

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

**MİKRO VE NANO DOLGULU EPOKSİ KOMPOZİTLERİN
TRİBOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mehmet İskender ÖZSOY

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Abdullah MİMAROĞLU

Nisan 2014

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKRO VE NANO DOLGULU EPOKSİ KOMPOZİTLERİN
TRİBOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ

DOKTORA TEZİ

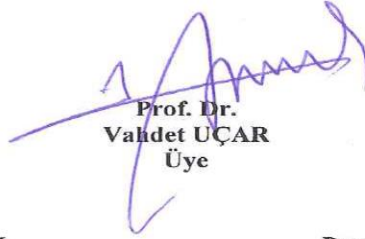
Mehmet İskender ÖZSOY

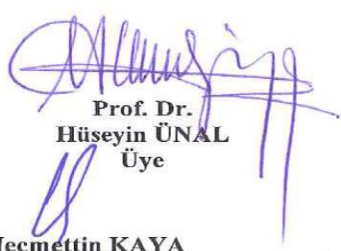
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ


Bu tez 11/ 04 /2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Abdullah MİMAROĞLU
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK
Üye


Prof. Dr.
Vahdet UÇAR
Üye


Prof. Dr.
Hüseyin ÜNAL
Üye


Doç. Dr. Necmettin KAYA
Üye

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımın her aşamasında yardımlarını esirgemeyip katkıda bulunan danışman hocam sayın Prof. Dr. Abdullah MİMAROĞLU' na ve çalışmalarım sırasında gösterdiği yardımlardan dolayı sayın Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL'a minnettarlığımı sunarım. Ayrıca, deneysel çalışmalarımda gösterdiği yardımlardan dolayı sayın Doç. Dr. Mustafa ZENGİN'e ve sayın Salih Hakan YETKİN'e, sonlu elemanlar konusundaki yardımlarından dolayı sayın Yrd. Doç. Dr. Ferit FIÇICI' ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım sayın Selman HIZAL'a ve sayın Hamit Asım ÇÖKREN'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAPK) tarafından 2010-50-02-004 ve 2010-50-06-005 numaralı projeler ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xvii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ

1.1. Giriş	1
1.2. Polimer Kompozitler	2
1.3. Polimer Kompozitlerin Mekanik Davranışları	3
1.4. Polimer Malzemelerin Tribolojisi.....	8
1.4.1. Sürtünme.....	8
1.4.2. Aşınma	9
1.4.2.1. Aşınma mekanizmaları	10
1.4.3. Polimer Kompozitlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları	14
1.5. Aşınma Davranışlarının Modelleme ve Analizi	27
1.5.1. Sonlu elemanlar yöntemi	27
1.5.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile aşınmanın modellenmesi	29
1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	36
BÖLÜM 2. MALZEMELER VE DENEYSEL ÇALIŞMA.....	38
2.1. Malzemeler ve Kompozitlerin Hazırlanması	38
2.2. Mekanik deneyler	40
2.2.1. Çekme deneyleri	41

2.2.2. Üç nokta eğme deneyleri	53
2.2.3. Sertlik deneyleri.....	66
2.3. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri	67
BÖLÜM 3. MODELLEME VE ANALİZ	106
3.1. Aşınma Teorileri	106
3.2. Aşınma Algoritması	109
3.3. Pim Disk Sonlu Elemanlar Modeli	112
3.4. Analiz Sonuçları	116
BÖLÜM 4. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI VE İRDELENMESİ	121
4.1. Mekanik Deneylerin Değerlendirilmesi	121
4.2. Tribolojik Davranışların Değerlendirilmesi.....	131
4.2.1. Sürtünme davranışlarının değerlendirilmesi.....	131
4.2.2. Aşınma davranışlarının değerlendirilmesi.....	137
4.2.3. Aşınan yüzeylerin SEM incelemeleri	143
4.3. Deneysel Aşınma Sonuçlarının Sonlu Elemanlar Sonuçlarıyla Karşılaştırılması	148
BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	150
5.1. Sonuçlar	150
5.2. Öneriler	151
KAYNAKLAR.....	153
EKLER	164
ÖZGEÇMİŞ	177

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al_2O_3	: Alüminyum oksit
ASTM	: Amerikan test ve malzemeler derneği
$CaCO_3$: Kalsiyum karbonat
$CaSiO_3$: Kalsiyum silikat
CuO	: Bakır oksit
PEEK	: Polieter eterketon
PPS	: Polifenilensülfid
PMMA	: Polimetil metakrilat
PTFE	: Politetrafloraetilen
SiC	: Silisyum karbür
Si_3N_4	: Silisyum nitrat
SiO_2	: Silisyum dioksit
TiO_2	: Titanyum dioksit
A_r	: Temas alanı
F_n	: Normal kuvvet
F_s	: Sürtünme kuvveti
F_T	: Kesme kuvveti
FKN	: Temas rijitlik parametresi
FTOLN	: Penetrasyon toleransı
H	: Sertlik
h	: Aşınma derinliği
I_u	: Aşınma yoğunluğu
k	: Özgül aşınma oranı

K	: Aşınma katsayısı
P	: Basınç
s	: Kayma mesafesi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
t	: Kayma süresi
T	: Yüzey sıcaklığı
T*	: Ergime sıcaklığı
V _s	: Kayma hızı
W	: Hacimsel aşınma miktarı
μ	: Sürtünme katsayısı
τ _s	: Kayma gerilmesi
{d}	: Dügümlerin yer değiştirmesi
[K]:	: Rijitlik matrisi
{F}	: Tümel kuvvet vektörü

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Polimerlerin fiziksel olarak sınıflandırılması ve takviyelendirilmesi	2
Şekil 1.2. Farklı polimer malzemelerin çekme davranışları	3
Şekil 1.3. Sürtünme kuvvetinin gösterimi	9
Şekil 1.4. Aşınma süreci.....	10
Şekil 1.5. Aşınma mekanizmaları	11
Şekil 1.6. Adezif Aşınma	11
Şekil 1.7. Metal - polimer yüzeylerindeki pürüzlülükler arasındaki mekanik etkileşimler	12
Şekil 1.8. Abrazif aşınma prosesi.....	13
Şekil 1.9. Pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin PMMA polimerlerinde yük altında sürtünme katsayısına etkisi.....	15
Şekil 1.10. Yüzey pürüzlülüğünün termoplastik malzemenin aşınma ve sürtünme davranışına etkisi.....	16
Şekil 1.11. Yüzey pürüzlülüğünün farklı polimerlerin aşınma oranına etkisi	17
Şekil 1.12. % 35 PbS katkılı naylon kompozitlerinde karşı yüzey pürüzlülüğünün transfer filme etkisi.....	19
Şekil 1.13. Hacimce %2 ve %5 Nano TiO ₂ dolgulu PPS kompozitinde çelik yüzeyde oluşan transfer film.....	19
Şekil 1.14. Hacimce %5 nano SiC dolgulu PPS kompozitine karşı çelik yüzeyde oluşan transfer film yapısı	20
Şekil 1.15. Nano Al ₂ O ₃ dolgulu PPS kompozitin farklı yüzey pürüzlülüklerinde transfer filme etkisi.....	20
Şekil 1.16. Hacimce %2 ve %3 nano Al ₂ O ₃ dolgulu PPS kompozitlerin karşı yüzeyde oluşan transfer filme etkileri	21
Şekil 1.17. Kısa elyaf takviyeli epoksi kompozitin temas durumu.....	24
Şekil 1.18. Nano parçacık dolgulu kısa elyaf takviyeli epoksi kompozitin temas durumu	24

Şekil 1.19. Sonlu elemanlar yönteminde düğümler	28
Şekil 1.20. Winkler yüzey modeline göre temas durumu	30
Şekil 1.21. Sürtünme ısısı, konveksiyon ve yükün sonlu elemanlar modeli.....	33
Şekil 1.22. Delaminasyon aşınmasının sonlu elemanlar modeli.....	34
Şekil 2.1. Karıştırıcı ucu.....	39
Şekil 2.2. Epoksi kompozit hazırlamada kullanılan cihazlar	40
Şekil 2.3. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan kalıplar	40
Şekil 2.4. Çekme numunesi ölçüleri	41
Şekil 2.5. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri	41
Şekil 2.6. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama eğrileri	42
Şekil 2.7. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri	43
Şekil 2.8. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama eğrileri	44
Şekil 2.9. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri	45
Şekil 2.10. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama değerleri.....	46
Şekil 2.11. Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri	47
Şekil 2.12. Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama eğrileri	48
Şekil 2.13. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerinin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri	49
Şekil 2.14. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama eğrileri	50
Şekil 2.15. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri	51
Şekil 2.16. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama eğrileri	52
Şekil 2.17. Üç nokta eğme deneyinin uygulanışı	53

Şekil 2.18. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi- eğilme zorlanması eğrileri	54
Şekil 2.19. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama eğrileri	55
Şekil 2.20. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi - eğilme zorlanması eğrileri	56
Şekil 2.21. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama değerleri.....	57
Şekil 2.22. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi - eğilme zorlanması eğrileri.....	58
Şekil 2.23. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama değerleri.....	59
Şekil 2.24. Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi - eğilme zorlanması eğrileri.....	60
Şekil 2.25. Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama eğrileri	61
Şekil 2.26. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi eğilme zorlanması eğrileri	62
Şekil 2.27. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama eğrileri	63
Şekil 2.28. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi eğilme zorlanması eğrileri	64
Şekil 2.29. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü ve kopma uzama eğrileri	65
Şekil 2.30. Mikro dolgulu epoksi kompozitlerin barkol sertlik değerleri	66
Şekil 2.31. Nano dolgulu epoksi kompozitlerin barkol sertlik değerleri	67
Şekil 2.32. Pim-disk aşınma cihazının resmi	68
Şekil 2.33. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi	70
Şekil 2.34. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi	71
Şekil 2.35. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi	72

Şekil 2.36. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8m/s kayma hızında yüke göre değişimi	72
Şekil 2.37 Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15n yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri	73
Şekil 2.38. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15n yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri	73
Şekil 2.39. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15n yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	74
Şekil 2.40. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15n yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	75
Şekil 2.41. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi	76
Şekil 2.42. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi.....	77
Şekil 2.43. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi.....	77
Şekil 2.44. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi.....	78
Şekil 2.45. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri.....	79
Şekil 2.46. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri.....	79
Şekil 2.47. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	80
Şekil 2.48. TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	81
Şekil 2.49. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi.....	82
Şekil 2.50. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi.....	83
Şekil 2.51. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi.....	83

Şekil 2.52. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8m/s kayma hızında yüke göre değişimi	84
Şekil 2.53. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri	85
Şekil 2.54. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri	85
Şekil 2.55. Uçucu kül dolgulu dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	86
Şekil 2.56. Uçucu kül dolgulu dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	87
Şekil 2.57. Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi	88
Şekil 2.58. Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4m/s kayma hızında yüke göre değişimi	89
Şekil 2.59. Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi	89
Şekil 2.60. Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8m/s kayma hızında yüke göre değişimi	90
Şekil 2.61 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri	91
Şekil 2.62 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri	91
Şekil 2.63. Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	92
Şekil 2.64. Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	93
Şekil 2.65. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi	94
Şekil 2.66. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4m/s kayma hızında yüke göre değişimi	95
Şekil 2.67. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi	95

Şekil 2.68. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8m/s kayma hızında yüke göre değişimi	96
Şekil 2.69. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri	97
Şekil 2.70. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15n yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri	97
Şekil 2.71. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	98
Şekil 2.72. Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	99
Şekil 2.73. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi	100
Şekil 2.74. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4m/s kayma hızında yüke göre değişimi	101
Şekil 2.75. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi	101
Şekil 2.76. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8m/s kayma hızında yüke göre değişimi	102
Şekil 2.77. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri	103
Şekil 2.78. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri	103
Şekil 2.79. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	104
Şekil 2.80. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri.....	105
Şekil 3.1. Pim disk aşınma sisteminin sonlu elemanlar yöntemi akış şeması.....	111
Şekil 3.2. Pim disk aşınma sisteminin şematik gösterimi	112
Şekil 3.3. Rijit tabanlı basınç altında kayan yüzeyin temas durumu	112
Şekil 3.4. Pim disk aşınma sisteminin yük ve sınır şartları.....	113
Şekil 3.5. Pim disk aşınma sisteminin sonlu elemanlar ağ modeli	113
Şekil 3.6. PLANE182 elemanının geometrisi	114
Şekil 3.7. CONTA171 elemanının geometrisi	114

Şekil 3.8. TARGE169 eleman geometrileri	115
Şekil 3.9. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerinin 0,4 m/s kayma hızında ve 15N yük şartında aşınma analizi sonuçları.....	117
Şekil 3.10. Pime etki eden kuvvetler.....	117
Şekil 3.11. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları	119
Şekil 3.12. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları	120
Şekil 4.1. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranına bağlı olarak çekme dayanımları.....	121
Şekil 4.2. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranına bağlı olarak elastiklik modülleri	123
Şekil 4.3. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak kopma uzama eğrileri.....	125
Şekil 4.4. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak eğilme dayanımları.....	126
Şekil 4.5. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak eğilme modülleri	127
Şekil 4.6. Mikro ve nano kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak eğilmede kopma uzama eğrileri	128
Şekil 4.7. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak sertlik değerleri.....	129
Şekil 4.8. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının dolgu oranlarına bağlı olarak 04m/s hız ve 15N yük şartlarındaki değişimleri	131
Şekil 4.9. %10 Dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s hızındaki sürtünme katsayısı - yük eğrileri	133
Şekil 4.10. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının dolgu oranlarına bağlı olarak 08m/s hız ve 15N yük şartlarındaki değişimleri	134
Şekil 4.11. %10 Dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s hızındaki sürtünme katsayısı - yük eğrileri	135

Şekil 4.12. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranları dolgu oranlarına bağlı olarak 04m/s hız ve 15N yük şartlarındaki değişimleri	137
Şekil 4.13. %10 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s hızındaki özgül aşınma oranı - yük eğrileri	138
Şekil 4.14. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının dolgu oranlarına bağlı olarak 08m/s hız ve 15N yük şartlarındaki değişimleri	140
Şekil 4.15. %10 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s hızındaki özgül aşınma oranı yük - eğrileri	141
Şekil 4.16. Epoksi kompozitlerin 0,4 m/s kayma hızı ve 15 N yük şartındaki pim aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	144
Şekil 4.17. Epoksi kompozitlerin 0,8 m/s kayma hızı ve 15 N yük şartındaki pim aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	147
Şekil 4.18. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s kayma hızında ve farklı yüklerdeki aşınma davranışının deneysel ve analiz sonuçları.....	148
Şekil 4.19. Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s kayma hızında ve farklı yüklerdeki aşınma davranışının deneysel ve analiz sonuçları.....	149

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Malzemeler ve özellikleri	38
Tablo 2.2. Deney malzemelerinin yoğunlukları.....	69
Tablo 3.1. Eleman ve düğüm sayıları.....	115
Tablo 3.2. DIN 1.2344 çeliğın özellikleri	116
Tablo 3.3. Saf epoksi ve Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayıları	118

ÖZET

Anahtar kelimeler: Epoksi Kompozit, Triboloji, Mekanik Özellikler, Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu çalışmanın amacı mikro ve nano dolgulu epoksi esaslı kompozit malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi ve modellenmesidir. Çalışmada kullanılan malzemeler epoksi matrisi ile mikro ve nano boyuttaki dolgulardan oluşmaktadır. Mikro dolgular Al_2O_3 , TiO_2 ve uçucu kül, nano dolgular ise Al_2O_3 , TiO_2 ve kilden oluşmaktadır. Mikro dolgular ağırlıkça %10 ile %30 aralığında ve nano dolgular ağırlıkça %2,5 ile %10 aralığında olmaktadır. Bu malzemeler açık kalıplara dökülerek mekanik ve tribolojik çalışmalar için deney standartlarına uygun olarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler mekanik özellikleri incelemek için, çekme, üç nokta eğilme ve sertlik deneylerine tabi tutulmuşlardır. Sonuçta çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama(%), eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama (%) elde edilmiştir. Tribolojik davranışları incelemek için pim disk deney düzeneği kullanılarak sürtünme katsayıları ve özgül aşınma oranları elde edilmiştir. Aşınan yüzeylerin optik ve SEM yüzey görüntüleri incelenmiştir. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik deneylerde uygulanan yükler 5, 10, 15 N ve uygulanan hızlar 0,4 ve 0,8 m/s 'dir. Buna ilave olarak Archard aşınma teorisi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak pim disk sistemi modellenerek aşınma miktarları ve pim numunelerinde oluşan gerilmeler elde edilmiştir ve sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ve sonlu elemanlar sonuçları arasında büyük oranda mutabakat görülmüştür.

Birinci bölümde genel kavramlar, sürtünme ve aşınma prensipleri, sonlu elemanlar yönteminin prensipleri ve literatür incelemelerine yer verilmiştir. İkinci bölümde deneysel çalışmalar olmak üzere mekanik deneyler ve aşınma deneylerine yer verilmiştir. Üçüncü bölümde pim disk aşınma deney düzeneği sonlu elemanlar yöntemine göre modellenerek sistemin sayısal çözümü yapılmıştır. Dördüncü bölümde deneysel çalışma sonuçlarının ve sonlu elemanlar yönteminin değerlendirilmesi yapılmıştır ve deneysel ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Beşinci bölümde genel sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.

EXPERIMENTAL AND MODELING OF THE TRIBOLOGICAL AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF MICRO AND NANO FILLED EPOXY COMPOSITES

SUMMARY

Key Words: Epoxy Composite, Tribology, Mechanical Properties, Finite Element Method

In this investigation: the tribological and mechanical performances of micro and nano filled epoxy composites were experimentally and theoretically studied and evaluated. The matrix material is epoxy. Micro filler are Al_2O_3 , TiO_2 and fly ash added in 10-30% by weight ratio. The nano filler are Al_2O_3 , TiO_2 and clay added in 2,5-10% by weight ratio. Test samples were prepared using an open mould type die. Tensile, three point bending and hardness tests were carried out. The tensile strength elastic modulus, elongation at break flexural strength, flexural modulus and flexural strain of the composite materials were obtained. Wear tests were carried out pin-on-disc arrangement. Tests were carried out at atmospheric condition, sliding speed of 0.4, 0.8 m/s and 5, 10, 15N load values. The friction coefficient, specific wear rate were obtained and evaluated. Furthermore the worn surfaces of pin and disc were analyzed using optical and SEM techniques. In the finite element technique, wear heights and stresses were obtained and correlated with the experimentally determined values. The results show the enhancement in tribological and mechanical properties using filler in the epoxy composite materials.

This thesis consists of five chapters: Chapter one consists of general concepts, principles of friction and wear, principle of finite element method and literature studies. Chapter two consists of materials and experimental works. Chapter three consists of finite element modeling and analysis of pin-on-disc system. Chapter four consists of discussion and evaluation of experimental and finite element results. Chapter five consists of conclusions and further works.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Günümüzde teknolojiye gelişmeler malzeme bilimine ve malzemelerin performansına duyulan ihtiyacı arttırmaktadır. Bu nedenle geleneksel malzemelerin yerini daha yüksek performanslı ve yüksek ömürlü malzemeler almaya başlamıştır. Malzemelerden beklenen performansın artması araştırmacıları yeni üretim yöntemleri geliştirmeye ve yeni malzemeler üretmeye yöneltmiştir. Bu aşamada kompozit malzemelerin önemi ortaya çıkmaktadır.

Polimer malzemeler günümüzde otomotiv, uzay-havacılık, inşaat alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Polimer malzemelerin düşük yoğunluklu olmaları, ve korozyondan etkilenmemeleri bu malzemelerin tercih edilmesini önemli hale getirmektedir. Bu malzemelerin mekanik ve tribolojik olarak güçlendirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Polimer esaslı kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve polimer matriksine eklenen katkıları bu malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini önemli oranda etkilemektedir.

Bu çalışmada mikro ve nano dolgulu epoksi esaslı kompozit malzemelerin tribolojik ve mekanik performanslarına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda matris malzemesi olarak epoksi reçinesi seçilmiştir. Dolgu olarak mikro tanecik boyutunda Al_2O_3 , TiO_2 , ve uçucu kül ile nano tanecik boyutunda Al_2O_3 , TiO_2 , nano kil, parçacıkları eklenerek kompozit malzemeler hazırlanmıştır.

Bu bölümde polimer kompozit kavramı ve polimer kompozitlerin mekanik ve tribolojik davranışlarına etki eden katkıların faktörlere ve bu faktörlerin etkileri ile ilgili literatür incelemelerine yer verilmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar yönteminin aşınma davranışına uygulanmasıyla ilgili literatür çalışmaları incelenmiştir.

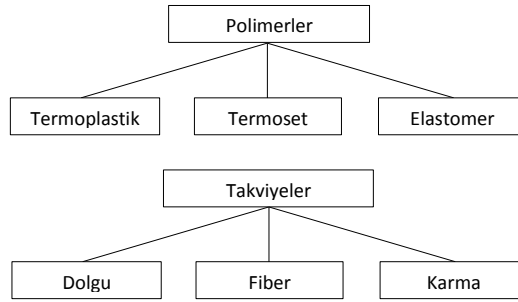
1.2. Polimer Kompozitler

Kompozit malzeme iki veya daha fazla malzemenin olumlu özelliklerini tek bir malzemede toplamak amacıyla oluşturulan malzemelerdir.

Kompozit malzemeler iki yapıdan oluşmaktadırlar. Bunlar ana yapıyı oluşturan matriks ve ana yapıyı destekleyen takviye malzemeleri olmaktadır. Matriks malzemesi metal, seramik ve polimer malzemesinden oluşmaktadır. Takviye malzemeleri ise elyaflar, viskerler, parçacıklar veya tabaka şeklindeki yapılardan oluşabilir.

Polimerler, monomer adı verilen kimyasal yapılardan meydana gelen zincir şeklinde bir yapıya sahip olan sentetik malzemelerdir [2].

Polimerler fiziksel olarak termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. Şekil 1.1.'de polimerlerin fiziksel olarak sınıflandırılması ve takviyelendirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Polimerlerin fiziksel olarak sınıflandırılması ve takviyelendirilmesi [3]

Termoplastikler, oda sıcaklığında katı olarak bulunurlar. Rijit bir yapıya sahip olmayıp ısıtıldıklarında yumuşarlar [2]. Polimer zincirleri kuvvetli kovalent bağlarla molekül zincirleri ise zayıf elektrostatik çekme kuvvetleriyle bağlıdır. Isı altında bağlar zayıflayarak polimer zincirleri birbirleri üzerinde hareket ederler [4].

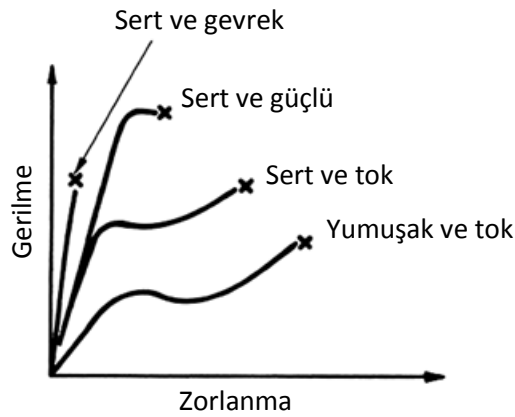
Termosetler, kimyasal çapraz bağlara ve kuvvetli fiziksel bağlara sahiptirler [4]. Polimerizasyon işlemi iki aşamada gerçekleşir. İlk aşamada monomerler lineer

zincirlerin bir araya getirdiği reaktörde başlar ve ikinci aşamada kalıplama işleminde sıcaklık ve basınçla reaksiyona girmeyen kısımlar sıvılaşıp molekül zincirleri reaksiyona girerler [2]. Termoset polimerler termoplastiklerden daha güçlü ve daha rijittirler ve genellikle yüksek sıcaklıklarda kullanılırlar. Termosetler yüksek ısı kararlılık, yüksek boyutsal kararlılık, yüksek rijitlik, sürünmeye karşı yüksek direnç, düşük yoğunluk ve yüksek elektriksel ve ısı yalıtım özelliklerine sahiptirler [3, 5].

Elastomerler, çapraz bağlı yapıya sahiptirler. Moleküller arası fiziksel bağları zayıf olduğu için lastiksi bir davranış gösterirler [4]. Çok düşük gerilmeler karşısında büyük elastik deformasyon yaparlar [2].

1.3. Polimer Kompozitlerin Mekanik Davranışları

Dış kuvvetlerin etkisi altında değişik zorlamalar karşısında, malzemede oluşan deformasyonlar ve bu etkiler altında malzemenin gösterdiği dayanma gücü özelliklerine mekanik özellikler adı verilir [6]. Malzemelerin mekanik davranışlarını belirlemek için çekme, basma, eğilme, darbe, yorulma, kırılma, sertlik ve sürünme testleri yapılmaktadır. Şekil 1.2.'de farklı polimer malzemelerin çekme deneyi davranışları görülmektedir.



Şekil 1.2. Farklı polimer malzemelerin çekme davranışları [7]

Şekil 1.2.'ye göre gevrek ve kırılğan malzemeler yüksek elastiklik modülüne, orta seviyede bir çekme dayanımına ve düşük kopma uzama değerine sahiptirler. Sert ve güçlü polimerler yüksek elastiklik modülü ve yüksek çekme dayanımı değerlerine sahip olmaktadır. Eğrinin şeklinden malzemenin akma noktasında kırılacağı

beklenmektedir. Sert ve tok davranıştaki polimerler yüksek akma noktası, yüksek elastiklik modülü, düşük akma noktası ve büyük kopma uzama değerine sahiptirler. Yumuşak ve tok polimerler düşük elastiklik modülü, orta seviyede çekme dayanımı ve oldukça yüksek kopma uzama değerlerine sahiptirler [7].

Polimer kompozitlerde kullanılan takviye malzemelerinin tipleri ve şekilleri, kompozit içerisindeki oranları, matriks ve takviye arasındaki bağ oluşumu ve üretim yöntemleri bu malzemelerin mekanik davranışlarını etkilemektedir [8].

Foroutan ve diğerleri [9], mekanik özellikleri etkileyen faktörlerin başında matriks ve dolgu ara yüzey etkileşiminin etkisini ve zayıf ara yüzey etkileşiminin matriks ve dolgu arasındaki gerilme transferini engellediğini belirtmişlerdir.

Polimer matrise mikro ve nano tanecik boyutunda parçacıkların eklenmesi polimer matrise daha yüksek bir rijitlik kazandırır [8]. Rijit mikro dolguların eklenmesi kompozit malzemelerin rijitliğini arttırmasına rağmen mekanik özellikleri özelliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum matriks ve dolgu arasındaki arayüzey bağının zayıf olmasından kaynaklanmaktadır [10, 11].

Parçacığın tanecik boyutunun azalmasıyla yüzey alanı arttığından dolayı polimer kompozit daha etkili bir gerilme transfer mekanizmasına sahip olur ve bu durum polimer kompozitin mekanik dayanımını arttırır [8]. Bununla birlikte nano parçacıklar küçük tanecik boyutuna ve yüksek yüzey enerjisine sahip olmalarından dolayı kompozit içerisinde topaklaşma eğilimi göstermektedirler [12].

Asi [13], cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlere Al_2O_3 parçacıkları ekleyerek mekanik özelliklerini incelemiştir. Al_2O_3 parçacıklarının eklenmesi epoksi kompozitin çekme dayanımı değerlerini düşürmüştür. Bununla birlikte eğilme dayanımı değerlerinde ise ağırlıkça %10 seviyesine kadar artış göstererek ağırlık oranı arttıkça eğilme dayanımı düşmüştür.

Wetzel ve diğerleri [14], hacimce %6,7 ve % 12,5 oranlarında mikro tanecik boyutunda $CaSiO_3$ ve hacimce %0,5 - %10 aralığında nano tanecik boyutunda Al_2O_3

ile epoksi matriksli kompozitler hazırlayarak mekanik olarak darbe enerjisi, eğilme mukavemeti ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir.

Jawahar ve diğerlerinin yaptıkları çalışmada [15] ağırlıkça % 1 kil içeren nano kompozitin eğilme modülü katkısız polyestere göre % 20 oranında iyileşme göstermiştir.

Turaif [16], nano tanecik boyutuna sahip dolgulu kompozit malzemelerin kompozit içerisindeki homojen dağılımının mekanik özellikleri etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğunu belirtmiştir. Buna göre dolguların kompozit içerisinde topaklaşması çentik etkisinden dolayı gerilme yığılma bölgeleri oluşturarak çatlak oluşumuna neden olmaktadır.

Inceoğlu ve Yilmazer [17], polyester matriste organik olarak işlem görmüş kil ve işlem görmemiş kil olarak iki farklı nano kil türünü %3, 5, 7 ve 10 oranlarında kullanarak mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Organik olarak işlem görmüş nano kil parçacıkları % 5lik oranda en yüksek eğilme dayanımını göstermiştir ve artan dolgu oranlarında oluşan topaklaşmalar gerilim yığılmaları olarak görev yapmışlardır ve parçacıkların topaklaşması ve matris ve dolgu arasındaki zayıf bağ oluşumundan dolayı eğilme dayanımı düşmüştür. Organik olarak işlem görmemiş kil ise matris içinde büyük topaklaşma davranışı gösterdiğinden dolayı kompozit malzemenin mekanik dayanımını düşürmüştür.

Fu ve diğerleri [8], mikro ve nano tanecik boyutuna sahip dolguların polimer kompozit malzemelerin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Dolguların parçacık boyutu, kompozit içerisindeki oranları parçacık matris arayüzey adezyonu olarak üç parametreyi elastisite modülü, çekme dayanımı, kırılma tokluğu ve darbe dayanımı üzerindeki etkisini ayrı ayrı inceleyerek teorik modellerle karşılaştırmışlardır. Dolguların kompozit malzemelerin mekanik davranışlarına etkisini değerlendirirken bu üç parametrenin önemini belirtmişlerdir.

Jajam ve Tippur [18], aynı miktarlardaki nano ve mikro tanecik boyutuna sahip silika dolgulu epoksi kompozitlerin statik ve dinamik kırılma tokluğu üzerindeki etkilerini

incelemişlerdir. Buna göre her iki tanecik boyutundaki dolgu türü ile oluşturulan kompozitlerin yarı statik kırılma tokluğu değerleri saf epoksiye göre daha yüksek değerlerde çıkmıştır ve aynı miktardaki dolgu ile oluşturulan nanokompozitte mikro kompozite göre göre daha yüksek kırılma tokluğu değerleri elde edilmiştir. Dinamik kırılma tokluğu değerlerinde ise mikro ve nanokompozitler saf epoksiye göre daha yüksek değerlere sahip olmasına karşılık mikro dolgulu kompozitlerde nano dolgulu kompozitlere göre daha yüksek kırılma tokluğu değerleri elde edilmiştir.

Zhou ve diğerleri [19], mikro ve nano tanecik boyutuna sahip farklı TiO_2 parçacıklarından oluşan epoksi kompozit malzemesinin mekanik davranışını incelemişlerdir. 5 nm, 10 nm, 30 nm ve 20 μm tanecik boyutlarına sahip TiO_2 ile hazırladıkları kompozit malzemelerde tanecik boyutu küçüldükçe daha iyi mekanik sonuçlar alındığını belirtmişlerdir. En iyi mekanik değerleri ağırlıkça %1 oranında 10 nm tanecik boyutuna sahip TiO_2 kompozitinden alırken tanecik boyutu 5 nm'ye indiğinde ise parçacıkların dağılımının zayıf olmasından dolayı mekanik değerlerde düşmeler gözlemlemişlerdir.

Lin ve diğerleri [20], nanoparçacıkların kompozit içindeki homojen dağılımı, dolguların tanecik yapısı ve geometrisinin kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkilediğini belirtmişlerdir. Bununla ilgili olarak polyester matrisli nano TiO_2 ve nano kil kompozitleri oluşturarak çekme dayanımını ve darbe dayanımlarını incelemişlerdir.

Evora ve Shukla [21], hacimce % 1 ile %4 aralığında değişen TiO_2 ile polyester nanokompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. %1 TiO_2 dolgulu nanokompozit en yüksek mekanik özellikleri göstermiştir. %1 TiO_2 dolgusunun en yüksek mekanik değerleri göstermesinin sebebi olarak dolguların kompozit içerisinde homojen dağılımından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Baskaran ve diğerleri [22], nano Al_2O_3 parçacık dolgulu doymamış polyester kompozitlerin performanslarını incelemişlerdir. Bu kapsamda mekanik özelliklerini incelemek amacıyla çekme testi, eğilme testi ve darbe testi yapmışlardır. Kompozit içerisindeki dolguların dağılımına bakıldığında ağırlıkça %5'ten sonra Al_2O_3

parçacıklarının kompozit içerisinde topaklaştığı belirtilerek bunun reçine ve dolgu arasında zayıf bağ oluşumuna yol açtığını belirtmişlerdir.

Zhang ve diğerleri [23], Polipropilen (PP) matriksine eklenen CaCO_3 dolgusunun mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bununla ilgili olarak saf polipropilen, nano boyutta tanecik dolgulu PP, mikro boyutta tanecik dolgulu PP ve nano ve mikro karma olarak oluşturdukları kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mikro CaCO_3 dolgusunun eklenmesi PP matriksinin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir buna karşılık nano CaCO_3 dolgusunun eklenmesi PP matriksinin mekanik özelliklerini iyileştirmiştir.

Xu ve diğerleri [24], nano TiO_2 parçacık dolgulu doymamış polyester kompozitleri incelemişlerdir. Nano dolgunun mekanik etkilerini incelemek için eğilme testi ve darbe testi yapmışlardır.

Baskaran ve diğerleri [25], polyester esaslı %1-%9 aralığında CaCO_3 dolgulu nanokompozit malzemeler üretmişlerdir. Dolgular saf polyestere göre mekanik değerleri yükseltmiştir ve en iyi mekanik değerleri % 5 CaCO_3 dolgulu kompozitte elde etmişlerdir. % 7 CaCO_3 dolgusu eklendikten sonra kompozit içerisinde nano parçacıkların topaklaşması meydana gelmiş ve bu durum mekanik değerlerin düşmesine sebep olmuştur.

Yinghong ve diğerleri [26], nano TiO_2 -polyester kompozitleri oluşturup mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çekme, eğilme ve darbe testleri sonucunda en iyi değerleri ağırlıkça %4 nano TiO_2 dolgusu ile elde etmişlerdir. Dolgu oranı arttıkça mekanik değerlerde düşmeler meydana gelmiştir.

Turaif [27], 17 nm, 50 nm tanecik boyutlarına sahip iki nano dolgu ve 220 nm tanecik boyutuna sahip mikronaltı büyüklüğündeki TiO_2 dolgusu ile epoksi kompozitleri oluşturmuştur. Buna göre tanecik boyutu küçüldükçe daha düşük % ağırlık oranlarında daha yüksek mekanik değerler elde etmiştir.

Shi ve diğeri [28], yaptıkları çalışmada epoksi matrisine hacimce % 0,27 ile %2,19 aralığında nano tanecik boyutunda Si_3N_4 eklemiştir. Si_3N_4 dolgusunun eklenmesiyle artan dolgu oranına bağlı olarak epoksi kompozitin eğilme dayanımı ve darbe dayanımı değerlerinde iyileşme sağlamışlardır.

Gupta ve diğeri [29], hacimce %0.125, %0.25, %0.50, %1 ve %2 nano kil içeren epoksi matrisli kompozitler hazırlayarak çekme, basma ve darbe dayanımlarını incelemiştir. Hacimce %0,25 nano kil dolgu ile hazırlanan kompozit malzemeler en yüksek çekme ve basma dayanımı göstermişlerdir. Diğer yünden nano kil dolgulu kompozit malzemelerin darbe dayanımlarını incelendiğinde ise saf epoksi matrisine göre daha düşük değerlerde çıkmıştır.

Zhang ve diğeri [30], % 0,5 - % 4 aralığında değişen nano- SiO_2 parçacıklarıyla dolgulu PEEK kompozitlerini çalışmışlardır. Nano SiO_2 'nin eklenmesiyle malzeme rijitliğinde önemli bir iyileşme ve malzeme sünekliğinde azalma meydana gelmiştir.

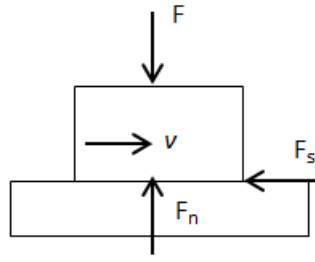
Zhou ve diğeri [31], doymamış polyester matrisi ile karbon nano fiber ve uzun fiber takviyesi ilave ederek hibrit kompozit üretmişlerdir. Ağırlıkça %3,5 oranında katılan karbon nano fiber katkısı, polyester fiber takviyeli kompozit malzemenin eğilme dayanımını %103 oranında arttırmıştır.

1.4. Polimer Malzemelerin Tribolojisi

Triboloji, temas halinde olan ve birbirlerine göre bağıl hareket yapan malzemeler arasındaki sürtünme, aşınma, yağlama olaylarını ve bunlar arasındaki ilişkiyi inceleyen bir alandır [4].

1.4.1. Sürtünme

Sürtünme, kayan veya yuvarlanan yüzeyler arasındaki harekete karşı oluşan direnç kuvvetidir. Sürtünme ile ortaya çıkan enerji deformasyon, aşınma ve ısıya dönüşür [32]. Şekil 1.3.'de sürtünme kuvveti görülmektedir.



Şekil 1.3. Sürtünme kuvvetinin gösterimi

$$F_n \cdot \mu = F_s \quad (1.1)$$

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (1.2)$$

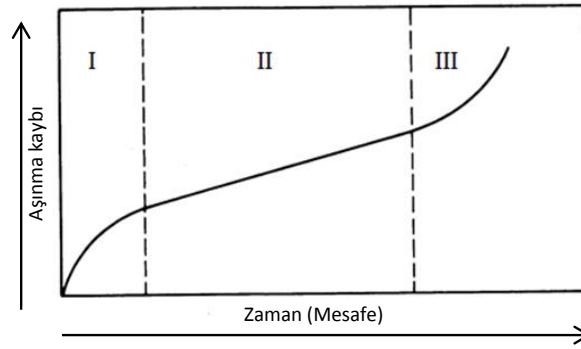
Burada, μ sürtünme katsayısını, F_s sürtünme kuvvetini ve F_n normal kuvveti göstermektedir.

Sürtünme katsayısı sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranı olan boyutsuz bir katsayıdır. Sürtünme katsayısı; malzeme özellikleri, temas yüzeyleri, sıcaklık, süre ve sisteme etki eden normal kuvvet faktörlerine bağlıdır.

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 [32].

1.4.2. Aşınma

Aşınma, temas halindeki yapıların bağlı hareketleri sonucunda yüzeylerinden malzeme ayrılması olarak tanımlanır. Şekil 1.4'te aşınma süreci gösterilmiştir.

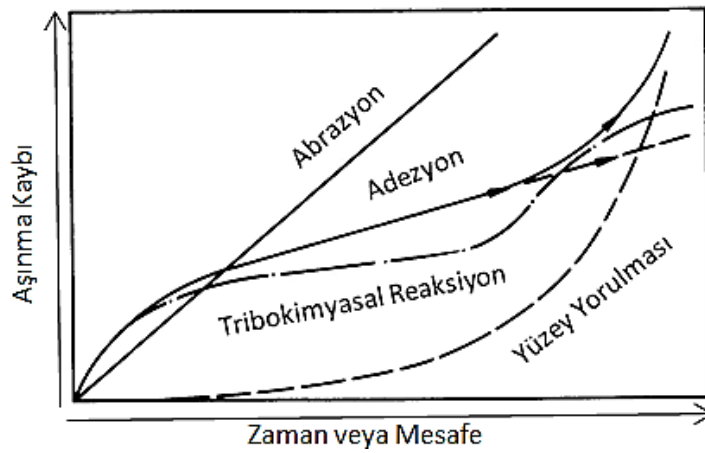


Şekil 1.4. Aşınma süreci [33]

Buna göre aşınma süreci üç aşamadan oluşmaktadır. I. aşama ilk çalışma periyodu olup bu aşamada süre ve kayma mesafesi ile birlikte aşınma kaybının yükselerek arttığı bölümdür. II. aşama, kararlı hal periyodu olarak tanımlanır ve bu aşamada aşınma oranı sabittir. III. aşamada ise hasar oluşuncaya kadar aşınma kaybı artarak devam eder [33].

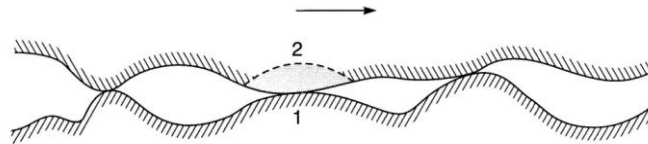
1.4.2.1. Aşınma mekanizmaları

Aşınma mekanizmaları deformasyon tipi, temas halindeki elemanların özellikleri, arayüzey özellikleri ve yükleme koşulları tarafından belirlenir. Şekil 1.5. Aşınma mekanizmalarını aşınma süreci diyagramında göstermektedir. Buna göre abrazyon aşınmasındaki aşınma kaybı aşınma süreci diyagramında lineer bir davranış göstermektedir. Diğer taraftan adezyon, yüzey yorulması ve tribokimyasal reaksiyon ise kaymalı aşınma durumunda genel olarak aşınma süreci diyagramındaki üç bölgedeki davranışı göstermektedir [33]. Bu bölümde polimerlerin kaymalı teması halimnde karşılaştıkları adezif, abrazif, yorulma ve tribokimyasal aşınmalara değinilmiştir.



Şekil 1.5. Aşınma mekanizmaları [33]

Adezif aşınma, basınç altındaki yapılarda kaymalı temas durumunda oluşmaktadır. Ara yüzeydeki temas çıkıntılarında adezyon olur ve bu temas noktaları kayma hareketi ile kesilir. Bu durum bir yüzeyden parçanın ayrılarak diğer yüzeye yapışmasına neden olur. Kayma hareketi devam ederken taşınan parçacıklar taşındıkları yüzeyden kopabilirler ve ilk yüzeylerine geri taşınabilirler veya aşınma parçacıkları serbest halde kalabilirler. Bu aşınma parçacıklarının oluşumu ile tekrarlı yükleme ve boşaltma sırasında yorulma prosesinin sonucu olarak çatlama olayı meydana gelir [34]. Şekil 1.6'da adezif aşınma olayı görülmektedir.



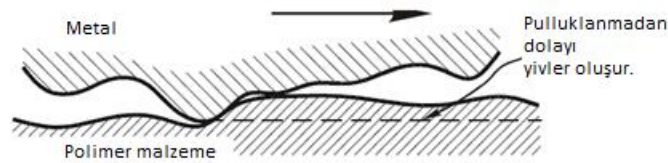
Şekil 1.6 Adezif Aşınma [34]

Adezif aşınmada aşınma kaybı, kayma hızı, yük, sıcaklık, çevre şartları, malzeme özellikleri, geometri, yüzey pürüzlülüğü, arayüzey elemanları ve yağlama parametrelerine bağlıdır [34].

Polimerler veya polimer metal çiftleri arasında Van der Waal kuvvetleri, Coulomb elektrostatik kuvvetleri ve hidrojen bağları tarafından adezyon oluşur [34].

Polimer ve çeliğin kayma halindeki ilk aşamasında polimerden karşı elemana olan adezyon transferi moleküler ve elektrostatik kuvvetler ve fiziksel ve kimyasal etkileşimler ile olmaktadır [35].

Polimer ve metal yüzeyleri arasındaki adezyondan dolayı polimerden metal yüzeyine malzeme transferi kayma sırasında temas bölgesinin alt yüzeyinin kesilmesine neden olur [36]. Şekil 1.7'de metal-polimer yüzeylerindeki pürüzlülükler arasındaki mekanik etkileşimler görülmektedir.



Şekil 1.7. Metal-polimer yüzeylerindeki pürüzlülükler arasındaki mekanik etkileşimler [35]

Sürtünme halindeki iki yüzeyin teması yüzey pürüzlülüklerinde olmaktadır. Sürtünme teorilerine göre sürtünme temas yüzeylerindeki pürüzlülük noktalarının mekanik etkileşimi sonucunda meydana gelmektedir [35].

Polimer malzeme F_N normal yükü altında çelik plakaya karşı sürtünmeye başladığında temas eden yüzeyler arasında gerçek temas bölgelerinde adeziv bağlantılar oluşur ve karşılıklı sürtünme sonucunda oluşan kesme kuvveti

$$F_T = \tau_s \cdot A_r \quad (1.3)$$

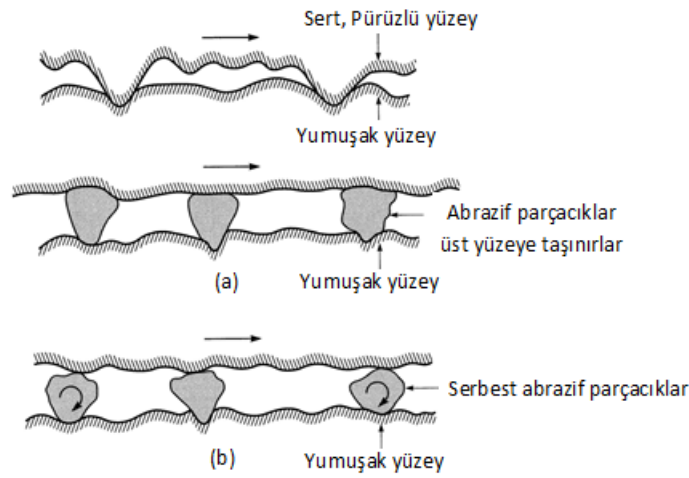
şeklinde ifade edilir. Burada A_r bağlantı noktalarındaki gerçek temas alanını, τ_s kayan yüzeyler arasında oluşan kayma gerilmesini ve F_T kesme kuvvetini belirtmektedir [37, 38].

Polimer-metal sürtünme sisteminde aşınma periyodunun ilk aşamasında transfer film oluşmaktadır. Birçok metal polimer aşınma çiftinde tribolojik özellikler transfer filme ve yapısına, polimerin metal yüzeye bağlanma mukavemetine, transfer filmle kaplı karşı yüzeyin yüzey alanına, polimer - transfer film ara yüzeyindeki adeziv etkileşime bağlıdır [39].

Polimer malzemeler metal yüzeylere karşı abrazif aşınmasında yüzey pürüzlülüğünün etkisi altında kalırlar [35].

Abrazif aşınma, temas halindeki malzemelerde pürüzlülük noktalarında sert yüzeylerin veya sert parçacıkların yumuşak yüzey üzerinde kayması ile plastik deformasyon veya kırılma sonucu ara yüzeyde meydana getirdikleri hasar sonucu oluşur [34].

Şekil 1.8'de abrazif aşınma prosesi görülmektedir. Abrazif aşınmada genel olarak iki durumla karşılaşılır. İki elemanlı abrazif aşınma olan birinci durum iki sürtünen yüzeyden daha sert olanının diğerini aşındırması olayıdır. Diğer abrazif aşınma türü ise iki yüzey arasında kalan ve tek bir yüzeyi veya temas halindeki her iki yüzeyi de aşındıracak kadar sert olan abrazif bir parçacığın üçüncü bir eleman olarak ortaya çıkması ile oluşan üç elemanlı abrazif aşınmadır [34].



Şekil 1.8. Abrazif aşınma prosesi [34]

Abrazif aşınmada malzeme kaybı mikro talaş kaldırma, çizilme ve pulluklanma nedeniyle olmaktadır [35, 40, 41, 42]. Üst tabakadaki çevrimsel, değişken deformasyonlar nedeniyle yorulma aşınması meydana gelmektedir. Tekrarlı yuvarlanma ve kayma boyunca sırasıyla alt yüzey ve yüzey yorulmaları görülmektedir. Kritik bir çevrim sayısından sonra tekrarlı yükleme çevrimleri alt yüzey ve yüzey çatlaklarına yol açmaktadır. Büyük parçacıkların oluşumu ile yüzey kırılması ve yüzeyde büyük oyuklar oluşur [34]. Bununla birlikte polimerlerin

molekül zincirlerinde çatlama meydana gelir. Bunun sonucunda polimerin yüzey tabakasının içindeki moleküler ağırlığı düşer ve polimerin kristallik oranı azalır. Yüzeyde oluşan mikro çatlakların sonucunda Polimer malzeme parçacıkları mekanik etkileşimler ve adezyon nedeniyle yüzeyden kalkarlar [35].

Tribokimyasal aşınma, sürtünen yüzeylerin ortamla reaksiyonu sonucu oluşur [33]. Polimerin temas yüzeyinde sürtünmeden dolayı oluşan ısı nedeniyle sıcaklık yükselmesi meydana gelir ve moleküler arası polimer zincirleri arasındaki bağlar gevşer. Polimer zincir yüzeyleri basma, kayma ve gerilme gibi mekanik zorlanmalara maruz kalarak zincirlerin çatlama ve farklı radikallerde molekül oluşumları meydana gelir. Bu durum polimerlerin kırılan zincirleri ve metalin yüzeyine konumlanan bileşikler arasında tribokimyasal reaksiyon başlatır [35].

Genel olarak polimerlerin tribokimyasal reaksiyonu, polimerin kimyasal içeriği ve moleküler yapısından, hız, yük, temas yapısı gibi sürtünme koşullarından temas elemanlarından veya yüzeydeki metal oksit gibi ortamda bulunan maddelerden etkilenir [43, 44].

1.4.3. Polimer kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışları

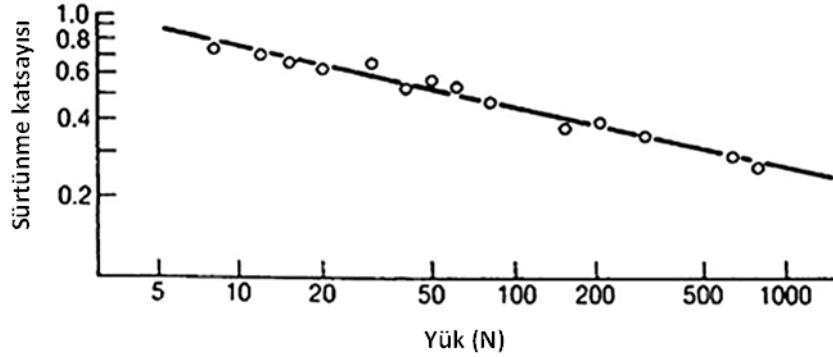
Polimerlerin sürtünme ve aşınma davranışları temas yüzeyleri, yüzey pürüzlülüğü sisteme uygulanan yük, kayma hızı, sıcaklık ve transfer film faktörleri tarafından etkilenmektedir. Ayrıca polimerlere eklenen dolgular da oluşan kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışları üzerinde önemli rol oynamaktadır [39].

Polimer aşınması üç grup parametreden etkilenmektedir. Birinci grup kayma halindeki temas koşullarıdır. Bunlar yüzey pürüzlülüğü ve temas kinematığından oluşur. İkinci grup polimerin kütle mekanik özelliklerinden ve bu özelliklerin sıcaklık ve ortam şartlarıyla nasıl değiştiğinden oluşur. Üçüncü grup ise transfer film ve polimer parçacıklarının aşınmaya etkisini inceler [45].

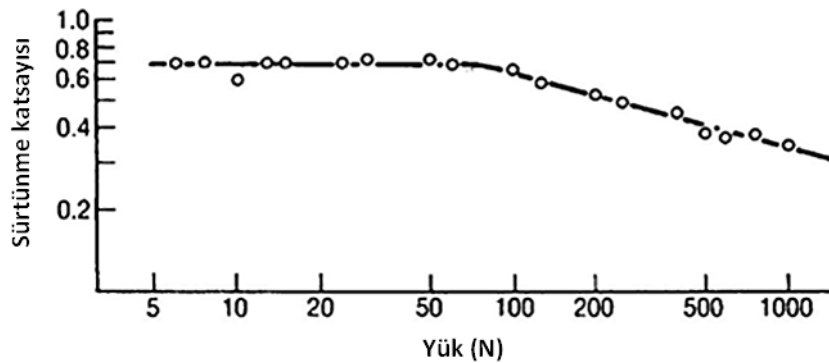
Yük, sürtünme katsayısını ve aşınma oranını önemli oranda etkilemektedir. Elastik temas durumunda yükün artmasıyla birlikte sürtünme katsayısı düşmektedir. Plastik

deformasyon başladığında ise yükün artışıyla sürtünme katsayısı yükselmektedir [46]. Yükün artışıyla polimerlerin termal yumuşamasına bağlı olarak aşınma debisi artmaktadır [33].

Orta derece pürüzlü yüzeylerde yük artarken bazı yüklerde pürüzlülük noktalarındaki elastik deformasyonlar oldukça yükselir bu durumda temas yüzeylerindeki tekil pürüzlülük noktaları tamamen deforme olur ve temas bölgesi geniş tekil bir pürüzlülük noktasına dönüşür. Bu durumda yükün artışıyla birlikte sürtünme katsayısı düşer. Pürüzsüz yüzeylerde temas bölgesi büyük bir pürüzlülük temas noktası olarak çalışmaya başlayarak yükün artışıyla sürtünme katsayısı düşmektedir. Şekil 1.9' da yüzey pürüzlülüğünün ve yükün PMMA polimerlerinin sürtünme katsayısına etkisi görülmektedir. Buna göre pürüzsüz polimer malzemesi artan yüklerle birlikte sürtünme kuvveti düşmektedir. Bununla birlikte pürüzlü polimer malzemesinde düşük yüklerde sürtünme kuvveti aynı kalırken yüksek yüklerde sürtünme kuvveti düşmektedir [34, 47].



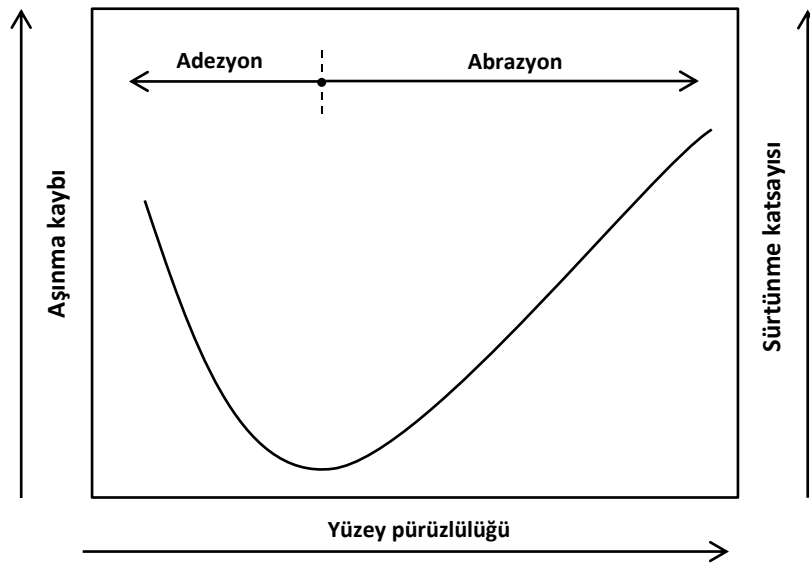
a) Pürüzsüz yüzey



b) Pürüzlü yüzey

Şekil 1.9. Pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin PMMA polimerlerinde yük altında sürtünme katsayısına etkisi [34, 48]

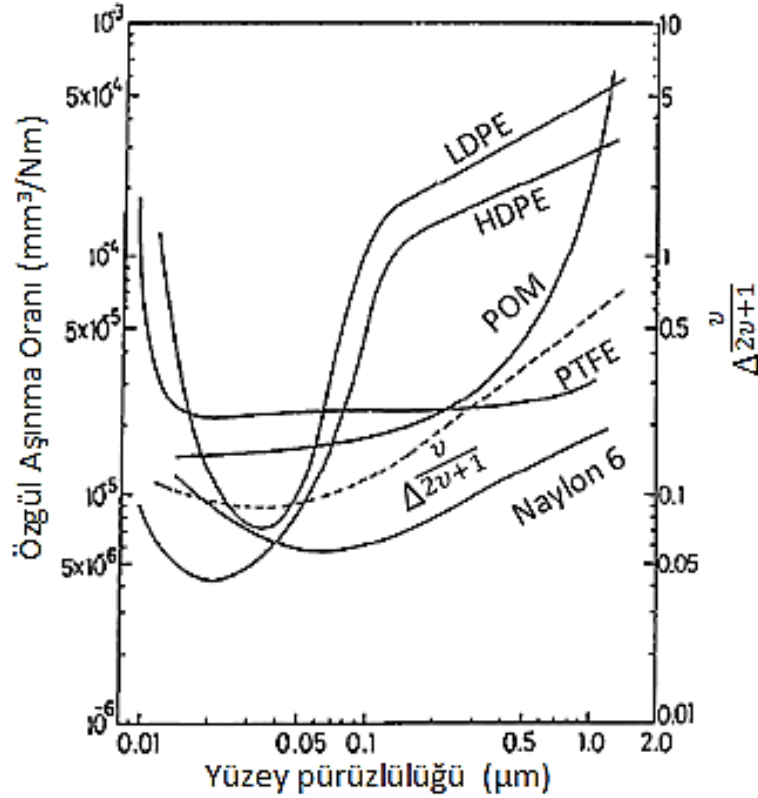
Diğer yönden yüksek pürüzlülükteki çelik yüzeyler polimerler üzerinde abrazyon aşınma mekanizmasına neden olmaktadır. Pürüzsüz yüzeylerde ise çelik yüzey üzerine polimerik tabaka şeklinde birikerek ara yüzey transferi gerçekleşir. [33] Şekil 1.10'da yüzey pürüzlülüğünün termoplastik malzemenin aşınma ve sürtünme davranışına etkisi görülmektedir. Buna göre yüzey pürüzlülüğünün azalması temas yüzeylerinin adeziv etkileşimlerini arttırmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün artması ile adeziv etkileşimler azalarak abrazyon meydana gelmektedir.



Şekil 1.10. Yüzey pürüzlülüğünün termoplastik malzemenin aşınma ve sürtünme davranışına etkisi [33]

Wieleba [35], yüzey pürüzlülüğü ve polimer metal adezyonunu incelemiştir. Buna göre pürüzsüz yüzeylerde temas yüzeylerindeki adezyon etkileşimleri yüksek olmaktadır bu durum polimerlerin yüksek sürtünme katsayısına ve yüksek aşınmasına neden olmaktadır. Çeliğin artan pürüzlülüğü ile adeziv etkileşimler düşer ve polimer tabakasının yapısı mekanik etkileşimleri artırır. Çelik yüzeyinin yüksek pürüzlülüğü ile polimer tabakasının oluşumu zorlaşır ve adezyon etkileşimleri zayıftır. Transfer olan malzeme tabakasının sürekliliğindeki eksiklik ve polimerin kayma yüzeyine karşı çelik yüzeyindeki güçlü mekanik etkileşimler aşınmayı artırır.

Tanaka [49], farklı polimer malzemeler kullanarak karşı yüzey pürüzlülüğünün aşınma oranına etkisini incelemiştir. Şekil 1.11'de karşı yüzey pürüzlülüğünün farklı polimerlerin aşınma oranına etkisi görülmektedir.



Şekil 1.11. Yüzey pürüzlülüğünün farklı polimerlerin aşınma oranına etkisi [49, 50]

Buna göre pürüzsüz yüzeyler üzerinde kayan polimer malzemelerin aşınması adezyon sonucu gerçekleşmektedir. Diğer yönden pürüzlü yüzeyler üzerindeki aşınma karşı yüzey pürüzlülük noktalarından kaynaklanan veya karşı yüzey pürüzlülük noktalarının neden olduğu küçük deformasyonlu tekrarlı gerilmelerden kaynaklanan yorulma sonucunda abrazyon ile oluşmaktadır. [49, 50]

Quaglioni ve Dubini [37], polimerlerin pürüzsüz yüzeyler üzerindeki sürtünmesini incelemişlerdir. Buna göre sisteme uygulanan yükün artmasıyla sürtünme katsayısı düşmektedir. Düşük ve orta yük seviyelerinde sürtünme katsayısının hassasiyetinin düşük olması pürüzlülük temas noktalarındaki elastoplastik deformasyonlardan dolayı gerçek temas alanının büyüme etkisinden kaynaklanmaktadır. Sürtünmenin daha hızlı düşmesi daha büyük basınç değerlerinde olmaktadır. Böylece temas alanının polimerin tüm yüzeyinde olduğu kabul edilir.

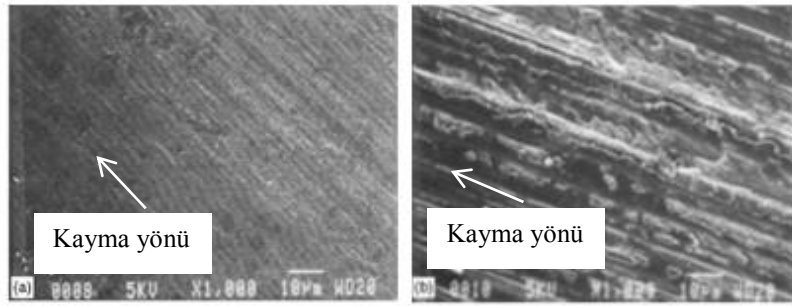
El Tayeb ve diğerleri [51], cam elyaf katkılı epoksi kompozitlerinin farklı aşındırıcı disk malzemeleri karşısındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Buna göre

pürüzsüz yüzey kompozit pimin ve aşındırıcı yüzeyin ara yüzeyindeki temas alanının artmasına neden olmaktadır. Farklı aşındırıcı disk malzemelerinde bulunan temas bölgesindeki pürüzlülükler sürtünme ısısının ve sürtünme kuvvetinin yükselmesine neden olmuştur.

Franklin [52], polimer malzemelerin kuru sürtünme halinde farklı karşı yüzey pürüzlüklerindeki aşınma davranışlarını incelemiştir. Buna göre yüzey pürüzlülüğündeki artış aşınma miktarının artmasına neden olmaktadır. Yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerinde abrazyon aşınma mekanizmasının etkili olduğunu belirtmiştir. Transfer tabakasının yapısı temas yüzeyleri pürüzlülüğünün yüzey topografyasını iyileştirerek ve pürüzlülük derinliğini düşürerek abrazyon etkisini azaltmada etkili olduğunu belirtmiştir.

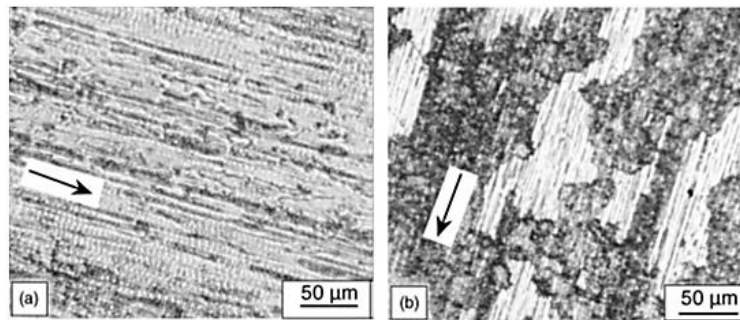
Polimerlerin metal yüzey üzerinde kayması sonucu transfer film oluşmaktadır. Transfer film karşı yüzey üzerinde oluşarak karşı malzeme, pürüzlülük ve kayma koşulları tarafından kontrol edilir. Polimerlere dolgu eklenmesi sonucu oluşan transfer film tribolojik davranışı etkilemektedir. Transfer filmi etkileyen değişkenler hız, yük, atmosfer ve sıcaklık, polimerin yapısı, zincir yapısı, pendant gruplar, polimerin kristallliği ve karşı yüzeyin mekanik topografyası, yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal reaktivitesi olmaktadır. [36] Polimerlerin sert yüzey üzerinde daha fazla kayması polimer parçacıkları ile oluşan transfer film üzerine eklenerek polimerin aşınması devam eder [34].

Bahadır [36], polimer tribolojisinde oluşan transfer tabakalarının yapısını incelemiştir. Buna göre düşük pürüzlülükte film ince ve oldukça yumuşaktır ve kayma esnasında polimerin olası bir abrazyonunu önler. Diğer yönden daha yüksek pürüzlü yüzeyde delikler ve çatlaklar vardır. Pürüzlülüğü yüksek olan karşı yüzeyde transfer film olmasına rağmen bu durum abrazyona neden olur. Bunun sonucu olarak pürüzlü yüzeydeki aşınma daha fazla olmaktadır. Şekil 1.12'de % 35 PbS katkılı naylon kompozitlerinde karşı yüzey pürüzlülüğünün transfer filme etkisi görülmektedir.



Şekil 1.12. % 35 PbS katkılı naylon kompozitlerinde karşı yüzey pürüzlülüğünün transfer filme etkisi a) 0,11 μm yüzey pürüzlülüğü b) 0,30 μm yüzey pürüzlülüğü [36]

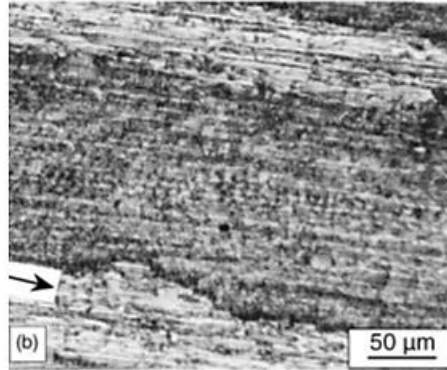
Bahadır ve Sunkara [53], farklı nano dolguların transfer tabakasına etkisini incelemiştir. Polimer kompozite eklenen nano dolgular belirli bir orandan sonra aşınmayı olumsuz yönde etkilemekte ve bu durum transfer filmi de etkilemektedir. Transfer film heterojen bir yapıya sahiptir ve iki yüzey arasındaki adezyon azalmaktadır. Şekil 1.13'de hacimce %2 ve %5 nano TiO_2 dolgulu PPS kompozitlerinde çelik yüzeyde oluşan transfer film yapısı görülmektedir. %2 Nano TiO_2 dolgulu PPS en düşük aşınma kaybını veren (a)'da ki transfer film ince ve üniform olmaktadır ve aşınma parçacıkları küçük yapıdadır. Buna karşılık %5 Nano TiO_2 dolgulu PPS ise en yüksek aşınma oranını veren (b)'de ise kalın ve topaklı yapıda olmaktadır.



Şekil 1.13. Hacimce %2 ve %5 Nano TiO_2 dolgulu PPS kompozitinde çelik yüzeyde oluşan transfer film [53]

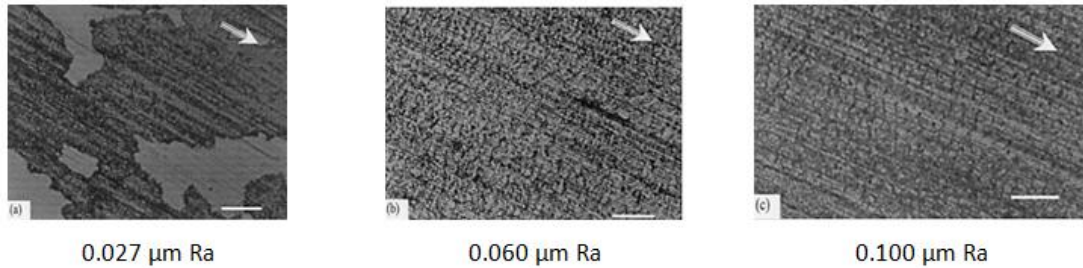
Şekil 1.14'de hacimce %5 nano SiC dolgulu PPS kompozitinde karşı çelik yüzeyinde oluşan transfer film yapısı görülmektedir. %5 Nano SiC dolgulu PPS kompozitte transfer film kalın bir yapıdadır ve karşı yüzeyin tamamını kaplamamaktadır. Aşınma parçacıkları parçalı yapıdadır. Matriks içinde artan dolgu içeriği ile birlikte transfer filmin içindeki taneciklerde artmakta ve böylece sert taneciklerin etkisiyle transfer filmin yapısı bozulmaktadır. transfer filmin karşı yüzeyden kolayca soyulmasına

neden olmakta ve bu durum karşı yüzeyle transfer film arasında adezyon eksikliğine neden olarak aşınmayı arttırmaktadır. [53]



Şekil 1.14. Hacimce %5 nano SiC dolgulu PPS kompozitine karşı çelik yüzeyde oluşan transfer film yapısı [53]

Schwartz ve Bahadur [54], nano Al_2O_3 dolgulu PPS polimerinin transfer film karşı yüzey ilişkisini incelemişlerdir. Şekil 1.15'de hacimce %2 nano Al_2O_3 dolgulu PPS kompozitin farklı yüzey pürüzlülüklerinde transfer filme etkisi görülmektedir.

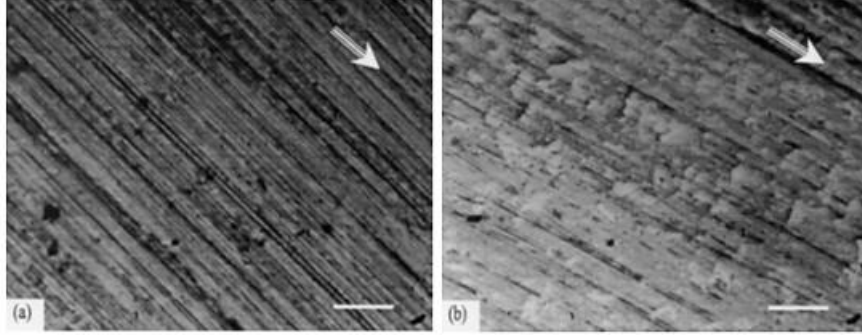


Şekil 1.15. Nano Al_2O_3 dolgulu PPS kompozitin farklı yüzey pürüzlülüklerinde transfer filme etkisi [54]

Artan yüzey pürüzlülüğü ile birlikte aşınma oranları düşmektedir. 0.027 μm yüzey pürüzlülüğünde transfer film düzenli değildir ve karşı yüzeyin tamamen sarmamıştır. 0.060 μm ve 0.100 μm pürüzlülük değerlerinde ise transfer film karşı yüzeyi kaplamış durumdadır.

Schwartz ve Bahadur [54], ayrıca dolgu oranının transfer film tabakasına etkisini incelemişlerdir. Hacimce %2 ve %3 nano Al_2O_3 dolgusu içeren kompozitlerin transfer film tabakaları görülmektedir. %3 nano Al_2O_3 dolgusu içeren kompozitler artan dolgu içeriği ile birlikte karşı yüzeyde oluşan transfer film tabakasında abrazyon etkisine neden olmuştur. Bu durum transfer filmin yapısını bozmuştur ve karşı yüzey transfer film bağ mukavemetini düşürmektedir. Bunun sonucunda aşınma oranı

artmaktadır. Şekil 1.16'da hacimce %2 ve %3 nano Al_2O_3 dolgulu PPS kompozitlerin transfer filme etkileri görülmektedir.



Şekil 1.16. Hacimce %2 ve %3 nano Al_2O_3 dolgulu PPS kompozitlerin karşı yüzeyde oluşan transfer filme etkileri [54]

Polimerlerde hızın sürtünme katsayısına ve aşınma davranışına etkisi sıcaklık etkisi ile birlikte ele alınmaktadır. Bu durum polimerin viskoelastik yapısıyla ilgilidir [33, 39, 55]. Sıcaklık artışı polimerin camsı geçiş sıcaklığına yaklaştığında sürtünme katsayısı hıza önemli bir şekilde bağlı olmaktadır. Bunun yanında düşük sıcaklıklarda sürtünme katsayısının değişimi hıza bağlı olmamaktadır [39, 56].

Polimerler içinde yarı kristal termoplastikler kayma hızından en çok etkilenen gruptur. Diğer yönden amorf veya çapraz bağlı malzemeler küçük dalgalanmalar göstermektedirler [33].

Hermann ve diğerleri [57], farklı yükler altında dokuma kompozit malzemelerin farklı hızların sürtünmeye etkisini incelemiştir. Düşük hızlarda kayan cisimler arasındaki temas zamanının süresi uzun olmaktadır. Bu durum iki yüzeyde daha büyük adezyon temasına yol açmaktadır. Düşük hızlarda büyük adezyondan dolayı adezyonu yenmek için daha büyük kuvvet gereklidir. Bu durum temas noktalarında daha büyük kesme ile sonuçlanmaktadır. Artan adezyon ve kesme kuvveti daha büyük sürtünmeye neden olmaktadır. Hızın belirli bir değerinden sonra ise karşı yüzey ve dokuma arasındaki temas zamanı düşmektedir ve bu durum yüksek hızlarda daha düşük temas zamanını sağlar.

Greco ve diğeri [58], yüksek hız ve farklı yük koşulları altında PEEK kompozitlerinin tribolojik davranışlarını incelemiştir. Yüksek kayma hızında yükün artışıyla malzemelerin sürtünme katsayıları düşmüştür.

Greco ve diğeri [58] polimerlerin sürtünme davranışı en çok termal etkilerden etkilenir. Kayma hızının artmasıyla sürtünme ısı polimerin yumuşamasına neden olarak kesme mukavemetini düşürür ve böylece sürtünme kuvveti düşer. Sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklık artışı polimer malzemesinin çelik yüzeyine transferini hızlandırmıştır. Transfer tabakasının oluşması temastaki sürtünme ve aşınma davranışını etkilemiştir.

Düşük sıcaklıklarda polimer malzemeler erime veya camsı geçiş sıcaklığına yaklaşır. Düşük ısı iletkenlikleri ısı etkilerine karşı polimerleri daha duyarlı hale getirir. Kaymalı temasta sürtünmeden kaynaklanan ısı, temas sıcaklığını erime veya camsı geçiş sıcaklığına kadar yükseltebilir. Bu durumda başta malzemenin rijitliği olmak üzere mekanik özellikler büyük oranda değişir. Yüksek kayma hızında temas bölgesinde oluşan sürtünme ısı polimer yüzeyinden malzeme transferini sağlamak için yeterli değilse termal yumuşama meydana gelir [58].

Diğeri yönden polimere eklenen katkı da sürtünme ve aşınma davranışları üzerinde etkili olmaktadır. Katkı tipi, dağılımı, katkı oranı, tanecik boyutu farklı kayma hızı ve farklı yükler altında polimer kompozit malzemelerin tribolojik özelliklerini etkilemektedir [59-79].

Polimer içerisindeki dolguların tanecik büyüklüğü polimer kompozitlerin tribolojik davranışını önemli oranda etkilemektedir. Tanecik büyüklüğü arttıkça taneciklerin açıcılığı artarak kayma sırasında dolgular abrazyona neden olmaktadır [59].

Krishna ve diğeri [60], seramik dolgulu polimer kompozitlerin tribolojik davranışlarını incelediklerinde seramik parçacıkları yüksek sertliklerinden dolayı seramik dolgulu polimer kompozitlerin saf polimere göre daha yüksek sürtünme katsayısına ve daha düşük aşınma oranına sahip olduklarını belirtmişlerdir.

Jawahar ve diğeri [61], polyester matrisine ağırlıkça % 3 nano kil dolgusu ekleyerek polyeşterin aşınma direncini % 85 oranında iyileştirmişlerdir.

Zhang ve diğeri [62], % 0,5 - % 4 aralığında değışen nano SiO₂ parçacıklarıyla dolgulu PEEK (polyetheretherketone) kompozitlerini çalışmışlardır. PEEK'in aşınma direnci nano SiO₂ eklenmesiyle önemli ölçüde iyileşmiştir. Hacimce %1 oranında nano SiO₂ içeriğinde kompozit en iyi aşınma direncini göstermiştir.

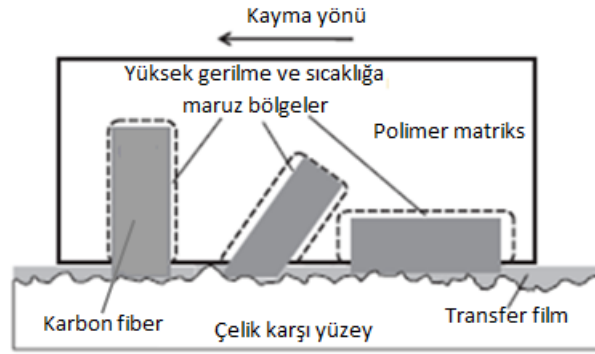
Shi ve diğeri [63], epoksi matrisine hacimce % 0,27 ile % 2,19 aralığında nano Si₃N₄ ekleyerek epoksi kompozitin sürtünme katsayısını ve aşınma oranını önemli ölçüde düşürmüşlerdir.

Yu ve diğeri [64], farklı yükler altında kuru kayma sürtünmesi altında ağırlıkça % 5, %10 ve %16 oranlarında nano kauçuk dolgulu epoksi kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça % 5 nano kauçuk dolgulu kompozit ile en düşük aşınma kaybını ve sürtünme katsayısını elde etmişlerdir. Nano kauçuk dolgusunun artışı ile kompozit içerisinde oluşan topaklaşmaların özgül aşınma oranının arttırdığını belirtmişlerdir.

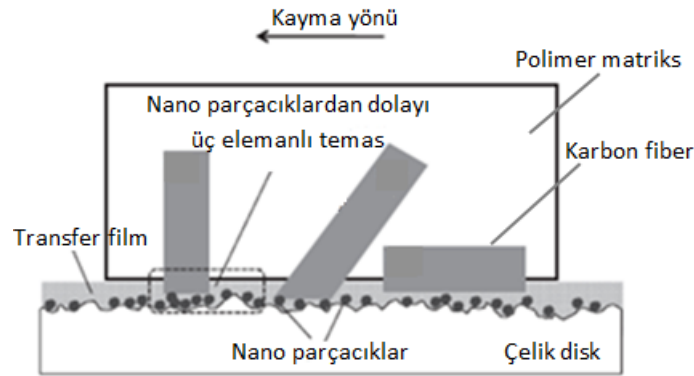
Xing ve Li [65], epoksi matrisli kompozite ağırlıkça % 0,5 - % 4 arasındaki oranlarda farklı tanecik boyutuna sahip küresel silika parçacıkları ekleyerek aşınma davranışına etkilerini incelemişlerdir. % 2 silika parçacıklı kompozit tribolojik açıdan en iyi değıerleri vermiştir ve daha küçük boyuttaki silika parçacıklarının aşınma direncine etkisinin daha etkili olduğunu belirlemişlerdir. %2 dolgu oranının artmasıyla taneciklerin topaklaşmasının başladığını ve aşınma debisinin arttığını belirtmişlerdir.

Fiber katkıların eklenmesi sonucu polimerin rijitliğinin artması karşı metal yüzeyin polimerin üst yüzeyinde kaymasına neden olarak kayma sırasında polimer malzemesinin deformasyona uğrayan hacmini azaltmaktadır. Bu durum kayma esnasında enerji yayılımını azaltarak sürtünme kuvvetini düşürür [58].

Chang ve Friedrich [66], kısa elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemede aşınma davranışını eklemek için hacimce %5 nano TiO_2 dolgu eklemiştir. Nano dolgusu sürtünme katsayısını düşürmüştür ve kısa elyaf takviyeli polimer kompozitin tribolojik performansında iyileşme görülmüştür. Ayrıca temas bölgesinde sert nano parçacıkların bulunmasıyla üç elemanlı abrasif aşınma durumu gerçekleşmiştir. Nano parçacıklar aşınma diski ve numune arasındaki mesafeyi arttırdığı için temas yüzelerindeki adezyon azalmıştır ve nano parçacıkların dağılımından dolayı, matris ve fiber ara yüzeyinde fiberlerde meydana gelen gerilme yığılmaları azaldığını belirtmişlerdir. Şekil 1.17 ve 1.18'de elyaf takviyeli ve nano parçacık dolgululu elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin temas durumları görülmektedir.



Şekil 1.17. Kısa elyaf takviyeli epoksi kompozitin temas durumu [66]



Şekil 1.18. Nano parçacık dolgululu kısa elyaf takviyeli epoksi kompozitin temas durumu [66]

Chang ve Zang [67], kısa karbon fiber takviyeli epoksi kompozite nano TiO_2 dolgusu ekleyerek aşınma mekanizmaları üzerindeki etkisini incelemiştir. Kayma esnasında nano parçacıkların yuvarlanma etkisi temas sıcaklığını ve sürtünme katsayısını düşürmüştür ve ara yüzey bölgelerindeki matris hasarlarını düşürmektedir. Ayrıca nano parçacıklar aşınma sırasında abrasif parçacıklar olarak

görev yaparak kısa karbon fiberlerde oluşacak yüksek kayma gerilmelerini düşürmektedirler ve yüksek basınç ve hız durumlarında şiddetli aşınma mekanizmalarından korumaktadırlar.

Guo ve diğerleri [68], hibrid nano SiO₂ parçacıklarıyla dolgulı epoksi esaslı kompozitler ve kısa karbon fiberli kompozitler hazırlamışlardır. Hibrid kompozitlerin hem sürtünme katsayısı hem de aşınma oranı nano SiO₂ ve kısa karbon fiber içeren kompozitlere göre önemli ölçüde düşük çıkmıştır. Ağırlıkça % 4 nano-SiO₂'li ve ağırlıkça % 6 karbon fiberli kompozit, tribolojik performansta en iyi iyileşmeyi göstermiştir.

Chand ve diğerleri [69], ağırlıkça %40 ve %45 oranlarında kısa cam fiber takviyeli polyester kompozitlerin abrasif aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Abrasif aşındırıcı olarak silika kumu parçacıkları kullanmışlardır. Kompozit içindeki cam fiber oranı arttıkça daha iyi aşınma direnci elde etmişlerdir. CaCO₃ dolgulı ve %45 cam fiber takviyeli olarak hazırladıkları kompozit malzemede ise aşınma kaybı artmıştır bunun nedeni olarak dolguların fiberlere göre aşındırıcı karşısında kolayca ayrıldığını belirtmişlerdir.

Tayeb [70], şeker kamışı katkılı polyester kompozitler ve cam fiber katkılı kompozitler hazırlayıp pim disk aşınma test cihazı ile adezif aşınmaya tabi tutarak tribolojik davranışlarını incelemiştir.

Fiber katkıların yönlendirmeleri ve kompozit içerisindeki ağırlıkça oranları da polimer kompozitlerin sürtünme ve aşınma özelliklerini etkilemektedir.

Qintelier ve diğerleri [71], hazırladıkları cam elyaf polyester kompozitlere kuru kayma halinde triboloji testleri uygulayarak fiber yönlendirmesinin sürtünme katsayısı, aşınma debisi ve aşınma mekanizmalarına olan etkilerini incelemişlerdir.

Tayeb ve Yousif [72], silisyum karbür aşındırıcısına karşı fiber takviyeli polyester kompozitlerin abrasif aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Farklı hız, yük ve fiber yönlendirme durumları için sürtünme ve aşınma özelliklerini karşılaştırmışlardır.

Polimer malzemelere eklenen katı yağlayıcılar kompozitlerin sürtünme ve aşınma özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca polimerlere eklenen katı yağlayıcılar diğer katkılarla birlikte karma olarak ta kompozit içerisine katılabilmektedirler.

Suresha ve diğerleri [73], grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitler hazırlayarak kaymalı aşınma ve abrasif aşınma davranışlarını incelemiştir

Kishore ve diğerleri [74], kauçuk ve grafitten oluşan iki farklı dolgu içeriğinin epoksi cam elyaf dokuma kompozitlerinin sürtünme ve aşınma özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Grafit içeren kompozit malzemelerin kauçuk içeren kompozit malzemelere göre daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma kaybı gösterdiğini ve grafit dolgusunun oranı arttıkça sürtünme katsayısı ve aşınma kaybının daha da düştüğünü belirtmiştir.

Basavarajappa ve diğerleri [75], farklı hız, yük ve mesafe durumları için hacimce %5 ve %10 oranlarında eklenen grafit dolgulu cam elyaf epoksi kompozit ile dolgusuz cam elyaf epoksi kompozitlerin kayma aşınması performansını karşılaştırmıştır.

Hashmi ve diğerleri [76], grafit ve pamuk lifi takviyeli kompozit malzemeler hazırlayarak sürtünme ve kaymalı aşınma davranışını incelemiştir.

Chang ve diğerleri [77], malzemelerin aşınma davranışını iyileştirmede dolguların rolünü ortaya çıkarmak için kısa karbon fiber, nano TiO₂ parçacıkları, PTFE tozları ve grafit tabakaları ile güçlendirilen epoksi nanokompozitlerin tribolojik özelliklerini çalışmıştır.

Larsen ve diğerleri [78], epoksi matrisine hacimce %7,5 sabit oranda PTFE mikro parçacıkları ve hacimce %0,1 -%10 aralığında CuO nano parçacıkları ekleyerek tribolojik davranışını incelemiştir. Hacimce %0,1 ve %0,4 aralığında eklenen CuO nano parçacıklarının PTFE mikro parçacıklarıyla birlikte eklenmesiyle oluşan kompozitlerde en iyi sürtünme ve aşınma değerlerini elde etmiştir.

Chang ve diğeri [79], kısa karbon fiber, grafit, PTFE ve nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin farklı oranları için pim disk aşınma test düzeneğinde tribolojik performanslarını incelemiştir. Klasik dolgulu epoksi kompozite nano TiO₂ eklenmesinin temas sıcaklığı ile sürtünme katsayısını düşürdüğünü ve aşınma direncini güçlendirdiğini belirtmişlerdir.

1.5. Aşınma Davranışlarının Modelleme ve Analizi

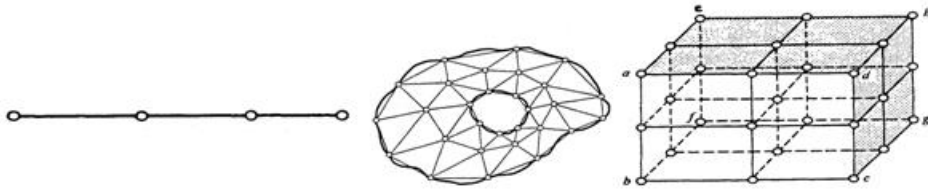
Son zamanlarda aşınma prosesinin deneysel çalışmaların yanında analitik ve bilgisayar destekli modelleme ve analiz çalışmaları da büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada aşınma davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve yük altındaki yüzeylerin teması sonucunda oluşan aşınma miktarları ve gerilmeler incelenmiştir.

1.5.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Mühendislik problemlerinin analitik yöntemlerle çözümünün yeterli olmadığı veya tam çözümünün mümkün olmadığı durumlarda bazı matematiksel yöntemlerden yardım alınır. Sonlu elemanlar yöntemi bu matematiksel yöntemlerden biridir.

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır: Birincisi, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit altbölgelere ayırır. İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin düğüm noktaları adı verilen belirli noktalardaki değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır [80].

Sonlu elemanlar yönteminde bir boyutlu cisimler düğümlerle, iki boyutlu cisimler çizgilerle, üç boyutlu cisimler düzlemlerle sonlu elemanlara ayrılır. Bir boyutlu cisimlerde sonlu elemanlar farklı uzunlukta olabilirler. Ancak iki veya üç boyutlularda elemanlar, eşit olmayan boyutlarda olabileceği gibi farklı şekillerde de olabilirler. Bununla birlikte, bütün durumlarda cisimi temsil eden sonlu elemanlar düğümlerle bağlanacaktır. Sonuçta cisim, sonlu elemanlar ve onları birbirine bağlayan düğümlerden oluşan bir sistemle yer değiştirmiş olacaktır [81]. Şekil 1.19'da sonlu elemanlar yöntemindeki düğümler görülmektedir.



Şekil 1.19. Sonlu elemanlar yönteminde düğümler [81]

Metodun çözümlenmesinde bundan sonraki adım, cisimi temsil eden elemanların her birinin eleman rijitlik matrisini tanımlamaktır. Daha sonra eleman rijitlik matrisleri, parçalara ayrılmış cismin tamamına ait tümel direngenlik matrisini oluşturmak üzere toplanır. Bu toplamada, cismin sonlu eleman modelindeki bütün düğümlerde kuvvetlerin dengesi ve yer değiştirmelerinin sürekliliği sağlanır. Buradan 1.4 denklemindeki matris denklemine ulaşılır.

$$[K] \{d\} = \{F\} \quad (1.4)$$

$[K]$, cismin tümel rijitlik matrisini tanımlar. Tümel kuvvet vektörü $\{F\}$, bütün düğümlere uygulanan dış kuvvetleri; $\{d\}$ ise, bütün düğümlerin yer değiştirmelerini göstermektedir. $[]$ işareti kare (veya dikdörtgen) matrisleri, $\{ \}$ işareti vektörünü gösterir. Denklemindeki $[K]$ nitelik bakımından, parçalara ayrılmış cisimde birim yer değiştirme oluşturacak kuvveti ifade eder. Buradan cismin sonlu eleman modelini bir yaya esdeğer olarak düşünürsek cismin rijitliğini $[K]$ 'nin yay sabitine karşılık olacağı açıktır. Dolayısıyla sonlu eleman metodu, esas itibarıyla, cismin rijitlik açısından analizinin yapıldığı bir metottur. Cisme etkiyen belirli bir dış kuvvetler ve

belirli bir sınır şartları takımı için, denklem 1.4' den düğüm yer değistirmeleri $\{d\}$ bulunur. Yer değistirmelerden de, gerilmeler ve zorlanmalar hesaplanabilir [81].

1.5.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile aşınmanın modellenmesi

Aşınma olayının sonlu elemanlar yöntemine göre modellenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar genel olarak sabit yük altında kaymalı temas, çevrimsel temas şeklindeki yükleme durumlarına maruz kalan sistemler olmak üzere biyomekanik alanında, dişli çark mekanizmalarında, fren balataları uygulamalarında, dövme prosesi uygulamalarında olmaktadır.

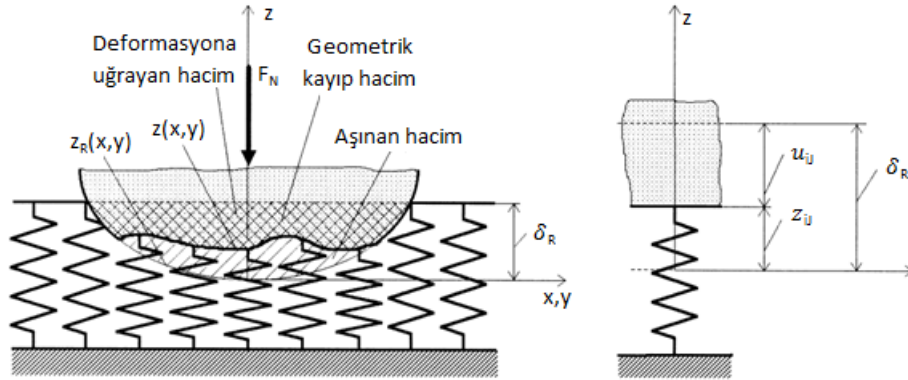
Benabdallah ve Olender [82] polioksümetilen numunelerini, pim disk aşınma testine göre sonlu elemanlar yöntemine göre Ansys yazılımında iki boyutlu olarak modellemişlerdir. Bunun için aşınma deneyinin belirli bir kayma hızı için; temas basıncı ve kayma mesafesi olarak iki değişkene bağlı geliştirdikleri algoritmayı sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplama yapan yazılıma dahil etmişlerdir. Analiz sonuçlarını; temas basınçları, kayma mesafesi ve kayma hızlarının farklı uygulamaları için elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Bilgisayar testleri ile deneysel sonuçları karşılaştırdıklarında sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Podra ve Andersson [83] Archard lineer aşınma kuralını Euler matematiksel iterasyon yöntemi ile birleştirip pim disk aşınma durumunu sonlu elemanlar yöntemine Ansys'te modellemişlerdir. Geliştirdikleri modelleme çalışmasının sonuçları ile deneysel ortalama sonuçlar ile karşılaştırdıklarında sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Hegadekotte ve diğerleri [84] pim disk aşınma sistemini sonlu elemanlar yöntemine göre hesaplamalarını yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, Archard aşınma denklemine Euler denklemi ile birleştirerek genel ortalama temas basıncına göre kayma mesafesini zaman adımlarına bölerek temas basıncını her bir adımda güncelleyen bir algoritma geliştirmişlerdir. Farklı yük uygulamaları ile yaptıkları sonlu elemanlar çalışması sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırdıklarında genel çalışma süreci

içinde uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Yükün artışına bağlı olarak deneysel sonuçlarla benzetim sonuçlarının örtüşme hassasiyeti azalmıştır. Bunun sebebi olarak uygulanan belirli bir yükten sonra sistemde oluşabilecek yağlayıcı veya koruyucu tabaka gibi farklı aşınma mekanizmalarından kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir.

Podra ve Andersson [85] aşınma modellemesinde analiz sürecindeki hesaplama süresini azaltmak için winkler yüzey modelini kullanarak bu yöntemin etkilerini incelemişlerdir. Winkler yüzey modeli, aralarında birbirinden bağımsız yaylardan oluşan bir yatak sistemidir. Geliştirdikleri iterasyon algoritması için çevrim başına düşen temas basıncını hesaplamak için bu yayların hacimsel deformasyonlarının toplamını bir temastaki temas basıncı dağılımının toplamı olarak kullanarak aşınma modelini kurarak benzetim çalışması yapmışlardır. Yaptıkları winkler yüzey analiz sonuçlarını sonlu elemanlar yöntemine göre yaptıkları diğer analiz sonuçlarıyla karşılaştırdıklarında sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu belirterek bu yöntemin en üstün tarafının temas basıncı ve deformasyonları hesaplama süresi olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 1.20'de Winkler yüzey modeline göre temas durumu görülmektedir.



Şekil 1.20. Winkler yüzey modeline göre temas durumu [85]

Öqvist [86] sonlu elemanlar yöntemini kullanan NIKE2D yazılımı ile yaptığı çalışmada algoritmalar geliştirerek hesaplama zamanının benzetim sonuçları üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmasında çelik bir plaka karşısında salınım halinde bulunan silindirik çelik bir makaranın aşınma durumunu modellemiştir. Hesaplama zamanını kısaltmak için geliştirdiği yöntemde zaman adımını seçmede

sabit bir zaman adımının yanı sıra diğer bir yöntem olarak, ilk aşınma adımlarında daha büyük bir zaman adımı ve son adımlarda daha küçük zaman adımları kullanılmıştır. Bu yöntemde ilk adımlarda aşınma miktarları yüksek çıkmasına rağmen toplam hesaplama sonuçları üzerinde bir etkisi olmamıştır. Yaptığı benzetim çalışmasını deneysel sonuçlarla karşılaştırdığında uyumlu sonuçlar gözlemlemiştir.

Söderberg ve Andersson [87] bir fren diskindeki fren balatasının aşınmasını ve balata rotor ara yüzeyinin temas basıncı dağılımını sonlu elemanlar yöntemine göre üç boyutlu olarak incelemiştir. Kararlı aşınma durumu altında lineer aşınma bölgesini modellemiştir. Euler integrasyon metodu ve Archard aşınma yasasını birleştirerek bir alt program yazmışlardır ve bu programı sonlu elemanlar çözümleyicisine aktarmışlardır.

Abu Bakar ve diğerleri [88] Rhee'nin aşınma formülünü kendi problemlerine uyarlamışlardır ve Abaqus sonlu elemanlar yazılımında geliştirdikleri algorithmada kullanarak bir fren diskinde meydana gelen temas basınçlarını ve aşınma durumlarını incelemiştir. Deneysel sonuçları simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırdıklarında sonuçların birbirleriyle yakın olduklarını belirtmişlerdir.

Hemanth [89] kaolin ve karbon parçacıkları ile yüzeyi sertleştirilmiş alüminyum matriksli malzemeyi kaymalı aşınma prensiplerine göre abrasif aşınma durumunu Marc yazılımını kullanarak sonlu elemanlar yöntemine göre modellemiştir.

Ashraf ve diğerleri [90] düzlemsel temas durumundaki iki polimer yüzeyin kuru sürtünme şartları altında kaymalı aşınma durumunu modellemiştir. Sonlu elemanlar yöntemine göre hesaplama yapan yazılıma Archard lineer aşınma modeline göre çalışan alt program geliştirmişlerdir. Ayrıca benzetim çalışmasında kullanılan adım büyüklüğünün hesaplama süresi ve sonuçlar üzerindeki etkilerini de görmek için ve farklı adım büyüklükleri kullanarak sonlu eleman düğüm noktaları üzerindeki basınç dağılımlarının farklılığını incelemiştir. Yaptıkları çalışmayı deneysel sonuçlar ile karşılaştırdıklarında benzetim sonuçları ile deneysel sonuçların birbirleriyle yakınlık gösterdiğini belirtmişlerdir.

Bortoleto ve diğeri [91] pim disk test düzeneğinde çelik bir pimin çelik diske karşı sürtünme ve aşınma davranışlarını sonlu elemanlar yöntemine göre modellemişlerdir. Kaymalı aşınma durumunu Abaqus yazılımında üç boyutlu modelleme yaparak Fortran kodlarıyla umeshmotion modülünde hazırlamışlardır.

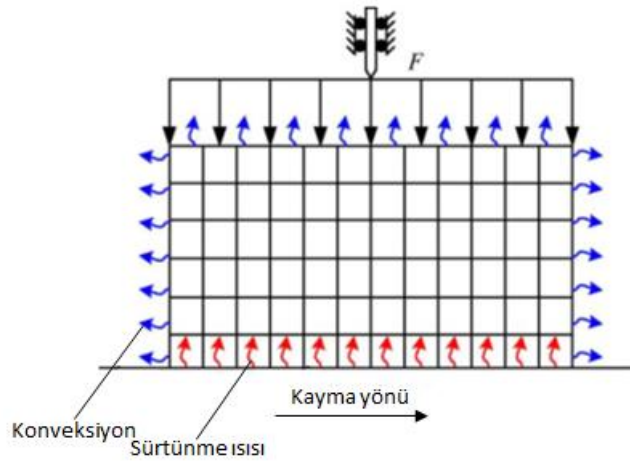
Jourdan ve Samida [92] kalça eklemi protezinin sonlu elemanlar yöntemine göre modellemesini yaparak aşınma durumunu incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada aşınma deplasman alanının sürtünmeli temas probleminin bilinmeyenlerine eklendiği bir model geliştirmişlerdir. Bu yöntem ile sadece birkaç yükleme çevriminde bütün aşınma sürecinin simülasyonu gerçekleştirilmektedir. Bir yükleme adımından oluşan bir algoritma ile kalça eklemi protezinin temas durumunu modellemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda buldukları aşınma debilerinin deneysel verilerle karşılaştırdıklarında sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Akarca ve diğeri [93] aşınmadan kaynaklanan alt yüzey deformasyonunun davranışlarını zamana bağlı analiz yöntemi kullanarak termal ve mekanik hesaplamalar yapmışlardır. Bununla ilgili olarak, alüminyum alaşımı bir malzemenin çelik bir yüzey karşısındaki aşınma durumunu iki boyutlu olarak modellemişlerdir. Yaptıkları çalışmada şekil değiştirme hızı ve deformasyondan kaynaklanan sıcaklığı göz önünde bulundurup Ls-Dyna yazılımında mekanik ve termal birleştirilmiş bir sonlu elemanlar yöntemi kullanmışlardır. Sisteme uygulanan belirli bir kayma hızı ve yük değeri karşısında programın algoritmasındaki temas çevrimlerine göre alt yüzey gerilmelerini, plastik şekil" değiştirmelerini", şekil değiştirme hızlarını, hidrostatik basınçlarını ve sıcaklıklarını incelemişlerdir ve benzetim sonuçlarından elde edilen gerilme, gerinim değerlerini alt yüzey hasar gradyanını ve alt yüzey tabakalarının ayrılmasını modellemek için kullanmışlardır.

Konya ve diğeri [94], aşınma modellemesinde yüksek sıcaklığın etkisini çalışmışlardır. Bunun için polimer pimin çelik diske karşı aşınma davranışını yüksek sıcaklık şartlarında modellemişlerdir. Artırımlı aşınma tekniğine göre modellenen sistem için polimer malzemesinin sürünme davranışını, sürtünme ısısını ve termal genişlemesini göz önüne alarak benzetim çalışması yapılmıştır. Analiz sonuçlarını

deneysel sonuçlarla karşılaştırdıklarında sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Thuresson [95], Pim disk aşınma olayında kayma esnasında oluşan ısıyı matematiksel modele göre ve sonlu elemanlar yöntemine göre incelemiştir. Yaptığı çalışmada termoelastik bir temas modeli kurmuş ve aşınma katsayısı, termal genişleme ve özgül ısı parametrelerine bağlı olarak temas basınçlarını incelemiştir. Şekil 1.21'de sürtünme ısı, konveksiyon ve yükün sonlu elemanlar modeli verilmektedir.



Şekil 1.21. Sürtünme ısı, konveksiyon ve yükün sonlu elemanlar modeli [95]

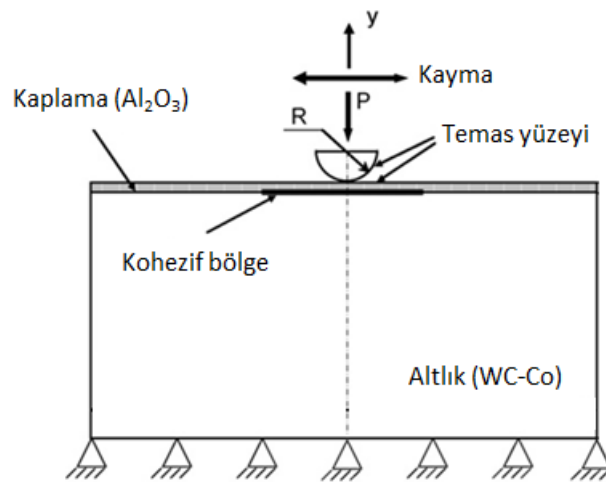
Cantizano ve diğerleri [96], termomekaniksel bir yaklaşım kullanarak pim disk aşınma sisteminde meydana gelen aşınma mekanizmalarını modellemişlerdir. Bu yaklaşımda temas yüzeylerinde sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklığı, geliştirdikleri aşınma algoritmasında kullanmışlar ve sonlu elemanlar yazılımına dahil etmişlerdir. Benzetim sonuçlarını inceledikleri literatür sonuçlarıyla karşılaştırarak sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Gonzalez ve diğerleri [97], silisyum karbür takviyeli alüminyum-lityum alaşımlı malzemenin pim disk test düzeneğinde sıcaklığın aşınma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bunun için farklı yük ve sıcaklıklarda deneysel çalışmalar gerçekleştirmişler ve aşınma testlerini simüle etmek için Coulomb sürtünmesi, pimin sıcaklığına bağlı olarak plastisite davranışını, pimin plastik deformasyonu ile temas

yüzeyinde oluşan ısı gibi özellikleri içeren iki boyutlu termomekaniksel bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Yaptıkları deneyler ve benzetim çalışması sonucunda sıcaklık artışı ile sertliğin düştüğünü ve aşınma miktarının arttığını belirterek, sıcaklığın aşınma miktarı üzerindeki etkisinin temas basıncından daha kritik bir öneme sahip olduğunu doğrulamışlardır.

Wang ve diğerleri [98], PTFE malzemesinden yapılmış contaların aşınma durumunu sonlu elemanlar yöntemine göre modellemişlerdir. Çalışmalarını 2 boyutlu aksenal simetrik olarak modellemişlerdir. Sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlı malzeme davranışını tanımlamak için Perzyna's viskoplastik bünye denklemini kullanmışlardır. Kararlı aşınma bölgesi için lineer bir model kurup temas basıncı ve kayma hızına bağlı olarak bir algoritma oluşturarak, bu algoritmayı Ansys sonlu elemanlar yazılımına eklemişlerdir.

Han ve Siegmund [99], metal altlık üzerine seramik kaplama yapılan bir sistemin delaminasyon aşınmasını modellemişlerdir. Geliştirdikleri modelde kohezif bölge modeli yaklaşımını ve uygulanan kayma genliği, yük ve sertlik değişkenlerine bağlı olarak kaymalı aşınma koşulları altında delaminasyon başlamasını ve yayılmasını modellemişlerdir. Şekil 1.22'de delaminasyon aşınmasının sonlu elemanlar modeli görülmektedir.



Şekil 1.22. Delaminasyon aşınmasının sonlu elemanlar modeli [99]

Rezaei ve diğeri [100], sonlu elemanlar tekniğini kullanarak tabakalı polimer kompozitlerin tribolojik özelliklerini çalışmışlardır. Buna göre Archard aşınma denkleminde göre aşınma derinliği denklem 1.5'de verilmektedir.

$$h = k.P.s \quad (1.5)$$

h aşınma derinliği, k , aşınma oranı, P basınç ve s kayma mesafesi olmaktadır. Bununla ilgili olarak deneysel sonuçlardan elde ettikleri aşınma katsayısını, basınç – hız (PV) verilerine göre eğri uydurma yöntemi ile elde ettikleri aşınma katsayısı değerlerini kullanmışlardır ve Abaqus programında hazırladıkları algoritmada, temas basıncı ve hız değişkenlerine bağlı olarak iteratif bir çözümleme ile aşınma değerlerini hesaplamışlardır. Benzetim çalışmasını deneysel sonuçlarla karşılaştırdıklarında sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğunu belirtmişlerdir.

Ventzel ve diğeri [101], bir yatak bileziğinin hassas işlenmesi sırasında oluşan abrazif aşınmayı sonlu elemanlar yöntemine göre modellemişlerdir.

Shen ve diğeri [102], bir kaymalı yatağın aşınma oranını ölçmek için pim disk aşınma cihazı ile test yaparak aynı zamanda Abaqus yazılımı ile Archard aşınma kanunu kullanarak sonlu elemanlar yöntemine göre temas yüzeylerindeki aşınma miktarının hesaplamasını yapmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmalar ile simülasyon çalışmasının sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang ve Meng [103], düzlemsel bir yapı üzerinde bulunan yarı küresel bir rotor kovanının aşınmasını iki boyutlu olarak modellemişlerdir ve sonlu elemanlar programında temas bölgesindeki gerilme dağılımlarını ve temas basınçlarını elde ederek, aşınma katsayısının, malzeme seçiminin, yüzey pürüzlülüğünün ve geometrinin etkilerini incelemişlerdir.

Han ve Hua [104], dövme işlemi sırasında kalıp ve iş parçasında oluşan aşınmayı belirlemek için sonlu elemanlar yöntemine göre modelleme yapmışlardır. Abaqus sonlu elemanlar programında 3 boyutlu elasto-plastik dinamik bir çalışma yaparak kalıp ve iş parçası arasındaki temas basıncı dağılımlarını ve temas kayma mesafesini

ve aşınma miktarını Archard aşınma modeline göre hesaplamışlardır. Sonlu elemanlar yazılımındaki büyük hesaplama zamanı ve hesaplama çevrimleri arasındaki yakınsama problemini önlemek için yarı statik yerine dinamik çalışma yapmışlardır.

Sfantos ve Alibadi [105], temas halindeki iki yapıyı sınır elemanları metoduna göre iki boyutlu olarak modelleyerek bu modeli aşınma analizine uyarlamışlardır. Yazılımın çözümleyicisi yapının bütünü yerine sadece sınırlardaki değişkenlere göre çözümleme yaptığı için hesaplama süresi sonlu elemanlar metoduna göre kısa sürmüştür. Yaptıkları çalışmada, sınır elemanlar metodunun yapıların sınırlarındaki gerilmeleri ve deplasmanları yüksek doğrulukta değerlendirdiğini belirterek sınır elemanlar yöntemine göre buldukları aşınma derinliğinin sonlu elemanlar yöntemine nazaran daha doğru olarak hesaplandığı sonucunu belirtmişlerdir.

1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Literatür çalışmalarının incelenmesi sonucunda polimer malzemelerin tribolojik ve mekanik performanslarının iyileştirilmesine büyük önem verildiği görülmektedir. Sonuçta matriks malzemesi, dolgu malzemeleri, dolgunun boyutu, oranı, uygulanan yük, hız ve sıcaklık faktörlerinin bu performansları etkilediği görülmektedir. Literatür çalışmalarından matriks malzemesi olarak epoksinin daha fazla incelenmesi gerektiği görülmektedir. Dolgu malzemeleri olarak ta mikro ve nano tanecik boyutundaki dolguların performanslarının karşılaştırılmasının detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Literatürlerde Al_2O_3 ve TiO_2 dolgularının önem kazandığı görülmektedir ve bu çalışmada bu mikro dolgularla birlikte bir de alternatif olarak uçucu kül dolgusu eklenmiştir. Diğer taraftan nano dolgularda da Al_2O_3 ve TiO_2 dolgularına ek olarak nano kil dolgusu eklenmiştir. Bu malzemelerin optimum oranlarını bulmak için farklı yük ve hız koşullarında detaylı bir şekilde çalışılması kanaatine varılmıştır.

Bu çalışmada, hazırlanan mikro ve nano dolgulu epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemek için çekme, üç nokta eğme ve sertlik deneyleri

gerçekleştirilmiştir. Aşınma ve sürtünme özellikleri pim-disk deney düzeneğinde tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın diğer bir amacı da aşınma davranışlarının sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesidir. Sürtünme ve aşınma üzerine yapılan deneysel çalışmaların yanında sonlu elemanlar yönteminin kullanımı da büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak aşınma deneylerinin simülasyonları yapılmıştır. Archard aşınma teorisine göre bir algoritma geliştirilmiştir ve bu algoritma Ansys yazılımına dahil edilmiştir. Böylece aşınma prosesi sırasında oluşan aşınma miktarlarını ve gerilmeleri inceleme olanağı elde edilmiştir. Ayrıca benzetim çalışmalarındaki amaç deney teçhizatı ve süre gibi etkenleri mümkün olduğunca en aza indirebilmek ve deneysel çalışmaları benzetim çalışmaları ile destekleyerek doğruluklarını ortaya koymaktır.

BÖLÜM 2. MALZEMELER VE DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde deneyler için kullanılacak epoksi esaslı kompozit malzemelerin hazırlanması, numunelerin hazırlanması ile mekanik ve tribolojik deneyler yer almaktadır. Mekanik deneyler çekme deneyi, üç nokta eğme deneyi ve sertlik deneylerinden oluşmaktadır. Bu deneylerin sonucunda çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama(%), eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama (%) değerleri incelenmiştir. Triboloji deneyleri olarak pim-disk aşınma deney düzeneğinde malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Sonuçta sürtünme katsayıları ve özgül aşınma oranlarının dolgu oranına, dolgu boyutuna, yüke ve hıza göre davranışları incelenmiştir. Ayrıca aşınan yüzeylerin optik ve SEM yüzey görüntüleri incelenmiştir.

2.1. Malzemeler ve Kompozitlerin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan matriks malzemesi 10:4 oranında hazırlanan epoksi ve sertleştirici olarak iki bileşenden oluşmaktadır. Epoksi reçinesine eklenecek katkılar mikro tanecik boyutunda alüminyum oksit (Al_2O_3), titanyum dioksit(TiO_2), uçucu kül ile nano tanecik boyutunda alüminyum oksit (Al_2O_3), titanyum dioksit(TiO_2), kil olmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 2.1'de görülmektedir.

Tablo 2.1. Malzemeler ve özellikleri

Malzemeler	Özellikler	Yoğunluk (gr/cm^3)	Tedarik
Epoksi Reçine (MGS L285)	Bisphenol A	1,178	Dost Kimya End. Ham. San.
Alüminyum oksit (Al_2O_3)	45 μ m	3,9	Eczacıbaşı Esan Kimya
Titanyum dioksit (TiO_2)	50 μ m	4	Sintaş Plastik San.Tic.A.Ş
Uçucu kül	45 μ m	2,006	Kütahya Çimento San
Alüminyum oksit (Al_2O_3)	40 nm, alfa fazı	3,88	Grafen Kimya Sanayi
Titanyum dioksit(TiO_2)	10nm, anatase	3,9	Grafen Kimya Sanayi
Nano kil (Montmorillonite)	Nanomer1.28E	1,9	Sigma Aldrich

Dolguların reçine içerisinde karışabilmeleri için yüksek hızda çalışan bir mekanik karıştırıcı imal edilmiştir. Bununla ilgili olarak Kocaeli sözer makine ' den katı tozların sıvı reçine içerisinde homojen dağılımlarını sağlayabilmek için testere tipi karıştırıcı ucu alınmıştır. Şekil 2.1'de karıştırıcı ucu fotoğrafı görülmektedir.



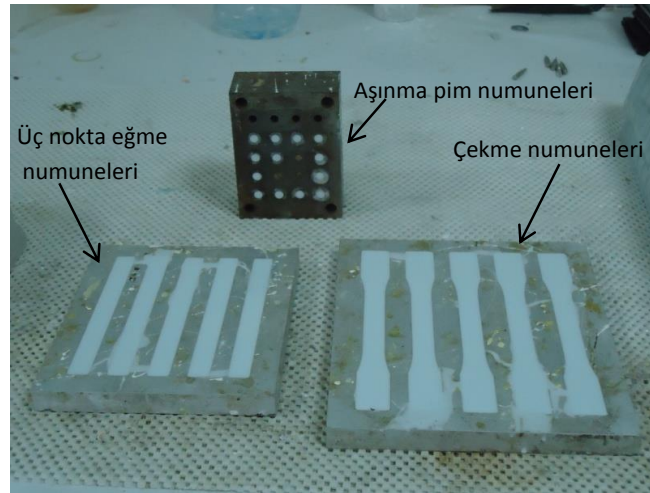
Şekil 2.1. Karıştırıcı ucu (Sözer Makine' nin izniyle)

Dolguların nemini almak için 70 °C'de 4 saat boyunca etüvde kurutulmuşlardır. Dolguların reçine içerisinde dağılabilmeleri için epoksi reçinesi ısıtılarak viskozitesi düşürülmüştür. Daha sonra epoksi reçinesine belirlenen miktarlarda dolgular eklenerek mekanik karıştırıcı ile karıştırılmışlardır. Karıştırma işlemi bitince karıştırma esnasında reçine içerisinde oluşan hava kabarcıklarını almak için vakumlama işlemi yapılmıştır. Daha sonra karışıma sertleştirici eklenip tekrar karıştırılmıştır. Nano boyuttaki dolgularda mikro boyuttaki dolgulara yapılan işlemlere ilave olarak sertleştirici eklenmeden önce 15 dakika boyunca ultrasonik karıştırıcıda tutulmuşlardır. Şekil 2.2'de epoksi kompozit hazırlamada kullanılan cihazlar görülmektedir.



Şekil 2.2. Epoksi kompozit hazırlamada kullanılan cihazlar

Sertleştirici eklendikten sonra tekrar vakumlama işlemi yapılmıştır ve daha sonra açık kalıplara dökülmüştür. 24 saat oda koşullarında bekletilen numunelere çapraz bağların kurulması için post kürtleme işlemi uygulanmıştır. Numuneler 15 saat 60 °C'de ve 5 saat 80 °C'de etüvde tutulmuşlardır. Şekil 2.3'te deney numunelerinin üretiminde kullanılan kalıplar görülmektedir.



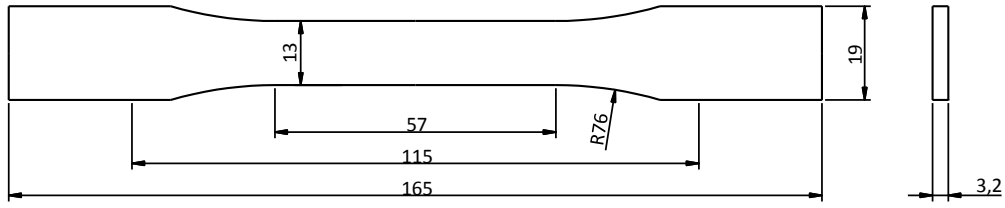
Şekil 2.3. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan kalıplar

2.2. Mekanik Deneyle

Mekanik deneyle, çekme, üç nokta eğilme ve sertlik deneylelerinden oluşmaktadır.

2.2.1. Çekme deneyleri

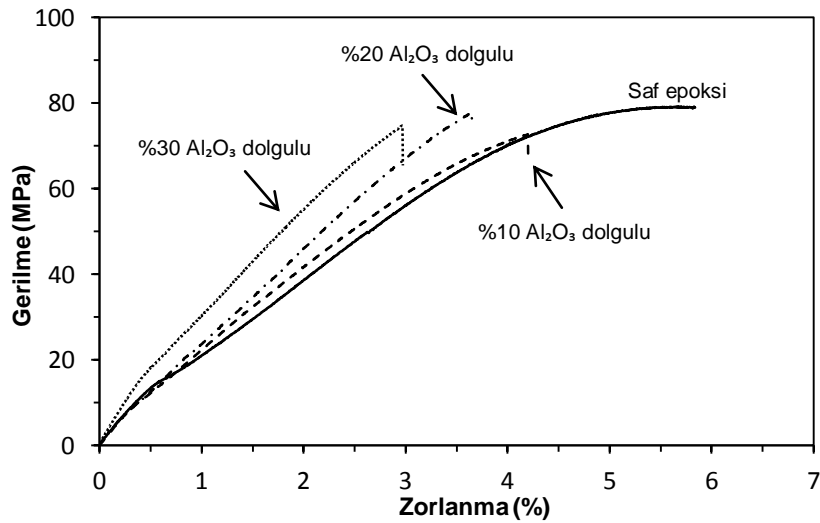
Çekme deneyleri Shimadzu marka test cihazında ASTM D638-10 [106] standardına göre yapılmıştır. Çekme deneyleri 5 mm/dakika hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi sonucunda kompozitlerin çekme dayanımı, elastiklik modülleri, % zorlanma değerleri bulunmuştur. Şekil 2.4' te çekme numunesi ölçüleri görülmektedir.



Şekil 2.4. Çekme numunesi ölçüleri (ASTM D638-10)

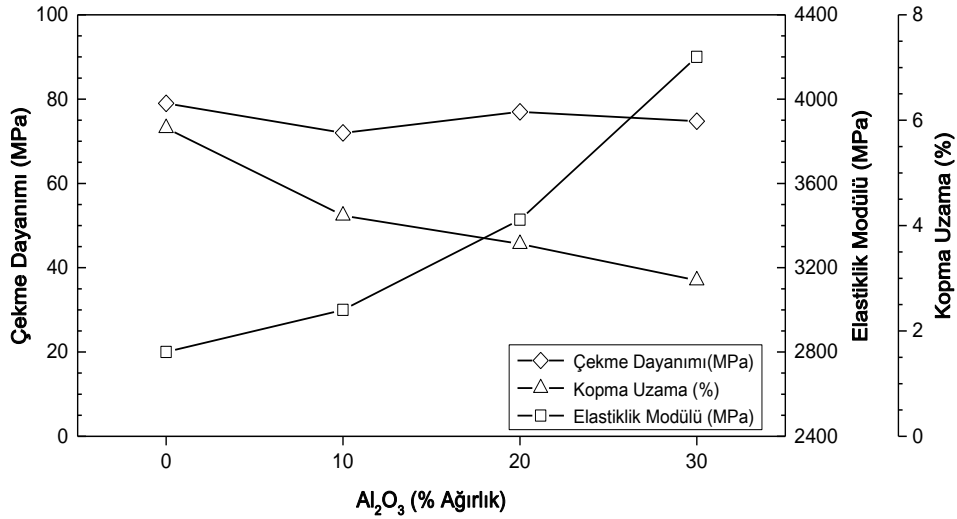
a) Mikro kompozitler

Şekil 2.5'te Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme - zorlanma eğrileri görülmektedir. Al_2O_3 dolgularının eklenmesiyle eğrilerin lineerliği artmaktadır ve davranışları gevrek malzeme özelliklerine yaklaşmaktadır. Dolguların eklenmesi polimer zincirlerinin hareketini kısıtlamaktadır [107].



Şekil 2.5. Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri

Şekil 2.6' da Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü ve kopma uzama eğrileri gösterilmektedir. Şekilden kompozitlerin çekme gerilmesi hassasiyetlerinin kompozit içindeki dolgu oranına göre düşük olduğu görülmektedir.

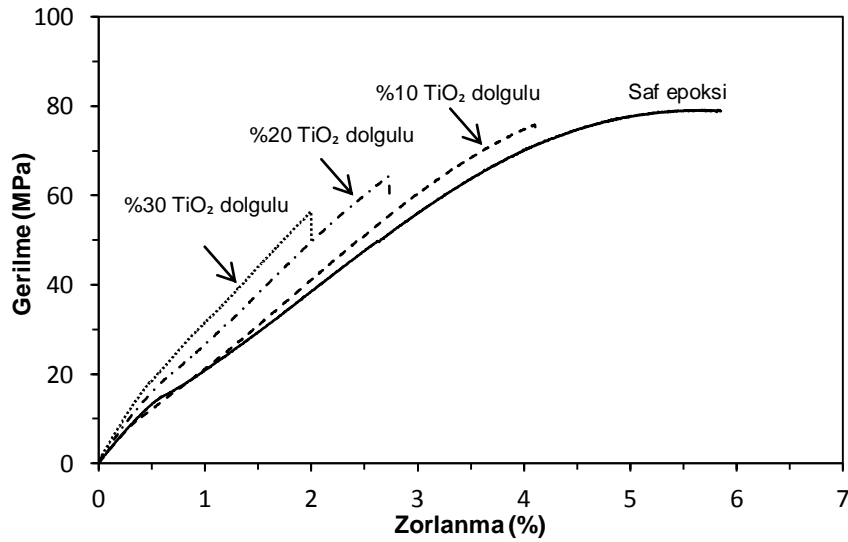


Şekil 2.6. Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama eğrileri

Şekilde görüldüğü üzere kompozit malzemelerin kopma uzama değerleri epoksi reçinesine mikro Al_2O_3 dolguları eklendiğinde azalmaktadır. Kompozit içerisindeki dolgu oranı arttıkça kompozit malzemelerin gevrekliğinin artmasının sonucunda kopma % uzama değerleri azalmaktadır. Bu azalma davranışı %10'luk dolgu oranına kadar belirgin bir şekilde %20 ve %30 dolgu içeriğinde ise lineer bir şekilde olmaktadır. En düşük kopma değeri %30 Al_2O_3 dolgulu kompozitte saf epoksiye göre % 50 oranında azalmaktadır.

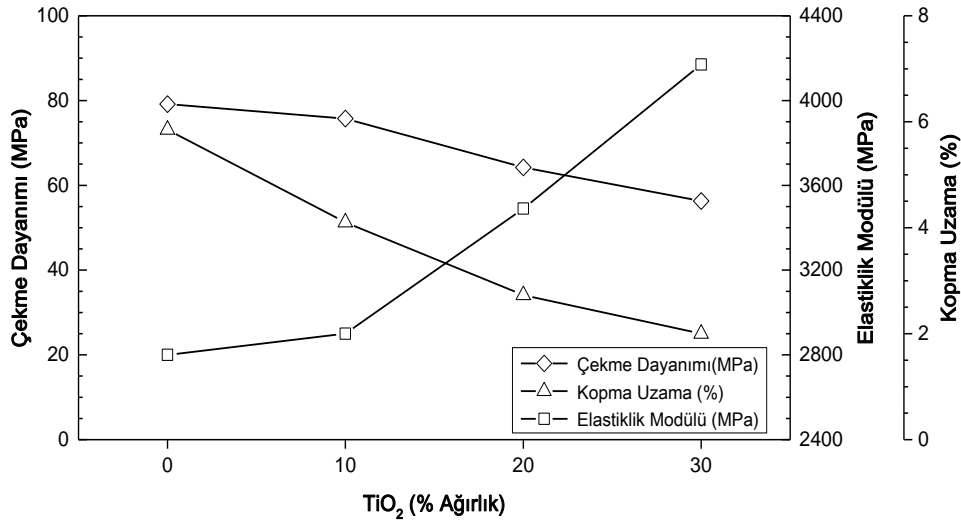
Kompozit malzemelerin elastiklik modülleri epoksi reçinesine Al_2O_3 dolgularının eklenmesi ile artmaktadır. Bu artış belirli bir profil şeklinde olmaktadır. %10 Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü %7 oranında artarak saf epoksi değerini 2800 MPa'dan 3000 MPa değerine, %20 Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü % 22 artarak 3428MPa değerine ve %30 Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü % 50 artarak 4200MPa değerine yükselmiştir.

Şekil 2.7' de TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme - zorlanma eğrileri gösterilmektedir. Kompozit içinde artan dolgu oranı ile birlikte kompozit malzemelerin çekme dayanımı azalmaktadır. Diğer yönden % zorlanma değerleri azalarak sünekliğinin azalması görülmektedir.



Şekil 2.7. TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri

Şekil 2.8' de TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü ve kopma uzama değerleri görülmektedir. Kompozitlerin çekme dayanımları epoksi reçinesine TiO_2 dolguları eklenmesiyle azalmaktadır. Bu azalma debisi %10 TiO_2 dolgulu kompozitte hafif bir şekilde olurken %20 ve %30 dolgulu kompozitlerde daha yüksek bir debi ile meydana gelmektedir. Buna göre 79 MPa olan saf epoksinin çekme dayanımı %10, %20 ve %30 TiO_2 dolgulu kompozitlerde sırasıyla 75,76, 64,22 ve 56,29 MPa değerlerinde olmaktadır.

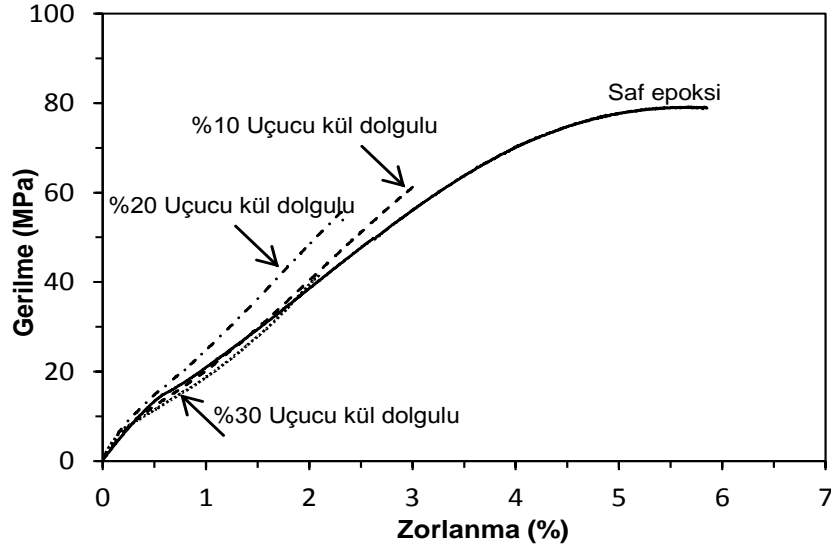


Şekil 2.8. TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama eğrileri

Şekilde görüldüğü üzere kompozit malzemelerin kopma uzama değerleri epoksi reçinesine TiO₂ parçacıkları eklenmesiyle azalmaktadır. Bu azalma davranışı %20 dolgu içeriğine kadar lineer bir şekilde ve %20'den sonra daha düşük bir hassasiyette gerçekleşmektedir. Artan dolgu oranı ile kopma uzama değerindeki en düşük değer %30 dolgulu kompozitte olmuştur.

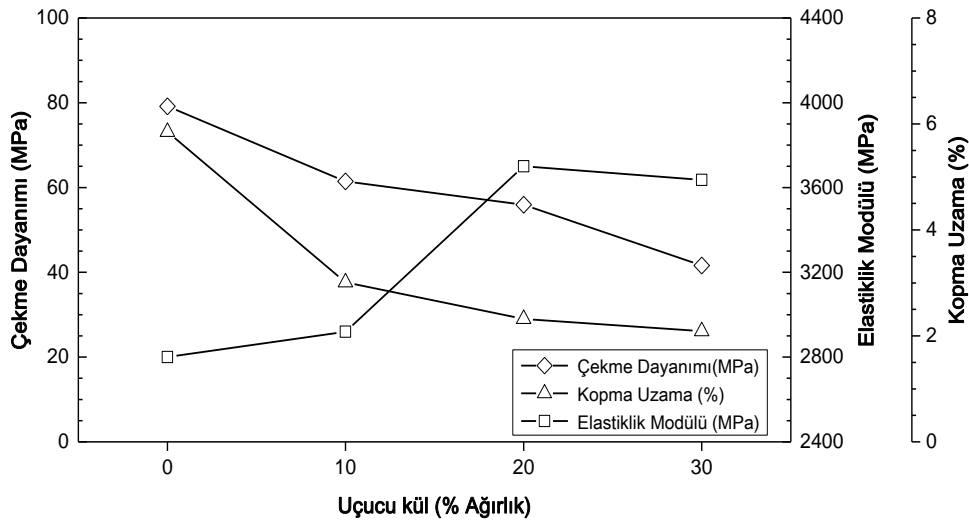
Kompozit malzemelerin elastiklik modülleri epoksi reçinesine TiO₂ dolgularının eklenmesi ile artmaktadır. Bu artış %10 dolgu oranına kadar belirli bir profile %10'dan sonra ise lineer bir şekilde gerçekleşmektedir. %10 TiO₂ dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü saf epoksiye göre %3 oranında artarak 2800 MPa' dan 2900 MPa değerine, %20 TiO₂ dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü % 24 artarak 2900 MPa değerine ve 30 TiO₂ dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü % 48 artarak 4170 MPa değerine yükselmiştir.

Şekil 2.9 uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme - zorlanma eğrilerini göstermektedir. Epoksi reçinesine uçucu kül dolgularının eklenmesiyle eğriler lineer bir yapıya sahip olmaktadır.



Şekil 2.9. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri

Şekil 2.10'da uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü ve kopma uzama değerleri görülmektedir. Kompozit malzemelerin çekme dayanımları epoksi reçinesine uçucu kül dolguları eklenmesiyle azalmaktadır. Bu azalma davranışı %10 dolgu oranında keskin bir şekilde %20 ve %30 dolgu oranlarında ise lineere yakın bir şekilde olmaktadır. Buna göre 79MPa çekme dayanımına sahip saf epoksi %10 uçucu kül dolgulu kompozitte 61,46 MPa, %20 dolgulu kompozitte 55,93 MPa ve %30 dolgulu kompozitte 41,62 MPa değerlerinde olmaktadır.



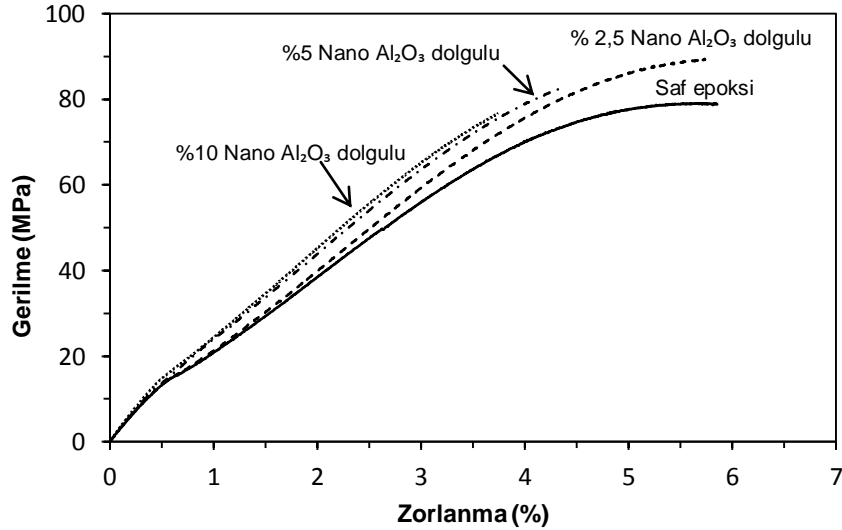
Şekil 2.10. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama değerleri

Şekilde görüldüğü üzere kompozit malzemelerin kopma uzama değerleri epoksi reçinesine mikro tanecik büyüklüğünde uçucu kül dolguları eklendiğinde düşmektedir.

Kompozit malzemelerin elastiklik modülleri epoksi reçinesine mikro tanecik büyüklüğüne sahip uçucu kül dolgularının eklenmesi ile %30 dolgu içeriğine kadar artmaktadır. En belirgin artış dolgu oranı %10'dan %20'ye geçerken meydana gelmiştir. %10 uçucu kül dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü saf epoksiye göre %4 oranında artarak 2800 MPa'dan 2920 MPa değerine, %20 uçucu kül dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü %32 oranında artarak 3700 MPa değerine ve %30 uçucu kül dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü ise 3636 MPa değerine düşmüştür.

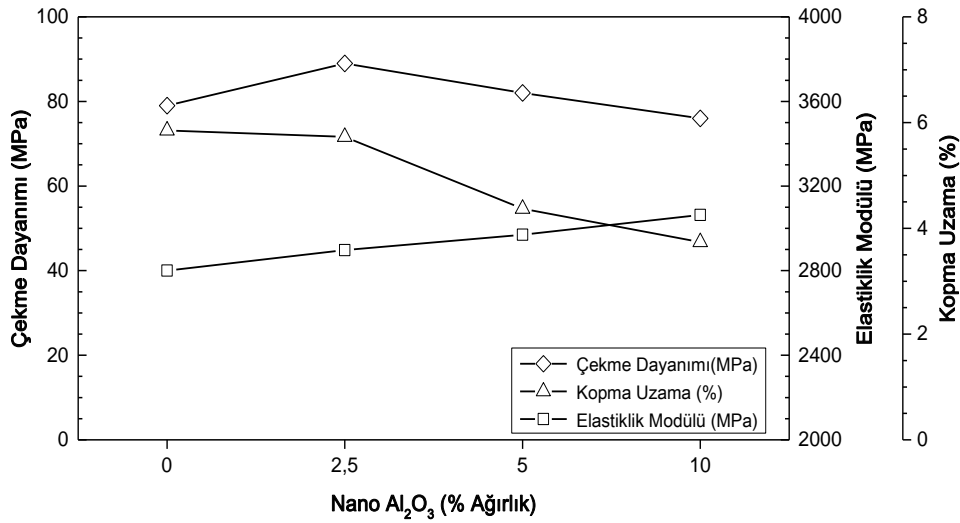
b) Nano kompozitler

Şekil 2.11'de nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme - zorlanma eğrileri gösterilmektedir. Kompozit içindeki %2,5 nano Al_2O_3 dolgu oranında en yüksek çekme gerilmesi görülmektedir.



Şekil 2.11. Nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri

Şekil 2.12'de nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü ve kopma uzama değerlerini göstermektedir. Nano Al_2O_3 'ün çekme dayanımı davranışı şekilden görüldüğü üzere %2,5'luk dolgu içeriğine kadar yükselme davranışı göstermektedir %2,5' tan sonra ise lineer bir şekilde azalmaktadır. Buna göre % 2,5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitte çekme dayanımı %12 oranında artarak 79 MPa'dan 89 MPa değerine, %5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitte çekme dayanımındaki artış ise %3 oranında olarak 82 MPa değerine ve %10 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitin çekme dayanımı % 4 oranında düşerek 76 MPa değerinde olmaktadır.

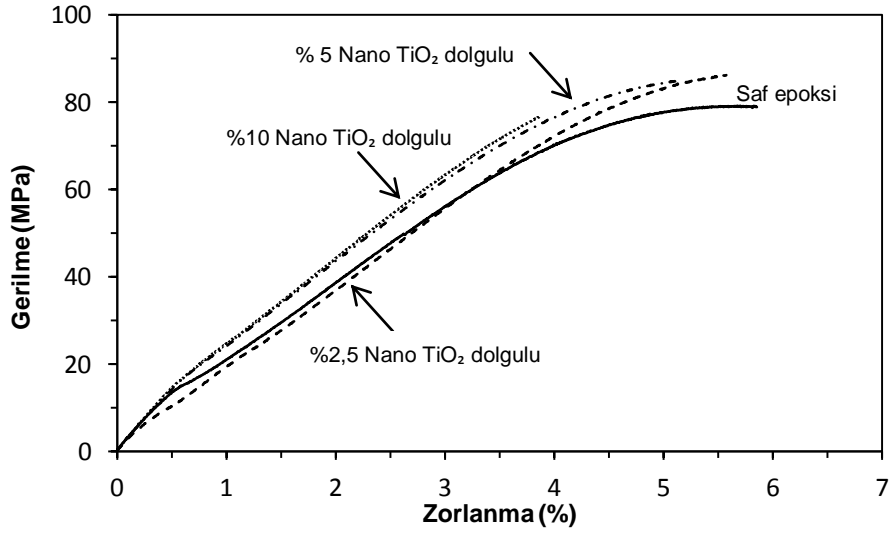


Şekil 2.12. Nano Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama eğrileri

Şekilde görüldüğü üzere kompozit malzemelerin kopma uzama değerleri nano Al₂O₃ dolgularının eklenmesi ile azalmaktadır. Dolguların eklenmesiyle kompozit malzemeler daha rijit bir yapıya sahip olmaktadır. Buna göre en büyük azalma değeri ağırlıkça %10 nano Al₂O₃ dolgulu kompozitte saf epoksiye göre %56 oranında meydana gelmektedir.

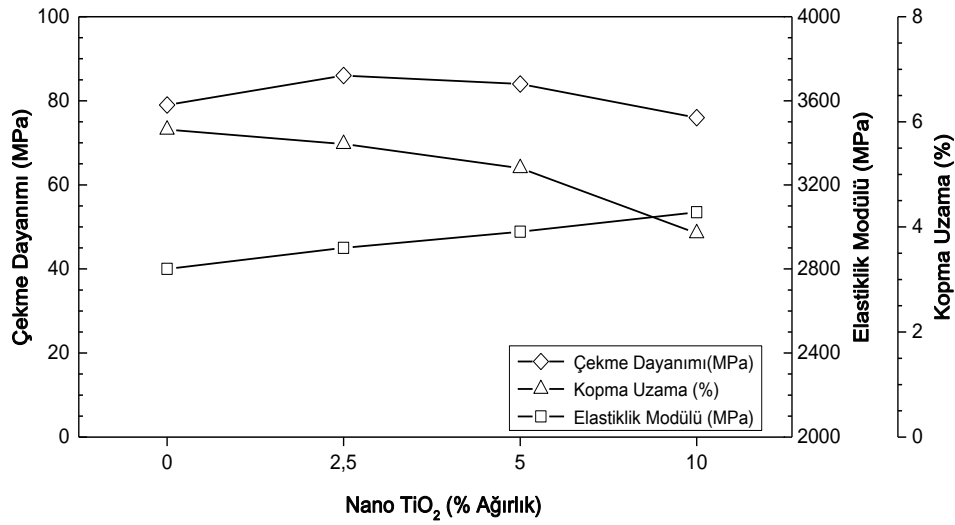
Kompozit malzemelerin elastiklik modülleri epoksi reçinesine Al₂O₃ dolgularının eklenmesi ile yükselmektedir. Grafikten görüldüğü üzere bu yükselme davranışı lineer bir şekilde olmaktadır. Buna göre ağırlıkça %2,5 nano Al₂O₃ dolgulu kompozitin elastiklik modülü %3 artarak 2800 MPa'dan 2897 değerine, %5 nano Al₂O₃ dolgulu kompozitin elastiklik modülü % 6 artarak 2970 MPa değerine ve 10 nano Al₂O₃ dolgulu kompozitin elastiklik modülü % 9 artarak 3063 MPa değerine yükselmektedir.

Şekil 2.13'de nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme - zorlanma eğrileri görülmektedir. Kompozit içinde artan nano TiO₂ dolguları ile birlikte gerilme zorlanma eğrileri gevrekleşerek daha lineer bir yapıda olmaktadır.



Şekil 2.13. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerinin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri

Şekil 2.14 nanoTiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü ve kopma uzama değerlerini göstermektedir. En yüksek çekme dayanımı ağırlıkça % 2,5 nano TiO₂ dolgulu kompozitte olmaktadır. % 2,5'luk dolgu oranından sonra kompozitlerin çekme dayanımları düşme davranışı göstermektedir. Buna göre % 2,5 nano TiO₂ dolgulu kompozitin çekme dayanımı %8 artarak 79 MPa'dan 86 MPa değerine yükselmektedir. % 5 nano TiO₂ dolgulu kompozitin çekme dayanımı 82 MPa değerinde ve %10 nano TiO₂ dolgulu kompozitin çekme dayanımı değeri ise 76 MPa olmaktadır.

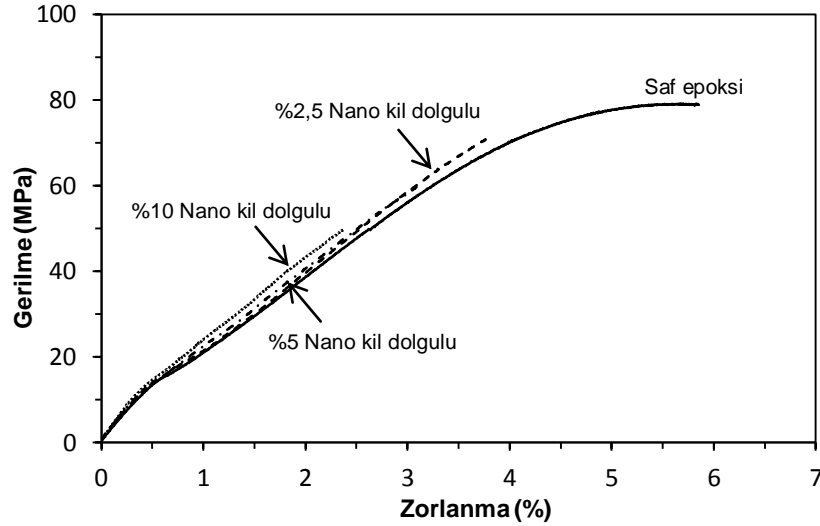


Şekil 2.14. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama eğrileri

Şekilde görüldüğü üzere kompozit malzemelerin kopma uzama değerleri epoksi reçinesine nano TiO₂ dolgularının eklenmesiyle düşmektedir. Bu düşme davranışı %5 dolgu içeriğine kadar lineer bir şekilde olurken %5 dolgu içeriğinden sonra ise daha hızlı bir şekilde düşüş göstermektedir.

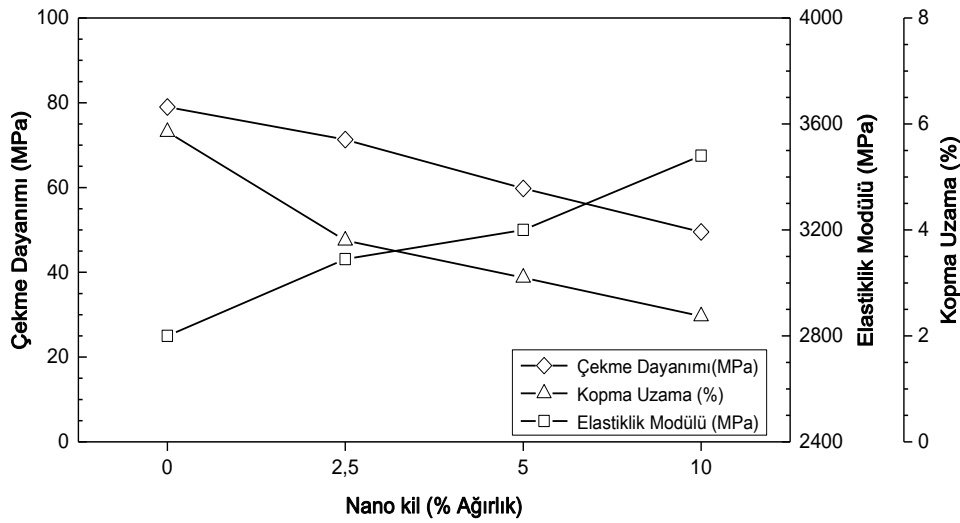
Kompozit malzemelerin elastiklik modülleri epoksi reçinesine nano TiO₂ dolgularının eklenmesi ile artmaktadır. Elastik modülündeki artış eğilimi lineer bir şekilde olmaktadır. Buna göre ağırlıkça %2,5 nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü %3 artarak 2800 MPa'dan 2900 MPa değerine, %5 nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü %6 artarak 2977 MPa değerine ve %10 nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü %9 artarak 3070 MPa değerine yükselmiştir.

Şekil 2.15'te nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme - zorlanma eğrileri görülmektedir. Kompozit içinde artan nano kil dolguları ile birlikte gerilme zorlanma eğrileri daha lineer bir profile yaklaşmaktadır.



Şekil 2.15. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre gerilme zorlanma eğrileri

Şekil 2.16'da nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü ve kopma uzama değerleri görülmektedir. Kompozitlerin çekme dayanımları nano kil dolgularının eklenmesiyle düşme eğilimi göstermektedir. Bu eğilim %2,5'lük dolgu oranına kadar belirgin bir yapıda, %2,5'tan sonra ise lineer bir şekilde olmaktadır. Buna %2,5 nano kil dolgulu epoksi kompozitin çekme dayanımı 79 MPa'dan 71 MPa değerine, %5 nano kil dolgulu epoksi kompozitin çekme dayanımı 59 MPa değerine ve %10 nano kil dolgulu epoksi kompozitin çekme dayanımı 49 MPa değerine düşmektedir.



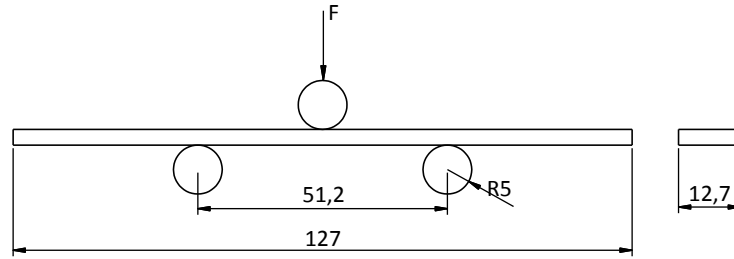
Şekil 2.16. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre çekme dayanımı, elastiklik modülü, kopma uzama eğrileri

Şekilde görüldüğü üzere nano kil dolgularının eklenmesiyle kompozitlerin kopma uzama değerleri düşmektedir. Düşme davranışı %2,5' luk dolgu oranına kadar yüksek bir debi ile %2,5'tan sonra ise daha düşük bir debide olmaktadır. En düşük değer %10'luk dolgu oranındadır.

Kompozit malzemelerin elastiklik modülleri nano kil dolgularının eklenmesiyle yükselmektedir. Yükselme davranışı belirli bir profili takip ederek dolgu oranına bağlı olarak artmaktadır. Buna göre %2,5 nano kil dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü %10 artarak 2800 MPa'dan 3090 MPa değerine, %5 nano kil dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü %14 artarak 3200 MPa değerine ve %10 nano kil dolgulu epoksi kompozitin elastiklik modülü %24 artarak 3480 MPa değerine yükselmiştir.

2.2.2. Üç nokta eğme deneyleri

Üç nokta eğme deneyleri Shimadzu marka deney cihazında ASTM D790-10 [108] standardına göre yapılmıştır. Deney numuneleri 3,2 X 12,7 X 127 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Çene hızı 2 mm/dakika'dır. Şekil 2.17' de üç nokta eğme deneyinin uygulanışı görülmektedir.



Şekil 2.17. Üç nokta eğme deneyinin uygulanışı

Üç nokta eğme deneyine göre eğilme gerilmesi,

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (2.1)$$

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,

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (2.2)$$

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.

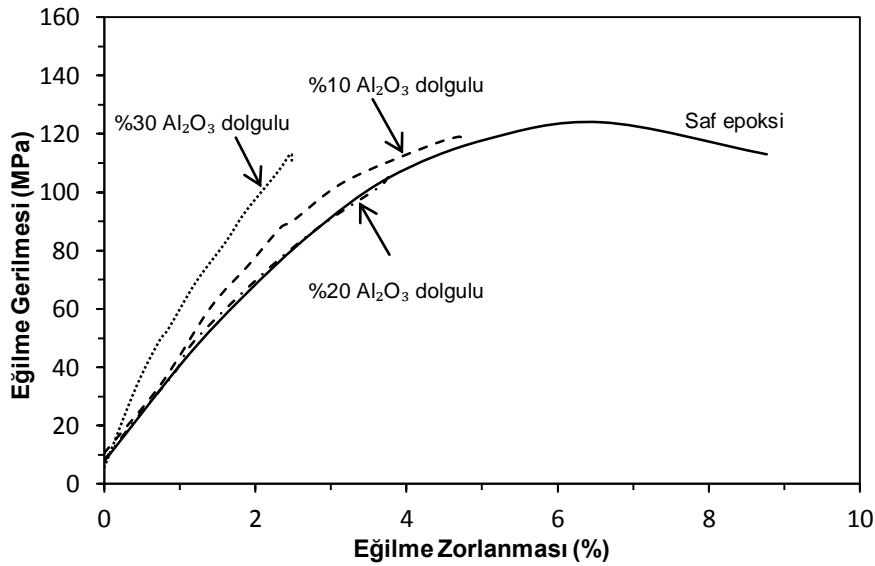
Eğilme zorlanması

$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (2.3)$$

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

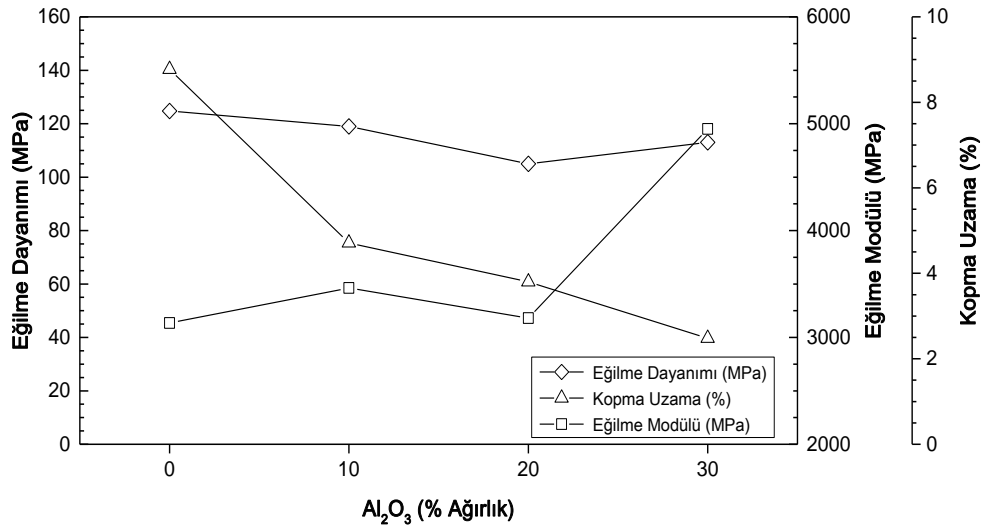
a) Mikro kompozitler

Şekil 2.18'de Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri görülmektedir. Eğrilerden görüldüğü üzere kompozit içinde artan dolgu oranı ile birlikte gerilme azalmakta ve eğrilerin davranışı lineer profile yaklaşmaktadır. Bu durum eklenen dolguların polimer matrisini gevreklettiğini göstermektedir.



Şekil 2.18. Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi- eğilme zorlanması eğrileri

Şekil 2.19' da Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü ve eğilmeye kopma uzama eğrileri görülmektedir. Epoksi reçinesine eklenen Al_2O_3 dolguları kompozitlerin eğilme dayanımlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Ağırlıkça %10 Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitin eğilme dayanımı 124,76 MPa' dan 119 MPa değerine, %20 Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitin eğilme dayanımı 105 MPa değerine ve %30 Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitin eğilme dayanımı %20' lik dolgu içeriğine göre %7 oranında iyileşmesine rağmen 113MPa değerine düşmektedir.

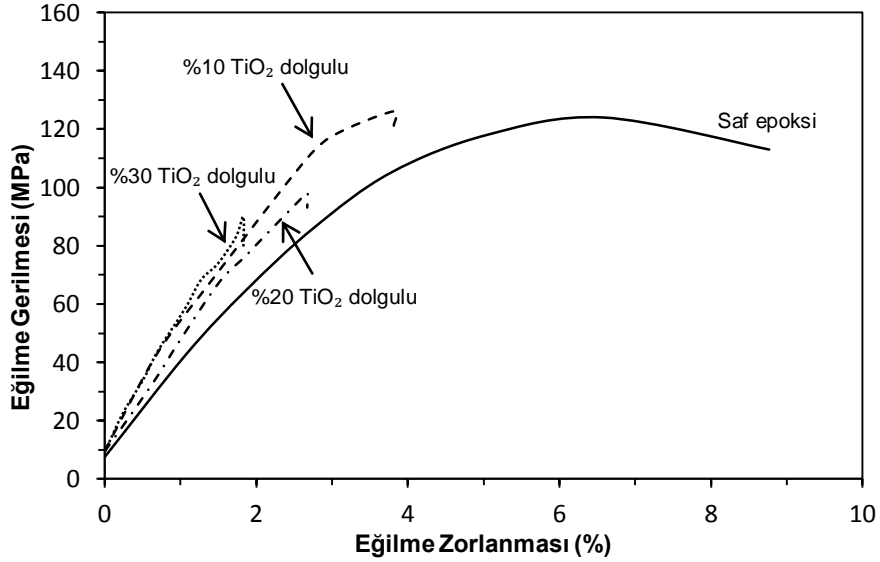


Şekil 2.19. Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama eğrileri

Kompozitlerin kopma uzama değerleri epoksi reçinesine Al₂O₃ dolgularının eklenmesiyle düşmektedir. Bu düşme davranışı %10 'luk dolgu oranında yüksek bir debi ile meydana gelirken %20 ve %30 dolgu oranlarında daha yumuşak bir şekilde meydana gelmektedir. Dolguların eklenmesiyle kompozit malzemeler rijit bir yapıya sahip olmakta ve yük altındaki sehim miktarları da azalmaktadır.

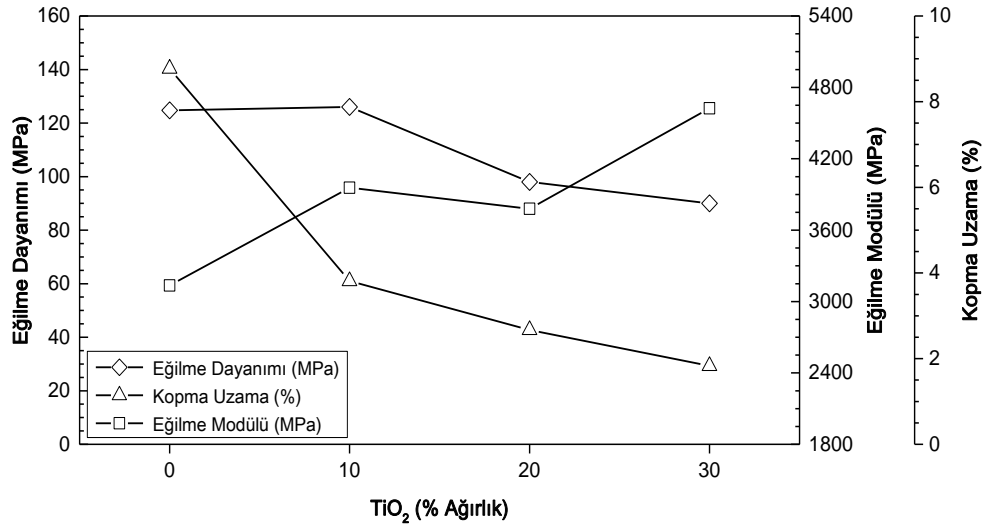
Kompozit malzemelerin eğilme modülleri epoksi reçinesine Al₂O₃ dolgularının eklenmesi ile yükselmektedir. Ağırlıkça %10 Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitin eğilme modülü %10 artarak 3135 MPa' dan 3463 MPa değerine yükselmektedir. %20 Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitin eğilme modülü saf epoksinin değerine yaklaşmaktadır. %30 Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitin eğilme modülü %57 artarak 4951 MPa değerinde olmaktadır.

Şekil 2.20'de TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri görülmektedir. Epoksi reçinesine eklenen TiO_2 dolguları epoksi reçinesine gevrek bir yapı kazandırmaktadır ve eğriler daha lineer bir profil sergilemektedirler.



Şekil 2.20. TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi - eğilme zorlanması eğrileri

Şekil 2.21'de TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü ve eğilmede kopma uzama eğrileri görülmektedir. TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin eğilme dayanımı davranışları %10 dolgu oranından sonra düşme eğilimi göstermektedir. Buna göre %20 ve %30 TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin eğilme dayanımları sırasıyla 98 MPa ve 90 MPa değerlerinde olmaktadır. Eklenen dolgular kompozit içerisinde topaklaşarak gerilme yığılma bölgeleri oluşturmakta ve gerilme dayanımları düşmektedir.

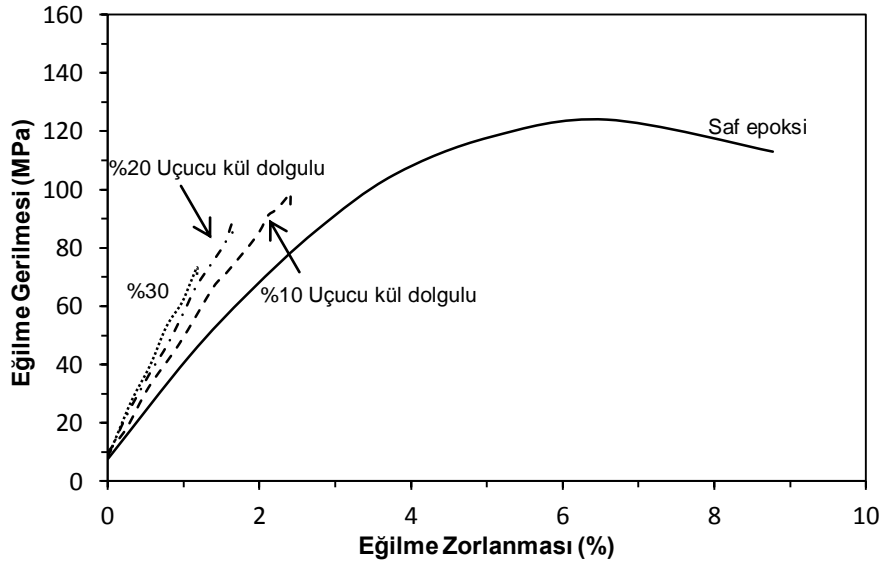


Şekil 2.21. TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama değerleri

Şekilde görüldüğü üzere kompozitlerin kopma uzama değerleri epoksi reçinesine TiO₂ dolgularının eklenmesiyle düşmektedir. Bu düşme davranışı %10'luk dolgu oranında belirgin bir şekilde meydana gelirken %10'dan sonra lineer bir davranışı takip etmektedir. Epoksi reçinesi içinde artan dolgu oranı ile birlikte kompozit malzemeler daha rijit bir yapıya sahip olarak yük altındaki sehimleri azalmaktadır.

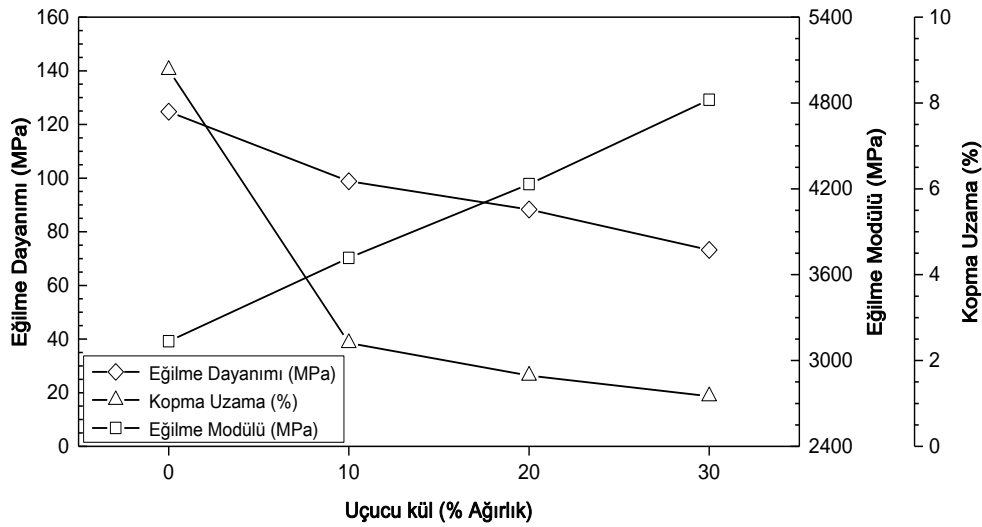
Kompozit malzemelerin eğilme modülleri TiO₂ dolgularının eklenmesiyle yükselmektedir. Buna göre %10 TiO₂ dolgulu epoksi kompozitin eğilme modülü %26 artarak 3135 MPa' dan 3956 MPa değerine, %20 TiO₂ dolgulu epoksi kompozitin eğilme modülündeki artış eğilme gerilmesinin düşmesine paralel olarak %20 oranında olarak 3780 MPa değerine, %30 TiO₂ dolgulu epoksi kompozitin eğilme modülü %47 artarak 4624 MPa değerine yükselmiştir.

Şekil 2.22'de uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrilerini görülmektedir. Kompozit içerisinde artan dolgu oranı ile birlikte eğrilerin yük altındaki zorlanma davranışları sınırlanmaktadır. Eklen dolgularla birlikte malzemeler daha gevrek bir yapı kazanmaktadırlar.



Şekil 2.22. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi - eğilme zorlanması eğrileri

Şekil 2.23'te uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü ve eğilmede kopma uzama değerleri görülmektedir. Kompozit malzemelerin eğilme dayanımları uçucu kül dolgularının eklenmesiyle düşme eğilimi göstermektedirler. Bu eğilim %10 dolgu oranında belirgin bir şekilde %10 'dan sonraki dolgu oranlarında lineer bir şekilde olmaktadır. Buna göre %10 uçucu kül dolgulu epoksi kompozitin eğilme dayanımı 124,76 MPa'dan 98,83 MPa değerine, %20 uçucu kül dolgulu epoksi kompozitin eğilme dayanımı 88,3 MPa değerine, %30 uçucu kül dolgulu epoksi kompozitin eğilme dayanımı 73,21 MPa değerine düşmektedir.



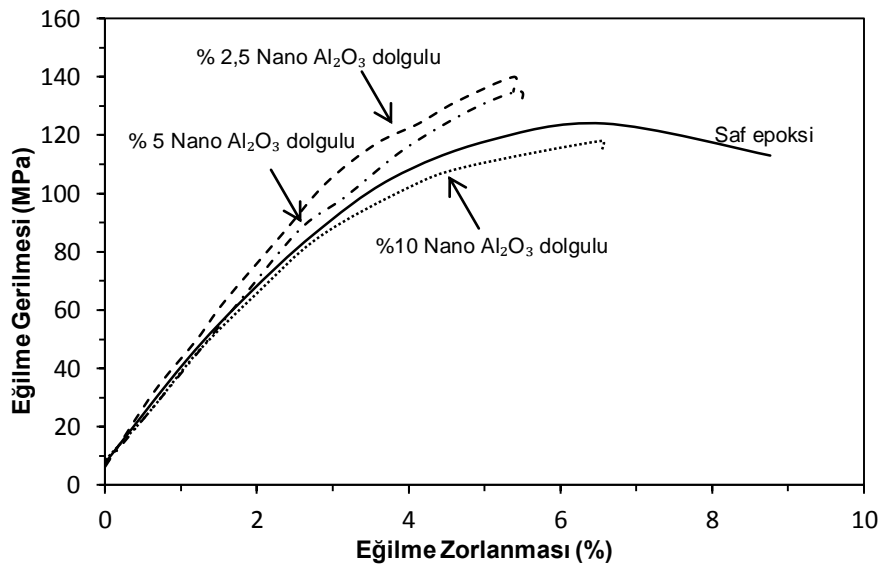
Şekil 2.23. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama değerleri

Şekilde görüldüğü üzere uçucu kül dolgulu kompozitlerin kopma uzama değerleri epoksi reçinesine uçucu kül dolgularının eklenmesiyle azalmaktadır. Bu azalma davranışında en belirgin fark %10 uçucu kül dolgulu kompozitlerde meydana gelmektedir ve dolgu oranının artmasıyla azalma profili lineer bir şekilde olmaktadır.

Uçucu kül dolgulu kompozit malzemelerin eğilme modülü dolguların eklenmesiyle yükselmektedir. Grafikten görüldüğü üzere eğilme modüllerinin yükselme davranışları dolgu oranına bağlı olarak lineer bir şekilde olmaktadır. Buna göre ağırlıkça %10 uçucu kül dolgulu epoksi kompozitin eğilme modülü %18 artarak 3135 MPa' dan 3717 MPa değerine, %20 uçucu kül dolgulu epoksi kompozitin eğilme modülü %35 artarak 4233 MPa değerine, %30 uçucu kül dolgulu epoksi kompozitin eğilme modülü % 53 artarak 4822 MPa değerine yükselmiştir

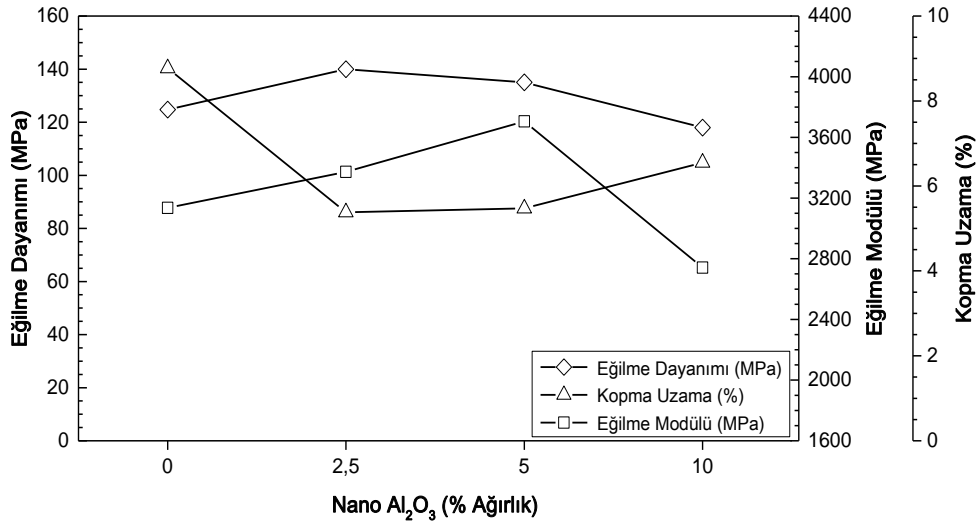
b) Nano kompozitler

Şekil 2.24'te nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrilerini görülmektedir. %2,5 ve %5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlere ait eğrilerin lineerliği saf epoksiye göre artmakta, %10 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitte ise düşme davranışı göstermektedir. Dolgu oranının belirli bir orandan sonra artmasıyla kompozit içerisinde dolgular topaklaşmakta ve bu durum kompozit içerisinde gerilme yığılma bölgelerinin oluşumuna neden olmaktadır.



Şekil 2.24. Nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi - eğilme zorlanması eğrileri

Şekil 2.25'te nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü ve eğilmede kopma uzama değerleri görülmektedir. En yüksek eğilme dayanımı ağırlıkça %2,5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitte olmaktadır. Artan dolgu oranına bağlı olarak eğilme dayanımları düşme davranışı göstermektedirler. % 2,5 nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitin eğilme dayanımı saf epoksiye göre % 12 artarak 124,76 MPa 'dan 140 MPa değerine çıkmıştır. %5 nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitin eğilme dayanımı saf epoksiye göre % 8 artarak 135 MPa değerinde olmaktadır. %10 oranında nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitin eğilme dayanımı saf epoksinin değerini % 5,5 azaltarak 118 MPa değerine düşürmüştür.

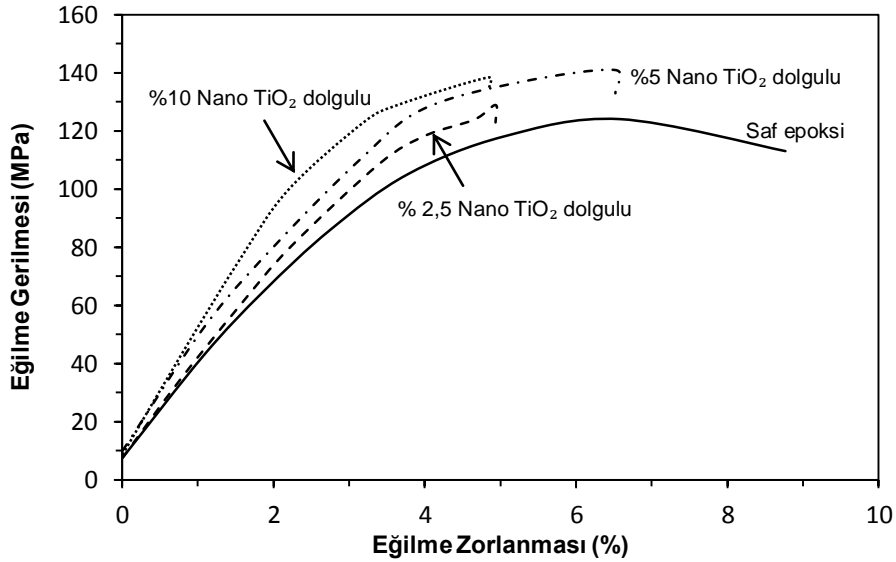


Şekil 2.25. Nano Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama eğrileri

Şekilde görüldüğü üzere % 2,5 nano Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitin kopma uzama değeri düşmekte ve artan dolgu oranı ile birlikte belirli bir profilde yükselme eğilimine geçmektedir.

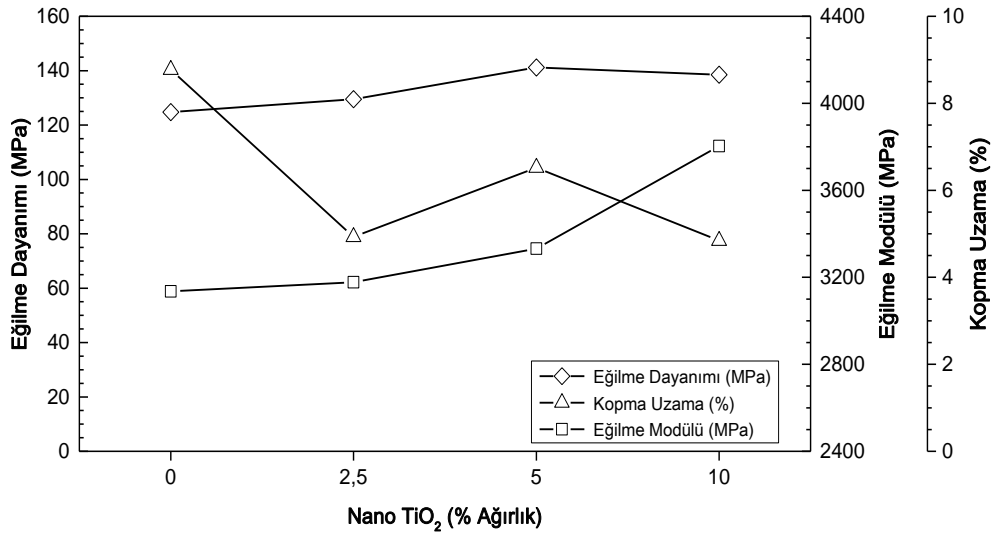
Nano Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin eğilme modülleri %5 dolgu oranına kadar yükselme davranışı göstermekte ve %5 dolgu oranından sonra düşmektedir. Dolgu oranının artmasıyla birlikte dolguların homojen dağılımı zorlaşmakta ve kompozit içinde topaklaşmalar oluşmaktadır. Buna göre en yüksek eğilme modülü %5 nano Al₂O₃ dolgulu kompozitte saf epoksinin eğilme modülünü %18 arttırarak 3135 MPa'dan 3705 MPa değerine yükseltmiştir. %10 nano Al₂O₃ dolgulu kompozitte ise eğilme dayanımında olduğu gibi eğme modülü de saf epoksinin altında olmaktadır.

Şekil 2.26'da nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri görülmektedir. Epoksi reçinesine nano TiO₂ eklenmesi ile birlikte eğriler lineer bir yapıya sahip olarak gevrekleşmektedirler.



Şekil 2.26. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi eğilme zorlanması eğrileri

Şekil 2.27' de nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü ve eğilmede kopma uzama değerleri görülmektedir. Epoksi kompozitlerin eğilme dayanımları %5 dolgu oranına kadar yükselen bir davranış göstermektedir. Dolgu oranının artması sonucu kompozit içerisinde oluşan topaklanmalar nedeniyle eğilme dayanımları düşmektedir. En yüksek eğilme dayanımı %5'lik dolgu oranında eğilme dayanımı 124,76 MPa değerinden % 13 artarak 141,15 MPa değerine yükselmiştir. Diğer taraftan % 10 oranında eklenen nano TiO₂ dolgusu eğilme dayanımının değerinde düşme eğilimine geçmesine rağmen saf epoksinin eğilme dayanımını % 10 oranında arttırarak 138,48 MPa değerine yükseltmiştir.

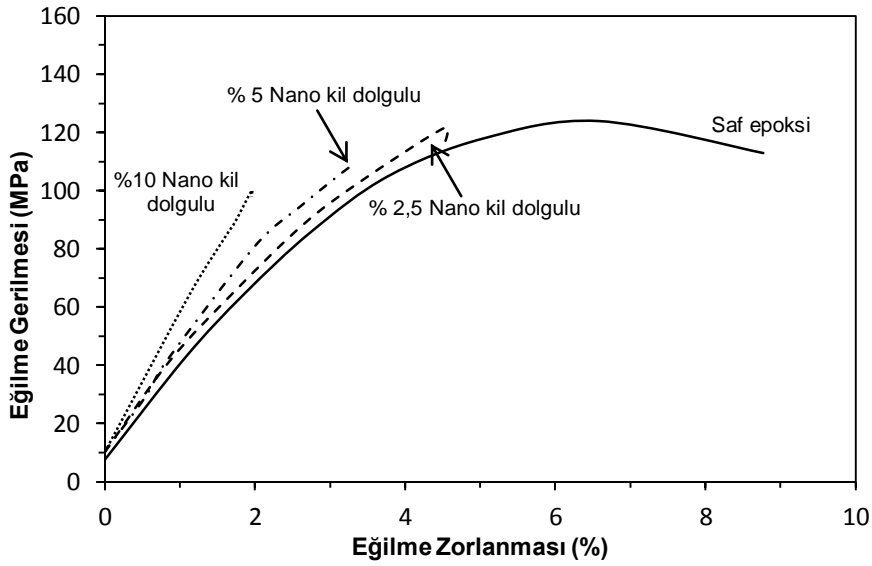


Şekil 2.27. Nano TiO₂ dolgululu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilmede kopma uzama eğrileri

Şekilde görüldüğü üzere kompozitlerin kopma uzama değeri % 2,5 nano TiO₂ dolgu oranında belirgin bir şekilde düşmektedir. %5 dolgu oranında artan eğilme dayanımı ile birlikte kopma uzama değeri de yükselmektedir. %10 dolgu oranında ise en düşük kopma uzama değerinde olmaktadır.

Kompozitlerin eğilme modülleri nano TiO₂ dolgularının eklenmesiyle birlikte yükselmektedir. Bu yükselme davranışı %5'lik içeriğe kadar dolgu oranına bağlı olarak belirli bir profilde ve dolgu oranının artmasıyla birlikte belirgin bir şekilde gerçekleşmektedir. En yüksek artış %10 Nano TiO₂ dolgululu kompozitte olmaktadır ve eğilme modülü 3135 MPa'dan %21 artarak 3803 MPa değerine yükselmiştir.

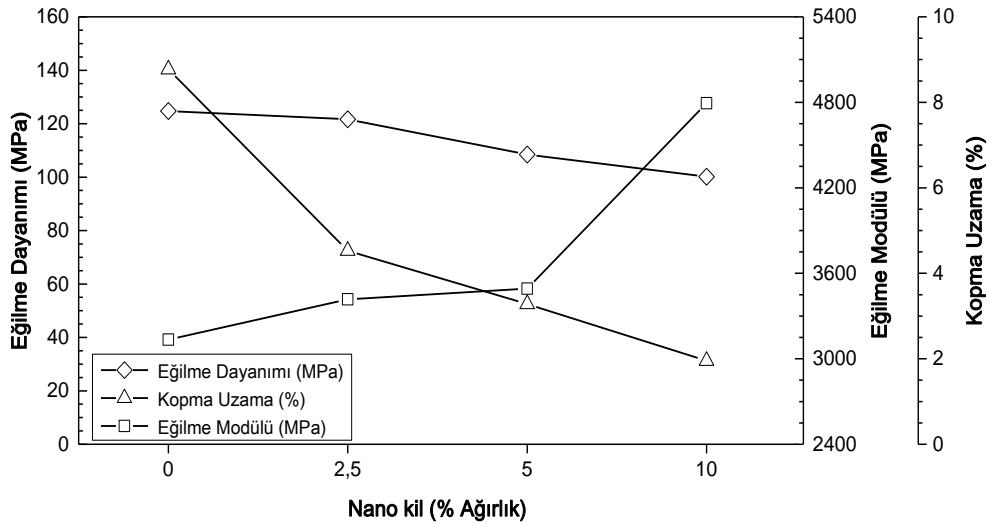
Şekil 2.28'de nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi-eğilme zorlanması eğrileri görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere epoksi reçinesine nano kil eklenmesiyle birlikte artan dolgu oranına bağlı olarak eğrilerin davranışı daha lineer bir yapı kazanmakta ve daha gevrek bir yapıya sahip olmaktadır.



Şekil 2.28. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme gerilmesi eğilme zorlanması eğrileri

Şekil 2.29'da nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü ve eğilmede kopma uzama eğrileri görülmektedir. Kompozitlerin eğilme dayanımları epoksi reçinesine nano kil eklenmesi ile düşmektedir. Bu düşme davranışı %2,5'lük dolgu oranında düşük bir hassasiyette %5 ve %10 'luk dolgu oranlarında lineer bir şekilde olmaktadır. Buna göre ağırlıkça %2,5 nano kil dolgulu

epoksi kompozitin eğilme dayanımı 124,76'dan 121,65 MPa değerine, %5 nano kil dolgulu epoksi kompozitin eğilme dayanımı 108,49 MPa değerine ve %10 nano kil dolgulu epoksi kompozitin eğilme dayanımı 100,13 MPa değerine düşmektedir.



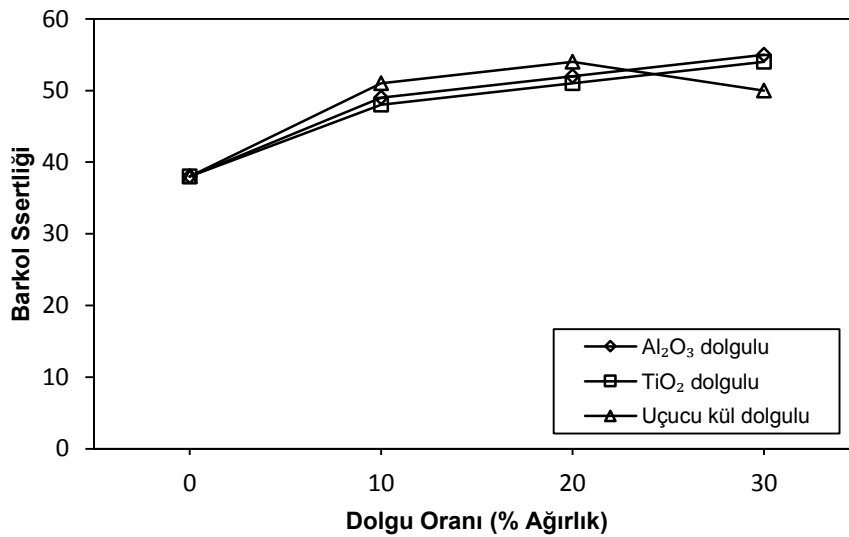
Şekil 2.29. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına göre eğilme dayanımı, eğilme modülü ve kopma uzama eğrileri

Şekilde görüldüğü üzere kompozitlerin kopma uzama değerleri epoksi reçinesine nano kil dolgularının eklenmesiyle azalmaktadır. Bu azalma davranışı %2,5'luk dolgu oranında belirgin bir şekilde meydana gelmektedir ve %5 ve %10'luk dolgu oranlarında lineer bir şekilde olmaktadır. Buna göre %10 nano kil dolgulu kompozitteki kopma uzama değeri % 6,58'den % 1,95'e düşmüştür.

Kompozitlerin eğilme modülleri epoksi reçinesine nano kil eklenmesi ile yükselmektedir. Dolgu oranının artmasına bağlı olarak en yüksek eğilme modülü ağırlıkça %10 nano kil dolgulu kompozitte olmaktadır. Buna göre %10 nano kil dolgulu kompozit saf epoksinin eğilme modülünü 3135 MPa' dan 4794 MPa değerine arttırarak %52 oranında bir yükselme sağlamıştır.

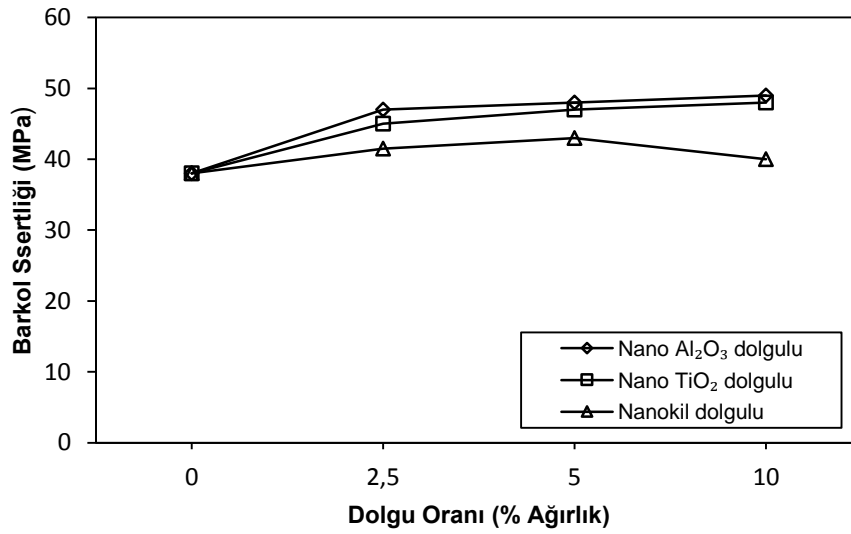
2.2.3. Sertlik deneyleri

Sertlik ölçümü deneyleri ASTM D2583-07 [109] standardına göre Barkol sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Şekil 2.30'da mikro dolgulu epoksi kompozitlerin Barkol sertlik değerleri görülmektedir. Şekilde Al_2O_3 ve TiO_2 dolgularının artan oranı ile birlikte kompozitlerin sertlik değerleri yükselme eğilimi göstermektedirler. Uçucu kül dolgusunun eklenmesiyle sertlik değeri ağırlıkça %20 dolgu içeriğine kadar yükselme eğilimi göstermekle birlikte ağırlıkça %30 dolgu içeriğinde sertlik değeri düşmektedir.



Şekil 2.30. Mikro dolgulu epoksi kompozitlerin barkol sertlik değerleri

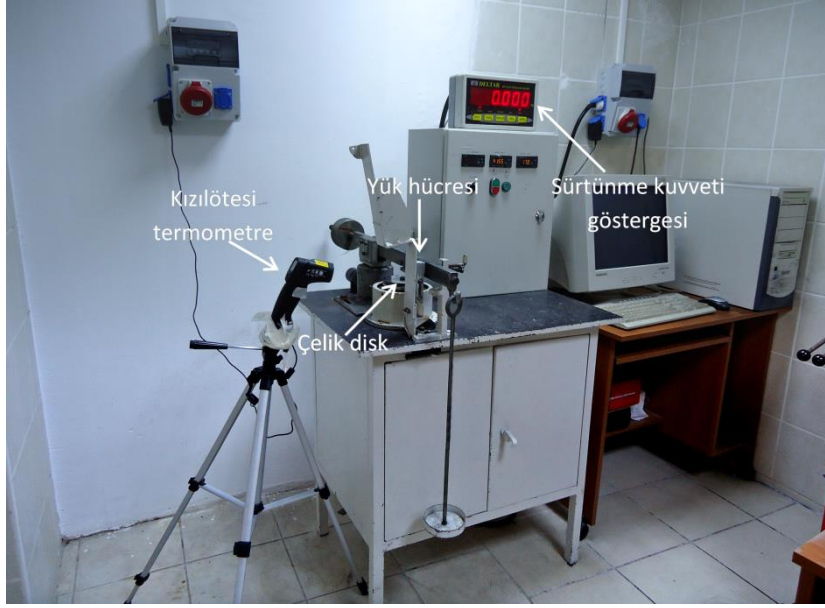
Şekil 2.31'de nano dolgulu epoksi kompozitlerin Barkol sertlik değerleri görülmektedir. Şekilde nano Al_2O_3 ve nano TiO_2 dolgularının artan oranı ile birlikte kompozitlerin sertlik değerleri yükselme eğilimi göstermektedirler. Nanokil dolgusunun eklenmesiyle sertlik değeri ağırlıkça %10 dolgu içeriğine kadar yükselme eğilimi göstermektedir. Ağırlıkça %10 dolgu içeriğinde sertlik değeri düşmektedir.



Şekil 2.31. Nano dolgulu epoksi kompozitlerin barkol sertlik değerleri

2.3. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri

Sürtünme ve aşınma deneyleri pim disk aşınma cihazında ASTM G99 [110] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri 6 mm çapında ve 36 mm uzunluğundadırlar. Disk malzemesi olarak 56 HRC sertliğinde DIN 1.2344 sıcak işlem takım çeliği kullanılmıştır. Deneyden önce numunelerin yüzeyleri 1200 numaralı zımpara ile parlatılmıştır. Numune ve disk yüzeyleri alkolle temizlenmiştir ve ardından kurutulmuşlardır. Her deney en az üç kez tekrarlanmıştır ve ortalama değerler alınmıştır. Kayma hızları 0,4 m/s ve 0,8 m/s' dir. Uygulanan yükler 5N, 10N ve 15N'dir. Kayma mesafesi 2000 m' dir. Pim disk aşınma cihazına bilgisayar destekli kızılötesi termometre ile deney esnasındaki yüzey sıcaklık değişimleri kaydedilmektedir. Şekil 2.32'de pim- disk aşınma cihazı görülmektedir.



Şekil 2.32. Pim-disk aşınma cihazının resmi

Deney öncesi ve deney sonrasında pim numunelerinin ağırlıkları 0,1mg hassasiyetindeki terazide tartılarak ağırlık bulunmuştur ve bulunan ağırlık kayıpları sonucunda denklem 2.4 ile özgül aşınma oranları hesaplanmıştır.

$$k = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F \cdot S} [mm^3/Nm] \quad (2.4)$$

Burada k özgül aşınma oranı (mm^3/Nm), Δm ağırlık kaybı (gr), ρ yoğunluk (gr/cm^3), F yük (N), S kayma mesafesi (m) olmaktadır.

Yoğunluk ölçümleri Precisa marka ölçüm cihazında yapılmıştır. Numunelerin kuru ve saf sudaki ağırlıkları ölçülmüş ve denklem 2.5 bağıntısına göre yoğunlukları hesaplanmıştır. Her numune için en az üç ölçüm yapılmıştır ve ortalaması alınmıştır. Tablo 2.2' de deney numunelerinin yoğunlukları verilmiştir.

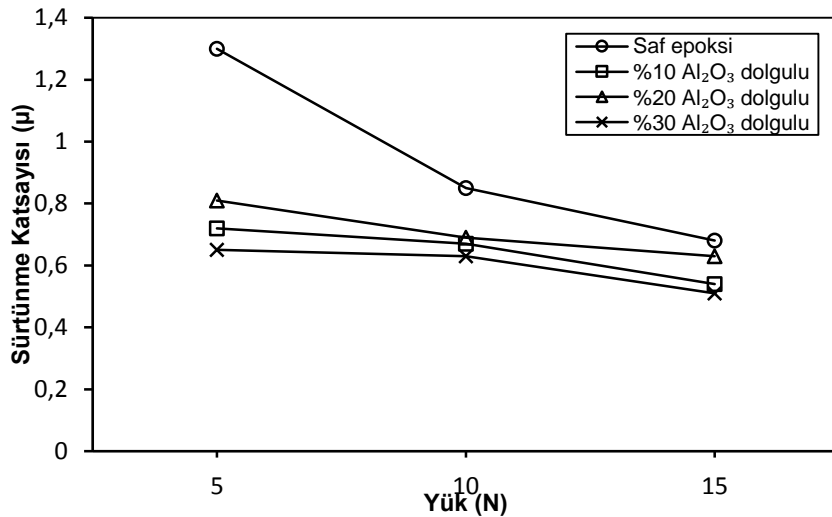
$$\rho = m_{kuru} / (m_{kuru} - m_{yaş}) \quad (2.5)$$

Tablo 2.2. Deney malzemelerinin yoğunlukları

Numune	Yoğunluk (gr/cm^3)
Saf epoksi	1,178
% 10 Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozit	1,260
% 20 Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozit	1,369
% 30 Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozit	1,485
% 10 TiO ₂ dolgulu epoksi kompozit	1,259
% 20 TiO ₂ dolgulu epoksi kompozit	1,363
% 30 TiO ₂ dolgulu epoksi kompozit	1,484
% 10 Uçucu kül dolgulu epoksi kompozit	1,229
% 20 Uçucu kül dolgulu epoksi kompozit	1,286
% 30 Uçucu kül dolgulu epoksi kompozit	1,350
% 2,5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozit	1,195
% 5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozit	1,211
% 10 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu epoksi kompozit	1,247
% 2,5 Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozit	1,197
% 5 Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozit	1,22
% 10 Nano TiO ₂ dolgulu epoksi kompozit	1,265
% 2,5 Nanokil dolgulu epoksi kompozit	1,180
% 5 Nanokil dolgulu epoksi kompozit	1,203
% 10 Nanokil dolgulu epoksi kompozit	1,22

a) Mikro kompozitler

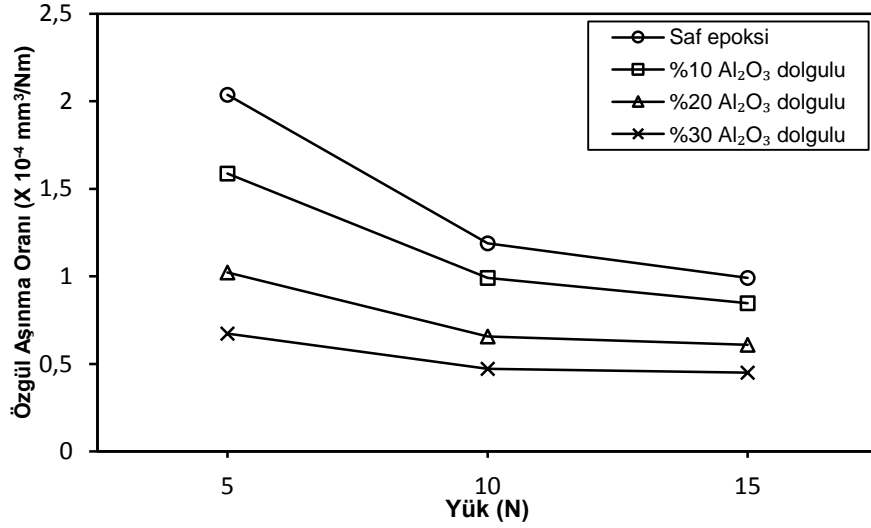
Şekil 2.33'de Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve Al_2O_3 dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayıları sisteme uygulanan yükün artması ile düşmektedir. En düşük sürtünme katsayısı % 30 Al_2O_3 dolgulu kompozitte, en yüksek sürtünme katsayıları ise saf epoksidedir. Buna göre 5N yük altında % 30 Al_2O_3 dolgulu kompozitin sürtünme katsayısı %50 azalarak 1,3'den 0,65 değerine düşmektedir. 15N altında ise sürtünme katsayısı 0,68'den 0,51 değerine düşerek %25 azalma olmaktadır.



Şekil 2.33. Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

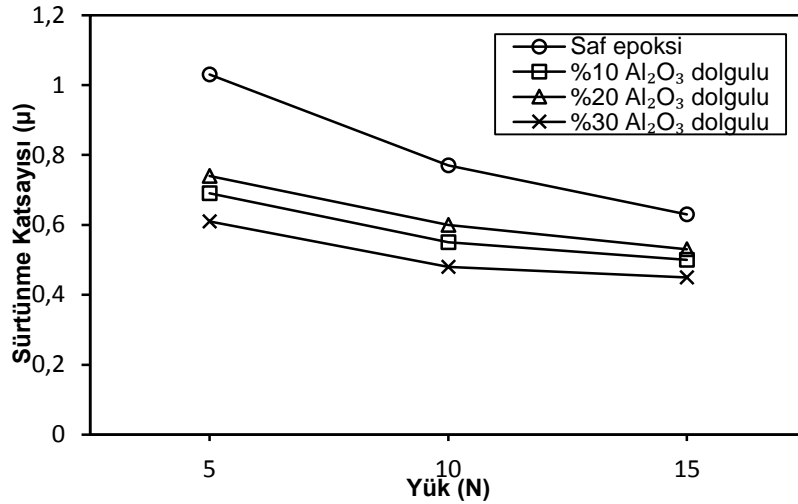
Şekil 2.34'te Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Kompozitlerin özgül aşınma oranları epoksi reçinesine Al_2O_3 dolgularının eklenmesiyle düşmektedir. En düşük özgül aşınma oranı ağırlıkça %30 Al_2O_3 dolgulu kompozitlerde en yüksek özgül aşınma oranı saf epoksidedir. 5N' luk yükte saf epoksinin özgül aşınma oranı $2,04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerindeyken %30 Al_2O_3 dolgulu kompozitteki özgül aşınma oranı % 67 oranında düşerek $6,74 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. 15 N'luk yükte ise $9,9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerine sahip saf epoksi %30 mikro Al_2O_3 dolgulu kompozitte $4,49 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerine gelerek %54 oranında bir düşme

sağlanmıştır. Aynı yük altında %10 Al₂O₃ dolgulu kompozit $8,47 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerine gelerek %15 oranında bir iyileşme sağlanmıştır.



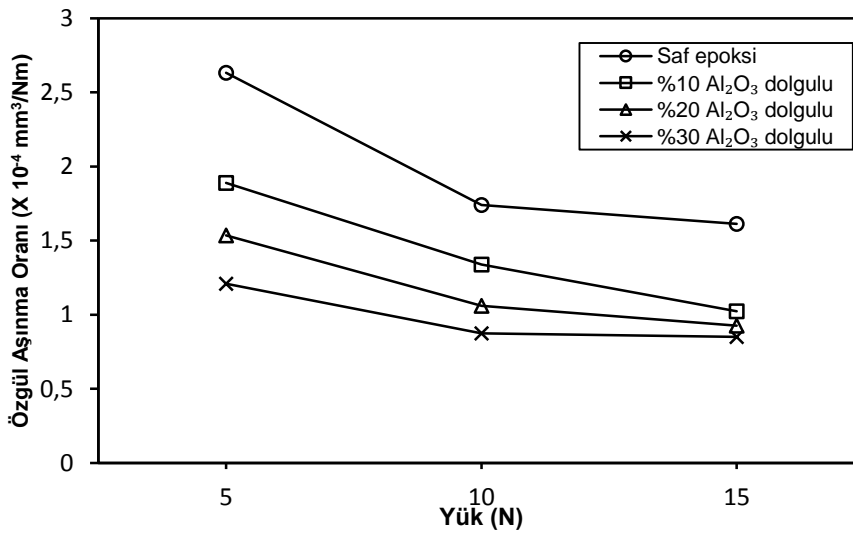
Şekil 2.34. Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.35'de Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayıları kayma hızının 0,4 m/s'den 0,8 m/s'ye çıkması ile düşmektedir. Ayrıca sisteme uygulanan yükün artması ile saf epoksi ve Al₂O₃ dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayıları azalmaktadır. En düşük sürtünme katsayısı % 30 Al₂O₃ dolgulu kompozitte en yüksek sürtünme katsayıları ise saf epokside olmaktadır. 5N yük altında % 30 Al₂O₃ dolgulu kompozitin sürtünme katsayısı %40 azalarak 1,03'den 0,61 değerine düşmektedir. 15N altında ise sürtünme katsayısı 0,63'den 0,45 değerine düşerek %28 azalma olmaktadır.



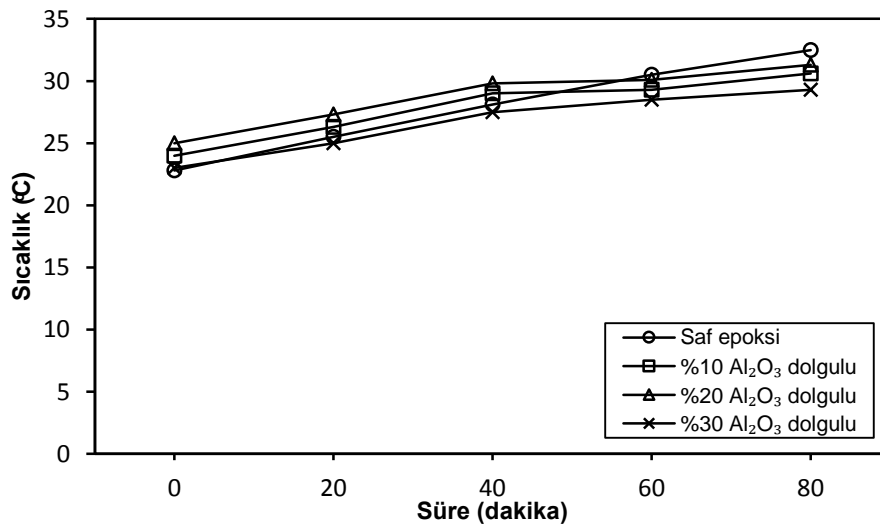
Şekil 2.35. Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.36'da Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Özgül aşınma oranları hızın artmasıyla yükselmektedir. En düşük özgül aşınma oranları %30 Al₂O₃ dolgulu kompozitlerde en yüksek özgül aşınma oranı saf epoksidede olmaktadır. 5N yük altında $2,63 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf epoksiye %30 mikro Al₂O₃ dolgusu eklendiğinde özgül aşınma oranı %54 oranında azalarak $1,21 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. 15N yük altında ise $1,61 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf epoksi, %30 mikro Al₂O₃ dolgusu eklendiğinde %47 azalarak $8,51 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır.

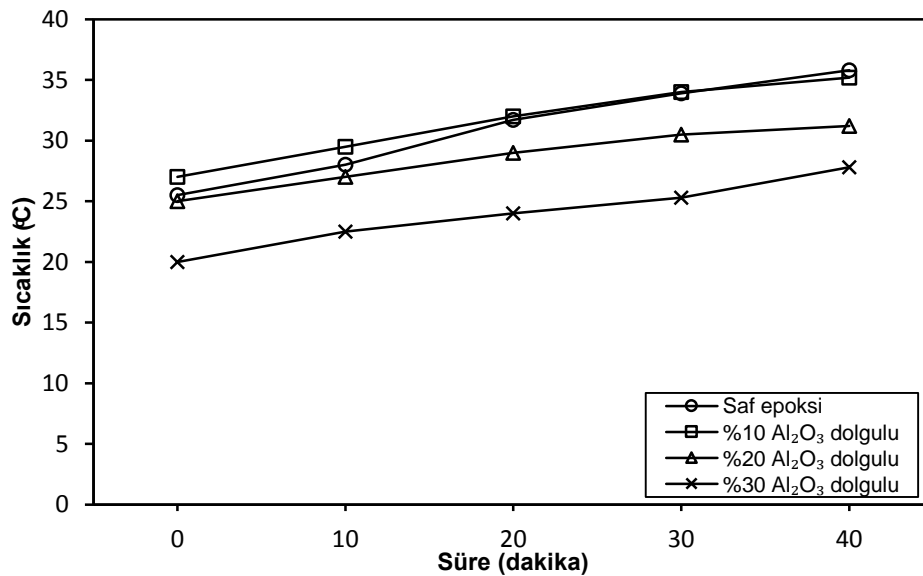


Şekil 2.36. Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.37 ve 2.38'de Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 ve 0,8m/s kayma hızlarında ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri görülmektedir. Al_2O_3 dolgularının eklenmesiyle sıcaklık değişimleri düşmektedir. Grafiklerden 0,4 ve 0,8 m/s kayma hızlarındaki en yüksek sıcaklık değişimleri sırasıyla $9,7^0$ ve $10,3^0$ olmaktadır. Bu sıcaklık değişimleri 90^0 olan epoksinin camsı geçiş sıcaklığının %10,7 ve %11,4 değerlerindedir. Sıcaklık değişimleri malzemelerin yapılarının değişime uğraması için yeterli seviyede değildir.

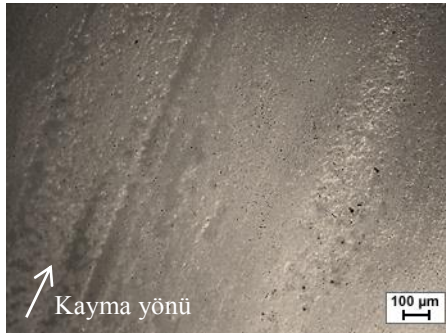


Şekil 2.37 Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15n yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri

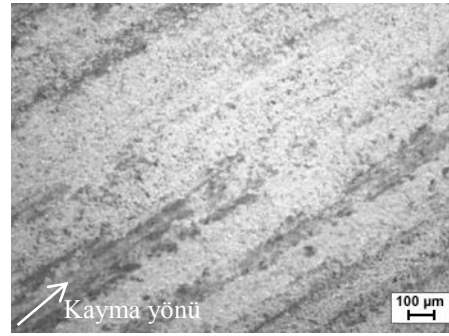


Şekil 2.38. Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15n yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri

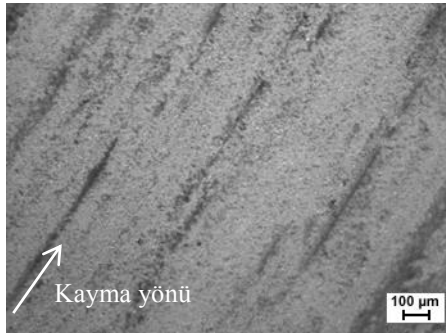
Şekil 2.39'de Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Pim aşınma yüzeyleri stereo mikroskobunda disk aşınma yüzeyleri optik mikroskopta incelenmiştir. Şekil 2.39a' da saf epoksinin aşınma izleri kayma yönünde dalgalı profiller şeklindedir ve yüzeyde hasarlar vardır. Al_2O_3 dolgusunun eklenmesiyle yüzeydeki hasar izleri kaybolmaktadır.



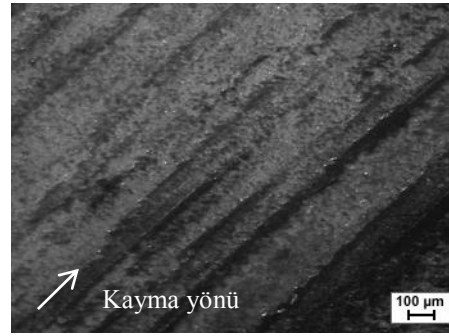
a) Saf epoksi pim yüzeyi



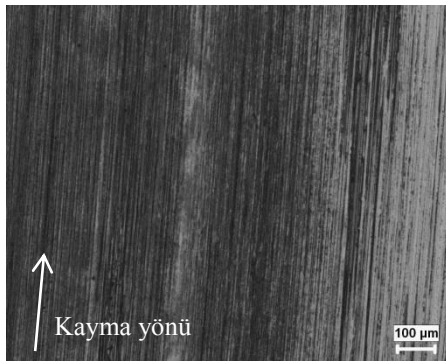
b) %10 Al_2O_3 dolgulu pim yüzeyi



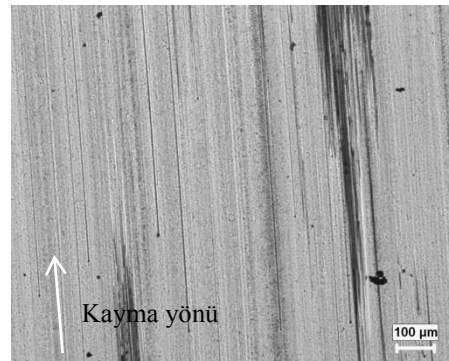
c) %20 Al_2O_3 dolgulu pim yüzeyi



d) %30 Al_2O_3 dolgulu pim yüzeyi



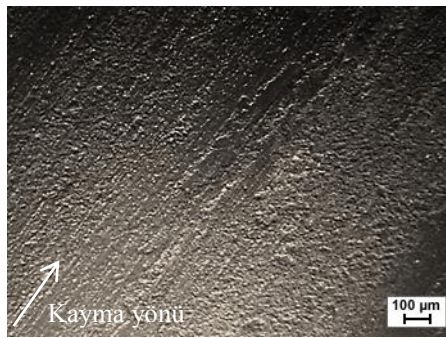
e) Saf epoksi disk yüzeyi



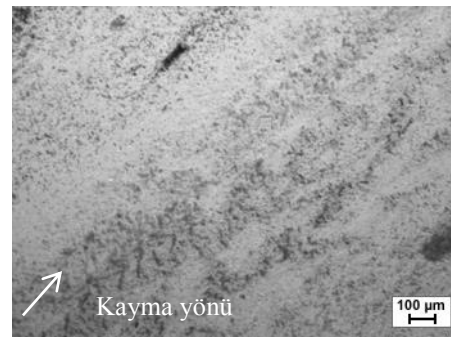
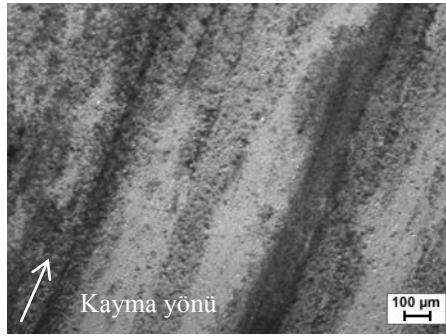
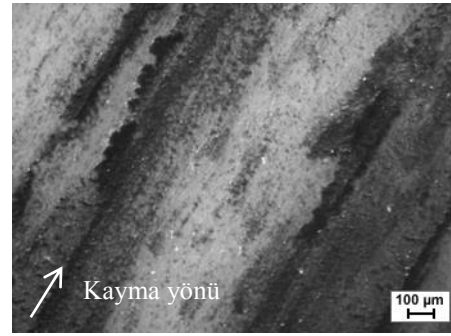
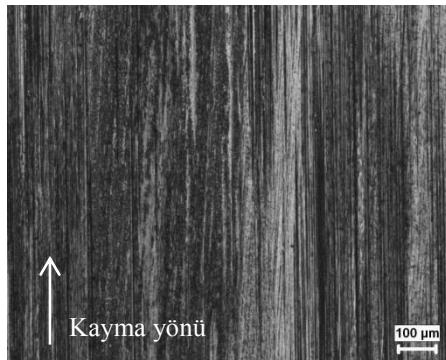
f) %30 Al_2O_3 dolgulu disk yüzeyi

Şekil 2.39. Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

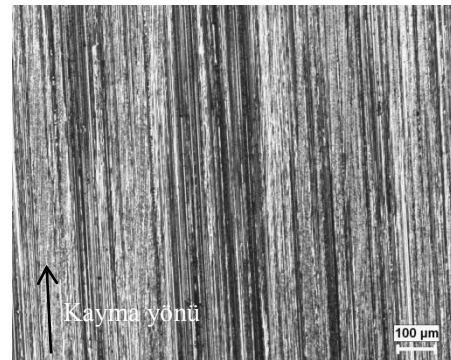
Şekil 2.40'ta Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikro yapı görüntüleri verilmektedir. Şekil 2.39'daki mekanizmaların çalışması görülmektedir. Hızın yükselmesi ile izlerin daha belirgin ve derin olduğu görülmektedir. Dolgu oranının artmasıyla ve hızın etkisiyle şekil 2.39d' de yüzeyde dalgalı bir görüntü oluşmaktadır. Yüzeyden kopan Al_2O_3 tozlarının, diskin pürüzlülük bölgelerine girerek sürtünme katsayısının ve özgül aşınma oranının düşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 2.39 e, f 'de diskin yüzeylerinde aynı mekanizmaların çalışması görülmektedir.



a) Saf epoksi

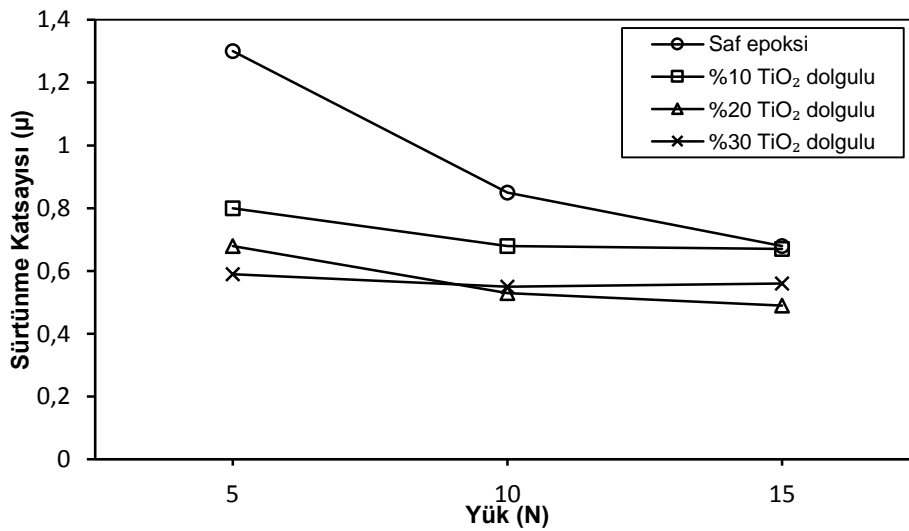
b) %10 Al_2O_3 dolguluc) %20 Al_2O_3 dolgulud) %30 Al_2O_3 dolgulu

e) Saf epoksi disk yüzeyi

f) %30 Al_2O_3 dolgulu disk yüzeyi

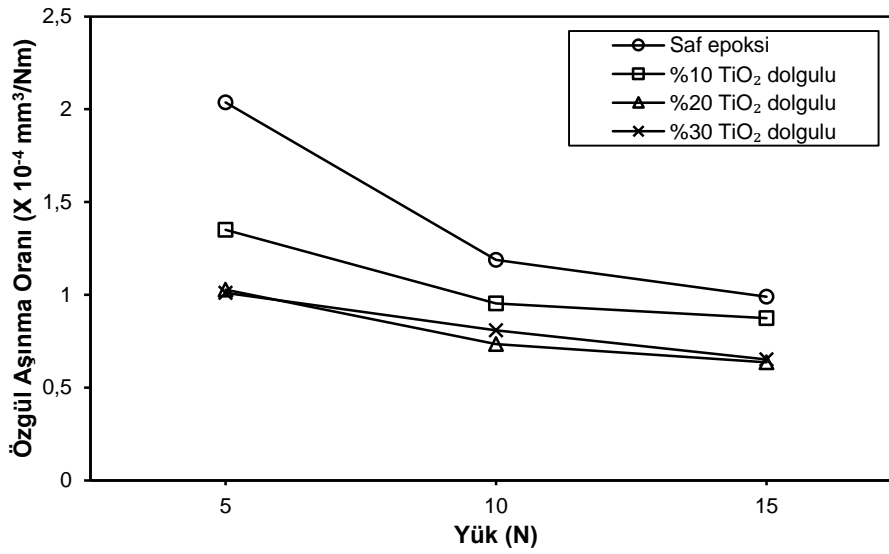
Şekil 2.40. Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

Şekil 2.41'de TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve TiO₂ dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayıları sisteme uygulanan yükün artması ile azalmaktadır. Dolgu oranının artması ile sürtünme katsayıları düşmesine rağmen artan yük ile birlikte %20 mikro TiO₂ dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayıları daha düşük değerlerde olmaktadır. 5N yük altında % 30 TiO₂ dolgulu kompozitin sürtünme katsayısı %54 azalarak 1,3'den 0,59 değerine düşmektedir. 15N altında ise sürtünme katsayısı 0,68'den 0,49 değerine düşerek %27 azalma olmaktadır.



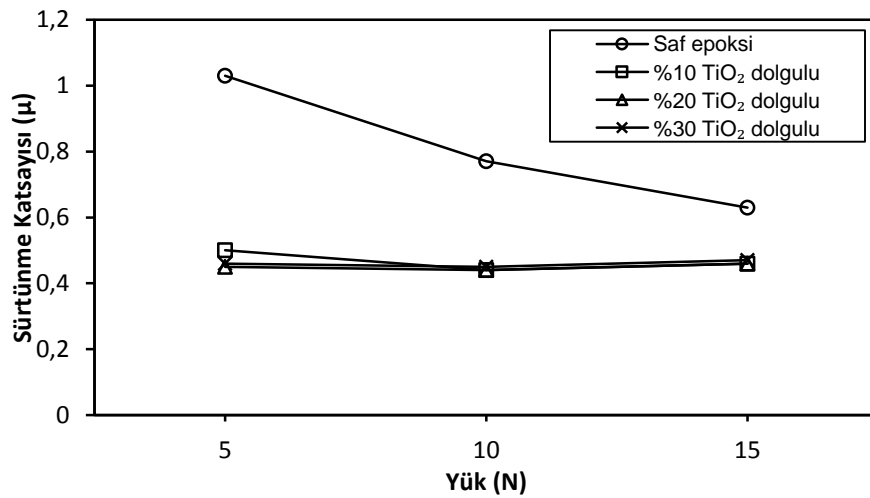
Şekil 2.41. TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.42'de TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve TiO₂ dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları yükün artışıyla düşmektedir. %30 TiO₂ dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları artan yükün etkisiyle %20 TiO₂ dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranlarının üzerinde olmaktadır. 5N yük altında 2,04 X10⁻⁴ mm³/Nm özgül aşınma oranına sahip saf epoksiye %20 oranında TiO₂ dolgusu eklendiğinde özgül aşınma oranı %49,5 oranında azalarak 1,03 X10⁻⁴ mm³/Nm değerine gelmektedir. %30 TiO₂ dolgusu eklendiğinde ise özgül aşınma oranı %50,5 oranında azalarak 1,01 X10⁻⁴ mm³/Nm değerine gelmektedir. 15N yük altında 9,9 X10⁻⁵ mm³/Nm özgül aşınma oranına sahip saf epoksi, %20 TiO₂ dolgulu kompozitte %34,6 azalarak 6,36 X10⁻⁵ mm³/Nm değerine, %30 mikro TiO₂ dolgulu kompozitte ise %34,2 oranında azalarak 6,51 X10⁻⁵ mm³/Nm değerinde olmaktadır.



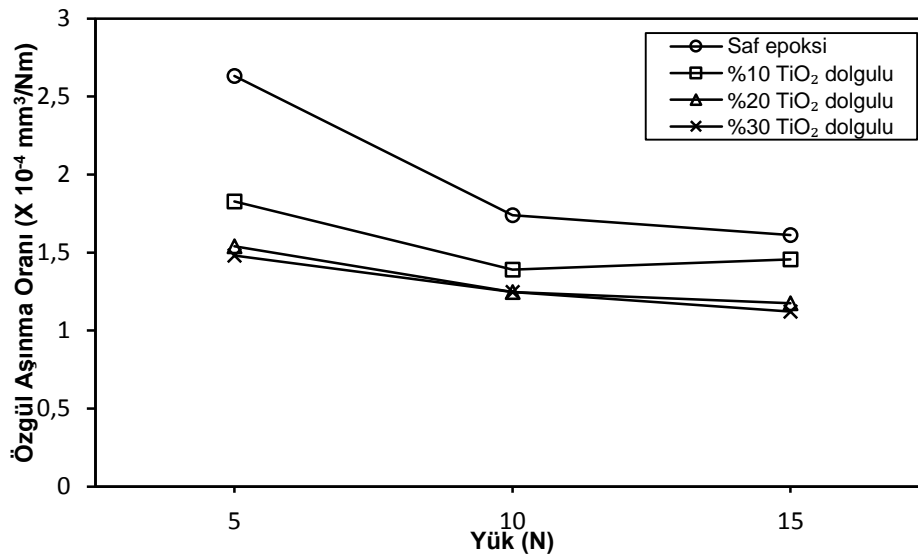
Şekil 2.42. TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.43'te TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve TiO₂ dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayıları düşmektedir. Kayma hızının 0,4'ten 0,8 m/s'ye çıkması ile kompozitlerin sürtünme katsayısı yük ilişkisi incelendiğinde yükün 5N' dan 10 N' a çıkmasıyla kompozitlerin sürtünme katsayısı azalmasına rağmen 10N' dan 15N' a çıkmasıyla sürtünme katsayıları yükselmektedir. 5N yük altında en düşük sürtünme katsayısı %20 dolgulu kompozitte %56 azalma olmaktadır. 15N yükte ise en düşük sürtünme katsayıları %10 ve %20 dolgulu kompozitlerde 0,63'den 0,46 değerine düşerek %27 azalma olmaktadır.



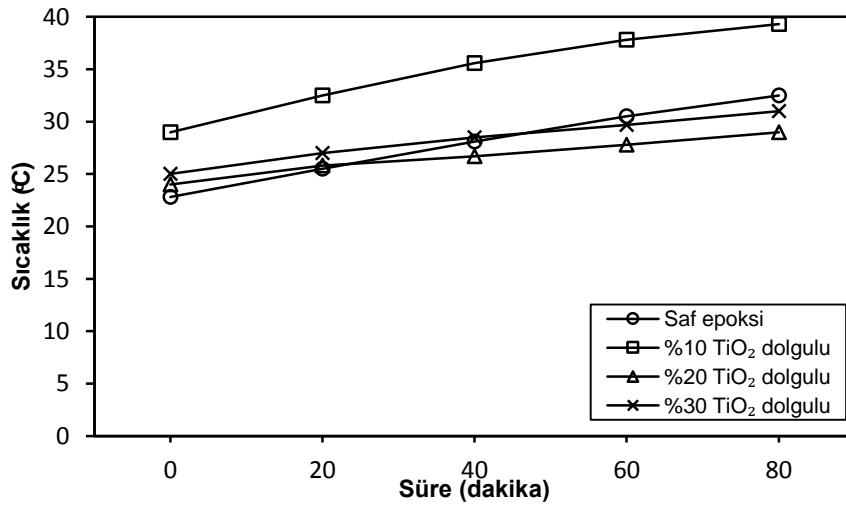
Şekil 2.43. TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.44'te TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s kayma hızındaki aşınma durumlarına bakıldığında özgül aşınma oranları kompozit içindeki dolgu oranının artması ile düşmektedir. Ayrıca yükün artışıyla özgül aşınma oranları düşmektedir. En düşük özgül aşınma oranları 5N ve 15N yüklerde %30 TiO_2 , 10N yükte %20 TiO_2 dolgulu kompozitlerde olurken en yüksek özgül aşınma oranları saf epoksidede olmaktadır. 5N yük altında $2,63 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf epoksiye %30 mikro TiO_2 dolgusu eklendiğinde özgül aşınma oranı %43,7 oranında azalarak $1,48 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. 15N yük altında $1,61 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf epoksi, %30 mikro TiO_2 dolgulu kompozitte %30 oranında azalarak $1,12 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır.

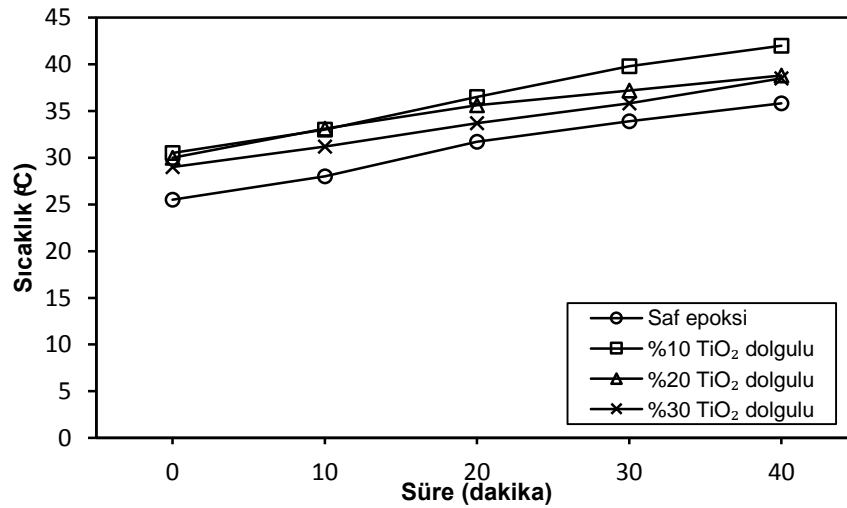


Şekil 2.44. TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.45 ve 2.46'da TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 ve 0,8m/s kayma hızlarında ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri görülmektedir. Grafiklerden 0,4 ve 0,8 m/s kayma hızlarındaki en yüksek sıcaklık değişimleri sırasıyla 10,3⁰ve 11,5⁰ olmaktadır. Bu sıcaklık değişimleri 90⁰ olan epoksinin camsı geçiş sıcaklığının %11 ve %12,7 değerlerindedir. Sıcaklık değişimleri malzemelerin yapılarının değişime uğraması için yeterli seviyede değildir.

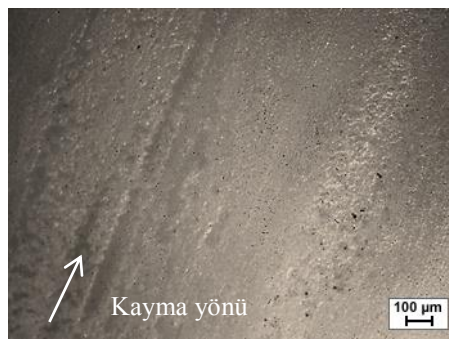


Şekil 2.45. TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri

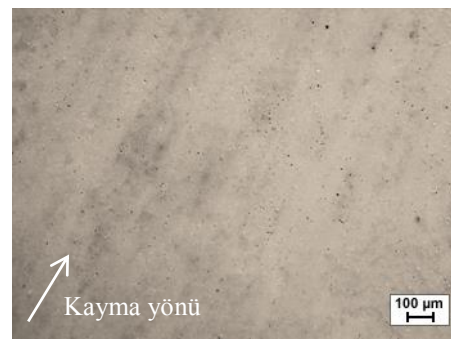
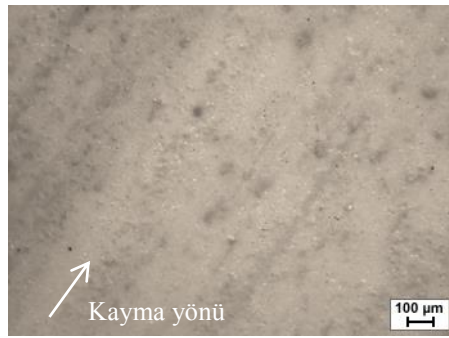
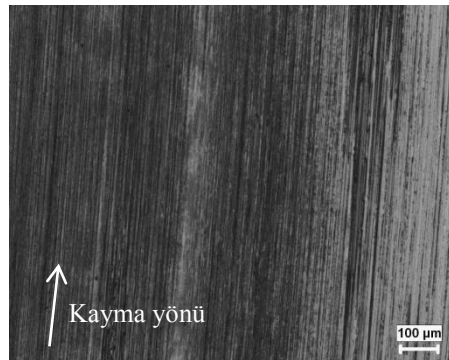


Şekil 2.46. TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri

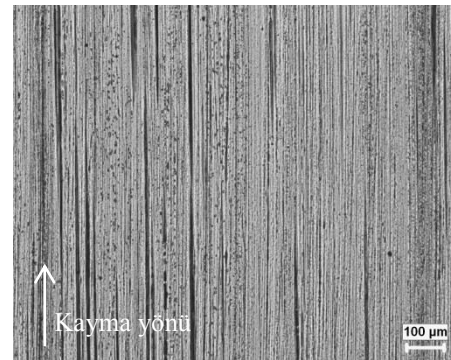
Şekil 2.47'de TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Saf epoksinin yüzeyindeki izler TiO_2 dolgusunun eklenmesi ile kaybolmaktadır. TiO_2 dolgusunun eklenmesi ile pim yüzeylerinde dalgalı bir yüzey durum görülmektedir. Ve yüksek dolgu oranlarında daha açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 2.47 b-d' de ağırlıklı olarak adeziv aşınma mekanizması olmaktadır. Şekil 2.47 e-f' de disk yüzeylerinde yolluklar görülmektedir. Diskin yüzeylerinde aynı mekanizmaların çalışması görülmektedir



a) Saf epoksi pim yüzeyi

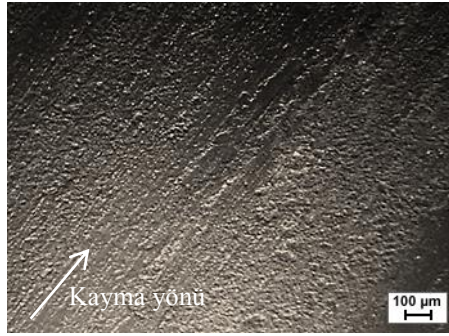
b) % 10 TiO_2 dolgulu pim yüzeyic) %20 TiO_2 dolgulu pim yüzeyid) %30 TiO_2 dolgulu pim yüzeyi

e) Saf epoksi disk yüzeyi

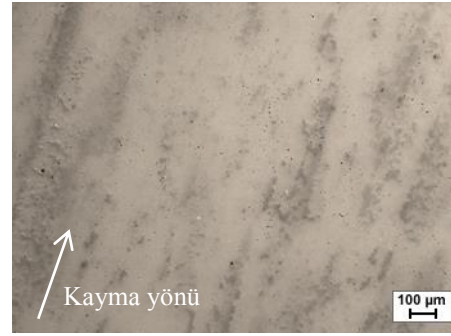
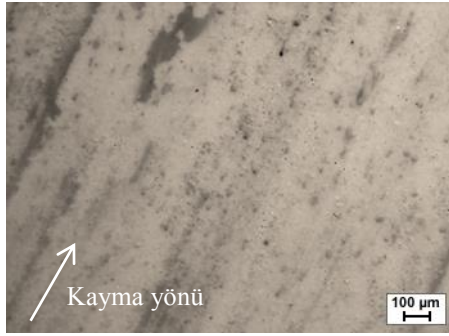
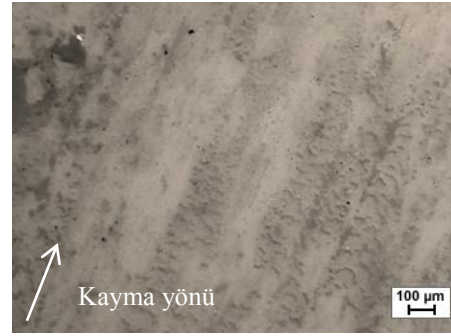
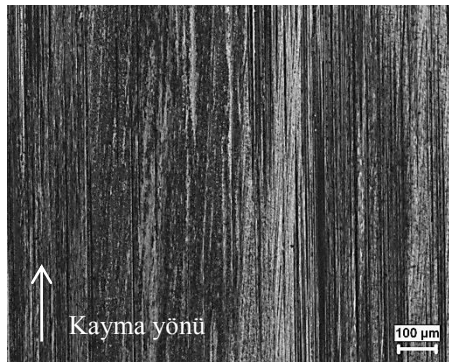
f) %30 TiO_2 dolgulu disk yüzeyi

Şekil 2.47. TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

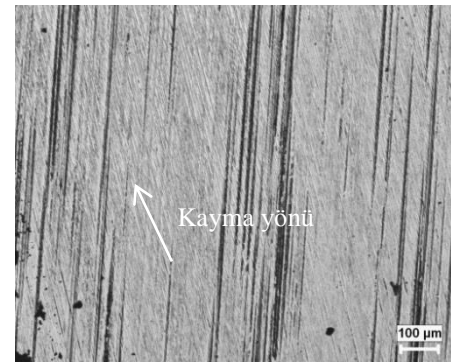
Şekil 2.48'de TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Şekil 2.47'deki aynı mekanizmaların çalışması görülmektedir ve hızın yükselmesi ile bu izler daha belirgin bir şekilde görülmektedir.



a) Saf epoksi

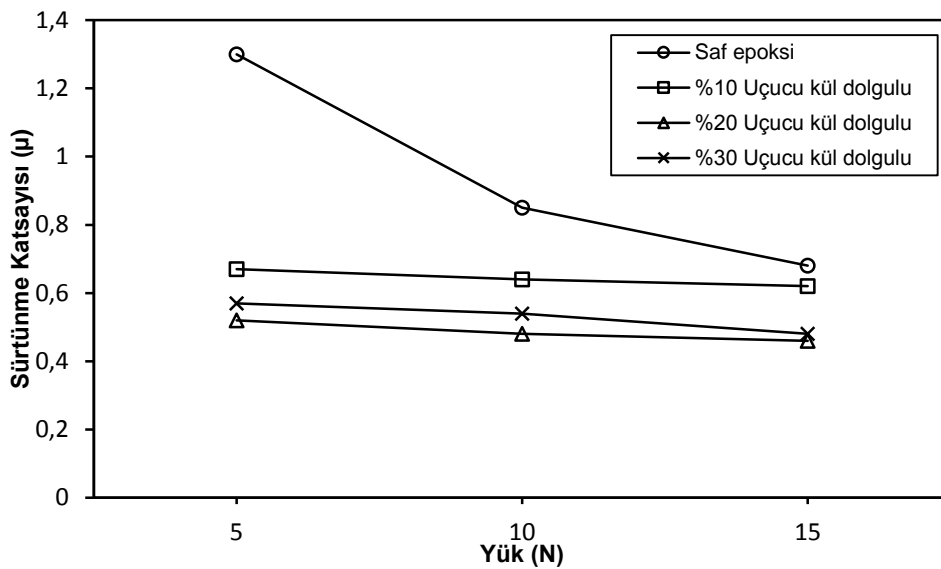
b) %10 TiO_2 dolguluc) %20 TiO_2 dolgulud) %30 TiO_2 dolgulu

e) Saf epoksi disk yüzeyi

f) %30 TiO_2 dolgulu disk yüzeyi

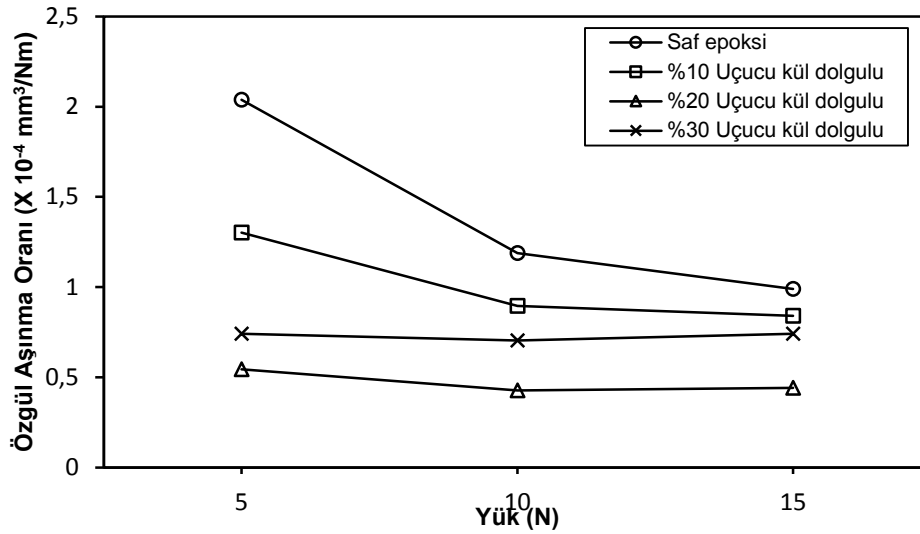
Şekil 2.48. TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

Şekil 2.49'da uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve uçucu kül dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayıları sisteme uygulanan yükün artması ile azalmaktadır. En düşük sürtünme katsayısı % 20 uçucu kül dolgulu kompozitte en yüksek sürtünme katsayısı ise saf epoksidede olmaktadır. 5N yük altında % 20 uçucu kül dolgulu kompozitin sürtünme katsayısı %56 azalarak 1,3'den 0,57 değerine düşmektedir. 15N altında ise sürtünme katsayısı 0,68'den 0,48 değerine düşerek %29 azalma olmaktadır.



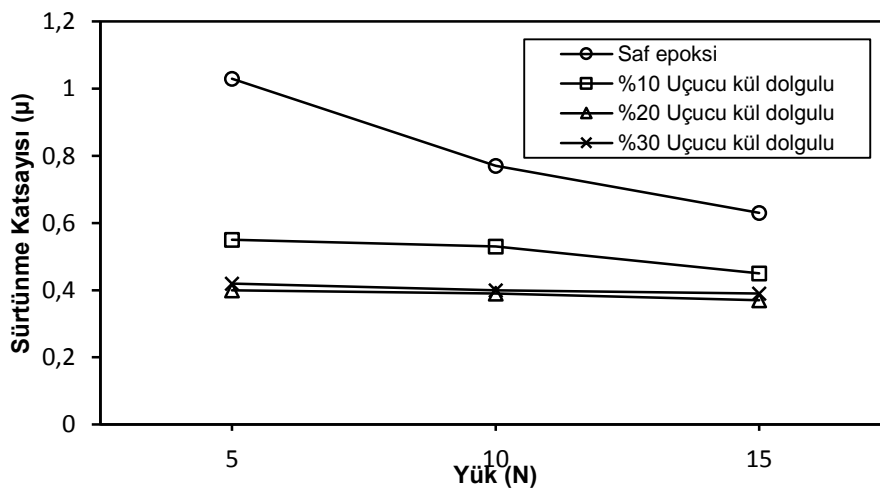
Şekil 2.49. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.50'de uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve uçucu kül dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları yükün artışıyla birlikte azalmaktadır. En düşük özgül aşınma oranı %20 uçucu kül dolgulu kompozitlerde en düşük özgül aşınma oranı ise saf epoksidede olmaktadır. 5N yük altında $2,04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf epoksiye %20 uçucu kül dolgusu eklendiğinde özgül aşınma oranı %73 oranında azalarak $5,44 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. 15N yük altında $9,9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf epoksi, %20 uçucu kül dolgulu kompozitte %55 azalarak $4,41 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır.



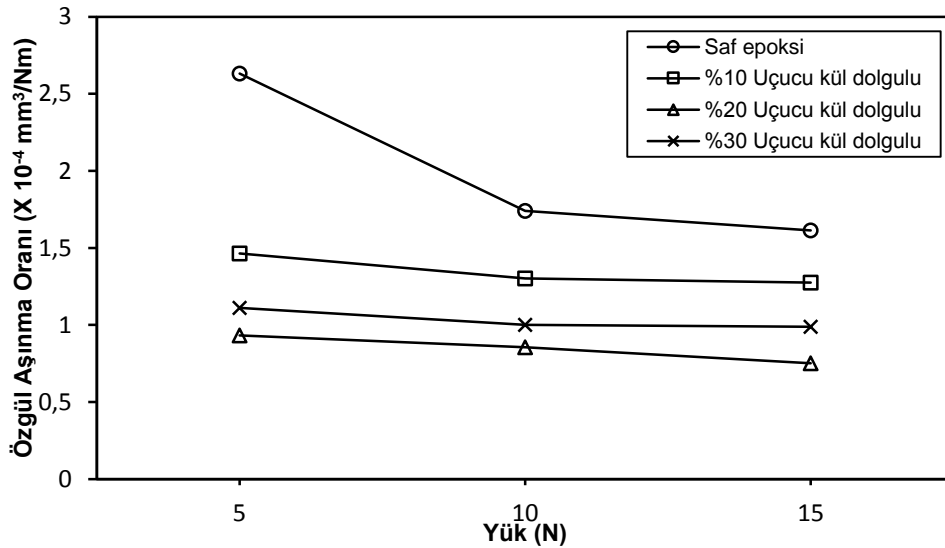
Şekil 2.50. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.51'de uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Sürtünme katsayıları kayma hızının 0,4 'den 0,8 m/s'ye çıkması ile azalmaktadır. Sisteme uygulanan yükün artması ile saf epoksi ve uçucu kül dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayıları azalmaktadır. En düşük sürtünme katsayıları % 20 uçucu kül dolgulu kompozitte en yüksek sürtünme katsayıları ise saf epoksidede olmaktadır. 5N yük altında % 20 uçucu kül dolgulu kompozitin sürtünme katsayısı %59 azalarak 1,03'den 0,42 değerine düşmektedir. 15N altında ise sürtünme katsayısı 0,63'den 0,37 değerine düşerek %41 azalma olmaktadır.



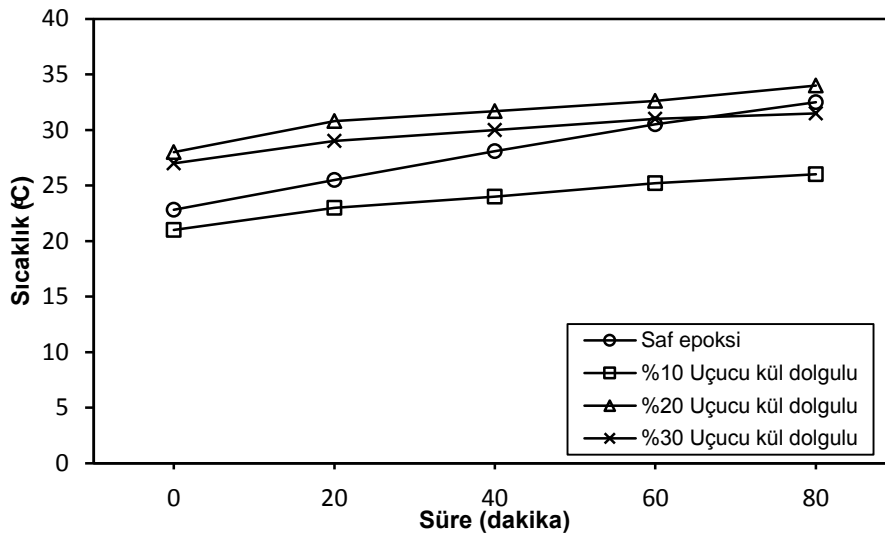
Şekil 2.51. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.52'de uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve uçucu kül dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları hızın artışıyla yükselmektedirler ve ayrıca yükün artışıyla birlikte azalmaktadır. En düşük özgül aşınma oranı %20 uçucu kül dolgulu kompozitlerde en yüksek özgül aşınma oranları ise saf epokside olmaktadır. 5N yük altında $2,63 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf epoksiye %20 uçucu kül dolgusu eklendiğinde özgül aşınma oranı %65 oranında azalarak $9,33 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. 15N yük altında $1,61 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf epoksi, %20 uçucu kül dolgulu kompozitte %53 azalarak $7,52 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerine olmaktadır.

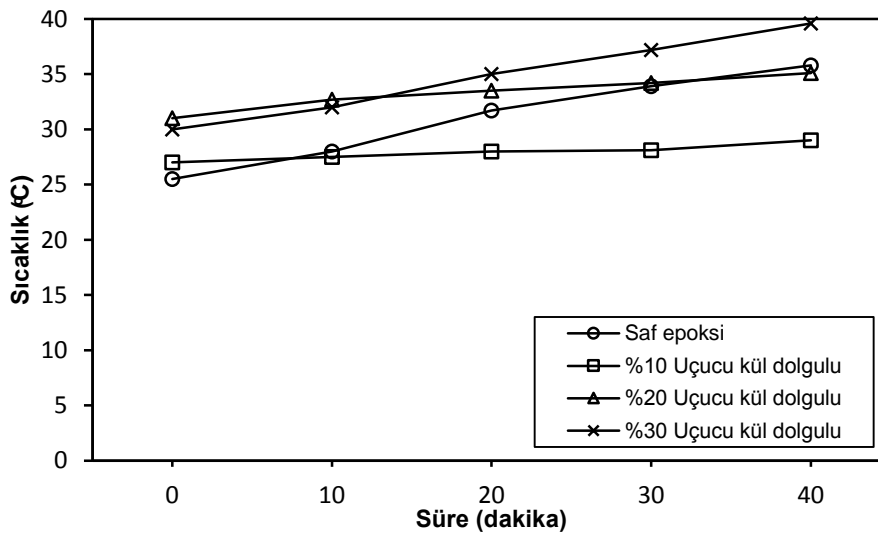


Şekil 2.52. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.53 ve 2.54'de uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 ve 0,8m/s kayma hızlarında ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri görülmektedir. Grafiklerden 0,4 ve 0,8 m/s kayma hızlarındaki en yüksek sıcaklık değişimleri saf epoksidede sırasıyla 9,7⁰ve 10,3⁰ olmaktadır. Bu sıcaklık değişimleri 90⁰ olan epoksinin camısı geçiş sıcaklığının %10,7 ve %11 değerlerindedir. Sıcaklık değişimleri malzemelerin yapılarının değişime uğraması için yeterli seviyede değildir.



Şekil 2.53. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri



Şekil 2.54. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri

Şekil 2.55'de uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Saf epoksinin yüzeyindeki izler uçucu kül dolgusunun eklenmesiyle kapanmakta ve %30 dolgu oranında külün ayrılması sonucu dalgalı yüzey ortamı oluşmaktadır.



a) Saf epoksi pim yüzeyi



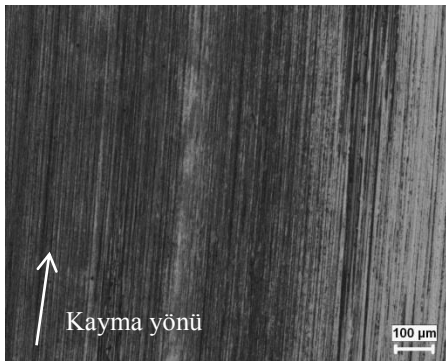
b) %10 Uçucu kül dolgulu pim yüzeyi



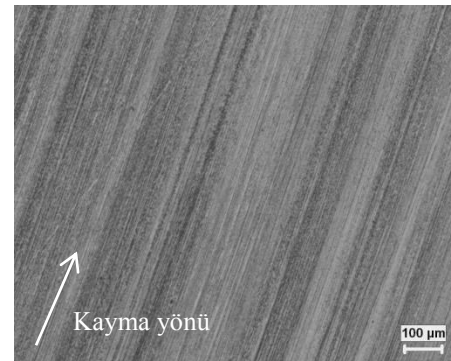
c) %20 Uçucu kül dolgulu pim yüzeyi



d) %30 Uçucu kül dolgulu pim yüzeyi



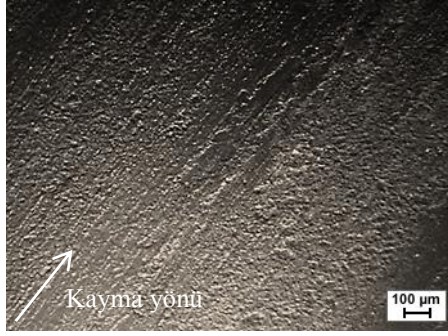
e) Saf epoksi disk yüzeyi



f) %30 Uçucu kül dolgulu disk yüzeyi

Şekil 2.55. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

Şekil 2.56'da uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Burada şekil 2.55'teki mekanizmaların çalışması görülmektedir. Hızın yükselmesi ile bu izler daha belirgin bir şekilde görülmektedir.



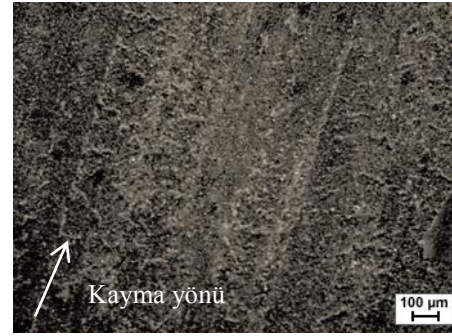
a) Saf epoksi pim yüzeyi



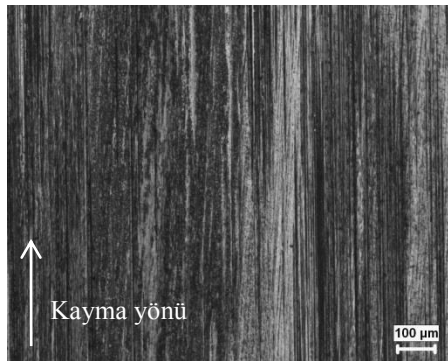
b) %10 Uçucu kül dolgulu pim yüzeyi



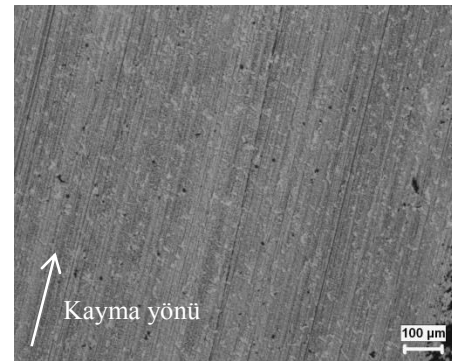
c) %20 Uçucu kül dolgulu pim yüzeyi



d) %30 Uçucu kül dolgulu pim yüzeyi



e) Saf epoksi disk yüzeyi

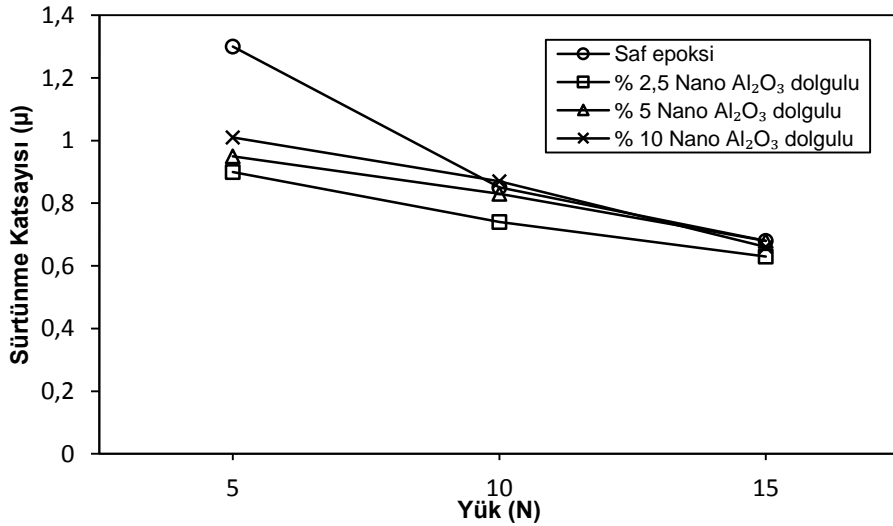


f) %30 Uçucu kül dolgulu disk yüzeyi

Şekil 2.56. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

a) Nano kompozitler

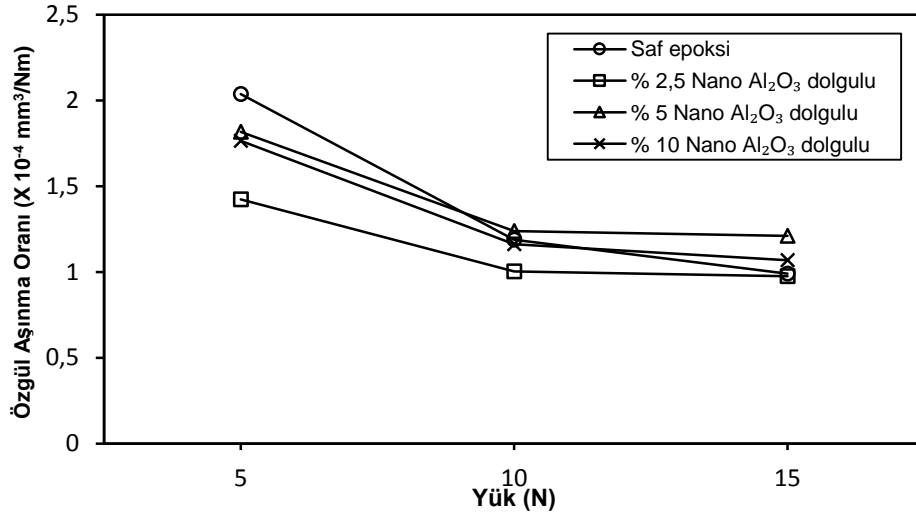
Şekil 2.57'de nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayıları sisteme uygulanan yükün artması ile azalmaktadır. Dolgu oranının artmasıyla sürtünme katsayıları yükselmektedir. En düşük sürtünme katsayısı %2,5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlerde olmaktadır. Buna göre 5N yük altında %2,5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitin sürtünme katsayısı %30 azalarak 1,3'den 0,9 değerine düşmektedir. 15N altında ise sürtünme katsayısı 0,68'den 0,63 değerine düşerek %7 azalma olmaktadır.



Şekil 2.57. Nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

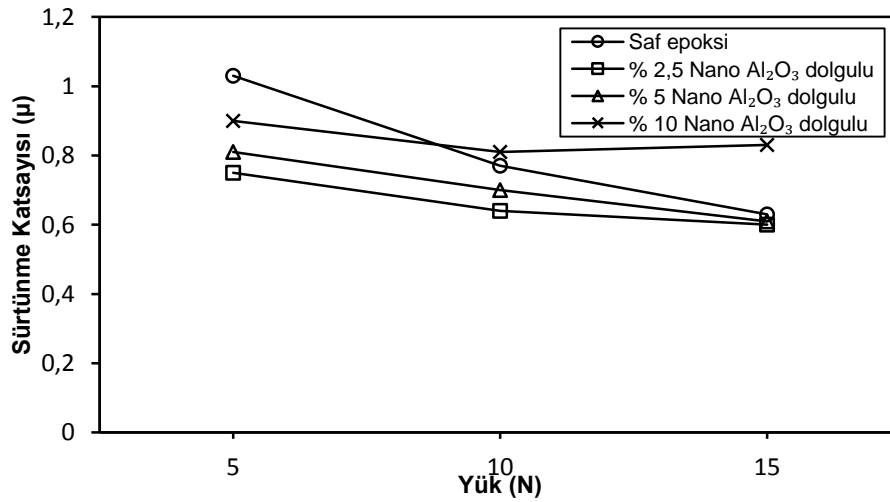
Şekil 2.58'de nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları yükün artmasıyla azalmaktadır. En düşük özgül aşınma oranları %2,5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlerde olmaktadır. 5N yük altında $2,04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf epoksiye %2,5 nano Al_2O_3 dolgusu eklendiğinde özgül aşınma oranı %30 oranında azalarak $1,42 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerine gelmektedir. 15N yük altında $9,9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf epoksiye %2,5 nano Al_2O_3 dolgusu özgül aşınma oranı $9,76 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. %5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitin özgül aşınma oranı 10N'dan itibaren saf epoksinin özgül aşınma oranını geçmektedir. 15N yük

altında %5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitin özgül aşınma oranı $1,21 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olmaktadır.



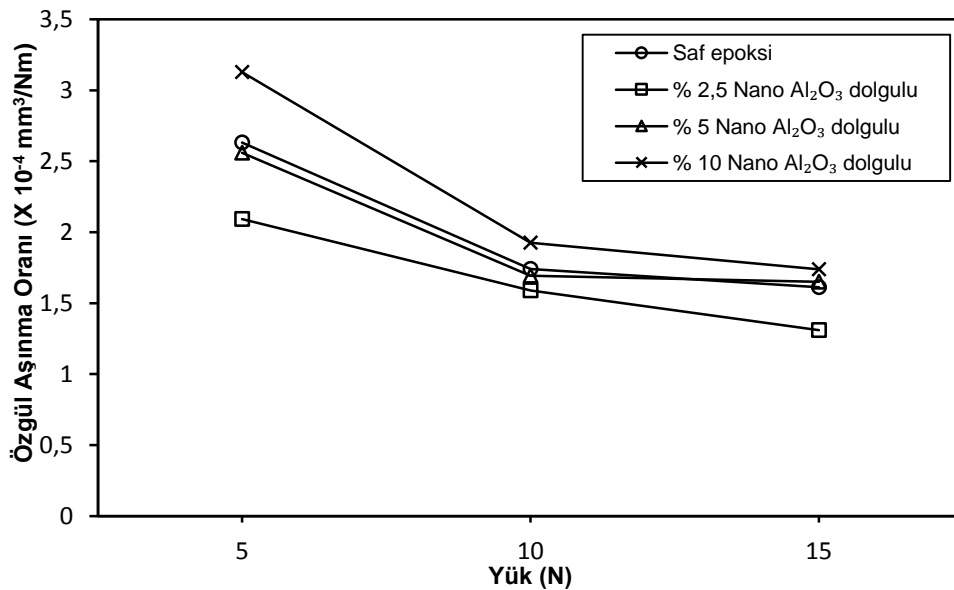
Şekil 2.58. Nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.59'da nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Grafikten görüldüğü üzere genel olarak kayma hızının 0,4 m/s'den 0,8 m/s'ye çıkması ile kompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri azalmakla birlikte %10 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlerde yük 10N'dan 15N'a artarken sürtünme katsayıları da yükselmektedir. Buna göre en düşük sürtünme katsayıları %2,5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlerde en yüksek sürtünme katsayıları ise artan yük ile birlikte %10 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlerde olmaktadır.



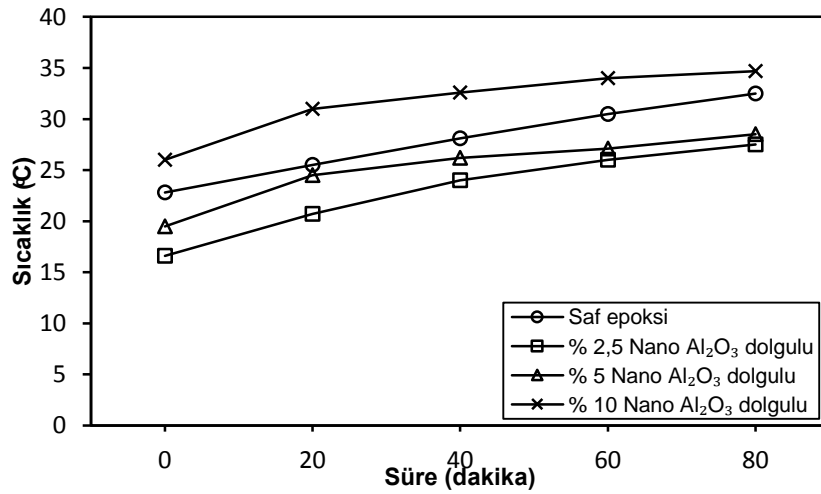
Şekil 2.59. Nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.60'ta nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Kayma hızının artmasıyla özgül aşınma oranları yükselmektedir. En düşük özgül aşınma oranları %2,5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlerde en yüksek özgül aşınma oranları %10 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlerde olmaktadır. Hız ve yükün artışıyla birlikte %5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları 10N'luk yükün uygulanmasıyla birlikte saf epoksinin özgül aşınma oranlarını geçmektedir. Kayma hızının artması ile %10 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları saf epoksinin üzerinde olmaktadır. Saf epoksinin 5N yük altındaki özgül aşınma oranı $2,63 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde %10 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitin özgül aşınma oranı $3,13 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. Ayrıca 15N yük altında ise saf epoksinin özgül aşınma oranı $1,61 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, %10 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitin özgül aşınma oranı ise $1,74 \times 10^{-4}$ değerinde olmaktadır.

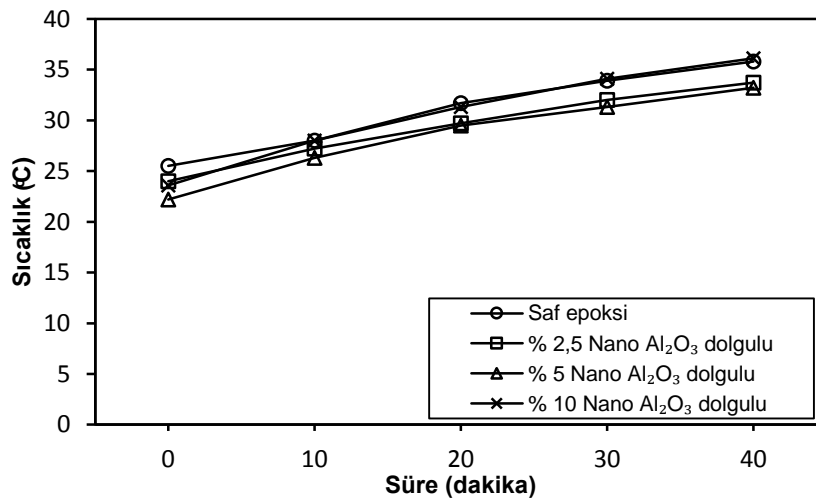


Şekil 2.60. Nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.61 ve 2.62'de nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 ve 0,8m/s kayma hızlarında ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri görülmektedir. Grafiklerden 0,4 ve 0,8 m/s kayma hızlarındaki en yüksek sıcaklık değişimleri sırasıyla $10,9^0$ ve $11,5^0$ olmaktadır. Bu sıcaklık değişimleri 90^0 olan epoksinin camsı geçiş sıcaklığının %12 ve %13,8 değerlerindedir. Sıcaklık değişimleri malzemelerin yapılarının değişime uğraması için yeterli seviyede değildir.

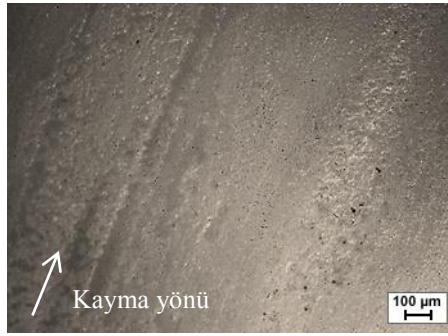


Şekil 2.61 Nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri

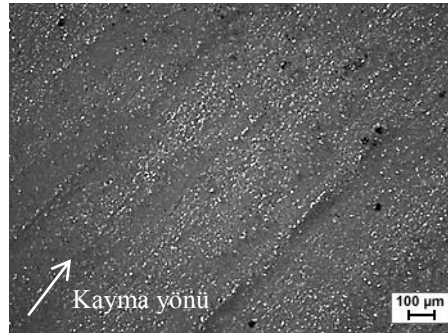


Şekil 2.62 Nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri

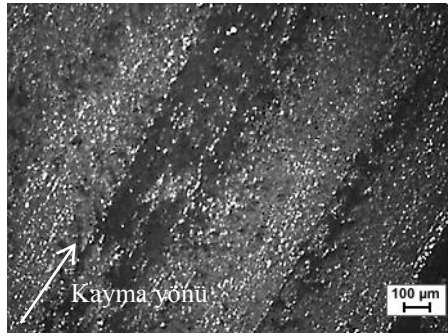
Şekil 2.63'te nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. %2,5 nano Al_2O_3 dolgusunun eklenmesiyle polimer kompozitin yüzeyi dalgalı bir yapıya sahip olmaktadır. %5 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitin yüzeyi sert parçacıkların etkisiyle pürüzlü bir yapıya sahip olmakta ve aşınma izleri kalın bir yapıdadır. Dolgu oranının artmasıyla yüzeydeki deformasyon artmaktadır.



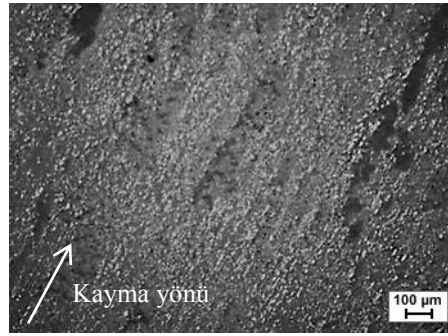
a) Saf epoksi pim yüzeyi



b) % 2,5 Nano Al_2O_3 dolgulu pim yüzeyi



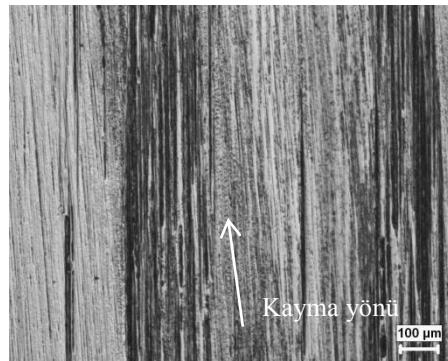
c) % 5 Nano Al_2O_3 dolgulu pim yüzeyi



d) % 10 Nano Al_2O_3 dolgulu pim yüzeyi



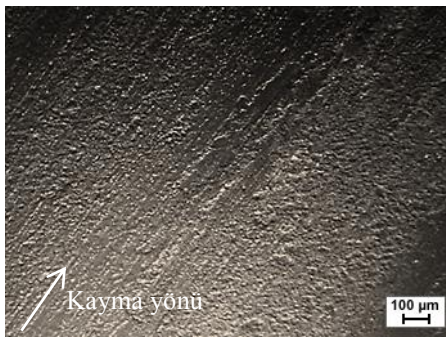
e) Saf epoksi disk yüzeyi



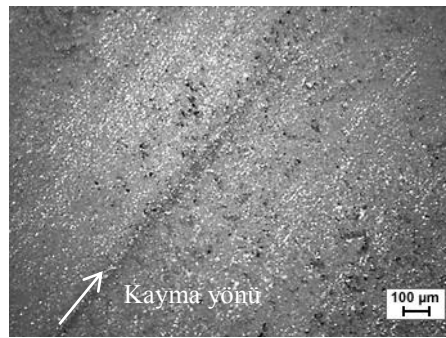
f) % 10 Nano Al_2O_3 dolgulu disk yüzeyi

Şekil 2.63. Nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

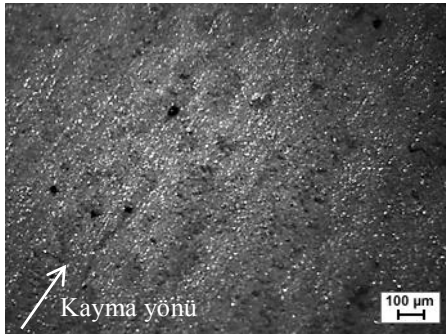
Şekil 2.64'te nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Kayma hızının artması ile saf epoksi yüzeyindeki çizikler derinleşmektedir. %2,5 nano Al_2O_3 eklenmesiyle çizgilerin derinlikleri azalmakla birlikte artan hızın ve yükün etkisiyle dolgular kompozit yüzeyinden ayrılmaktadırlar. %5 nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitin yüzeyindeki aşınma izleri parçacıklı şeklindedir. %10 nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitte artan dolgu oranı ile birlikte aşınma izleri kalın ve kanallı bir yapıda olmaktadır.



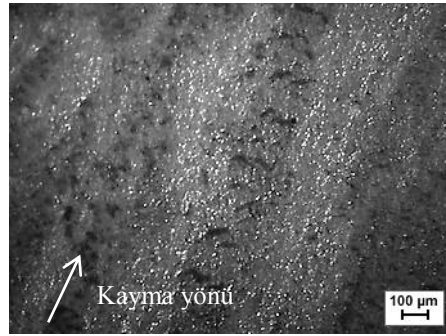
a) Saf epoksi pim yüzeyi



b) % 2,5 Nano Al_2O_3 dolgulu pim yüzeyi



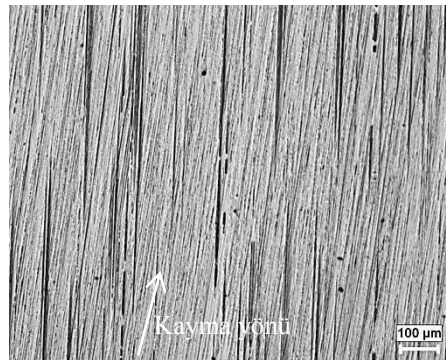
c) % 5 Nano Al_2O_3 dolgulu pim yüzeyi



d) % 10 Nano Al_2O_3 dolgulu pim yüzeyi



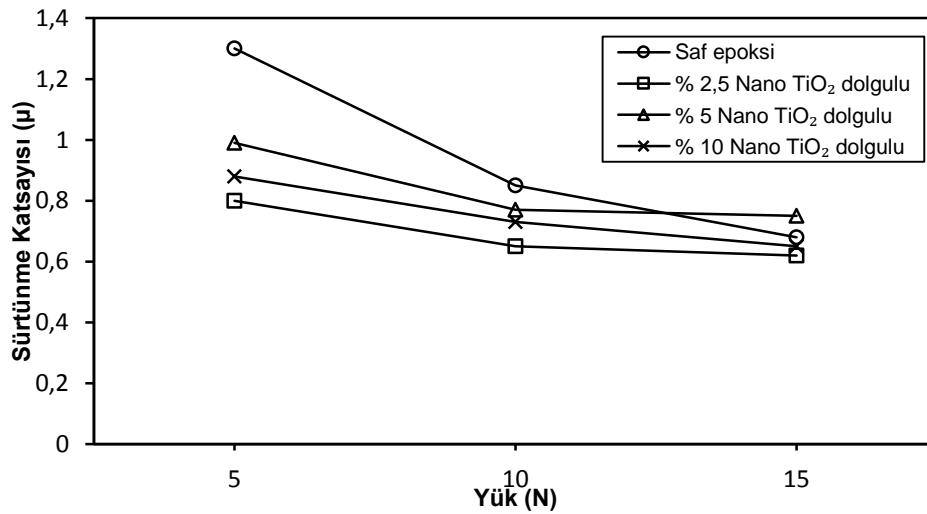
e) Saf epoksi disk yüzeyi



f) % 10 Nano Al_2O_3 dolgulu disk yüzeyi

Şekil 2.64. Nano Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

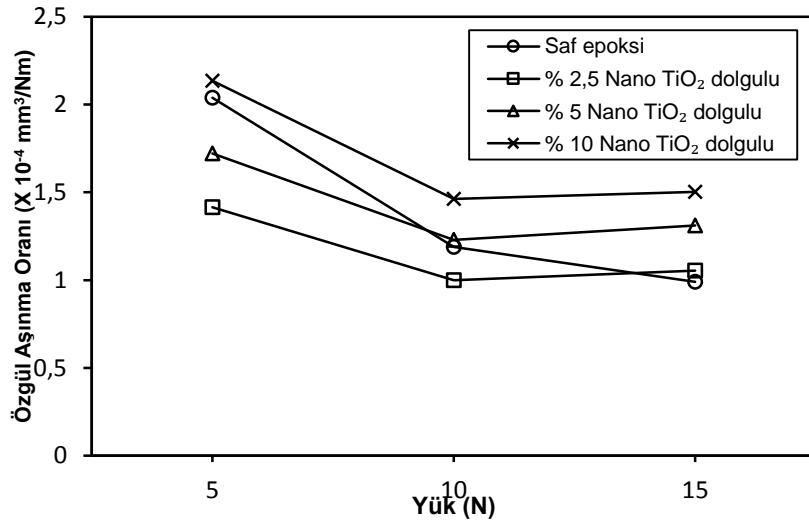
Şekil 2.65'te nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve nano TiO₂ dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayıları sisteme uygulanan yükün artması ile azalmaktadır. En düşük sürtünme katsayısı değerleri %2,5 nano TiO₂ dolgulu kompozitlerde olmaktadır. 5N yük altında % 2,5 nano TiO₂ dolgulu kompozitin sürtünme katsayısı %54 azalarak 1,3'den 0,8'e düşmektedir. 15N altında ise sürtünme katsayısı 0,68'den 0,62 değerine düşmektedir



Şekil 2.65. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

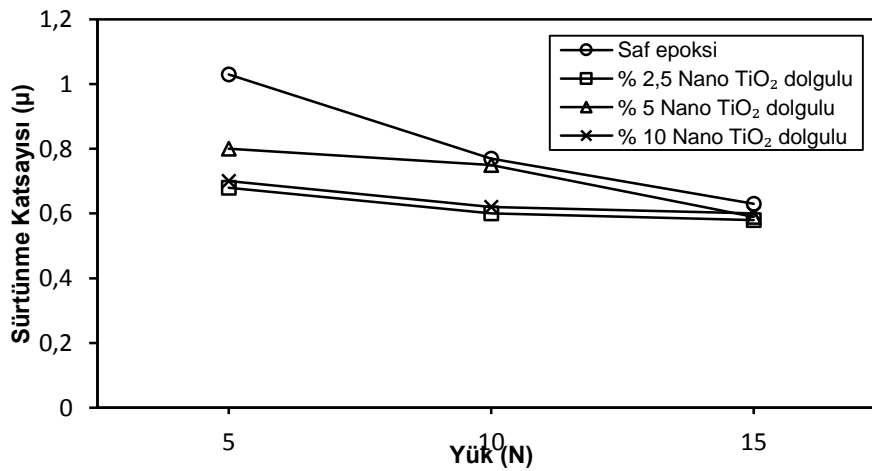
Şekil 2.66'da nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Özgül aşınma oranları kompozit içerisindeki dolgu oranının artmasıyla yükselmektedir. En düşük özgül aşınma oranı %2,5 nano TiO₂ dolgulu kompozitte en yüksek özgül aşınma oranı %10 nano TiO₂ dolgulu kompozitte meydana gelmektedir. 5N' luk yükte saf epoksinin özgül aşınma oranı $2,04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerindeyken %2,5 nano TiO₂ dolgulu kompozitteki özgül aşınma oranı %31 oranında düşerek $1,42 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. 15N yükte saf epoksinin özgül aşınma oranı $9,9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerindeyken %2,5 nano TiO₂ dolgulu kompozitteki özgül aşınma oranı saf epoksinin değerini yaklaşık %6 oranında yükselterek $1,05 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. %5 nano TiO₂ dolgulu kompozitlerde 10N 'dan sonra artan yük ile birlikte özgül aşınma oranı saf epoksinin değerini geçmektedir. Bununla

birlikte %10 Nano TiO₂ dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları saf epoksinin üzerinde olmaktadır.



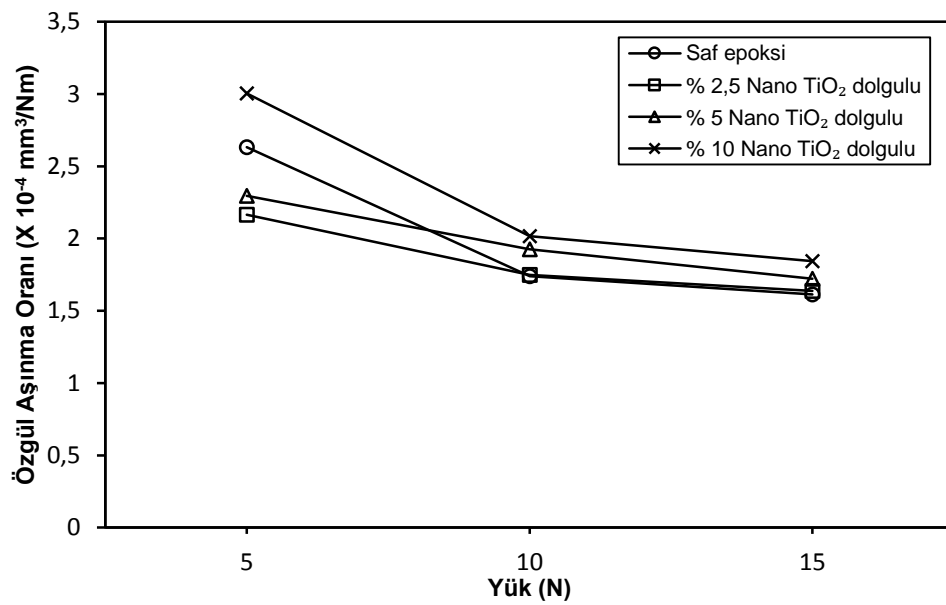
Şekil 2.66. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.67'de nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Sürtünme katsayıları kayma hızının 0,4 m/s'den 0,8 m/s'ye çıkması ile azalmaktadır. Sisteme uygulanan yükün artması ile saf epoksi ve nano TiO₂ dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayıları azalmaktadır. En düşük sürtünme katsayıları %2,5 nano TiO₂ dolgulu kompozitlerde meydana gelmektedir. 5N yük altında % 2,5 nano TiO₂ dolgulu kompozitin sürtünme katsayısı %34 azalarak 1,03'den 0,68'e düşmektedir. 15N altında ise sürtünme katsayısı 0,65'den 0,58'e düşmektedir.



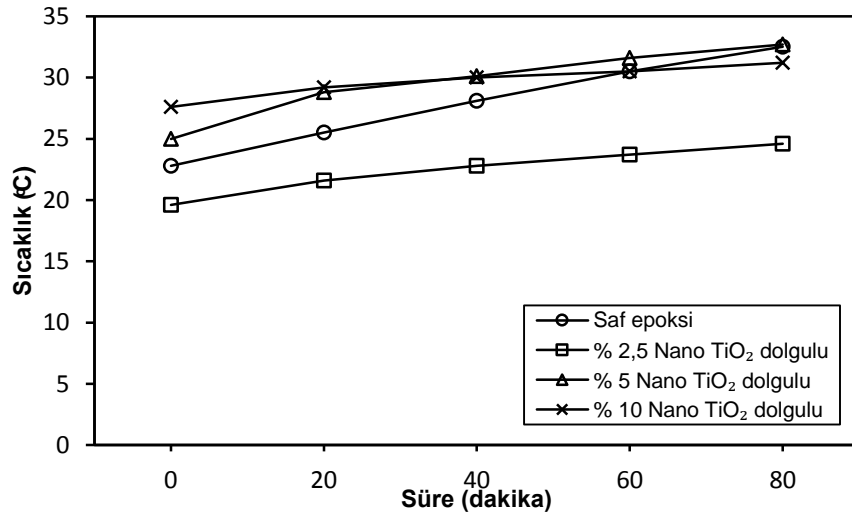
Şekil 2.67. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.68'de nano TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının $0,8\text{m/s}$ kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. %2,5 ve %5 nano TiO_2 dolgulu kompozitlerin 5N yük altındaki özgül aşınma oranları sırasıyla $2,16 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ve $2,3 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak saf epoksinin altındadır. Dolgu oranının artmasıyla epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarını yükselmektedir. %10 Nano TiO_2 dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları saf epoksinin üzerinde olmaktadır. %10 Nano TiO_2 dolgulu kompozitlerin 5N ve 15N yük altındaki özgül aşınma oranları sırasıyla $3 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ve $1,84 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olmaktadır

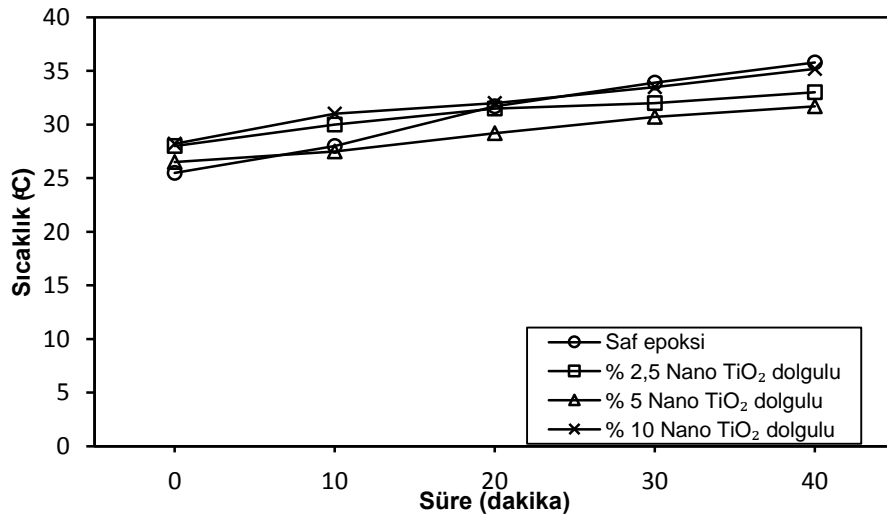


Şekil 2.68. Nano TiO_2 dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının $0,8\text{m/s}$ kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.69 ve 2.70'te nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 ve 0,8m/s kayma hızlarında ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri görülmektedir. Grafiklerden 0,4 ve 0,8 m/s kayma hızlarındaki en yüksek sıcaklık değişimleri sırasıyla 9,7⁰ve 10,3⁰ olmaktadır. Bu sıcaklık değişimleri 90⁰ olan epoksinin camsı geçiş sıcaklığının %10,77 ve %11,4 değerlerindedir. Sıcaklık değişimleri malzemelerin yapılarının değişime uğraması için yeterli seviyede değildir.

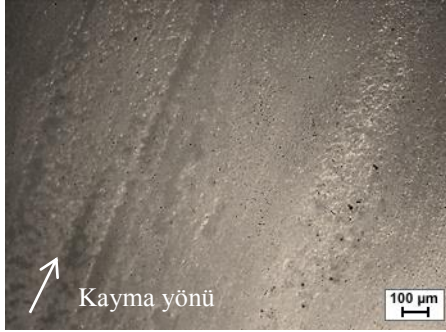


Şekil 2.69. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri



Şekil 2.70. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15n yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri

Şekil 2.71'de nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. %2,5 nano TiO₂ eklenmesiyle saf epoksinin yüzeyindeki çizgilerin derinlikleri azalmakta ve kopan parçacıklar yüzeyi örterek dalgalanmayı önlemektedir. Dolgu oranının artmasıyla kopan parçacıklar yüzeyde deformasyona neden olmaktadır.



a) Saf epoksi pim yüzeyi



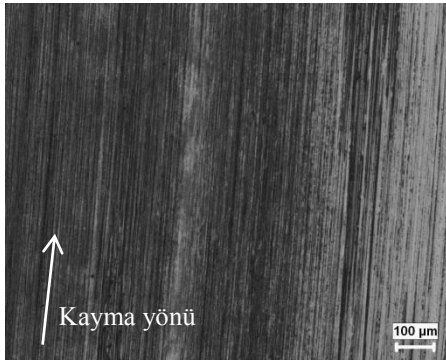
b) %2,5 Nano TiO₂ dolgulu pim yüzeyi



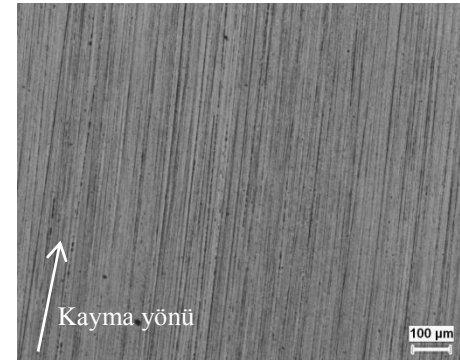
c) % 5 Nano TiO₂ dolgulu pim yüzeyi



d) % 10 Nano TiO₂ dolgulu pim yüzeyi



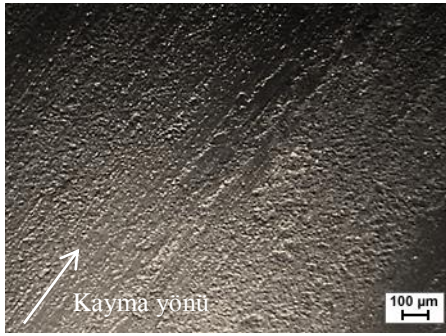
e) Saf epoksi disk yüzeyi



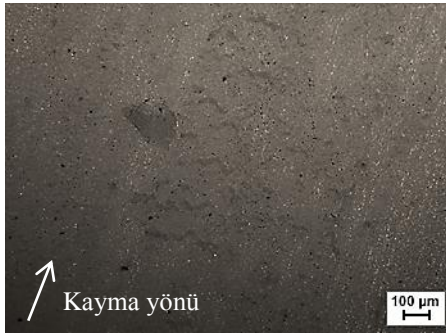
f) % 10 Nano TiO₂ dolgulu disk yüzeyi

Şekil 2.71. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

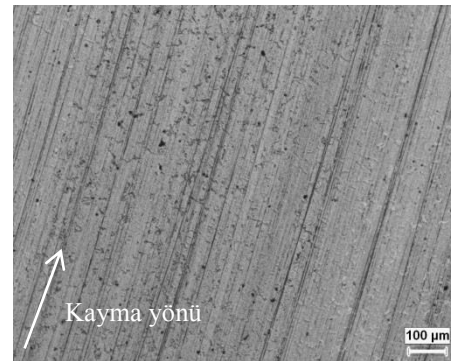
Şekil 2.72'de nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Kayma hızının artması ile saf epoksi yüzeyinde abrazif çizikler oluşmaktadır. Nano TiO₂ eklenmesiyle çizgilerin derinlikleri azalmakta ve kopan parçacıklar yüzeyi örterek dalgalanmayı önlemektedir. %10 nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitte artan dolgu oranı ve hız ve yükün etkisiyle aşınma izleri geniş bir yapıda olmaktadır.



a) Saf epoksi

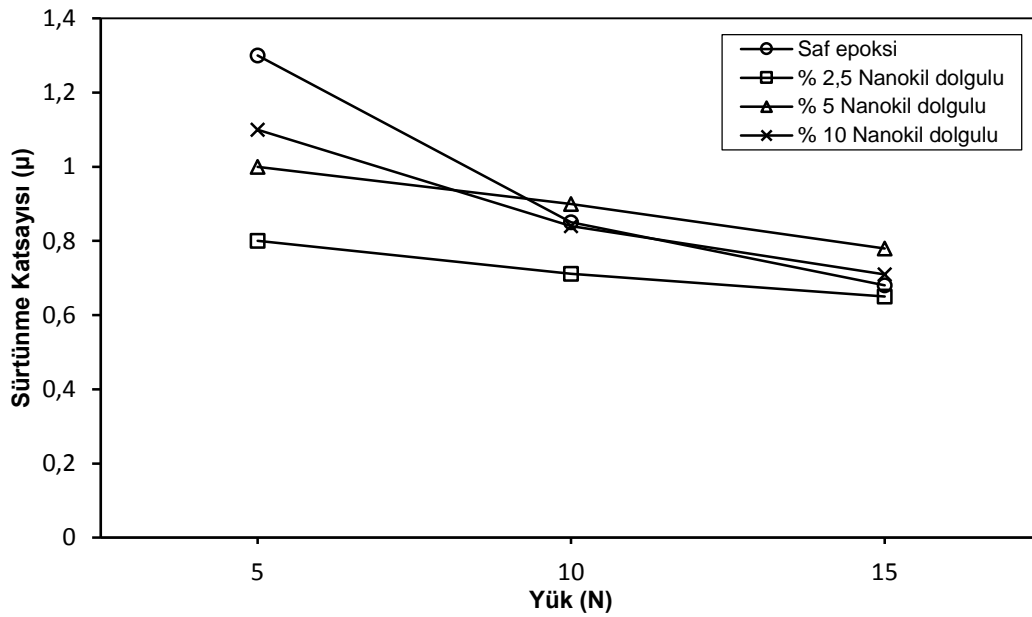
b) % 2,5 Nano TiO₂ dolguluc) % 5 Nano TiO₂ dolgulud) % 10 Nano TiO₂ dolgulu

e) Saf epoksi disk yüzeyi

f) % 10 Nano TiO₂ dolgulu disk yüzeyi

Şekil 2.72. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

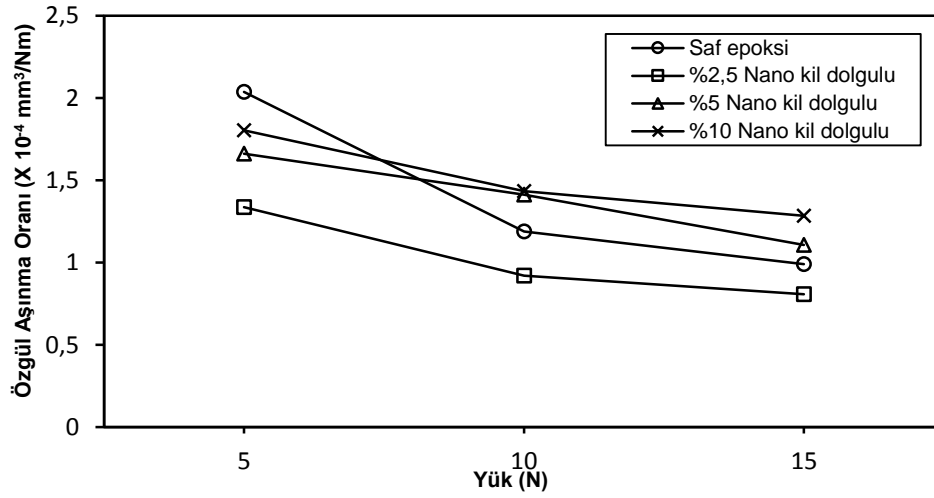
Şekil 2.73'de nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Yükün artmasıyla sürtünme katsayıları azalmaktadır. En düşük sürtünme katsayıları %2,5 nano kil dolgulu kompozitlerde olmaktadır. Yükün artmasıyla birlikte en yüksek sürtünme katsayıları %5 nano kil dolgulu kompozitlerde olmaktadır. 5N yük altında %2,5 nano kil dolgulu kompozitin sürtünme katsayısı %38 azalarak 1,3'den 0,8'e düşmektedir. 15N altında ise sürtünme katsayısı 0,68'den 0,65'e düşmektedir. Bununla birlikte 15N yük altında %5 nano kil dolgulu kompozitin sürtünme katsayısı 0,78 olmaktadır.



Şekil 2.73. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

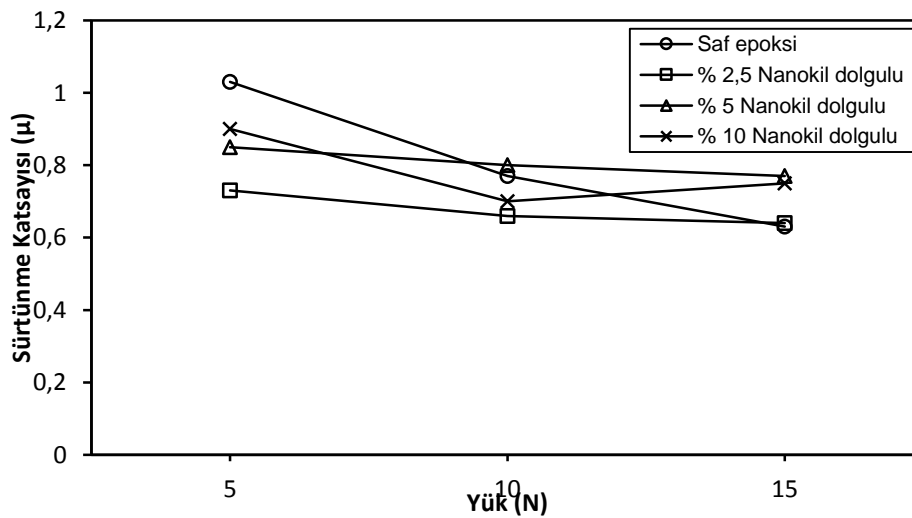
Şekil 2.74'te nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. En düşük özgül aşınma oranları %2,5 nano kil dolgulu kompozitlerde olmaktadır. Dolgu oranının artmasıyla özgül aşınma oranları artmaktadır. 5N' luk yükte saf epoksinin özgül aşınma oranı $2,04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerindeyken %2,5 nano kil dolgulu kompozitteki özgül aşınma oranı %34 oranında düşerek $1,34 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. Bununla birlikte 15N yük altında saf epoksinin özgül aşınma oranı $9,9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerindeyken %2,5 nano kil dolgulu kompozitteki özgül aşınma oranı saf epoksinin değerini %18 oranında azaltarak $8,08 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. %5 ve

%10 nano kil dolgulu kompozitlerde artan yük ile birlikte özgül aşınma oranı saf epoksinin değerini geçmektedir.



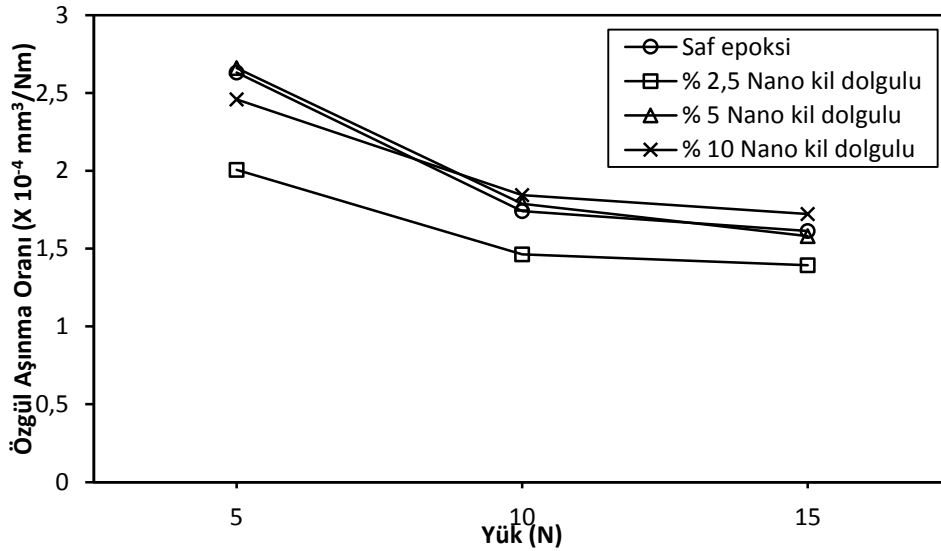
Şekil 2.74. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,4m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.75'te nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. En düşük sürtünme katsayısı %2,5 nano kil dolgulu kompozitlerde en yüksek sürtünme katsayıları ise 5N yük altında saf epokside, yükün 5N'dan sonra artmasıyla %5 nano kil dolgulu kompozitlerde olmaktadır. 5N yük altında % 2,5 nano kil dolgulu kompozitin sürtünme katsayısı %29 azalarak 1,03'den 0,73'e düşmektedir. 15N altında ise en yüksek sürtünme katsayısı %5 nano kil dolgulu kompozitte 0,63'ten 0,77 değerine yükselmektedir.



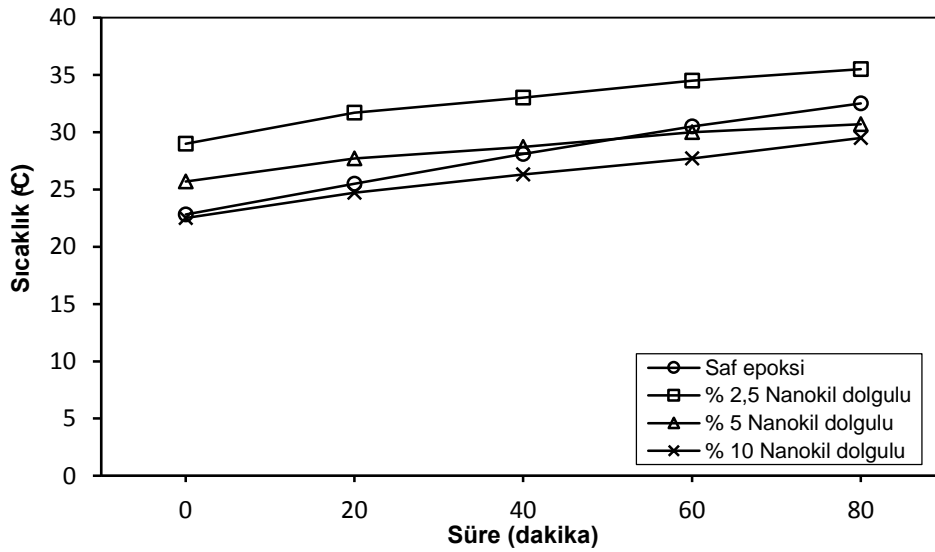
Şekil 2.75. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.76'da nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8 m/s kayma hızında yüke göre değişimi görülmektedir. Saf epoksi ve nano kil dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları kayma hızının artmasıyla yükselmektedir. En düşük özgül aşınma oranları %2,5 nano kil dolgulu kompozitlerde olmaktadır. Yükün ve dolgu oranının artmasıyla en yüksek özgül aşınma oranları 10N ve 15N yükler altında %10 nano kil dolgulu kompozitlerde olmaktadır. %2,5 ve %10 nano kil dolgulu kompozitlerde 5N yük altındaki özgül aşınma oranları sırasıyla $2,16 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ve $2,46 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olarak saf epoksinin altındadır. Bununla birlikte 15N yük altında %10 nano kil dolgulu kompozitin özgül aşınma oranı $1,72 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır.

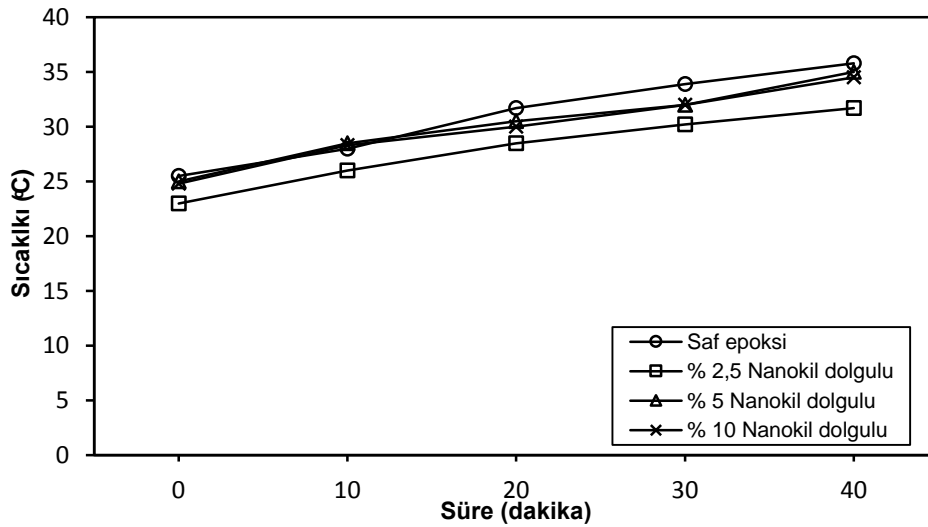


Şekil 2.76. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının 0,8m/s kayma hızında yüke göre değişimi

Şekil 2.77 ve 2.78'de nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 ve 0,8m/s kayma hızlarında ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri görülmektedir. Grafiklerden 0,4 ve 0,8 m/s kayma hızlarındaki en yüksek sıcaklık değişimleri sırasıyla 9,7⁰ve 10,3⁰ olmaktadır. Bu sıcaklık değişimleri 90⁰ olan epoksinin camsı geçiş sıcaklığının %10,77 ve %11,4 değerlerindedir. Sıcaklık değişimleri malzemelerin yapılarının değişime uğraması için yeterli seviyede değildir.

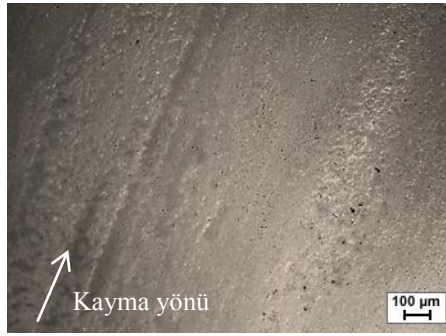


Şekil 2.77. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri

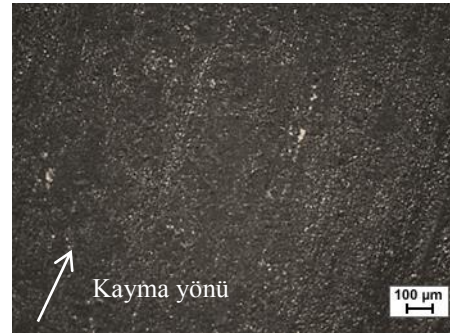


Şekil 2.78. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarında aşınma deneyi boyunca yüzey sıcaklık değişimleri

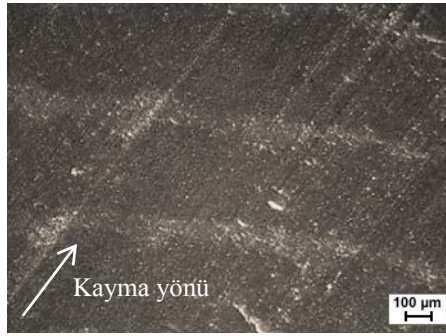
Şekil 2.79'da nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Saf epoksinin yüzeyindeki kayma izleri belirgin bir şekilde görülmektedir. %2,5 nano kil eklenmesi ile yüzeydeki izler kaybolmaktadır. %5 nanokil eklenmesiyle kompozitin yüzeyinde geniş bir aralıkta dalgalanmalar olmaktadır. %10 nano kil dolgulu polimer kompozitin yüzeyinde bu dalgalanmalar daha belirgin bir şekilde görülmektedir.



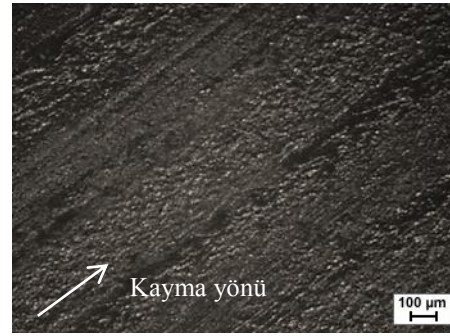
a) Saf epoksi pim yüzeyi



b) %2,5 Nano kil dolgulu pim yüzeyi



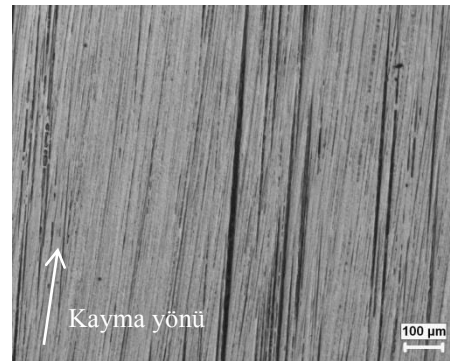
c) %5 Nano kil dolgulu pim yüzeyi



d) %10 Nano kil dolgulu pim yüzeyi



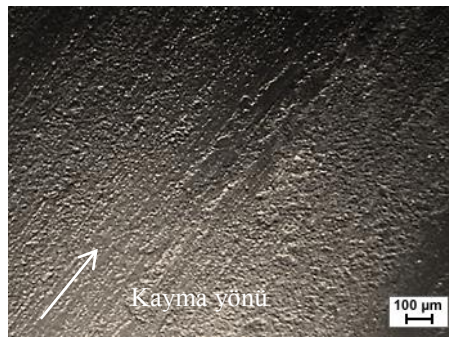
e) Saf epoksi disk yüzeyi



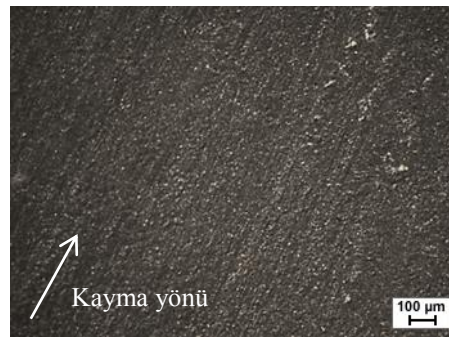
f) %10 Nano kil dolgulu disk yüzeyi

Şekil 2.79. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

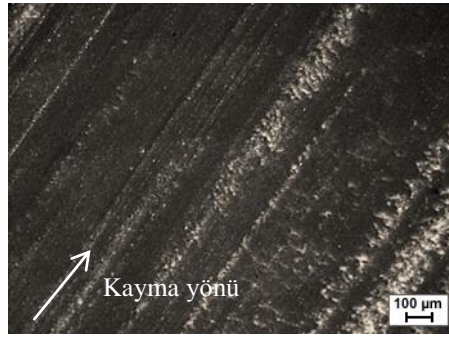
Şekil 2.80'de nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Şekil 2.80 b-d'de kayma hızının artması ile yüzeylerdeki çizikler derinleşmektedir. %5 nanokil dolgulu epoksi kompozitin yüzeyi sık ve kalın çizgili bir yapıya sahiptir. %10 nanokil dolgulu epoksi kompozitin yüzeyinde aşınma izleri kayma yönüne paralel ve geniş bir yapıda olmaktadır. 2.80 f'de disk yüzeyinde görüldüğü üzere kopan parçacıkların yüzeye yapışması sonucu iz aralıkları kapanmakta ve geniş yapıda olmaktadır.



a) Saf epoksi pim yüzeyi



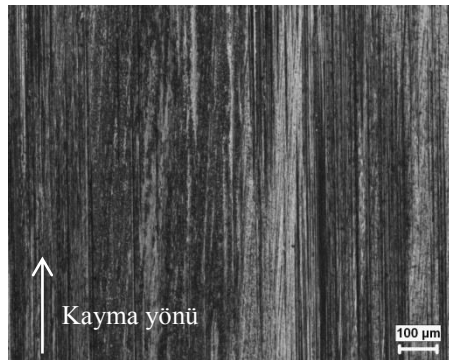
b) %2,5 Nanokil dolgulu pim yüzeyi



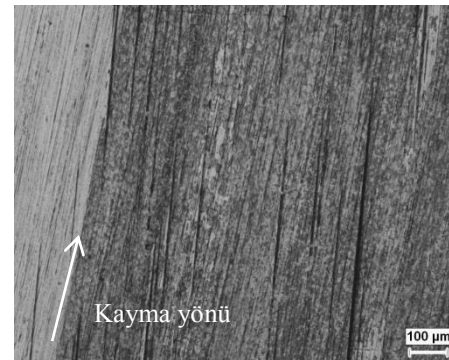
c) %5 Nanokil dolgulu pim yüzeyi



d) %10 Nanokil dolgulu pim yüzeyi



e) Saf epoksi disk yüzeyi



f) %10 Nano kil dolgulu disk yüzeyi

Şekil 2.80. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s ve 15N yük şartlarında pim ve disk aşınma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri

BÖLÜM 3. MODELLEME VE ANALİZ

Bu bölümde pim disk aşınma sistemi sonlu elemanlar kodları ile çalışan Ansys yazılımı kullanılarak iki boyutlu olarak modellenmiştir. Modelleme Archard aşınma teorisine göre yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme işleminde tüm aşınma süreci lineer kabul edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan yük ve hız şartları sonlu elemanlar analizine ekleyerek aşınma değerleri ve pim üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. Kaymalı temas esnasında pim ve disk arasında oluşan sıcaklık değişimleri ve sürtünme nedeniyle oluşan ısı sonlu elemanlar hesaplamasında ihmal edilmiştir. Son olarak analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve sonuçların birbirleriyle büyük oranda uyumlu olduğu görülmüştür.

3.1. Aşınma Teorileri

Literatür incelemelerinde kaymalı aşınma modelleri olarak çeşitli aşınma teorilerinin kullanıldığı görülmüştür. Archard aşınma teorisine göre [48] hacimsel aşınma miktarı ile aşınma katsayısı, yük, kayma mesafesi ve sertlik arasında lineer bir bağıntı kurmuştur. Hacimsel aşınma miktarı denklem 3.1 ile verilmiştir.

$$W = k \frac{F.S}{H} \quad (3.1)$$

Denklemdaki W hacimsel aşınma miktarını (m^3), F normal yükü (N), S kayma mesafesini (m), H yumuşak malzemenin sertlik değerini (Pa) ve k boyutsuz aşınma katsayısını göstermektedir. Boyutsuz aşınma katsayısının sertliğe oranı ile boyutlu aşınma katsayısı yani özgül aşınma oranı elde edilmektedir ve Archard aşınma teorisi

$$W = k_b . F . S \quad (3.2)$$

şeklinde olmaktadır. k_b boyutlu aşınma katsayısını göstermektedir (Pa^{-1}). Archard aşınma teorisi sonlu elemanlar çalışmalarında oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır [82-84, 86-88, 90, 91, 99, 100, 104]. Archard aşınma teorisi genel olarak adezif aşınmaya yönelik olmasına rağmen incelenen literatür çalışmalarında seramik kaplama yapılan bir sistemin delaminasyon aşınmasında [99], dövme işlemi sırasında kalıp ve iş parçasında oluşan aşınmanın modellenmesi [104] gibi çalışmalarda da kullanılmıştır.

Sarkar [111], Archard' in aşınma modelini geliştirmiştir. Bu modeli sürtünme katsayısı ile ilişkilendirerek denklem 3.3'teki formülasyonu elde etmiştir.

$$W = k \cdot F \cdot V_s \sqrt{1 + 3\mu^2} \quad (3.3)$$

Burada V_s kayma hızı (m/s) ve μ sürtünme katsayısı olmaktadır.

Lineer aşınma modellerinin yanında ampirik modellerde geliştirilmiştir. Rhee [112] polimer kompozit malzemelerin metal yüzeylere karşı kayma durumu için bir teori geliştirmiştir. Bu teoriye göre aşınma mekanizmalarındaki kayma durumunu yük, hız ve zamana bağlı olarak açıklamıştır. Rhee'nin sabit sıcaklıktaki deneysel aşınma formülüne göre aşınma kaybı

$$W = K \cdot F^a \cdot V^b \cdot t^c \quad (3.4)$$

şeklinde olmaktadır. Denklemdaki t kayma süresini (s) göstermektedir. a , b ve c katsayıları sırasıyla yükün aşınma kaybına bağlı grafiğinden, hızın aşınma kaybına bağlı grafiğinden ve kayma süresinin aşınma kaybına bağlı grafiğinden logaritmik olarak elde edilir ve daha sonra aşınma katsayısı elde edilir.

$$\log W = \log K + a \log F + b \log V + c \log t \quad (3.5)$$

Abu Bakar ve diğerleri [88] Rhee'nin aşınma formülü bir fren diskine uygulamışlardır.

Bir diğ er ampirik model de Barwell' in [113] geliştirdiğ i teoridir. Barwell' in aşınma teorisine göre hacimsel aşınma miktarını  farklı durum için geliştirmiştir. Denklem 3.6'da orta derecede yağlı yüzeyler için bir model geliştirmiştir.

$$W = \frac{\beta}{\alpha} (1 - (\exp^{-\alpha t})) \quad (3.6)$$

Denklem 3.7'de aşınma oranının sabit olduğu bir model geliştirmiştir.

$$W = \alpha t \quad (3.7)$$

Denklem 3.8de geliştirdiğ i modelde aşınma miktarı zamana bağlı olarak çok hızlı bir Şekilde olmaktadır.

$$W = \beta \exp^{\alpha t} \quad (3.8)$$

Bu denklemlerdeki β sabit değer, α yüzey zelliğ i olmaktadır.

Pavelescu ve Musat [114] kompozit fren malzemelerinin aşınma yoğunluğ unu denklem 3.9' daki gibi tanımlamışlardır.

$$\frac{h}{S} = I_u = k \cdot F^a \cdot v^b \quad (3.9)$$

Denklemdeki I_u aşınma yoğunluğu (cm/cm), h aşınan malzemenin yksekliliğ i (cm) k , a ve b malzemeden malzemeye farklılık gösteren sabit katsayılar olmaktadır.

Ho ve Peterson [115] elik üzerinde kayan bakır esaslı fren malzemesinin aşınma davranışını alışmaşlardır. Aşınma miktarını yüzey sıcaklığ ı ve erime sıcaklığ ıyla ilişkilendirmişlerdir.

$$T = \beta \cdot F^a \cdot t^b \quad (3.10)$$

Denklemdede T yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), β , a ve b sürtünme kuvvetinden kaynaklanan katsayılar olmaktadır. Hacimsel aşınma miktarı denklem 3.11'deki gibi olmaktadır.

$$W = k \frac{T}{T^* - T} \quad (3.11)$$

Denklemdede T^* ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) olmaktadır.

İncelenen aşınma teorilerinde araştırmacıların geliştirdikleri modeller buldukları deneysel ortam ve şartlar içerisinde şekillenmektedir. Bu çalışmada kullanılacak model için Archard aşınma modeli seçilmiştir. Bu modelin seçim nedenleri aşağıda sıralanmıştır:

- i. Aşınma denkleminin basit ve temel bir yapıya sahip olması ve kaymalı temas uygulamalarında geniş bir alanda kullanılabilir olması,
- ii. Sonlu elemanlar programında temas yüzeyleri için sürtünme katsayısının programa parametre olarak eklenebilmesi ve Archard aşınma formülünde sürtünme ile ilgili ek bir parametreye gerek olmaması,
- iii. Deneysel çalışma sonuçlarında yüzey sıcaklıklarının çok az yükselmesi ve bu durumun malzeme davranışlarına etkisinin olmadığı kabul edilerek Archard aşınma modelinin sıcaklık içermeyen bir teori olması şeklinde sıralanmaktadır.

3.2. Aşınma Algoritması

Archard aşınma teorisine göre [116] aşınma miktarı hacimsel olarak denklem 3.12 ile verilmektedir.

$$W = k.F.S \quad (3.12)$$

Burada k , özgül aşınma oranını (m^2/N) F , normal kuvveti (N) S , kayma mesafesini (m) göstermektedir. Denklemin her iki tarafı temas alanına bölünerek denklem 3.13 ile aşınma derinliği elde edilir.

$$h = k.P.S \quad (3.13)$$

h aşınma derinliğini (m), P temas basıncını (N/mm^2), S (m) kayma mesafesini göstermektedir.

Podra ve Andersson [83], aşınma debisinin kuvvet, sıcaklık, hız, malzeme ve yüzey özellikleri ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir ve bu ilişkiyi denklem 3.14'de tanımlamışlardır.

$$\frac{dh}{ds} = f(\text{kuvvet, sıcaklık, kayma hızı, malzeme özellikleri, yüzey ...}) \quad (3.14)$$

Burada h , aşınma derinliğini ve s kayma mesafesini vermektedir. Denklem 3.15' de aşınma derinliğinin kayma mesafesine oranı ile aşınma debisi elde edilmektedir.

$$\frac{dh}{ds} = k.P \quad (3.15)$$

Matematiksel iterasyon yöntemi olan Euler integrasyon metoduna göre kurulan aşınma algoritmasında aşınma derinliği denklem 3.16 ifadesi ile verilmiştir [84].

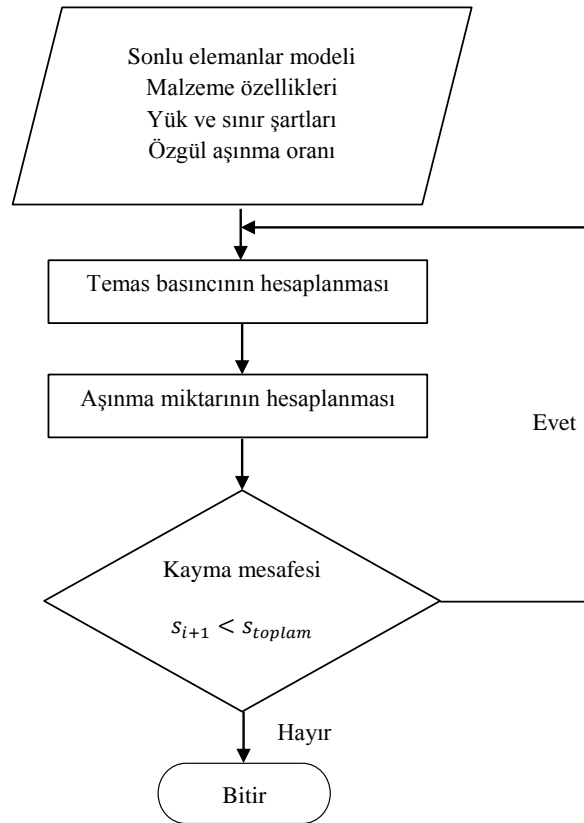
$$h_{i+1} = h_i + \Delta h_i \quad (3.16)$$

Denklemdaki h_{i+1} ifadesi $i + 1$ adımındaki toplam aşınma derinliğini, h_i ifadesi $i + 1$ aşınma adımına kadar olan toplam aşınma derinliğini ve Δh_i ifadesi geçerli aşınma adımındaki aşınma miktarını vermektedir. Temas basıncı her bir çevrim sonucunda düğüm noktaları üzerine aktarılır ve geçerli adımdaki kayma mesafesinin aşınma derinliği hesaplanır. Denklem 3.16' ya göre her bir hesaplama çevriminden sonra düğüm noktalarının koordinat pozisyonları değişmektedir. Model, hesaplama çevriminin sonuna kadar yani toplam kayma mesafesine ulaşana kadar düğüm noktalarının yer değiştirmesi ile geometrisini günceller. Toplam kayma mesafesi alt adımlara bölünerek her bir çevrim sonucunda aşınma miktarları hesaplanmaktadır. Bu seçilen adım miktarı çok büyük olduğunda temas yüzeyinde süreksizlikler

meydana gelmektedir. Adım miktarının çok küçük olduğunda ise hesaplama zamanı uzamaktadır. Bu çalışmada adım miktarları ile ilgili deneme çalışmaları yapılarak her bir kayma adımının 5m olmasına karar verilmiştir ve 2000 m'lik toplam kayma mesafesine ulaşmak için 400 çevrim gerçekleştirilmektedir. Her bir çevrimde kayma mesafesine bağlı olarak aşınma miktarı denklem 3.17'ye göre hesaplanmaktadır.

$$\Delta h_i = k \cdot P_i \cdot \Delta S_i \quad (3.17)$$

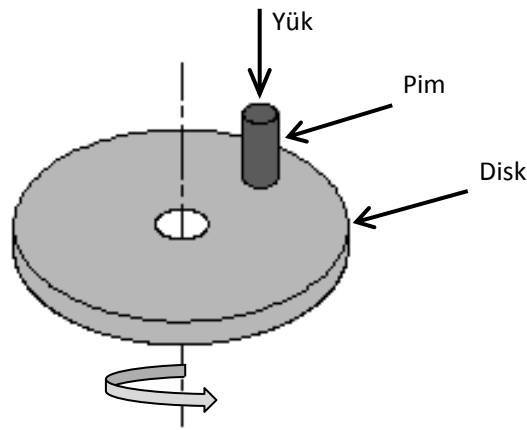
Şekil 3.1'de pim disk aşınma sisteminin sonlu elemanlar yöntemi akış şeması verilmektedir. Şemaya göre sonlu elemanlar modeli kurulan yapının temas basıncı statik olarak hesaplanmakta ve temas basınçları aşınma derinliği denkleminde yazılarak geçerli kayma mesafesindeki aşınma derinlikleri elde edilmektedir. Yapının güncellenmesi düğüm noktalarının yer değiştirmesi ile olmaktadır. Bu güncelleme işlemi toplam kayma mesafesine ulaşıldığında sonlanmaktadır.



Şekil 3.1. Pim disk aşınma sisteminin sonlu elemanlar yöntemi akış şeması

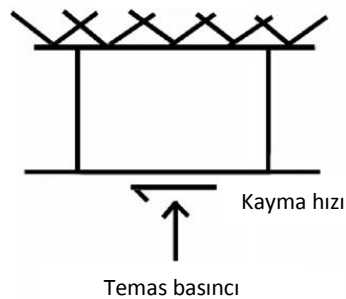
3.3. Pim Disk Sonlu Elemanlar Modeli

Şekil 3.2' de pim disk aşınma sisteminin şematik gösterimi verilmiştir. Pim disk aşınma sistemi bir motora bağlı mil üzerine monte edilen bir disk ve bu diskin üzerine konumlandırılmış deney numunesinden oluşmaktadır. Diskin dönmesi ile birlikte deney numunesine düşey yönde yük uygulanmaktadır.



Şekil 3.2. Pim disk aşınma sisteminin şematik gösterimi

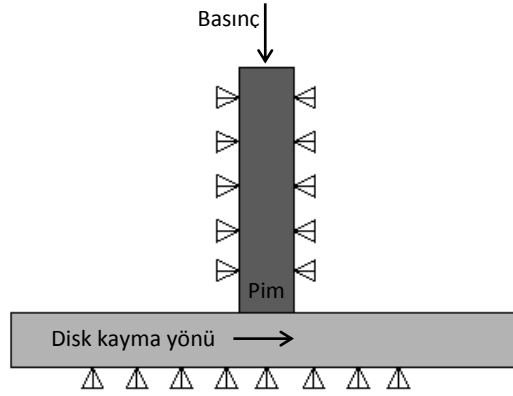
Pim disk aşınma sisteminin yük ve sınır şartlarının belirlenmesi için Prasad ve diğerlerinin [117] rijit tabanlı basınç altında kayan bir yüzey ile temas halindeki elastik bir bloğun iki boyutlu temas durumunu içeren çalışması incelenmiştir. Şekil 3.3'te geliştirdikleri model ve sınır şartları görülmektedir.



Şekil 3.3. Rijit tabanlı basınç altında kayan yüzeyin temas durumu [82, 117]

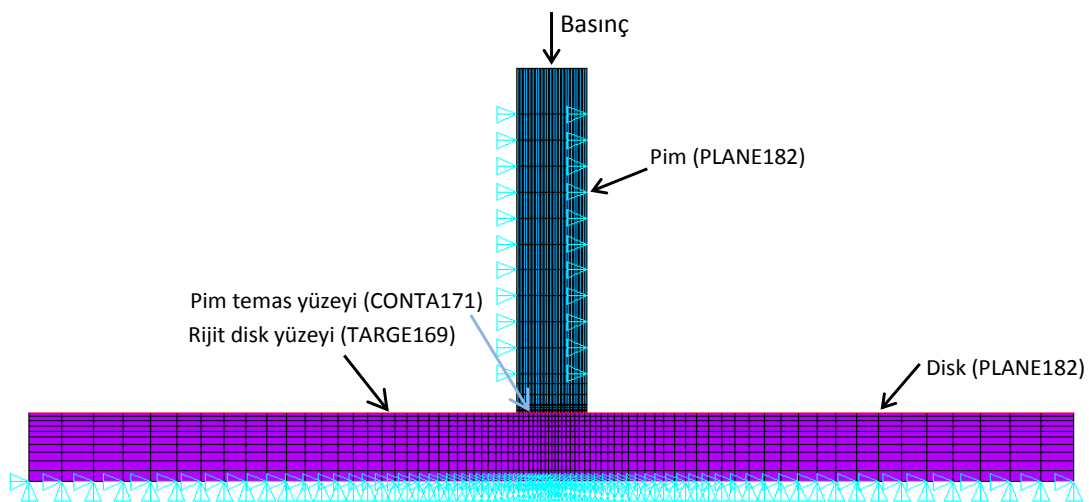
Şekil 3.4'te pim disk aşınma sisteminin yük ve sınır şartları verilmektedir. Pimin üst yüzeyinden 5, 10 ve 15N yüklere karşılık gelen 0.177, 0.34 ve 0.53 MPa temas basınç değerleri uygulanmaktadır. Pimin yatay eksenindeki hareketi engellenmiştir.

Disk alt yüzeyinden düşey yönde sabitlenmiştir ve yatay yönde deplasman verilmiştir. Pim 36 mm yüksekliğinde ve 6 mm çapındadır. Disk 6 mm kalınlığında ve 90 mm çapındadır.



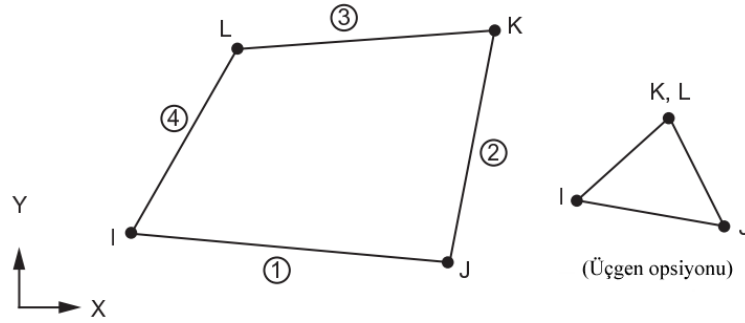
Şekil 3.4. Pim disk aşınma sisteminin yük ve sınır şartları

Şekil 3.5' de pim disk aşınma sisteminin yük ve sınır şartları verilmiş sonlu elemanlar ağ modeli görülmektedir. Pim ve disk temas bölgelerinde hesaplama hassasiyeti bakımından daha yoğun ağ örme işlemi uygulanmıştır. Pim disk sistemi 2 boyutlu düzlem gerinim olarak modellenmiştir. Bu durumda x ve y yönünde gerilmeler oluşmaktadır ve z yönünde birim şekil değişiminin olmadığı varsayılır. Genellikle yapısal elemanların kesit modelinde kullanılır [118].



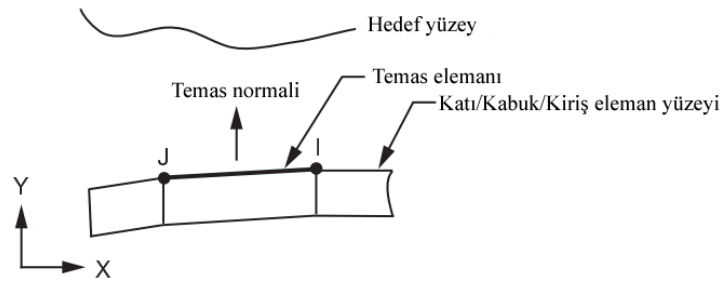
Şekil 3.5. Pim disk aşınma sisteminin sonlu elemanlar ağ modeli

Pim ve disk için eleman tipi olarak PLANE182 seçilmiştir. PLANE182, 2 boyutlu bir elemandır. Bu eleman tipi Düzlem gerilme, düzlem gerinim ve aksenal simetrik olarak kullanılabilir. Dört düğüm noktasına sahiptir ve her bir düğüm noktasının serbestlik derecesi ikidir. Düğüm noktaları x ve y doğrultularında öteleme hareketi yapabilir [118]. Şekil 3.6' da PLANE182 elemanının geometrisi görülmektedir.



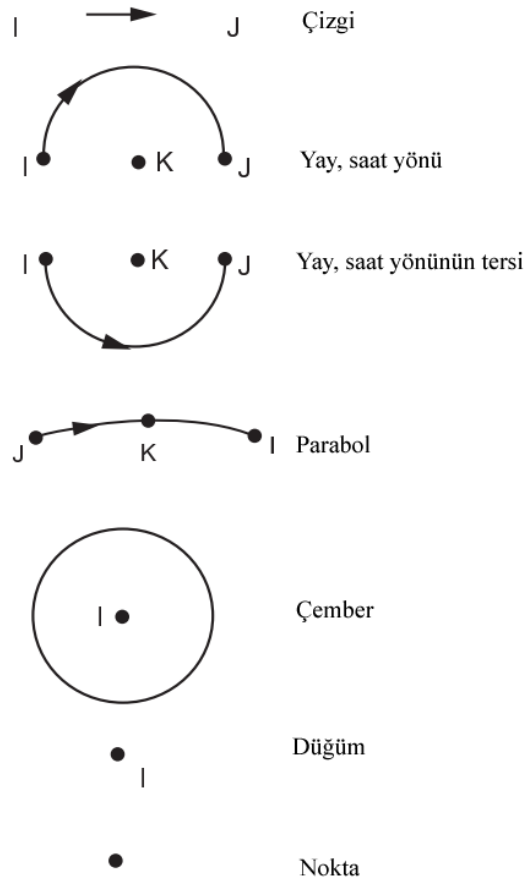
Şekil 3.6. PLANE182 elemanının geometrisi[118]

Pimin temas yüzeyi için CONTA171 elemanı seçilmiştir. CONTA171, 2 boyutlu iki düğüm noktalı yüzeyden yüzeye temas elemanı olarak kullanılır [118]. Şekil 3.7' de CONTA171 elemanının geometrisi görülmektedir.



Şekil 3.7. CONTA171 elemanının geometrisi[118]

Disk için üst yüzeyi için rijit eleman olarak TARGE 169 eleman tipi seçilmiştir. TARGE169 hedef yüzey elemanı CONTA171 ve CONTA172 iki boyutlu temas elemanlarıyla uyumlu olarak kullanılır [118]. Şekil 3.8'de TARGE169 eleman geometrileri görülmektedir.



Şekil 3.8. TARGE169 eleman geometrileri[118]

Tablo 3.1'de eleman ve düğüm sayıları verilmiştir.

Tablo 3.1. Eleman ve düğüm sayıları

Bileşen adı	Eleman tipi	Eleman sayısı	Düğüm sayısı
Pim	PLANE182	760	3040
Disk	PLANE182	800	3200
Temas elemanı	CONTA171	40	80
Hedef yüzey elemanı	TARGE169	80	160

Temas yüzeyleri için deneme çalışmaları yapılarak en uygun çözümün alındığı Augmented Lagrange temas algoritmasının seçilmesine karar verilmiştir. Bu algoritmanın rijitlik katsayısı (FKN) ve penetrasyon toleransı (FTOLN) olmak üzere iki temel parametresi vardır. FKN, temas rijitlik parametresidir. Yüksek rijitlik değeri yüzeylerdeki penetrasyonu azaltmasına rağmen global rijitlik matrisinin yapısını bozarak yakınsama problemleri oluşturabilir. Rijitliğin küçük olması ise hatalı sonuçlar üretebilir. Ansys yazılım rehberinde bu değer 0,01-1 aralığında olması

önerilmektedir [118]. Bu çalışmada FKN değeri 0,01 alınmıştır. FTOLN, yüzey normali doğrultusunda izin verilebilir toleransı hesaplamak için kullanılan parametredir. Bu çalışmada FTOLN değeri Benabdallah ve Olender'in yaptığı çalışmadaki [82] 0,0052 değeri alınmıştır. Sürtünme katsayıları olarak bölüm 2'de deneysel çalışmada verilen değerler girilmiştir.

Pim malzeme özelliklerini tanımlamak için bölüm 2'de mekanik deneyler sonucunda elde edilen gerçek gerilme zorlanma eğrilerinden elde edilen değerler girilmiştir. Pim malzemesinin davranışı elasto plastik olarak modellenmiştir. Bu çalışmada pim malzemesinin plastik davranışı için izotropik pekleşme modeli seçilmiştir. İzotropik model malzemenin tüm özelliklerinin her yönde aynı olduğu durumdur. Elimizde gerçek çekme zorlanma eğrisi olmasından dolayı Ansys'de çoklu noktaların girilmesine olanak sağlayan multilinear isotropic hardening modeli seçilmiştir. Disk malzeme modeli olarak lineer izotropik seçilmiştir. Tablo3.2'de DIN 1.2344 çeliğin özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2. DIN 1.2344 çeliğin özellikleri [119]

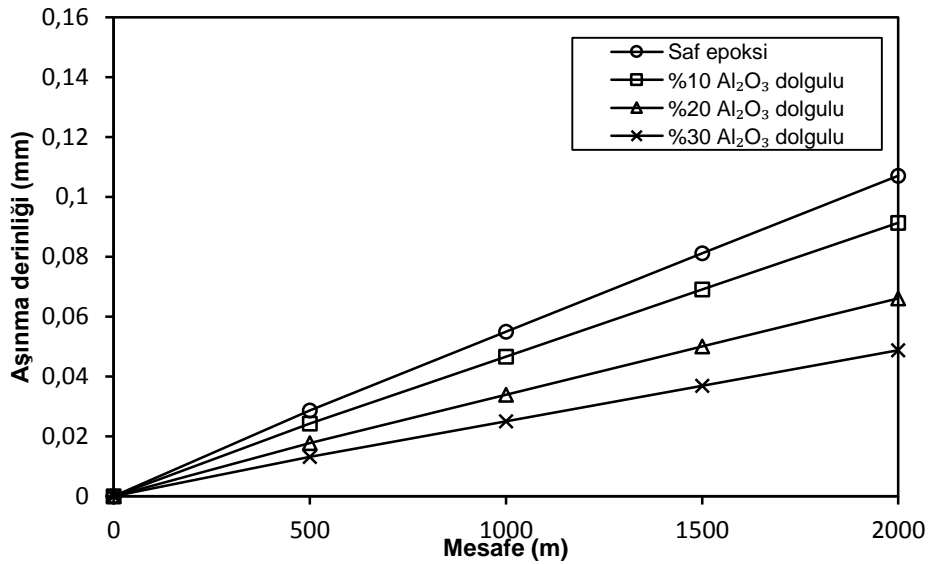
Yoğunluk (kg/m ³)	7800
Elastiklik modülü (GPa)	210
Poisson oranı	0,3
Akma gerilmesi (MPa)	1410

3.4. Analiz Sonuçları

Sonlu eleman analizleri bölüm 2' de verilen saf epoksi ve bütün epoksi kompozitlerin her biri için deneysel olarak çalışılan 5N, 10N ve 15N yük ile 0,4 m/s ve 0,8 m/s hız şartlarında iki boyutlu yarı statik olarak gerçekleştirilmiştir. Kayma mesafesi 2000 m'dir. Analiz sonucunda aşınma derinlikleri ve pim üzerinde oluşan gerilmeler elde edilmiştir.

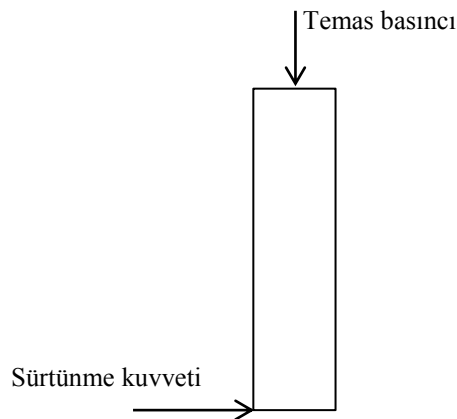
Şekil 3.9'da Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s kayma hızında ve 15N normal yük şartında aşınma derinliklerinin kayma mesafesine göre değişimi verilmiştir. Şekilde kayma mesafesi ve aşınma derinliği ilişkisinin lineer olduğu görülmektedir. Yapılan analiz çalışmasında her bir adım sonucu alınan sonuçlar .txt

uzantılı metin dosyasına yazdırılmaktadır. Böylece her bir kayma mesafesindeki aşınma miktarı elde edilmektedir. Şekilde en düşük aşınma derinliği %30 Al_2O_3 dolgulu kompozitte, en yüksek aşınma derinliği saf peoksidedir. Sonuçların bölüm 2' de verilen deneysel sonuçlarla uyumlu oldukları görülmektedir.



Şekil 3.9. Al_2O_3 dolgulu epoksi kompozitlerinin 0,4 m/s kayma hızında ve 15N yük şartında aşınma analizi sonuçları

Şekil 3.10'da pime etki eden kuvvetler görülmektedir. Bölüm 2'de verilen malzemelerin sürtünme katsayılarının etkisiyle pim numuneleri farklı sürtünme kuvvetlerine maruz kalmaktadırlar. Pime temas yüzeyinde etki eden teğetsel sürtünme kuvvetinin etkisiyle oluşan eğilme momenti pim üzerinde eğilme gerilmeleri meydana getirmektedir.



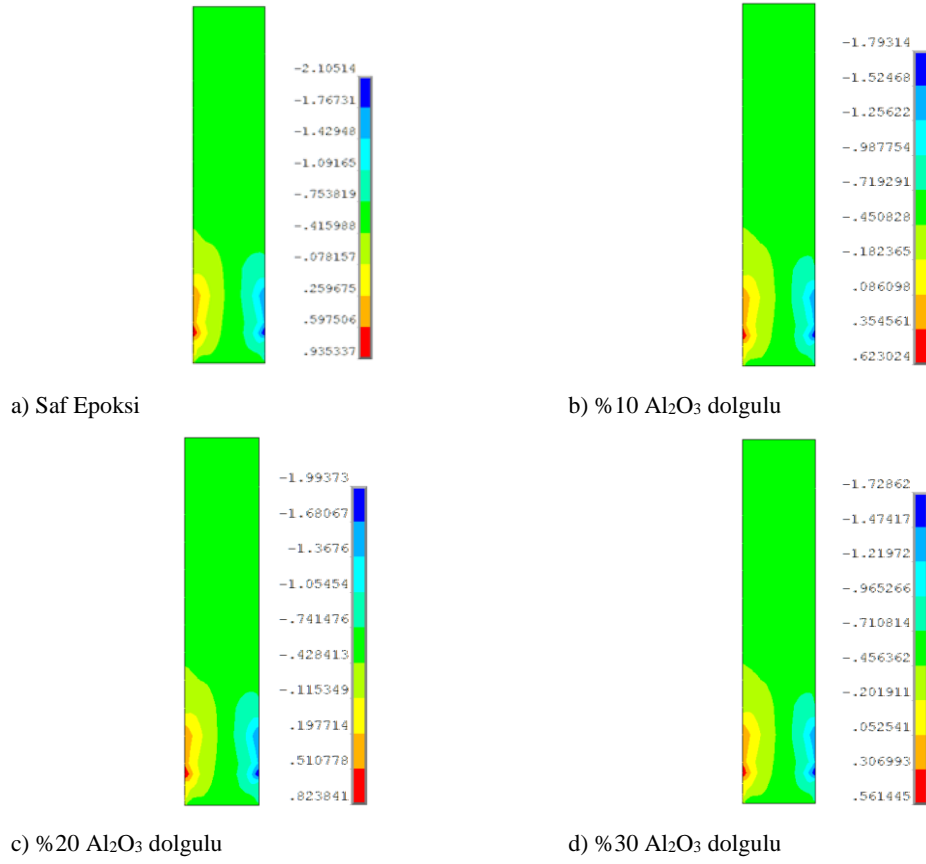
Şekil 3.10. Pime etki eden kuvvetler

Tablo 3.3'de saf epoksi ve Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 ve 0,8 m/s kayma hızlarındaki deneysel sürtünme katsayıları verilmiştir. Sürtünme katsayısındaki değişimler pim temas noktasında oluşacak teğetsel sürtünme kuvvetinden dolayı pim üzerindeki gerilmeleri etkilemektedir. Sürtünme katsayısının azalmasıyla teğetsel sürtünme kuvveti azalmakta ve pim üzerinde oluşacak eğilme gerilmesi de azalmaktadır.

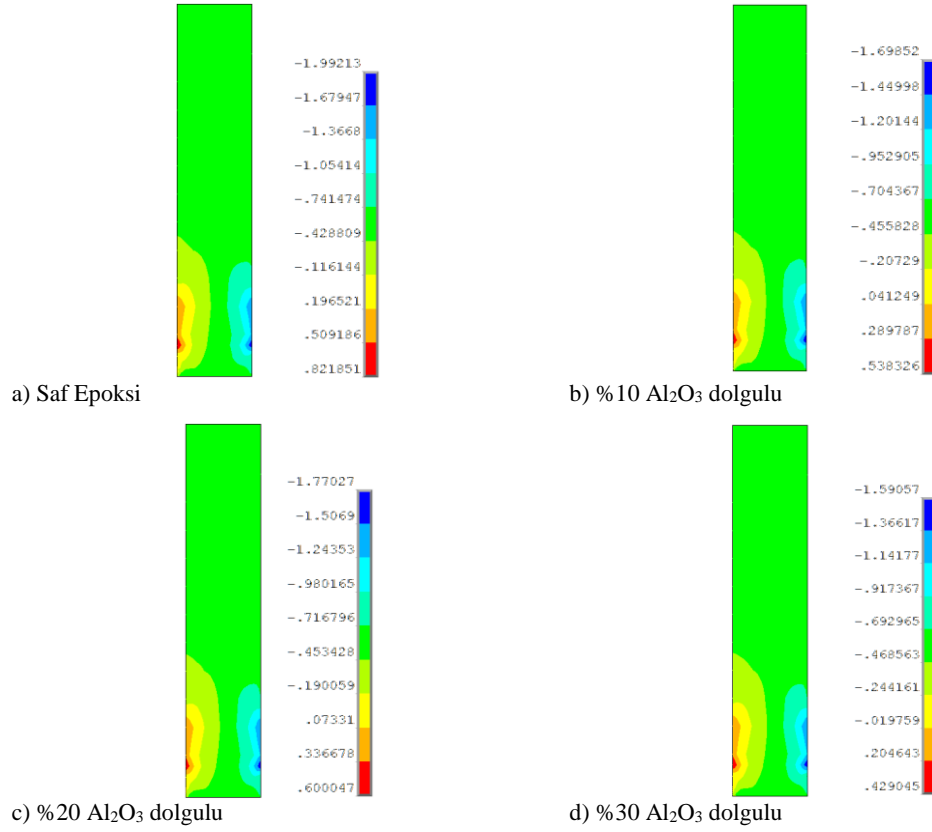
Tablo 3.3. Saf epoksi ve Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin sürtünme katsayıları

Numune	Sürtünme katsayısı (Kayma hızı 0,4m/s)	Sürtünme katsayısı (Kayma hızı 0,8m/s)
Saf epoksi	0,68	0,63
% 10 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,54	0,50
%20 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,63	0,53
%30 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,51	0,45

Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 0,8 m/s kayma hızlarında ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışları sonucunda oluşan normal gerilme dağılımları görülmektedir. Diskin sınır şartlarından dolayı pim üzerindeki gerilme dağılımlarının sağ ve sol köşelerde farklı olduğu görülmektedir. Şekil 3.12'de görüldüğü üzere diskin sağ yöne doğru hareketine bağlı olarak pimin sol köşede disk ile temas eden noktasında basma yönünde etki eden sürtünme kuvvetinden dolayı sol yüzey üzerinde çekme gerilmelerine maruz kalmakta ve pimin sağ yüzeyi basma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Diğer kompozitlerin gerilme dağılımları EK A.'da verilmiştir.



Şekil 3.11. Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları



Şekil 3.12. Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları

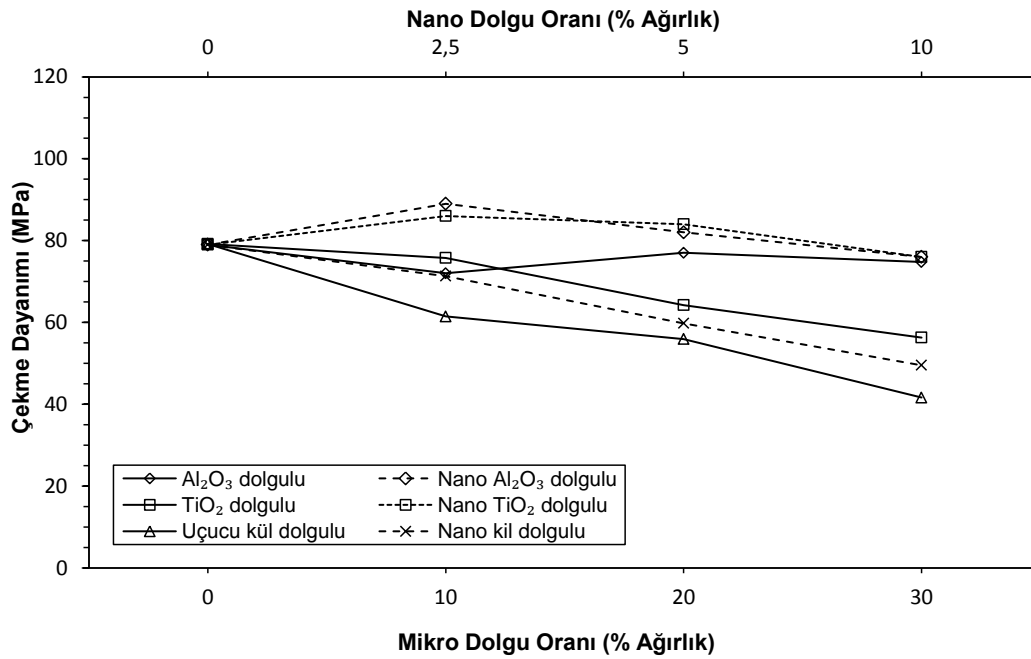
Tablo 3.3'te en yüksek sürtünme katsayısı saf epoksiye ait olmaktadır. Bu nedenle şekil 3.11 ve 3.12'de pim üzerindeki gerilmeler incelendiğinde en yüksek gerilme dağılımları saf epoksidede olmaktadır. Bölüm 2'deki deneysel çalışmalarda görüldüğü üzere saf epoksiye dolgu eklenmesiyle ve hızın artması ile sürtünme katsayıları düşmekte idi. Tablo 3.3'te en düşük sürtünme katsayısı %30 Al₂O₃ dolgulu kompozitte 0,8 m/s kayma hızında olmaktadır. Şekil 3.12 ve 3.13'deki tüm pimler dikkate alındığında Şekil 3.12'de %30 Al₂O₃ dolgulu kompozit numunesi en düşük gerilme dağılımına sahiptir.

BÖLÜM 4. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI VE İRDELENMESİ

Bu bölümde mikro ve nano dolgulu epoksi kompozitlerin mekanik ve tribolojik deneysel sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelemesi yapılmıştır. Ayrıca deneysel aşınma sonuçları ile modelleme sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.1. Mekanik Deneylerin Değerlendirilmesi

Şekil 4.1’de mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranına bağlı olarak çekme dayanımı eğrileri görülmektedir. Mikro dolguların kompozit içerisindeki oranları ağırlıkça %10-30 aralığında, nano dolguların kompozit içerisindeki oranları ağırlıkça %2,5-10 aralığında olmaktadır. Şekilde genel olarak mikro dolgulu kompozitlerin çekme dayanımları dolgu oranı artışı ile azalmaktadır. Al_2O_3 dolgulu kompozitlerin dolgu içeriğine göre çekme dayanımı hassasiyetleri düşük görülmektedir. TiO_2 ve uçucu kül dolgulu kompozitlerin çekme dayanımı benzer davranışı göstermektedir.



Şekil 4.1. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranına bağlı olarak çekme dayanımları

Bu sonuçlar literatürlerdeki [9-11, 13] sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Bu çalışmalarda kompozit içerisindeki artan dolgu ile birlikte dolgu ve matris arasında zayıf bağ kurulması ve dolguların kompozit içerisinde topaklaşmaları neticesinde gerilme yığılma bölgelerinde oluşan çentik etkisi nedeniyle malzemenin dayanımının düştüğünü belirtmişlerdir.

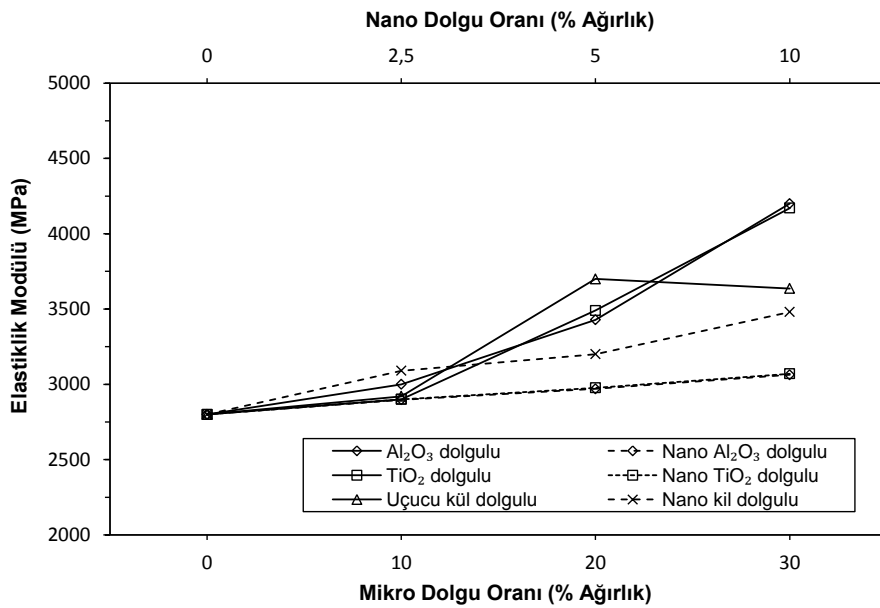
Şekilden nano epoksi kompozitlerin çekme dayanımı eğrileri incelendiğinde nano Al_2O_3 ve nano TiO_2 benzer davranışı göstermektedir. %2,5 nano Al_2O_3 ve nano TiO_2 dolgulu kompozitler en yüksek çekme dayanımına sahip olmaktadır ve nano Al_2O_3 ve nano TiO_2 MPa olan saf epoksinin çekme dayanımını sırasıyla 89 MPa ve 86 MPa değerlerine yükseltmişlerdir. Nano kil dolgulu kompozitler ise dolgu oranına bağlı olarak lineer bir şekilde çekme dayanımı azalmaktadır. Kompozit içerisindeki dolgu oranı arttıkça dolguların kompozit içerisindeki homojen dağılımı zorlaşmakta ve kompozit içerisinde topaklaşarak gerilme yığılma bölgeleri oluşturmaktadır. Böylece mekanik özellikler olumsuz yönde etkilenmektedir. [12, 19, 21, 22, 25, 26] Bu nedenle belirli bir dolgu oranından sonra eklenen Al_2O_3 ve TiO_2 nano parçacıkları kompozit malzemenin çekme dayanımını düşürmüştür. Bu durum nano tanecik boyutuna sahip dolguların kompozit içerisinde homojen dağılımının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca incelenen literatür çalışmalarında da nano kil dolgulu kompozit malzemelerinin mekanik değerlerinde düşmeler görülmüştür [120-123].

Epoksi kompozitlerin çekme dayanımları dolguların tanecik boyutu açısından incelendiğinde: %10 oranındaki dolgularda çekme dayanımları saf epoksiye göre Al_2O_3 dolguluda %6 azalarak 72 MPa, TiO_2 dolguluda %4 azalarak 75.76 MPa, uçucu kül dolguluda %22 azalarak 61.46 MPa, nano Al_2O_3 ve nano TiO_2 dolguluda %4 azalarak 76 MPa ve nano kil dolguluda %62 azalarak 49,53 MPa olmaktadır. %10 dolgu oranında en yüksek çekme dayanımını nano Al_2O_3 ve nano TiO_2 dolgulu kompozitler sergilemektedir. En düşük çekme dayanımını ise uçucu kül dolgulu kompozit sergilemektedir.

Bu çalışmalarda görülen mekanik değerlerin düşmesinin ortak sebebi nano kilin karışım içerisinde homojen karışmayıp topaklaşma davranışı göstermesidir. Sonuç

olarak en uygun kompozitler olarak nano Al_2O_3 ve nano TiO_2 dolgulu kompozitler görülmektedir. Reçineye eklenen mikro dolgulara göre nano dolgulardaki çekme dayanımındaki azalma daha az hissedilmektedir. Bunun nedeni olarak mikro dolgularda tanecik boyutunun artışıyla kompozit içindeki çentik etkisini büyüyeceği düşünülmektedir.

Şekil 4.2’de mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranına bağlı olarak elastiklik modülleri görülmektedir. Epoksi kompozitlerin elastiklik modülleri dolgu eklenmesiyle birlikte yükselmektedir. Mikro dolgulu kompozitler incelendiğinde Al_2O_3 ve TiO_2 dolgulu kompozitler aynı davranışı göstermektedirler. Mikro kompozitlerde en yüksek elastiklik modülleri %30 dolgu içeriğinde sırasıyla elastiklik modülünü % 50 arttırarak 2800 MPa'dan 4200 MPa değerine ve %48 arttırarak 4170 MPa değerine yükseltmektedir. %30 uçucu kül dolgulu kompozitin elastiklik modülü ise %20 dolgu içeriğine göre düşme davranışı göstermektedir. Bu dolgu içeriğinde matriks ve dolgu arasındaki bağın zayıf olduğu ve bu nedenle matriksin bağlayıcılığının azaldığı düşünülmektedir. Mikro dolguların eklenmesi kompozit malzemelerin rijitliğini arttırmasına rağmen mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum matris ve dolgu arasındaki arayüzey bağının zayıf olmasından kaynaklanmaktadır. [10, 11]

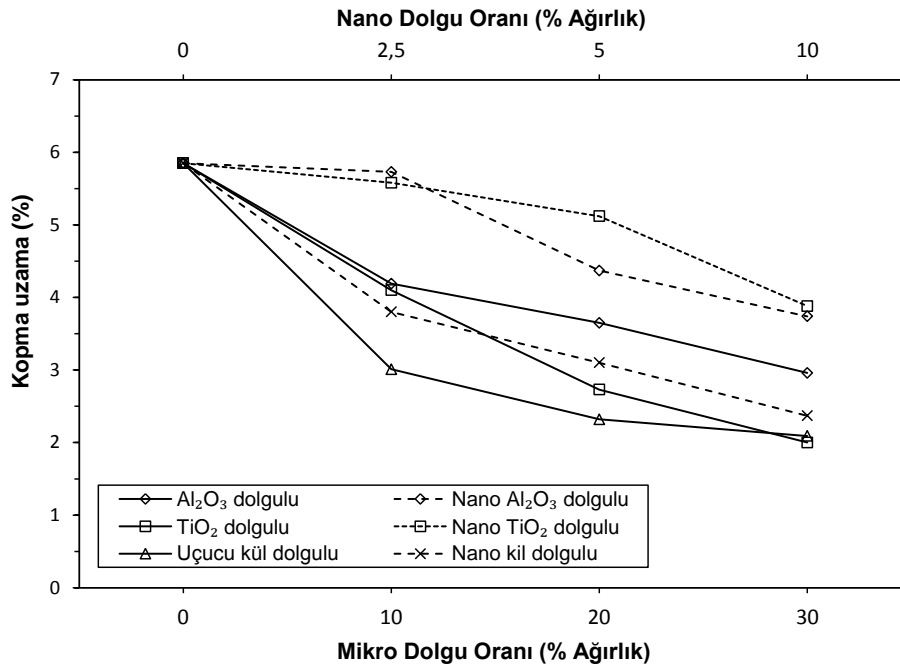


Şekil 4.2. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranına bağlı olarak elastiklik modülleri

Nano dolgulu epoksi kompozitler incelendiğinde epoksi reçinesine nano dolguların eklenmesi ile birlikte kompozitlerin elastiklik modülleri yükselmiştir. Kompozit içerisindeki dolgu oranı arttıkça kompozit malzemeler daha rijit ve gevrek bir yapıya sahip olmuşlardır. En yüksek elastiklik modülleri %10 dolgu içeriğinde olmaktadır.

Epoksi kompozitlerin elastiklik modülleri dolguların tanecik boyutu açısından incelendiğinde: Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde elastiklik modülleri saf epoksiye göre Al_2O_3 dolguluda %7 yükselerek 3000 MPa, TiO_2 dolguluda %3 yükselerek 2900 MPa, uçucu kül dolguluda %4 yükselerek 2920 MPa, nano Al_2O_3 dolguluda %9 yükselerek 3063 MPa, nano TiO_2 dolguluda %9,6 yükselerek 3070 MPa ve nano kil dolguluda %24 yükselerek 3480 MPa olmaktadır. Sonuç olarak aynı dolgu oranında nano dolguların elastiklik modülüne etkisi daha yüksek olmaktadır. Bu durum nano dolguların saf epoksiye daha yüksek gevreklik kazandırdığını göstermektedir.

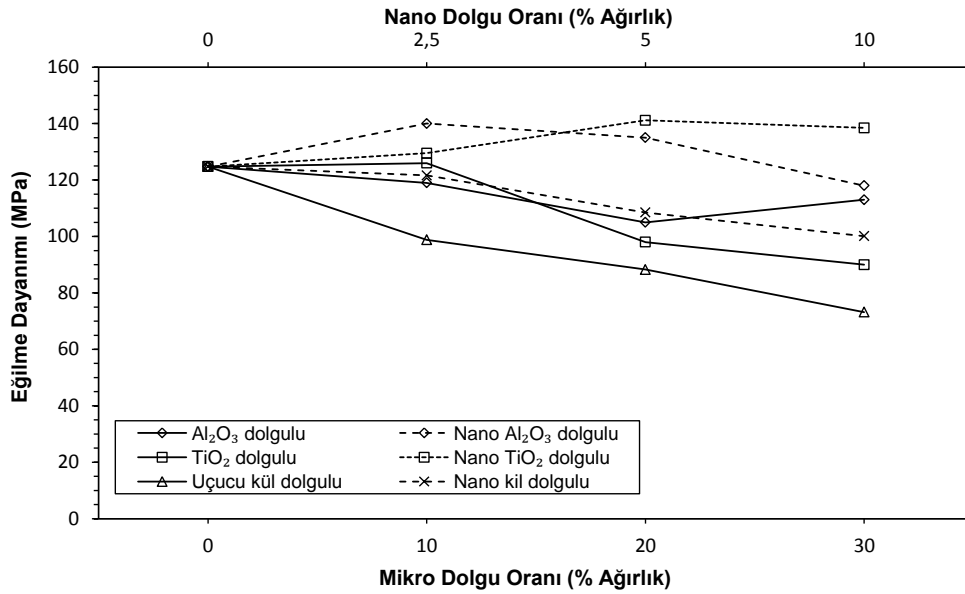
Şekil 4.3'te mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranına bağlı olarak kopma uzama eğrileri görülmektedir. Epoksi reçinesine mikro ve nano dolguların eklenmesiyle kompozitler sünek davranıştan daha gevrek bir davranışa dönüşmüşlerdir. Epoksi reçinesine eklenen dolguların neticesinde kompozit malzemelerin kopma uzama değerleri düşmüştür. Epoksi reçinesine rijit dolguların eklenmesiyle polimer zincirlerinin hareket kabiliyeti sınırlanmaktadır. Kompozit içerisinde artan dolgu oranı ile birlikte bu değerler daha da azalmaktadır. Şekilden Al_2O_3 , uçucu kül ve nano kil dolgulu kompozitlerde benzer profilde azalma görülmektedir.



Şekil 4.3. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak kopma uzama eğrileri

Epoksi kompozitlerdein kopma uzama değerleri dolguların tanecik boyutu açısından incelendiğinde: Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde kopma uzama değerleri (%) saf epoksiye göre Al₂O₃ dolguluda %28 azalma, TiO₂ dolguluda %30 azalma, uçucu kül dolguluda %48 azalma, nano Al₂O₃ dolguluda %37 azalma, nano TiO₂ dolguluda %33 azalma ve nano kil dolguluda %60 azalma olmaktadır. Sonuç olarak. nano dolguların gevrekliğe etkisinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 4.4'te mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranına bağlı olarak eğilme dayanımları görülmektedir. Mikro dolgulu kompozitlerin eğilme dayanımları genel olarak dolgu eklenmesiyle azalma davranışı göstermektedir. Mikro dolgular kompozit içerisinde topaklaşarak gerilme yığılma bölgeleri oluşturmakta ve eğilme dayanımlarını düşürmektedir. Nano kompozitlerin eğilme dayanımları incelendiğinde ise nano Al₂O₃ dolgulu kompozitlerde en yüksek değeri %2,5 dolguluda eğilme dayanımını % 12 oranında arttırarak 124,76 MPa 'dan 140 MPa değerine yükseltmiştir. Nano TiO₂ dolgulu kompozitte ise en yüksek eğilme dayanımı %5'lik dolgu oranında eğilme dayanımını 141,15 MPa değerine % 13 oranında yükseltmiştir. Nano kil dolgusunun eklenmesi ile kompozitlerin eğilme dayanımları düşmektedir.

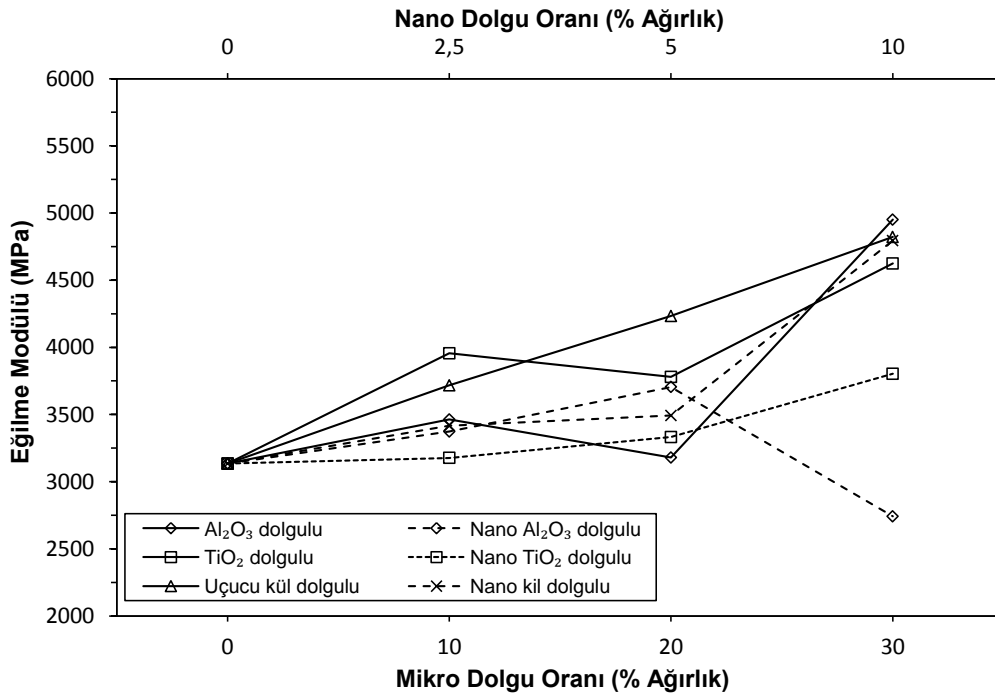


Şekil 4.4. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak eğilme dayanımları

Epoksi kompozitlerin eğilme dayanımları dolguların tanecik boyutu açısından incelendiğinde: Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde kompozitlerin eğilme dayanımları saf epoksiye göre Al₂O₃ dolguluda %5 düşerek 119 MPa, %10 TiO₂ dolguluda mevcut durumunu korumaktadır. %10 Uçucu kül dolgusu eklenmesiyle eğilme dayanımı %20,8 azalarak 98,83 MPa değerine düşmektedir. Nano Al₂O₃ dolguluda %6 düşerek 118 MPa, nano TiO₂ dolguluda %10 yükselerek 138,48 MPa ve nano kil dolguluda %20 düşerek 100 MPa değerinde olmaktadır. Dolgu ve matris arasındaki etkileşimin zayıf olması parçacıkların dış yükleri taşıma kabiliyetini olumsuz hale getirir. Bu durumda kompozitin mekanik dayanımı saf polimer matristen daha düşük olmaktadır ve artan dolgu oranı ile birlikte mekanik özellikler düşmektedir [11].

Epoksi nano kompozitlerin eğilme dayanımları şekil 4.1'deki çekme dayanımlarına benzer davranışı göstermektedir. Bu davranışın ortak özelliği nano dolguların tanecik boyutuna bağlı olarak belirli bir orandan sonra topaklaşma eğilimi göstermeleri ve reçine içerisinde homojen dağılamamalarından kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar incelenen çalışmalarda [124, 125] nano kil dolgusunun eğilme davranışı ile benzerlik göstermektedir. Şekil 4.4'teki tüm kompozitlerin eğilme dayanımlarının incelenmesi sonucunda en iyi sonuçlar nano Al₂O₃ ve nano TiO₂ dolgulu kompozitlerde olmaktadır.

Şekil 4.5'te mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranına bağlı olarak eğilme modülleri görülmektedir. Kompozit malzemelerin eğilme modülleri epoksi reçinesine dolguların eklenmesiyle genel olarak yükselmektedir. Mikro kompozitlerin eğilme modüllerinde bu yükselme davranışı uçucu kül dolgulu kompozitlerde lineer bir şekilde meydana gelirken Al_2O_3 ve TiO_2 dolgulu kompozitlerde dolgu içeriğine bağlı olarak aynı davranışı takip etmiştir.



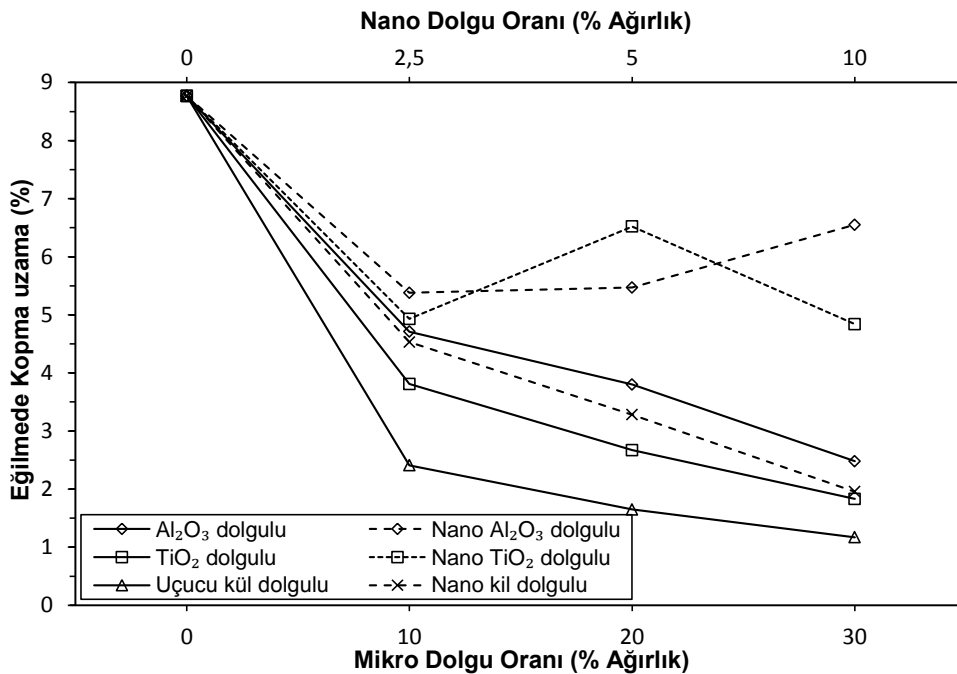
Şekil 4.5. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak eğilme modülleri

Şekilde en yüksek eğilme modülü değerleri %30 dolgulu kompozitlerde olmaktadır. %30 Al_2O_3 dolgusu saf epoksinin eğilme modülünü % 57 oranında arttırarak 3135 MPa'dan 4951 MPa değerine %30 TiO_2 dolguluda % 47 oranında artarak 4624 MPa değerine ve %30 uçucu kül dolguluda % 53 oranında artarak 4822 MPa değerine yükseltmiştir. Epoksi reçinesine dolguların eklenmesiyle kompozitler sünek davranıştan daha gevrek davranış sergilemektedirler. Nano kompozitlerin eğilme modülleri incelendiğinde nano Al_2O_3 dolgulu kompozitte en yüksek eğilme modülü ağırlıkça %5 dolgu oranında %18 oranında artarak 3135 MPa'dan 3705 MPa değerine yükselmiştir. %10 nano Al_2O_3 dolgulu kompozitte ise eğilme modülü saf epoksi değerinin de altına düşmektedir. Nano Al_2O_3 aynı davranışı eğilme dayanımında da göstermiştir. Bu durumun dolgu oranının artmasının sonucu olarak

matriks ve dolgu arasındaki bağın zayıflaması ve böylece matriksin bağlayıcılığının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Epoksi kompozitlerin eğilme modülleri dolguların tanecik boyutu açısından incelendiğinde: %10 oranında dolgular eklendiğinde kompozitlerin eğilme modülleri saf epoksiye göre Al_2O_3 dolguluda %10 yükselerek 3463 MPa, %10 TiO_2 dolguluda %26 artarak 3956 MPa, %10 uçucu kül dolgusu eklenmesiyle eğilme modülü %18 artarak 3717 MPa değerine yükselmektedir. Nano Al_2O_3 dolguluda %13 azalarak 2742 MPa, nano TiO_2 dolguluda %21 yükselerek 3803MPa ve nano kil dolguluda %53 yükselerek 4794 MPa değerinde olmaktadır.

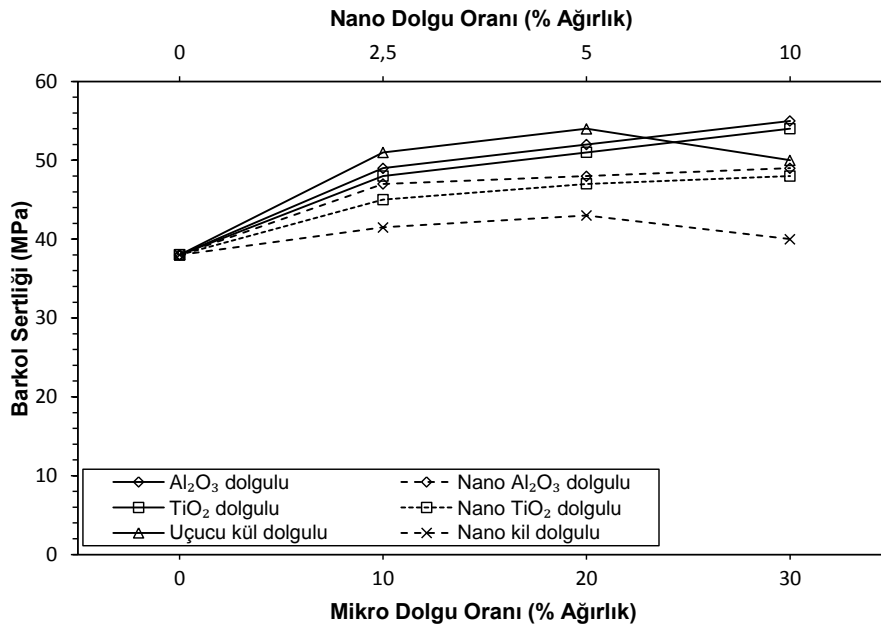
Şekil 4.6'da mikro ve nano kompozitlerin dolgu oranına bağlı olarak eğilmede kopma uzama (%) eğrileri görülmektedir. Kompozit malzemelerin eğilmede kopma uzama değerleri epoksi reçinesine dolguların eklenmesiyle genel olarak düşme eğilimi göstermektedir. Grafikte Al_2O_3 , TiO_2 , uçucu kül ve nano kilin eğilmede kopma uzama eğrilerinin aynı davranışı gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.6. Mikro ve nano kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak eğilmede kopma uzama eğrileri

Mikro kompozitlerde en yüksek kopma uzama değerleri en yüksek dolgu oranında meydana gelmektedir. %30 dolgulu kompozitlere incelendiğinde Al_2O_3 dolgusunda saf epoksinin kopma uzama değeri 8,77' den 2,42' ye, TiO_2 dolgusunda %1,99 değerine ve uçucu kül dolgusunda %1,17 değerine düşmektedir. Epoksi kompozitlerin eğilmede kopma uzama değerleri (%) dolguların tanecik boyutu açısından incelendiğinde: Saf epoksiye göre Al_2O_3 dolguluda %46 azalma, TiO_2 dolguluda %56 azalma, uçucu kül dolguluda %72 azalma, nano Al_2O_3 dolguluda %25 azalma, nano TiO_2 dolguluda %44 azalma ve nano kil dolguluda %77 azalma olmaktadır. Sonuç olarak epoksi reçinesine dolguların eklenmesiyle malzemeler saf epoksiye göre gevrekleşerek yük altındaki zorlanma davranışları azalmaktadır.

Şekil 4.7'de mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak sertlik değerleri verilmektedir. Epoksi reçinesine mikro tanecik boyutunda Al_2O_3 ve TiO_2 dolgularının eklenmesiyle sertlik değerleri artmaktadır. Uçucu kül dolgusunda ise %30 dolgu içeriğine kadar sertlik yükselmekte ve %30 dolgu oranında ise düşmektedir. Aynı davranış uçucu kül kompozitlerin elastiklik modülünde de meydana gelmiştir. Kompozit içerisinde artan dolgu oranı sonucunda matriks ve dolgu arasındaki bağın zayıflayarak matriksin bağlayıcılığının azalmasının bu davranışa neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak sertlik değerleri

Epoksi reçinesine nano tanecik boyutunda Al_2O_3 ve TiO_2 eklenmesiyle sertlik değerleri artmaktadır. %10 nano kil dolgusu eklendiğinde ise kompozit malzemenin sertliğinde hafif bir düşme olmaktadır. Bununla ilgili olarak Jawahar ve diğerleri [61], nano dolgu oranının artışıyla reçinenin viskozitesinin arttığını ve bu nedenle karışım esnasında reçine içerisinde bulunan hava kabarcıklarının atılmasının zorlaştığını belirterek nano kompozitlerde gözenek bulunabileceğini belirtmişlerdir.

Epoksi kompozitlerin sertlik değerleri dolguların tanecik boyutu açısından incelendiğinde: Al_2O_3 , TiO_2 , uçucu külde saf epoksiye göre sırasıyla %29, %26 ve %31 oranında yükselmişti. %10 nano Al_2O_3 , nano TiO_2 ve nano kil dolguları ise epoksi kompozitlerin sertliklerini sırasıyla %29, %26 ve %5 oranında yükseltmişlerdir.

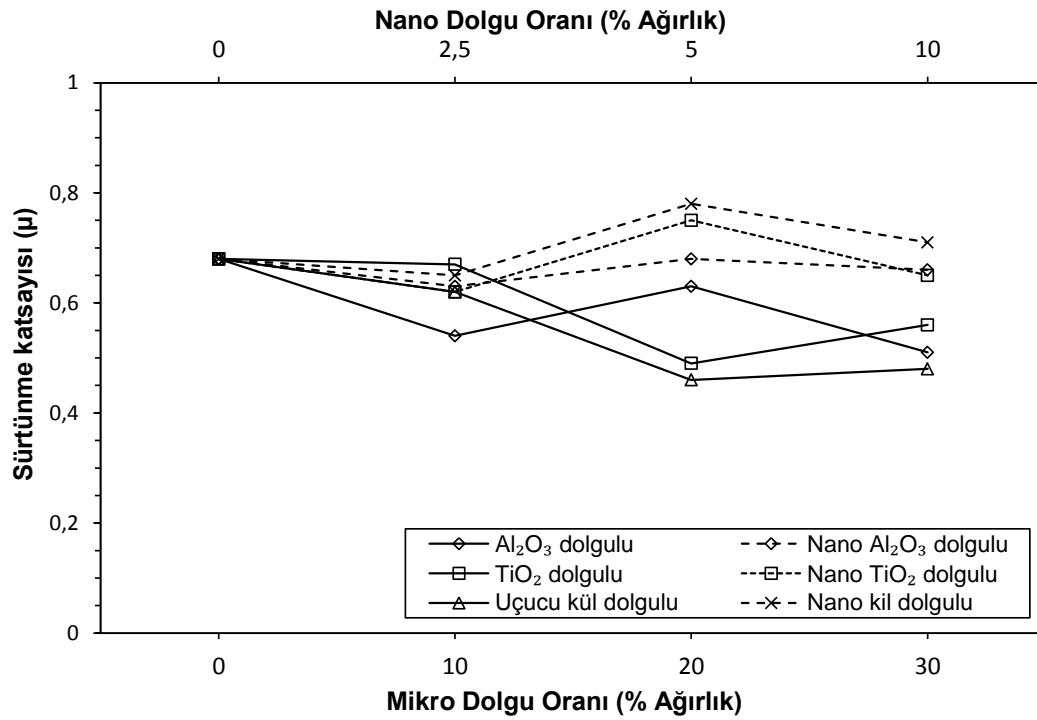
Genel olarak şekil 4.1-4.7 'de mikro ve nano dolgulu epoksi kompozitlerin mekanik davranışları incelendiğinde, aynı dolgu oranındaki nano Al_2O_3 ve TiO_2 kompozitlerin çekme dayanımı ve eğilme dayanımı mikro Al_2O_3 ve TiO_2 dolgulu kompozitlere göre daha yüksek olmaktadır. Bu durum tanecik boyutu büyüdükçe kompozit içindeki çentik etkisini büyüterek mekanik dayanımı olumsuz etkileyeceğini göstermektedir. diğer yönden nano Al_2O_3 ve nano TiO_2 dolgulu kompozitler üretim koşulları ve maliyet açısından ele alındığında ise mikro dolgululara göre düşünülen beklentiyi karşılayamamaktadırlar.

Diğer yönden aynı dolgu oranlarında nano dolgulu kompozitlerin elastiklik modülleri mikro dolgululara göre daha yüksek ve kopma uzamaları daha düşüktür. Bu durum nano dolgular ile daha yüksek gevreklik kazandırıldığını göstermektedir. Mikro Al_2O_3 ve mikro TiO_2 dolgulu kompozitlerin eğilme modülleri nano Al_2O_3 ve nano TiO_2 dolgulu kompozitlere göre daha yüksek ve eğilmede kopma uzama değerleri daha düşüktür. Bu durum eğilme davranışında mikro dolguların daha gevrek olduğunu göstermektedir.

4.2. Tribolojik Davranışların Değerlendirilmesi

4.2.1. Sürtünme davranışlarının değerlendirilmesi

Şekil 4.8'de mikro ve nano dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranına bağlı olarak sürtünme katsayılarındaki değişimler verilmektedir. Epoksi reçinesine eklenen dolgular kompozitlerin sürtünme davranışlarını etkilemiştir. Şekilde epoksi reçinesine mikro dolguların eklenmesi ile genel olarak sürtünme katsayıları düşmektedir.



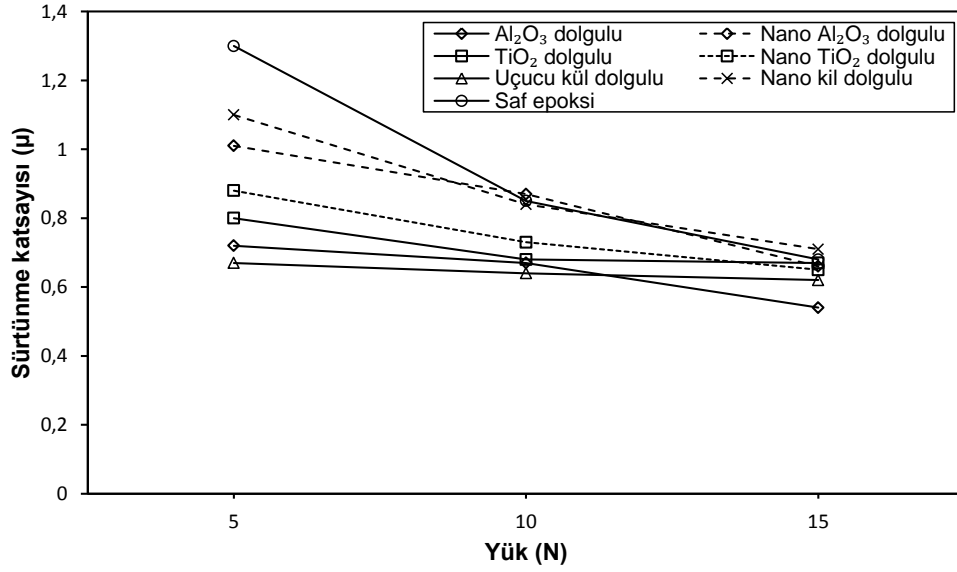
Şekil 4.8. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının dolgu oranlarına bağlı olarak 04m/s hız ve 15N yük şartlarındaki değişimleri

Mikro dolgulu epoksi kompozitlerde 0,4 m/s hızında ve 15N yük şartında en düşük sürtünme katsayıları %30 Al₂O₃ dolgulu kompozitte saf epoksiye göre %25 azalma, %20 TiO₂ dolgulu kompozitte %28 azalma ve %20 uçucu kül dolgulu kompozitte %32 azalma sağlanmıştır. %20 Al₂O₃ ile %30 TiO₂ ve uçucu kül dolgulu kompozitlerde sürtünme katsayıları dolgu oranıyla yükselme davranışı göstermektedirler. Sürtünme katsayısının yükselmesiyle ilgili olarak bölüm 2' deki %20 Al₂O₃ dolgulu numune yüzeyi görüntüsünden abrazyon aşınma mekanizmasının

etkili oluğu görölmektedir. Burada pim yüzeyinden kopan dolgular çelik disk ile temas etmekte ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olmaktadır. Literatürde görüldüğü üzere yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla sürtünme katsayısı yükselmektedir [34,47]. Aynı durum %30 uçucu kül dolgulu kompozitlerde meydana gelmiştir. Yüksek dolgu oranında yüzey çizikleri ve pürüzlülükleri daha fazla görülmüş ve kırılma mekanizması oluşmuştur.

Nano dolgulu epoksi kompozitlerde en düşük sürtünme katsayıları % 2,5 dolgulu kompozitlerde olmaktadır. Sürtünme katsayıları nano Al_2O_3 , nano TiO_2 ve nano kil dolgulu kompozitlerde saf epoksiye göre sırasıyla %7.35, %8.8 ve %4.4 oranında düşmektedir. Epoksi reçinesinde nano dolgu oranının artmasıyla sürtünme katsayıları yükselmektedir. Bu durumla ilgili olarak Jawahar ve diğerleri [61] kompozit içerisinde artan nano dolgu oranları topaklaşmaya neden olduğunu ve yumuşak matriksten dolguların kopması sonucu temas yüzeyinde pürüzlülüğünün artarak sürtünme katsayılarının yükseldiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak sürtünme katsayısı mikro dolguların eklenmesiyle azalmaktadır, nano dolguların eklenmesinde ise artan dolgu oranında sürtünme katsayıları yükselmektedir.

Şekil 4.9'da Saf epoksi ve %10 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s hızındaki sürtünme katsayısı – yük eğrileri görölmektedir. Şekilde yükün artışıyla birlikte sürtünme katsayısı değerleri lineer bir şekilde azalmaktadır. Şekildeki eğrilerden en düşük sürtünme katsayıları 5 ve 10N yük altında uçucu kül dolgulu kompozitlerde, 15N yük altında ise Al_2O_3 dolgulu kompozitlerde olmaktadır. Şekilden mikro dolgulu kompozitlerin sürtünme performanslarının nano dolgulu kompozitlerden daha iyi olduğu görölmektedir. En düşük sürtünme katsayıları 15N yük altında olmaktadır. İncelenen literatürlerde [33-35,47] yükün sürtünme katsayısı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Yükün artışıyla pürüzsüz yüzeylerde sürtünme katsayısı düşmektedir. Bu çalışmada yükün artışıyla birlikte sürtünme katsayısının düşmesinin sebebinin yüzeylerdeki sıcaklığın değişiminin az olmasına rağmen polimer yüzeylerinde yumuşama etkisi olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.9. %10 Dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s hızındaki sürtünme katsayısı - yük eğrileri

Şekilde 0,4 m/s kayma hızında, %10 mikro ve nano dolgulu epoksi kompozitlerin yükün ve dolgu çeşidinin sürtünme katsayılarına etkisi incelendiğinde:

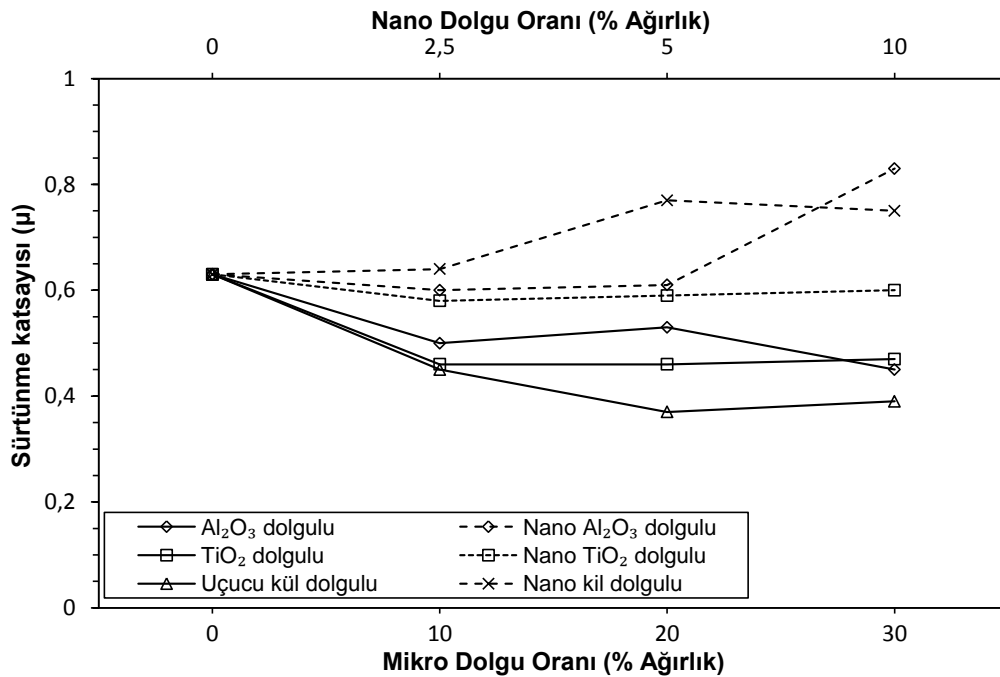
Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,4m/s hızında ve 5N yük şartlarındaki sürtünme katsayıları saf epoksiye göre Al₂O₃ dolguluda %44,6, TiO₂ dolguluda %38,46, uçucu kül dolguluda %48, nano Al₂O₃ dolguluda %22, nano TiO₂ dolguluda %32 ve nano kil dolguluda %15 oranında azalmaktadır.

Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,4m/s hızında ve 10N yük şartlarındaki sürtünme katsayıları saf epoksiye göre Al₂O₃ dolguluda %21, TiO₂ dolguluda %20, uçucu kül dolguluda %24,7 azalmaktadır. %10 nano TiO₂ dolguluda sürtünme katsayısı %14 oranında düşmekte ve nano kil dolguluda %1 oranında düşmektedir. Diğer yönden %10 nano Al₂O₃ dolguluda sürtünme katsayısı %2 oranında yükselmiştir.

Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,4m/s hızında ve 15N yük şartlarındaki sürtünme katsayıları saf epoksiye göre Al₂O₃ dolguluda %20, TiO₂ dolguluda %1,5, uçucu kül dolguluda %7,5, nano Al₂O₃ dolguluda %3, nano TiO₂ dolguluda %4,4 düşmekte ve nano kil dolguluda %4 yükselmektedir. Yükün artmasıyla birlikte sürtünme katsayılarının saf epoksiye göre düşme oranları

azalmaktadır. Yüksek dolgu oranından dolayı aşınma esnasında çelik disk ile pim arasında kalan sert parçacıkların yüzeyi kazıyarak sürtünme katsayısının yükseldiği düşünülmektedir.

Şekil 4.10'da mikro ve nano dolgulu epoksi kompozitlerin dolgu oranlarına bağlı olarak 0,8 m/s hız ve 15N yük şartlarındaki sürtünme katsayıları verilmektedir. Epoksi reçinesine mikro dolguların eklenmesiyle genel olarak sürtünme katsayıları azalmaktadır. Nano kompozitlerde en düşük sürtünme katsayıları %2,5 oranındaki dolgu içeriğinde olmaktadır. Kompozit içinde artan dolgu oranıyla birlikte sürtünme katsayıları da yükselmektedir. Bunun nedeni olarak hızın artışıyla birlikte yüksek dolgu oranlarında kopan parçacıkların temas yüzeyi arasına girip abrazyon mekanizma ortamı oluşturduğu düşünülmektedir.



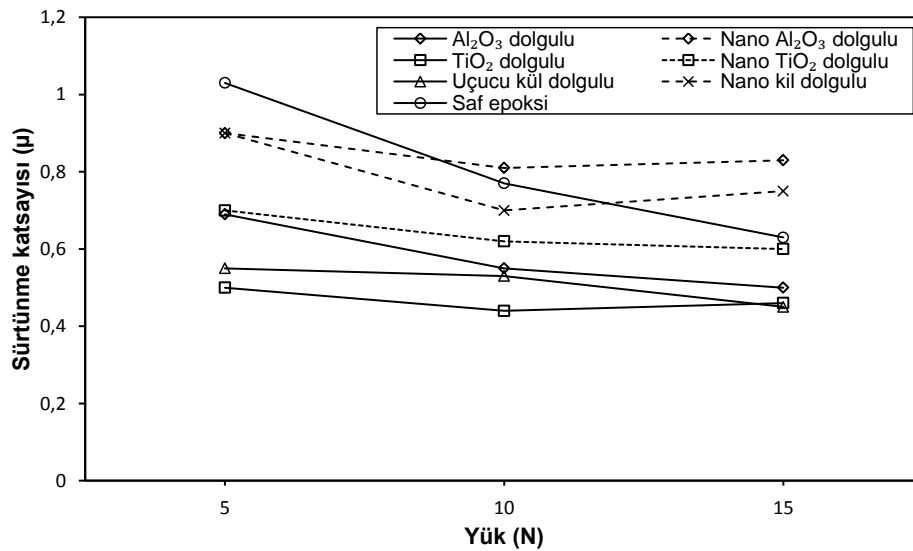
Şekil 4.10. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin sürtünme katsayılarının dolgu oranlarına bağlı olarak 0,8m/s hız ve 15N yük şartlarındaki değişimleri

Şekilde mikro dolgulu epoksi kompozitlerde 0,8 m/s hızında ve 15N yük şartında en düşük sürtünme katsayıları %30 Al₂O₃ dolgulu kompozitte %28,5, %10 ve %20 TiO₂ dolgulu kompozitlerde %27 ve %20 uçucu kül dolgulu kompozitte %41 oranında düşme sağlanmıştır. %2,5 nano dolgulu Al₂O₃ ve TiO₂'de sırasıyla %4,79 ve %8

oranında düşme olmaktadır. Diğer yönden nano kil dolgusunda ise sürtünme katsayısı %1,6 oranında yükselmektedir.

Genel olarak şekil 4.8 ve 4.10'dan görüldüğü üzere kayma hızının yükselmesi ile sürtünme katsayıları düşmektedir. Kayma hızının yükselmesiyle disk ve pim temas yüzeyinde oluşan sıcaklık değişimiyle pim yüzeyinde yumuşama olacağı düşünülmektedir. Dolgu çeşidinin epoksi kompozitlerin sürtünme katsayısı üzerine etkisi karşılaştırıldığında mikro kompozitler nano kompozitlere göre daha etkilidir. Nano dolguların pim yüzeyinden ayrıldığı ve ara yüzeyde kalarak pürüzlülüğü arttırdığı düşünülmektedir.

Şekil 4.11'de saf epoksi ve %10 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s hızındaki sürtünme katsayısı - yük eğrileri görülmektedir. Şekilde hızın artmasıyla sürtünme katsayıları azalmaktadır. Ayrıca sürtünme katsayıları yükün artışıyla genel olarak düşmektedir. Literatür incelemelerinde kayma hızının artmasıyla birlikte sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir [37,58]. Bu çalışmada sürtünme katsayılarının düşmesinin sebebi olarak yükün ve hızın artmasıyla kompozit malzeme yüzeylerinde oluşan ısının yükselmesi ve bunun sonucunda yüzeylerde yumuşamaya neden olması düşünülmektedir. Bölüm 2' de verilen sürtünme ve aşınma deneylerinde yüzey sıcaklıklarının artması bu durumu desteklemektedir.



Şekil 4.11. %10 Dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s hızındaki sürtünme katsayısı - yük eğrileri

15 N yük altında %10 Nano Al_2O_3 ve nano kil dolgulu kompozitlerde sürtünme katsayıları yükselmektedir. %10 Nano Al_2O_3 dolgulu kompozitin yüzey yapılarında kopan parçacıkların temas yüzeyinde pürüzlülüğe neden olduğu düşünülmektedir. %10 Nano kil dolgulu kompozitin yüzey yapısında ise aşınan parçacıkları pul tabakası şeklinde yüzeyi kaplamaktadırlar. Bu tabakanın sürtünme katsayısının artmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Şekilde 0,8 m/s kayma hızında, %10 dolgulu epoksi kompozitlerin yük ve dolgu çeşidinin sürtünme katsayılarına etkisi incelendiğinde:

Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,8m/s hızında ve 5N yük şartlarında sürtünme katsayıları saf epoksiye göre Al_2O_3 dolguluda %33, TiO_2 dolguluda %48.5, uçucu kül dolguluda %46.6, nano TiO_2 dolguluda %32, nano Al_2O_3 ve nano kil dolguluda %12.62 oranında azalmaktadır.

Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,8m/s hızında ve 10N yük şartlarında sürtünme katsayıları saf epoksiye göre Al_2O_3 dolguluda %28.5, TiO_2 dolguluda %42.8, uçucu kül dolguluda %31 düşmektedir. %10 nano TiO_2 dolguluda sürtünme katsayısı %19.5 azalmakta ve nano kil dolguluda %9 azalmaktadır. Diğer yönden %10 nano Al_2O_3 dolguluda sürtünme katsayısı %5 oranında yükselmiştir. 0,4 m/s kayma hızında olduğu gibi yüksek dolgu oranından dolayı aşınma esnasında kopan sert parçacıklar çelik disk ile pim arasında kalarak yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla sürtünme katsayısının yükseldiği düşünülmektedir.

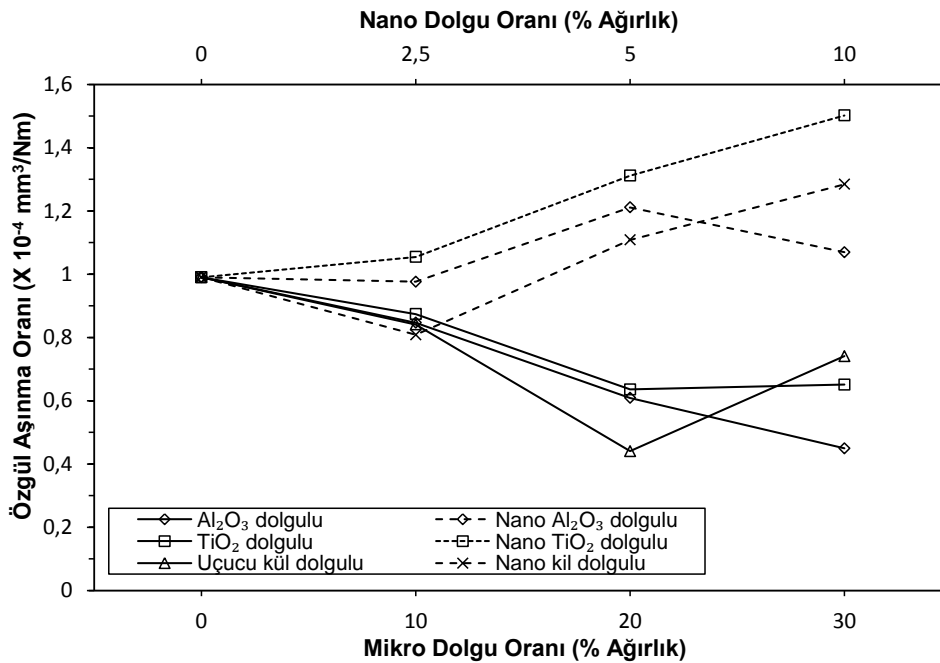
Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,8m/s hızında ve 15N yük şartlarında sürtünme katsayıları saf epoksiye göre Al_2O_3 dolguluda %20, TiO_2 dolguluda %27, uçucu kül dolguluda %28.5 oranında azalmaktadır. Nano TiO_2 dolguluda %4,76 düşme olurken nano Al_2O_3 dolguluda ve nano kil dolguluda sürtünme katsayıları sırasıyla %31 ve 19 oranında yükselmektedir.

Şekil 4.9 ve 4.11'deki yükün sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinden genel olarak yükün artması ile sürtünme katsayılarındaki düşme oranları azalmaktadır. Bu azalmanın sebebinin yükün artması ile aşınma miktarının yükselmesi sonucunda

çelik disk ve pim arasında kalan dolgu miktarını artmasıyla abrazif etkinin oluşması ve bu durumun sürtünme katsayısını yükselttiği düşünülmektedir.

4.2.2. Aşınma davranışlarının değerlendirilmesi

Şekil 4.12'de mikro ve nanodolgu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının dolgu oranlarına bağlı olarak 0,4m/s hız ve 15N yük şartlarındaki değişimleri verilmektedir. Kompozitlerin özgül aşınma oranları epoksi reçinesine mikro tanecik büyüklüğüne sahip dolguların eklenmesi ile azalmıştır. Mikro dolgulu kompozitlerin aşınma oranları artan dolgu oranı ile genel olarak azalmaktadır. Uçucu kül dolgulu kompozitlerde en düşük özgül aşınma oranları %20 dolgu içeriğinde olmuştur. Ayrıca şekilden %30 TiO₂ dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları saf epoksiye göre %30, %30 Al₂O₃ dolguluda %54, %20 TiO₂ dolguluda %36 ve %20 uçucu kül dolguluda %55 oranında bir azalma olmuştur.



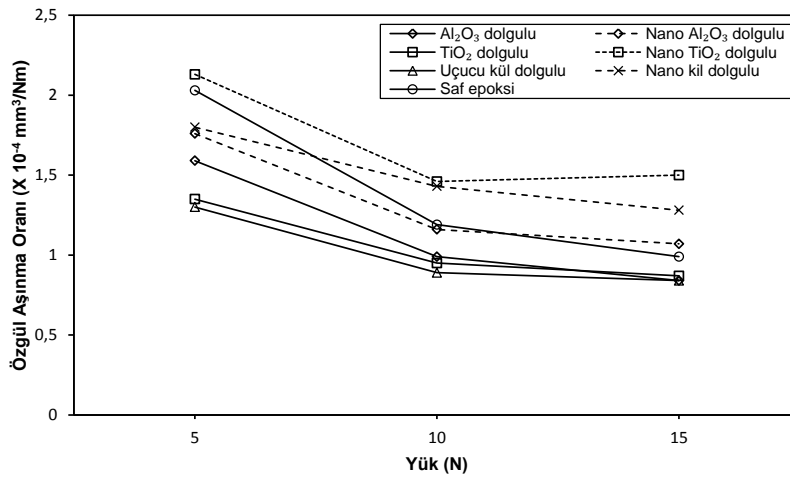
Şekil 4.12. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranları dolgu oranlarına bağlı olarak 0,4m/s hız ve 15N yük şartlarındaki değişimleri

Nano kompozitlerin aşınma davranışları incelendiğinde en düşük özgül aşınma oranları ağırlıkça %2,5 nano kil dolgulu kompozitlerde olmaktadır. Nano dolgulu epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranları dolgu oranının artmasıyla

yükselmektedir. Benzer durum literatür incelemelerinde de görülmüştür [53,62-65]. %2,5 nano kil dolgusunun eklenmesiyle özgül aşınma oranı safepoksiye göre %18 oranında düşmektedir. Nano Al_2O_3 dolgusunun eklenmesiyle kompozitlerin özgül aşınma oranları %2 oranında düşmektedir. Ayrıca nano TiO_2 dolgusunun eklenmesiyle özgül aşınma oranı %6 oranında yükseltmektedir.

Nanokompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik performansı nano dolguların kompozit içerisindeki homojen dağılımına bağlıdır. Nano parçacıkların çeşidi, boyutu, spesifik yüzey alanı, kompozit içerisindeki oranı ve karışım sürecindeki davranışları bu homojen dağılımı etkilemektedir [11]. Nano parçacıklar küçük tanecik boyutuna ve yüksek yüzey enerjisine sahip olmalarından dolayı kompozit içerisinde topaklaşma eğilimi göstermektedirler [12]. Bu nedenle belirli bir orandan sonra eklenen dolguların reçine içerisindeki homojen dağılımı zorlaşmaktadır ve matriks ile dolgu arasında zayıf bir bağ kurulmaktadır. İncelenen literatür çalışmalarından [61] artan dolgu oranı sonucunda kaymalı temas esnasında yumuşak matriks ile sert dolguların ayrılması kolay bir şekilde olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçlardan genel olarak mikro dolgu dolgular ile nano dolgulara göre daha iyi aşınma sonuçları elde edilmiştir.

Şekil 4.13'te %10 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s hızındaki özgül aşınma oranı – yük eğrileri verilmektedir. Şekilde kompozitlerin özgül aşınma oranları yükün artışıyla lineer olarak azalmaktadır.



Şekil 4.13. %10 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4m/s hızındaki özgül aşınma oranı -yük eğrileri

Şekilde mikro kompozitlerin aşınma performanslarının nano kompozitlerden daha iyi olduğu görülmektedir. %10 dolgu içeriğinde en düşük özgül aşınma oranları uçucu kül dolgulu kompozitlerde en yüksek özgül aşınma oranları ise nano Al_2O_3 dolgulu kompozitlerde olmaktadır.

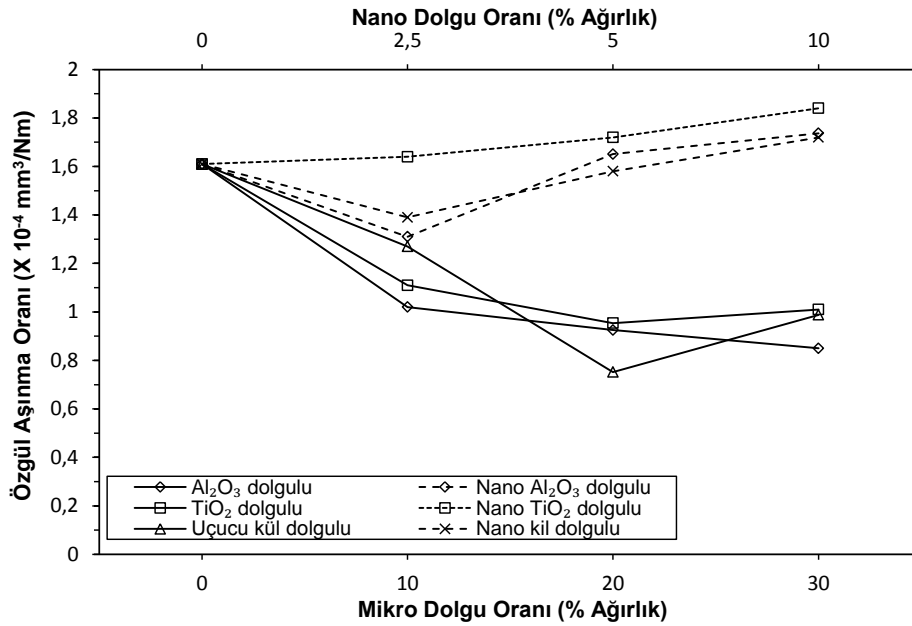
Şekilde 0,4 m/s kayma hızında, %10 dolgulu epoksi kompozitlerin yük ve dolgu çeşidinin özgül aşınma oranlarına etkisi incelendiğinde:

Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,4m/s hızında ve 5N yük şartlarında özgül aşınma oranları saf epoksiye göre Al_2O_3 dolguluda %21.67, TiO_2 dolguluda %33, uçucu kül dolguluda %36, nano Al_2O_3 dolguluda %13 ve nano kil dolguluda %11 oranında azalmaktadır. Bununla birlikte nano TiO_2 dolguluda özgül aşınma oranı %4.96 oranında yükselmektedir.

Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,4m/s hızında ve 10N yük şartlarında özgül aşınma oranları saf epoksiye göre Al_2O_3 dolguluda %17, TiO_2 dolguluda %20, uçucu kül dolguluda %25 oranında azalmaktadır. Nano Al_2O_3 dolguluda özgül aşınma oranı %2.5 oranında azalırken, nano TiO_2 ve nano kil dolgulu kompozitlerde sırasıyla %22 ve %20 oranında yükselmiştir.

Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,4m/s hızında ve 15N yük şartlarında özgül aşınma oranları saf epoksiye göre Al_2O_3 ve uçucu kül dolguluda %15, TiO_2 dolguluda %12 oranında azalmıştır. Nano dolguların eklenmesiyle özgül aşınma oranları yükselmektedir. Bu yükselme Nano Al_2O_3 nano TiO_2 ve nano kil dolgulu kompozitlerde sırasıyla % 8, %51 ve %29 olmaktadır. Yüksek nano dolgu oranından dolayı aşınma esnasında kopan sert parçacıklar çelik disk ile pim arasında kalarak yüzeyi kazıdığı ve abrazif etki yaparak pim yüzeyinin daha fazla aşınmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Sonuçlardan mikro dolgulu kompozitlerin aşınma performansı nano dolgululara göre daha iyi olmaktadır. Yükün artışıyla birlikte genel olarak özgül aşınma oranının azalması ise saf epoksi ve epoksi kompozitlerde özgül aşınma oranında yükün hassasiyetinin etkisinin az olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.14'de mikro ve nano kompozitlerin özgül aşınma oranlarının dolgu oranına bağlı olarak 0,8m/s hız ve 15N yük şartlarındaki değişimleri verilmektedir. Kayma hızının artmasıyla özgül aşınma oranları yükselmektedir. Mikro dolgularında dolgu içeriğinin artmasıyla genel olarak özgül aşınma oranları azalmaktadır. En düşük özgül aşınma oranları %30 Al_2O_3 dolgulu, %20 TiO_2 dolgulu ve %20 uçucu kül dolgulu kompozitlerde aşınma oranını sırasıyla %47, %41 ve % 53 oranında bir düşme elde edilmiştir. Nano dolgulu kompozitlerde en düşük özgül aşınma oranı %2,5 dolgu oranında olmaktadır. dolgu içeriğinin artmasıyla özgül aşınma oranları yükselmektedir. Nano Al_2O_3 ve nano kil dolgulu kompozitlerin özgül aşınma oranları %18, %13 oranında düşmektedir. Bununla birlikte nano TiO_2 dolgulu kompozitin özgül aşınma oranı %1 oranında yükselmektedir.

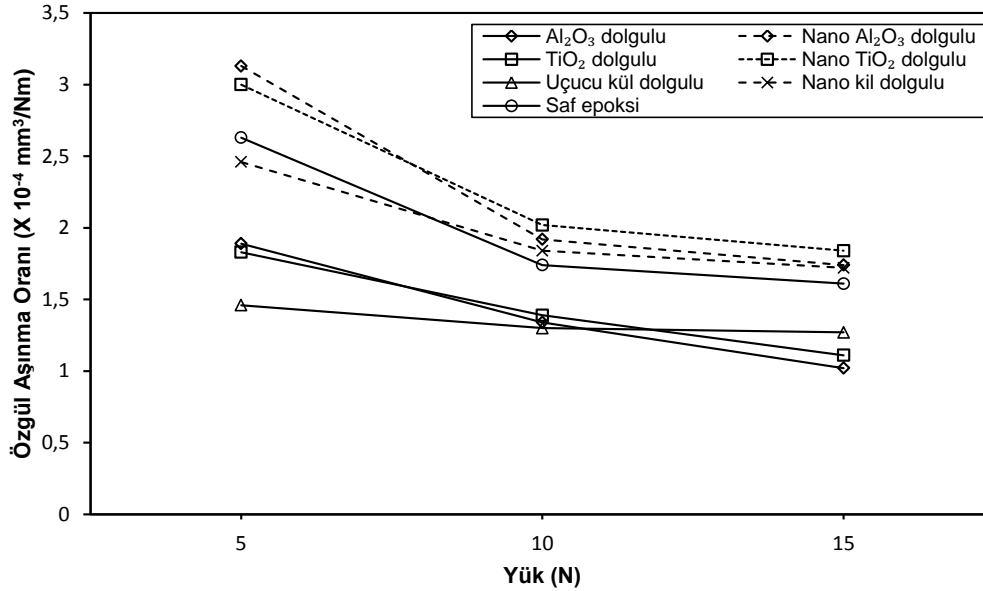


Şekil 4.14. Mikro ve nano epoksi kompozitlerin özgül aşınma oranlarının dolgu oranlarına bağlı olarak 0,8m/s hız ve 15N yük şartlarındaki değişimleri

Dolgu içeriğinin belirli bir orandan sonra artmasıyla matris ve dolgu arasındaki bağın zayıfladığı ve matrisin bağlayıcılığının azaldığı düşünülmektedir. Bu nedenle kaymalı temas esnasında hızın artmasıyla yüzeyden parçacıkların ayrılması ve sert parçacıkların yüzeye abrazif etki yapması daha kolay bir şekilde olmaktadır.

Şekil 4.15'te %10 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s hızındaki özgül aşınma oranı – yük eğrileri verilmektedir. Kayma hızının artmasıyla özgül aşınma oranları

yükselmektedir. Şekilden, yükün artmasıyla özgül aşınma oranlarının lineer olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.15. %10 dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8m/s hızındaki özgül aşınma oranı yük - eğrileri

%10 dolgu içeriğine sahip kompozitlerde en düşük özgül aşınma oranları 5 ve 10N yük altında uçucu kül dolgulu kompozitlerde, 15N yük altında Al₂O₃ dolgulu kompozitlerde olmaktadır. En yüksek özgül aşınma oranları 5N yük altında nano Al₂O₃ dolgulu kompozitte 10 ve 15N yük altında ise nano TiO₂ dolgulu kompozitlerde meydana gelmektedir.

Epoksi kompozitlerde 0,8 m/s kayma hızında, %10 dolgulu epoksi kompozitlerin yük ve dolgu çeşidinin özgül aşınma oranlarına etkisi incelendiğinde:

Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,8m/s hızında ve 5N yük şartlarında özgül aşınma oranları saf epoksiye göre Al₂O₃ dolguluda %28, TiO₂ dolguluda %30, uçucu kül dolguluda %44 ve nano kil dolguluda %6 oranında azalma olmuştur. Nano Al₂O₃ ve nano TiO₂ dolguların eklenmesi ise özgül aşınma oranlarını sırasıyla %19 ve %14 oranında yükselmiştir.

Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,8m/s hızında ve 10N yük şartlarında özgül aşınma oranları saf epoksiye göre Al₂O₃ dolguluda %23, TiO₂

dolguluda %20, uçucu kül dolguluda %25 oranında azalmaktadır. Nano dolguların eklenmesiyle özgül aşınma oranları yükselmektedir. Nano Al_2O_3 nano TiO_2 ve nano kil dolgulu kompozitlerde özgül aşınma oranları sırasıyla %8.62, %16 ve %5.74 oranında yükselmektedir.

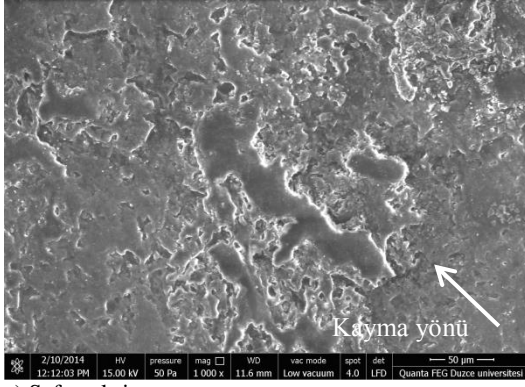
Epoksi reçinesine %10 oranında dolgular eklendiğinde 0,8m/s hızında ve 15N yük şartlarındaki özgül aşınma oranları saf epoksiye göre Al_2O_3 TiO_2 ve uçucu kül dolgulu kompozitlerde sırasıyla %36, %31 ve %21 oranlarında düşmektedir. Nano dolguların eklenmesiyle özgül aşınma oranları yükselmektedir. Nano Al_2O_3 nano TiO_2 ve nano kil dolgulu kompozitlerde özgül aşınma oranlarındaki artış sırasıyla % 8, %14 ve %7 olmaktadır. Nano dolguların kaymalı temas esnasında yüzeyden ayrılmaları ile temas yüzeyi ara yüzeyde kalan dolgulardan dolayı pürüzlü bir yapıya sahip olmakta ve dolgular pimin temas yüzeyinde abrazif etkiye neden olarak aşınma miktarı yükselmektedir.

0,8 m/s kayma hızında ve değişen yük şartlarında mikro dolgulu kompozitlerin aşınma performansları nano dolgulu kompozitlere göre daha iyi olmaktadır. Mikro tanecik boyutuna sahip dolgular artan dolgu içeriği ile birlikte sertliğin de artmasının sonucu olarak daha düşük özgül aşınma oranlarına sahip olmaktadırlar. Nano tanecik boyutuna sahip dolgular ise artan dolgu oranlarında reçine içerisinde homojen dağılımları zorlaşmakta ve topaklaşma davranışı göstererek kompozit içerisinde gerilme yığılma bölgeleri oluşturmaktadırlar. Böylece kaymalı temas esnasında sert parçacıkların yumuşak matriksten kopması kolaylaşmaktadır [61].

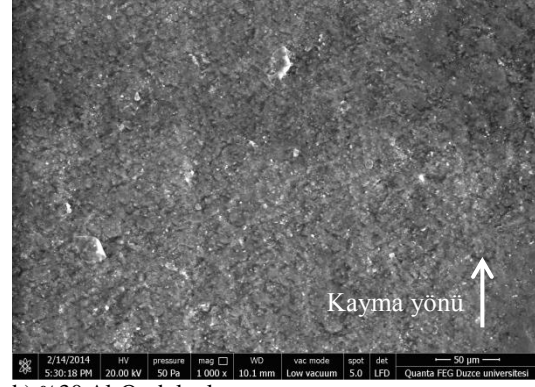
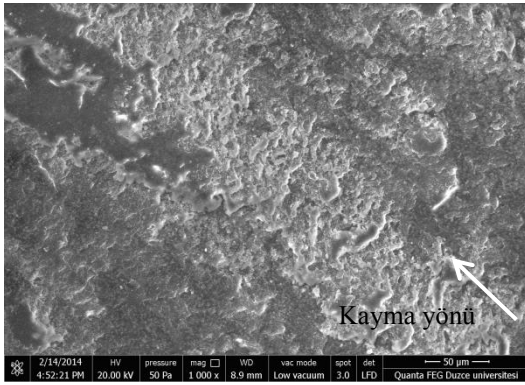
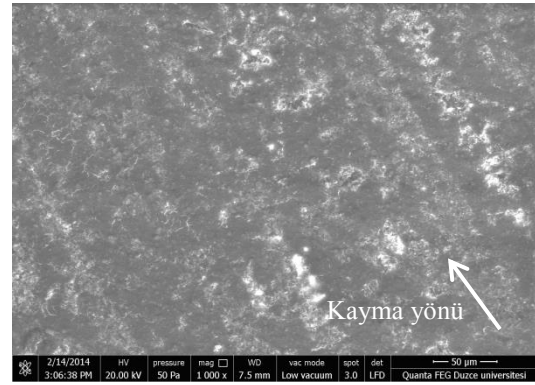
Saf epoksi ve epoksi kompozitlerin aşınma sonuçlarından genel olarak yükün artmasıyla birlikte özgül aşınma oranları düşmekte hızın artmasıyla özgül aşınma oranları yükselmektedir. Bu durum aşınma oranında hızın etkisinin yükün etkisinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Diğer yönden mikro dolguların kullanımı ile malzemelerin sertliği artmakta ve pim yüzeylerini kaplayarak nano dolgulara göre daha iyi aşınma performansı sergilemektedirler.

4.2.3. Aşınan yüzeylerin SEM incelemeleri

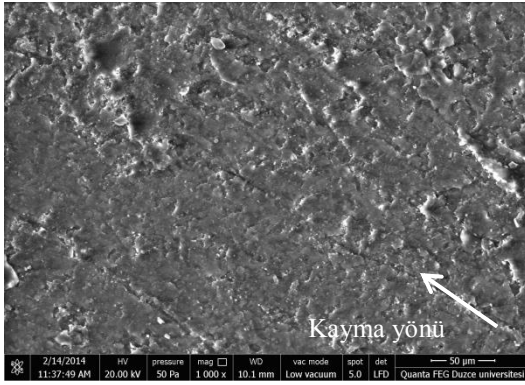
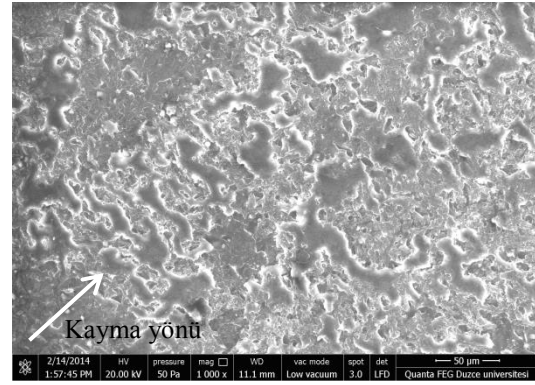
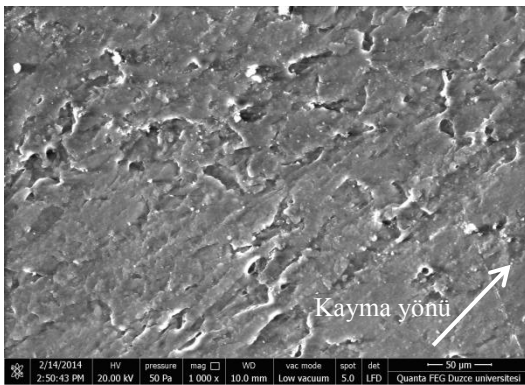
Şekil 4.16'da epoksi kompozitlerin 0,4 m/s kayma hızı ve 15N yük şartındaki pim aşınma yüzeylerinin SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri verilmektedir. 4.16a'da saf epoksinin yüzeyinde kaymalı temas esnasında yumuşak matriks yüzeyindeki parçacıklar koparak birbirlerinin üzerine yapışmakta ve hasarlar tabakalı şekilde olmaktadır. 4.16b'de epoksi reçinesine %30 Al₂O₃ dolgularının eklenmesiyle sert bir yüzey oluşmaktadır. Yüzeyi kaplayan sert tozların etkisiyle yüzey deformasyonunda azalma görülmektedir. 4.16c ve d'de %30 TiO₂ ve uçucu kül dolgularını eklenmesiyle saf malzemeye göre daha az deformasyon ve yapışma görülmektedir. Bu yapışan toz şeklindeki sert parçacıklar çelik disk ve pim numunesi arasındaki temas bölgesinde yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır. Pürüzlü yüzeyin etkisiyle sürtünme katsayısı ve aşınma kaybında artış meydana gelmiştir. Bu sonuçlar Şekil 4.8 ve 4. 10'daki sürtünme ve aşınma eğrilerinden görülmektedir. 4.16e'de epoksi reçinesinde yüksek nano Al₂O₃ dolgu oranından dolayı matriksin bağlayıcılığının azalmasının sonucunda nano dolguların yüzeyden ayrılması gerçekleşmektedir. Çelik disk ve pim numunesi arasında kalan parçacıklar pim yüzeyine abrazif etki yapmaktadırlar. Yüksek orandaki sert dolguların etkisiyle pim yüzeyinde çatlamlar olmuştur. 4.16f'de aynı şekilde kompozit içinde artan nano TiO₂ dolgu oranından dolayı matriksin bağlayıcılığı azalmaktadır. Dağılan parçacıklar yüzeyde abrazif etkiye neden olmaktadır ve numune yüzeyinde soyulmalara neden olmaktadır. Dolguların abrazif etkisiyle sürtünme katsayısı ve aşınma kaybı artmaktadır. Şekildeki pürüzlülük bölgeleri büyük ve parçalı bir şekilde olmaktadır. 4.16g'de kayma yönünde dalgalı bir görüntü vardır. Yüksek nano kil dolgu oranında epoksi kompozitin sertliğinin düşmesiyle çelik disk numune yüzeyinde küçük oyuk ve kanalların oluşumuna neden olmaktadır. Yüzeyde deformasyonlar olmuştur.



a) Saf epoksi

b) %30 Al₂O₃ dolguluc) %30TiO₂ dolgulu

d) %30 Uçucu kül dolgulu

e) % 10 nano Al₂O₃ dolguluf) % 10 nano TiO₂ dolgulu

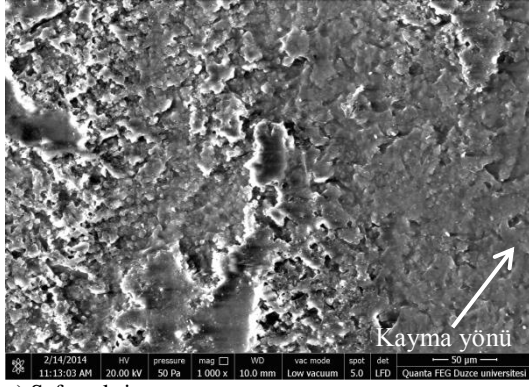
g) % 10 nano kil dolgulu

Şekil 4.16. Epoksi kompozitlerin 0,4 m/s kayma hızı ve 15 N yük şartındaki pim aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri

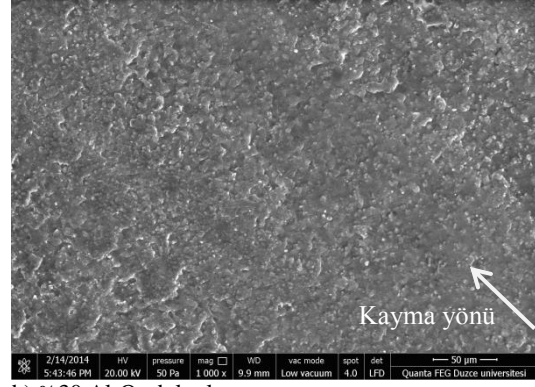
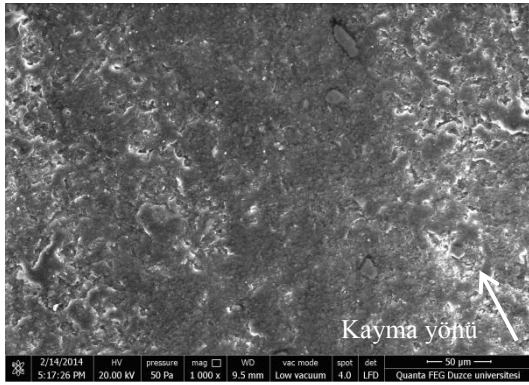
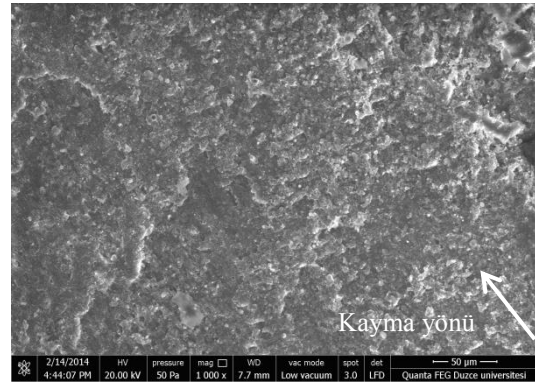
Şekil 4.17’de epoksi kompozitlerin 0,8 m/s kayma hızı ve 15N yük şartındaki pim aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmektedir. 4.17a’da saf epoksinin yüzeyinde kayma hızının artmasıyla aşınma yüzeyindeki tozların tabakalaşması küçük parçacıklar şeklinde olmaktadır ve yüzeydeki izler derinleşmektedir. 4.17b’de %30 Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitte kayma hızının artmasıyla sert Al₂O₃ parçacıkları kayma yönünde pim numunesi üzerinde iz yapmaktadırlar. Çelik disk ve pim numunesi temas yüzeyi arasında kalan parçacıklar numune yüzeyinde dalgalanmalara neden olmaktadır. 4.17c’de %30 TiO₂ dolgulu epoksi kompozitte hızın etkisiyle tabaka şeklindeki yapılar dağılmakta ve küçük parçacıklar şeklinde ara yüzeyde ezilmektedirler. Böylece yüzeyde pürüzlülük bölgeleri oluşmakta ve sürtünme katsayısı ve aşınma kaybı artmaktadır. 4.17d’de %30 uçucu kül dolgulu epoksi kompozitte yüzeye yapışan tozlar hızın etkisiyle sıcaklık artışından dolayı yumuşama davranışı göstermektedirler. Nano dolgularda hızın artması sonucu yüzeyden kopan parçacıklarda abrazyon etkisi artmaktadır. 4.17e’de epoksi reçinesinde yüksek nano Al₂O₃ dolgu oranı hızın etkisiyle birlikte pim yüzeyine olan abrazyon etkisini arttırmıştır. Hızın etkisiyle pürüzlülük noktalarındaki derinlik farkı artmıştır. Sert dolgular pim yüzeyinde küçük oyukların oluşumuna neden olmuşlardır. 4.17f’de kompozit içinde artan nano TiO₂ oranıyla kayma hızının artmasının sonucunda çelik disk ve pim temas yüzeyi arasında kalan büyük ve parçalı yapıdaki tabakalar dağılarak küçük parçacıkların oluşumuna neden olmaktadır. Sert parçacıklar pim yüzeyinde küçük oyukların oluşumuna neden olmaktadır. 4.17g’de %10 nano kil dolgusunda kopan parçacıklar yüzeye yapışmaktadır. Yüzeye yapışan dolgular yüzeyde pul tabakaları şeklinde bir görüntüye neden olmaktadır. Pul tabakası şeklindeki dolgular izlerin arasını kapatmaktadır. sonuç olarak hızın artmasıyla saf epoksi ve kompozitlerin yüzeyinden kopan parçacıklar artmakta ve mikro kompozitlerde yüzey sertliğinin artmasıyla birlikte kopan parçacıklar saf epoksiye göre daha az olmaktadır. nano dolgularda ise hızın etkisi abrazyon etkisini arttırmaktadır.

Triboloji deneyleri esnasında pim ve disk temas yüzeyinde oluşan ısı nedeniyle yüzey sıcaklıklarının artması malzeme yüzeyinde yumuşamaya neden olmasına rağmen oluşan değişimler epoksinin camsı geçiş sıcaklığının %10,77’si ile %13,8’i arasında olmaktadır. Bu sıcaklık değerleri iç yapıyı etkilemeyecek seviyelerdedir. Aynı şekilde yüzey yapıları incelendiğinde genel olarak tüm yüzeylerde aynı

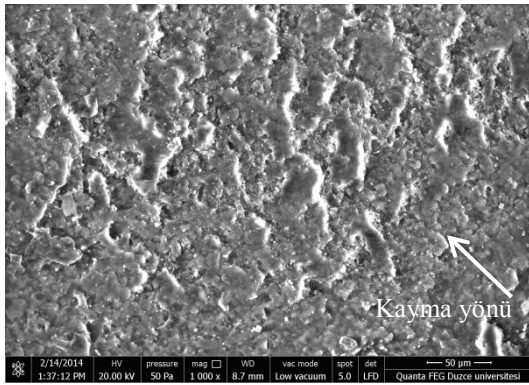
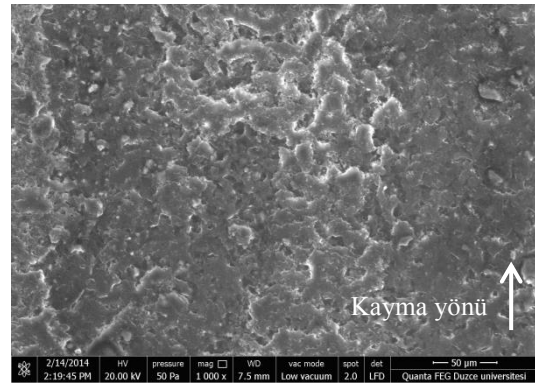
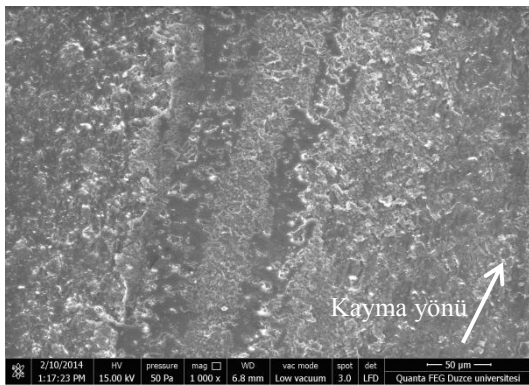
mekanizmaların çalışması görülmektedir. Aşınma davranışları genel olarak adezif ve bir miktar abrazif aşınmanın etkisi altındadır. Bu durum sıcaklığın etkisinin ön planda olmadığını göstermektedir.



a) Saf epoksi

b) %30 Al₂O₃ dolguluc) %30TiO₂ dolgulu

d)%30 Uçucu kül dolgulu

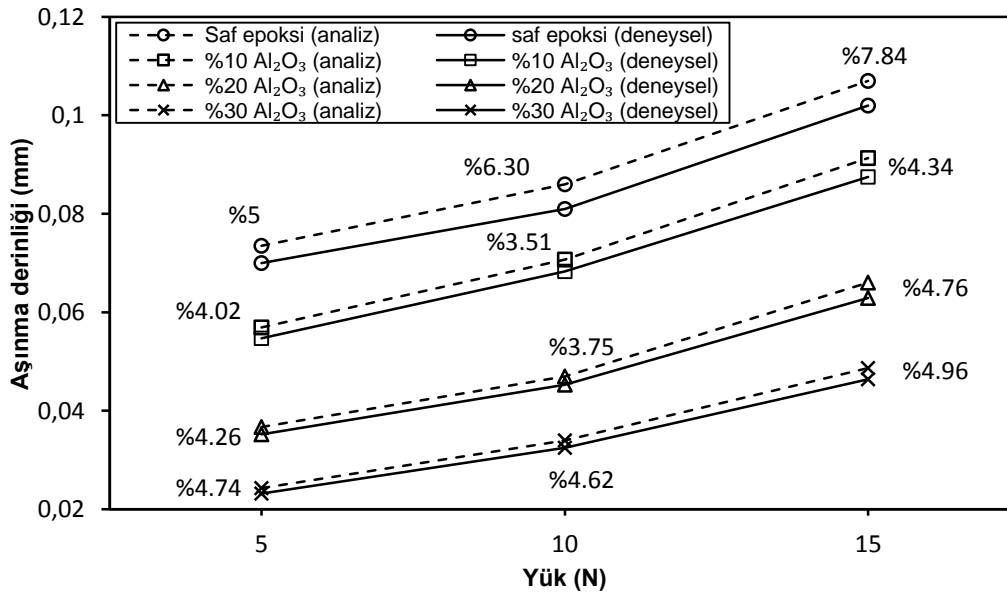
e) % 10 nano Al₂O₃ dolguluf) % 10 nano TiO₂ dolgulu

g) % 10 nano kil dolgulu

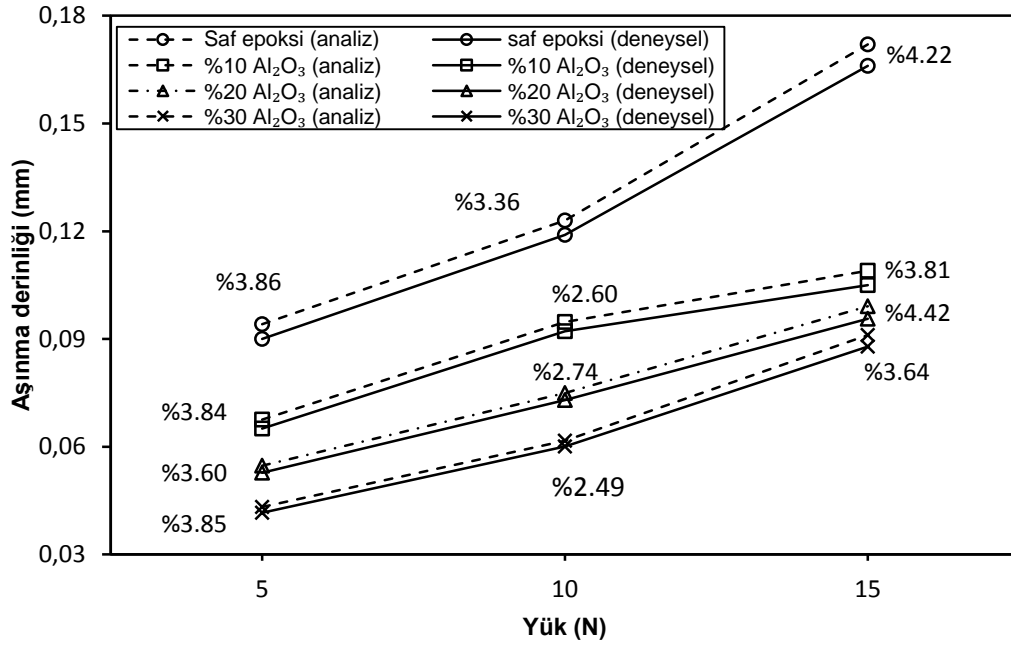
Şekil 4.17. Epoksi kompozitlerin 0,8 m/s kayma hızı ve 15 N yük şartındaki pim aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri

4.3. Deneysel Aşınma Sonuçlarının Sonlu Elemanlar Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

Şekil 4.18 ve şekil 4.19' de epoksi Al₂O₃ kompozitlerinin 0,4 ve 0,8 m/s kayma hızlarında ve farklı yüklerdeki aşınma davranışının deneysel ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlardan hacimsel olarak elde edilen aşınma miktarları pim alanına bölünerek ortalama aşınma derinlikleri bulunmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemine Archard'ın lineer aşınma modelinin dahil edilmesinin sonucunda deneysel ve analiz sonuçlarının birbirlerine oldukça yakın oldukları görülmektedir. Analiz sonuçları deneysel sonuçlardan daha yüksek değerlerdedir. Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitler için sapma oranları şekilde görülmektedir. Tüm malzemelerin deneysel ve analiz sonuçları Ek. B'deki tabloda verilmiştir ve analiz çalışmalarının deneysel sonuçlardan sapma oranları %2,49 ile %7,84 arasında değişmektedir. Bölüm 2'de verilen deneysel aşınma sonuçları lineer bir davranış göstermektedir ve analiz sonuçlarının Archard teorisi ile kurulan modeldeki sonuçlarla uyumlu çıkması bu modelin saf epoksi ve epoksi kompozitler için uygun olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 4.18. Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s kayma hızında ve farklı yüklerdeki aşınma davranışının deneysel ve analiz sonuçları



Şekil 4.19. Al₂O₃ dolgulı epoksi kompozitlerin 0,8 m/s kayma hızında ve farklı yüklerdeki aşınma davranışının deneysel ve analiz sonuçları

BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada epoksi reçinesine tanecik büyüklüğü nano ve mikro seviyelerdeki dolgular eklenerek kompozit malzemeler hazırlanmıştır. Hazırlanan kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik davranışları incelenmiştir. Mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, eğilme ve sertlik deneyleri yapılmıştır. Tribolojik davranışlarını incelemek için pim disk deney cihazında sürtünme ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada farklı oranlarda eklenen dolgu tiplerinin ve bu dolguların tanecik boyutlarının kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklere etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın diğer bir amacı da malzemelerin aşınma davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve analizidir. Analiz sonuçlarından aşınma derinlikleri ve aşınma sonucu oluşan gerilmeler elde edilmiştir

5.1. Sonuçlar

- Epoksi reçinesine eklenen mikro dolgularda saf epoksiye göre elastiklik modülü, eğilme modülü ve sertlik artmıştır. Çekme ve eğilme dayanımları ile kopma uzama değerleri azalmıştır.
- Epoksi reçinesine nano dolgular eklendiğinde en yüksek çekme dayanımı %2,5 nano Al_2O_3 ve Nano TiO_2 dolgulu kompozitlerde en yüksek eğilme dayanımı %5 nano TiO_2 dolgulu kompozitlerde olmaktadır. Dolgu oranının artmasıyla çekme, eğilme dayanımları ve kopma uzama değerleri azalmıştır. Elastiklik modülü, eğilme modülü ve sertlik artmıştır.
- Epoksi reçinesindeki mikro dolgu oranının artmasıyla genel olarak sürtünme katsayıları ve aşınma oranları düşmektedir.

- Nano dolgulu epoksi kompozitlerin en iyi sürtünme ve aşınma performansları %2,5 dolgu oranında elde edilmiştir. Dolgu oranının artmasıyla sürtünme katsayıları ve aşınma oranları artmaktadır.
- Mikro dolgulu kompozitler nano dolgulu kompozitlere göre daha iyi sürtünme ve aşınma performansları sergilemişlerdir.
- Sürtünme ve aşınma deneylerinde yükün artışıyla saf epoksi ve kompozitlerin genel olarak sürtünme katsayısı düşmektedir. Özgül aşınma oranları yükselmektedir. Hızın artışıyla saf epoksi ve kompozitlerin sürtünme katsayısı azalmaktadır. Özgül aşınma oranları yükselmektedir.
- Sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında oluşan sıcaklık değişimleri epoksinin camsı geçiş sıcaklığının oldukça altında olmaktadır. Bu sıcaklık değişimleri içyapıyı etkilemeyecek seviyelerdedir.
- Aşınma mekanizmalarında ağırlıklı olarak adeziv ve biraz abrazif mekanizma etkilidir.
- Archard modelinin lineer davranışlı malzemeler için uygun bir model olduğu görülmüştür.
- Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme ve analiz sonucunda elde edilen aşınma derinlikleri ve deneysel sonuçlar arasında büyük bir uyum olmaktadır. Ayrıca sonlu elemanlar analizi ile aşınma sonucu pim numunelerinde oluşan gerilmeler elde edilmiştir. Böylece farklı sürtünme katsayıları nedeniyle pim numuneleri üzerinde oluşan gerilme dağılımlarını inceleyebilme olanağı elde edilmiştir.

5.2. Öneriler

- Yapılan çalışmada kompozit malzemeleri üretmek için mekanik üretim yöntemleri sınırlı kalmaktadır. Mekanik üretim yöntemlerinin yanı sıra

kimyasal yüzey geliştirme ve kaplama yöntemleri de eklenerek yüksek dolgu oranlı ve daha yüksek performanslı kompozit malzemeler üretilebilir.

- Yapılan modelleme çalışması ve geliştirilen algoritma aşınma sisteminin pim disk deney düzeneğine uygulanmasına dayanmaktadır. Bu modelleme genel olarak sabit yük altında kaymalı temas, çevrimsel temas gibi yükleme durumlarına maruz kalan sistemlere uyarlanabilir. Bu nedenle özellikle karmaşık geometriye sahip elemanların temas basınçları, yüzey deformasyonları ve yüzey gerilmelerinin incelenmesinde etkin bir rol üstlenebilir.
- Model üç boyutlu hale dönüştürülerek temas yüzeylerindeki deformasyonlar incelenebilir.
- Modele sıcaklık içeren fonksiyonlar eklenerek bu alana daha geniş bakma imkanı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] EDWARDS, K.L., A Designer's to Engineering Polymer Technology, Materials and Design, 19, 57-67, 1998.
- [2] ŞAHİN Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2006.
- [3] ALDOUSIRI, B., SHALWAN, A., and CHIN, C. W., A Review on Tribological Behaviour of Polymeric Composites and Future Reinforcements, Advances in Materials Science and Engineering, Volume: 2013, pp. 1-8, 2013».
- [4] SOYDAN, Y., ULUKAN, L., Temel Triboloji, Tagem Kopisan Yayınları, Sakarya, 2013.
- [5] SHACHELFORD, J. F., Introduction To Material Science For Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2000.
- [6] ŞAHİN, S., Malzeme Seçimi Ders Notları, Celal Bayar Üniversitesi, Malzeme Mühendisliği, 2013.
- [7] BLAGA, A., Properties and Behaviour of Plastics, National Research Council, Division of Building Research, Canada, 1973.
- [8] FU, S.Y., FENG, X. Q., LAUKE, B., MAI, Y.W., Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites, Composites Part B: Engineering, Volume 39, Issue 6, pp. 933–961, 2008.
- [9] FOROUTAN, F., JAVADPOUR, J., KHAVENDI, A., ATAI, M., REZAIE, H.R., Mechanical Properties of Dental Composite Materials Reinforced with Micro and Nano Size Al₂O₃ Filler Particles, Iranian Journal of Materials Science & Engineering, 8 (2), 25-33, 2011.
- [10] NIELSEN, L., LANDEL, R., Mechanical Properties of Polymers and Composites, Marcel Decker, New York, 1994.
- [11] FRIEDRICH, K., FAKIROV, S. and ZHANG, Z., Polymer Composites, From Nano to Macro Scale, Springer, Chapter 3, Pages:45-76, USA, 2005.

- [12] SHI, Q., WANG, L., Yu, H., JIANG, S., ZHAO, Z., DONG, X., A Novel Epoxy Resin/CaCO₃ Nanocomposite and its Mechanism of Toughness Improvement, *Macromolecular Materials and Engineering*, Volume 291, Issue 1, pp. 53–58, 2006.
- [13] ASİ, O., Mechanical Properties of Glass-Fiber Reinforced Epoxy Composites Filled with Al₂O₃ Particles, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol: 28, No:23, pp. 2861-2867, 2009.
- [14] WETZEL, B., HAUPERT, F., ZHANG, M.Q., Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance, Volume 63, Issue 14, pp. 2055–2067, 2003.
- [15] JAWAHAR, P., GNANAMOORTHY, R., BALASUBRAMANIAN, M., Flexural and tribological properties of polyester-clay nanocomposites, *Journal of Materials Science*, Volume 40, Issue 16, pp. 4391-4393, 2005.
- [16] TURAIİF, H.A.A., Effect of nano TiO₂ particle size on mechanical properties of cured epoxy resin, Volume 69, Issue 3, pp. 241–246, 2010.
- [17] İNCEOĞLU, A.B. and YILMAZER, U., Mechanical Properties of Unsaturated Polyester/ Montmorillonate Composites, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 703, pp. 387-392, 2002.
- [18] JAJAM, K.C., TİPPUR, H.V., Quasi-static and dynamic fracture behavior of particulate polymer composites: A study of nano- vs. micro-size filler and loading-rate effects, Volume 43, Issue 8, pp. 3467–3481, 2012.
- [19] ZHOU, Y., WHITE, E., HOSUR, M., JEELANI, S., Effect of particle size and weight fraction on the flexural strength and failure mode of TiO₂ particles reinforced epoxy, Volume 64, Issue 7, pp. 806–809, 2010.
- [20] LIN, J.C., CHANG, L.C., NIEN, M.H., HO, H.L., Mechanical behavior of various nanoparticle filled composites at low-velocity impact, Volume 74, Issue 1, pp. 30-36, 2006.
- [21] EVORA, V.M.F., SHUKLA, A., Fabrication, characterization, and dynamic behavior of polyester/TiO₂ nanocomposites, *Materials Science and Engineering: A*, pp.358–366, 2003.
- [22] BASKARAN, R., SAROJADEVI, M., VIJAYAKUMAR, C. T., Unsaturated polyester nanocomposites filled with nano alumina, *J Mater Sci*, 46: 4864–4871, 2011.
- [23] ZHANG, J., HAN, B.,ZHOU, N.L., FANG, J., WU, J., MA, Z.M., MO, H., SHEN, Preparation and characterization of nano/micro-calcium carbonate particles/polypropylene composites, Volume 119, Issue 6, pp. 3560–3565, 2011.

- [24] XU, Y., LI, M., GUO, Y., LU, F., Structure and Properties of Modified Unsaturated Polyester Resin by Nano-TiO₂, *Journal of Material Science and Technology*, 19(06), pp.578-580, 2003.
- [25] BASKARAN, R., SAROJADEVI, M., VIJAYAKUMAR, C.T., Mechanical and thermal properties of unsaturated polyester/calcium carbonate nanocomposites, *Journal of Reinforced Plastics*, 30(18) 1549–1556, 2011.
- [26] YINGHONG, X., XIN, W., XUJIE, Y., LUDE, L., Nanometre-sized TiO₂ as applied to the modification of unsaturated polyester resin, *Materials Chemistry and Physics*, Volume 77, Issue 2, pp. 609–611, 2003.
- [27] TURAIF, H.A.A., Effect of nano TiO₂ particle size on mechanical properties of cured epoxy resin, *Progress in Organic Coatings*, Volume 69, Issue 3, pp. 241–246, 2010.
- [28] SHI, G., ZHANG, M.Q., RONGA, M.Z., WETZEL, B., FRIEDRICH, K., Friction and wear of low nanometer Si₃N₄ filled epoxy composites, *Wear*, Volume 254, Issues 7–8, pp. 784–796, 2003.
- [29] GUPTA, N., LIN, T.C., SHAPIRO, M., Clay-epoxy nanocomposites: Processing and properties, *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, Volume 59, Issue 3, pp. 61-65, 2007.
- [30] ZHANG, G., SCHLARB, A.K., TRIA, S., ELKEDIM, O., Tensile and tribological behaviors of PEEK/nano-SiO₂ composites compounded using a ball milling technique, *Composites Science and Technology*, Volume 68, Issues 15–16, pp. 3073–3080, 2008.
- [31] ZHOU, G., MOVVA, S., LEE, L.J., Preparation and Properties of Nanoparticle and Long-Fiber-Reinforced Unsaturated Polyester Composites, *Polymer Composites*, Volume 30, Issue 7, pp. 861–865, 2009.
- [32] MANG, T., BOBZIN, K., BARTELS, T., *Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*, Wiley-VCH, Weinheim, 2011.
- [33] GAHR, K.H.Z, *Microstructure and Wear of Materials*, Elsevier Science Publishing, New York, 1987.
- [34] Bhushan, B., *Introduction To Tribology*, John Wiley & Sons, Newyork, 2002.
- [35] WIELEBA, W., *The Mechanism of Tribological Wear of Thermoplastic Materials*, *Archieves of Civil and Mechanical Engineering*, Vol: VII, No:4, pp. 185-199, 2007.

- [36] BAHADUR, S., T, The development of transfer layers and their role in polymer tribology, Volume 245, Issues 1–2, Pages 92–99, 2000.
- [37] QUAGLINI, V., DUBINI, P., Friction of Polymers Sliding on Smooth Surfaces, Advances in Tribology, Volume 2011, pp. 1-8, 2011.
- [38] SHOOTER, K.V., TABOR, D., The Frictional Properties of Plastics, Proceedings of the Physical Society. Section B, Volume: 65, Number: 9, Pages: 661–671, 1952.
- [39] SINHA, S.K., BRISCOE, B.J., Polymer Tribology, Imperial College Press, London, 2009.
- [40] BHUSHAN, B., Modern Tribology Handbook, CRC Press, Boca Raton, 2001.
- [41] CZICHOS H., Tribology, Elsevier, Amsterdam, 1978.
- [42] MYSHKIN N.K., PETROKEVETS M.I., KOVALEV A.V., Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer, Volume 38, Issues 11–12, pp.910–921, 2006.
- [43] JINTANG, G., Tribochemical effects in formation of polymer transfer film, Volume 245, Issues 1–2, pp. 100–106, 2000.
- [44] JINTANG, G., JIAZHEN, Z., HONGXIN, D., ASLE Proceedings of Third International Conference on Solid Lubrication, USA, p. 308, 1984.
- [45] BRISCOE, B.J., SINHA, S.K., Wear of polymers, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol: 216, pp. 401-413, 2002.
- [46] RYMUZA, Z., Tribology of Polymers, Archives Of Civil And Mechanical Engineering, Vol: VII, No. 4, pp. 177-184, 2007.
- [47] STEJIN, R.P., Friction and Wear of Plastics, Metal Eng, Q. 7, 371-383, 1967.
- [48] ARCHARD, J. F., Elastic Deformation and the Laws of Friction, Proceedings of the Royal Society of London A Vol:243, Pages:190-205,1957.
- [49] TANAKA, K., Some interesting problems that remain unsolved in my work on polymer tribology, Tribology International, Volume 28, Issue 1, pp.19–22, 1995.

- [50] KRAGELSKY, I.V., ALISIN V.V., Calculation of Wear Rate. in Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook, Vol:1, (Ed. Kragelsky I.V. and Alisin V.V.) Chap:3, Mir Publishers, Moscow, 1981.
- [51] EL-TAYEB, N.S.M., YOUSIF B.F., BREVERN, P.V., On the Effect of Counterface Materials on Interface Temperature and Friction Coefficient of GFRE Composite Under Dry Sliding Contact, American Journal of Applied Sciences, Vol: 2(11), pp. 1533-1540, 2005.
- [52] FRANKLIN, S. E., Wear experiments with selected engineering polymers and polymer composites under dry reciprocating sliding conditions, Volume 251, Issues 1–12, pp. 1591–1598, 2001.
- [53] BAHADUR, S., SUNKARA, C., Effect of transfer film structure, composition and bonding on the tribological behavior of polyphenylene sulfide filled with nano particles of TiO₂, ZnO, CuO and SiC, Wear, Volume 258, Issue 9, pp. 1411–1421, 2005.
- [54] SCHWARTZ, C.J., BAHADUR, S., Studies on the tribological behavior and transfer film–counterface bond strength for polyphenylene sulfide filled with nanoscale alumina particles, Wear, Volume 237, Issue 2, Pages 261–273, 2000.
- [55] LUDEMA, K.C., TABOR, D., The friction and visco-elastic properties of polymeric solids, Wear, Volume 9, Issue 5, pp. 329–348, 1966.
- [56] VINOGRADOV, G.V., BARTENEV, G.M., ELKIN A.I., MIKHAYLOV, V.K., Effect of temperature on friction and adhesion of crystalline polymers, Wear, Volume 16, Issue 3, pp. 213–219, 1970.
- [57] HERMANN, D., RAMKUMAR, S.S., SESHAIYER, P., PARAMESWARAN, S., Frictional study of woven fabrics: The relationship between the friction and velocity of testing, Journal of Applied Polymer Science, Volume 92, Issue 4, pp. 2420–2424, 2004.
- [58] GRECO, A.C., ERCK, R., AJAYI, O., FENSKE, G., Effect of reinforcement morphology on high-speed sliding friction and wear of PEEK polymers, Wear, Volume 271, Issues 9–10, pp. 2222–2229, 2011.
- [59] CHO, M.H., The role of transfer film and back transfer behavior on the tribological performance of polyoxymethylene in sliding, Journal of Mechanical Science and Technology 23, 2291-2298, Journal of Mechanical Science and Technology 23, 2291-2298, 2009.
- [60] KRISHNA, K.G., DIVAKAR, C., VENKATESH, K., MOHAN, C.B., LOHITH, K.S.M., Tribological studies of polymer based ceramic–metal composites processed at ambient temperature, Wear, 266, pp. 878-883, 2009.

- [61] JAWAHAR, P., GNANAMOORTHY, R., BALASUBRAMANIAN, M., Tribological behaviour of clay-thermoset polyester nanocomposites, *Wear*, 261, pp. 835-840, 2006.
- [62] ZHANG, G., SCHLARB, A.K., TRIA, S., ELKEDIM, O., Tensile and tribological behaviors of PEEK/nano-SiO₂ composites compounded using a ball milling technique, *Composites Science and Technology*, Volume 68, Issues 15–16, pp. 3073–3080, 2008.
- [63] SHI, G., ZHANG, M.Q., RONGA, M.Z., WETZEL, B., FRIEDRICH, K., Friction and wear of low nanometer Si₃N₄ filled epoxy composites, *Wear*, Volume 254, Issues 7–8, pp. 784–796, 2003.
- [64] YUA, S., HUA, H., MAB, J., YIN, J., Tribological properties of epoxy/rubber nanocomposites, *Tribology International*, Volume 41, Issue 12, pp. 1205–1211, 2008.
- [65] XING, X.S., LI, R.K.Y., Wear behavior of epoxy matrix composites filled with uniform sized sub-micron spherical silica particles, *Wear*, Volume 256, Issues 1–2, pp. 21–26, 2004.
- [66] CHANG, L., FRIEDRICH, K., Enhancement effect of nanoparticles on the sliding wear of short fiber-reinforced polymer composites: A critical discussion of wear mechanisms, *Tribology International*, Volume 43, Issue 12, pp. 2355–2364, 2010.
- [67] CHANG, L., ZHANG, Z., Tribological properties of epoxy nanocomposites: Part II. A combinative effect of short carbon fibre with nano-TiO₂, *Wear*, Volume 260, Issues 7–8, pp. 869–878, 2006.
- [68] GUO, Q.B., RONG, M.Z., JIA, G.L., LAU, K.T., ZHANG, M.Q., Sliding wear performance of nano-SiO₂/short carbon fiber/epoxy hybrid composites, *Wear*, Volume 266, Issues 7–8, pp. 658–665, 2009.
- [69] CHAND, N., NAIK, A., NEOGI, S., Three-body abrasive wear of short glass fibre polyester composite, *Wear*, Volume 242, Issues 1–2, pp. 38–46, 2000.
- [70] TAYEB, N.S.M.E., A study on the potential of sugarcane fibers/polyester composite for tribological applications, *Wear*, Volume 265, Issues 1–2, pp. 223–235, 2008.
- [71] QUINTELIER, J., BAETS, P.D., SAMYN, P., HEMELRIJCK, D.V., On the SEM features of glass–polyester composite system subjected to dry sliding wear, *Wear*, Volume 261, Issues 7–8, pp. 703–714, 2006.

- [72] TAYEB, N.S.M. E., YOUSIF, B.F., Evaluation of glass fiber reinforced polyester composite for multi-pass abrasive wear applications, *Wear*, Volume 262, Issues 9–10, pp. 1140–1151, 2007.
- [73] SURESHA, B., SIDDARAMAIAH, KISHORE, SEETHARAMU, S., KUMARAN, P.S., Investigations on the influence of graphite filler on dry sliding wear and abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites, Volume 267, Issues 9–10, pp.1405–1414, 2009.
- [74] KISHORE, SAMPATHKUMARAN, P., SEETHARAMU, S., THOMAS, P., JANARDHANA, M., A study on the effect of the type and content of filler in epoxy–glass composite system on the friction and slide wear characteristics, *Wear*, *Wear* 259, pp. 634–641, 2005.
- [75] BASAVARAJAPPA, S., ELLANGO VAN, S., ARUN, K. V., studies on dry sliding wear behaviour of Graphite filled glass – epoxy composites, *Materials and Design*, Volume: 30, Issue:7, pp. 2670 – 2675, 2009.
- [76] HASHMI, S.A.R., DWIVEDI, U.K., CHAND, N., Graphite modified cotton fibre reinforced polyester composites under sliding wear conditions, *Wear*, Volume 262, Issues 11–12, pp. 1426–1432, 2007.
- [77] CHANG, L., ZHANG, Z., YE, L., FRIEDRICH, K., Tribological properties of epoxy nanocomposites: III. Characteristics of transfer films, *Wear*, Volume 262, Issues 5–6, pp. 699–706, 2007.
- [78] LARSEN, T.Ø., ANDERSEN, T.L., THORNING, B., HORSEWELL, A., VIGILD, M.E., Changes in the tribological behavior of an epoxy resin by incorporating CuO nanoparticles and PTFE microparticles, *Wear*, Volume 265, Issues 1–2, 203–213, 2008.
- [79] CHANG, L., ZHANG, Z., BREIDT, C., FRIEDRICH, K., Tribological properties of epoxy nanocomposites: I. Enhancement of the wear resistance by nano-TiO₂ particles, *Wear*, Volume 258, Issues 1–4, pp. 141–148, 2005.
- [80] TOPCU, M., TAŞGETİREN, S., Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu, *Sonlu Elemanlar Ders Notları*, Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2013.
- [81] GÜNAY, D., Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri, *Sakarya Üniversitesi Yayınları*, Adapazarı, 1993.
- [82] BENABDALLAH, H., OLENDER, D., Finite element simulation of the wear of polyoxymethylene in pin-on-disc configuration, *Wear*, Volume 261, Issues 11–12, pp. 1213–1224, 2006.
- [83] PODRA, P., ANDERSSON, S., Simulating sliding wear with finite element method, *Tribology International*, Volume 32, Issue 2, pp. 71–81, 1999.

- [84] HEGADEKATTE, V., HUBER, N., KRAFT, O., Modeling and simulation of wear in a pin on disc tribometer, *Tribology Letters*, Volume 24, Issue 1, pp. 51-60, 2006.
- [85] PODRA, P., ANDERSSON, S., Wear simulation with the Winkler surface model, *Wear*, Volume 207, Issues 1–2, pp. 79–85, 1997.
- [86] ÖQVIST, M., Numerical simulations of mild wear using updated geometry with different step size approaches, *Wear*, Volume 249, Issues 1–2, 2001.
- [87] SÖDERBERG, A., ANDERSSON, S., Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software, *Wear*, Volume 267, Issue 12, pp. 2243–2251, 2009.
- [88] ABU BAKAR, A. R., LI, L., JAMES, S., OUYANG, H., SIEGEL, J.E., Wear simulation and its effect on contact pressure distribution and squeal of a disc brake, *Proceedings of the International Conference on Vehicle Braking Technology* . pp. 233-242, 2006.
- [89] HEMANTH, J., Finite Element Wear Behavior Modeling of Al/Al₂SiO₅/C Chilled Hybrid Metal Matrix Composites (CHMMCs), *Materials Sciences and Applications*, Vol. 2 No. 7, pp. 878-890, 2011.
- [90] ASHRAF, M.A., NAJAFABADI, B.S., GÖL, Ö., SUGUMAR, D., Numerical simulation of sliding wear for a polymer–polymer sliding contact in an automotive application, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 41, Issue 11-12, pp. 11-18, 2009.
- [91] BORTOLETO, E.M., ROVANI, A.C., SERIACOPI, V., PROFITO, F.J., ZACHARIADIS, D.C., MACHADO, I.F., SINATORA, A., SOUZA, R.M., Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test, *Wear*, Volume 301, Issues 1–2, pp. 19–26, 2013.
- [92] JOURDAN, F., SAMIDA, A., An implicit numerical method for wear modeling applied to a hip joint prosthesis problem, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 198, Issues 27–29, pp. 2209–2217, 2009.
- [93] AKARCA, S. S., ALTENHOF, W. J., ALPAS, A. T., A Coupled Thermal and Mechanical Model of Sliding Wear, 9th International LS-DYNA Users Conference, *Simulation Technology* (4), pp. 23-32, 2006.
- [94] KONYA, L., VARADI, K., FRIEDRICH, K., Finite Element Modelling of Wear Process of A Peek-Steel Sliding Pair At Elevated Temperature, *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.* Vol: 49, No:1, pp. 25-38, 2005.

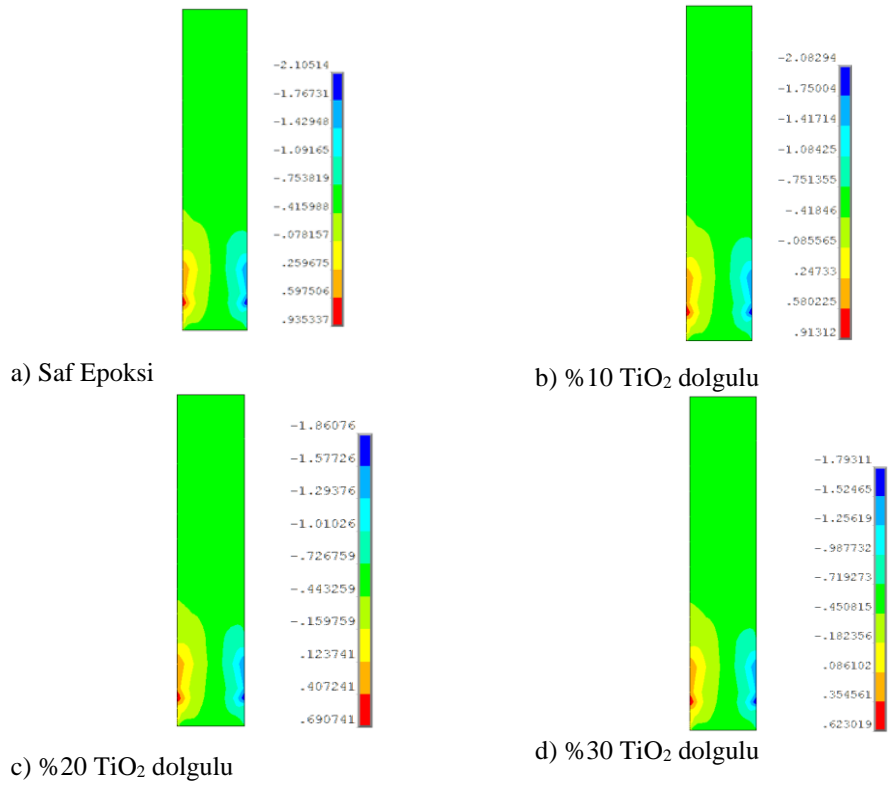
- [95] THURESSON, D., Stability of sliding contact—Comparison of a pin and a finite element model, *Wear*, Volume 261, Issues 7–8, pp. 896–904, 2005.
- [96] CANTIZANO, A., CARNICERO, A., ZAVARISE, G., Numerical simulation of wear-mechanism maps, *Computational Materials Science*, Volume 25, Issues 1–2, pp. 54–60, 2002.
- [97] GONZALEZ, C., MARTÍN, A., LLORCA, J., GARRIDO, M.A., GÓMEZ, M.T., RICO, A., RODRÍGUEZ, J., Numerical analysis of pin on disc tests on Al–Li/SiC composites, *Wear*, Volume 259, Issues 1–6, pp. 609–612, 2005.
- [98] WANG, Z., DRAPER, D., HODAPP, T., Radial Lip Seal Simulation Using ANSYS Non-standard Procedures, *International ANSYS-Conference*, 2006.
- [99] HAN, J., SIEGMUND, T., Computational simulations of delamination wear in a coating system, *Wear*, Volume 267, Issues 9–10, pp. 1680–1687, 2009.
- [100] REZAEI, A., PAEPEGEM, W.V., BAETS, P.D., OST, W., DEGRIECK, J., Adaptive finite element simulation of wear evolution in radial sliding bearings, *Wear*, Volume 296, Issues 1–2, pp. 660–671, 2012.
- [101] VENTZEL, S.N., CIOC, S., MARINESCU, L., A wear model and simulation of superfinishing process: analysis for the superfinishing of bearing rings, *Wear*, Volume 260, Issues 9–10, pp. 1061–1069, 2006.
- [102] SHEN, X., CAO, L., LI, R., Numerical Simulation of Sliding Wear Based on Archard Model, *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, 2010 International Conference, pp. 325–329, 2010.
- [103] ZHANG, W.M., MENG, G., Numerical simulation of sliding wear between the rotor bushing and ground plane in micromotors, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 126, Issue 1, pp. 15–24, 2006.
- [104] HAN, X., HUA, L., Prediction of contact pressure, slip distance and wear in cold rotary forging using finite element methods, *Tribology International*, Volume 44, Issue 12, pp. 1742–1753, 2011.
- [105] SFANTOS, G.K., ALIABADI, M.H., Wear simulation using an incremental sliding Boundary Element Method, *Wear*, Volume 260, Issues 9–10, pp. 1119–1128, 2006.
- [106] ASTM Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, *American Society for Testing and Materials*, 2010.
- [107] SURYANI, E., RASHID, A., AKIL, H. MD., ARIFFIN, K., KOOI, C. C., The Flexural and Morphological Properties of α -Alumina Filled Epoxy Composites, *Malaysian Polymer Journal*, Vol 1, No. 1, pp. 25–38, 2006.

- [108] ASTM D790-10 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, American Society for Testing and Materials, 2010.
- [109] ASTM D2583-07, Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor.
- [110] ASTM G99 - 05 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, American Society for Testing and Materials, 2010.
- [111] SARKAR, A. D., Friction and Wear, Academic Press, London, 1980.
- [112] RHEE, S. K., Wear Equation For Polymers Sliding Against Metal Surfaces, Wear, Volume:16, pp. 431-445, 1970.
- [113] BARWELL, F.T., Wear of metals, Wear 1, 317-332, 1958.
- [114] PAVELESCU, D., MUSAT, M., Some Relations for Determining the Wear of Composite Brake Materials, Wear, 27, pp:91-97, 1974.
- [115] HO, T. L., PETERSON, M. B., Wear Formulation for Aircraft Brake Material Sliding Against Steel, Wear, 43, pp: 199-210, 1977.
- [116] ARCHARD, J. F., Contact and Rubbing of Flat Surfaces, Journal of Applied Physics, 24, pp. 981-988, 1953.
- [117] PRASAD,S.N., CHIU, P.K., DASGUPTA, S., Compression and Sliding of an Elastic Rectangle Fixed Rigidly at The Base, Int. J. Eng. Sci. 14, 617–629, 1976.
- [118] ANSYS Inc. Help Documentation for Release 14.0.
- [119] Metals Handbook, Vol:1, Properties and Selection: Irons, Steels and High - Performance Alloys, ASM International, 10th Ed. 1990.
- [120] SHOKRIEHA, M. M., KEFAYATI, A.R. , CHITSAZZADE, M., Fabrication and mechanical properties of clay/epoxy nanocomposite and its polymer concrete, Materials and Design, 40, pp. 443–452, 2012.
- [121] QI, B., ZHANG, Q.X., BANNISTER, M., MAI, Y.W., Investigation of the mechanical properties of DGEBA-based epoxy resin with nanoclay additives, Composite Structures, Volume 75, Issues 1–4, pp. 514–519, 2006.
- [122] FERREIRA, J.A.M., COSTA, J.D.M., REIS, P.N.B., CAPELA, C., A STUDY ON THE STIFFNESS AND TOUGHNESS OF ENHANCED NANOFILLED EPOXY COMPOSITES, Anales de Mecanica de la Fractura 28, Vol: 1, pp. 291-296, 2011.

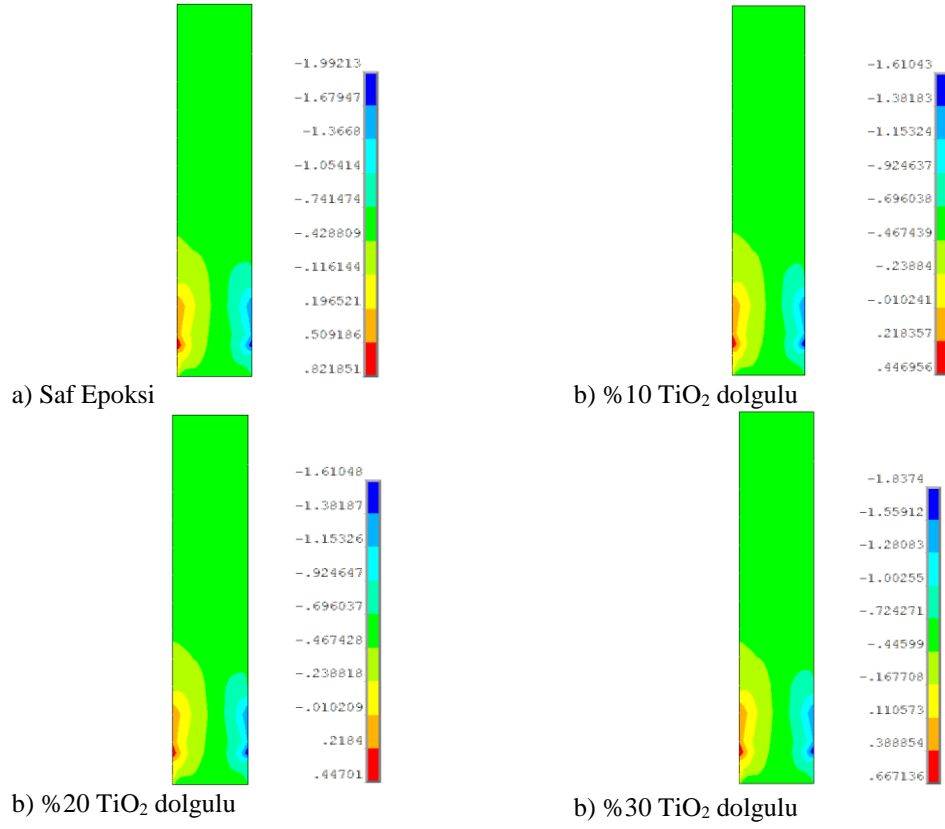
- [123] YASMIN, A., ABOT, J.L., DANIEL, I.M., Processing of clay/epoxy nanocomposites by shear mixing, *Scripta Materialia*, Volume: 49, Issue:1, pp. 81–86, 2003.
- [124] DONG, Y., MATHEW, R.A., CHAUDHARY, D.S., BICKFORD, T., HAROOSH, H., Flexural properties and morphological structures of epoxy composites reinforced with platelet and tubular nanoclays, *CHEMECA 2011*, Sep 18-21 2011, Sydney, Australia.
- [125] ALAMRI, H., LOW, I.M., ALOTHMAN, Z., Mechanical, thermal and microstructural characteristics of cellulose fibre reinforced epoxy/organoclay nanocomposites, *Composites: Part B*, Volume: 43, pp. 2762-2771, 2012.

EKLER

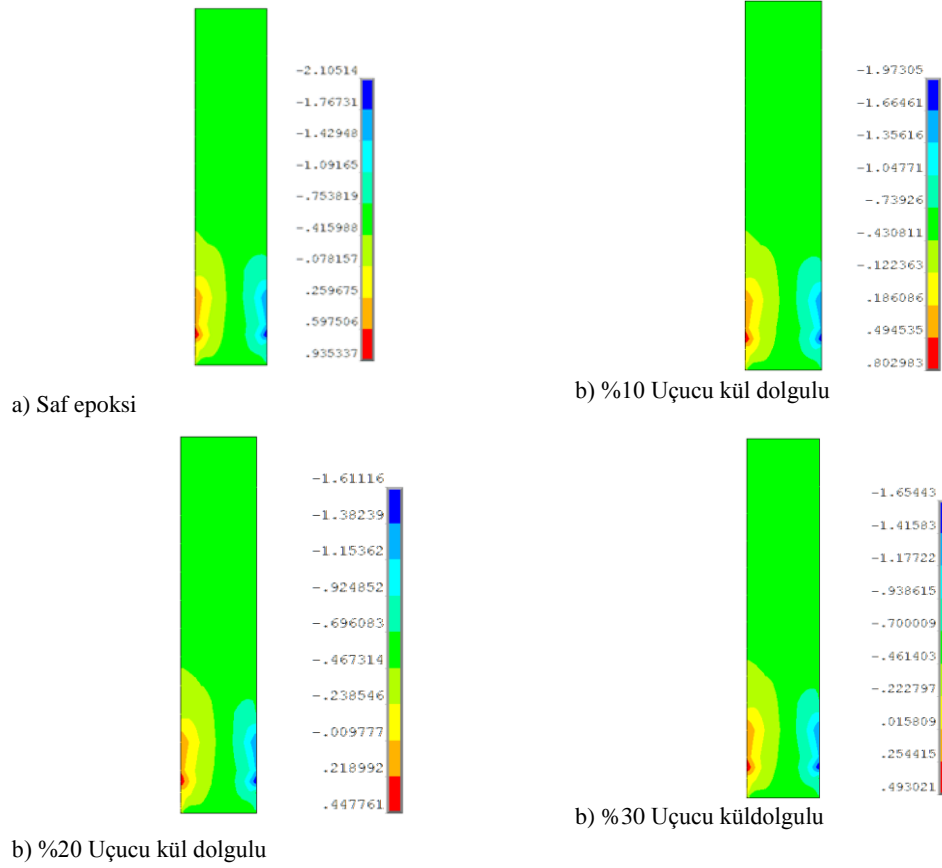
Ek A. Pimlerde Analiz Sonucu Oluşan Gerilme Dağılımları



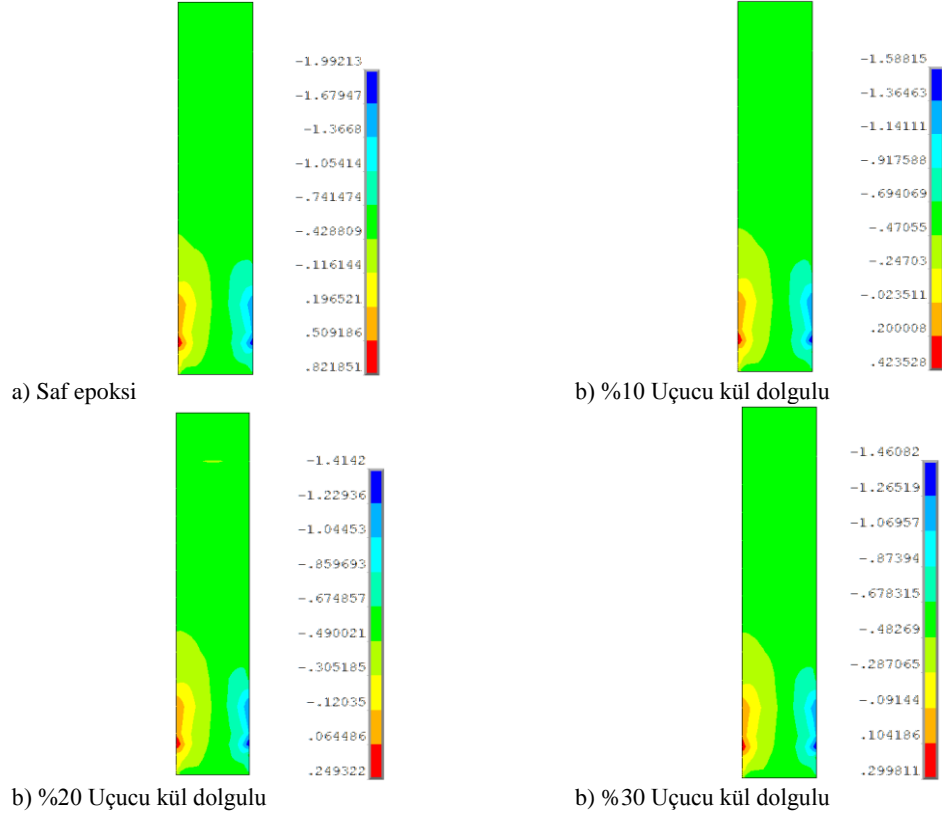
Şekil A.1. TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları



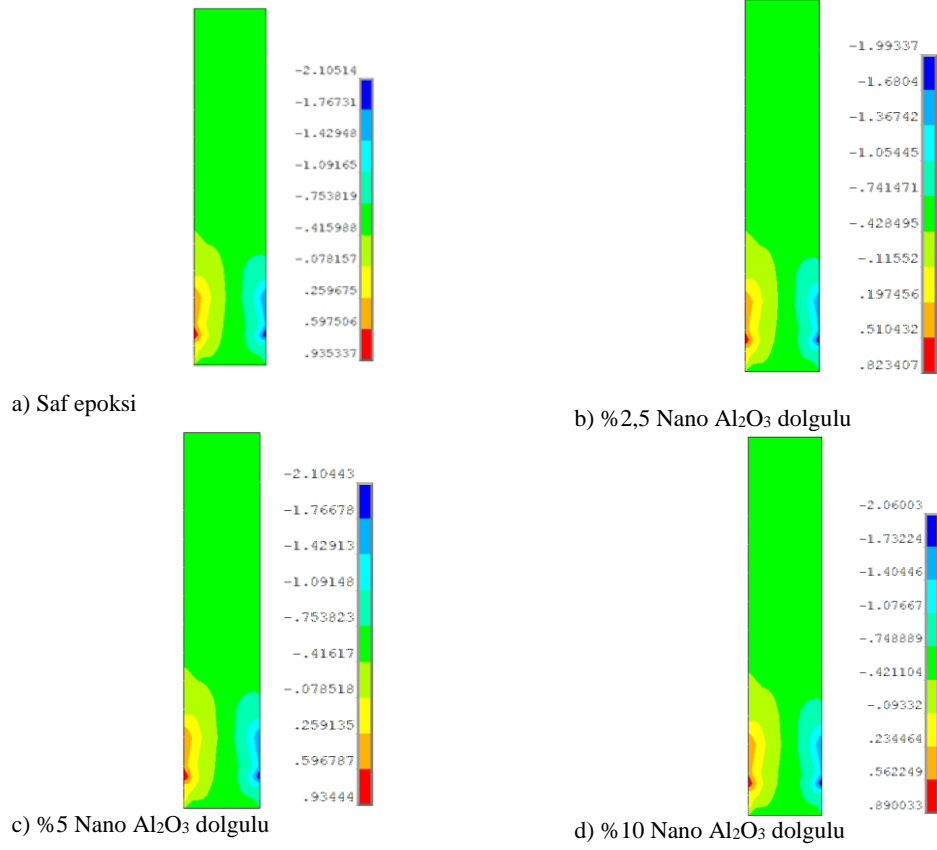
Şekil A.2. TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları



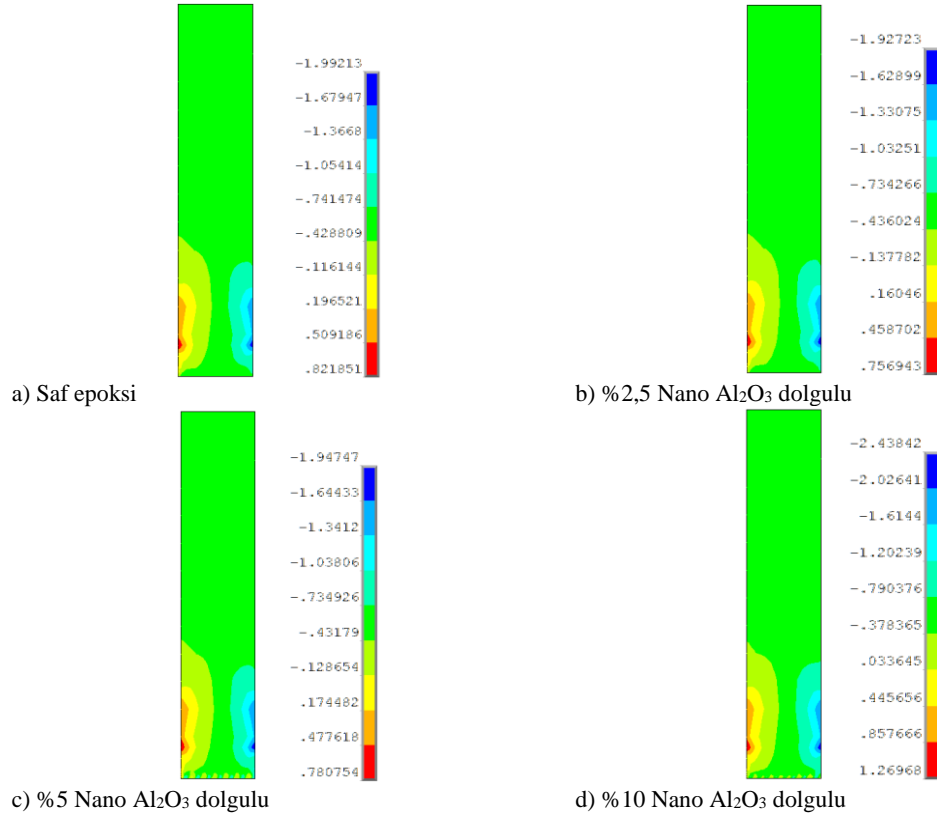
Şekil A.3. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları



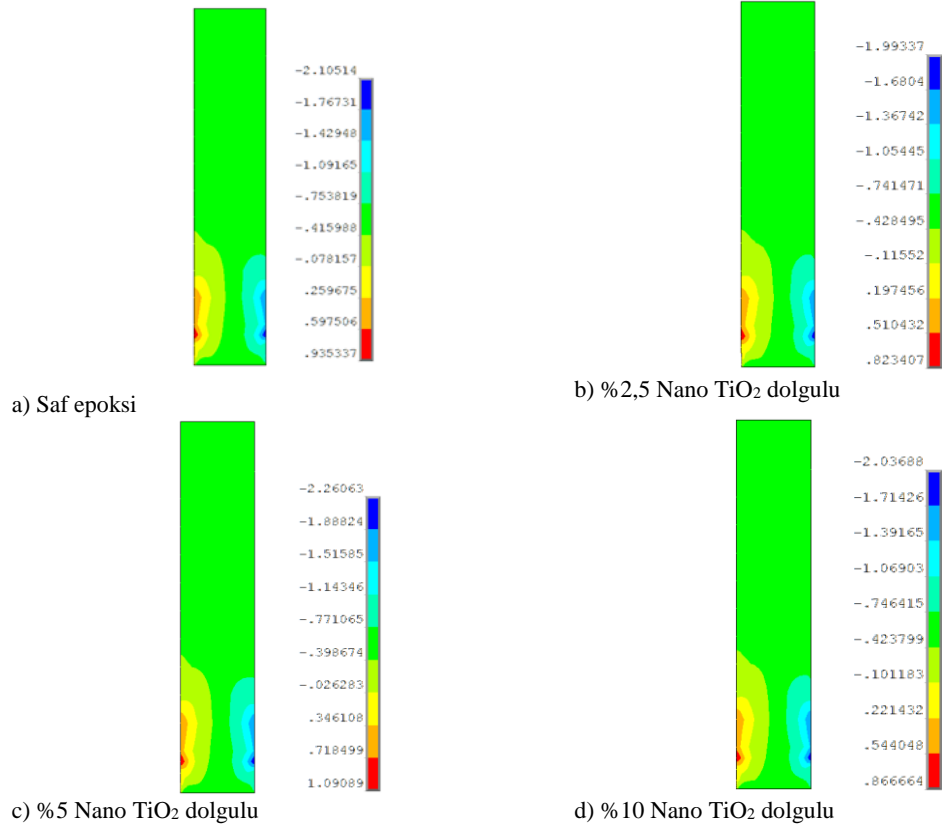
Şekil A.4. Uçucu kül dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları



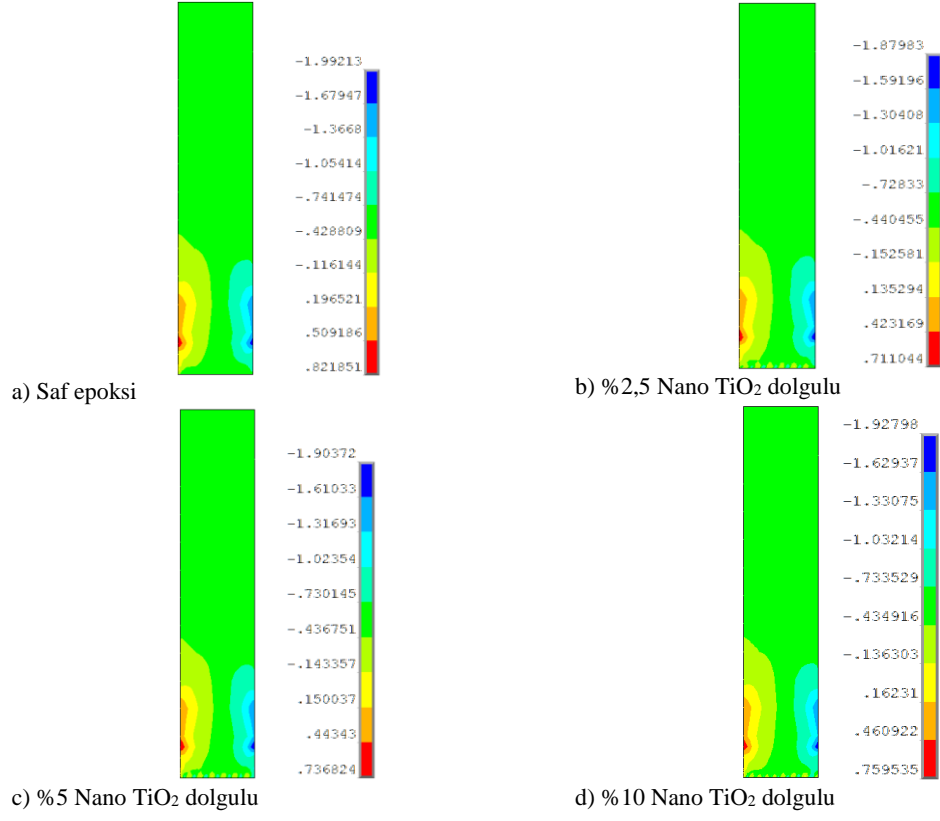
Şekil A.5. Nano Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları



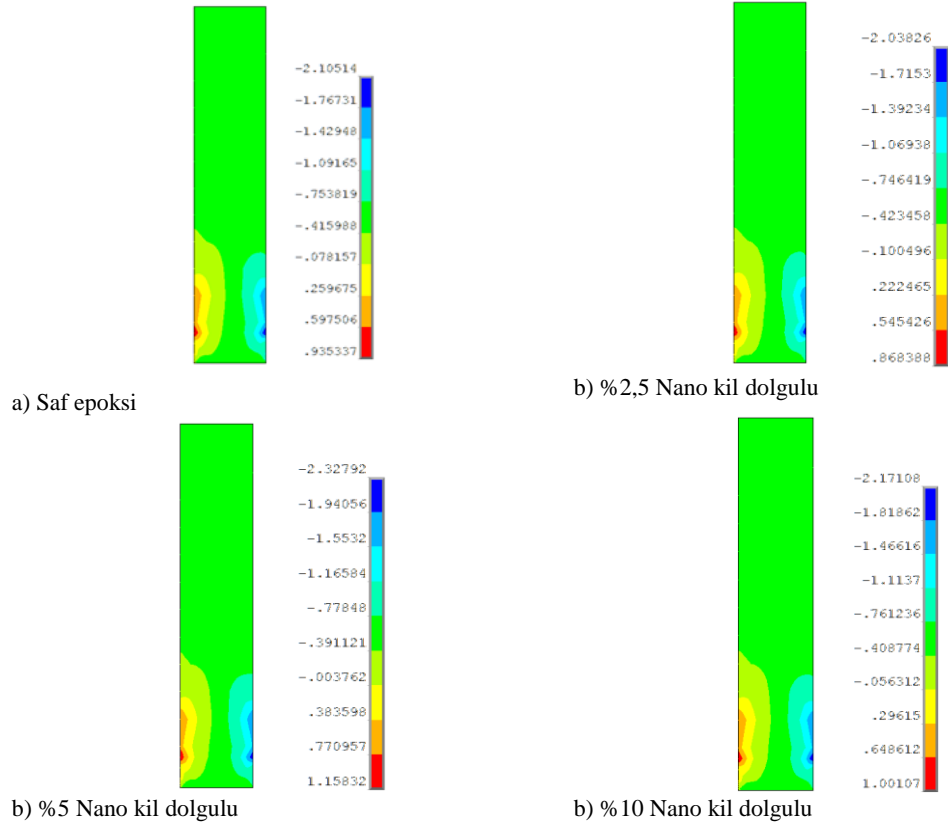
Şekil A.6. Nano Al₂O₃ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları



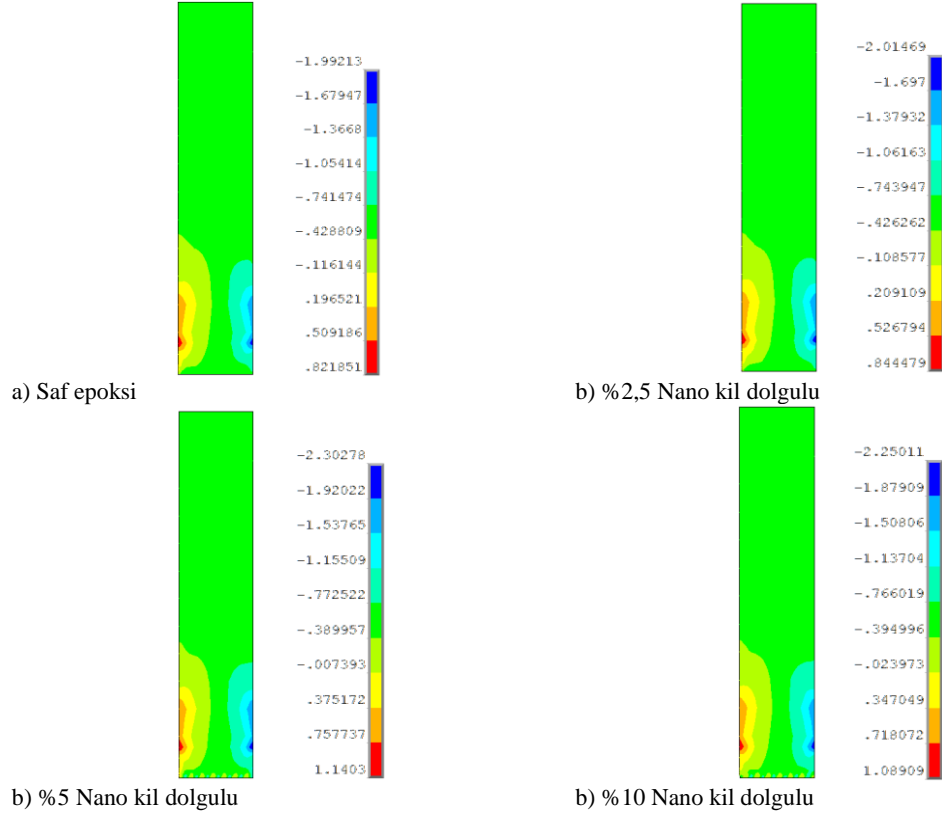
Şekil A.7. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları



Şekil A.8. Nano TiO₂ dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları



Şekil A.9. Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,4 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları



Şekil A.10 Nano kil dolgulu epoksi kompozitlerin 0,8 m/s ve 15N yük şartlarındaki aşınma davranışı sonucu oluşan normal gerilme dağılımları

Ek B. Epoksi Kompozitlerin Aşınma Analizi Sonuçları

Numune Adı	Hız (m/s)	Yük (N)	hdeneyssel (mm)	hanaliz (mm)	Sapma (%)
Saf epoksi	0,4	5	0,07	0,0735	5,00
Saf epoksi	0,4	10	0,081	0,0861	6,30
Saf epoksi	0,4	15	0,102	0,11	7,84
Saf epoksi	0,8	5	0,0907	0,0942	3,86
Saf epoksi	0,8	10	0,119	0,123	3,36
Saf epoksi	0,8	15	0,166	0,173	4,22
% 10 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	5	0,0547	0,0569	4,02
% 10 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	10	0,0683	0,0707	3,51
% 10 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	15	0,0875	0,0913	4,34
% 10 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	5	0,0651	0,0676	3,84
% 10 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	10	0,0923	0,0947	2,60
% 10 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	15	0,105	0,109	3,81
% 20 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	5	0,0352	0,0367	4,26
% 20 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	10	0,0453	0,047	3,75
% 20 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	15	0,063	0,066	4,76
% 20 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	5	0,0528	0,0547	3,60
% 20 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	10	0,073	0,075	2,74
% 20 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	15	0,095	0,0992	4,42
% 30 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	5	0,0232	0,0243	4,74
% 30 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	10	0,0325	0,034	4,62
% 30 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	15	0,0464	0,0487	4,96
% 30 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	5	0,0416	0,0432	3,85
% 30 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	10	0,0602	0,0617	2,49
% 30 Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	15	0,0879	0,0911	3,64
% 10 TiO ₂ dolgulu	0,4	5	0,0465	0,0485	4,30
% 10 TiO ₂ dolgulu	0,4	10	0,0657	0,068	3,50
% 10 TiO ₂ dolgulu	0,4	15	0,0903	0,0946	4,76
% 10 TiO ₂ dolgulu	0,8	5	0,0629	0,0651	3,50
% 10 TiO ₂ dolgulu	0,8	10	0,0958	0,098	2,30
% 10 TiO ₂ dolgulu	0,8	15	0,115	0,119	3,48
% 20 TiO ₂ dolgulu	0,4	5	0,0354	0,037	4,52
% 20 TiO ₂ dolgulu	0,4	10	0,0505	0,0522	3,37
% 20 TiO ₂ dolgulu	0,4	15	0,0657	0,0688	4,72
% 20 TiO ₂ dolgulu	0,8	5	0,0531	0,0548	3,20
% 20 TiO ₂ dolgulu	0,8	10	0,0784	0,0804	2,55
% 20 TiO ₂ dolgulu	0,8	15	0,0986	0,102	3,45
% 30 TiO ₂ dolgulu	0,4	5	0,0348	0,0361	3,74
% 30 TiO ₂ dolgulu	0,4	10	0,0536	0,0551	2,80
% 30 TiO ₂ dolgulu	0,4	15	0,0673	0,0701	4,16
% 30 TiO ₂ dolgulu	0,8	5	0,051	0,0527	3,33
% 30 TiO ₂ dolgulu	0,8	10	0,0766	0,0782	2,09
% 30 TiO ₂ dolgulu	0,8	15	0,104	0,108	3,85
% 10 Uçucu kül dolgulu	0,4	5	0,0448	0,0465	3,79
% 10 Uçucu kül dolgulu	0,4	10	0,0617	0,0637	3,24
% 10 Uçucu kül dolgulu	0,4	15	0,0869	0,0907	4,37
% 10 Uçucu kül dolgulu	0,8	5	0,0504	0,0521	3,37
% 10 Uçucu kül dolgulu	0,8	10	0,0897	0,0918	2,34
% 10 Uçucu kül dolgulu	0,8	15	0,132	0,135	2,27
% 20 Uçucu kül dolgulu	0,4	5	0,0187	0,0196	4,81
% 20 Uçucu kül dolgulu	0,4	10	0,0294	0,0306	4,08
% 20 Uçucu kül dolgulu	0,4	15	0,0455	0,0477	4,84

% 20 Uçucu kül dolgulu	0,8	5	0,0321	0,0333	3,74
% 20 Uçucu kül dolgulu	0,8	10	0,0589	0,063	6,96
% 20 Uçucu kül dolgulu	0,8	15	0,0777	0,0804	3,47
% 30 Uçucu kül dolgulu	0,4	5	0,0255	0,0265	3,92
% 30 Uçucu kül dolgulu	0,4	10	0,0485	0,0499	2,89
% 30 Uçucu kül dolgulu	0,4	15	0,0766	0,0794	3,66
% 30 Uçucu kül dolgulu	0,8	5	0,0383	0,0395	3,13
% 30 Uçucu kül dolgulu	0,8	10	0,068	0,07	2,94
% 30 Uçucu kül dolgulu	0,8	15	0,102	0,105	2,94
% 2,5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	5	0,049	0,0511	4,29
% 2,5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	10	0,0692	0,0717	3,61
% 2,5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	15	0,101	0,105	3,96
% 2,5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	5	0,072	0,075	4,17
% 2,5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	10	0,109	0,112	2,75
% 2,5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	15	0,135	0,14	3,70
% 5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	5	0,063	0,0653	3,65
% 5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	10	0,0853	0,0883	3,52
% 5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	15	0,125	0,13	4,00
% 5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	5	0,0882	0,0914	3,63
% 5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	10	0,116	0,119	2,59
% 5 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	15	0,17	0,176	3,53
% 10 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	5	0,0608	0,0631	3,78
% 10 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	10	0,0801	0,0827	3,25
% 10 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,4	15	0,11	0,115	4,55
% 10 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	5	0,107	0,111	3,74
% 10 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	10	0,132	0,136	3,03
% 10 Nano Al ₂ O ₃ dolgulu	0,8	15	0,179	0,186	3,91
% 2,5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,4	5	0,0487	0,051	4,72
% 2,5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,4	10	0,0688	0,0711	3,34
% 2,5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,4	15	0,109	0,113	3,67
% 2,5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,8	5	0,0746	0,0772	3,49
% 2,5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,8	10	0,1205	0,123	2,07
% 2,5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,8	15	0,169	0,175	3,55
% 5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,4	5	0,0593	0,0618	4,22
% 5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,4	10	0,0847	0,0878	3,66
% 5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,4	15	0,135	0,141	4,44
% 5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,8	5	0,0791	0,0821	3,79
% 5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,8	10	0,132	0,136	3,03
% 5 Nano TiO ₂ dolgulu	0,8	15	0,178	0,183	2,81
% 10 Nano TiO ₂ dolgulu	0,4	5	0,0735	0,0763	3,81
% 10 Nano TiO ₂ dolgulu	0,4	10	0,1	0,103	3,00
% 10 Nano TiO ₂ dolgulu	0,4	15	0,155	0,16	3,23
% 10 Nano TiO ₂ dolgulu	0,8	5	0,103	0,106	2,91
% 10 Nano TiO ₂ dolgulu	0,8	10	0,138	0,142	2,90
% 10 Nano TiO ₂ dolgulu	0,8	15	0,19	0,196	3,16
% 2,5 Nanokil dolgulu	0,4	5	0,0461	0,0481	4,34
% 2,5 Nanokil dolgulu	0,4	10	0,0634	0,0662	4,42
% 2,5 Nanokil dolgulu	0,4	15	0,0835	0,0874	4,67
% 2,5 Nanokil dolgulu	0,8	5	0,0691	0,0717	3,76
% 2,5 Nanokil dolgulu	0,8	10	0,101	0,103	1,98
% 2,5 Nanokil dolgulu	0,8	15	0,144	0,148	2,78
% 5 Nanokil dolgulu	0,4	5	0,0573	0,0595	3,84
% 5 Nanokil dolgulu	0,4	10	0,0974	0,1	2,67

% 5 Nanokil dolgulu	0,4	15	0,114	0,119	4,39
% 5 Nanokil dolgulu	0,8	5	0,0916	0,0948	3,49
% 5 Nanokil dolgulu	0,8	10	0,123	0,126	2,44
% 5 Nanokil dolgulu	0,8	15	0,163	0,169	3,68
% 10 Nanokil dolgulu	0,4	5	0,0621	0,0647	4,19
% 10 Nanokil dolgulu	0,4	10	0,0989	0,101	2,12
% 10 Nanokil dolgulu	0,4	15	0,132	0,137	3,79
% 10 Nanokil dolgulu	0,8	5	0,0847	0,088	3,90
% 10 Nanokil dolgulu	0,8	10	0,127	0,13	2,36
% 10 Nanokil dolgulu	0,8	15	0,178	0,184	3,37

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet İskender ÖZSOY, 24.01.1984 de Sakarya' da doğdu. 2002 yılında Figen SAKALLIOĞLU Anadolu lisesinden mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2006 yılında Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünden mezun oldu ve aynı yıl yüksek lisans eğitimine başladı. 2008 yılında yüksek lisans programını bitirip doktora eğitimine başladı. 2007 yılında Sakarya Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı, halen aynı görevi sürdürmektedir.