve görüldüğü gibi sonra da koparak diske yapışmasına sebep olmaktadır (şekil 4.44c). Bu nedenle de yüksek sürtünme katsayıları ortaya çıkmaktadır.

Saf epoksiyle karşılaştırıldığında bambu kompozitlerin tribolojik performansının çok ta iyi olmadığı görülmektedir. Saf epoksiye bambu kırpıntı takviyesi aşınma oranını iyileştirirken sürtünme katsayısında etkili olamamaktadır. Mekanik deneylerde de bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin saf epoksiden daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştü (Şekil 4.5, 4.20, 4.35,4.42). Yani bambu kırpıntı takviyesiyle hem mekanik hem de tribolojik dayanım düşmektedir.

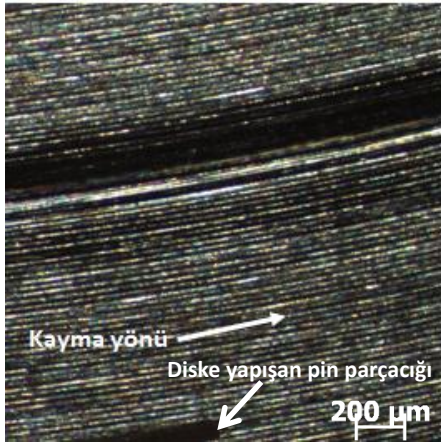
Şekil 4.44'te bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin aşınan disk ve pin yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri görülmektedir.



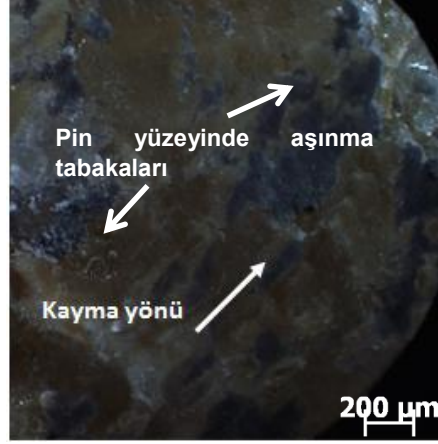
a) %10 bambu takviyeli disk yüzeyi (20N, 1m/s)



b) %10 bambu takviyeli pin yüzeyi (20N, 1m/s)



c) %6 bambu takviyeli disk yüzeyi (40N, 0,8m/s)



d) %6 bambu takviyeli pin yüzeyi (40N, 0,8m/s)

Şekil 4.44. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.44a'da 20 N yük ve 1 m/s hız altında %10 takviyeli kompozitle yapılan deneyin disk yüzeyi, şekil 4.44b'de ise pin yüzeyi görülmektedir. Şekil 4.44c'de 40 N yük ve 0,8 m/s hız altında %6 takviyeli kompozitle yapılan deneyin disk yüzeyi, şekil 4.44d'de ise aşınma tabakalarına sahip pin yüzeyi görülmektedir. Artan hızla pin ve disk yüzeyindeki deformasyonun arttığı görülmektedir. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin tribolojik deneylerinde izlenen genel mekanizma abrazyif aşınma şeklindedir. Matrisle iyi bağ kurulamadığından pinden kopan parçacıklar abrazyif etkiye neden olmaktadır. Ayrıca saf epoksiye benzer şekilde yüksek sıcaklık sonucu kopan pin parçalarının diske yapışmasıyla adhesif mekanizma ortaya çıkmasına ve yüksek sürtünme katsayılarının oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 4.44c). Deney sırasında alınan sıcaklık ölçümleri şekil 4.43'te verilmektedir.

4.3.1.3. Cam kırpıntı takviyeli kompozitler

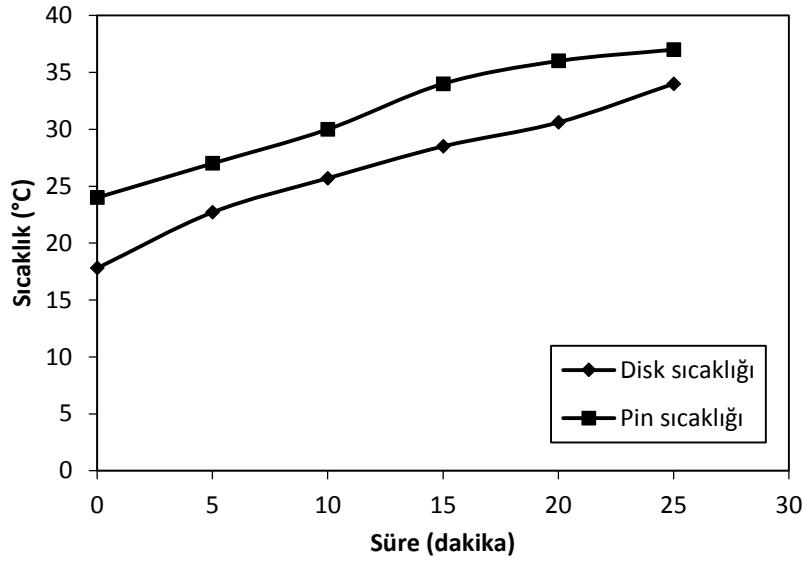
Tablo 4.7’de cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait Taguchi L9 ortogonal dizinine göre planlanan pin on disk deneylerinden elde edilen aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir.

Tablo 4.7. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar

Yük (N)	Hız (m/s)	Katkı (%)	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı
20	0,6	10	0,000631	0,560991
20	0,8	30	0,001448	0,656483
20	1	50	0,001364	0,6539
30	0,6	30	0,002134	0,690694
30	0,8	50	0,004161	0,746665
30	1	10	0,144947	0,809627
40	0,6	50	0,004571	0,705915
40	0,8	10	0,113334	0,832416
40	1	30	0,087775	0,848626

Deneyler 18 °C-22 °C sıcaklık aralığında ve %30-%60 nem koşullarında gerçekleştirilmiştir. Tablo değerleri karşılaştırıldığında, saf epoksiye takviye edilen cam kırpıntı sayesinde tribolojik özelliklerin iyileştiği yani aşınma oranı ve sürtünme katsayılarının düştüğü gözlenmektedir.

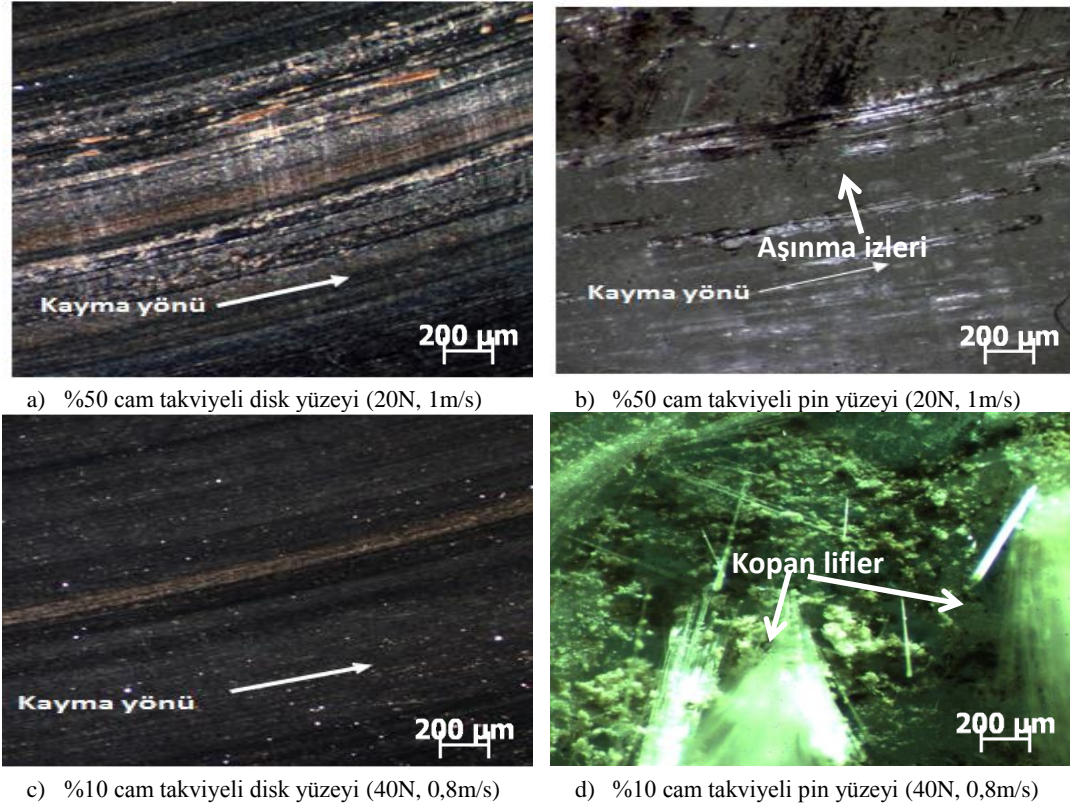
Şekil 4.45’te cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin deneylerinde ölçülen disk ve pin sıcaklık değişimleri verilmektedir. Diskte ölçülen sıcaklık değişimi 16,2 °C pinde ölçülen sıcaklık değişimi ise 13 °C’dir. Saf epoksiye nazaran daha düşük sıcaklık farkları ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle de sürtünme katsayısında düşüş izlenmektedir.



Şekil 4.45. Cam kırpıntı kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi

Saf epoksiyle karşılaştırıldığında cam kırpıntı takviyesiyle aşınma oranı ve sürtünme katsayılarının düştüğü yani tribolojik performansın iyileştiği söylenebilmektedir. Mekanik performans açısından ise fazla bir iyileştirme söz konusu değildir.

Şekil 4.46'da cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.46a'da %50 cam kırpıntılı kompozitin 20 N yük ve 1 m/s hız altında disk yüzeyi, b'de ise pin yüzeyi görülmektedir. Hız arttıkça ve sıcaklığın artmasına da bağlı olarak ta aşınan yüzeylerin daha belirginleştiği ve kayma yönüne paralel izlerin oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.46c'de %10 cam kırpıntılı kompozitin 40 N yük ve 0,8 m/s hız altında disk yüzeyi, d'de ise pin yüzeyi görülmektedir. %10 takviyede aşınma sonucu liflerin koptuğu gözlenmektedir. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin aşınma mekanizması çoğunlukla adheziv olmakla beraber abrasif mekanizmalar da görülmüştür.



Şekil 4.46. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

4.3.1.4. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitler

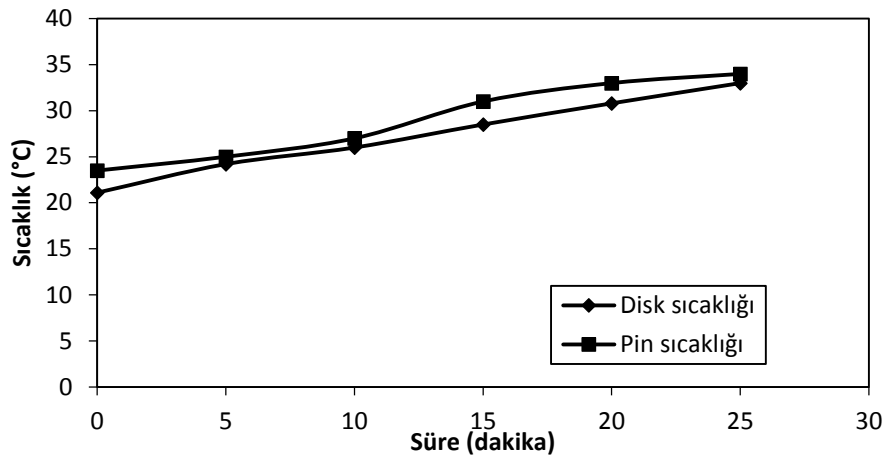
Tablo 4.8’de karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait Taguchi L9 ortogonal dizinine göre planlanan pin on disk deneylerinden elde edilen aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir.

Tablo 4.8. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar

Yük (N)	Hız (m/s)	Katkı (%)	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı
20	0,6	6	0,0034203	0,54164
20	0,8	8	0,0028484	0,63912
20	1	10	0,0037434	0,63213
30	0,6	8	0,00539	0,64702
30	0,8	10	0,0055941	0,62312
30	1	6	0,0046418	0,67618
40	0,6	10	0,0071924	0,699175
40	0,8	6	0,0080133	0,75365
40	1	8	0,0085013	0,77592

Deneyleer 19 °C-25 °C sıcaklık aralığında ve %50-%60 nem koşullarında gerçekleştirilmiştir. Tablo değerlerine bakıldığında, saf epoksiye karbon kırpıntı takviyesiyle tribolojik özelliklerin iyileştiği görölmektedir.

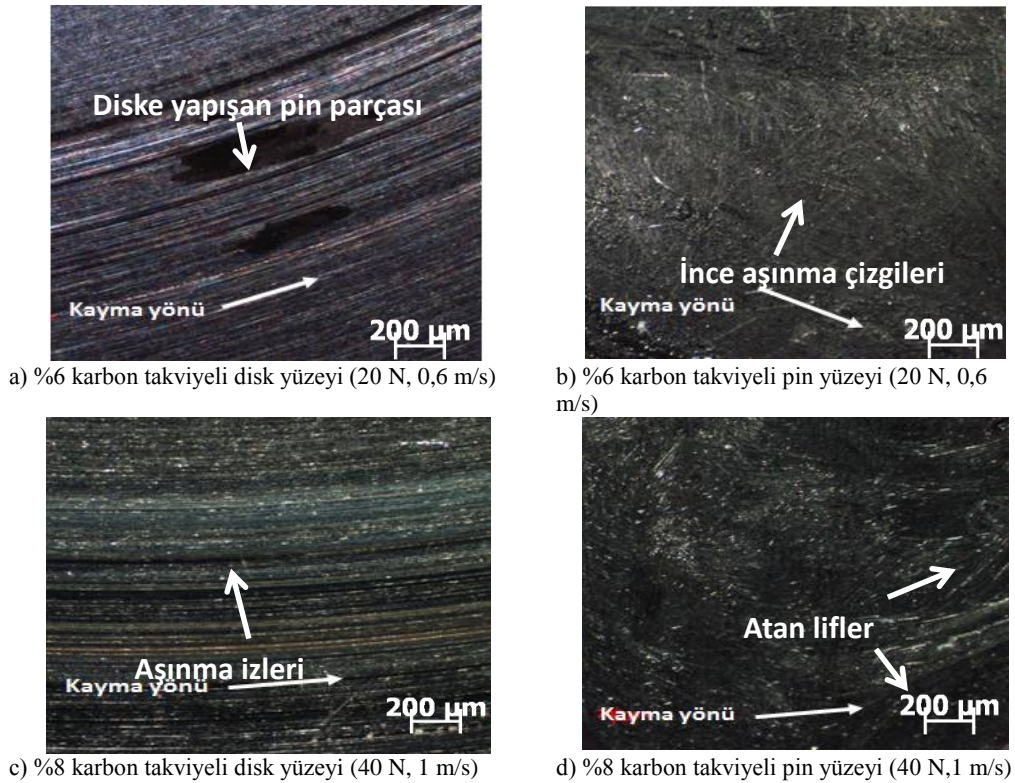
Şekil 4.47’de karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin deneylerinde ölçölen disk ve pin sıcaklık değışimleri verilmektedir. Diskte ölçölen sıcaklık değışimi 11,9 °C pinde ölçölen sıcaklık değışimi ise 10,5 °C’dir. Saf epoksiye nazaran daha düşük sıcaklık farkları ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle de sürtünme katsayısında düşüş izlenmektedir.



Şekil 4.47. Karbon kırpıntı kompozit deneylerinde sıcaklık değışimi

Saf epoksiyle karşılaştırıldığında karbon kırpıntı takviyesiyle aşınma oranı ve sürtünme katsayılarının düştüğü yani tribolojik performansın iyileştiği söylenebilmektedir. Benzer sonuçlar mekanik performansta da ortaya çıkmaktadır.

Şekil 4.48’de karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin aşınan disk ve pin yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri görölmektedir.



Şekil 4.48. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.48a'da %6 takviye 20 N yük ve 0,6 m/s hız altında kopan pin parçasının diske transferi görülmektedir. Şekil 4.48b'de ise aynı şartlar altında pin yüzeyinde kayma yönüne paralel ince aşınma çizgileri görülmektedir. Şekil 4.48c'de %8 karbon kırpıntı takviye, 40 N yük ve 1 m/s hız altında aşınma izlerine sahip disk yüzeyi ve şekil 4.48d'de pin yüzeyi görülmektedir. Pin yüzeyinde aşınma sonucu atan lifler gözlenmektedir. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerde izlenen genel aşınma mekanizması adhezif mekanizmadır.

4.3.1.5. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitler

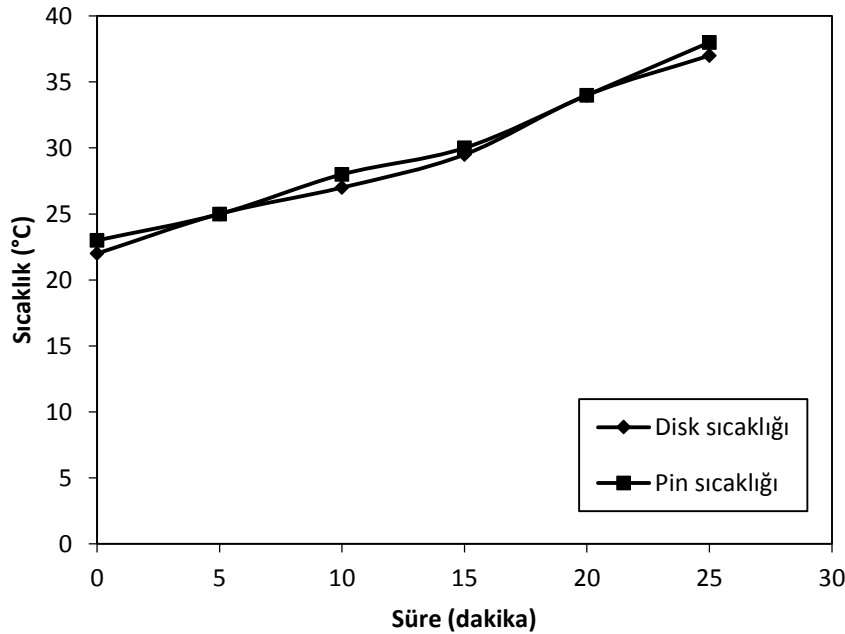
Tablo 4.9'da hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait Taguchi L9 ortogonal dizinine göre planlanan pin on disk deneylerinden elde edilen aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Deneyler 27 °C-30 °C sıcaklık aralığında ve %65-%75 nem koşullarında gerçekleştirilmiştir. Tablo değerlerine bakıldığında saf epoksiye eklenen hindistan cevizi kabuğu lifi tribolojik özellikleri çok

fazla iyileştirmemektedir. Genel olarak özellikle sürtünme katsayılarında yükselme gözlenmektedir. Aşınma oranı değerlerinde ise düşüş izlenmektedir.

Tablo 4.9. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar

Yük (N)	Hız (m/s)	Katkı (%)	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı
20	0,6	6	0,06953	1,109
20	0,8	8	0,13082	1,1209
20	1	10	0,08062	1,13152
30	0,6	8	0,1286	1,02185
30	0,8	10	0,09832	1,02269
30	1	6	0,14146	1,01525
40	0,6	10	0,15836	0,84456
40	0,8	6	0,19702	0,83623
40	1	8	0,20807	0,89917

Şekil 4.49’da hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin deneylerinde ölçülen disk ve pin sıcaklık değişimleri verilmektedir.

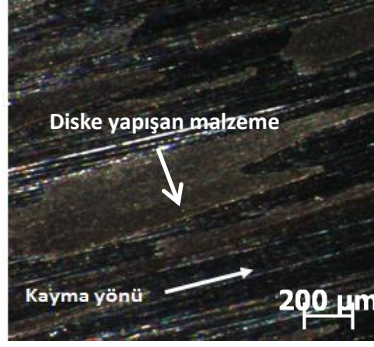


Şekil 4.49. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi

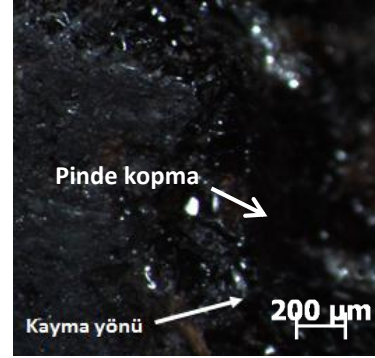
Diskte ölçülen sıcaklık değişimi 15 °C pinde ölçülen sıcaklık değişimi ise 15 °C’dir. Saf epoksiye yakın sıcaklık farkları ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle de saf epoksiye

benzer şekilde pinde sıcaklıkla yumuşama ve eriyerek diske yapışma meydana gelmektedir (şekil 4.50a). Bu da yüksek sürtünme katsayılarına sebep olmaktadır. Saf epoksiyle karşılaştırıldığında hindistan cevizi kabuğu lifi takviyesiyle aşınma oranı ve sürtünme katsayılarında fazla değişiklik olmadığı yani tribolojik performansın etkilenmediği söylenebilmektedir. Ölçülen değerler birbirine yakındır. Bu nedenle hindistan cevizi kabuğu lifi takviyesi mekanik dayanımda olduğu gibi tribolojik olarak ta iyileştirme sağlamamaktadır.

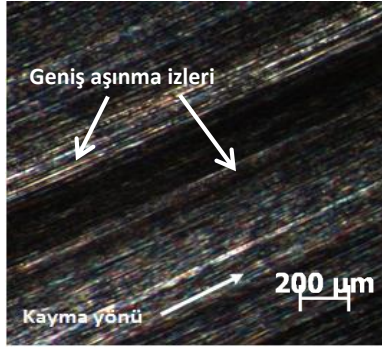
Şekil 4.50'de hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin aşınan disk ve pin yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.50a'da %8 takviyeli 20 N yük ve 0,8 m/s hız altında disk yüzeyi görülmektedir. Şekil 4.50b'de ise aynı şartlar altında pin yüzeyi görülmektedir. Şekil 4.50a'da diske yapışan pin malzemesi görülmektedir bu da pinin kaymasını zorlaştırarak, sürtünme katsayısının yükselmesine neden olmaktadır. Disk üzerindeki izlerden şiddetli aşınmanın olduğu görülmektedir. Ayrıca şekil 4.50b'de pin yüzeylerindeki kopmalardan aşınma kaybının yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.50c'de %8 takviyeli 40 N yük ve 0,6 m/s hız altında kayma yönünde geniş aşınma izlerine sahip disk yüzeyi, 4.50d'de pin yüzeyi görülmektedir. Genel olarak saf epoksi ve bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerde elde edilen görüntülere benzer görüntüler görülmektedir. Zaten bu üç malzemenin de tablo değerleri birbirine yakın değerlerdedir. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerde görülen genel mekanizma abrazif mekanizmadır. Bunun yanısıra adhezif mekanizmaya da rastlanmaktadır.



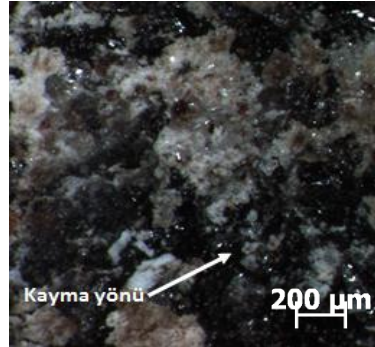
a) %8 hindistan cevizi kabuğu lifi disk yüzeyi (20 N, 0,8 m/s)



b) %8 hindistan cevizi kabuğu lifi pin yüzeyi (20 N, 0,8 m/s)



c) %8 hindistan cevizi kabuğu lifi disk yüzeyi (40 N, 0,6 m/s)



d) %8 hindistan cevizi kabuğu lifi pin yüzeyi (40 N, 0,6 m/s)

Şekil 4.50. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

4.3.2. Elyaf takviyeli kompozitler

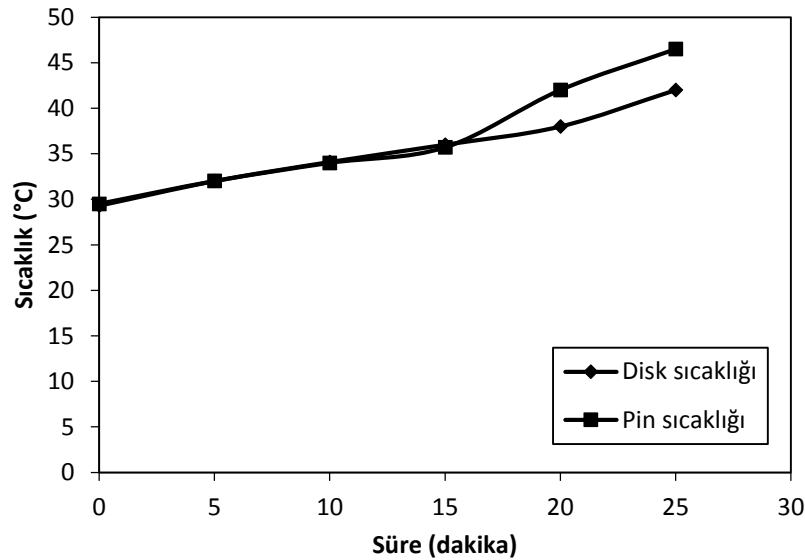
4.3.2.1. Cam elyaf takviyeli kompozitler

Tablo 4.10'da cam elyaf takviyeli takviyeli kompozitlere ait Taguchi L9 ortogonal dizinine göre planlanan pin on disk deneylerinden elde edilen aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Deneyler 25 °C-30 °C sıcaklık aralığında ve %55-%75 nem koşullarında gerçekleştirilmiştir. Tablo değerlerine bakıldığında saf epoksinin cam elyafla takviyelendirilmesiyle tribolojik özelliklerin iyileştirildiği görülmektedir.

Tablo 4.10. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar

Yük (N)	Hız (m/s)	Yönlenme	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı
20	0.6	0	0,00028	0,682379
20	0.8	90	0,00035	0,688429
20	1	0/90	0,000563	0,635816
30	0.6	90	0,000909	0,748294
30	0.8	0/90	0,001408	0,774008
30	1	0	0,001748	0,690543
40	0.6	0/90	0,002465	0,70575
40	0.8	0	0,001818	0,745702
40	1	90	0,001678	0,67035

Şekil 4.51’de cam elyaf takviyeli kompozitlerin deneylerinde ölçülen disk ve pin sıcaklık değişimleri verilmektedir. Diskte ölçülen sıcaklık değişimi 12,7 °C pinde ölçülen sıcaklık değişimi ise 17 °C’dir. Yüksek sıcaklık farklarına rağmen kırpıntı takviyeli kompozitlerde olduğu gibi diske yapışma durumları görülmemektedir. Bunun nedeni de kompozitin daha iyi bağlanmasıdır. Kırpıntı takviyelilerde matris ve takviye arasında kuvvetli bağ oluşmadığından pinden parça kopmaları görülürken cam elyafta sürekli liflerin etkisiyle bu durum oluşmamaktadır.

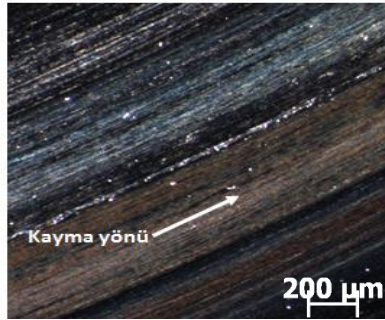


Şekil 4.51. Cam elyaf takviyeli kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi

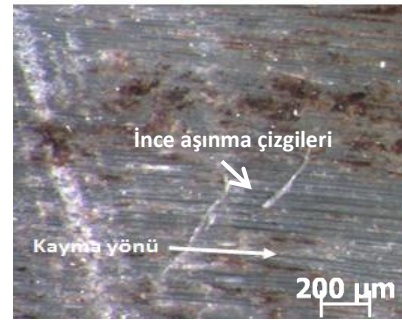
Saf epoksiye cam elyaf takviyesiyle tribolojik davranışların iyileşerek, sürtünme katsayısında ve aşınma oranında düşüşlerin ortaya çıktığı görülmektedir. Cam elyaf

takviyesi genel olarak mekanik dayanımı arttırdığı gibi tribolojik dayanımı da arttırmaktadır (Şekil 4.13, 4.28, 4.39, 4.46). Bunun yanısıra mekanik deneylerde yönlenmenin ortaya çıkardığı bariz farklılıklar tribolojik deneylerde izlenmemektedir.

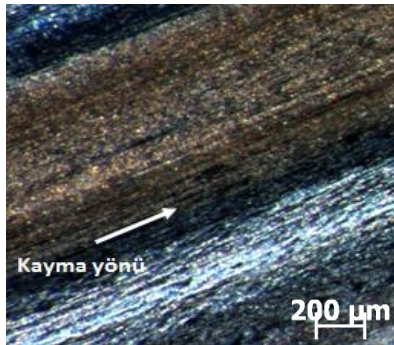
Şekil 4.52’de cam elyaf takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.52a’da 0° yönlenmede 20 N yük ve 0,6 m/s hız altında disk yüzeyinde kayma yönünde meydana gelen izler belirgin bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.52b’de ise aynı şartlar altında kayma yönüne paralel ince aşınma çizgileri görülmektedir. Şekil 4.52c’de 90° yönlenmede 40 N yük ve 1 m/s hız altında disk yüzeyinde daha geniş aşınma izleri gözlenmektedir. Şekil 4.52d’de aynı şartlar altında pin yüzeyinde yüksek yük ve hızın etkisiyle pin yüzeyinde atan lifler izlenmektedir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerde aşınma mekanizması adhezif olarak gözlenmektedir.



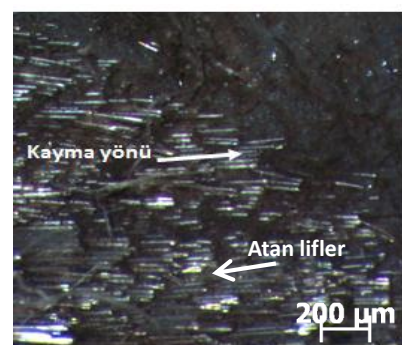
a) 0° yönlenmeli cam elyaf disk yüzeyi (20 N, 0,6 m/s)



b) 0° yönlenmeli cam elyaf pin yüzeyi (20 N, 0,6 m/s)



c) 90° yönlenmeli cam elyaf disk yüzeyi (40 N, 1 m/s)



d) 90° yönlenmeli cam elyaf pin yüzeyi (40 N, 1 m/s)

Şekil 4.52. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

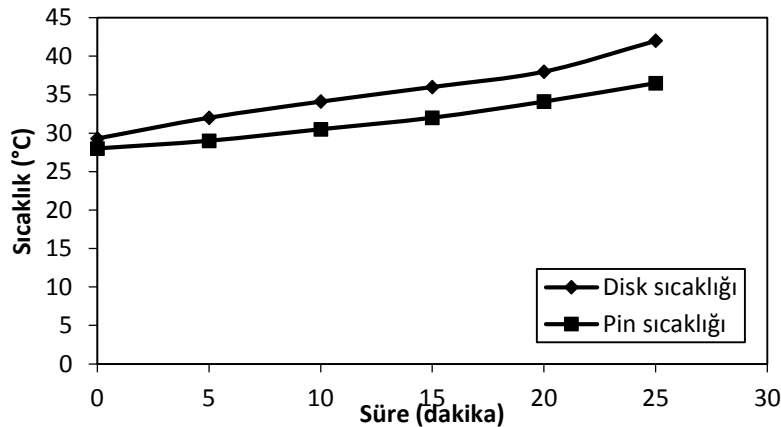
4.3.2.2. Karbon elyaf takviyeli kompozitler

Tablo 4.11’de karbon elyaf takviyeli takviyeli kompozitlere ait Taguchi L9 ortogonal dizinine göre planlanan pin on disk deneylerinden elde edilen aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Deneyler 20 °C-23 °C sıcaklık aralığında ve %50-%70 nem koşullarında gerçekleştirilmiştir. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin saf epoksiye göre mekanik özellikler de olduğu gibi tribolojik olarak ta üstün olduğu görülmektedir.

Tablo 4.11. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar

Yük (N)	Hız (m/s)	Yönlenme	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı
20	0.6	0	0,000225	0,296617
20	0.8	90	0,00015	0,388789
20	1	0/90	0,000412	0,3414286
30	0.6	90	0,0006	0,3555
30	0.8	0/90	0,000659	0,3968892
30	1	0	0,000525	0,4011677
40	0.6	0/90	0,001648	0,4336
40	0.8	0	0,000779	0,4828782
40	1	90	0,000981	0,529032

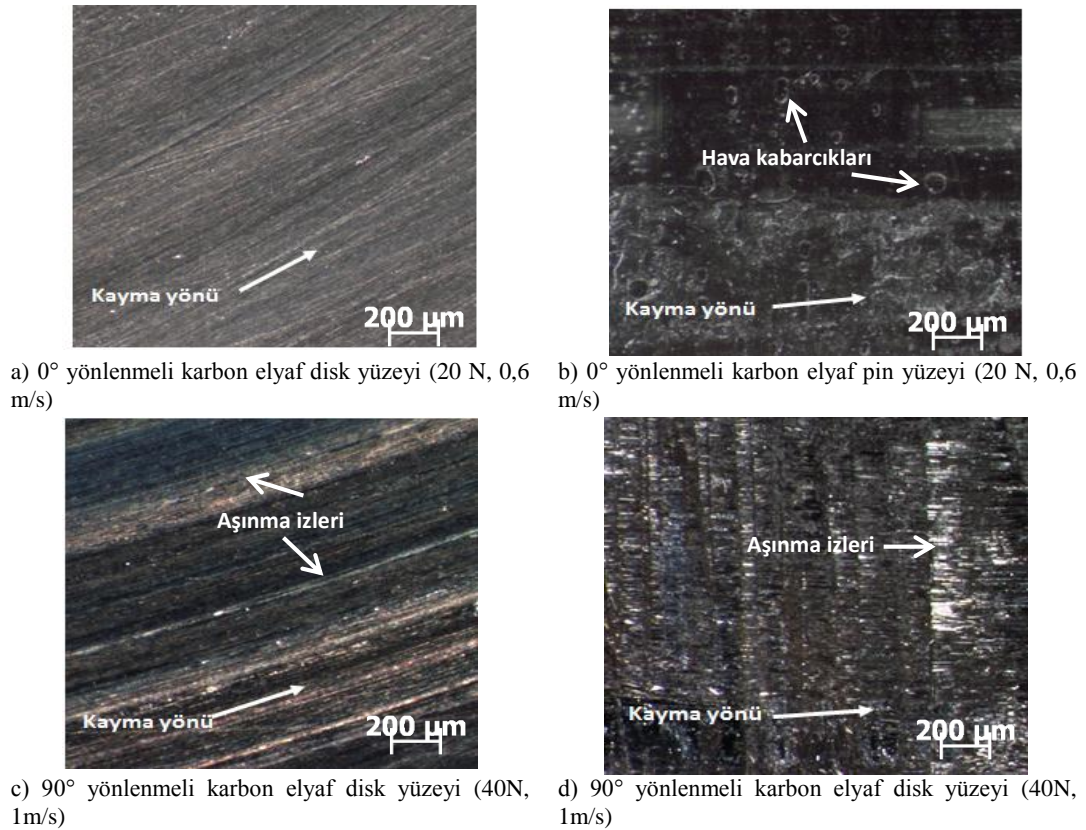
Şekil 4.53’te karbon elyaf takviyeli kompozitlerin deneylerinde ölçülen disk ve pin sıcaklık değişimleri verilmektedir. Diskte ölçülen sıcaklık değişimi 7,2 °C pinde ölçülen sıcaklık değişimi ise 8,5 °C’dir. Sıcaklık farkları düşük seviyelerdedir. Bu nedenle de tribolojik performansın daha da iyileştiğini söyleyebiliriz.



Şekil 4.53. Karbon elyaf takviyeli kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi

Saf epoksiye karbon elyaf takviyesiyle tribolojik davranışların bariz bir şekilde iyileşerek, sürtünme katsayısında ve aşınma oranında düşüşlerin ortaya çıktığı görülmektedir. Tıpkı mekanik dayanımda olduğu gibi tribolojik dayanımda da karbon elyaf takviyesi en yüksek iyileştirmeye sahiptir. Bunun yanısıra mekanik deneylerde yönlenmenin ortaya çıkardığı bariz farklılıklar tribolojik deneylerde izlenmemektedir (Şekil 4.15, 4.30).

Şekil 4.54'te karbon elyaf takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.54. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.54a'da 0 yönlenmede 20 N yük ve 0,6 m/s hız altında disk yüzeyi ve şekil 4.54b'de aynı şartlar altında pin yüzeyi görülmektedir. Kayma yönünde hem pin hem disk yüzeyinde çok ta belirgin olmayan ince aşınma izlerine rastlanmaktadır. Şekil 4.54b'de pin yüzeyinde kompozit üretimi sırasında meydana gelen hava kabarcıkları görülmektedir. Şekil 4.54c'de 90° yönünde 40 N yük ve 1 m/s hız altında, disk

yüzeyinde artan yük ve hızın etkisiyle aşınma izlerinin belirginleşerek kalınlaştığı görülmektedir. Şekil 4.54d'de aynı şartlar altında pin yüzeyinde aşınma izleri görülmektedir. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde izlenen aşınma mekanizması adheziftir.

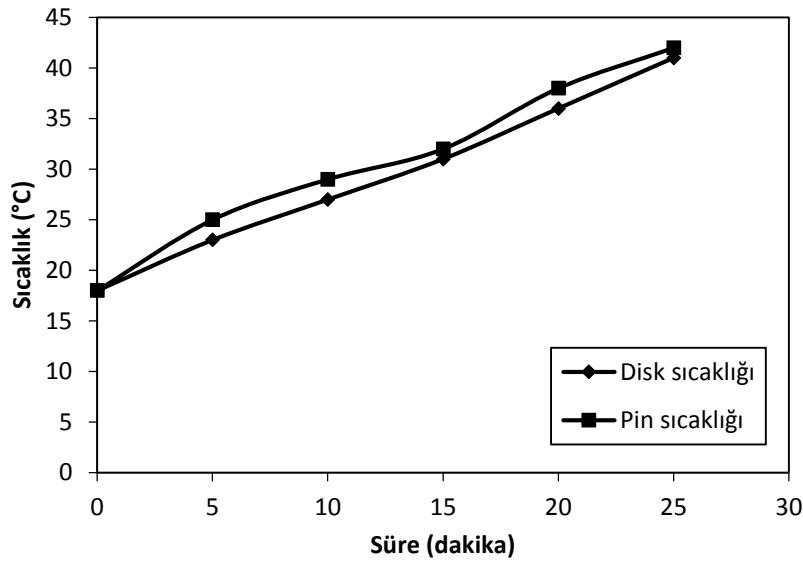
4.3.2.3. Keten iplik takviyeli kompozitler

Tablo 4.12'de keten iplik takviyeli kompozitlere ait Taguchi L9 ortogonal dizinine göre planlanan pin on disk deneylerinden elde edilen aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Deneyler 17 °C-22 °C sıcaklık aralığında ve %50-%70 nem koşullarında gerçekleştirilmiştir. Tablo değerlerine bakıldığında keten iplik takviyeli kompozitlerin tribolojik performansının saf epoksiden daha iyi olduğu ancak genel olarak yüksek sürtünme katsayılarının oluştuğu görülmektedir.

Tablo 4.12. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait deneysel sonuçlar

Yük (N)	Hız (m/s)	Yönlenme	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı
20	0.6	0	0,0015	0,91
20	0.8	90	0,00154	0,92
20	1	0/90	0,1	0,94
30	0.6	90	0,0028333	0,965
30	0.8	0/90	0,1	0,96
30	1	0	0,08875	0,86
40	0.6	0/90	0,100091	0,97
40	0.8	0	0,0655	0,88
40	1	90	0,0945	0,9

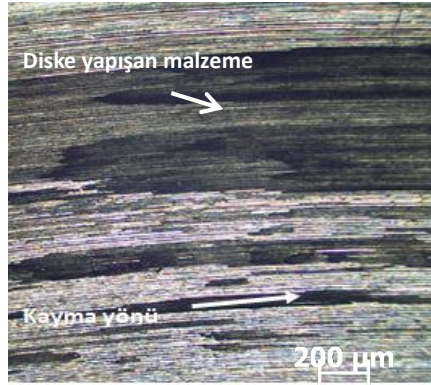
Şekil 4.55'te keten iplik takviyeli kompozitlerin deneylerinde ölçülen disk ve pin sıcaklık değişimleri verilmektedir. Diskte ölçülen sıcaklık değişimi 23 °C pinde ölçülen sıcaklık değişimi ise 24 °C'dir. Sıcaklık farkları oldukça yüksek seviyelerdedir. Bu nedenle de yüksek sürtünme katsayıları gözlenmektedir.



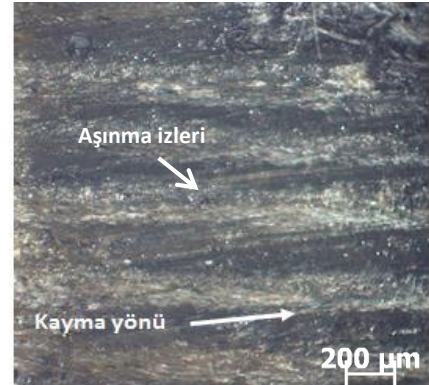
Şekil 4.55. Keten iplik takviyeli kompozit deneylerinde sıcaklık değişimi

Saf epoksiye keten iplik takviyesiyle tribolojik davranışların aşınma oranı bakımından iyileştiği ancak sürtünme katsayısı bakımından çok ta kayda değer olmayan iyileşmenin ortaya çıktığı söylenebilir. Mekanik dayanım da olduğu gibi tribolojik olarak ta keten iplik takviyesi başarı gösterememektedir.

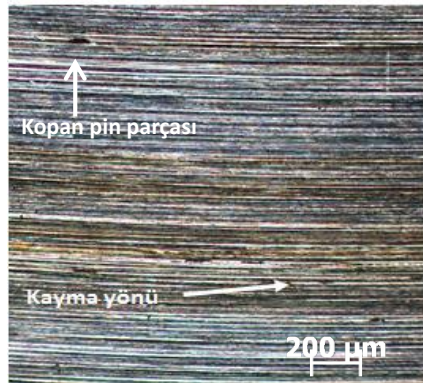
Şekil 4.56'da keten iplik takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.56a'da 0° yönlenmede 20 N yük ve 0,6 m/s hız altında diskte pinden kopan parçacıkların yüzeye geçerek kalın aşınma izlerinin neden olduğu görülmektedir. Şekil 4.56b'de aynı şartlar altında pin yüzeyinde de kalın aşınma izleri görülmektedir. Şekil 4.56c'de 90° yönlenmede 40 N yük ve 1 m/s hız altında artan yük ve hız sonucu pinden kopan parçacıkların diskte meydana gelen izlerin arasını doldurduğu görülmektedir. Aynı şartlar altında şekil 4.56d'de pin yüzeyinde geniş aşınma izleri görülmektedir. Keten iplik takviyeli kompozitlerde görülen genel aşınma mekanizması abrasif olmakla birlikte adhezif mekanizmalar da söz konusudur.



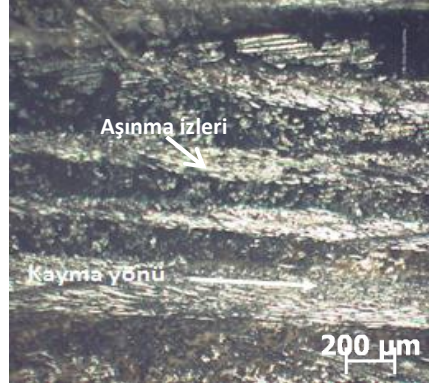
a) 0° yönlenmeli keten iplik disk yüzeyi (20 N, 0,6 m/s)



b) 0° yönlenmeli keten iplik pin yüzeyi (20 N, 0,6 m/s)



c) 90° yönlenmeli keten iplik disk yüzeyi (40 N, 1 m/s)



d) 90° yönlenmeli keten iplik pin yüzeyi (40 N, 1 m/s)

Şekil 4.56. Keten iplik takviyeli kompozitlerin disk ve pin aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

4.4. Tribolojik Deney Sonuçlarının Analizi

Taguchi'ye göre planlanan deneyler bu bölümde analiz edilmiştir. Sonuçların sinyal/gürültü oranı analizi, varyans analizleri ve son olarak ta doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir.

4.4.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin analizleri

4.4.1.1. Saf epoksi

Tablo 4.13'te saf epoksi numunelerin tribolojik deneylerine ait deney sonuçları ve sinyal/gürültü oranları görülmektedir.

Tablo 4.13. Saf epoksiye ait deneysel sonuçlar ve sinyal/gürültü oranları

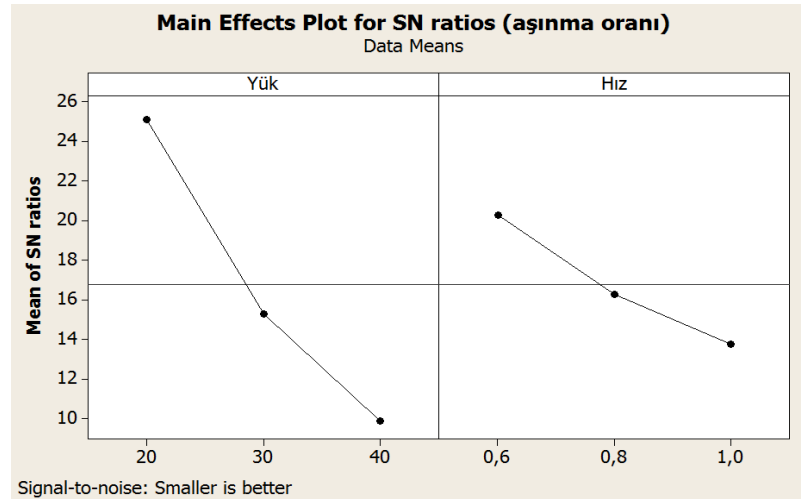
Yük (N)	Hız(m/s)	Aşınma Oranı(mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı	Aşınma S/N oranı (dB)	Sürtünme katsayısı S/N oranı (dB)
20	0,6	0,024460	1,08297	32,2308	-0,69231
20	0,8	0,066300	1,12041	23,5697	-0,98754
20	1,0	0,105307	0,94457	19,5508	0,49532
30	0,6	0,138221	0,86819	17,1885	1,22767
30	0,8	0,157060	0,79195	16,0787	2,02609
30	1,0	0,234303	0,82225	12,6045	1,69993
40	0,6	0,268075	0,80953	11,4349	1,83531
40	0,8	0,349566	0,84123	9,1294	1,50167
40	1,0	0,351626	0,77139	9,0784	2,25456

Aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuçları tablo 4.14'te görülmektedir. Tabloya göre aşınma oranı üzerinde yükün etkisi hızdan daha fazladır. Yani aşınma oranı üzerindeki birincil etken yükür. Yük arttıkça aşınma oranı da artmaktadır.

Tablo 4.14. Saf epoksiye ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız
1	25,117	20,285
2	15,291	16,259
3	9,881	13,745
Delta	15,236	6,540
Rank	1	2

Yukarıda tablo 4.14 ile verilen sonuçlar, şekil 4.57'de grafiklerde aşınma oranı sinyal/gürültü oranına ait grafikler olarak görülmektedir.



Şekil 4.57. Saf epoksiye ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri

Sinyal/gürültü oranı grafiklerinde yüksek değer en iyi seviyeleri göstermektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi her iki faktörün de seviyelerinin sinyal/gürültü oranları

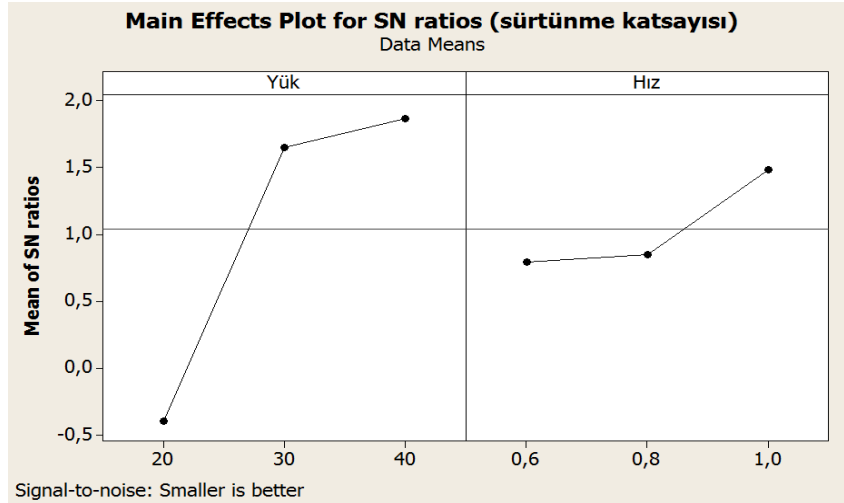
arasındaki farklar büyüktür. En yüksek sinyal/gürültü oranı değeri yük için 20 N'da hız için ise 0,6 m/s 'dedir. Yani saf epoksi için yükte 20 N, hız da ise 0,6 m/s seviyeleri altında yapılan deneyler en düşük aşınma oranlarını vermektedir.

Tablo 4.15'te verilen sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosuna bakıldığında en etkin faktörün yük olduğu görülmektedir. Yani sürtünme katsayısı değişen yük koşullarında daha fazla hassasiyet göstermektedir. Yük artışıyla sürtünme katsayısı da azalmaktadır.

Tablo 4.15. Saf epoksiye ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız
1	-0,3948	0,7902
2	1,6512	0,8467
3	1,8638	1,4833
Delta	2,2587	0,6930
Rank	1	2

Yukarıda tablo 4.15 ile verilen sonuçlar, şekil 4.58'de sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri olarak görülmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi yük seviyelerinden 30 ve 40'ın sinyal/gürültü oranları birbirine yakınken 20'ninki uzaktır. Yük arttıkça sinyal/gürültü oranı artmaktadır bu da sürtünme katsayısının düştüğü anlamına gelmektedir. Hız seviyelerinden 0,6 ve 0,8 ise birbirine oldukça yakındır. 1m/s hız için ise sinyal/gürültü oranı yükselmeye başlamaktadır. Yani hız arttıkça sürtünme katsayısı düşmektedir. Sürtünme katsayısı için yükte 40 N, hız da ise 1 m/s seviyeleri altında yapılan deneyler en düşük sürtünme katsayısını vermektedir.



Şekil 4.58. Saf epoksiye ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri

4.4.1.1.1. Varyans analizi

Tablo 4.16'da saf epoksi deneylerinin aşınma oranlarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.16. Saf epoksi deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,100266	0,100266	0,050133	121,11	88,5
Hız	2	0,011340	0,011340	0,005670	13,70	10
Error	4	0,001656	0,001656	0,000414		2,5
Total	8	0,113261				

DF: Degree of freedom, Seq SS: Sequential sum of squares, Adj SS: Adjusted sum of squares, Adj MS: Adjusted mean squares, F: F testi

ANOVA sonuçlarına bakıldığında deneylerde aşınma oranı üzerinde yükün %88,5, hızın ise %10 etkili olduğu görülmektedir. Taguchi analizlerinde artan yükün aşınma oranını arttırdığı belirtildiği gibi aşınma oranı üzerinde yükün hıza göre daha baskın faktör olduğu buradan da görülmektedir.

Tablo 4.17'de saf epoksi deneylerinin sürtünme katsayılarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.17. Saf epoksi deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,108153	0,108153	0,054076	18,19	82,74
Hız	2	0,010660	0,010660	0,005330	1,79	8,15
Error	4	0,011892	0,011892	0,002973		9
Total	8	0,130705				

ANOVA sonuçlarına göre deneylerde sürtünme katsayısı üzerinde yükün %82,74, hızın ise %8 civarında etkili olduğu görülmektedir. Taguchi analizlerinde artan yükte sürtünme katsayısının azaldığı belirtildiği gibi etkisi burada da görülmektedir. Sürtünme katsayısı üzerinde de faktörlerin etkisi aşınma oranına benzer şekilde gerçekleşmektedir.

4.4.1.1.2. Doğrulama testi

Taguchi'nin sinyal/gürültü analizine göre en iyi parametre seviyeleri aşınma oranı için A_1B_1 , sürtünme katsayısı için ise A_3B_3 olarak belirlendi. Bu faktörlerin deneysel ve tahmini sinyal/gürültü oranlarını karşılaştırarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranı tahmini S/N oranı için 4.8 eşitliğinden, sürtünme katsayısı tahmini S/N oranı için 4.9 eşitliğinden faydalanılmıştır. Eşitliklerde; $\hat{\eta}$ tahmin edilen ortalama S/N oranı, \bar{T} toplam deneysel ortalama, \bar{A}_1 , \bar{B}_1 , \bar{A}_3 , \bar{B}_3 faktörlerin ortalama yanıtlarıdır.

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) \quad (4.8)$$

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_3 - \bar{T}) + (\bar{B}_3 - \bar{T}) \quad (4.9)$$

Sonuçlar tablo 4.18'de verilmektedir. Aşınma oranı doğrulama testi sonucu %6,238, sürtünme katsayısı doğrulama testi sonucu %2,327'lik sapma meydana gelmektedir.

Tablo 4.18. Saf epoksi için doğrulama deney sonuçları

	Aşınma oranı için S/N oranı (dB)			Sürtünme katsayısı için S/N oranı (dB)		
Seviye	A_1B_1			A_3B_3		
	Tahmini	Deneysel	% Sapma	Tahmini	Deneysel	% Sapma
	30,221	32,2308	6,238	2,30704	2,25456	2,327

4.4.1.2. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitler

Tablo 4.19’da bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin tribolojik deneylerine ait deney sonuçları ve sinyal/gürültü oranları görülmektedir.

Tablo 4.19. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar

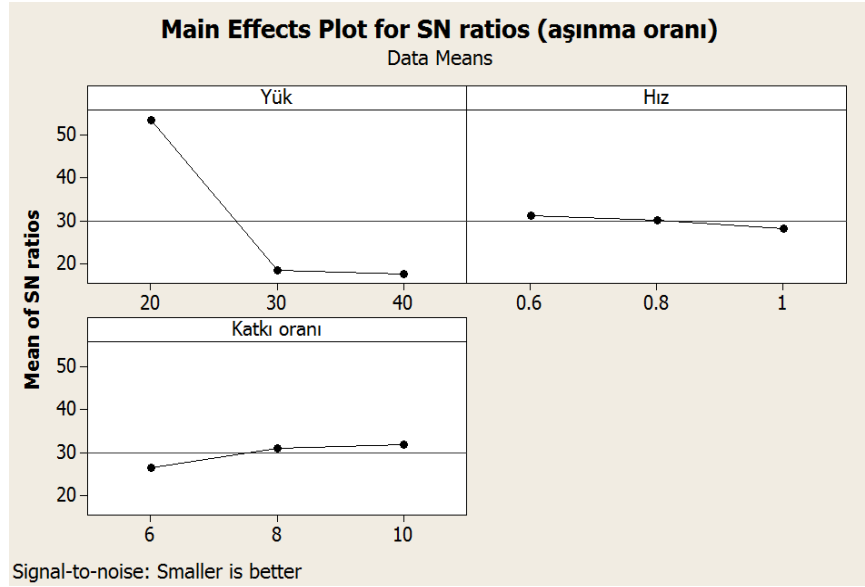
Yük (N)	Hız (m/s)	Katkı (%)	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı	Aşınma S/N oranı (dB)	Sürtünme katsayısı S/N oranı (dB)
20	0,6	6	0,003108	0,870364	50,1498	1,20598
20	0,8	8	0,001422	0,824852	56,9412	1,67248
20	1	10	0,002111	0,791369	53,5116	2,03241
30	0,6	8	0,094733	0,970903	20,47	0,25649
30	0,8	10	0,107786	0,98017	19,3487	0,17397
30	1	6	0,168165	0,923824	15,4853	0,68822
40	0,6	10	0,069747	1,061386	23,1295	-0,51746
40	0,8	6	0,195905	1,102588	14,1591	-0,84826
40	1	8	0,163836	1,140232	15,7118	-1,13986

Tablo 4.20’deki aşınma oranı sinyal/gürültü oranı tablosuna bakıldığında yükün aşınma üzerinde en etkili faktör olduğu, katkı oranının ikinci sırada yer aldığını ve en az da hızın etkili olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan da saf epoksiye nazaran daha düşük aşınma değerleriyle karşılaştırılmasının katkı oranı faktörü olduğunu söyleyebiliriz.

Tablo 4.20. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Katkı
1	53,53	31,25	26,60
2	18,43	30,15	31,04
3	17,67	28,24	32
Delta	35,87	3,01	5,40
Rank	1	3	2

Yukarıda tablo 4.20 ile verilen sonuçlar, şekil 4.59’da aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri olarak görülmektedir. Grafiklere bakıldığında yük ve hız artışının aşınma oranını arttırdığını en az aşınmanın 20 N ve 0,6 m/s altında olduğu, katkı oranındaki artışın ise aşınma oranını düşürdüğünü ve en iyi seviyenin %10 olduğu görülmektedir.



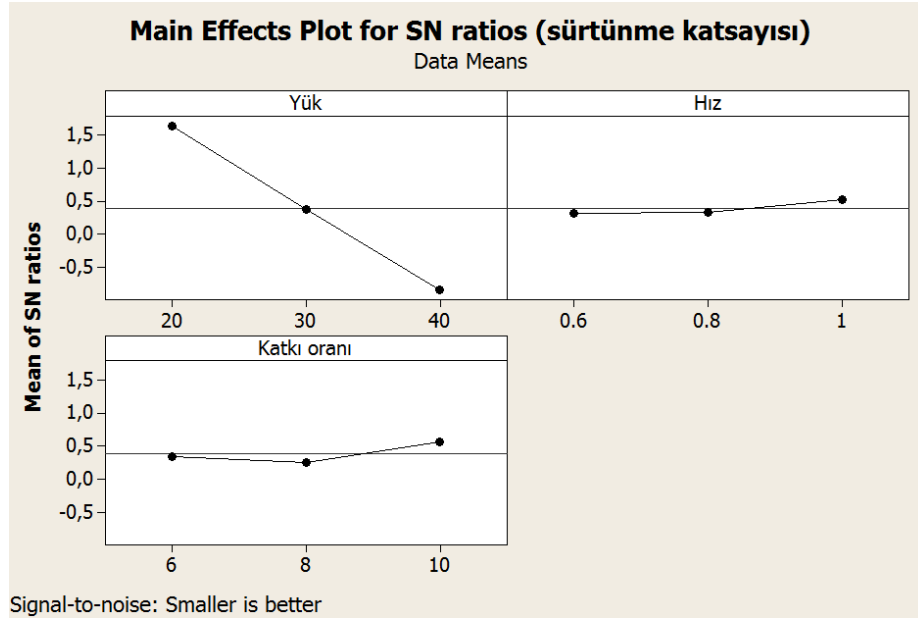
Şekil 4.59. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri

Tablo 4.21'deki sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosuna bakıldığında en etkin faktörün yük olduğu görülmektedir. Yükü sırasıyla katkı oranı ve hız takip etmektedir. Yük arttıkça sürtünme katsayısının da arttığı sinyal/gürültü oranlarındaki düşüşten anlaşılmaktadır. Katkı oranında %10 için en yüksek sinyal/gürültü oranı izlenmektedir. Hız için ise değerler birbirine yakın olmakla beraber 1m/s seviyesi için sürtünme katsayısı uygun seviyedir.

Tablo 4.21. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Katkı
1	1,637	0,3150	0,3486
2	0,3729	0,3327	0,2630
3	-0,8352	0,5269	0,5630
Delta	2,4722	0,2119	0,2999
Rank	1	3	2

Tablo 4.21'deki değerler şekil 4.60'ta sürtünme katsayısının sinyal/gürültü oranı grafikleri olarak verilmektedir. Grafik eğrilerinden sürtünme katsayısı için yük seviyeleri arasındaki etkinin büyük olduğu, hız ve katkı oranı için ise seviyelerin etkilerinin yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.60. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri

4.4.1.2.1. Varyans analizi

Tablo 4.22’de bambu kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranlarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.22. Bambu kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,0349761	0,0349761	0,0174881	71,05	74,9
Hız	2	0,0052761	0,0052761	0,0026380	10,72	11,3
Katkı oranı	2	0,0059016	0,0059016	0,0029508	11,99	12,65
Error	2	0,0004923	0,0004923	0,0002461		1,15
Total	8	0,0466460				

Elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre aşınma üzerinde en büyük etki %74,9 oranıyla yük tarafından meydana gelmektedir. Hızın (%11,3) ve katkı oranının (%12,65) yaklaşık eşit derecede etkileri bulunmaktadır. Taguchi analizlerinde de yük arttıkça aşınma oranının da arttığı sonucu çıkarılmıştır.

Tablo 4.23’te bambu kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayılarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.23. Bambu kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,111510	0,111510	0,055755	19,48	93,24
Hız	2	0,000553	0,000553	0,000277	0,10	0,46
Katkı oranı	2	0,001804	0,001804	0,000902	0,32	1,5
Error	2	0,005723	0,005723	0,002862		4,8
Total	8	0,119591				

Sürtünme katsayısı için elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre yine yük %93,24 oranla birinci sırada etkilidir. Katkı oranı ikinci sırada etkiliyken hız üçüncü sırada yer almaktadır. Taguchi analizlerinde de yük arttıkça sürtünme katsayısının da arttığı sonucu çıkarılmıştır. Katkı oranı ve hızın etkileri yok denilecek kadar az seviyelerdedir. Buradan da saf epoksiye bambu kırpıntı takviyesiyle sürtünme katsayılarında iyileştirme yapılamadığı sonucuna varılabilir.

4.4.1.2.2. Doğrulama testi

Taguchi' nin sinyal/gürültü analizine göre en iyi parametre seviyeleri aşınma oranı için $A_1B_1C_3$, sürtünme katsayısı için ise $A_1B_3C_3$ olarak belirlendi. Bu faktörlerin deneysel ve tahmini sinyal/gürültü oranlarını karşılaştırarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranı tahmini S/N oranı için 4.10 eşitliğinden, sürtünme katsayısı tahmini S/N oranı için 4.11 eşitliğinden faydalanılmıştır. Eşitliklerde; $\hat{\eta}$ tahmin edilen ortalama S/N oranı, \bar{T} toplam deneysel ortalama, \bar{A}_1 , \bar{B}_1 , \bar{B}_3 , \bar{C}_3 faktörlerin ortalama yanıtlarıdır.

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) \quad (4.10)$$

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_3 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) \quad (4.11)$$

Sonuçlar tablo 4.24'te verilmektedir. Aşınma oranı doğrulama testi sonucu %2,788, sürtünme katsayısı doğrulama testi sonucu %4,362'lik sapma meydana gelmektedir.

Tablo 4.24. Bambu kırpıntı takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları

	Aşınma oranı için S/N oranı (dB)			Sürtünme katsayısı için S/N oranı (dB)		
Seviye	A ₁ B ₁ C ₃			A ₁ B ₃ C ₃		
	Tahmini	DeneySEL	% Sapma	Tahmini	DeneySEL	% Sapma
	57,0234	58,659	2,788	1,94375	2,03241	4,362

4.4.1.3. Cam kırpıntı takviyeli kompozitler

Tablo 4.25'te cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin tribolojik deneylerine ait deney sonuçları ve sinyal/gürültü oranları görülmektedir.

Tablo 4.25. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar

Yük (N)	Hız (m/s)	Katkı (%)	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı	Aşınma S/N oranı (dB)	Sürtünme katsayısı S/N oranı (dB)
20	0,6	10	0,000631	0,560991	52,5635	5,02088
20	0,8	30	0,001448	0,656483	56,7858	3,65553
20	1	50	0,001364	0,6539	57,3015	3,68978
30	0,6	30	0,002134	0,690694	51,4795	3,21428
30	0,8	50	0,004161	0,746665	47,6155	2,53749
30	1	10	0,144947	0,809627	19,7647	1,8343
40	0,6	50	0,004571	0,705915	28,8039	3,02495
40	0,8	10	0,113334	0,832416	18,9128	1,59319
40	1	30	0,087775	0,848626	18,3068	1,42568

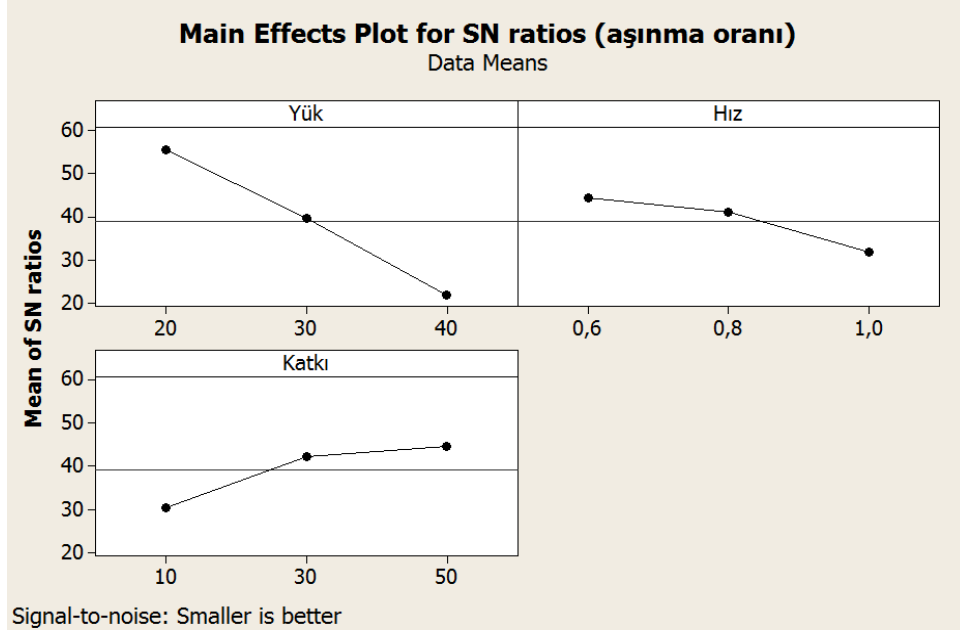
Tablo 4.26'da aşınma oranı sinyal/gürültü oranı tablosuna bakıldığında yükün aşınma üzerinde en etkili faktör olduğu, katkı oranının ikinci sırada yer aldığını ve en az da hızın etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 4.26. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Katkı
1	55,55	44,28	30,41
2	39,62	41,10	42,19
3	22,01	31,79	44,57
Delta	33,54	12,49	14,16
Rank	1	3	2

Tablo 4.26'daki değerler şekil 4.61'de aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri olarak verilmektedir. Yük ve hız arttıkça sinyal/gürültü oranı azalmakta yani aşınma

oranı artmaktadır. Katkı oranı arttıkça ise sinyal/gürültü oranı artmakta yani aşınma oranı düşmektedir.



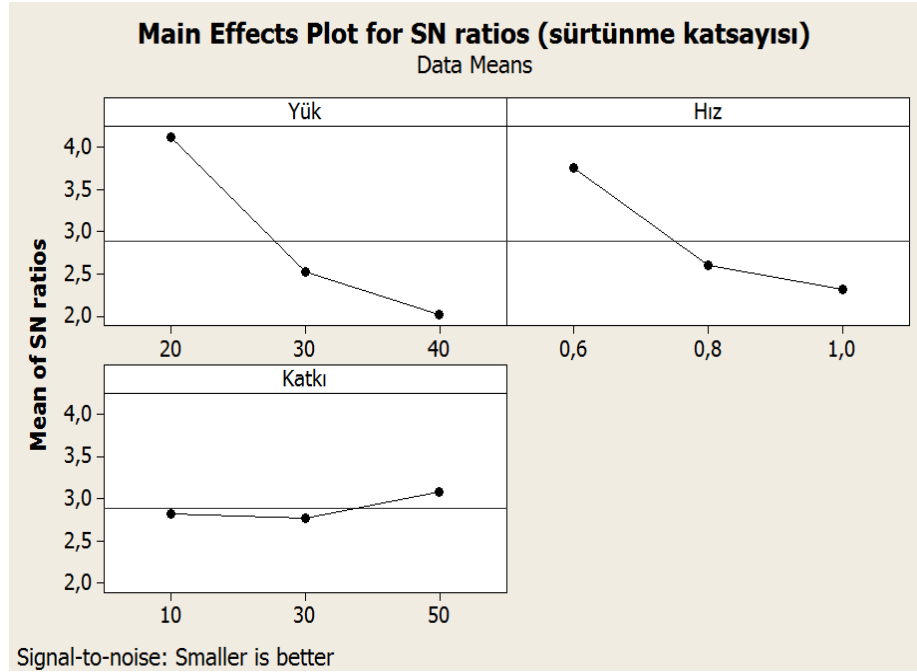
Şekil 4.61. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri

Tablo 4.27’de sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosuna bakıldığında en etkin faktörün yük olduğu görülmektedir. Yükü sırasıyla hız ve katkı oranı takip etmektedir.

Tablo 4.27. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Katkı
1	4,122	3,753	2,816
2	2,529	2,595	2,765
3	2,015	2,317	3,084
Delta	2,107	1,437	0,319
Rank	1	2	3

Şekil 4.62’de grafiklerde sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranlarına ait sonuçlar görülmektedir. Yük ve hız arttıkça sinyal/gürültü oranı düşmekte yani sürtünme katsayısı artmaktadır. Takviye oranında ise seviyeler birbirine yakın olmakla beraber en yüksek sinyal/gürültü oranı %50 takviyede görülmektedir.



Şekil 4.62. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri

4.4.1.3.1. Varyans analizi

Tablo 4.28’de cam kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranlarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.28. Cam kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,0119728	0,0119728	0,0059864	134,13	52,11
Hız	2	0,0057093	0,0057093	0,0028547	63,96	24,8
Katkı oranı	2	0,0052034	0,0052034	0,0026017	58,29	22,64
Error	2	0,0000893	0,0000893	0,0000446		0,45
Total	8	0,0229748				

Elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre aşınma üzerinde en büyük etki %52,11 oranıyla yük tarafından meydana gelmektedir. Taguchi analizlerinde bahsedildiği gibi yük arttıkça aşınma oranı da artmaktadır. Hız %24,8 oranıyla ikinci sırada etkiliyken katkı oranı %22,64 oranıyla üçüncü sırada etkili olmaktadır. Ancak hızın ve katkı oranının etki dereceleri birbirlerine çok yakındır.

Tablo 4.29’da cam kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayılarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.29. Cam kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,047389	0,047389	0,023695	607,23	65,27
Hız	2	0,023204	0,023204	0,011602	297,33	31,96
Katkı oranı	2	0,001928	0,001928	0,000964	24,71	2,65
Error	2	0,000078	0,000078	0,000039		0,12
Total	8	0,072599				

Sürtünme katsayısı için elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre yükün etkisi %65,27 oranıyla birinci sıradadır. Hız %31,96 ile ikinci sırada etkiliyken katkı oranı %2,65 ile üçüncü sırada yer almaktadır. Yük ve hız arttıkça sürtünme katsayısı da artmaktadır.

4.4.1.3.2. Doğrulama testi

Taguchi’nin sinyal/gürültü analizine göre en iyi parametre seviyeleri aşınma oranı için $A_1B_1C_3$, sürtünme katsayısı için ise $A_1B_3C_3$ olarak belirlendi. Bu faktörlerin deneysel ve tahmini sinyal/gürültü oranlarını karşılaştırarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranı tahmini S/N oranı için 4.12 eşitliğinden, sürtünme katsayısı tahmini S/N oranı için 4.13 eşitliğinden faydalanılmıştır. Eşitliklerde; $\hat{\eta}$ tahmin edilen ortalama S/N oranı, \bar{T} toplam deneysel ortalama, \bar{A}_1 , \bar{B}_1 , \bar{C}_3 faktörlerin ortalama yanıtlarıdır.

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) \quad (4.12)$$

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) \quad (4.13)$$

Sonuçlar tablo 4.30’de verilmektedir. Aşınma oranı doğrulama testi sonucu %2,637, sürtünme katsayısı doğrulama testi sonucu %6,049’luk sapma meydana gelmektedir.

Tablo 4.30. Cam kırpıntı takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları

	Aşınma oranı için S/N oranı (dB)			Sürtünme katsayısı için S/N oranı (dB)		
Seviye	$A_1B_1C_3$			$A_1B_1C_3$		
	Tahmini	Deneysel	% Sapma	Tahmini	Deneysel	% Sapma
	66,2875	64,5842	2,637	5,18260	5,5163	6,049

4.4.1.4. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitler

Tablo 4.31’de karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin tribolojik deneylerine ait deney sonuçları ve sinyal/gürültü oranları görülmektedir.

Tablo 4.31. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar

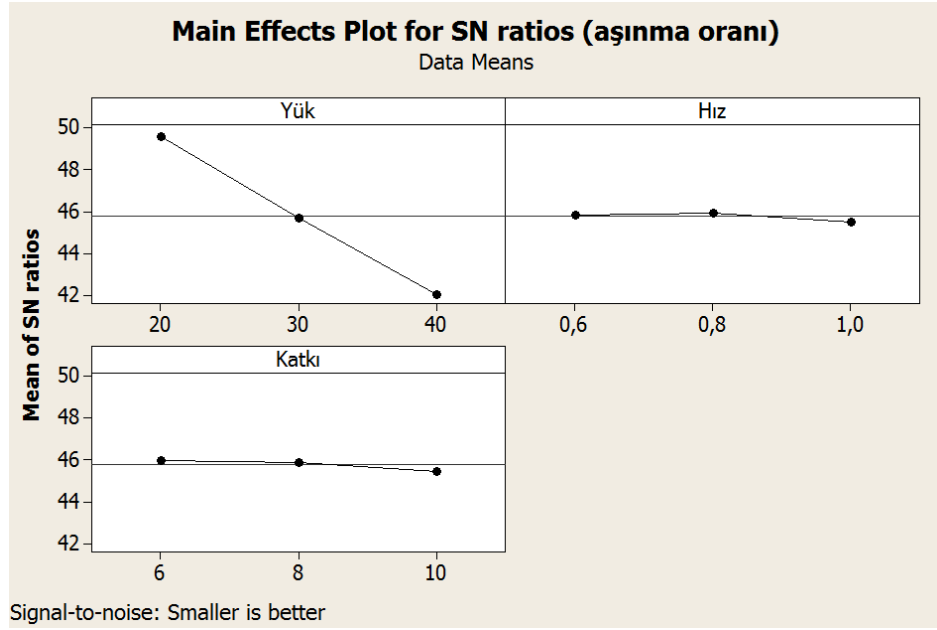
Yük (N)	Hız (m/s)	Katkı (%)	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı	Aşınma S/N oranı (dB)	Sürtünme katsayısı S/N oranı (dB)
20	0,6	6	0,0034203	0,54164	49,3187	5,32579
20	0,8	8	0,0028484	0,63912	50,908	3,88835
20	1	10	0,0037434	0,63213	48,5347	3,98387
30	0,6	8	0,00539	0,64702	45,3682	3,78165
30	0,8	10	0,0055941	0,62312	45,0455	4,10857
30	1	6	0,0046418	0,67618	46,6662	3,39875
40	0,6	10	0,0071924	0,699175	42,8626	3,10828
40	0,8	6	0,0080133	0,75365	41,9238	2,45661
40	1	8	0,0085013	0,77592	41,4103	2,20366

Tablo 4.32’de aşınma oranı sinyal/gürültü oranı tablosuna bakıldığında yükün aşınma üzerinde en etkili faktör olduğu, katkı oranının ikinci sırada yer aldığını ve en az da hızın etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 4.32. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Katkı
1	49,59	45,85	45,97
2	45,69	45,96	45,90
3	42,07	45,54	45,48
Delta	7,52	0,42	0,49
Rank	1	3	2

Şekil 4.63’te sinyal/gürültü oranı değerlerinin grafiğe dökülmüş hali görülmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi yük arttıkça sinyal/gürültü seviyesi azalmakta, hız ve katkı oranı seviyelerinde ise belirgin bir farklılık görülmemektedir.



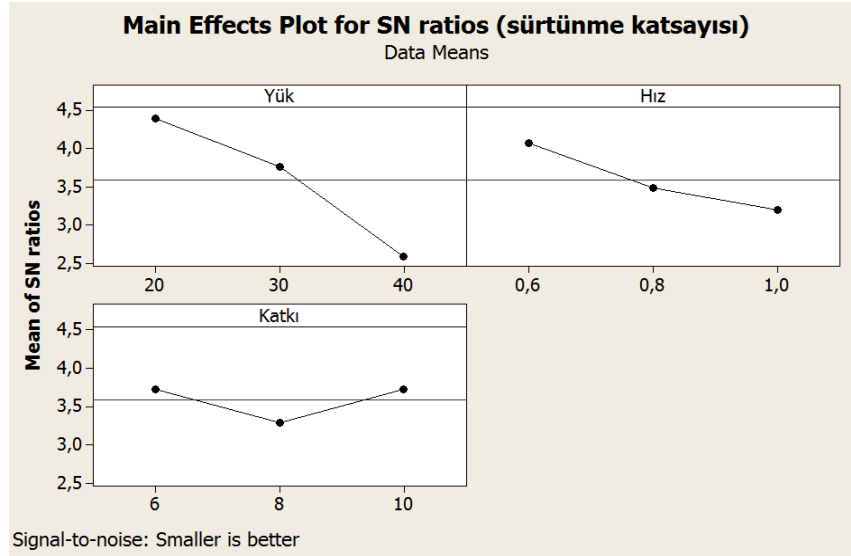
Şekil 4.63. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri

Tablo 4.33'te sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosuna bakıldığında en etkin faktörün yük olduğu görülmektedir. Yükü sırasıyla hız ve katkı oranı takip etmektedir.

Tablo 4.33. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Katkı
1	4,399	4,072	3,727
2	3,763	3,485	3,291
3	2,590	3,195	3,734
Delta	1,810	0,876	0,442
Rank	1	2	3

Şekil 4.64'te grafiklerde sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı ait sonuçlar görülmektedir. Aşınma oranında olduğu gibi sürtünme katsayısında da yük arttıkça sinyal/gürültü oranı azalmakta yani sürtünme katsayısı artmaktadır. Benzer şekilde hız arttıkça da sinyal/gürültü oranı azalmaktadır. Katkı oranı için ise optimum değer %10 olarak görülmektedir.



Şekil 4.64. Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri

4.4.1.4.1. Varyans analizi

Tablo 4.34'te karbon kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranlarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.34. Karbon kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,0000316	0,0000316	0,0000158	19,98	94
Hız	2	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,08	0,29
Katkı oranı	2	0,0000001	0,0000001	0,0000000	0,05	0,29
Error	2	0,0000016	0,0000016	0,0000008		5,42
Total	8	0,0000334				

Elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre aşınma üzerinde %94 oranla en büyük etki yük tarafından meydana gelmektedir. Hızın ve katkının eşit derecede etkileri bulunmaktadır ve yok denecek kadar azdır. Zaten Taguchi analizi sonuçlarına göre de seviyeler arası sinyal/gürültü oranları değerlerinin yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 4.35'te karbon kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayılarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.35. Karbon kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,0300559	0,0300559	0,0150279	18,96	74,21
Hız	2	0,0066266	0,0066266	0,0033133	4,18	16,36
Katkı oranı	2	0,0022314	0,0022314	0,0011157	1,41	7,42
Error	2	0,0015853	0,0015853	0,0007926		2
Total	8	0,0404991				

Sürtünme katsayısı için elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre yine yükün etkisi %74,21 oranla birinci sıradadır. Yük arttıkça sürtünme katsayısı da artmaktadır. Hız %16,36 oranıyla ikinci sırada etkiliyken katkı oranı %7,42 ile üçüncü sırada yer almaktadır.

4.4.1.4.2. Doğrulama testi

Taguchi'nin sinyal/gürültü analizine göre en iyi parametre seviyeleri aşınma oranı için $A_1B_2C_1$, sürtünme katsayısı için ise $A_1B_1C_3$ olarak belirlendi. Bu faktörlerin deneysel ve tahmini sinyal/gürültü oranlarını karşılaştırarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranı tahmini S/N oranı için 4.14 eşitliğinden, sürtünme katsayısı tahmini S/N oranı için 4.15 eşitliğinden faydalanılmıştır. Eşitliklerde; $\hat{\eta}$ tahmin edilen ortalama S/N oranı, \bar{T} toplam deneysel ortalama, \bar{A}_1 , \bar{B}_1 , \bar{B}_2 , \bar{C}_1 , \bar{C}_3 faktörlerin ortalama yanıtlarıdır.

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_2 - \bar{T}) + (\bar{C}_1 - \bar{T}) \quad (4.14)$$

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) \quad (4.15)$$

Sonuçlar tablo 4.36'da verilmektedir. Aşınma oranı doğrulama testi sonucu %3,334, sürtünme katsayısı doğrulama testi sonucu %3,414'lük sapma meydana gelmektedir.

Tablo 4.36. Karbon kırpıntı takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları

	Aşınma oranı için S/N oranı (dB)			Sürtünme katsayısı için S/N oranı (dB)		
Seviye	$A_1B_2C_1$			$A_1B_1C_3$		
	Tahmini	Deneysel	% Sapma	Tahmini	Deneysel	% Sapma
	49,9518	51,675	3,334	5,03692	5,215	3,414

4.4.1.5. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitler

Tablo 4.37’de hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin tribolojik deneylerine ait deney sonuçları ve sinyal/gürültü oranları görülmektedir.

Tablo 4.37. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar

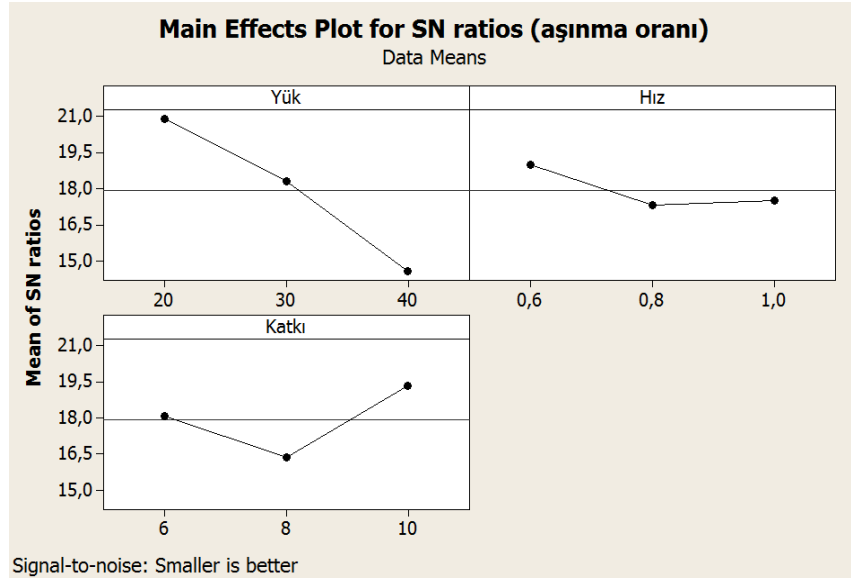
Yük (N)	Hız (m/s)	Katkı (%)	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı	Aşınma S/N oranı (dB)	Sürtünme katsayısı S/N oranı (dB)
20	0,6	6	0,06953	1,109	23,1569	-0,8986
20	0,8	8	0,13082	1,1209	17,6666	-0,9913
20	1	10	0,08062	1,13152	21,8712	-1,0732
30	0,6	8	0,1286	1,02185	17,8154	-0,1878
30	0,8	10	0,09832	1,02269	20,1473	-0,1948
30	1	6	0,14146	1,01525	16,9872	-0,1314
40	0,6	10	0,15836	0,84456	16,0069	1,46737
40	0,8	6	0,19702	0,83623	14,1097	1,55344
40	1	8	0,20807	0,89917	13,6358	0,92312

Tablo 4.38’de aşınma oranı sinyal/gürültü oranı tablosuna bakıldığında yükün aşınma üzerinde en etkili faktör olduğu, katkı oranının ikinci sırada yer aldığını ve en az da hızın etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 4.38. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Katkı
1	20,90	18,99	18,08
2	18,32	17,31	16,37
3	14,58	17,50	19,34
Delta	6,31	1,69	2,97
Rank	1	3	2

Şekil 4.65’te aşınma oranı sinyal/gürültü oranlarına ait sonuçlar görülmektedir.



Şekil 4.65. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri

Yük arttıkça sinyal/gürültü oranının azaldığı yani aşınma oranının arttığı görülmektedir. Hız seviyelerinin sinyal/gürültü oranları birbirine yakın olmakla birlikte optimum hız 0,6 m/s'dir. Katkı oranı için ise optimum seviye %10 olarak görülmektedir.

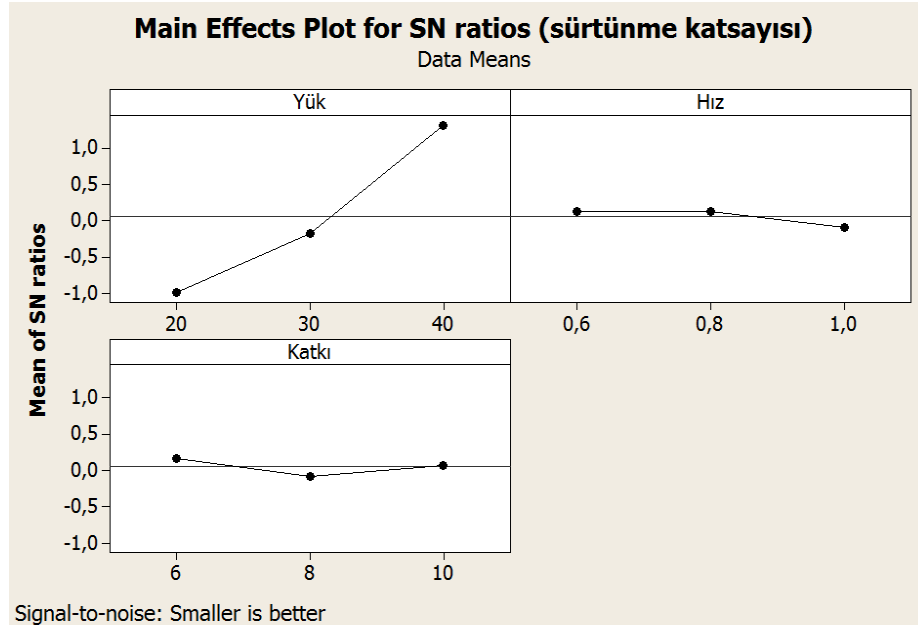
Tablo 4.39'da sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı tablosuna bakıldığında yükün aşınma üzerinde en etkili faktör olduğu, katkı oranının ikinci sırada yer aldığını ve en az da hızın etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 4.39. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Katkı
1	-0,98773	0,12699	0,17446
2	-0,17134	0,12242	-0,08532
3	1,31464	-0,09384	0,06644
Delta	2,30237	0,22084	0,25978
Rank	1	3	2

Şekil 4.66'da grafiklerde sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranlarına ait sonuçlar görülmektedir. Hız ve katkı oranı seviyeleri için sinyal/gürültü oranı değerleri yakınken, yük arttıkça sinyal/gürültü oranı artmaktadır. Artan yüklerle yüzeyler

ısınmakta ve yağlayıcı etkisi göstererek sürtünme katsayısının düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.66. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri

4.4.1.5.1. Varyans analizi

Tablo 4.40'ta hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranlarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.40. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,0139441	0,0139441	0,0069721	27,83	75,69
Hız	2	0,0011441	0,0011441	0,0005721	2,28	6,21
Katkı oranı	2	0,0028317	0,0028317	0,0014158	5,65	15,37
Error	2	0,0005011	0,0005011	0,0002506		2,73
Total	8	0,0184211				

Elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre aşınma üzerinde en büyük etki %75,69 oranıyla yük tarafından meydana gelmektedir [16]. Yük arttıkça aşınma oranı da artmaktadır. Katkı oranı %15,37 etkiye sahipken, hız %6,21 etkiye sahiptir.

Tablo 4.41’de hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayılarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.41. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,103540	0,103540	0,051770	216,88	%97,52
Hız	2	0,001041	0,001041	0,000520	2,18	%0,98
Katkı oranı	2	0,001107	0,001107	0,000553	2,32	%1,04
Error	2	0,000477	0,000477	0,000239		%0,46
Total	8	0,106165				

Sürtünme katsayısı için elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre yükün etkisi %97,52 ile birinci sıradadır. Taguchi analizlerinde bahsedildiği gibi yük arttıkça sürtünme katsayısı azalmaktadır. Diğer faktörlerin etkileri yok denecek kadar azdır.

4.4.1.5.2. Doğrulama testi

Taguchi’nin sinyal/gürültü analizine göre en iyi parametre seviyeleri aşınma oranı için $A_1B_1C_3$, sürtünme katsayısı için ise $A_3B_1C_1$ olarak belirlendi. Bu faktörlerin deneysel ve tahmini sinyal/gürültü oranlarını karşılaştırarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranı tahmini S/N oranı için 4.16 eşitliğinden, sürtünme katsayısı tahmini S/N oranı için 4.17 eşitliğinden faydalanılmıştır. Eşitliklerde; $\hat{\eta}$ tahmin edilen ortalama S/N oranı, \bar{T} toplam deneysel ortalama, \bar{A}_1 , \bar{B}_1 , \bar{B}_2 , \bar{C}_1 , \bar{C}_3 faktörlerin ortalama yanıtlarıdır.

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) \quad (4.16)$$

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_3 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_1 - \bar{T}) \quad (4.17)$$

Sonuçlar tablo 4.42’de verilmektedir. Aşınma oranı doğrulama testi sonucu %2,466, sürtünme katsayısı doğrulama testi sonucu %0,924’lük sapma meydana gelmektedir.

Tablo 4.42. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları

Seviye	Aşınma oranı için S/N oranı (dB)			Sürtünme katsayısı için S/N oranı (dB)		
	A ₁ B ₁ C ₃			A ₃ B ₁ C ₁		
	Tahmini	DeneySEL	% Sapma	Tahmini	DeneySEL	% Sapma
	23,3671	23,958	2,466	1,51238	1,5265	0,924

4.4.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin analizleri

4.4.2.1. Cam elyaf takviyeli kompozitler

Tablo 4.43'te cam elyaf takviyeli kompozitlerin tribolojik deneylerine ait deney sonuçları ve sinyal/gürültü oranları görülmektedir.

Tablo 4.43. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar

Yük (N)	Hız (m/s)	Yönlenme	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı	Aşınma S/N oranı (dB)	Sürtünme katsayısı S/N oranı (dB)
20	0.6	0	0,00028	0,682379	71,06552	3,31949
20	0.8	90	0,00035	0,688429	69,12732	3,242813
20	1	0/90	0,000563	0,635816	64,98397	3,933376
30	0.6	90	0,000909	0,748294	60,82785	2,518549
30	0.8	0/90	0,001408	0,774008	57,02517	2,22509
30	1	0	0,001748	0,690543	55,14792	3,21618
40	0.6	0/90	0,002465	0,70575	52,16441	3,026986
40	0.8	0	0,001818	0,745702	54,80725	2,548691
40	1	90	0,001678	0,67035	55,5025	3,473963

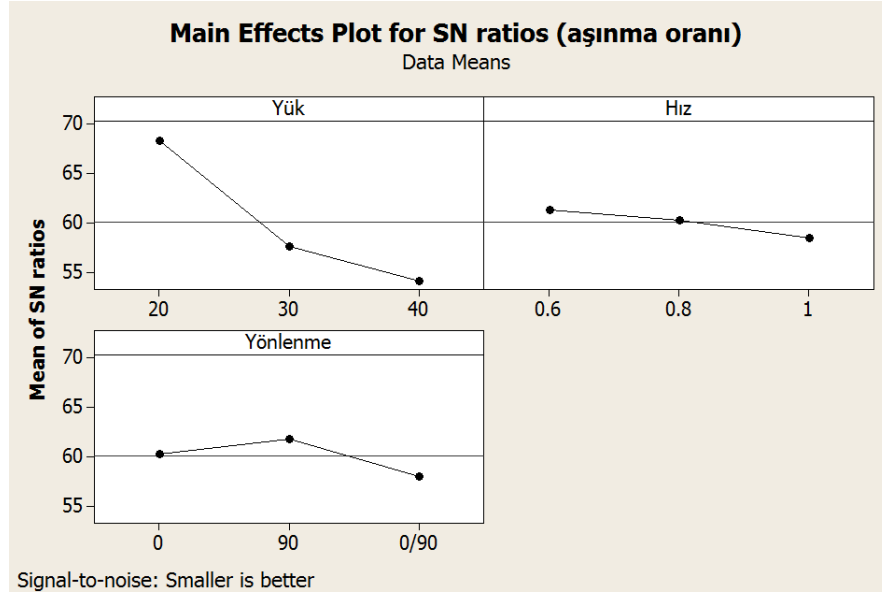
Tablo 4.44'te aşınma oranı sinyal/gürültü oranı tablosuna bakıldığında yükün aşınma üzerinde en etkili faktör olduğu, yönlenmenin ikinci sırada yer aldığını ve en az da hızın etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 4.44. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Yönlenme
1	68,39	61,35	60,34
2	57,67	60,32	61,82
3	54,16	58,54	58,06
Delta	14,23	2,81	3,76
Rank	1	3	2

Şekil 4.67'de aşınma oranı sinyal/gürültü oranlarına ait sonuçlar görülmektedir. Yük arttıkça sinyal/gürültü oranı düşmekte yani aşınma oranı artmaktadır. Hız ve yönlenme

seviyelerinin ise sinyal/gürültü oranı değerleri birbirine yakın değerlerdedir. Hız arttıkça sinyal/gürültü oranı düşmekte ve aşınma oranı artmaktadır. Aşınma oranında hız için optimum değer 0,6 m/s, yönlenme için ise optimum değer 90° yönündedir.



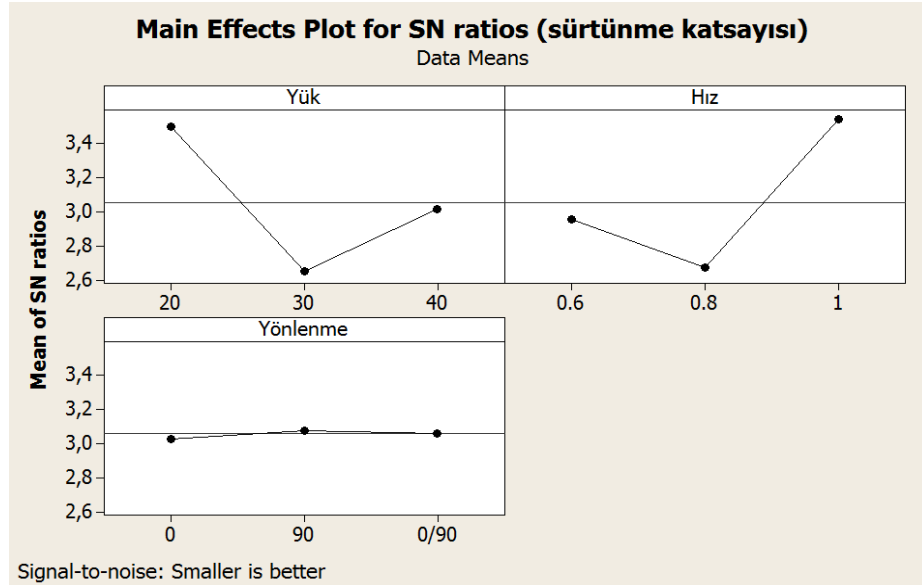
Şekil 4.67. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri

Tablo 4.45'te sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı tablosuna bakıldığında hızın sürtünme katsayısı üzerinde en etkili faktör olduğu, yükün ikinci sırada yer aldığını ve en az da yönlenmenin etkili olduğu görülmektedir. Yönlenme seviyelerinin sinyal/gürültü oranı değerleri birbirlerine oldukça yakındır.

Tablo 4.45. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Yönlenme
1	3,4999	2,955	3,028
2	2,653	2,672	3,078
3	3,017	3,541	3,062
Delta	0,845	0,869	0,050
Rank	2	1	3

Şekil 4.68'de sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranlarına ait sonuçlar görülmektedir. Sürtünme katsayısı için yükte optimum değer 20 N, hız da 1 m/s ve yönlenmede aşınma oranında olduğu gibi 90° yönündedir.



Şekil 4.68. Cam elyaf takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri

4.4.2.1.1. Varyans analizi

Tablo 4.46'da cam elyaf takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranlarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.46. Cam elyaf takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,0000038	0,0000038	0,0000019	11,32	82,6
Hız	2	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,10	2,19
Yönlenme	2	0,0000004	0,0000004	0,0000002	1,12	8,69
Error	2	0,0000003	0,0000003	0,0000002		6,52
Total	8	0,0000046				

Elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre aşınma üzerinde en büyük etki %82,16 oranıyla literatüre benzer şekilde [5,41] yüke aittir. Yük arttıkça aşınma oranı da artmaktadır. Yönlenme %8,69 ile ikinci sıradayken, hız %2,19 ile üçüncü sıradadır.

Tablo 4.47'de cam elyaf takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayılarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.47. Cam elyaf takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,0071203	0,0071203	0,0035602	16,83	46,61
Hız	2	0,0077073	0,0077073	0,0038537	18,22	50,45
Yönlenme	2	0,0000239	0,0000239	0,0000119	0,06	0,15
Error	2	0,0004231	0,0004231	0,0002115		2,76
Total	8	0,0152746	0,0152746			

Sürtünme katsayısı için elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre hız %50,45 oranıyla birinci sırada etkiliyken, %46,61 etki oranıyla yük ikinci sırada yer almaktadır. Yönlenme ise %0,15 gibi çok düşük bir etkiye sahiptir.

4.4.2.1.2. Doğrulama testi

Taguchi'nin sinyal/gürültü analizine göre en iyi parametre seviyeleri aşınma oranı için $A_1B_2C_2$, sürtünme katsayısı için ise $A_1B_3C_2$ olarak belirlendi. Bu faktörlerin deneysel ve tahmini sinyal/gürültü oranlarını karşılaştırarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranı tahmini S/N oranı için 4.18 eşitliğinden, sürtünme katsayısı tahmini S/N oranı için 4.19 eşitliğinden faydalanılmıştır. Eşitliklerde; $\hat{\eta}$ tahmin edilen ortalama S/N oranı, \bar{T} toplam deneysel ortalama, \bar{A}_1 , \bar{B}_2 , \bar{B}_3 , \bar{C}_2 faktörlerin ortalama yanıtlarıdır.

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_2 - \bar{T}) + (\bar{C}_2 - \bar{T}) \quad (4.18)$$

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_3 - \bar{T}) + (\bar{C}_2 - \bar{T}) \quad (4.19)$$

Sonuçlar tablo 4.48'de verilmektedir. Aşınma oranı doğrulama testi sonucu %1,821, sürtünme katsayısı doğrulama testi sonucu %4,37'lik sapma meydana gelmektedir.

Tablo 4.48. Cam elyaf takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları

	Aşınma oranı için S/N oranı (dB)			Sürtünme katsayısı için S/N oranı (dB)		
Seviye	$A_1B_2C_2$			$A_1B_3C_2$		
	Tahmini	Deneysel	% Sapma	Tahmini	Deneysel	% Sapma
	70,3865	69,12732	1,821	4,00592	4,189	4,37

4.4.2.2. Karbon elyaf takviyeli kompozitler

Tablo 4.49'da cam elyaf takviyeli kompozitlerin tribolojik deneylerine ait deney sonuçları ve sinyal/gürültü oranları görülmektedir.

Tablo 4.49. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar

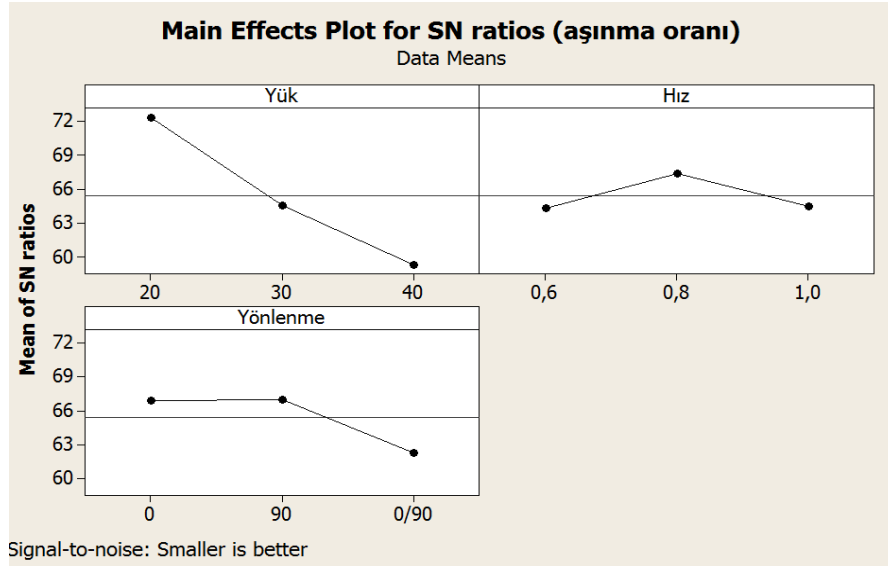
Yük (N)	Hız (m/s)	Yönlenme	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı	Aşınma S/N oranı (dB)	Sürtünme katsayısı S/N oranı (dB)
20	0.6	0	0,000225	0,296617	72,95634964	10,55607924
20	0.8	90	0,00015	0,388789	76,47817482	8,205720621
20	1	0/90	0,000412	0,3414286	67,70205568	9,334002054
30	0.6	90	0,0006	0,3555	64,43697499	8,983207899
30	0.8	0/90	0,000659	0,3968892	63,62229171	8,026614376
30	1	0	0,000525	0,4011677	65,59681393	7,933480829
40	0.6	0/90	0,001648	0,4336	55,66085585	7,258214529
40	0.8	0	0,000779	0,4828782	62,16925085	6,323248016
40	1	90	0,000981	0,529032	60,16661985	5,530361153

Tablo 4.50'de aşınma oranı sinyal/gürültü oranı tablosuna bakıldığında literatüre benzer şekilde [10] yükün aşınma üzerinde en etkili faktör olduğu, yönlenmenin ikinci sırada yer aldığını ve en az da hızın etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 4.50. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Yönlenme
1	72,38	64,35	66,91
2	64,55	67,42	67,03
3	59,33	64,49	62,33
Delta	13,05	3,07	4,70
Rank	1	3	2

Şekil 4.69'da aşınma oranı sinyal/gürültü oranlarına ait sonuçlar görülmektedir.



Şekil 4.69. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri

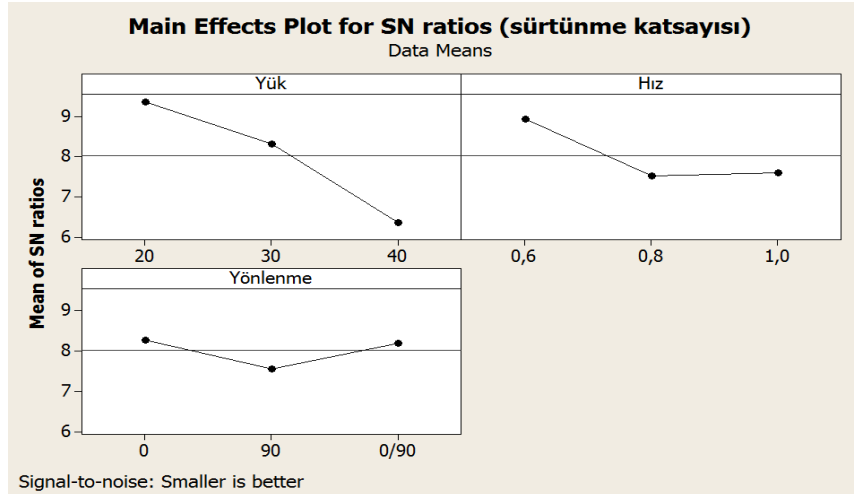
Yük arttıkça sinyal/gürültü oranları düşmekte ve aşınma oranı artmaktadır. Aşınma oranında hız için optimum değer 0,8 m/s, yönlenme için ise 90°'dir.

Tablo 4.51'de sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı tablosuna bakıldığında yükün sürtünme katsayısı üzerinde en etkili faktör olduğu, hızın ikinci sırada yer aldığını ve en az da yönlenmenin etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 4.51. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Yönlenme
1	9,365	8,933	8,271
2	8,314	7,519	7,573
3	6,371	7,599	8,206
Delta	2,995	1,414	0,698
Rank	1	2	3

Şekil 4.70'te sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranlarına ait sonuçlar görülmektedir. Yük arttıkça sinyal/gürültü oranı düşmekte sürtünme katsayısı da artmaktadır. Sürtünme katsayısı analizlerinde hız için optimum değer 0,6 m/s, yönlenme için ise 0°'dir. Yönlenme seviyeleri sinyal/gürültü oranları birbirine yakındır.



Şekil 4.70. Karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri

4.4.2.2.1. Varyans analizi

Tablo 4.52’de karbon elyaf takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranlarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.52. Karbon elyaf takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,0000012	0,0000012	0,0000006	21,08	75
Hız	2	0,0000001	0,0000001	0,0000001	2,41	6,25
Yönlenme	2	0,0000003	0,0000003	0,0000001	4,88	18,75
Error	2	0,0000001	0,0000001	0,0000000		0
Total	8	0,0000016				

Elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre aşınma üzerinde en büyük etki %75 oranıyla yüke aittir. Yönlenme %18,75 ile ikinci sıradayken, hız %6,25 ile üçüncü sıradadır. Tablo 4.53’te karbon elyaf takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayılarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.53. Karbon elyaf takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,0307316	0,0307316	0,0153658	73,93	75,3
Hız	2	0,0075559	0,0075559	0,0037779	18,18	18,3
Yönlenme	2	0,0021050	0,0021050	0,0010525	5,06	5,15
Error	2	0,0004157	0,0004157	0,0002078		1,25
Total	8	0,0408081	0,0408081			

Sürtünme katsayısı için elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre yük %75,3 oranıyla birinci sırada etkiliyken, %18,3 etki oranıyla hız ikinci sırada yer almaktadır. Yönlenme ise %5,15 oranında etkilidir.

4.4.2.2.2. Doğrulama testi

Taguchi'nin sinyal/gürültü analizine göre en iyi parametre seviyeleri aşınma oranı için $A_1B_2C_2$, sürtünme katsayısı için ise $A_1B_1C_1$ olarak belirlendi. Bu faktörlerin deneysel ve tahmini sinyal/gürültü oranlarını karşılaştırarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranı tahmini S/N oranı için 4.20 eşitliğinden, sürtünme katsayısı tahmini S/N oranı için 4.21 eşitliğinden faydalanılmıştır. Eşitliklerde; $\hat{\eta}$ tahmin edilen ortalama S/N oranı, \bar{T} toplam deneysel ortalama, \bar{A}_1 , \bar{B}_1 , \bar{B}_2 , \bar{C}_1 , \bar{C}_2 faktörlerin ortalama yanıtlarıdır.

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_2 - \bar{T}) + (\bar{C}_2 - \bar{T}) \quad (4.20)$$

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_1 - \bar{T}) \quad (4.21)$$

Sonuçlar tablo 4.54'te verilmektedir. Aşınma oranı doğrulama testi sonucu %1,315, sürtünme katsayısı doğrulama testi sonucu %0,2'lik sapma meydana gelmektedir.

Tablo 4.54. Karbon elyaf takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları

Seviye	Aşınma oranı için S/N oranı (dB)			Sürtünme katsayısı için S/N oranı (dB)		
	$A_1B_2C_2$			$A_1B_1C_1$		
	Tahmini	Deneysel	% Sapma	Tahmini	Deneysel	% Sapma
	75,9873	77	1,315	10,5352	10,556	0,2

4.4.2.3. Keten iplik takviyeli kompozitler

Tablo 4.55'te keten iplik takviyeli kompozitlerin tribolojik deneylerine ait deney sonuçları ve sinyal/gürültü oranları görülmektedir.

Tablo 4.55. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait Taguchi ortogonal dizisi ve deneysel sonuçlar

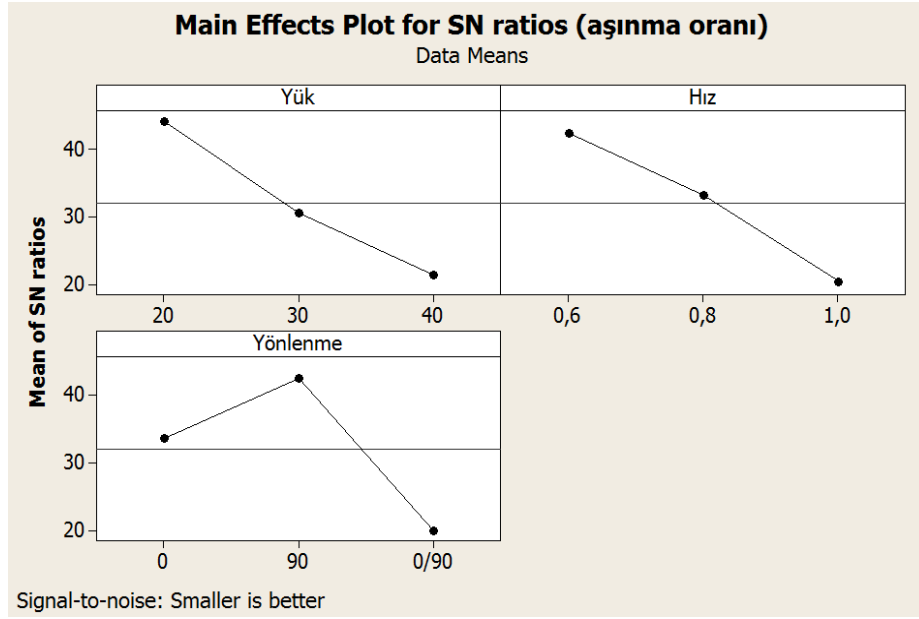
Yük (N)	Hız (m/s)	Yönlenme	Aşınma Oranı (mm ³ /m)	Sürtünme Katsayısı	Aşınma S/N oranı (dB)	Sürtünme katsayısı S/N oranı (dB)
20	0.6	0	0,0015	0,91	56,4782	0,819172
20	0.8	90	0,00154	0,92	56,2496	0,724243
20	1	0/90	0,1	0,94	20	0,537443
30	0.6	90	0,0028333	0,965	50,954	0,309454
30	0.8	0/90	0,1	0,96	20	0,354575
30	1	0	0,08875	0,86	21,0366	1,31003
40	0.6	0/90	0,100091	0,97	19,9921	0,264565
40	0.8	0	0,0655	0,88	23,6752	1,11035
40	1	90	0,0945	0,9	20,4914	0,91515

Tablo 4.56’da aşınma oranı sinyal/gürültü oranı tablosuna bakıldığında yükün aşınma üzerinde en etkili faktör olduğu, yönlenmenin ikinci sırada yer aldığını ve en az da hızın etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 4.56. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Yönlenme
1	44,24	42,47	33,73
2	30,66	33,31	42,56
3	21,39	20,51	20,00
Delta	22,86	21,97	22,57
Rank	1	3	2

Şekil 4.71’de grafiklerde aşınma oranı sinyal/gürültü oranlarına ait sonuçlar görülmektedir. Aşınma oranı grafiklerinden yük ve hız arttıkça sinyal/gürültü oranlarının azaldığı görülmektedir. Bu da aşınma oranının artması demektir. Yönlenme için optimum değer ise 90° yönündedir. En düşük sinyal/gürültü oranı ise 0/90 yönlenmedir.



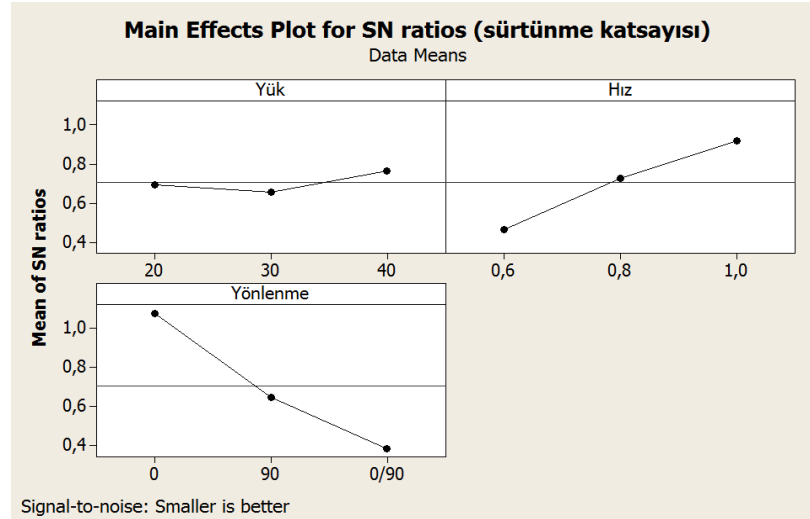
Şekil 4.71. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait aşınma oranı sinyal/gürültü oranı grafikleri

Tablo 4.57’de sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı tablosuna bakıldığında yönlenmenin sürtünme katsayısı üzerinde en etkili faktör olduğu, hızın ikinci sırada yer aldığını ve en az da yükün etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 4.57. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı sonuç tablosu

Seviye	Yük	Hız	Yönlenme
1	0,6936	0,4644	1,0798
2	0,6580	0,7297	0,6496
3	0,7634	0,9209	0,3855
Delta	0,1053	0,4565	0,6943
Rank	3	2	1

Şekil 4.72’de grafiklerde sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranlarına ait sonuçlar görülmektedir. Yük için seviyeler arası sinyal/gürültü oranları birbirine yakın olmakla birlikte optimum değer 40 N olarak görülmektedir. Sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafiklerine bakıldığında artan hızla sinyal/gürültü oranının arttığı görülmektedir. Yüksek hızlarda ısınan yüzeyin yağlayıcı etkisi sonucu sürtünme katsayısının düştüğü düşünülmektedir. Sürtünme katsayısı için en iyi yönlenme seviyesi ise 0°’dir.



Şekil 4.72. Keten iplik takviyeli kompozitlere ait sürtünme katsayısı sinyal/gürültü oranı grafikleri

4.4.2.3.1. Varyans analizi

Tablo 4.58’de keten iplik takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranlarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.58. Keten iplik takviyeli kompozit deneylerinin aşınma oranı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,0041331	0,0041331	0,0020666	28,99	24,40
Hız	2	0,0054893	0,0054893	0,0027447	38,50	32,4
Yönlenme	2	0,0071731	0,0071731	0,0035865	50,31	42,34
Error	2	0,0001426	0,0001426	0,0000713		0,86
Total	8	0,0169381				

Elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre aşınma üzerinde en büyük etki %42,34 oranıyla yönlenmeye aittir. Hız %32,4 ile ikinci sıradayken, yük %24,40 ile üçüncü sıradadır.

Tablo 4.59’da keten iplik takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayılarına ait varyans analizi sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.59. Keten iplik takviyeli kompozit deneylerinin sürtünme katsayısı ANOVA sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	% etki
Yük	2	0,0002056	0,0002056	0,0001028	1,00	1,7
Hız	2	0,0035389	0,0035389	0,0017694	17,22	29,11
Yönlenme	2	0,0082056	0,0082056	0,0041028	39,92	67,5
Error	2	0,0002056	0,0002056	0,0001028		1,7
Total	8	0,0121556				

Sürtünme katsayısı için elde edilen varyans analizi sonuçlarına göre yönlenme %67,5 oranıyla birinci sırada etkiliyken, %29,11 etki oranıyla hız ikinci sırada yer almaktadır. Yük ise %1,7 gibi çok düşük bir etki oranına sahiptir.

4.4.2.3.2. Doğrulama testi

Taguchi'nin sinyal/gürültü analizine göre en iyi parametre seviyeleri aşınma oranı için $A_1B_1C_2$, sürtünme katsayısı için ise $A_3B_3C_1$ olarak belirlendi. Bu faktörlerin deneysel ve tahmini sinyal/gürültü oranlarını karşılaştırarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranı tahmini S/N oranı için 4.22 eşitliğinden, sürtünme katsayısı tahmini S/N oranı için 4.23 eşitliğinden faydalanılmıştır. Eşitliklerde; $\hat{\eta}$ tahmin edilen ortalama S/N oranı, \bar{T} toplam deneysel ortalama, \bar{A}_1 , \bar{A}_3 , \bar{B}_1 , \bar{B}_3 , \bar{C}_1 , \bar{C}_2 faktörlerin ortalama yanıtlarıdır.

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_2 - \bar{T}) \quad (4.22)$$

$$\hat{\eta} = \bar{T} + (\bar{A}_3 - \bar{T}) + (\bar{B}_3 - \bar{T}) + (\bar{C}_1 - \bar{T}) \quad (4.23)$$

Sonuçlar tablo 4.60'ta verilmektedir. Aşınma oranı doğrulama testi sonucu %3,270, sürtünme katsayısı doğrulama testi sonucu %7,791'lik sapma meydana gelmektedir.

Tablo 4.60. Keten iplik takviyeli kompozit için doğrulama deney sonuçları

	Aşınma oranı için S/N oranı (dB)			Sürtünme katsayısı için S/N oranı (dB)		
Seviye	$A_1B_1C_2$			$A_3B_3C_1$		
	Tahmini	Deneysel	% Sapma	Tahmini	Deneysel	% Sapma
	65,0875	63,026	3,270	1,35408	1,4685	7,791

Genel olarak Taguchi analizlerinde sinyal/gürültü oranlarında yük seviyeleri arasında belirgin farklılıklar varken, diğer seviyelerin sinyal/gürültü oranları birbirlerine yakın çıktı.

ANOVA analizleri sonucu hem aşınma oranı hem de sürtünme katsayısı üzerindeki etken faktör yük olmuştur. Genellikle yük artışıyla tribolojik özellikler kötüleşmektedir. Bazen de artan yükle ısınan yüzeyler sonucu sürtünme katsayısında düşüş gözlenmektedir.

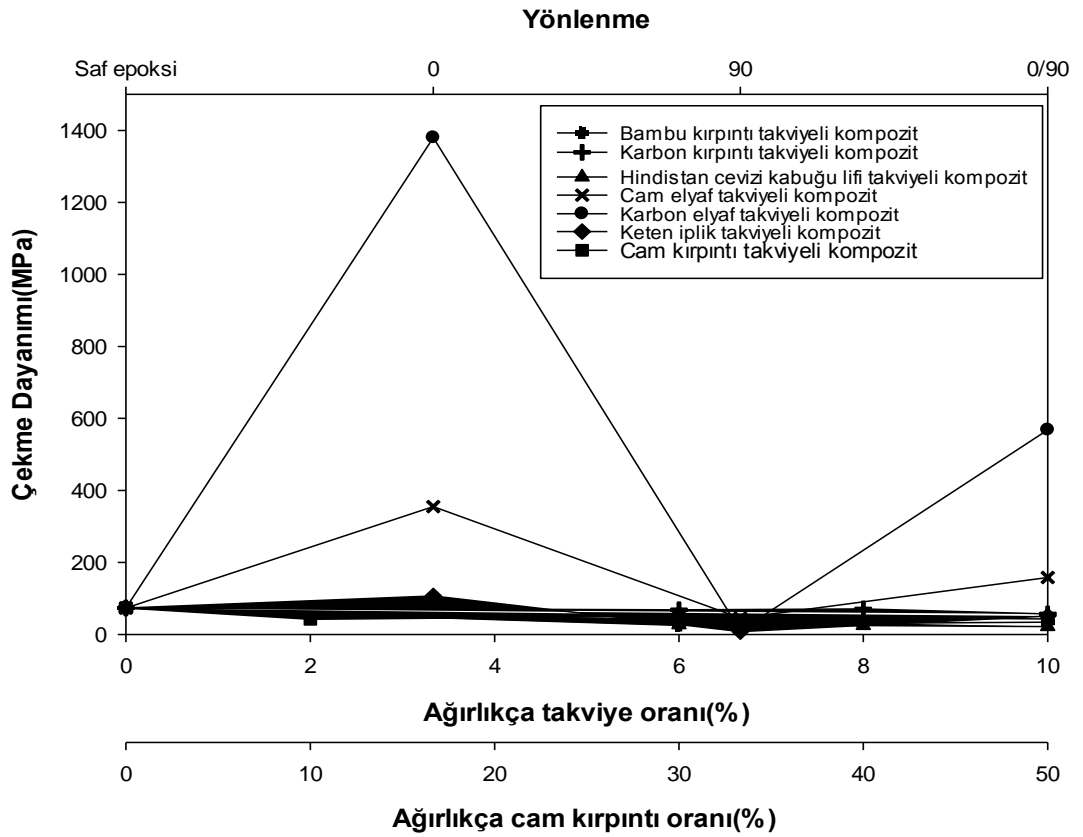
Doğrulama deneylerinde optimum parametre seviyeleriyle yapılan ve elde edilen sonuçlar, tahmini değerlerle uyum içerisindedir.

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde mekanik ve tribolojik deneysel sonuçlara ve sonuçların tartışılmasına yer verilmektedir.

5.1. Mekanik deneylerinin değerlendirilmesi

Yapılan çekme deneyleri sonucu kompozitlere ait elde edilen çekme dayanımına karşılık ağırlıkça takviye oranına ve yönlenmeye göre sonuçlar şekil 5.1’de görülmektedir. Ağırlıkça takviye oranı cam kırpıntıda %10-50 aralığında, diğer kırpıntı takviyelerde ise %6-10 aralığında olmaktadır.



Şekil 5.1. Kompozitlerin takviye oranına ve yönlenmeye göre çekme dayanımları

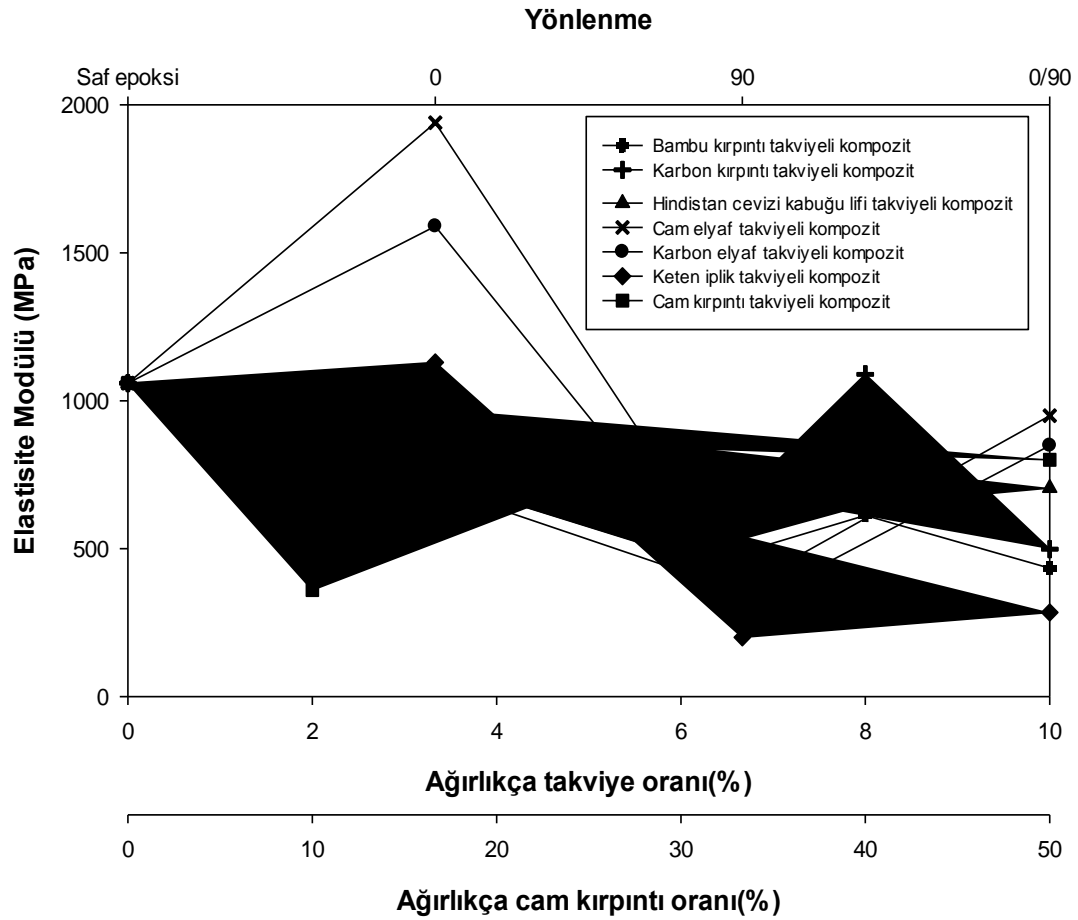
Şekilden genel olarak tüm kırpıntı takviye malzemelerinin ve oranlarının saf epoksinin çekme dayanımının altında olduğu görülmektedir. Saf epoksinin dayanımına en yakın değerler karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerde görülmektedir. Kırpıntı takviyeli kompozitlerdeki en düşük çekme dayanımı değerleri ise hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerde görülmektedir. Cam kırpıntı, karbon kırpıntı ve hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitler benzer profil izlemektedir. Minimum takviye değerinde düşüş, orta değerde artış ve maksimum takviye değerinde tekrar düşüş gözlenmektedir. Bunun da sebebi belli bir takviye miktarından fazlası için epoksinin bağlayıcılık özelliğinin azalması, takviye malzemesine göre matris yüzey alanının azalarak takviyeleri bir arada tutamaması, boşlukların ve takviyelerin topaklaşarak oluşturdukları gerilme yığılma bölgeleriyle çentik etkisi oluşturmasıdır. Benzer durum literatürde de ortaya çıkmaktadır [17, 19, 23]. Diğer taraftan bambu kırpıntı takviyesi arttıkça çekme dayanımında da artış gözlenmektedir. Bu sonuçlar literatürle uyum içerisindedir [26, 30].

Saf epoksinin çekme dayanımıyla karşılaştırıldığında en düşük değer %10 hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerde %70 oranında düşüşle 22 MPa, en yüksek değer de %8'lik düşüşle %8 karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerde 70,761 MPa olarak ölçülmüştür.

Elyaf takviyeli kompozitlerde en yüksek çekme dayanımı değerleri 0° yönünde izlenmektedir. Bunun da sebebi literatürde de bahsedildiği gibi [60, 63] bu yönde dayanımın elyaf boyu tarafından kontrol edilmesidir. Bu yönü literatüre benzer şekilde [35, 38] 0/90 ve 90° izlemektedir. En büyük çekme dayanımı %1777 gibi büyük bir artışla 1380 MPa olarak 0° yönünde karbon elyaf takviyeli kompozitlerde görülmektedir. Elyaf takviyeli kompozitlerde en düşük çekme dayanımı değeri ise 90° yönlenmeli keten iplik takviyeli kompozitlerde %89 düşüş ile 8 MPa olarak ölçülmüştür.

Yapılan çekme deneyleri sonucu kompozitlere ait elde edilen elastisite modülüne karşılık ağırlıkça takviye oranına ve yönlenmeye göre çizilen eğriler şekil 5.2'de görülmektedir. Kırpıntı takviyelilerde saf epoksiye göre sadece %8 karbon kırpıntı

takviyesiyle elastisite modülünde %3'lük artış görülmektedir. Çekme dayanımı özelliklerine benzer şekilde elastisite modülü değerlerinde bambu ve karbon kırpıntı takviyesinde %8 takviyede en yüksek değerler görülmektedir. Bu durum tıpkı literatürde olduğu gibi [26, 30] belli bir takviye oranından sonra epoksinin bağlayıcılığının yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. En düşük elastisite modülü değeri ise %10 cam kırpıntı takviyeli kompozitlerde %66 düşüşle 360 MPa değerinde ölçülmüştür.

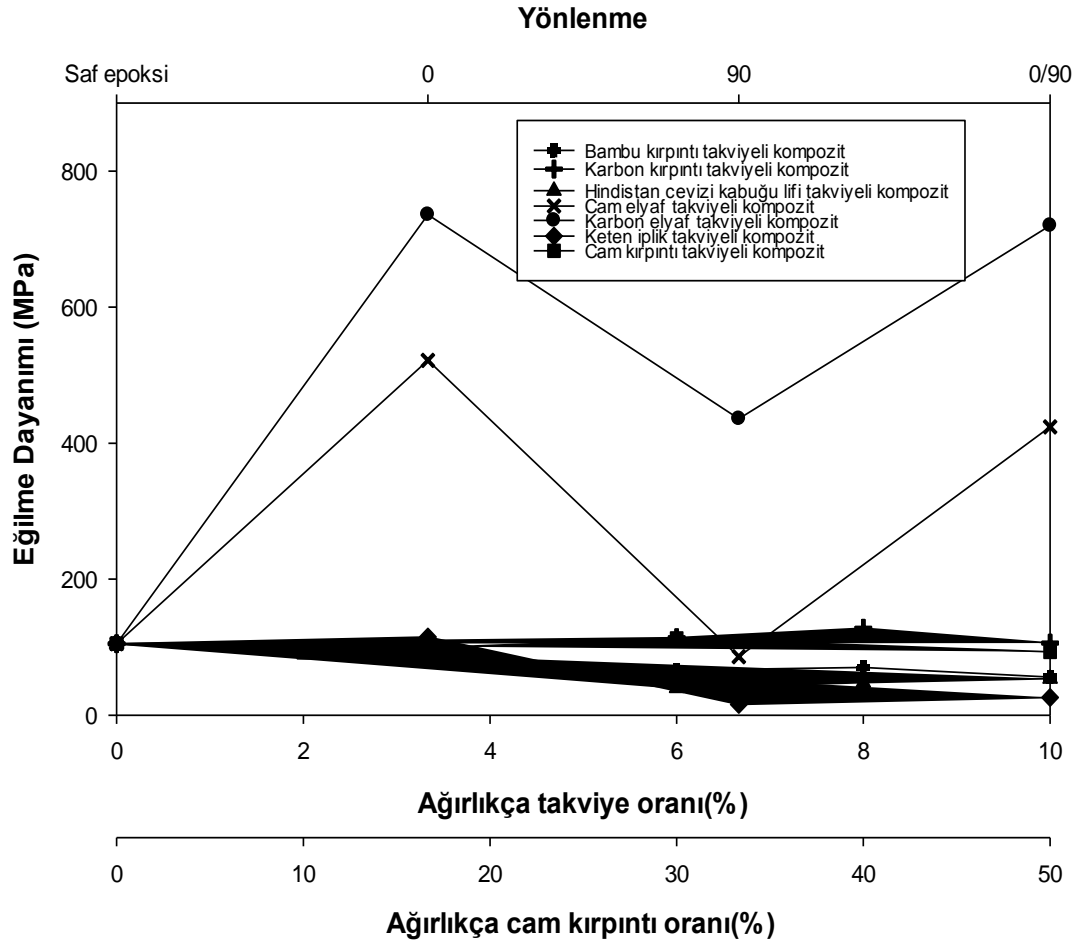


Şekil 5.2. Kompozitlerin takviye oranına ve yönlenmeye göre elastisite modülleri

Çekme dayanımlarına benzer şekilde elyaf takviyelilerde 0° yönünde en yüksek elastisite modüllerine rastlanmaktadır. Bunun da nedeni bu yönde mukavemeti elyaf boyunun kontrol etmesidir [60,63]. Ayrıca cam elyaf takviyeli kompozitlerin her yönde en yüksek elastisite modülüne sahip olduğu görülmektedir. En yüksek elastisite modülü değeri %50 artışla 0° yönünde cam elyaf takviyeli kompozitlerde 1940 MPa

değerinde ölçülmüştür. En düşük elastisite modülü değeri ise 90° yönlenmeli keten iplik takviyeli kompozitlerde %81'lik düşüşle 200 MPa olarak ölçülmüştür.

Yapılan eğme deneyleri sonucu kompozitlere ait elde edilen eğme dayanımına karşılık ağırlıkça takviye oranına ve yönlenmeye göre çizilen eğriler şekil 5.3'te görülmektedir.



Şekil 5.3. Kompozitlerin takviye oranına ve yönlenmeye göre eğme dayanımları

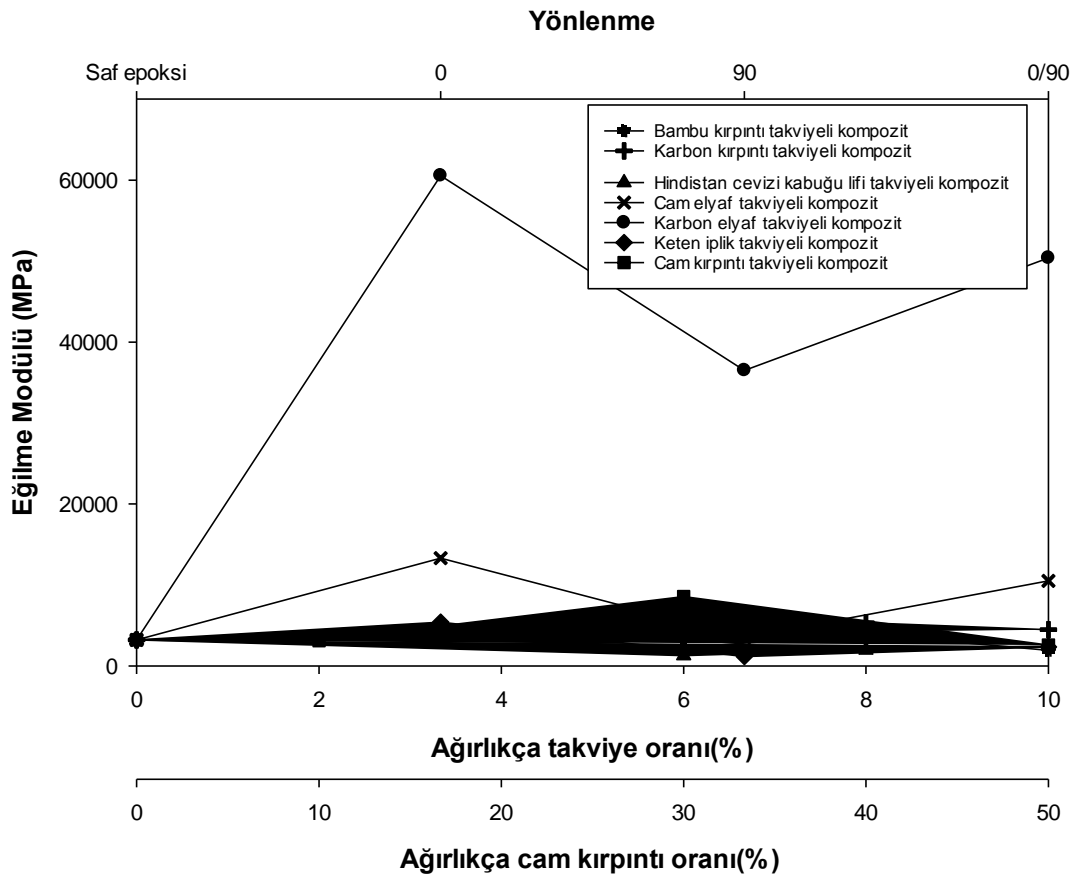
Kırpıntı takviyeliler arasında saf epoksinin dayanımına en yakın değerler karbon kırpıntı ve cam kırpıntı takviyeli kompozitlerde görülmektedir. Çekme dayanımına benzer davranışlar görülmektedir. Kırpıntı takviyeli kompozitlerdeki en düşük eğme dayanımı değerleri ise hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerde görülmektedir. Cam kırpıntı, karbon kırpıntı ve bambu kırpıntı takviyeli kompozitler benzer profil izlemektedir. Yani minimum takviye değerinde düşüş, orta değerinde artış ve maksimum takviye değerinde tekrar düşüş gözlenmektedir. Bunun da sebebi

literatürde de bahsedildiği gibi [17, 26, 30] belli bir takviye miktarından fazlası için epoksinin bağlayıcılık özelliğinin azalması, takviye ve matris arasındaki etkileşimin zayıflayarak dış yükleri taşıyabilme kabiliyetinin düşmesidir. Diğer taraftan hindistan cevizi kabuğu lifi takviyesi arttıkça literatürde olduğu gibi [22, 25] eğme dayanımında da artış gözlenmektedir.

Saf epoksinin eğme dayanımıyla karşılaştırıldığında en düşük değer %6 hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerde %62 oranında düşüşle 40 MPa, en yüksek değer de %22'lik artışla %8 karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerde 128 MPa olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak karbon kırpıntı takviyesinin her oranı için eğilme dayanımında iyileşme gözlenirken, cam kırpıntı takviyesinde sadece %30 oranında iyileşme gözlenmektedir. Diğer takviyelerin eğilme dayanımını düşürdüğü gözlenmektedir.

Çekme dayanımlarına benzer şekilde elyaf takviyelilerde en iyi performans 0° yönünde daha sonra $0/90$ ve en son olarak ta 90° yönünde görülmektedir. Literatürde de benzer sonuçlar vardır [60, 62]. En yüksek eğilme dayanımı değerlerine karbon elyaf takviyeli kompozitlerde rastlanmaktadır. En düşük değerler ise keten iplik takviyeli kompozitlerde görülmektedir. En yüksek eğilme dayanımı 0° yönlene karbon elyaf takviyeli kompozitlerde %600 artarak 736 MPa değerinde, en düşük eğilme dayanımı ise 90° yönlene keten iplik takviyeli kompozitlerde %84 azalarak 16 MPa değerindedir. Genel olarak keten iplik ve cam elyafın 90° yönlene ve keten ipliğın $0/90$ yönlene dışında takviyelendirmelerin eğilme dayanımı iyileştirdiği görülmektedir.

Yapılan eğme deneyleri sonucu kompozitlere ait elde edilen eğilme modülüne karşılık ağırlıkça takviye oranına ve yönlene göre çizilen eğriler şekil 5.4'te görülmektedir.



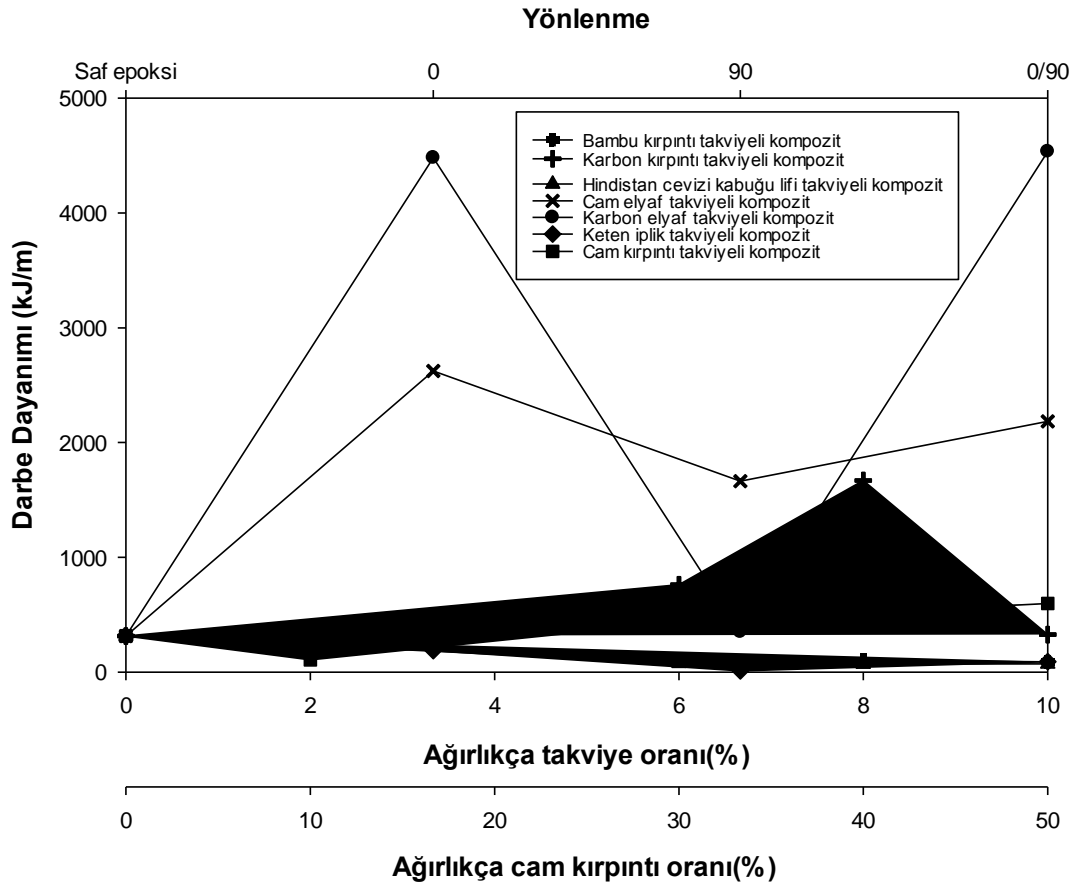
Şekil 5.4. Kompozitlerin takviye oranına ve yönlenmeye göre eğilme modülleri

Eğilme modülü profillerine bakıldığında elastisite modülüne benzer eğriler görülmektedir. Eğilme modüllerinin genelinde saf epoksiye göre artış gözlenmektedir. Kırpıntı takviyeliler arasında en yüksek eğilme modülü değeri %30 cam kırpıntı takviyeli kompozitlerde %166 artışla 8560 MPa olarak ölçülmüştür. En düşük eğilme modülü %6 hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerde %60'lık düşüşle 1280 MPa olarak ölçülmüştür. %8 takviyeye kadar artan karbon kırpıntıyla ve %30 takviyeye kadar artan cam kırpıntıyla eğilme modülünün yükseldiği ve malzemelerin gevrekleştiği görülmektedir. Bu oranları geçtikten sonra eğilme modüllerindeki düşüşün sebebi matris ve takviye malzemeleri arasındaki bağın zayıflayarak yük taşıyabilme kabiliyetinin azalmasıdır.

Elyaf takviyeli kompozitlerde eğilme dayanımına benzer sonuçlarla karşılaşılmaktadır. En yüksek eğilme modülleri 0° yönünde daha sonra 0/90 ve en son olarak ta 90° yönünde görülmektedir. En yüksek eğilme modülü değerlerine karbon

elyaf takviyeli kompozitlerde rastlanmaktadır. En düşük değerler ise keten iplik takviyeli kompozitlerde görülmektedir. En yüksek eğilme modülü 0° yönlendirilmiş karbon elyaf takviyeli kompozitlerde %1786 artarak 60550 MPa değerinde, en düşük eğilme modülü ise 90° yönlendirilmiş keten iplik takviyeli kompozitlerde %64 azalarak 1150 MPa değerindedir.

Şekil 5.5'te kompozitlerin katkı oranına ve yönlendirmeye göre darbe dayanımı değerleri görülmektedir. Normal oda şartları altında yapılan deneylerde kırpıntı takviyelilerde ve saf epoksida tüm deneyler 5,5 J enerjiye sahip çekiçle gerçekleştirilmiştir. Karbon ve cam için 90° yönlendirilmiş kompozitler 5,5 J enerjiye sahip çekiçle test edilirken 0° ve $0/90$ yönlendirmeye ait kompozitlerin deneyleri 22 J'lük çekiçle gerçekleştirilmiştir. Keten iplik takviyeli kompozitler ise her yön için 5,5 J enerjiye sahip çekiçle test edilmiştir.

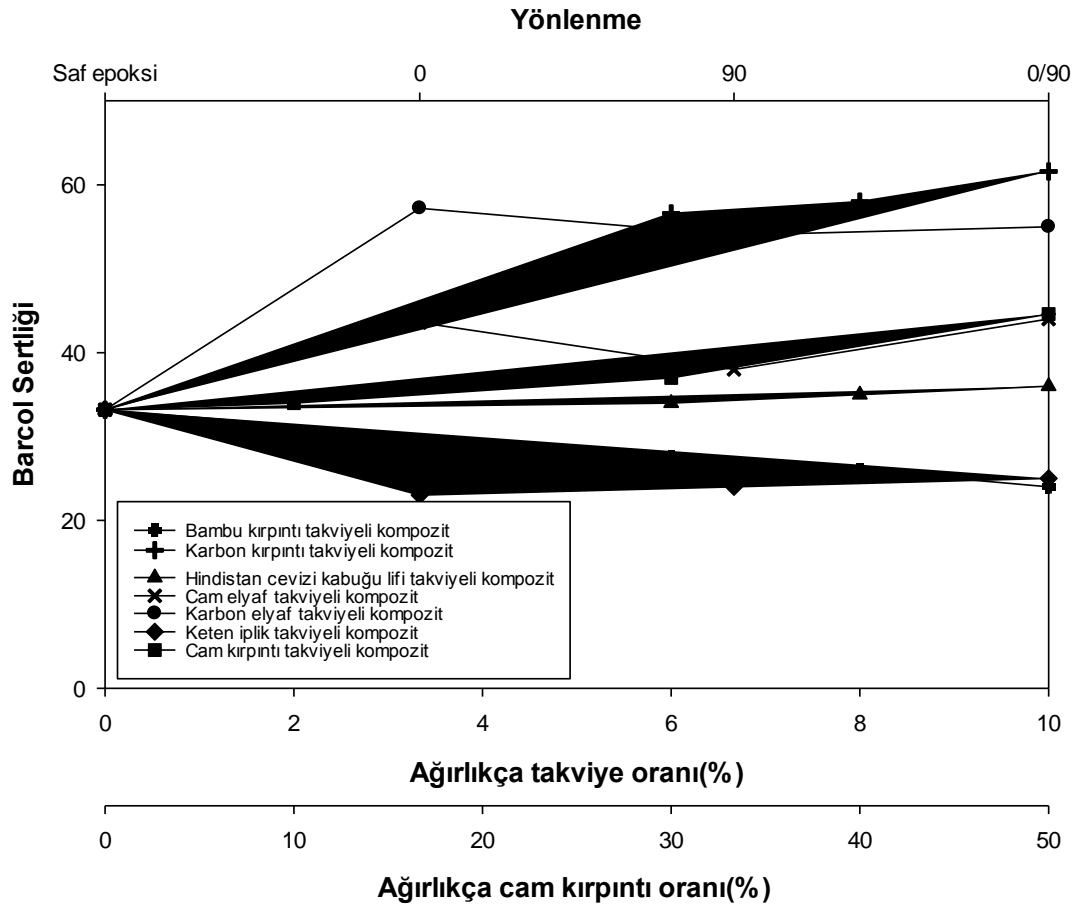


Şekil 5.5. Kompozitlerin katkı oranına ve yönlendirmeye göre darbe dayanımları

Kırpıntı takviyelilerde saf epoksiye bambu ve hindistan cevizi kabuğu lifi takviyesinin darbe dayanımını düşürdüğü, cam kırpıntı takviyesinin %10'u aşıttan sonra iyileştirdiği ve karbon kırpıntının ise %8 oranına kadar arttırdığı görülmektedir. Bu sonuçlar literatürle de benzeşmektedir [17,19,20].

Elyaf takviyelilerde genel olarak darbe deneylerinde de çekme ve eğme deney sonuçlarına benzer şekilde en iyi dayanımlar 0° yönünde en kötü dayanımlar ise 90° yönünde görülmektedir. Keten iplik takviyesinin darbe dayanımını düşürdüğü cam elyaf ve karbon elyaf takviyelerinin ise iyileştirdiği görülmektedir. Diğer takviyelerle karşılaştırıldığında karbon elyaf çekme ve eğme dayanımlarında olduğu gibi darbede de en üstün özelliklere sahiptir.

Şekil 5.6'da kompozitlere ait katkı oranına ve yönlenmeye göre sertlik değerleri görülmektedir. Kırpıntı takviyelilerde en çok karbon kırpıntı takviyesiyle sertlikte ciddi bir artış olduğu görülmektedir. İkinci sırada cam kırpıntı takviyesinin de sertliği arttırdığı görülmektedir. Bu sonuçlar çalışmadaki diğer mekanik deneyleri ve tribolojik deneyleri de desteklemektedir. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyesinin ise sertlik üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı söylenebilir. Diğer taraftan bambu kırpıntı takviyesi arttıkça sertliğin düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 5.6. Kompozitlerin takviye oranına ve yönlenmeye göre sertlik değerleri

Sertlik değeri aşınma direncini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin sertlikleriyle, elde edilen tribolojik sonuçlar örtüşmektedir. Yani kırpıntı takviyeliler arasında en yüksek sertlik değerlerine sahip karbon kırpıntı takviyeli kompozitler tribolojik olarak en iyi performansa sahiptir.

Karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde tüm yönlenmeler için sertlik değerlerinin saf epoksiye göre daha yüksek olduğu, keten iplik için ise tüm yönlenmeler için daha düşük olduğu görülmektedir. En yüksek sertlik değerleri karbon elyaf takviyeli kompozitlerde ve 0° yönünde elde edilmiştir.

Sertlik değeri aşınma direncini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Elyaf takviyeli kompozitlerin sertlikleriyle, elde edilen tribolojik sonuçlar örtüşmektedir. Yani elyaf takviyeliler arasında en yüksek sertlik değerlerine sahip olan karbon elyaf

takviyeli kompozitler yapılan çalışma sonuçlarına göre tribolojik olarak ta en iyi performansa sahiptir.

Genel olarak kırpıntı takviyeli ve elyaf takviyeli kompozitler tüm mekanik özellikler (çekme, eğme, darbe, sertlik) bakımından karşılaştırıldığında elyaf takviyelilerin daha üstün olduğu görülmektedir. Bunun da nedeni kırpıntıya nazaran elyafların sürekli lif halinde olması ve hem epoksiyle hem de kendi aralarında daha sağlam bağlar oluşturmasıdır. Diğer taraftan en yüksek mukavemetler karbon elyaf takviyelilerde gözlenmektedir. Karbon elyaf zaten literatürde de kabul görmüş yüksek mukavemete sahip bir takviye elemanıdır. Bu çalışmada da bir kez daha kanıtlanmıştır. Keten iplik takviyesi ise saf epoksiye göre başarısız görülmektedir.

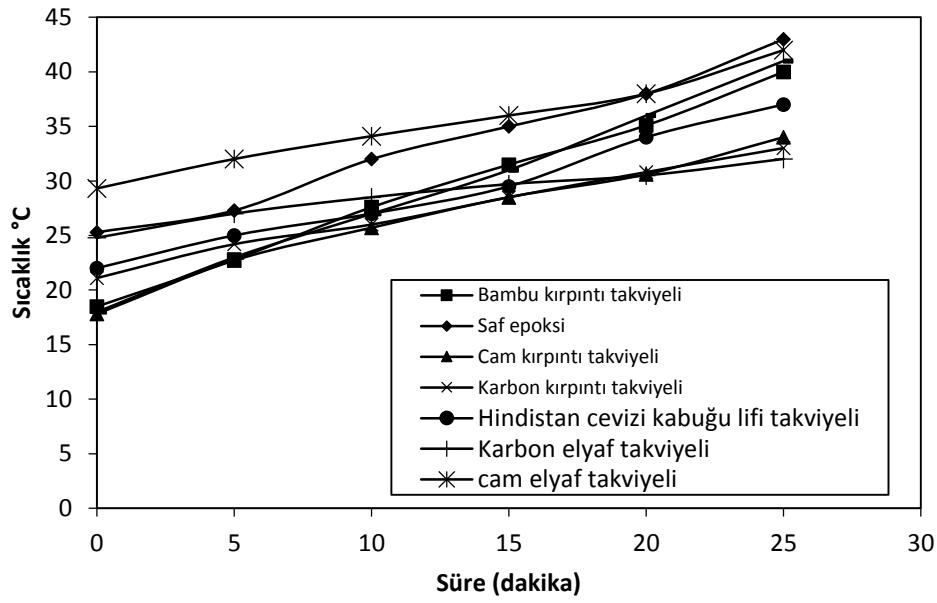
Kırpıntı takviyeli kompozitler içinde de en iyi performans genel olarak karbon kırpıntı takviyeli kompozitlere aittir. Ancak saf epoksiyle karşılaştırıldığında da iyileşmenin çokta kayda değer olmadığı görülmektedir. En düşük performans ise genellikle hindistan cevizi kabuğu lifi takviyelilerde izlenmiştir. Buradan çalışmada kullanılan sentetik elyafların doğal elyaflardan daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmaktadır. Mekanik özelliklerdeki düşüşün genel sebebinin matris ve takviye elemanı arasındaki bağlayıcılığın yeterli olmayışına ve yer yer boşlukların bazen de biriken kırpıntıların çentik etkisinden meydana geldiği düşünülmektedir.

5.2. Tribolojik Deneyler Sırasında Temas Yüzeylerindeki Sıcaklık Değişimi

Tüm tribolojik deneyler sırasında disk yüzeyinden sürekli, pin üzerinden ise belli aralıklarla kızılötesi sıcaklık ölçer yardımıyla sıcaklık değişimi incelenmiştir. Pin ve disk yüzeyinden alınan ölçümler sonucu, ortalama 90 °C olan epoksi camı geçiş sıcaklığının üzerinde hiçbir değer gözlenmemiştir. Dolayısıyla malzemelerin içyapısında değişiklik te gerçekleşmemiştir.

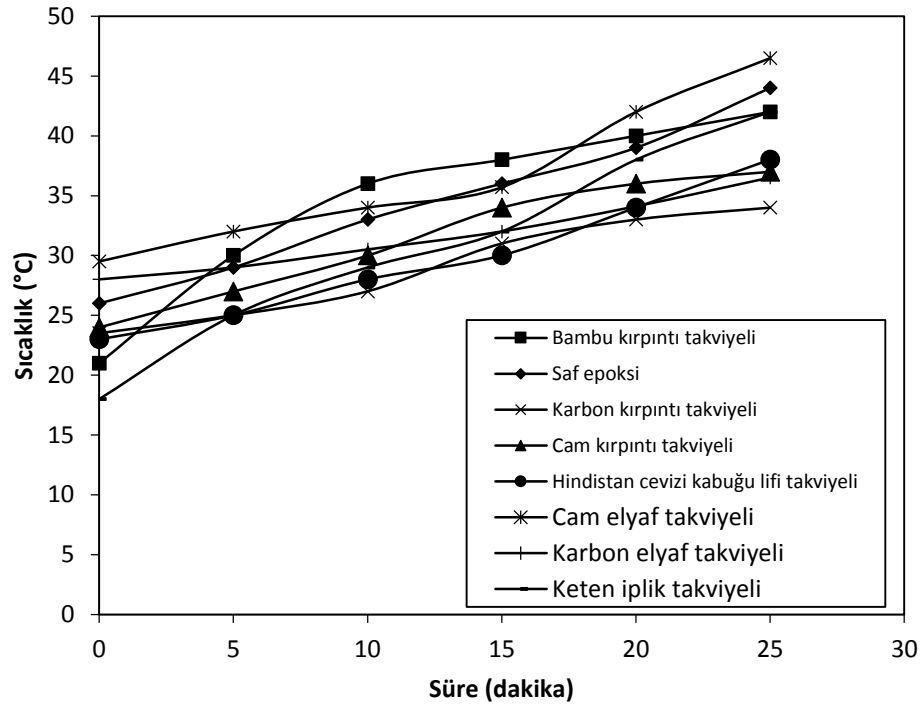
Aşağıda şekil 5.7’de kompozitlerin tribolojik deneyleri sırasında ölçülen maksimum disk yüzey sıcaklıklarına ait zamana karşı grafikler görülmektedir.

Şekil 5.7'ye göre kırpıntı takviyeli kompozitler arasında diskteki en büyük sıcaklık değişimi bambu kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinde 21,5 °C değerindedir. Bunu sırasıyla 17,7 °C ve 16 °C ile saf epoksi ve hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitler takip etmektedir. Elyaf takviyeli kompozitlerde diskteki en büyük sıcaklık değişimi keten iplik takviyeli kompozit deneylerinde 23 °C değerindedir.



Şekil 5.7. Kompozitlere ait 40N yük ve 1 m/s hız şartlarında aşınma deneyleri boyunca disk yüzey sıcaklık değişimleri

Şekil 5.8'de kompozitlerin tribolojik deneyleri sırasında ölçülen maksimum pin yüzey sıcaklıklarına ait zamana karşı grafikler görülmektedir.



Şekil 5.8. Kompozitlere ait 40N yük ve 1 m/s hız şartlarında aşınma deneyleri boyunca pin yüzey sıcaklık değişimleri

Kırpıntı takviyeli kompozitler arasında pindeki en büyük sıcaklık değişimi bambu kırpıntı takviyeli kompozit deneylerinde 21 °C değerindedir. Bunu sırasıyla 18 °C ve 15 °C ile saf epoksi ve hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitler takip etmektedir. Sıcaklıktaki yükselişe bağlı olarak yumuşayan pinden diske malzeme transferi gerçekleşerek yüksek sürtünme katsayılarına sebep olmaktadır.

Elyaf takviyeli kompozitler arasında pindeki en büyük sıcaklık değişimi keten iplik takviyeli kompozit deneylerinde 24 °C değerindedir. Sıcaklıktaki bu yükseliş, yukarıdaki duruma benzer şekilde sıcaklık artışıyla yumuşayan pinden diske malzeme yapışarak yüksek sürtünme katsayılarının meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Yüksek sıcaklık değişimlerine sahip kompozitlerin tribolojik performansının da düştüğü sonucuna varılmaktadır.

5.3. Tribolojik Davranışların Değerlendirilmesi

Tezin amacında da belirtildiği gibi üretilen kompozitlerin tribolojik davranışları sürtünme katsayıları ve aşınma oranları bakımından incelenmiştir. Tablo 5.1’de kırpıntı takviyeli kompozitlerin ve 5.2’de elyaf takviyeli kompozitlerin ortogonal dizin üzerinden saf epoksiye göre sürtünme katsayılarındaki % değişimleri verilmektedir. Tablolardaki (-) sonuçlar düşüşü, (+) sonuçlar ise artışı belirtmektedir. Cam kırpıntı takviyesinde katkı oranı olarak 6, 8, 10 yerine sırasıyla 10, 30, 50 değerleri geçerlidir.

Tablo 5.1. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin sürtünme katsayılarının saf epoksiye göre % değişimi

Deney No	Yük (N)	Hız (m/s)	Katkı (%)	Karbon Kırpıntı Takviyeli Kompozitler (%)	Cam Kırpıntı Takviyeli Kompozitler (%)	Bambu Kırpıntı Takviyeli Kompozitler (%)	Hindistan Cevizi Kabuğu Lifi Takviyeli Kompozitler (%)
1	20	0,6	6	-49,99	-48,20	-19,63	2,40
2	20	0,8	8	-42,96	-41,41	-26,38	0,04
3	20	1	10	-33,08	-30,77	-16,22	19,79
4	30	0,6	8	-25,47	-20,44	11,83	17,70
5	30	0,8	10	-21,32	-5,72	23,77	29,14
6	30	1	6	-17,76	-1,54	12,35	23,47
7	40	0,6	10	-13,63	-12,80	31,11	4,33
8	40	0,8	6	-10,41	-1,05	31,07	-0,59
9	40	1	8	0,59	10,01	47,82	16,56

Kırpıntı takviyeli kompozitlerin tablosuna bakıldığında karbon kırpıntı ve cam kırpıntı takviyesinin genel olarak sürtünme katsayısını azalttığını, bambu ve hindistan cevizi kabuğu lifi takviyesinin ise arttırdığı görülmektedir.

Elyaf takviyeli kompozitlerin tablosuna bakıldığında karbon elyafın sürtünme katsayısını ciddi derecelerde düşürdüğü gözlenmektedir. Cam elyaf takviyesi de sürtünme katsayılarının düşmesine neden olmaktadır. Keten iplik takviyeli kompozitlerde ise genel olarak sürtünme katsayısının arttığı gözlenmektedir.

Tablo 5.2. Elyaf takviyeli kompozitlerin sürtünme katsayılarının saf epoksiye göre % değişimi

Deney No	Yük (N)	Hız (m/s)	Yönlenme	Cam Elyaf Takviyeli Kompozitler (%)	Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitler (%)	Keten İplik Takviyeli Kompozitler (%)
1	20	0.6	0	-36,99	-72,61	-15,97
2	20	0.8	90	-38,56	-65,30	-17,89
3	20	1	0/90	-32,69	-63,85	-0,48
4	30	0.6	90	-13,81	-59,05	11,15
5	30	0.8	0/90	-2,27	-49,88	21,22
6	30	1	0	-16,02	-51,21	4,59
7	40	0.6	0/90	-12,82	-46,44	19,82
8	40	0.8	0	-11,36	-42,60	4,61
9	40	1	90	-13,10	-31,42	16,67

Yapılan pin on disk deneyleri sonucu elde edilen sürtünme katsayılarına bakıldığında saf epoksiye göre elyaf takviyeli kompozitlerin keten iplik dışında daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Yani aynı deney parametreleriyle bu kompozitlerde daha düşük sürtünme katsayıları meydana gelmektedir. Özellikle karbon elyaf takviyeli kompozitlerde sürtünme katsayısında ciddi düşüşler meydana gelmektedir. Literatürde de benzer sonuçlara rastlanmaktadır [11]. Çünkü karbon liflerin yağlayıcı etkisi bulunmaktadır [7].

Kırpıntı takviyeli kompozitlerde ise saf epoksiye bambu kırpıntı ve hindistan cevizi kabuğu lifi takviyesi, sürtünme katsayılarında iyileştirme sağlamamıştır. Bunun da nedeninin tıpkı mekanik deneylerde olduğu gibi matris ve takviye elemanı arasındaki bağın zayıf olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kopan pin parçacıkları deney sırasında abrasif etkiye neden olmuştur. Ayrıca deneyler sırasında sıcaklık değişimi de artarak pinde yumuşama ve disk yüzeyine yapışmalar sonucu adhesif mekanizmalar ortaya çıkmıştır. Bu nedenle de sürtünme katsayılarında artış görülmüştür. Doğal elyaflarla takviyelendirilen polimerik kompozitlerde daha yüksek sürtünme katsayıları ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar literatürde Shalwan ve Yousif'un yaptığı çalışmayla benzerdir [17]. Bunu azaltmak için kompozitlerde dolgu maddeleri kullanılarak yağlayıcı özelliği kazandırılabilir. Ayrıca rastgele dağılan liflerle elde edilen kompozitlerin hem mekanik hem de tribolojik özelliklerinin daha düşük olduğu bilinmektedir [15].

Saf epoksiye karbon kırpıntı ve cam kırpıntı takviyesinin Zhang ve arkadaşlarının çalışmasında olduğu gibi [13] sürtünme katsayısını düşürdüğü görülmüştür.

Tablo 5.3'te kırpıntı takviyeli kompozitlerin ve 5.4'te elyaf takviyeli kompozitlerin ortogonal dizin üzerinden saf epoksiye göre aşınma oranlarındaki % değişimleri verilmektedir. Tablolardaki (-) sonuçlar düşüşü, (+) sonuçlar ise artışı belirtmektedir. Cam kırpıntı takviyesinde katkı oranı olarak 6, 8, 10 yerine sırasıyla 10, 30, 50 değerleri geçerlidir.

Tablo 5.3. Kırpıntı takviyeli kompozitlerin aşınma oranlarının saf epoksiye göre % değişimi

Deney No	Yük (N)	Hız (m/s)	Katkı (%)	Karbon Kırpıntı Takviyeli Kompozitler (%)	Cam Kırpıntı Takviyeli Kompozitler (%)	Bambu Kırpıntı Takviyeli Kompozitler (%)	Hindistan Cevizi Kabuğu Lifi Takviyeli Kompozitler (%)
1	20	0,6	6	-86,02	-97,42	-87,29	184,26
2	20	0,8	8	-95,70	-97,82	-97,86	97,32
3	20	1	10	-96,45	-98,70	-98,00	-23,44
4	30	0,6	8	-96,10	-98,46	-31,46	-6,96
5	30	0,8	10	-96,44	-97,35	-31,37	-37,40
6	30	1	6	-98,02	-38,14	-28,23	-39,63
7	40	0,6	10	-97,32	-98,29	-73,98	-40,93
8	40	0,8	6	-97,71	-67,58	-43,96	-43,64
9	40	1	8	-97,58	-75,04	-53,41	-40,83

Kırpıntı takviyeli kompozitlerin tablosuna bakıldığında karbon kırpıntı ve cam kırpıntı takviyesinin aşınma oranını %90 civarı yüksek oranlarda azalttığını, bambu ve hindistan cevizi kabuğu lifi takviyesinin de aşınma oranını düşürdüğü görülmektedir.

Elyaf takviyeli kompozitlerin tablosuna bakıldığında karbon elyafın ve cam elyafın aşınma oranını %90 civarı yüksek oranlarda düşürdüğü gözlenmektedir. Keten iplik takviyeli kompozitlerin de karbon ve cam elyaf kadar olmasa da aşınma oranını düşürdüğü görülmektedir.

Tablo 5.4. Elyaf takviyeli kompozitlerin aşınma oranlarının saf epoksiye göre % değişimi

Deney No	Yük (N)	Hız (m/s)	Yönlenme	Cam Elyaf Takviyeli Kompozitler (%)	Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitler (%)	Keten İplik Takviyeli Kompozitler (%)
1	20	0.6	0	-98,86	-99,08	-93,87
2	20	0.8	90	-99,47	-99,77	-97,68
3	20	1	0/90	-99,47	-99,61	-5,04
4	30	0.6	90	-99,34	-99,57	-97,95
5	30	0.8	0/90	-99,10	-99,58	-36,33
6	30	1	0	-99,25	-99,78	-62,12
7	40	0.6	0/90	-99,08	-99,39	-62,66
8	40	0.8	0	-99,48	-99,78	-81,26
9	40	1	90	-99,52	-99,72	-73,12

Yapılan pin on disk deneyleri sonucu elde edilen aşınma oranlarına bakıldığında tüm takviyeli kompozitlerin aşınma oranlarının saf epoksinin altında olduğu görülmektedir. Ancak yine sürtünme katsayılarında olduğu gibi elyaf takviyeli kompozitlerde, saf epoksi ve kırpıntı takviyelilere nazaran daha düşük aşınma oranları elde edilmiştir. Bu sonuç Nasir ve Azizan'ın çalışmasıyla [4] ile benzeşmektedir. Larsen [7] ve Suresha'nın [11] çalışmalarına benzer şekilde elyaf takviyeliler arasında en düşük aşınma oranları karbon elyaf takviyelilerde izlenirken, en yüksek aşınma oranları ise keten iplik takviyeli kompozitlerde tespit edilmiştir.

Kırpıntı takviyeli kompozitlerde ise en düşük aşınma oranları karbon ve cam kırpıntı takviyeli kompozitlerde, en yüksek aşınma oranları ise hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerde görülmektedir.

Optik ve SEM görüntülerine göre kırpıntı takviyeli kompozitlerin yüzeylerindeki kopma, oyuk ve boşluklardan matris ve takviye elemanı arasında güçlü bağ kurulamadığı görülmektedir. Aynı sorun mekanik performansın da düşmesine neden olmuştur. Sürekli elyafarla yapılan elle yatırma yöntemiyle üretilen kompozitlerin keten iplik takviyeli dışında hem mekanik hem de tribolojik olarak daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. Kırpıntıya göre sürekli elyafın üstün olduğu sonucuna varılabilir.

Sıcaklık değişimleri epoksinin camsı geçiş sıcaklığının altında olmakla birlikte doğal kırpıntı ve keten iplik takviyelilerde en yüksek seviyelerdedir. Bunun sonucunda da ısınan pinden yumuşayarak diske malzeme transferi gerçekleşmiş ve bu da yüksek sürtünme katsayılarına neden olmuştur.

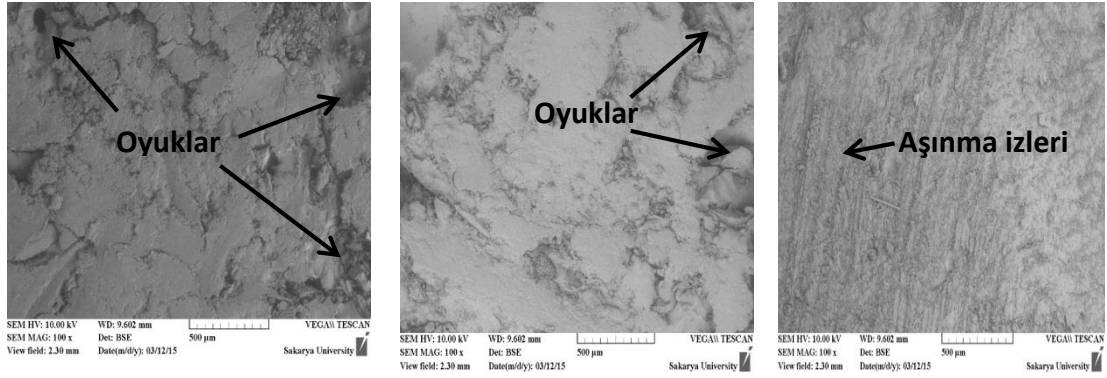
Zhang ve arkadaşlarının çalışmasında da olduğu gibi [13] matris olarak epoksi zaten kırılğan bir malzeme olduğundan elik diske karşı yapılan deneylerde de epoksiyle oluşturulan kompozitlerin abrasiv mekanizmaya uğraması doğal bir sonuçtur. Ayrıca çalışmanın kuru şartlarda gerçekleşmesi de yüksek aşınma ve sürtünme katsayılarının sebeplerinden biridir.

Kompozitlerin performansları mekanik ve tribolojik bakımdan kendi içinde uyumluluk göstermiştir. Mekanik performansı kötü olan kırpıntı takviyeli kompozitlerin tribolojik performansının da düşük olduğu gözlenmektedir. Buna karşılık keten iplik hariç elyaf takviyeli kompozitler mekanik deneylerde olduğu gibi tribolojik deneylerde de daha üstündür.

Sonuç olarak kompozitler içinde tribolojik performans açısından en iyisinin karbon elyaf takviyeli kompozit olduğu görüldü.

5.4. Aşınan Yüzeylerin SEM İncelemeleri

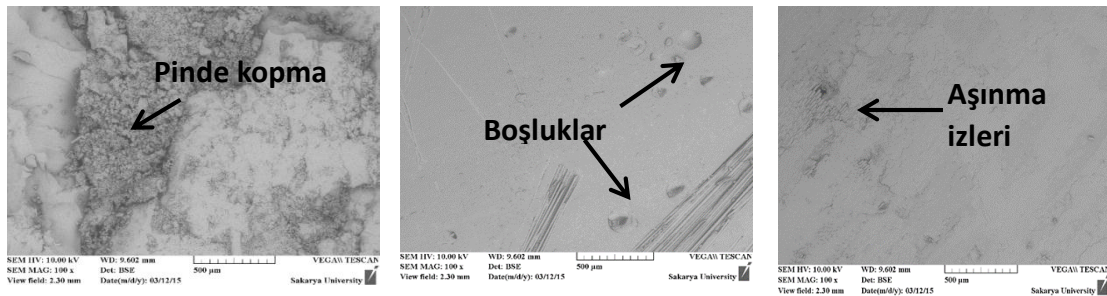
Şekil 5.9'da bambu kırpıntı takviyeli kompozit pinlerin SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 5.9a'da %6 bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerde oyuklar, b'de %8 bambu kırpıntı takviyesinde oyuklar, c'de de %10 kırpıntı takviyeli kompozit üzerinde aşınma izleri görülmektedir. Oyuklar pinden kopan parçalar sonucu oluşmaktadır ve abrasif mekanizmanın sonucudur. Kopan parçalar disk ve pin arasına girerek yüksek sürtünme katsayılarının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca bazı bölgelerde artan sıcaklıkla diske yapışarak adheziv aşınmaya neden olmaktadır. Düşen hızla deformasyonun da azaldığı görülmektedir.



a) %6 takviye, 40N, 0,8 m/s b) %8 takviye, 40 N, 0,8 m/s c) %10 takviye, 40 N, 0,6 m/s

Şekil 5.9. Bambu kırpıntı takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri

Şekil 5.10'da cam kırpıntı takviyeli kompozit pinlerin SEM görüntüleri görülmektedir. 5.10a'da %10 cam kırpıntı takviyeli kompozit görülmektedir. Yüksek hızın etkisiyle parçacık kopmasıyla abrasif aşınma gözlenmektedir. Şekil 5.10b'de %30 cam kırpıntı takviyeli kompozit görülmektedir. Artan katkı oranıyla sertlik arttığından yüzey pürüzsüz görülmektedir. Bunun yanısıra kopan küçük parçacıkların yüzeyde oluşturduğu oyuklara ve atan liflere rastlanmaktadır. Şekil 5.10c'de %50 cam kırpıntı takviyeli kompozitte kayma yönünde izler ve pin-disk yüzeyi arasında kalan parçacıklar sonucu dalgalanmalar meydana gelmektedir. Tablo 4.17'de sonuçlarda da %50 katkıli kompozitler için aşınma oranlarının daha düşük olduğu görülmektedir.

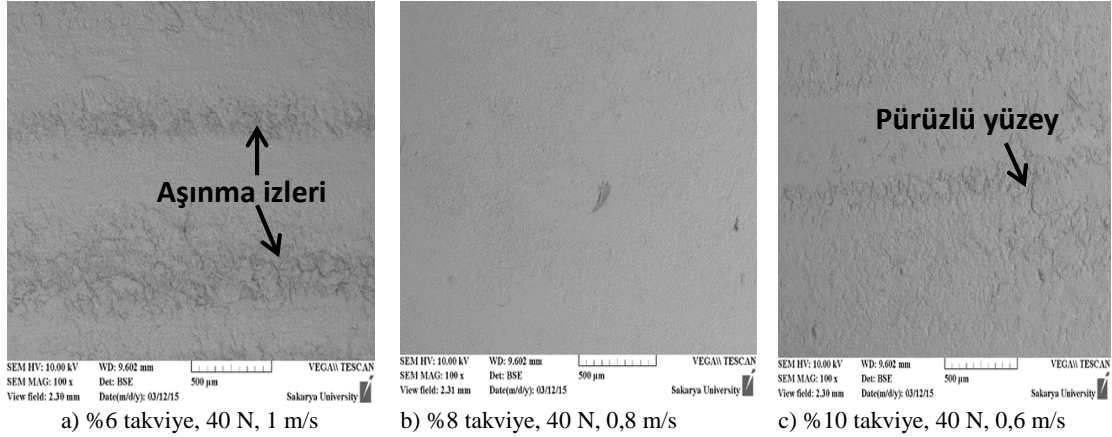


a) %10 takviye, 30 N, 1 m/s b) %30 takviye, 30 N, 0,6 m/s c) %50 takviye, 30 N, 0,8 m/s

Şekil 5.10. Cam kırpıntı takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri

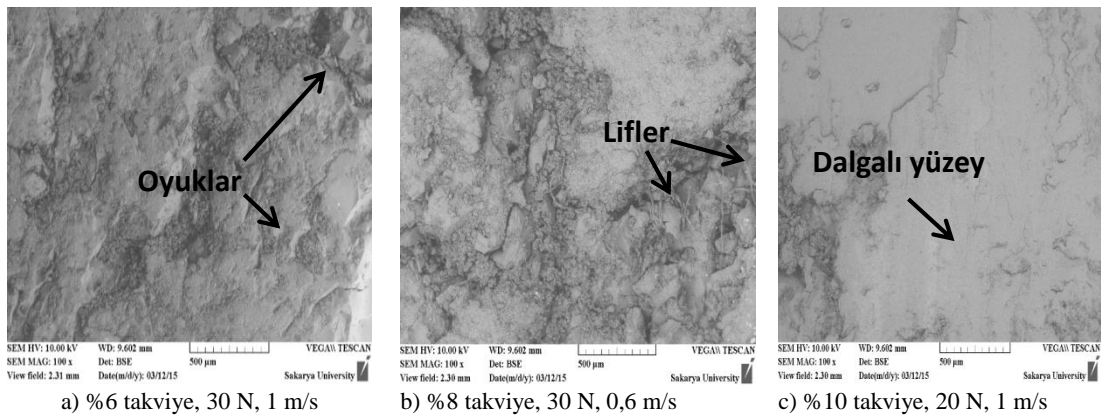
Şekil 5.11'de karbon kırpıntı takviyeli kompozit pinlerin SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 5.11a'da %6 karbon kırpıntı takviyeli pinin yüzeyinde kayma yönünde aşınma izleri görülmektedir. Şekil 5.11b'de %8 karbon takviyeli az aşınan pin yüzeyi görülmektedir. Analiz sonuçlarında %8 karbon takviyesinin optimum olduğu belirtilmektedir. Mekanik deneylerde de %8 takviyenin en iyi performansı

göstermesi de tribolojik deneylerle uyum içindedir. Burada da sadece hafif dalgalanmalar gözlenmektedir. Şekil 5.11c'de takviye oranının %10'a çıkmasıyla epoksinin bağlayıcılığı azalmakta ve pürüzlülük meydana gelmektedir.



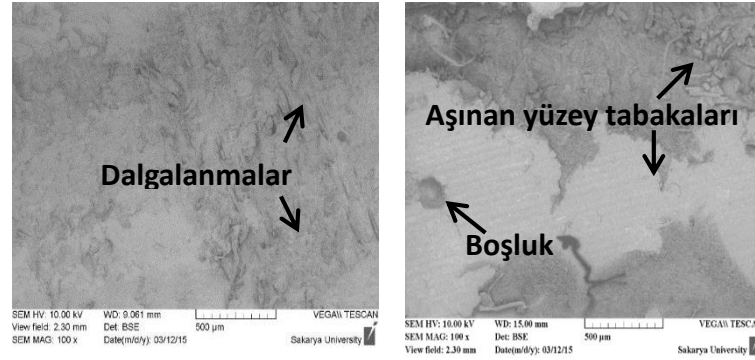
Şekil 5.11. Karbon kırıntı takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri

Şekil 5.12'de hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozit pinlerin SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 5.12a'da %6 hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitte oyuklar, b'de %8 takviyeli kompozitte lifler, c'de %10 takviyeli kompozit yükselen sıcaklıkla dalgalanan yüzeyiyle görülmektedir. %6 takviyede yüzeyden kopan parçalar en fazla takviye arttıkça oyuklu görüntü azalmaktadır. Tablo 4.29'daki yüksek aşınma oranı ve sürtünme katsayıları da görüntüleri desteklemektedir.



Şekil 5.12. Hindistan cevizi kabuğu lifi takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri

Şekil 5.13'te cam elyaf takviyeli kompozit pinlerin SEM görüntüleri görülmektedir.



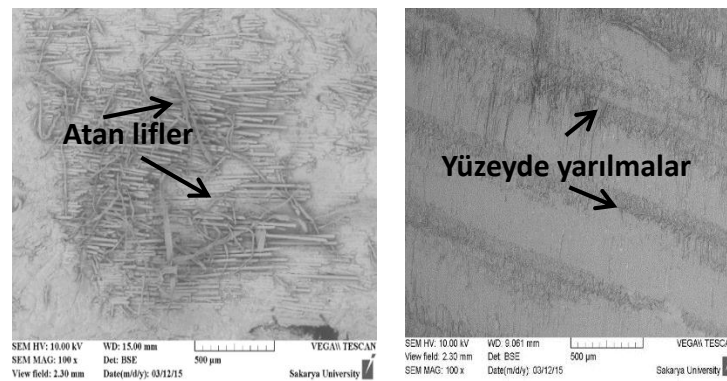
a) 0° yönlenme, 40 N, 0,8 m/s

b) 90° yönlenme, 40 N, 1 m/s

Şekil 5.13. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri

Şekil 5.13a'da 0° cam elyaf takviyeli kompozitin dalgalı yüzeyi ve pimle disk arasında kalan küçük parçacıkların meydana getirdiği pürüzler gözlenmektedir. Şekil 5.13b'de 90° cam elyaf takviyeli kompozitte kayma yönünde oluşan çizgiler, artan hızla kopan parçaların oluşturduğu boşluklar ve şiddetli aşınma sonucu tabakalar görülmektedir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerde genel aşınma mekanizması abrasif aşınmadır.

Şekil 5.14'te karbon elyaf takviyeli kompozit pinlerin SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 5.14a'da 90° karbon elyaf takviyeli kompozitin aşınma yönünde ayrılan lifleri görülmektedir. Şekil 5.14b'de 0/90 karbon elyafın abrasiv aşınma sonucu oluşan yarıklar ve aşınan lifler görülmektedir. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde genel olarak hafif şiddette aşınmalar meydana geldiği görülmektedir.



a) 90° yönlenme, 20 N, 0,8 m/s

b) 0/90 yönlenme, 30 N, 0,8 m/s

Şekil 5.14. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin aşınan pin yüzeyi SEM görüntüleri

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kırpıntı ve elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitler üretilerek mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Mekanik özelliklerde katkı malzemesi türünün, oranın veya yönlenmenin etkilerini belirlemek için çekme, üç nokta eğme, darbe ve sertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tribolojik özelliklere hız, yük, katkı oranı veya yönlenmenin etkisini belirlemek için pim disk cihazıyla deneyler gerçekleştirilerek kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucu kompozitlerin performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

6.1. Sonuçlar

- Bambu kırpıntı takviyesiyle çekme, eğilme, darbe dayanımı ve sertlik düşmektedir.
- Cam kırpıntı takviyesiyle çekme dayanımı düşmekte, eğilme dayanımında sadece %30 katkı oranında az bir iyileşme gözlenmektedir. Darbe dayanımı ve sertlikte ise katkı oranı arttıkça artış gerçekleşmektedir.
- Karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerin çekme dayanımları saf epoksiye çok yakın olmakla birlikte %8 katkı oranında en yüksek değer gözlenmektedir. Eğilme dayanımı ve darbe dayanımında ise en iyi performans %8 katkılı kompozitlerde olmakla birlikte saf epoksiden daha iyi sonuçlar gözlenmektedir. Sertlikte de benzer şekilde %8 karbon kırpıntı katkılı kompozitler yüksek değere sahiptir.
- Saf epoksiye eklenen hindistan cevizi kabuğu lifi çekme, eğilme, darbe dayanımlarını düşürürken sertliği arttırmaktadır.
- Kırpıntı takviyeli kompozitlerden en iyi mekanik performans karbon kırpıntı takviyesiyle elde edilmektedir.
- Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde eğme, darbe ve sertlik her yön için saf epoksiden daha yüksek değerlerdedir. Çekme dayanımında ise sadece 90 yönünde

saf epoksinin altına düşmektedir. En iyi performans 0° yönlenmeli kompozitlerde gözlenirken ikinci sırada $0/90$ yönlenme ve son olarak ta 90° yönlenmeli kompozitlerde gelmektedir.

- Cam elyaf takviyeli kompozitlerde çekme ve eğilme dayanımında sırasıyla 0° ve $0/90$ yönlenmede saf epoksiden daha yüksek değerdeyken 90° yönünde daha düşük seviyededir. Darbe dayanımı ve sertlik değerleri ise saf epoksiden tüm yönlenmelerde daha yüksektir.
- Keten iplik ile takviyelendirilen kompozitlerde çekme dayanımı sadece 0° yönünde saf epoksiden daha yüksektir. Eğilme dayanımı ise sırasıyla $0/90$ ve 0° yönünde daha yüksekken 90° yönünde saf epoksinin altında kalmaktadır. Darbe dayanımı ise tüm yönlenmeler için saf epoksiden daha düşüktür. Sertlikte $0/90$ yönünde çok az farkla yüksekken diğer yönlenmelerde düşüktür.
- Elle yatırma yöntemiyle üretilen kompozitlerde en iyi mekanik performans karbon elyaf takviyeli olanlarda gözlenmektedir.
- Aşınma deneylerinde en büyük sıkıntı olan deney sayısı Taguchi metodu kullanılarak azaltılmıştır.
- Kırpıntı takviyeli kompozitlerde en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranları yani en iyi tribolojik performans saf epoksinin de altında olmakla birlikte karbon kırpıntı takviyeli kompozitlerdedir.
- Elyaf takviyeli kompozitlerde en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranları yani en iyi tribolojik performans saf epoksinin de altında olmakla birlikte karbon elyaf takviyeli kompozitlerdedir.
- Deneylerde aşınma mekanizması olarak adhezif ve abrasif aşınma etkindir.
- Tribolojik deneyler sırasında oluşan sıcaklık değişimleri epoksinin camsı geçiş sıcaklığının altındadır. Bu nedenle kompozitlerin içyapıları etkilenmemektedir.

6.2. Öneriler

- Takviye olarak kırpıntı boyutlarında değişiklik yapılarak, boşlukları azaltılabilir ve mekanik özellikler iyileştirilebilir.
- Hibrit kompozitler üretimi gerçekleştirerek özellikler incelenebilir.
- Elle yatırma yöntemiyle üretilen kompozitlerde farklı yönlenmeler denenebilir.

- Doğal katkı malzemesi olarak bölgemizde yetiştirilen ürünlerden (fındık kabuğu, ceviz kabuğu gibi) faydalanılarak geri dönüşüm gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] RAJU, B.R., SURESHA B., SWAMY R. P., SWAYM, B. , KANTHRAJU, G., Investigation on mechanical and tribological behaviour of particulate filled glass fabric reinforced epoxy composites, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 1, 160-167, 2013.
- [2] VISCONTI, I.C., LANGELLA, A., DURANTE, M., The wear behaviour of composite materials with epoxy matrix filled with hard powder, Applied Composite Materials 8: 179–189, 2001.
- [3] PIHTILI, H., An experimental investigation of wear of glass fibre–epoxy resin and glass fibre–polyester resin composite materials, European Polymer Journal (45), 149–154, 2009.
- [4] NASIR, R.MD., AZIZAN, M.M, Adhesion and friction of E-glass fiber-reinforced epoxy composites for tribo-applications, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 24, pp. 1-14, November 2011.
- [5] BASAVARAJAPPA S., ELLANGO VAN S., Dry sliding wear characteristics of glass–epoxy composite filled with silicon carbide and graphite particles, Wear, 296, 491–496, 2012.
- [6] SURESHA, B., CHANDRAMOHAN G., PRAKASH, J.N., BALUSAMY V. and SANKARANARAYANASAMY K., The role of fillers on friction and slide wear characteristics in glass-epoxy composite systems, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 5, No.1, pp 87-101, 2006.
- [7] LARSEN T., ANDERSEN T., THORNING B. , HORSEWELL A., VIGILD M., Comparison of friction and wear for an epoxy resin reinforced by a glass or a carbon/aramid hybrid weave, Wear Volume 262, Issues 7–8, pp. 1013–1020, 2007.
- [8] YAŞAR, İ. ARSLAN, F., Sürekli cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozitlerde elyaf hacim oranı ve elyaf doğrultusunun tribolojik özelliklere etkisi, Turk J Engin Environ Sci 24, 181 – 191, 2000.

- [9] SURESHA, B., CHANDRAMOHAN G., Effect of normal load and sliding velocity on friction and wear behavior of carbon fiber reinforced epoxy composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 26, No. 16/2007.
- [10] KUMARESAN, K., CHANDRAMOHAN, G., SENTHILKUMAR, M., SURESHA, B., INDRAN, S., Dry sliding wear behaviour of carbon fabric-reinforced epoxy composite with and without silicon carbide, *Composite Interfaces* 18, 509–526, 2011.
- [11] SURESHA B. and CHANDRAMOHAN G., SAMAPTHKUMARAN P. , SEETHARAMU S. and VYNATHEYA S. , Friction and wear characteristics of carbon-epoxy and glass-epoxy woven roving fiber composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 25, No. 7, 2006.
- [12] SURESHA, B., SIDDARAMAIAH, K., SEETHARAMU, S., SAMPATHKUMARAN, P., Investigations on the influence of graphite filler on dry sliding wear and abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites, *Wear*, 267, 1405–1414, 2009.
- [13] ZHANG, Z., BREIDT, C., CHANG, L., HAUPERT, F., FRIEDRICH, K., Enhancement of the wear resistance of epoxy: short carbon fibre, graphite, PTFE and nano-TiO₂, *Composites: Part A*, 35, pp. 1385–1392, 2004.
- [14] LARSEN, T., ANDERSEN, T.L., THORNING, B., VIGILD, M.E., The effect of particle addition and fibrous reinforcement on epoxy-matrix composites for severe sliding conditions, *Wear*, 264, pp. 857–868, 2008.
- [15] NIRMAL, U., HASHIM, J., LOW, K.O., Adhesive wear and frictional performance of bamboo fibres reinforced epoxy composite, *Tribology International*, 47, pp. 122–133, 2012.
- [16] RAO, C.H.C., MADHUSUDAN, S., RAGHAVENDRA, G., RAO, E.V., Investigation in to wear behavior of coir fiber reinforced epoxy composites with the Taguchi method, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, Issue 5, pp.371-374, September- October 2012.
- [17] SHALWAN, A., YOUSIF, B.F., In state of art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres, *Materials and Design*, 48, pp.14–24, 2013.
- [18] OKUBO K., FUJII T., YAMAMOTO Y., Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties, *Composites: Part A*, 35, 377–383, 2004.

- [19] ZAMAN I., ISMAIL A. E., AWANG M.K., Influence of fiber volume fraction on the tensile properties and dynamic characteristics of coconut fiber reinforced composite, *Journal of Science and Technology*, Vol 1, No 1, 2009.
- [20] SARKI, J., HASSAN, S.B., AIGBODION, V.S, OGHENEVWETA, J.E., Potential of using coconut shell particle fillers in eco-composite materials, *Journal of Alloys and Compounds*, 509, pp. 2381–2385, 2011.
- [21] SINGH, A., SINGH, S., KUMAR, A., Study of mechanical properties and absorption behaviour of coconut shell powder-epoxy composites, *International Journal of Materials Science and Applications*; 2(5): 157-161, 2013.
- [22] SAPUAN, S.M., HARIMI, M., MALEQUE, M.A., Mechanical properties of epoxy/coconut shell filler particle composites, *The Arabian Journal For Science And Engineering*, Volume 28, Number 2B, October 2003.
- [23] BHASKAR, J., SINGH, V.K., Physical and mechanical properties of coconut shell particle reinforced-epoxy composite, *J. Mater. Environ. Sci.*, 4 (2) pp. 227-232, 2013.
- [24] GIRISHA. C, GUNTI, R. S., Sisal/coconut coir natural fibers – epoxy composites: water absorption and mechanical properties, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* Volume 2, Issue 3, September 2012.
- [25] REIS, J.M.L., Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete, *Construction and Building Materials*, 20, pp. 673–678, 2006.
- [26] KUMAR, D., Mechanical characterization of treated bamboo natural fiber composite, *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*. ISSN 2250-3234 Volume 4, Number 5, pp. 551-556, 2014.
- [27] RAO, H.R., RAJULU, A.V., REDDY, G.R., REDDY, K.H., Flexural and compressive properties of bamboo and glass fiber-reinforced epoxy hybrid composites, *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, Vol. 29, No. 10, 2010.
- [28] PANDA, O., A study on the effect of fiber parameters on the mechanical behavior of bamboo-glass fiber reinforced epoxy based hybrid composites, *National Institute Of Technology, Rourkela*, 2012.
- [29] H.P.S. ABDUL KHALIL, I.U.H. BHAT, M. JAWAID, A. ZAIDON, D. HERMAWAN, Y.S. HADI, Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review, *Materials and Design*, 42, pp. 353–368, 2012.

- [30] BISWAS, S., Mechanical properties of bamboo-epoxy composites a structural application, *Advances in Materials Research*, Vol. 1, No. 3, pp.221-231, 2012.
- [31] KONGKEAW, P., NHUAPENG, W., THAMAJAREE, W., The effect of fiber length on tensile properties of epoxy resin composites reinforced by the fibers of bamboo, *Journal Of The Microscopy Society Of Thailand*, 4 (1), pp. 46-48, 2011.
- [32] VERMA, C.S., CHARIAR, V.M., Development of layered laminate bamboo composite and their mechanical properties, *Composites: Part B*, 43, pp. 1063–1069, 2012.
- [33] SANTULLI, C., JANSSEN, M., JERONIMIDIS, G., Partial replacement of e-glass fibers with flax fibers in composites and effect on falling weight impact performance, *Journal Of Materials Science*, 40, pp. 3581 – 3585, 2005.
- [34] LIU, Q., HUGHES, M., The fracture behaviour and toughness of woven flax fibre reinforced epoxy composites, *Composites: Part A*, 39, pp. 1644–1652, 2008.
- [35] MURALIDHAR, B.A., Tensile and compressive behaviour of multilayer flax-rib knitted preform reinforced epoxy composites, *Materials and Design*, 49, pp. 400–405, 2013.
- [36] LIANG, S., GNING, V.M., GUILLAUMAT, L., A comparative study of fatigue behaviour of flax/epoxy and glass/epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 72, pp. 535–543, 2012.
- [37] RAMNATH, B.V., KOKAN, S.J., RAJA, R.N, SATHYANARAYANAN, R., ELANCHEZHIAN, C., PRASAD, A.R., MANICKAVASAGAM, V.M, Evaluation of mechanical properties of abaca–jute–glass fibre reinforced epoxy composite, *Materials and Design*, 51, pp. 357–366, 2013.
- [38] FERESHTEH-SANIEE, F., MAJZOobi, G.H., BAHRAMI, M., An experimental study on the behavior of glass–epoxy composite at low strain rates, *Journal of Materials Processing Technology*, 162–163, pp.39–45, 2005.
- [39] SATHISHKUMAR, T.P., SATHEESHKUMAR S., NAVEEN, J., Glass fiber-reinforced polymer composites - a review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33(13), pp. 1258-1275, 2014.
- [40] ROUT, A.K., SATAPATHY, A., Study on mechanical and tribo-performance of rice-husk filled glass–epoxy hybrid composites, *Materials and Design*, 41, pp. 131–141, 2012.

- [41] BASAVARAJAPPA, S., ARUN, K.V., DAVIM, J.P., Effect of filler materials on dry sliding wear behavior of polymer matrix composites – a Taguchi approach, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 8, No.5, pp 379-391, 2009.
- [42] SIDDHARTHA, K.G., Mechanical and abrasive wear characterization of bidirectional and chopped E-glass fiber reinforced composite materials, *Materials and Design* 35, pp. 467–479, 2012.
- [43] AGARWAL, G., PATNAIK, A., SHARMA, R.S., Parametric optimization and three-body abrasive wear behavior of SiC filled chopped glass fiber reinforced epoxy composites, *International Journal of Composite Materials*, 3(2), pp. 32-38, 2013.
- [44] BISWAS, S., XESS, P.A., Erosion wear behaviour of bamboo/glass fiber reinforced epoxy based hybrid composites, *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1(4), pp. 79-83, 2012.
- [45] RAMESH, B.N., SURESHA, B., Optimization of tribological parameters in abrasive wear mode of carbon-epoxy hybrid composites, *Materials and Design*, 59, pp. 38–49, 2014.
- [46] SUBBAYA, K.M., SURESHA, B., RAJENDRA, N., VARADARAJAN, Y.S., Grey-based Taguchi approach for wear assessment of SiC filled carbon–epoxy composites, *Materials and Design*, 41, pp. 124–130, 2012.
- [47] BISWAS, S., SATAPATHY, A., A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo–epoxy and glass–epoxy composites, *Materials and Design*, 31, pp. 1752–1767, 2010.
- [48] TUDU, P., Processing and characterization of natural fiber reinforced polymer composites, Department Of Mechanical Engineering National Institute Of Technology Rourkela-769008, 2009.
- [49] SUDHEER, M., PRABHU, R., RAJU, K., BHAT, T., Modeling and analysis for wear performance in dry sliding of epoxy/glass/ptw composites using full factorial techniques, *Hindawi Publishing Corporation ISRN Tribology*, Article ID 624813, 11 pages, 2013.
- [50] RENUKAPPA, N.M., SURESHA, B., DEVARAJAIAH, R.M., SHIVAKUMAR, K.N., Dry sliding wear behaviour of organo-modified montmorillonite filled epoxy nanocomposites using Taguchi’s techniques, *Materials and Design*, 32, pp. 4528–4536, 2011.
- [51] SIDDHARTHA, PATNAIK, A., BHATT, A.D., Mechanical and dry sliding wear characterization of epoxy–TiO₂ particulate filled functionally graded composites materials using Taguchi design of experiment, *Materials and Design*, 32, pp. 615–627, 2011.

- [52] SUDHEER, M., PRABHU, R., RAJU, K., BHAT, T., Optimization of dry slidingwear performance of ceramic whisker filled epoxy composites using Taguchi approach, Hindawi Publishing Corporation Advances in Tribology, Article ID 431903, 9 pages, 2012.
- [53] BASAVARAJAPPA, S., CHANDRAMOHAN, G., Wear studies on metal matrix composites: a Taguchi approach, J. Mater. Sci. Technol., Vol.21, No.6, 2005.
- [54] HEMANTH KUMAR, T.R., SWAMY, R.P, CHANDRASHEKAR, T.K., Taguchi technique for the simultaneous optimization of tribological parameters in metal matrix composite, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 10, No.12, pp.1179-1188, 2011.
- [55] PRASAT, S.V., SUBRAMANIAN, R., RADHIKA, N., ANANDAVEL, B., ARUN, L., PRAVEEN, N., Influence of parameters on the dry sliding wear behaviour of aluminium/fly ash/graphite hybrid metal matrix composites, European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.53 No.2, pp.280-290, 2011.
- [56] KOKSAL, S., FICICI, F., KAYIKCI, R., SAVAS, O., Experimental optimization of dry sliding wear behavior of in situ AlB_2/Al composite based on Taguchi's method, Materials and Design, 42, pp. 124–130, 2012.
- [57] SAHIN, Y., Abrasive wear behaviour of SiC/2014 aluminium composite, Tribology International, 43, pp. 939–943, 2010.
- [58] SAHIN, Y., Optimization of testing parameters on the wear behaviour of metal matrix composites based on the Taguchi method, Materials Science and Engineering A, 408, pp. 1–8, 2005.
- [59] RADHIKA, N., VAISHNAVI, A., CHANDRAN, G.K., Optimisation of dry sliding wear process parameters for aluminium hybrid metal matrix composites, Tribology in Industry, 188 Vol. 36, No. 2, pp. 188-194, 2014
- [60] CALLISTER, W.D., RETHWISCH, G.D., Malzeme bilimi ve mühendisliği, Wiley, 2011.
- [61] VURAL, M., Ders notu, İTÜ Makine Fakültesi, 2010.
- [62] SAÇAK, M., Polimer teknolojisi, Gazi Kitabevi, Ağustos 2005.
- [63] MALLICK, P.K., Fiber reinforced composites, Marcel Dekker, New York, 1993.
- [64] HUTCHINGS, I.M., Tribology friction and wear of engineering materials, Edward Arnold, 1992.

- [65] BAYER, R.G., Wear analysis for engineers, HNB Publishing, 2002.
- [66] ÜNLÜ, B.S., PARALI, L., PINAR, A.M., Pim-disk, pim-plate, pim-ring, mil-yatak aşınma deney cihazı tasarımı ve imalatı, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye
- [67] BAYER, R.G., Mechanical wear fundamentals and testing, Marcel Deekker Inc, New York, USA, 2004
- [68] AKKURT, M., Makine elemanları cilt 1, Birsen Yayınevi, 1999.
- [69] GEMCİ, R., ULCAI, Y., Üç boyutlu tesadüfi dağılımlı aramid novoloid ve cam lif takviyeli polimerik kompozit malzemelerin aşınma direnci, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 9, Sayı 1, 2004.
- [70] BHUSHAN, B., Introduction to tribology, Wiley, New York, 2002.
- [71] ŞİRVANCI, M., Kalite için deney tasarımı, Literatür Yayınları, İstanbul, 1997.
- [72] DURMAZ S., Taguchi metodunun kauçuğun vulkanizasyonu prosesine Uygulanması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi 2008.
- [73] GÖKÇE, G, TAŞGETİREN, S., Kalite için deney tasarımı Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi” .Cilt:6,No:1 (71-83), 2009.
- [74] RANJIT K. ROY, A, Primer on the Taguchi Method, Society of Manufacturing Engineers, USA, 2010.
- [75] İZGİZ, S., Deney tasarımı ve Taguchi metodu, Federal Mogul, İstanbul 2001.
- [76] TAYLAN D., Taguchi deney tasarımı uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, 2009.
- [77] ASTM D638M-96, Standard test method for tensile properties of plastics (metric), American Society for Testing and Material, 1996.
- [78] ASTM D 3039/D 3039M – 08, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite Materials, American Society for Testing and Material, 2008.
- [79] ASTM D790-10, Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, American Society for Testing and Material, 2010.
- [80] ASTM D4812-11, Standard test method for unnotched cantilever beam impact resistance of plastics, American Society for Testing and Material, 2011.

- [81] ASTM D-2583, Standard test method for indentation hardness of rigid plastics by means of a Barcol impressor, American Society for Testing and Material, 2013.
- [82] ASTM G99, Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus, American Society for Testing and Material, 2010.

ÖZGEÇMİŞ

Neslihan ÖZSOY, 14.05.1984'te Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adapazarı'nda tamamladı. 2002 yılında Adapazarı Atatürk Lisesi'nden mezun oldu. 2002 yılında başladığı SAÜ Makine Mühendisliği bölümünü 2006 yılında bitirdi. 2006 yılında Sakarya Üniversitesi, Makina Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine ve halen devam etmekte olan araştırma görevliliğine başladı. 2008 yılında mezun oldu ve aynı yıl SAÜ Makine Mühendisliği bölümünde doktora başladı. Evli ve iki çocuk annesidir.