

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

**NANO SiO₂ ve ZrO₂ KATKILI POLYESTER
MATRİKSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ
VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet AYÇİÇEK

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Akın AKINCI

Haziran 2021

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

**NANO SiO₂ ve ZrO₂ KATKILI POLYESTER
MATRİKSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ
VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet AYÇİÇEK

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

**Bu tez 08/06/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile
kabul edilmiştir.**

BEYAN

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

Muhammet AYÇİÇEK

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyip bana destek olan danışman hocam sayın Prof. Dr. Akın AKINCI'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca vermiş oldukları katkılardan dolayı Doç. Dr. Murat Özsoy ve Dr. Öğr. Üyesi Neslihan Özsoy hocalarıma, Yüzey Mühendisliği konusundaki yardımlarından dolayı Prof. Dr. Sefer Cem OKUMUŞ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü eğitimimde beraber birçok çalışmalara imza attığımız ve çalışmam süresince bana verdiği tüm desteklerden dolayı Sedef ÇAKIR'a ve bugünlere gelmemde büyük emeği olan, beni hiç yalnız bırakmayan annem Nurhan AYÇİÇEK ve babam Veysel AYÇİÇEK'e sonsuz minnetimi sunarım.

Tez çalışmalarımda kullanılan malzemeler konusunda desteklerini esirgemeyen Subor Boru San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.2. Polimer Matriksli Kompozit Malzemeler	2
1.3. Polimer Matriksli Kompozit Malzemelerin Tribolojisi	4
1.3.1. Sürtünme	5
1.3.2. Aşınma	6
1.3.3. Aşınma mekanizmaları.....	7
1.3.4. Polimer matriksli kompozit malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışı.....	11
1.4. Polimer Kompozitlerde Temas Açısı ve Yüzey Özellikleri.....	13
1.4.1. Islanabilirlik ve temas açısı	13
1.4.2. Temas açısı histerezisi.....	16
1.4.3. Yüzey gerilimi ve serbest yüzey enerjisi.....	16
1.4.4. Temas açısı ölçüm teknikleri.....	17
1.5. Çalışmanın Kompozit Boru Sektöründeki Önemi	23

BÖLÜM 2.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
2.1. Malzemeler ve Numune Üretimi	25
2.2. Yoğunluk Deneyi	28
2.3. Sertlik Deneyi.....	29
2.4. Aşınma Deneyi.....	30
2.5. Temas Açısı ve Yüzey Enerjisi Ölçüm Deneyleri	31
2.6. Termal Analiz.....	32
2.7. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi	33
2.8. Optik Mikroskop İncelemesi	33
2.9. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve Enerji Dağılımlı Spektrum (EDS) Analizi	34

BÖLÜM 3.

DENEYSEL SONUÇLAR	35
3.1. Yoğunluk Deneyi Sonucu	35
3.2. Sertlik Deneyi Sonucu.....	36
3.3. Aşınma Deneyi Sonucu	38
3.3.1. Nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitler	38
3.3.2. Nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitler	43
3.4. Sürtünme Davranışlarının Değerlendirilmesi.....	49
3.5. Aşınma Davranışlarının Değerlendirilmesi.....	52
3.6. Temas Açısı ve Yüzey Enerjisi Sonuçları.....	55
3.6.1. Temas açısı ölçümü sonucu.....	55
3.6.2. Yüzey enerjisi ölçümü sonucu	58
3.7. Temas Açısı ve Aşınma Oranı İlişkisi.....	60
3.8. Termal Analiz Sonucu.....	61
3.9. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi Sonucu	65
3.10. Optik Mikroskop İncelemesi Sonucu	67
3.11. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve Enerji Dağılımlı Spektrum (EDS) Analizi Sonucu	82
3.11.1. Nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitler.....	83

3.11.2. Nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitler	85
BÖLÜM 4.	
SONUÇ VE ÖNERİ.....	88
4.1. Sonuçlar.....	88
4.2. Öneriler.....	89
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	99



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CTP	: Cam takviyeli polyester
DMSO	: Dimetilsülfoksit
DTG	: Diferansiyel termogravimetrik analiz
EDS	: Enerji dağılımlı spektrum
W	: Normal kuvvet
F	: Sürtünme kuvveti
g	: Yerçekimine bağlı ivme
PA	: Poliamid
PEEK	: Polietereterketon
PLA	: Polilaktikasit
PMMA	: Polimetilmetakrilat
PS	: Polistren
PTFE	: Politetrafloroetilen
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SiO ₂	: Silisyum dioksit
TG	: Termogravimetrik analiz
T _g	: Camsı geçiş sıcaklığı
Tr	: Referans malzemenin sıcaklığı
Ts	: Numune sıcaklığı
V	: Sıvının hacmi
w	: Sıkıştırma kuvveti
W'	: Adezyon kuvveti
XRD	: X-ışını kırınımı
ZnO	: Çinko oksit

ZrO_2	: Zirkonyum dioksit
γ_{LV}	: Sıvının yüzey gerilimi
ΔT	: Sıcaklık farkı
$\Delta \rho$	: Sıvı ve buhar arasındaki yoğunluk farkı
θ	: Temas Açısı
μ'	: Adezyon katsayısı
μ	: Sürtünme katsayısı
ρ	: Yoğunluk



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Polimerlerin genel sınıflandırılması	3
Şekil 1.2. Katkı malzemelerinin sınıflandırılması	4
Şekil 1.3. Sürtünme kuvvetinin gösterimi (serbest gövde diyagramı olan bir yüzey üzerinde kayan bir gövde); W normal yük (kuvvet) ve F sürtünme kuvvetidir	5
Şekil 1.4. Adezif aşınma	8
Şekil 1.5. Abrasif aşınma mekanizması	9
Şekil 1.6. Yorulma aşınması	10
Şekil 1.7. Koroziif aşınma türleri (a) Tribofilmin kesme kırılmasından kaynaklanan koroziif aşınma; (b) kırılğan tribofilmin tabakalara ayrılmasıyla oluşan koroziif aşınma; (c) yumuşak tribofilmin birikmiş plastik kayma akışından kaynaklanan koroziif aşınma; (d) yumuşak tribofilmin tıraşlanmasıyla oluşan koroziif aşınma.	10
Şekil 1.8. Yüzeylere damlatılan sıvı damlacıklarının temsili görüntüsü: Hidrofilik (HPi, Yüksek yüzey enerjili katı yüzey), hidrofobik (HPo, Düşük yüzey enerjili katı yüzey) ve süperhidrofobik (SHPo, Çok düşük yüzey enerjili katı yüzey).....	13
Şekil 1.9. Çeşitli uçak parçalarında buz birikimi görüntüsü a) Uçak gövdesi, b) Motor pervanesi ve c) Uçak kanadı.....	14
Şekil 1.10. Yüzey üzerindeki sıvıya etki eden kuvvetler	15
Şekil 1.11. Yüzey enerjisinin ıslatma davranışına etkisi.....	15
Şekil 1.12. Kayma açısı, ilerleyen ve gerileyen temas açıları.....	16
Şekil 1.13. Durağan damla yöntemi ile temas açısı ölçümünde kullanılan gonyometre	18
Şekil 1.14. Hapsedilmiş kabarcık yöntemi gösterimi	19
Şekil 1.15. Eğik plaka yöntemi ile temas açısının belirlenmesi.....	20

Şekil 1.16. Wilhelmy denge yöntemi ile temas açısının belirlenmesi	20
Şekil 1.17. Nanopartiküllerin temas açısına etki mekanizması.....	23
Şekil 1.18. Cam Fiber Takviyeli (CTP) kompozit boru yapısı	24
Şekil 2.1. Kompozit hazırlamada kullanılan ekipmanlar a) Mekanik karıştırıcı (WiseStir HT50DX) b) Buzlu su içerisinde ultrasonik karıştırma (Sonics VC750) c) Vakumlama tüpü	26
Şekil 2.2. Post kürlleme işleminde kullanılan etüv fırını	27
Şekil 2.3. Numune Hazırlama Şematik Görüntüsü	27
Şekil 2.4. Deney numuneleri ve kullanılan kalıplar a) Temas açısı ve aşınma deneyi numuneleri b) Aşınma numune kalıbı c) Temas açısı numune kalıbı.	28
Şekil 2.5. Yoğunluk Ölçüm Kiti	29
Şekil 2.6. Sertlik deneylerinin yapıldığı Shore D sertlik ölçüm cihazı.....	29
Şekil 2.7. Pin-on disk aşınma cihazı	30
Şekil 2.8. Aşınma deneyinin uygulanma metodu.....	31
Şekil 2.9. Dataphysics OCA15 cihazı ile saf su temas açısı görüntüsü (90,3°)....	31
Şekil 2.10. Temas açısı ve yüzey enerjisi ölçüm cihazı (Dataphysics OCA15)	32
Şekil 2.11. Aşınma yüzey analizlerinin yapıldığı optik mikroskop	34
Şekil 2.12. Analizlerin Yapıldığı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	34
Şekil 3.1. Nano katkı oranına göre polyeesterin yoğunluğunun değişimi	35
Şekil 3.2. Nano katkılı polyeester kompozitlerin Shore D sertlik değerleri	37
Şekil 3.3. Nano SiO ₂ katkılı polyeester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (2N yük altında)	38
Şekil 3.4. Nano SiO ₂ katkılı polyeester kompozitlerin özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (2N yük altında)	39
Şekil 3.5. Nano SiO ₂ katkılı polyeester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (5N yük altında)	40
Şekil 3.6. Nano SiO ₂ katkılı polyeester kompozitlerin özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (5N yük altında)	41
Şekil 3.7. Nano SiO ₂ katkılı polyeester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (10N yük altında)	42
Şekil 3.8. Nano SiO ₂ katkılı polyeester kompozitlerin özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (10N yük altında)	43

Şekil 3.9. Nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (2N yük altında)	44
Şekil 3.10. Nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (2N yük altında)	45
Şekil 3.11. Nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (5N yük altında)	46
Şekil 3.12. Nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (5N yük altında)	47
Şekil 3.13. Nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (10N yük altında)	48
Şekil 3.14. Nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (10N yük altında)	49
Şekil 3.15. Nano katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve yüke bağlı 0,5 m/s kayma hızında değişimleri	50
Şekil 3.16. Nano katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve yüke bağlı 1 m/s kayma hızında değişimleri	51
Şekil 3.17. Nano katkılı polyester kompozitlerin 0,5 m/s kayma hızında özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve yüke bağlı değişimleri	52
Şekil 3.18. Nano katkılı polyester kompozitlerin 1 m/s kayma hızında özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve yüke bağlı değişimleri.....	54
Şekil 3.19. Saf polyesterin saf su temas açısı sonucu (70.6°).....	56
Şekil 3.20. Nanokompozitlerin af su temas açısı sonuçları; a) 0,5% SiO ₂ (81.9°) b) 1% SiO ₂ (97.4°) c) 2% SiO ₂ (101.4°)	56
Şekil 3.21. Nano kompozitlerin saf su temas açısı sonuçları; a) 0,5% ZrO ₂ (104.1°) b) 1% ZrO ₂ (80.6°) c) 2% ZrO ₂ (93.4°).....	56
Şekil 3.22. Nano katkılı polyester kompozitlerin temas açılarının katkı oranına göre değişimi	57
Şekil 3.23. Nano katkılı polyester kompozitlerin yüzey enerjilerinin ve temas açılarının katkı oranına göre değişimi	59
Şekil 3.24. Temas açısı ve aşınma oranı ilişkisi.....	60
Şekil 3.25. Saf ve nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitlerin TG/DTG grafiği....	62
Şekil 3.26. Saf ve nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin TG/DTG grafiği ...	64

Şekil 3.27. Nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitlerin XRD analizi	65
Şekil 3.28. Nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin XRD analizi.....	66
Şekil 3.29. Saf ve nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 2N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	67
Şekil 3.30. Saf ve nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 2N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	69
Şekil 3.31. Saf ve nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 5N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	70
Şekil 3.32. Saf ve nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 5N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	71
Şekil 3.33. Saf ve nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 10N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	72
Şekil 3.34. Saf ve nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 10N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	74
Şekil 3.35. Saf ve nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 2N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	75
Şekil 3.36. Saf ve nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 2N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	76
Şekil 3.37. Saf ve nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 5N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	78
Şekil 3.38. Saf ve nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 5N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	79

Şekil 3.39. Saf ve nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 10N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	80
Şekil 3.40. Saf ve nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 10N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	81
Şekil 3.41.Saf polyesterin SEM ve EDS analizi	83
Şekil 3.42. Nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri a) %0,5 SiO ₂ b) %1 SiO ₂ c) %2 SiO ₂	83
Şekil 3.43. Nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri a) %0,5 ZrO ₂ b) %1 ZrO ₂ c) %2 ZrO ₂	85

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Malzemeler ve özellikleri	25
Tablo 3.1. Deney malzemelerinin yoğunlukları.....	36
Tablo 3.2. Saf polyester ve nano katkılı kompozitlerin temas açısı ölçüm sonuçları	57
Tablo 3.3. Yüzey enerjisi sonuçları (mN/m).....	58
Tablo 3.4. Saf ve nano SiO ₂ katkılı polyester kompozitlerin TG/DTG analiz sonuçları	62
Tablo 3.5. Saf ve nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozitlerin TG/DTG analiz sonuçları	64

ÖZET

Anahtar kelimeler: Polyester, nano kompozit, triboloji, temas açısı, yüzey enerjisi.

Polyester matriksli kompozitler, başta Cam Takviyeli Polyester (CTP) boru sektörü olmak üzere, havacılık sanayii, tekne gövdeleri üretimi, elektrik yalıtım malzemeleri, otomotiv sanayii, askeri teknolojiler, inşaat sektörü, dekorasyon malzemeleri ve çeşitli makine parçaları imalatı gibi endüstride birçok alanda kullanım yerine sahiptir. Polyester matriks içerisine nano katkı ilavesi ile aşınma, sürtünme, temas açısı, yüzey enerjisi, termal, yapısal özelliklerinin incelenmesi ve geliştirilmesi amaçlanmıştır. Matriks malzeme olarak izoftalik poliestere nano boyutlu, ağırlıkça %0,5, %1, %2 oranlarında SiO_2 ve ZrO_2 katkılar eklenerek nano kompozit malzemeler elde edilmiştir. Bu malzemeler mekanik ve ultrasonik yöntemlerle karıştırılarak açık kalıplara dökülmüş; tribolojik, yüzey ve termal analiz araştırmaları için deney standartlarına uygun şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan nano kompozitlerin tribolojik davranışlarını incelemek için pin-on disk aşınma deney sistemi kullanılarak sürtünme katsayıları ve aşınma oranları elde edilmiştir. Kompozitlerin optik ve SEM yüzey görüntüleri incelenmiştir. Deneyler oda sıcaklığında ve ortalama %70 nem altında gerçekleştirilmiştir. Tribolojik çalışmalar; 2, 5, 10N yük altında ve 0,5 ve 0,1 m/s kayma hızında yapılmıştır. Temas açısı ve yüzey enerjisi deneyleri Datapyhsics OCA15 cihazında sessile drop yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Yüzey enerjisi ölçümlerinde saf suya ek olarak DMSO (Dimetilsülfoksit) ve etilen glikol sıvıları kullanılmıştır.

Birinci bölümde genel bilgiler, sürtünme, aşınma, temas açısı ve yüzey enerjisi kavramları ile literatür araştırmalarına yer verilmiştir. İkinci bölümde kullanılan malzemelerin özellikleri, yapılan deneyler ve testlerden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde deney sonuçları verilerek elde edilen sonuç değerlendirilmiştir. Dördüncü bölümde genel sonuçlar ve öneriler verilmektedir.

PRODUCTION AND INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF NANO SiO₂ and ZrO₂ REINFORCED POLYESTER MATRIX COMPOSITE MATERIALS

SUMMARY

Keywords: Polyester, nano composite, tribology, contact angle, surface energy.

Polyester matrix composites are used in many areas such as the mainly Glass Reinforced Polyester (GRP) pipe sector, aviation industry, boat hull production, electrical insulation materials, automotive industry, military technologies, construction industry, decoration materials and various machine parts manufacturing. With the addition of nano additives into the polyester matrix, it is aimed to examine and improve the abrasion, friction, contact angle, surface energy, thermal and structural properties. Nano composite materials were obtained by adding 0.5%, 1% and 2% SiO₂ and ZrO₂ additives with nano-size to isophthalic polyester as matrix material. These materials are mixed by mechanical and ultrasonic methods and poured into open molds. Prepared in accordance with experimental standards for tribological, surface and thermal analysis research. Friction coefficients and wear rates were obtained by using pin disc wear test system to examine the tribological behavior of prepared nano composites. Optical and SEM surface images of the composites were examined. The experiments were carried out at room temperature and at an average humidity of 70%. Tribological studies were carried out under 2, 5, 10N load and 0.5 and 0.1 m/s sliding speed. Contact angle and surface energy experiments were measured on Datapyhsics OCA 15 using the sessile drop method. In addition to pure water, DMSO (Dimethylsulfoxide) and ethylene glycol liquids were used in surface energy measurements.

In the first chapter, general information, friction, wear, contact angle and surface energy concepts and literature researches are given. In the second part, the properties of the materials used, experiments and tests are mentioned. In the third part, the results obtained by giving the experimental results are evaluated. In the fourth chapter, general results and recommendations are mentioned.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişimiyle birlikte üstün özellikli malzemelere ihtiyaç giderek artmaktadır. Dolayısıyla malzeme bilimi alanında yapılan çalışmalar ile birlikte geleneksel malzemeler yerini daha nitelikli ve daha performanslı malzemelere bırakmaktadır. Bu özel malzemelerin geliştirilmesine yönelik araştırmacılar, yeni üretim yöntemleri ve yeni malzemeler üretmek adına çalışmalarını sürdürmektedir. Bu yeni üstün nitelikli ve performanslı malzemelerin ilham kaynağını ise kompozit malzemeler oluşturmaktadır.

Kompozit malzemeler, birbirlerine göre farklı şekil ve özelliklere sahip olan ve elemanları arasındaki sınırın kolayca görülebildiği ve bunların pozitif özelliklerinin birleştirildiği iki veya daha fazla bileşenden oluşan malzemelerdir [1, 2].

Polimerler; düşük yoğunluklu, kolay kalıplanabilen, farklı amaçlarda kullanıma uygun, kimyasal açıdan inert ve korozyon direnci yüksek malzemeler olmaları dolayısıyla günümüzde neredeyse her sektör ve alanda kullanılmaktadır. Bu üstün özelliklerinden dolayı polimer malzemelerin kullanım alanının genişletilmesi, mekanik, tribolojik ve yüzey özelliklerinin güçlendirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Polimer matriksine eklenen katkıları ile bu malzemelerin çeşitli özelliklerini geliştirilebilmek mümkündür [1, 3].

Bu çalışmada termoset matrikse çeşitli nano katkı ilavesinin tribolojik ve yüzey performanslarına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda termoset polimer olarak en sık kullanılan malzemelerden biri olan polyester matriks olarak seçilmiştir. Katkı malzemesi olarak, nano boyutlu SiO_2 ve ZrO_2 eklenerek kompozit malzemeler elde edilmiştir.

Bu bölümde, çalışmanın amacı, polimer ve kompozit malzemeler kavramları, bu malzemelerin özelliklerine etki eden faktörler ve ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

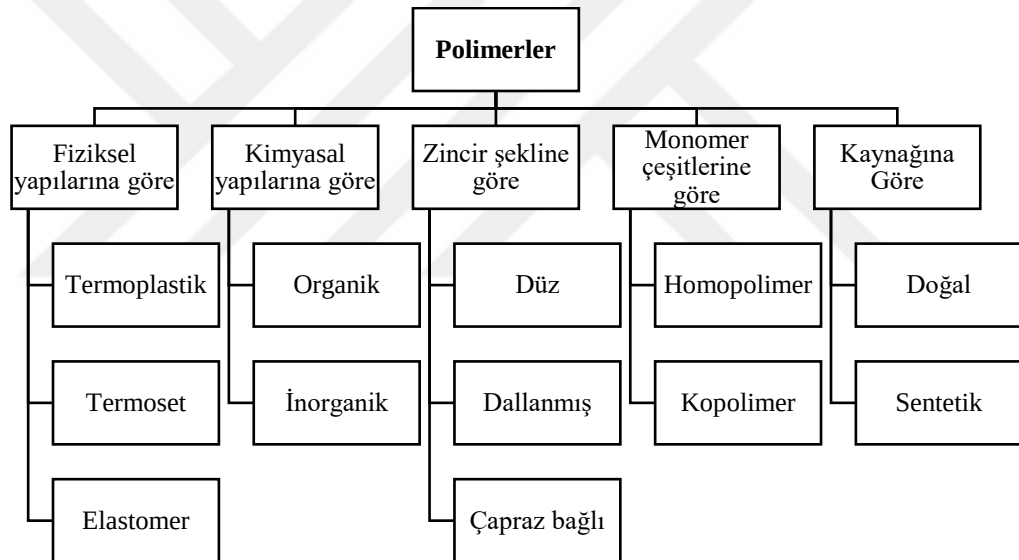
Polimer matriksli kompozit malzemeler alanında yapılan araştırmalar neticesinde bu malzemelerin tribolojik ve yüzey özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalara önem verildiği görülmektedir. Kullanılan katkı çeşidi, katkı miktarı, matriks malzemesi, uygulanan yük ve hız gibi değişkenlerin malzeme özelliklerini etkilediği saptanmıştır. Polimer matriksli kompozitler, havacılık, denizcilik, kompozit boru sektörü, otomotiv sektörü, makine imalatı, spor aletleri üretimi gibi birçok farklı alanda üstün performans almak için başvurulan malzemelerdir. Polimer matriksli kompozitlerde en çok kullanılan matriks malzemelerden birinin polyester olması ve polyester matriksli kompozitler alanında araştırmalara ihtiyaç duyulması dolayısıyla polyester matriks ile çalışılmaya karar verilmiştir. Katkı malzemesi olarak nano boyutlu SiO_2 ve ZrO_2 kullanılarak uygun karışım oranlarında elde edilen kompozitlerin tribolojik özellikleri, sertliği, yoğunluğu, termal davranışı, temas açısı ve yüzey enerjisi gibi özelliklerinin geliştirilerek kullanım yerindeki ömrünün ve performansının artırılması amaçlanmıştır.

1.2. Polimer Matriksli Kompozit Malzemeler

Eşsiz özelliklerinden dolayı polimerler birçok mühendislik uygulamasında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu malzemeler genel olarak iyi özellikler sunsa da tek başına kullanıldıklarında yetersiz kalabilmektedir. Dolayısıyla bu noktada kompozit malzemeler ön plana çıkmaktadır. Kompozitler, iki veya daha fazla malzemenin iyi olan özelliklerini tek bir yapıda toplamak amacıyla makro düzeyde birleştirilerek üretilen malzemelerdir [4]. Kompozitler, havacılık, otomotiv, gemicilik, elektrik ve inşaat gibi birçok alanda kullanılan üstün işlevselliğe sahip malzemelerdir [5]. Kompozit malzemeler, matriks ana fazı ve bunun içine dağılmış takviye elemanlardan oluşmaktadır [6].

Matriks ana fazı olarak kullanılan polimerler, zincir şeklinde dizilmiş monomer adı verilen tekrarlı yapılardan meydana gelen sentetik malzemelerdir. Polimerler Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi fiziksel olarak üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar; termoplastikler, termosetler ve elastomerlerdir [7-9]. Detaylı olarak sınıflandırılacak olursak;

- Fiziksel yapılarına göre: Termoplastik, termoset, elastomer,
- Kimyasal yapılarına göre: Organik, İnorganik,
- Kaynağına göre: Doğal, sentetik,
- Zincir şekline göre: Düz, dallanmış, çapraz bağlı,
- Monomer çeşitlerine göre: Homopolimer, kopolimer.



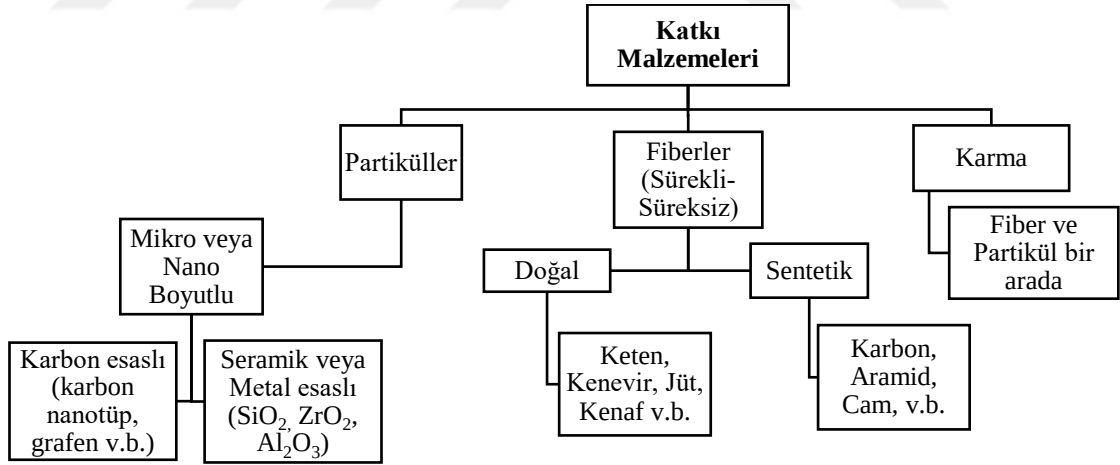
Şekil 1.1. Polimerlerin genel sınıflandırılması [7-9]

Termoplastikler, uzun zincirler halinde bulunan lineer ya da dallanmış zincirlerden oluşan polimer sistemlerine denir. Termoplastikler ısıtıldığı zaman camsı geçiş sıcaklığı (T_g) üzerinde yumuşayarak şekillendirilebilen ve soğutulduklarında ise sertleşen yapıdadırlar. Bu özelliklerimden dolayı birçok kez bu işlem tekrarlanarak kullanılabilirler. Toz, granül ve çözelti şeklinde olabilirler. Polimer zincirleri güçlü kovalent bağlarla, molekül zincirleri ise zayıf Van der Waals kuvvetleriyle bağlıdır [10].

Termosetler, ısıyla sertleşen ve çapraz bağlı moleküller oluştururlar, tekrar ısıtıldıklarında yumuşamazlar. Termoset polimerler termoplastiklerden daha mukavemetlidirler ve genellikle daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler. Termosetler yüksek termal ve yüksek boyutsal kararlılık, yüksek rijitlik, sıcaklık altındaki gerilim direnci, düşük yoğunluk, yüksek elektriksel ve termal yalıtım özelliklerine sahiptirler [11].

Oda sıcaklığında kendi boyunun en az iki misline uzayabilen ve kuvvet ortadan kalktığında yaklaşık olarak tekrar orijinal boyuna dönebilen polimer yapılarına elastomer denilmektedir. Vulkanize olmuş polimerik malzemelerdir. İçlerinde bulunan makro moleküller seyrek çapraz bağlarla bağlanmışlardır [12].

Katkı malzemeleri; mikro veya nano boyutlu partiküller, fiberler (doğal, sentetik, sürekli, süreksiz) ve bu ikisinin birleşimi olarak elde edilen karma katkıları olarak açıklanmaktadır [13]. Şekil 1.2.'de kompozit malzemelerin yapısını oluşturan katkıları sınıflandırılmaktadır.



Şekil 1.2. Katkı malzemelerinin sınıflandırılması [9, 14, 15]

1.3. Polimer Matriksli Kompozit Malzemelerin Tribolojisi

Bağlı hareketlerle etkileşim içerisinde olan yüzeylerin sürtünme, aşınma ve yağlama olaylarına odaklanan bu olaylar arasındaki ilişkiyi inceleyen bilim dalına triboloji adı verilmektedir [16].

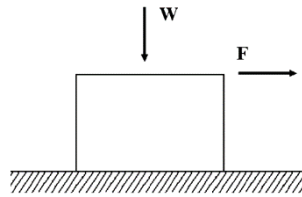
Polimer ve polimer kompozitlerin aşınması, genellikle plastik deformasyon, gevrek kırılma ve yorulma nedeniyle oluşur. Bu nedenle, çeşitli takviyelerle güçlendirilirler ve ortaya çıkan kompozit, uygulanan bir yükün neden olduğu dinamik gerilimleri ve nihayetinde aşınmayı önleyen mekanizmaları destekler.

Polimer kompozitlerin aşınması, içsel bir malzeme özelliği değildir; Aşınma mekanizmasına (adezif, abrasif, yorulma ve tribokimyasal) dış koşullara (sıcaklık, yük, kayma hızı ve çevre koşulları), bağıl hareketlere (kayma, çoklu / tek geçiş, ileri-geri) temas yüzeyine duyarlıdır. Aynı zamanda kompozit yapısı (polimer matris, takviye tipi ve yapısı, dolgu / matris arayüzü ve iç yağlayıcılar) gibi parametrelere ek olarak çevre koşullarına (atmosfer, nem ve sıcaklık gibi) karşı da çok duyarlıdır [5].

1.3.1. Sürtünme

Birbiriyle temas halinde bulunan ve bağıl kayma veya yuvarlanma hareketi yapan iki yüzey arasındaki dinamik veya statik kuvvete sürtünme adı verilmektedir.

Yüzeyler arası temiz olsa dahi, atmosfer şartları altında birbirleri ile sürtünme halindeyken aralarında çok ince de olsa absorpsiyon ve tribo-mekanik reaksiyon tabakaları meydana gelecektir. Genellikle bu tip sürtünme hali genel olarak kuru sürtünme olarak kabul edilir [17]. Şekil 1.3.'te sürtünme kuvvetinin gösterimi verilmektedir.



Şekil 1.3. Sürtünme kuvvetinin gösterimi (serbest gövde diyagramı olan bir yüzey üzerinde kayan bir gövde); W normal yük (kuvvet) ve F sürtünme kuvvetidir [18]

Sürtünme Kuvvetinin Hesabı;

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (1.1)$$

Denklem 1.1’de görülen, μ : sürtünme katsayısı, F_s : sürtünme kuvveti, W : normal kuvvettir. Birbiri üzerinde çalışan yüzeyler arasına özel yağlayıcı maddelerin koyulması halinde yüzeyler kuru sayılmamaktadır. Sürtünme, yağlanmış yüzeyler arasında meydana gelmektedir. Bu sürtünme hali ise sıvı film sürtünmesi olarak kabul edilir [17].

Sürtünmeyi etkileyen faktörler;

- Kayma yüzeyinde aşınma parçacıkları veya sistem dışından gelen parçacıkların etkisi
- Temasta bulunan malzemelerin bir birlerine göre bağlı sertliği
- Uygulanan yük ve/veya kayma mesafesi
- Sıcaklık veya yağlayıcı gibi dış etmenler
- Yüzey topografyası
- Malzemelerin mikro yapısı veya morfolojisi
- Görünür temas alanı
- Temasta bulunan yüzeylerin kinematiği (hareket yönü, kayma hızının büyüklüğü vb.) [19].

1.3.2. Aşınma

Birbiriyle temas halinde bulunan ve bağlı kayma veya yuvarlanma hareketi yapan iki yüzey arasında meydana gelen malzeme ve kütle kaybıdır [17].

Sürtünme bir enerji kaybı nedeniyle, aşınma da tekrar geriye kazanılamayan madde kaybı nedenidir. Aşınmanın genellikle tek bir mekanizmanın değil, farklı mekanizmaların bir kombinasyonu sonucu olduğuna dikkat etmek önemlidir [19, 20]. Bazı koşullarda yüksek sürtünmeli arayüzlerin yüksek aşınma oranlarını tetiklediği varsayılır ancak bu kesin değildir. Örneğin, polimerler kıyasen düşük sürtünme ve yüksek aşınma gösterirken, seramikler orta derecede sürtünme ama son derece düşük aşınma sergiler. Polimer tribolojisi, sürtünme temasında polimer malzemelerin abrasif, adeziv ve yorulma ve korozyon aşınma analizine dayanır. Polimerlerin yapısal

özellikleri, çoğunlukla kompozit malzemelerin matriksleri ve dolgu maddeleri olarak temel polimerlerin çeşitli tribolojik uygulamalarını sağlar. Son zamanlarda polimer nano kompozitler, çeşitli tribosistemlerin bileşenlerini yapmak için kullanılmaktadır [21].

Bu bölümde, çeşitli aşınma mekanizmaları ve aşınma enkazında bulunan partikül tiplerini, ardından malzemelerin aşınmasını gösteren temsili veriler açıklanmaktadır.

1.3.3. Aşınma mekanizmaları

Aşınma temel olarak dört mekanizmada meydana gelmektedir. Bunlar;

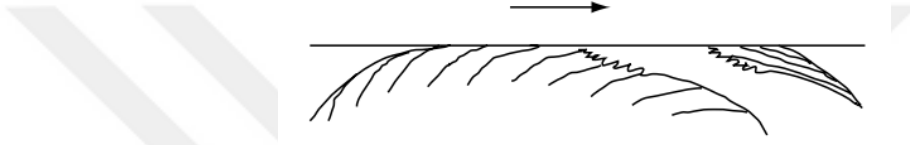
- Adezif aşınma
- Abrazif aşınma
- Yorulma aşınması
- Korozyon aşınma

a) Adezif aşınma

Adezif veya kayma aşınması, birbiri üzerinde temas halinde olan yüzeylerden birinden kopan parçacıkların diğerine yapışması şeklinde gerçekleşen aşınma türüdür. Bu biriken veya başka bir deyişle taşınan parçacıklar, biriken yüzeyden ardışık döngülerle aşınmaya neden olacak şekilde orijinal yüzeye geri aktarılır. Bu aşınma şekli genellikle adezif aşınma olarak adlandırılır. Bu iki katı parçayı ayırmak için normal bir kuvvet gerektiren arayüz boyunca yapışma veya birleşmeye adezif kuvvet denilmektedir. [5]. Adezyon, saf bir normal kuvvet (yük) veya birleşik normal ve kesme kuvvetleri altında iki yüzeye birlikte yük uygulandığında ortaya çıkan sabittir. Yüzeyleri ayırmak için normal bir çekme kuvveti uygulanmalıdır. Denklem 1.2’de ayırma için gereken normal gerilme kuvvetinin W' (normalde adezyon kuvveti olarak adlandırılır) başlangıçta uygulanan normal sıkıştırma kuvvetine (w) oranı, genellikle adezyon katsayısı olan μ' verir.

$$\mu' = \frac{W'}{w} \quad (1.2)$$

W tipik olarak W artışı ile doğrusal olarak artar ve μ genellikle statik temas süresi ve ayırma oranı ile artar. Adezyon hem katı-katı temaslarda hem de sıvılar ya da adezif katılarla karışan iki katı halinde meydana gelir. İki katı yüzey temizse ve tüm kimyasal filmler ve adsorbatlar çıkarılırsa, genellikle bir katının diğerine güçlü yapışması veya adezyon meydana gelir. Yüzey kirletici maddeler veya ince filmler çoğu durumda yapışmayı azaltır; ancak bazı durumlarda, bunun zıttı geçerli olabilir. İyi yağlanmış yüzeylerde genellikle zayıf yapışma gözlenir [17]. Şekil 1.4.'te adezif aşınma mekanizması görülmektedir [19].



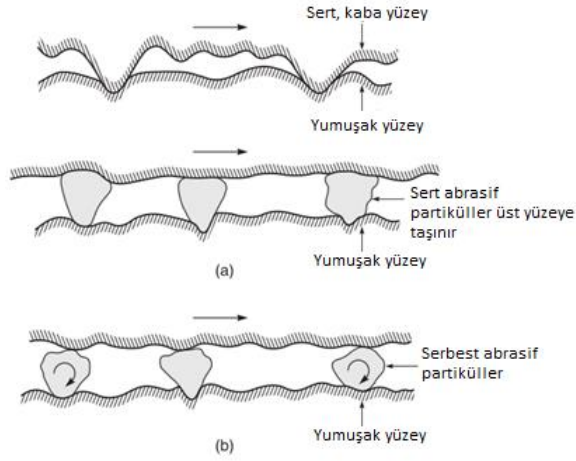
Şekil 1.4. Adezif aşınma [19]

Adezif aşınma, yük, kayma hızı, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü, çevre şartları, malzeme yapısı, arayüzey elemanları ve yağlama değişkenlerine bağlıdır [22].

b) Abrasif aşınma

Abrasif aşınma, pürüzlü, sert bir yüzeyin veya sert parçacıkların daha yumuşak bir yüzey üzerinde kayması ve plastik deformasyon veya çatlak nedeniyle ara yüzeye zarar vermesi durumunda oluşmaktadır [5, 19].

Abrasif aşınma için iki genel durum vardır, Şekil 1.5.'te abrasif aşınma mekanizması görülmektedir [22]. İlk durumda sert yüzey, örneğin taşlama, kesme ve işleme gibi mekanik işlemlerde iki sürtünme yüzeyi de (iki gövdeli aşınma) serttir. İkinci durumda, sert yüzey, diğer iki yüzey arasına yakalanmış ve yeterince daha sert olan, birleşme yüzeylerinden birini veya her ikisini (üç-cisim aşınması) aşındırabilen üçüncü bir cisim, genellikle küçük bir aşındırıcı parçacıktır. [17].

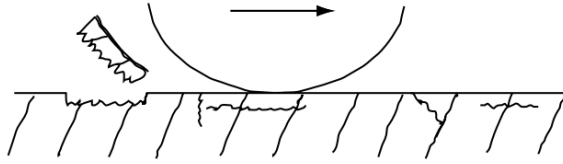


Şekil 1.5. Abrasif aşınma mekanizması [22]

Abrasif aşınmada, sert bir karşı cisim, daha yumuşak bir malzemeye karşı hareket eder ve hasar verir. Bu nedenle, malzemenin sertliği önem arz etmektedir. Polimerlerde yüzey sertliğini artırmak partikül takviyeleri ile yapılıyor olsa da bu tarz katkılarda kritik partikül oranına önem verilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, yüksek katkı içeriği, matriks içerisinde partikül topaklaşmasına neden olarak aşınma özelliklerinde bir bozulmaya yol açmaktadır [19]. Optimum katkı oranlarında ise malzeme çiftleri arasında nanopartiküller, pozitif bir yuvarlanma etkisi göstermektedir. Bu yuvarlanma etkisi, kayma sırasında sürtünme katsayısının düşürülmesine yardımcı olarak, kesme gerilimini ve temas sıcaklığını düşürerek aşınma oranında iyileşme sağlamaktadır [23, 24].

c) Yorulma aşınması

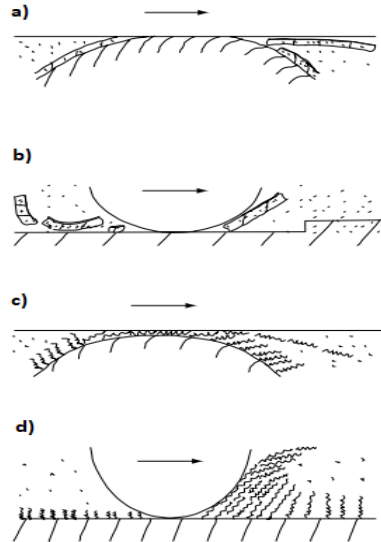
Yüzey altı ve yüzey yorgunlukları sırasıyla tekrarlanan yuvarlanma (ihmal edilebilir sürtünme) ve kayma sırasında gözlenir. Malzemelerin tekrarlanan devirli olarak sürekli yüklemeye uğraması sonucu ilerlemeli ve yapısal kritik sayıdaki döngüden sonra, büyük çukurların oluşumu ile yüzeyin parçalanmasına ve yüzeyde çukur bırakmasına neden olacak olan çatlakların oluşumuna sebebiyet veren aşınma türüne yorulma aşınması adı verilmektedir [5, 25]. Şekil 1.6.'da yorulma aşınması görülmektedir [19].



Şekil 1.6. Yorulma aşınması [19]

d) Korozi (tribokimyasal) aşınma

Korozi aşınma, sürtünen yüzeylerin ortamla etkileşime geçmesi sonucu oluşur. Kimyasal veya aşındırıcı aşınma, kayma aşındırıcı bir ortamda gerçekleştiğinde meydana gelir. Havada en baskın aşındırıcı ortam oksijendir. Bu nedenle havada kimyasal aşınmaya genellikle oksidatif aşınma denir. Kayma olmadığında, korozyonun kimyasal ürünleri (örn: oksitler) yüzeyler üzerinde tipik olarak yüzeylerde mikrometreden daha az olan ve korozyonu yavaşlatma veya hatta tutuklama eğilimi gösterecek bir film oluşturur, ancak kayma hareketi kimyasal kimyasal saldırı devam edebilir. Bu nedenle, kimyasal aşınma için hem korozyon hem de sürtünme gerekmektedir [17]. Şekil 1.7.'de çeşitli korozi aşınma türleri görülmektedir [19].



Şekil 1.7. Korozi aşınma türleri [19] (a) Tribofilmin kesme kırılmasından kaynaklanan korozi aşınma; (b) kırılmalı tribofilmin tabakalara ayrılmasıyla oluşan korozi aşınma; (c) yumuşak tribofilmin birikmiş plastik kayma akışından kaynaklanan korozi aşınma; (d) yumuşak tribofilmin tıraşlanmasıyla oluşan korozi aşınma.

1.3.4. Polimer matriksli kompozit malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışı

Polimerlerin aşınma ve sürtünme davranışlarını incelediğimizde; sisteme uygulanan yük, kayma hızı, nem, sıcaklık, transfer film ve yüzey pürüzlülüğü unsurları tarafından etkilenmektedir [25]. Ayrıca polimerlere eklenen katkıları, malzemenin aşınma ve sürtünme davranışı, yüzey özellikleri, termal stabilitesi ve sertliği üzerinde önemli rol oynamaktadır [26].

Bilge ve ark. epoksi matriks içerisine grafit eklenerek hazırlanan kompozitin aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Aşınma deneyleri 5N yük altında ve 200m kayma mesafesine kadar oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda grafit katkılı kompozitin aşınma mukavemetinin arttığını gözlemlemişlerdir [27].

He ve ark. polimer matriks içerisine nano SiO₂ ekleyerek elde ettikleri kompozitin aşınma özelliklerini incelemiş ve nano-SiO₂ katkılı kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranında yaklaşık % 27 ve % 47.4'ye varan düşüşler elde etmişlerdir [28].

Zhaohong ve ark. polimer malzeme içerisine katkıladıkları nano SiO₂ ile elde ettikleri kompozit malzemenin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Sürtünme özelliklerinin geliştiği tespit edilmiştir. Ayrıca %1-5 arasında yapılan katkılardan en iyi sürtünme özellikleri %3 nano SiO₂ katkılı kompozitlerde elde edilmiştir. Kritik oranın üzerindeki katkı miktarının aşınma mukavemetini değiştirmedeği görülmüştür [29].

Li ve ark. takviye olarak nano grafen eklenmesi sayesinde polimer kompozitlerin ortalama olarak belirlenmiş sürtünme katsayısı ve aşınma oranında yaklaşık %35 ve %48 oranında düşüşler elde etmişlerdir [30].

Beckford ve ark. PTFE polimer matriksi içerisine nano SiO₂ partikül takviyesi ile kompozitin aşınma dayanımını artırmayı amaçlamışlardır. %1.7 ve %3.3 oranında SiO₂ takviyesi ile aşınma dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. %3.3 SiO₂ katkılı kompozitte %1.7'ye göre daha düşük tepeler ve daha düşük oluklar olduğu dolayısıyla daha yüksek aşınma mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak nano

partikül takviyesi ile polimerin aşınma direncinde artış yaşandığı gözlemlenmiştir [31].

Kurahatti ve ark. epoksi matriks içerisine %0,5-10 oranlarında nano boyutlu (60-100 nm) ZrO_2 takviye ederek elde ettikleri kompozitin aşınma mukavemetini incelemişlerdir. %0,5 ZrO_2 katkı oranıyla birlikte aşınma oranında %95'e varan gelişme kaydetmişlerdir. Daha yüksek katkı oranlarında aşınma oranında bir azalma görülmemiştir [32].

Li ve ark. ZrO_2/SiO_2 nanopartikül katkılı kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda nano ZrO_2/SiO_2 katkılar ile birlikte hem sürtünme katsayısının hem de aşınma oranının azaldığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda yüzey nano partiküllere yüzey modifikasyonu yapılmasının kompozitin tribolojik özelliklerini geliştirdiğini kanıtlamışlardır [33].

Wang ve ark. nano ZrO_2 katkı PEEK kompozitlerin aşınma performanslarını incelemişlerdir. Artan katkı oranı ile birlikte aşınma oranı ve sürtünme katsayısında azalma kaydetmişlerdir. En düşük aşınma oranı %7,5 katkı oranında elde edilmiştir [34].

Zhang ve ark. PTFE, grafit ve kısa karbon fiber katkılı hibrit epoksi kompozit içerisine ekledikleri nano TiO_2 katkısının aşınma performansına etkisini araştırmışlardır. %5 nano TiO_2 katkısı ile aşınma özelliklerinin geliştiğini ortaya koymaktadırlar [23].

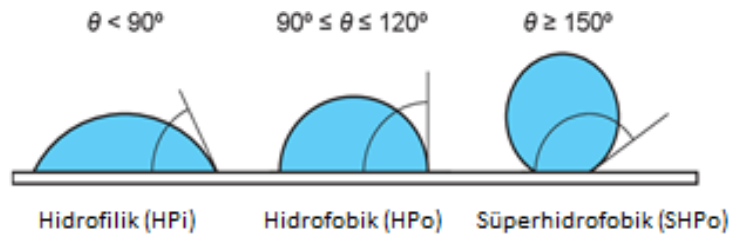
Nadia ve ark. epoksi matriks içerisine nano Al_2O_3 ve nano SiO_2 katkısı ekleyerek elde ettikleri nano kompozitin aşınma davranışını incelemişlerdir. %2 nano SiO_2 katkısı ile birlikte nano kompozitin aşınma performansında büyük oranda gelişme kaydetmişlerdir. %2 katkı oranından sonra aşınma oranlarında artış meydana geldiği görülmektedir. Optimum katkı yüzdesinin %2 olduğu bu çalışma ile desteklenmektedir [35].

1.4. Polimer Kompozitlerde Temas Açısı ve Yüzey Özellikleri

1.4.1. Islanabilirlik ve temas açısı

Temas açısı, bir katı yüzeyin sıvıyla ıslatılmasının nicel bir ölçüsüdür. Katı yüzeyle temastaki bir sıvının oluşturduğu ıslanma açısına ise temas açısı denmektedir. Temas açısı " θ " ile gösterilmektedir (Şekil 1.8.). Katı yüzeylerin ıslanabilirliği, kimyasal yapısı ve yüzey pürüzlülüğünün etkisi ile oluşan yüzey enerjisine göre değişiklik gösterir. Islanabilirlik katı yüzeylerin en temel ve en önemli özelliklerinden biridir [36]. Su veya başka diğer bir sıvı ile katı yüzey temas ettiğinde birçok farklı durum oluşabilir. Bu sıvı, katı yüzey üzerinde bütünüyle yayılabilir ve sıfır derece veya sıfır dereceden yakın temas açısı ölçülebilir. Bu duruma "tam ıslatma" bu yüzey yapısına da "süperhidrofilik" denilmektedir. Katı yüzeyine yayılan sıvının temas açısı 90 dereceden küçük olabilir, bu durumda katı yüzeyi "hidrofilik" yapıda olur. Temas açısının 90 dereceden büyük olduğu durumlarda ise yüzeyin ıslatma davranışı "hidrofobik" yapıdadır. 150 dereceden daha büyük temas açıları ise yüzey su tutmayan "süperhidrofobik" olarak adlandırılmaktadır.

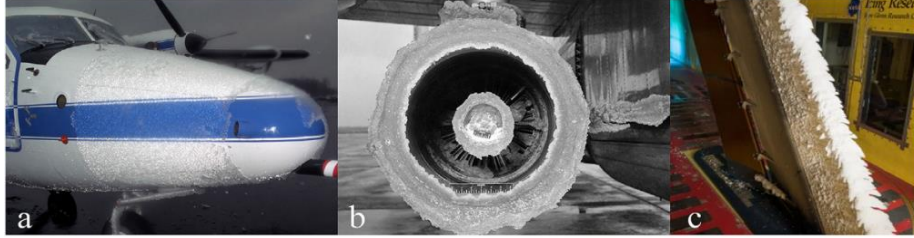
- Temas açısı $> 90^\circ$ $\Rightarrow$ hidrofobik
- Temas açısı $< 90^\circ$ $\Rightarrow$ hidrofilik
- Temas açısı $> 150^\circ$ $\Rightarrow$ süper hidrofobik
- Temas açısı $\sim 0^\circ$ $\Rightarrow$ süper hidrofilik



Şekil 1.8. Yüzeylere damlatılan sıvı damlacıklarının temsili görüntüsü: Hidrofilik (HPI, Yüksek yüzey enerjili katı yüzey), hidrofobik (HPo, Düşük yüzey enerjili katı yüzey) ve süperhidrofobik (SHPo, Çok düşük yüzey enerjili katı yüzey) [37]

Örneğin; hidrofobik malzemeler kendi kendini temizleme, buzlanmayı önleme, yağ-su ayırma, buğu ve donma önleyici, kirlenme önleme, sürüklenmeyi azaltma ve hatta

anti bakteriyel kaplamalar olarak büyük olanaklar sağlar [38]. Şekil 1.9.'da malzeme yüzeyinde meydana gelen buz birikimi görülmektedir [39].



Şekil 1.9. Çeşitli uçak parçalarında buz birikimi görüntüsü a) Uçak gövdesi, b) Motor pervanesi ve c) Uçak kanadı [39]

Katı yüzeye Şekil 1.10.'daki gibi sıvı damlası düşürdüğümüzde damla üç kuvvetin dengelenmesiyle durmaktadır. Bu kuvvetler katı - sıvı arasındaki γ_{SL} , katı - buhar arasındaki γ_{SV} , sıvı - buhar arasındaki γ_{LV} ara yüzey gerilimlerinden meydana gelmektedir [36].

Üç fazın bir araya geldiği durumda “üçlü nokta” oluşur. Bu açının ölçülmesindeki amaç yüzey ıslanabilirliğinin ölçülmesidir. Temas açısı kavramı ilk kez Young tarafından tanımlanmıştır. Üç fazın bir araya geldiği üçlü noktadan vektörel olarak şu denklem elde edilmiştir:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV}\cos\theta \quad (1.3)$$

γ_{SV} : Katı-gaz yüzeyler arası gerilimi

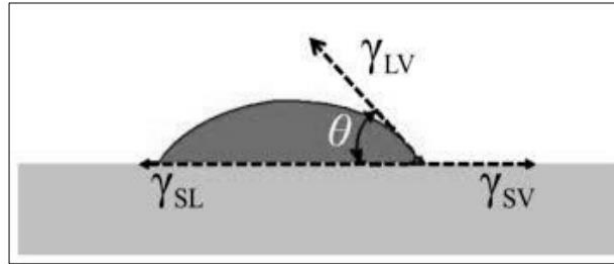
γ_{SL} : Katı-sıvı yüzeyler arası gerilimi

γ_{LV} : Sıvı-gaz yüzeyler arası gerilimi

θ : Temas açısı

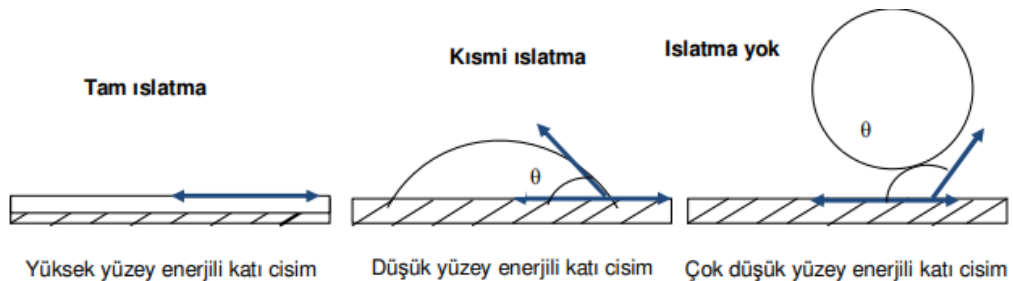
Young denklemi olarak ifade edilen bu eşitlik ideal şartlarda geçerlidir. İdeal şartlar, katı yüzeyin atomsal yapıda düz olması ve kimyasal olarak homojenlik durumlarıdır. Yüzey geriliminin bir sonucu olarak yüzey enerjisi ortaya çıkmaktadır. Bir kristal yapı içerisindeki atomu düşündüğümüzde tüm yönlerden çekme kuvvetine maruz kalır ve bu nedenle kararlı şekilde yerini koruyabilir. Yüzeydeki atomlar ise iç kısımdaki bu atoma uygulan çekme kuvvetinin yarısına maruz kalabileceği için yüzeyden ayrılma

yönelimi vardır. Bu sebeple ayrılma yönelimi de yüzey gerilimini oluşturmaktadır. Yüzey gerilimi ile temas açısı birbirleriyle doğru orantılıdır. Özetle, yüzey gerilimi azaldığı durumlarda temas açısı da azalır. Yüzeyde pürüzlülüğün artması ise yüzey özelliklerini değiştirirken, yüzeyle su damlası arasında hava sıkışmasına neden olacağı için etkileşme miktarını azaltmaktadır [36].



Şekil 1.10. Yüzey üzerindeki sıvıya etki eden kuvvetler [36]

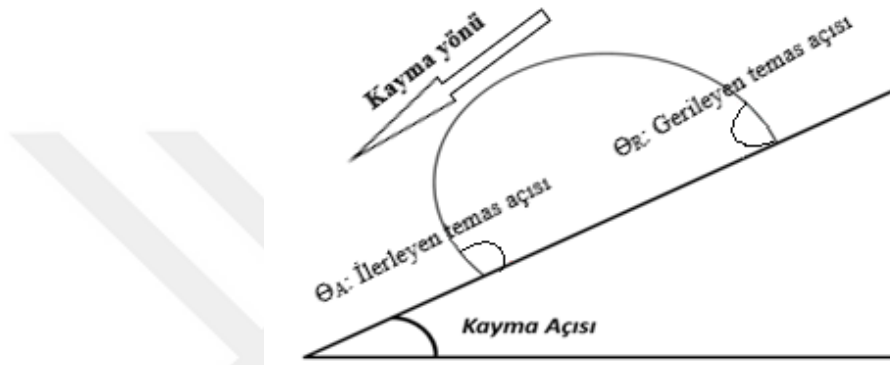
Young eşitliği yalnızca sıvı yüzeyi düzgün, pürüzsüz, homojen, çözülmeyen ve ölçüm yapılacak sıvıyla herhangi bir etkileşime girmeyen katı yüzeylerde uygulanabilir. Young eşitliğine göre damlanın hareket etmesine kadarki üç fazın yüzey gerilimleri toplamı sıfırdır. Katı yüzeyler yüksek veya düşük enerjili olarak tanımlanırlar. Yüksek enerjili katı yüzeylerde, sıvı yüzeyde homojen olarak dağılır ve ince bir film oluşturur. Bu durumda temas açısı sıfıra yakındır ve yüzey tamamen ıslanır ve bu duruma hidrofilik denir. Benzer olarak düşük enerjili yüzeylerde su damlaları ayrı ayrı yerleşirler. Bunlarda temas açısı 90°'den yüksek ve yüzey hidrofobik yapıdadır. Roach ve ark. su damlacıklarının düşük enerjili yüzeylerden ayrılmaya çalıştığını ve dolayısıyla düşük enerjili yüzeylerde hidrofobik etkinin görüleceğini tespit etmişlerdir [40]. Şekil 1.11.'de yüzey enerjisinin ıslatma davranışına etkisi görülmektedir [41].



Şekil 1.11. Yüzey enerjisinin ıslatma davranışına etkisi [41]

1.4.2. Temas açısı histerezi

Eğimli bir yüzeyde kayan damlanın, ilerleme yönündeki açısına ilerleme açısı, ters yönde ki açısı ise gerileme açısı adı verilir. Hareket halindeki bir damlanın ilerleyen açısı maksimum, gerileyen açısı ise minimum temas açısı değeridir (Şekil 1.12.). Bu iki açı arasındaki fark ise temas açısı histerezi olarak tanımlanır ve hidrofobik özellik arttıkça bu fark azalır [40, 42, 43].



Şekil 1.12. Kayma açısı, ilerleyen ve gerileyen temas açıları [42]

1.4.3. Yüzey gerilimi ve serbest yüzey enerjisi

Sıvı içerisindeki molekül, çevresindeki moleküller tarafından tüm yönlerden eş kuvvetle çekilmektedir. Fakat yüzeydeki moleküller sadece tek taraflı bir çekime maruz kalmaktadır ve sonucunda sıvı yüzeyi zarımsı bir hal alır. Yüzey molekülleri tek taraflı çekim kuvvetine uğradıkları için iç moleküllere oranla moleküller arası mesafelerinde artış olur. Artış ile birlikte oluşan gerilmeye sıvının yüzey gerilimi adı verilir [44].

Yüzey enerjisi, malzeme içindeki türlerin (katı veya sıvı) enerjileri arasındaki fark olarak adlandırılabilir. Örneğin, bir sıvının atomları ve molekülleri, bir malzemenin yüzeyinin altındayken daha düşük bir enerjik konuma yerleşmek için bu şekilde hareket etme eğilimindeyken, bir malzemenin yüzeyindeki parçacıklar, sıvıya doğru yalnızca doğru kuvveti uygular; daha düşük enerjili bölgeler haline gelir [45, 46]. Bir katının yüzey enerjisini belirlemek için, polar ve dispersif (non-polar) kısımlar dâhil

olmak üzere bilinen yüzey gerilimleriyle test sıvılarının temas açıları ölçülür. Bu polar ve dispersif kısımlar, uygun bir modele dayalı olarak katı ve sıvı arasındaki arayüzey gerilimini σ_{SL} hesaplamak için kullanılır. Sık uygulanan bir model, sıvının yüzey geriliminin σ_L ve katının yüzey enerjisi σ_S 'nin polar ve dispersif kısımlarının geometrik ortalamasını hesaba katan Owens, Wendt, Rabel ve Kaelble (OWRK modeli) modellerinden biridir (Denklem 1.4):

$$\sigma_{SL} = \sigma_S + \sigma_L - 2\sqrt{\sigma_S^d \sigma_S^L} - 2\sqrt{\sigma_S^p \sigma_S^p} \quad (1.4)$$

σ_{SL} katı ve sıvı arasındaki yapışma işi olduğunda ve σ_S^d ve σ_S^p , katının yüzey enerjisinin dispersif ve polar bileşenleridir, σ_S^L ve σ_S^P ise sıvının dispersif ve polar bileşenleridir [40, 42].

1.4.4. Temas açısı ölçüm teknikleri

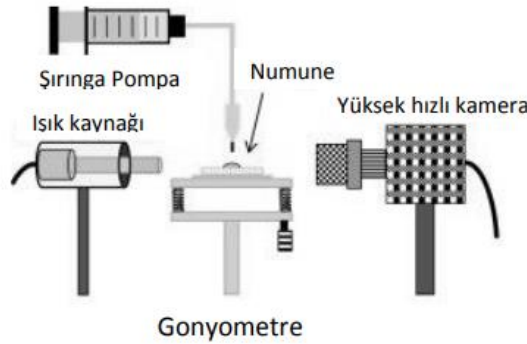
a) Durağan damla yöntemi (Sessile drop)

Temas açısını analiz etmek için kullanılan en yaygın olarak yöntemlerden olan durağan damla yönteminde sıvı damlasının düz bir yüzeyde dengede olduğu durumda üç fazlı denge arayüzey noktasında teğet açının doğrudan ölçümüne dayanmaktadır [47, 48]. Bu yöntemin kullanım açısından basit olmakla birlikte sadece damla için gerekli küçük yüzey alanına ve az miktarda sıvıya ihtiyaç duymaktadır. Temas açısı ölçümünün tekrarlanabilirliği ve doğruluğu, esas olarak teğet çizgisinin doğru atanmasına ve operatörün tutarlılığına bağlıdır.

Optik CCD kameranın, numunenin yakın kenarı (odak dışı) görüş hattının dışında olacak ve profilin bir kısmı substrat yüzeyi tarafından yansıtılarak ufuktan hafifçe aşağı eğilmesi önerilir. Profilde bulanık bir sıvı alt tabaka temas hattının oluşumunu önleyen odak noktasına getirilir. Gözleme yardımcı olmak için her zaman bir arka plan ışığı kullanılırken, sıvının veya substratın istenmeyen ısınmasını önlemek için belirli bir ışık kaynağı seçilir. İlerleyen bir temas açısı oluşturmak için damla, dar ölçülü paslanmaz çelik veya teflon iğneli bir mikrometre şırınga kullanılarak yaklaşık 5 mm

çapa yavaşça büyütülür. İstenmeyen titreşimi önlemek için ölçüm sırasında iğne sıvı damlası içinde kalmalıdır ve damla profili şeklini bozmaması için iğne çapı olabildiğince küçük olmalıdır. Damlanın görüntüsü simetrik olmayabileceğinden dolayı sıvı damla profilinin her iki tarafında temas açılarının ölçülmesi ve ortalama sonucun kullanılması tavsiye edilmektedir. Büyük yüzey alanlı malzemelerde ölçüm yapılırken, tüm yüzeyi temsil eden ortalama bir değer vermek için temas açıları birden çok noktada ölçülmelidir. Bununla birlikte, ölçüm anında atmosfere bağlı olarak temas açısı değişebilir. Bu nedenle ortam şartları dikkate alınmalıdır. Bu tekniğin dezavantajı ise; düşük temas açısı değerlerinde (20° altında), teğet çizgisinin tahsis edilmesinin zor olması nedeniyle doğru bir ölçüm yapılması güç olabilmektedir [47].

Şekil 1.13.'te Sessile Drop (Durağan Damla) yöntemiyle temas açısı ölçümünde kullanılan gonyometrenin temsili görüntüsü görülmektedir [41].



Şekil 1.13. Durağan damla yöntemi ile temas açısı ölçümünde kullanılan gonyometre [41].

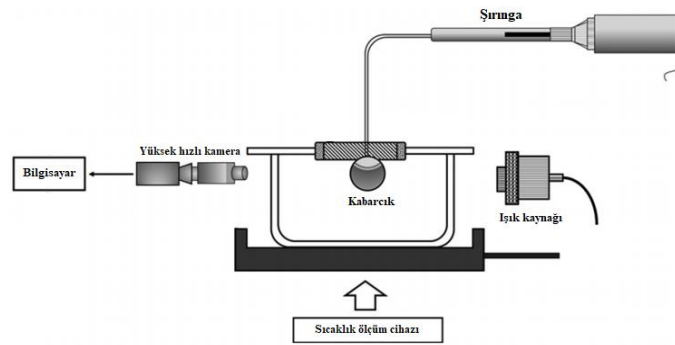
Gonyometre cihazı temel olarak damlanın gönderildiği düz yüzey, ışık kaynağı, mikro şırınga, ultra-yüksek çözünürlüklü bir kamera ve görüntünün yansıtılarak hesaplamaların yapıldığı bir bilgisayardan oluşmaktadır. Gonyometre de temas açısının haricinde yüzey gerilimleri de tespit edilebilmektedir.

b) Hapsedilmiş kabarcık yöntemi (Captive bubble)

Sıvının düz katı substrat üzerindeki temas açısını analiz etmek için başka bir yöntem olarak, katı numunenin alt yüzeyine özel iğne aracılığıyla hapsedilen sıvı kabarcığının oluşturduğu temas açısının ölçülmesi esasına dayanmaktadır (Şekil 1.14.). Bu teknikte,

test sıvısı içindeki hava kabarcığının oluşturduğu temas açısı doğrudan belirlenebilmektedir. Bu yöntem, Taggart ve ark. [49] tarafından geliştirilmiştir ve yaygın olarak "hapsedilmiş kabarcık yöntemi" olarak ifade edilmektedir. Kısaca, substratın altında bir hava kabarcığı oluşturmak için test sıvısına küçük bir miktar hava (yaklaşık 0.05 ml) verilir. Durağan damla tekniğine benzer şekilde; iğne, ilerleyen açının dengesini bozmamak ve ayrıca kabarcığın katı yüzey üzerinde sürüklenmesini önlemek için kabarcık içinde kalmalıdır.

Bu teknik, katı numunenin atmosferik arayüzey gerilimi ile dengede olmasını sağlama avantajına sahiptir. Ayrıca, havadan gelen katı-buhar arayüzü üzerindeki safsızlıkların sayısını da azaltır. Ayrıca bu yöntemde temas açısı çalışmalarının sıcaklığa bağımlılığını araştırmak mümkündür. Test sıvısının sıcaklığı, durağan damla tekniğine kıyasla kolaylıkla izlenebilir. Polimerik yüzeylerde, hapsedilmiş kabarcık ve durağan damla yöntemi ile ölçülen temas açılarındaki dikkate değer bir uyum kaydedilmiştir. Öte yandan, ölçümün doğası gereği, hapsedilmiş kabarcık tekniğinin, durağan damla tekniğine göre çok daha fazla test sıvısına ihtiyacı vardır. Katı üzerindeki filmin sıvı tarafından çözülmesi veya test çözeltisine daldırıldıktan sonra numunenin şişmesi sorunları da olabilmektedir [47, 48].

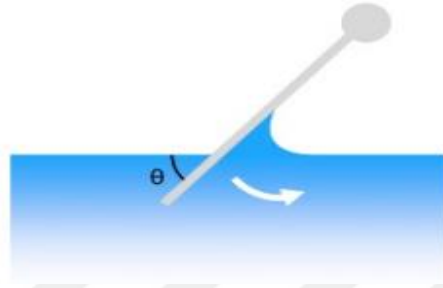


Şekil 1.14. Hapsedilmiş kabarcık yöntemi gösterimi

c) Eğik plaka yöntemi (Tilting plate)

Çok küçük temas açılarının ($< 10^\circ$) ölçülebilmesinin mümkün olduğu bu metotta, dikdörtgen şeklinde bir plaka bir ucundan sıvı yüzeyinde hareketsiz ve kararlı bir şekilde tutturulur. Daha sonra plakanın serbest olan ucu, ağzına kadar sıvı dolu bir

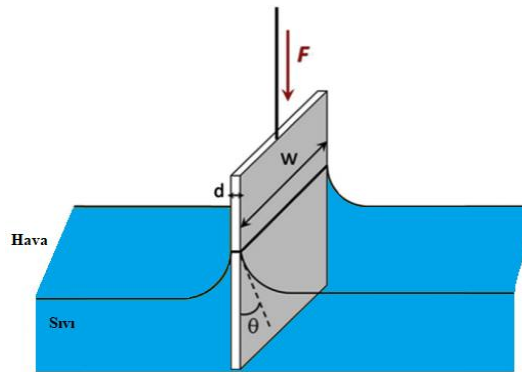
kabın içine daldırılır ve bu sırada plakanın iki yüzeyinde de sıvı tarafından bir eğiklik oluşur. Ön tarafın temas açısı kademeli olarak artarken, plakaya eğim verildikçe arkadaki temas açısı azalmaktadır. Plakanın bir yüzeyindeki eğiklik, Şekil 1.15.'de ki gibi dik pozisyona gelinceye kadar yavaşça sıvı içinde döndürülür ve plaka üzerinde oluşan açı saptanır [43].



Şekil 1.15. Eğik plaka yöntemi ile temas açısının belirlenmesi [43]

d) Wilhelmy denge yöntemi (Wilhelmy Balance)

Bu teknik, katı bir yüzeydeki temas açısının dolaylı olarak ölçülebildiği bir yöntemdir. İnce, pürüzsüz yüzeyli, dikey bir plaka sıvı ile temasa ettirildiğinde, ağırlığındaki değişim bir denge yoluyla tespit edilir. Denge üzerinde tespit edilen kuvvet değişikliği, yüzdürme kuvveti ile ıslatma kuvvetinin bir inikadır. Wilhelmy denge yönteminin temsili görüntüsü Şekil 1.16.'da sunulmaktadır [47].



Şekil 1.16. Wilhelmy denge yöntemi ile temas açısının belirlenmesi [47]

Denklem 1.5’de ρ ; temas hattının çevresi, θ ; temas açısı ve γ_{LV} ; sıvının yüzey gerilimidir.

$$WF = \rho\gamma LV\cos\theta \quad (1.5)$$

Daldırma derinliği sıfıra eşit değilse, denkleme sıvı hacmi (V) eklenecektir.

$$WF = \rho\gamma LV\cos\theta - V\Delta\rho g \quad (1.6)$$

Denklem 1.6’da, $\Delta\rho$; sıvı ile buhar arasındaki yoğunluk farkı, g ; yerçekimine bağlı ivmedir. Test sıvısının yüzey gerilimi biliniyorsa, temas açısı kolayca hesaplanabilmektedir. Bu teknik, temas açısını analiz etmek için uygun bir yöntem gibi görünse de, bazı sınırlamaları vardır. Doğru sonucu elde etmek için yüksek hassasiyetli bir elektro terazi gereklidir. Malzeme çözeltide çok fazla bekletilip şişmesi önlenmeli ve su buharı plakaya adsorbe olmamalıdır. Aynı zamanda dikey plakanın kenarları düzgün bir yapıya, aynı morfolojiye ve bileşime sahip olmalıdır [47].

Ammar ve ark. epoksi-polydimetilsiloksan matriks içerisine nano ZnO katkısı ekleyerek elde ettikleri kompozit malzemenin yüzey özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarda nano ZnO partiküllerinin kompozitin temas açısını 65° değerinden 115° değerine ulaştırdığı görülmüştür [50].

İbrahim ve ark. PS (polistren) matriks içerisine nano SiO₂ ekleyerek elde ettikleri kompozitin ıslanabilirliğini araştırmışlardır. Artan nano SiO₂ katkısı ile birlikte temas açısı değerlerinde artış meydana geldiği görülmüştür. Saf polistren temas açısı $\sim 90^\circ$ değerindeyken nano SiO₂ katkısı ile birlikte temas açısı 115° değerine ulaşmıştır [51].

Li ve ark. epoksi matriks içerisine modifiye edilmiş nano silika ekleyerek süperhidrofobik kaplamalar elde etmeye çalışmışlardır. Çalışmalar sonucunda $81,6^\circ$ temas açısına sahip saf epoksiye modifiye edilmiş nano silika katkısı ile birlikte temas açısını $158,6^\circ$ değerine ulaştırarak süperhidrofobik hale getirmişlerdir [52].

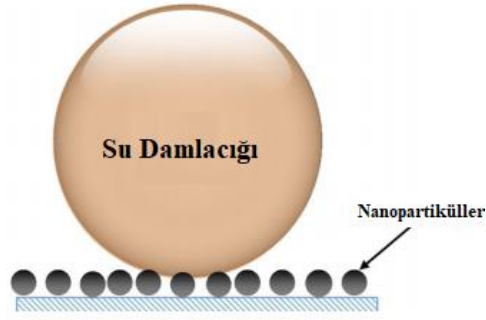
Manoudis ve ark. farklı polimer matriksleri içerisine nano boyutlu SiO_2 , Al_2O_3 , SnO_2 ve ZnO ekleyerek elde ettikleri nano kompozitlerin temas açısı davranışlarını incelemişlerdir. Saf PMMA matriksin temas açısı yaklaşık 70° iken %2 nano SiO_2 katkısı ile birlikte 163° değerine ulaşarak süperhidrofobik yapı sergilemiştir [53].

Robert ve ark. alüminyum alaşımlarının yüzey hidrofobikliğini artırmak için ürettikleri nano ZnO katkılı PVC polimer nanokompozitin temas açısını incelemişlerdir. Ağırlıkça %0,5-%2,5 oranlarında ekledikleri nano ZnO ile yüzeyin temas açısı değerlerinde artış kaydetmişlerdir. %2,5 nano ZnO katkılı kompozitin temas açısını 154° değerine ulaştırarak süperhidrofobik yapı elde etmişlerdir [54].

Goncalves ve ark. selülozik fiberlerin yüzeylerini nano TiO_2 ile modifiye ederek hazırladıkları nanokompozitin temas açısını araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda, modifiye edilmemiş fiberlerin temas açısı iki katına varan seviyelere ulaşmıştır. Bu çalışma, nano katkıların ilavesiyle kendi kendini temizleyen malzemeler, hava arındırma filtreleri dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için perspektifler açmıştır [55].

Darie ve ark. PLA (Polilaktikasit) matriksi içerisine nano kil ekleyerek elde ettikleri nanokompozitin yüzey hidrofobikliği üzerine etkisini araştırmışlardır. Saf PLA matriksin temas açısı 79° değerindeyken nano kil katkısı ile birlikte $\sim 90^\circ$ değerine ulaşmıştır [56].

Bu çalışmalar ile birlikte, nano katkıların polimerlerin temas açısını artırabildiği kanıtlanmaktadır. Artan temas açısı ile birlikte kir tutmayan yüzeyler, daha iyi korozyon direnci, daha iyi tribolojik performans, antimikrobiyal yüzeyler, buz oluşumunu engelleyen yüzeyler gibi birçok olumlu etkinin elde edilebilmesi mümkündür. Şekil 1.17.'de nanopartiküllerin temas açısına etki mekanizması görülmektedir.



Şekil 1.17. Nanopartiküllerin temas açısına etki mekanizması [57]

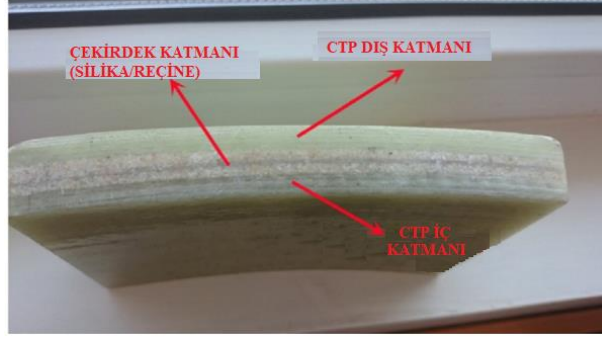
1.5. Çalışmanın Kompozit Boru Sektöründeki Önemi

Kompozit borular, yaygın çelik borulara göre kurulum ve bakım maliyetinin daha düşük olması, düşük yoğunluğu ve dolayısıyla nihai yapıdaki ağırlık tasarrufu, korozyon direnci gibi birçok avantaja sahiptir. Dolayısıyla içme suyu iletim hatları, deniz altı boru hatları, kanalizasyon hatları gibi altyapı hizmetleri başta olmak üzere inşaat, petrol-doğalgaz taşımacılığı, askeri ve havacılık gibi alanlarda kullanım açısından oldukça daha fazla talep görmektedir [58, 59].

Polyester matriksli kompozit malzemeler, üstün özellikleri neticesinde kompozit boru sektöründe yoğunlukla kullanılmaktadır. Bu kompozitlerin özellikleri, özellikle su emilimi nedeniyle, hizmet ortamlarına maruz kaldıklarında etkilenebilmektedir. Suyu maruz kaldıktan sonra, mekanik mukavemet kaybından ziyade kompozitin şişmesine ve hasara uğramasına neden olarak olumsuz etki yapmaktadır [60]. Bu bağlamda servis suları, içme suları, kanalizasyon suları gibi genel olarak su geçişinin olduğu alanlarda kullanılan cam fiber takviyeli polyester (CTP) borular, doğrudan suya maruz kalmalarına rağmen performanslarını kaybetmeden uzun süre bütünlüğünü korumalıdır.

Bu çalışma sonucunda, boruların sürekli kullanımında meydana gelen su emme kaynaklı performans sorunları ve suyun hareketiyle iç yüzeyinin aşınma oranının düşürülebileceği düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlarda saf polyestere nano katkıları eklenmesiyle birlikte su temas açısı sonuçlarında ciddi bir iyileşme kaydedilmiştir. Yüksek temas açısı ile birlikte kompozitlerin yüzeyi hidrofobik hale gelerek su emilim

performansına olumlu etki yapabilmesi, aynı zamanda polyesterin aşınma ve sürtünme performansını geliştirerek kullanım ömrünü artırabilmesi mümkündür. Şekil 1.18.'de Cam Fiber Takviyeli (CTP) kompozit boru yapısı görülmektedir.



Şekil 1.18. Cam Fiber Takviyeli (CTP) kompozit boru yapısı [59]

d'Almeida ve ark. CTP borularda su emme davranışının kullanım performansına etkisini incelemişlerdir. Suyu daldırıp bekleterek elde ettikleri sonuçlarda, kompozit şişme meydana geldiğini ve boyutsal olarak etkileyerek kullanım performansını düşüreceğini sonucuna varmışlardır [60].

Abbas ve ark. kompozit boru sektörüne yönelik epoksi matriks içerisine ağırlıkça %2 oranında karbon nanotüp ekleyerek elde ettikleri kompozitin performansını karşılaştırmışlardır. Elde edilen kompozitin gerilme özelliklerinde %60'a varan iyileşme kaydetmişlerdir [61].

Xu ve ark. floropolimer/SiO₂ esaslı nanokompozit yapıyı polyester yüzey üzerine kaplama yaparak, polyesterin temas açısı ölçümünü gerçekleştirmişlerdir. Nanokompozit yapı ile birlikte polyester yüzeyinde 151,5° temas açısına ulaşarak yüzeyi hidrofobik hale getirmişlerdir [57].

Literatürde bu sorunlara yönelik çalışmalar mevcut olmakla birlikte yapılan çalışmalar kısıtlı kalmaktadır ve bu konuda araştırmalara ihtiyaç duymaktadır. Bu tez çalışmasında polyester matriksli kompozitlerin özelliklerinin geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

BÖLÜM 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde deneyler için kullanılacak polyester esaslı kompozit malzemelerin hazırlanması, yoğunlukların tespiti, tribolojik deneyler, yüzey özelliklerinin incelenmesi yer almaktadır. Tribolojik deneyler olarak pin-on disk aşınma deney düzeneğinde malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Yüzey özelliklerinin incelenmesi neticesinde numunelerin farklı katkı oranına göre değişen temas açıları ve yüzey enerjileri hesaplanmıştır. Aşınan yüzeylerin optik ve sem görüntülerinin yanı sıra temas açısı görüntüleri de incelenmiştir.

2.1. Malzemeler ve Numune Üretimi

Matriks malzemesi olarak izoftalik polyester (1/100 sertleştirici) kullanılmıştır. Polyester matriks içerisine eklenen katkılarda ise nano boyutta silisyum dioksit (SiO_2) ve zirkonyum dioksit (ZrO_2) kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 2.1.'de görülmektedir.

Silisyum dioksit (SiO_2) ve zirkonyum dioksit (ZrO_2) tozlarının kullanılma sebebi, iyi stabilitesi, yüksek mukavemeti, yüksek kırılma tokluğu, üstün aşınma direnci, yüksek sertliği ve mükemmel kimyasal direnci nedeniyle özel bir yere sahip olmasıdır [62].

Tablo 2.1. Malzemeler ve özellikleri

Malzemeler	Özellikler	Marka
Polyester Reçine (POLYLITE 721-800)	İzoftalik	REICHHOLD™
Silisyum dioksit (SiO_2)	10-20 nm	Alfa-Aesar™
Zirkonyum dioksit (ZrO_2)	12-25 nm	Alfa-Aesar™

Kullanılan nano partiküllerin içerisinde mevcut olabilecek rutubeti gidermek için 80 °C’de etüv fırınında kurutulmuşlardır. Daha sonra polyester reçine içerisine belirlenen

miktarlarda nano partiküller eklenerek mekanik karıştırıcı (WiseStir HT50DX) ile 1 saat boyunca 250 rpm’de karıştırılmıştır. Bu işlem sonunda reçine içerisinde oluşan kabarcıkların alınabilmesi için vakumlama işlemi yapılmıştır. Ön karıştırması tamamlanan reçine ultrasonik karıştırıcıya (Sonics VC750) alınarak %30 genlikte 15 dakika boyunca karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Ultrasonik karıştırma esnasında oluşan ısınnın reçinenin yapısını bozmaması için buzlu su içerisinde karıştırma yapılmıştır. Şekil 2.1.’de polimer matriksli nano kompozit malzemeler hazırlanırken kullanılan ekipmanlar görülmektedir.



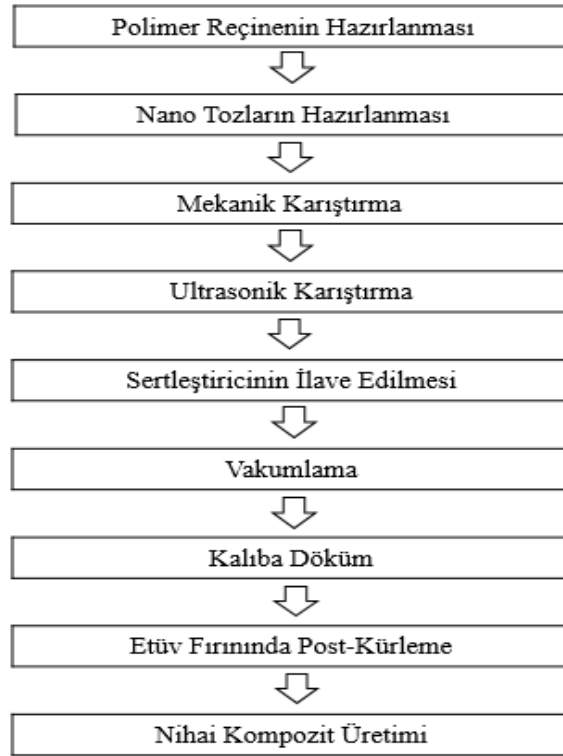
Şekil 2.1. Kompozit hazırlamada kullanılan ekipmanlar a) Mekanik karıştırıcı (WiseStir HT50DX) b) Buzlu su içerisinde ultrasonik karıştırma (Sonics VC750) c) Vakumlama tüpü

Hazırlanan kompozite, sertleştirici ilave edilip karıştırıldıktan sonra tekrar vakumlama işlemi yapılmıştır. Elde edilen karışım silikon ve teflon esaslı açık kalıplara dökülerek 24 saat süre boyunca oda şartlarında kalıp içerisinde kürlenmesi sağlanmıştır. Son olarak malzemelerin post kürlenme işlemi için 6 saat süreyle 80 °C’de etüv fırınında tutulmuştur. Şekil 2.2.’de kullanılan etüv fırını görülmektedir.



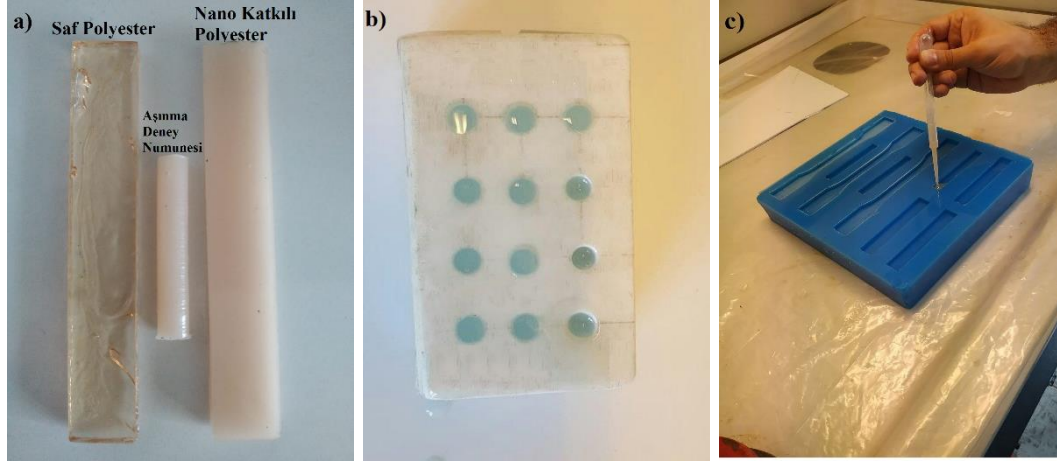
Şekil 2.2. Post kürleme işleminde kullanılan etüv fırını

Numuneler deneylere hazırlanırken kullanılan akış şeması Şekil 2.3.'teki gibidir;



Şekil 2.3. Numune Hazırlama Şematik Görüntüsü

Şekil 2.4.'te numuneler üretilirken kullanılan kalıplar ve elde edilen nanokompozit numuneler görülmektedir.



Şekil 2.4. Deney numuneleri ve kullanılan kalıplar a) Temas açısı ve aşınma deneyi numuneleri b) Aşınma numune kalıbı c) Temas açısı numune kalıbı

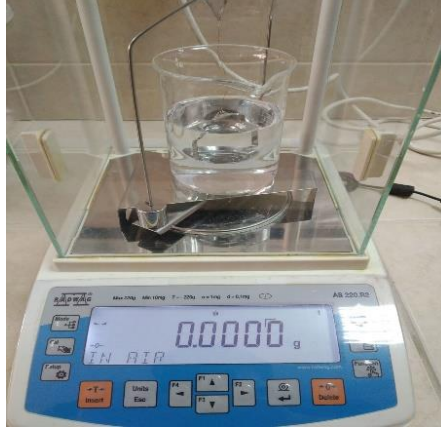
Aşınma ve sürtünme deneyleri için 48 adet, temas açısı ve yüzey enerjisi deneyleri için 32 adet, sertlik deneyleri için 24 adet olmak üzere toplam 104 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Termal analiz ve XRD analizi, sertlik deneylerinde kullanılan numuneler ile yapılmıştır.

2.2. Yoğunluk Deneyi

Saf polyesterin ve nano partikül katılarak elde edilen kompozitlerin yoğunluklarının farkını gözlemlemek amacıyla Şekil 2.5.'te ki Radwag marka hassas terazinin Kit 85 adlı düzeneği kullanılmıştır. Yoğunluk sonuçları, özgül aşınma oranını etkilediği için ölçümlerinin yapılması önem arz etmektedir.

Numunelerin havada ve saf sudaki ağırlıkları ölçülmüş ve denklem 2.1 bağıntısına göre yoğunluklarını terazi otomatik olarak hesaplamıştır. Her numune için en az üç ölçüm yapılmıştır ve ortalaması alınmıştır. (ρ : yoğunluk, m_{kuru} : numunenin havadaki ağırlığı, $m_{yaş}$: numunenin su içindeyken ağırlığı).

$$\rho = \frac{m_{kuru}}{(m_{kuru} - m_{yaş})} \quad (2.1)$$



Şekil 2.5. Yoğunluk Ölçüm Kiti

2.3. Sertlik Deneyi

Nano katkı ilave ile birlikte elde edilen polyester kompozit numunelerin katkı oranına bağlı olarak sertlik değerlerindeki meydana gelen değişim incelenmiştir.

Sertlik ölçümü deneyleri ASTM D2240 [63] (ASTM D2240, Durometer Hardness Shore) standardına uygun şekilde Shore D sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Şekil 2.6.'da Sakarya Üniversitesi Polimer Esaslı Malzeme Üretim, Kaplama ve Analiz Laboratuvarında bulunan sertlik ölçümlerinin yapıldığı Shore D sertlik ölçüm cihazı görülmektedir.



Şekil 2.6. Sertlik deneylerinin yapıldığı Shore D sertlik ölçüm cihazı

2.4. Aşınma Deneyi

Sürtünme ve aşınma deneyleri pin-on disk aşınma cihazında ASTM G99 [64] standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin çapı 6 mm, uzunluğu ise 36 mm'dir. Aşınma cihazında disk malzemesi olarak 100Cr6 soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Deneylerden önce numuneler bünyesinde bulunan nemi uzaklaştırmak için 80°C'de 4 saat süreyle kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin yüzeyleri 2400 numaralı zımpara ile parlatılmıştır. Daha sonra numune ve disk yüzeyleri alkolle temizlenerek kurutulmuştur. Her deney en az üç kez tekrarlanmıştır. Aşınma anında veriler bilgisayara otomatik kaydedilmiş ve ortalama değerleri alınmıştır. Deneyler oda koşullarında ve ortalama ~%70 nem altında gerçekleştirilmiştir. Kayma 0,5 m/s ve 1,0 m/s'dir. Uygulanan yükler 2N, 5N ve 10N'dır. Kayma mesafesi 250 m'dir. Şekil 2.7.'de pin-on disk aşınma cihazı görülmektedir.

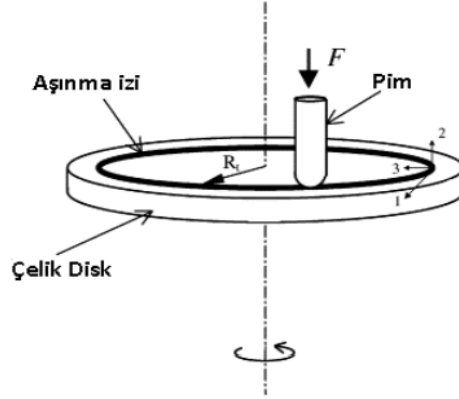


Şekil 2.7. Pin-on disk aşınma cihazı

Hem deney öncesi hem de deney sonrasında pin numuneleri 0,0001 g hassasiyetindeki terazide tartılarak ağırlıkları bulunmuştur ve bulunan ağırlık kayıpları neticesinde denklem 2.2 ile özgül aşınma oranları hesaplanmıştır. Şekil 2.8.'de aşınma deneyi uygulanma metodu görülmektedir [65].

$$k = \frac{\Delta m}{\rho \cdot d} [\text{mm}^3 / \text{Nm}] \quad (2.2)$$

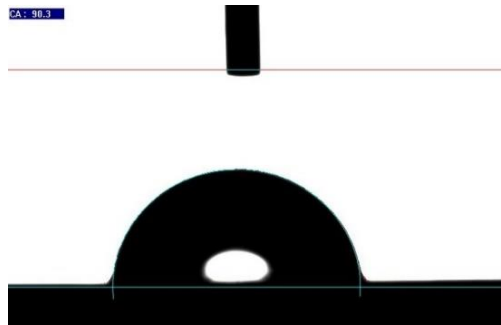
Denklem 2.2'ye göre, k özgül aşınma oranı, Δm son ve ilk ağırlık arasındaki fark, ρ yoğunluk ve d kayma mesafesini göstermektedir.



Şekil 2.8. Aşınma deneyinin uygulanma metodu

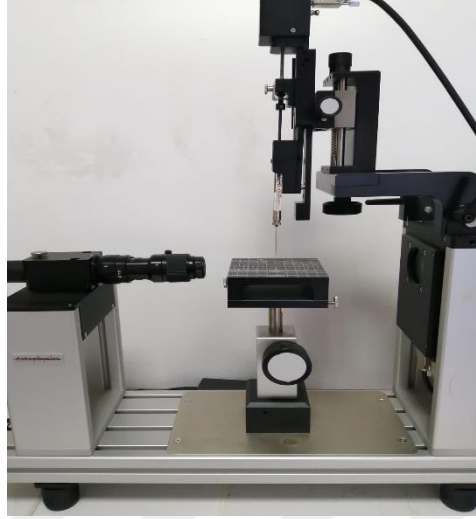
2.5. Temas Açısı ve Yüzey Enerjisi Ölçüm Deneyleri

Deneyler, Dataphysics OCA15 cihazı yardımıyla oda koşullarında yapıldı. OCA15 cihazının elektronik dozajlama sistemi tarafından polimer yüzeyine sıvı damlacıklar oluşturulur. Yapılan deneylerde 5 μ l saf su damlatılarak, damla malzeme üzerine düştüğü anda dijital görüntüsü ultra yüksek yenileme hızına sahip optik/CCD kamera tarafından alınarak kaydedilmiştir. Son olarak yazılım, sıvı ile katı arasındaki temas açısını otomatik olarak belirlemekte ve Şekil 2.9.'da görüldüğü gibi rapor etmektedir. Şekil 2.10.'da ölçümlerin yapıldığı cihaz görülmektedir.



Şekil 2.9. Dataphysics OCA15 cihazı ile saf su temas açısı görüntüsü (90,3°).

Sonuçların güvenilirliği için malzeme yüzeyinin üç farklı kısmından ölçümler alınmıştır.



Şekil 2.10. Temas açısı ve yüzey enerjisi ölçüm cihazı (Dataphysics OCA15)

Yüzey enerjisi, temas açısına bağlı olarak elde edilmektedir. Ancak bir malzemenin yüzey enerjisini saptamak için birkaç test sıvısıyla ölçülmüş temas açılarına da ihtiyaç vardır. Polar ve dispersif yüzey gerilimine sahip en az iki test sıvısı kullanılması gereklidir. Bu çalışmada saf suya ek olarak; dimetilsülfoksit ve etilen glikol sıvıları kullanılmıştır. Bu üç sıvıdan alınan temas açısı ölçümleri, cihazın yazılımına tanımlanmış ve OWRK (Owens, Wendt, Rabel ve Kaelble) yöntemine esas alınarak yüzey enerjileri hesaplanmıştır.

2.6. Termal Analiz

Polyester matriks içerisine eklenen nano tozların matrikse ilave edilmesiyle elde edilen kompozitlerin belli bir sıcaklık programı altında özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri ve tepkimeye absorplanan veya açığa çıkan ısıyı incelemek amacıyla Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan HITACHI STA 7300 marka cihaz ile termal analiz yapılmıştır. Testler 10 °C/dk ısıtma hızında 25 °C'den 600 °C sıcaklığa kadar azot atmosferi altında ısıtılarak termal analizler yapılmıştır.

Kullanılan yöntem, ısıtma veya soğutma sırasında, numune ile referans olarak belirlenen malzeme arasındaki sıcaklık farkı ölçümüne dayanmaktadır. Bu yöntemde, numune ile referans malzeme aynı koşullarda ısıtılmaktadır. Isıtma sırasında numunede meydana gelen hal değişimi veya kimyasal reaksiyon sonucu sıcaklığı değişir ve böylece aynı şartlarda ısıtılan referans malzemesinin sıcaklığı ile ΔT kadar bir sıcaklık farkı meydana gelir [66]. Denklem 2.3'te bu durumun eşitliği verilmiştir.

$$\Delta T = T_r - T_s \quad (2.3)$$

(T_s : Numune sıcaklığı, T_r : Referans malzemenin sıcaklığı)

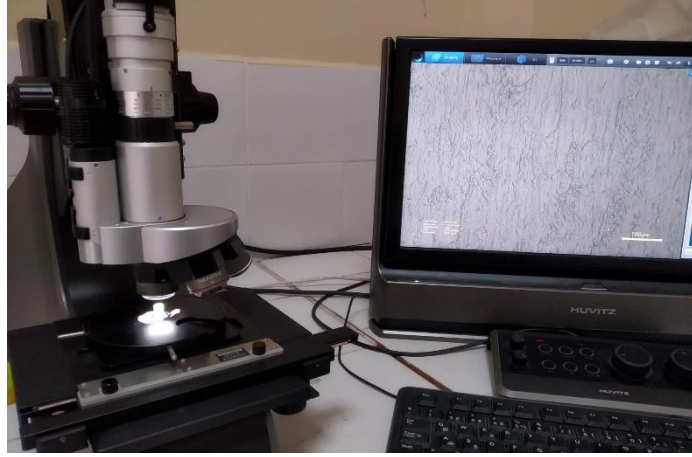
Referans malzemesi termal stabiliteye sahip olmalı ve uygulanacak sıcaklık aralığında faz dönüşümüne uğramamalı veya bozunmamalıdır [66]. Bu sebeple referans malzeme olarak platin kullanılmıştır.

2.7. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi

Polyester matriks içerisine nano tozların matrikse ilave edilmesiyle elde edilen kompozitlerde meydana gelen fazların belirlenmesi ve katkılanan nano partiküllerin kompozit içerisinde varlığını teyit etmek amacıyla Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Rigaku D/MAX 2000 marka cihaz ile XRD analizi yapılmıştır.

2.8. Optik Mikroskop İncelemesi

Sakarya Üniversitesi Polimer Esaslı Malzeme Üretim, Kaplama ve Analiz Laboratuvarında bulunan Huvitz™ marka optik mikroskop yardımıyla nano kompozitlerin ve aşındırıcı diskin aşınma sonrası yüzey görüntülerini incelemek, aşınma türlerini tespit edebilmek amaçlanmıştır. Numune aşınma yüzeylerinin görüntüleri 100-200 μm ölçekte, aşındırıcı disk yüzey görüntüleri ise 1000 μm ölçekte alınmıştır. Şekil 2.11.'de aşınma yüzey ve disk yüzey görüntülerinin alındığı optik mikroskop görülmektedir.



Şekil 2.11. Aşınma yüzey analizlerinin yapıldığı optik mikroskop

2.9. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve Enerji Dağılımlı Spektrum (EDS) Analizi

Taramalı elektron mikroskopunda kompozitlerdeki nano katkının homojen dağılıp dağılmadığını kontrol etmek, nano katkıların topaklanma durumunu incelemek ve malzeme yüzeyini incelemek maksadıyla çeşitli büyütme oranlarında yüzey morfolojisi incelenmiştir. Görüntüler 500-100x büyütme koşullarında elde edilmiştir. EDS analizi ile kompozit içerisinde bulunan nano partikül yapısı ve oranı teyit edilmiştir. Şekil 2.12.'de Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan ve analizlerin yapıldığı SEM (taramalı elektron mikroskobu) görülmektedir.

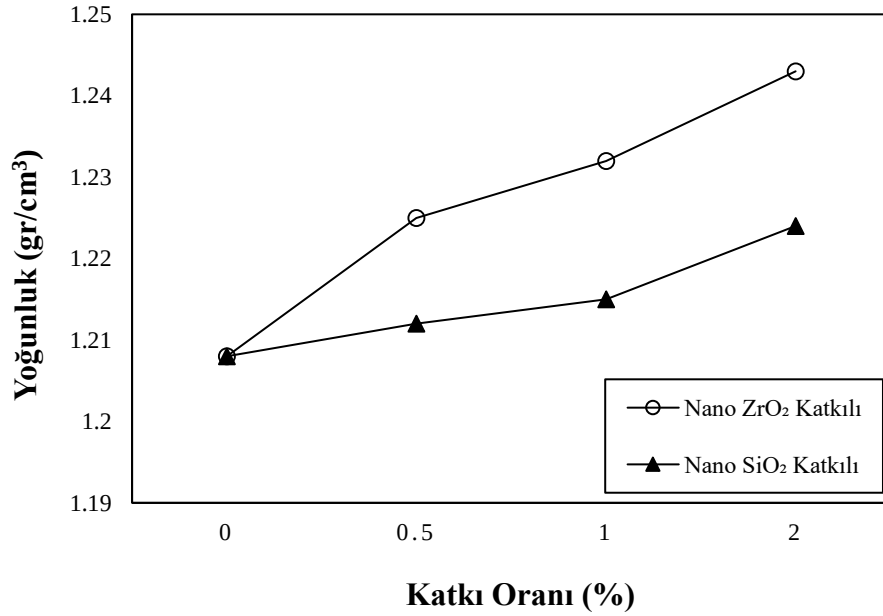


Şekil 2.12. Analizlerin Yapıldığı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

BÖLÜM 3. DENEYSEL SONUÇLAR

3.1. Yoğunluk Deneyi Sonucu

Şekil 2.5.'te görülen ölçüm kitiyle yapılan yoğunluk ölçüm deneyleri sonucunda Şekil 3.1.'de ve Tablo 3.1.'de saf ve nano katkıli polyester kompozitlerin yoğunlukları verilmektedir.



Şekil 3.1. Nano katkı oranına göre polyesterin yoğunluğunun değişimi

Artan katkı oranıyla birlikte malzemelerin yoğunluklarında artış görülmektedir. En yüksek yoğunluk %2 nano ZrO₂ katkıli kompozitlerde olmaktadır. 1,208 gr/cm³ yoğunluğa sahip saf polyestere %2 nano ZrO₂ katkısı ile elde edilen kompozitin yoğunluğu 1,243 gr/cm³ değerine yükselerek %14 artış göstermektedir. Sonuç olarak ZrO₂ (5,68 g/cm³) ve SiO₂ tozlarının (2,65 g/cm³) yoğunluğunun polimer matriksten daha yüksek olması sebebiyle kompozitin yoğunluğunda artış meydana gelmektedir.

Tablo 3.1. Deney malzemelerinin yoğunlukları

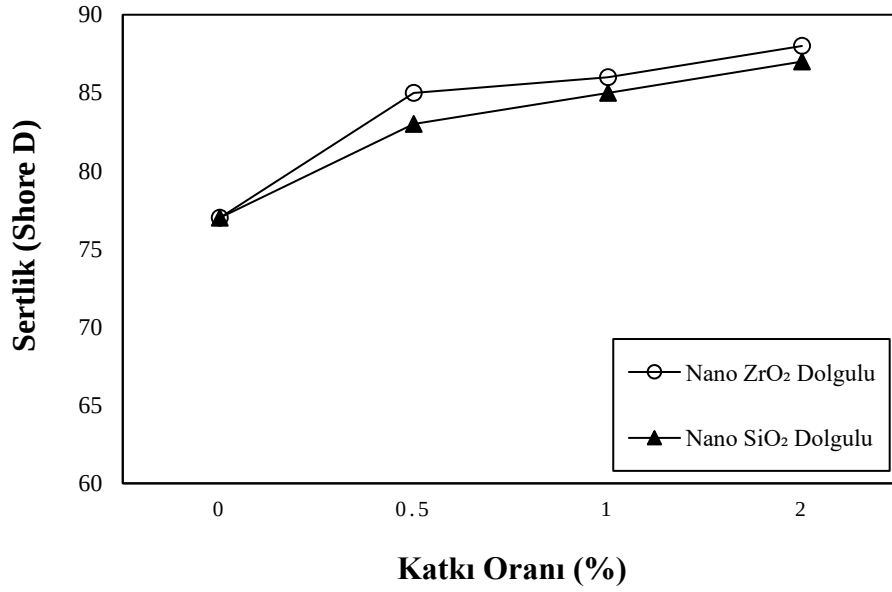
Numune	Yoğunluk (g/cm ³)
Saf Polyester	1,208
% 0,5 nano SiO ₂ katkılı polyester kompozit	1,212
% 1 nano SiO ₂ katkılı polyester kompozit	1,215
% 2 nano SiO ₂ katkılı polyester kompozit	1,224
% 0,5 nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozit	1,225
% 1 nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozit	1,232
% 2 nano ZrO ₂ katkılı polyester kompozit	1,243

Amal Nassar ve Eman Nassar yapmış oldukları çalışmada epoksi matriks içerisine nano SiC ilave ederek elde ettikleri nano kompozitte artan katkı oranı ile birlikte kompozitin yoğunluğu $\sim 1,17 \text{ g/cm}^3$ değerinden $\sim 1,27 \text{ g/cm}^3$ değerine ulaşarak artış meydana geldiğini göstermişlerdir [67]. Literatürde görülen sonuçların yapılan bu deneysel çalışmayı destekler nitelikte olduğu anlaşılmaktadır.

Özsoy, mikro ve nano katkılı kompozitler üzerine yapmış olduğu doktora tezinde, yoğunluğu $1,178 \text{ g/cm}^3$ olan epoksi matriks içerisine %2,5 nano Al₂O₃ katkısıyla birlikte elde edilen kompozitin yoğunluğunun $1,195 \text{ g/cm}^3$ değerine ulaştığını tespit etmiştir. Aynı zamanda nano %2,5 TiO₂ katkısıyla birlikte elde edilen nano kompozitin yoğunluğu $1,197 \text{ g/cm}^3$ değerine ulaşarak artış göstermiştir [22].

3.2. Sertlik Deneyi Sonucu

Şekil 3.2.'de nano katkılı polyester kompozitlerin Shore D sertlik değerleri görülmektedir. Şekilde SiO₂ katkısının artan oranı ile birlikte kompozitlerin sertlik değerleri de artış göstermektedirler. Nanopartiküller, seramik yapısı nedeniyle çok daha iyi bir yüzey sertliğine sahiptir. Bu nedenle nanopartiküllerin matrikse katkısı polimer malzemelerin sertliklerini arttırmıştır.



Şekil 3.2. Nano katkılı polyester kompozitlerin Shore D sertlik değerleri

En yüksek sertlik %2 nano ZrO₂ katkılı kompozitlerde meydana gelmektedir. 77 Shore D sertliğe sahip saf polyestere %2 nano ZrO₂ katkısı ile elde edilen kompozitin sertliği 88 Shore D değerine yükselerek %12,5 artış göstermektedir. %2 nano SiO₂ katkısı ile birlikte 87 Shore D sertlik elde edilmiştir.

Khalil ve ark. yapmış olduğu çalışmada, 52 Shore D sertliği bulunan epoksi matriks içerisine eklenen nano SiO₂ takviyesi ile birlikte kompozitin sertliğinin 88 Shore D değerine kadar ulaşarak artış gösterdiğini tespit etmişlerdir [68].

Hameed ve ark. yapmış olduğu bir çalışmada ise ~80 Shore D sertliğe sahip PMMA matriks içerisine nano %3 ZrO₂ katkısı ekleyerek elde ettikleri kompozit malzemenin sertliğinin 84,08 değerine ulaşarak artış gösterdiğini saptamışlardır [69].

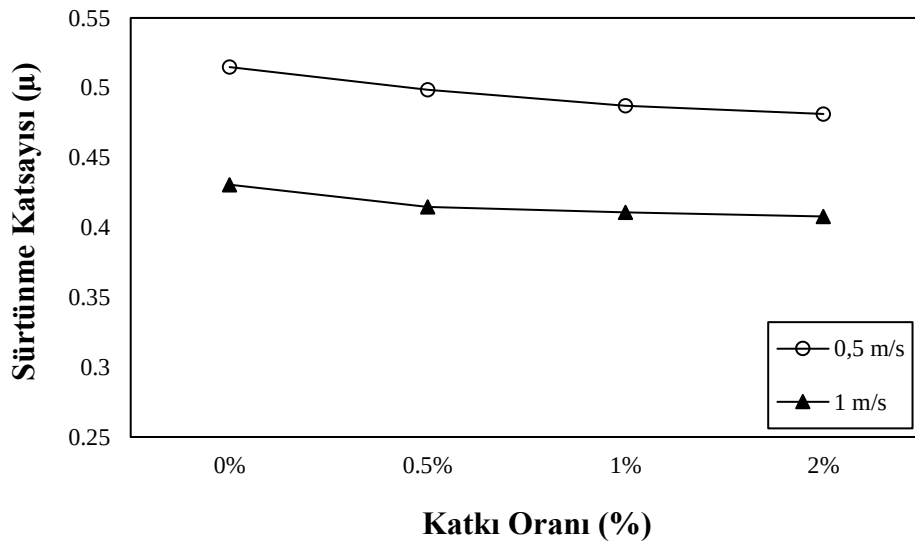
Nadia ve ark. yapmış olduğu başka bir çalışmada 51 Shore D sertliğe sahip epoksi matriks içerisine %0,5-%3 oranlarında nano SiO₂ ve nano Al₂O₃ eklemişlerdir. En yüksek sertliğe %3 katkı oranında ulaşmışlardır. %3 nano SiO₂ katkısıyla birlikte sertlik 81 Shore D değerine, %3 Al₂O₃ katkı oranında ise 85 Shore D sertlik elde etmişlerdir. Elde ettikleri nano katkılı kompozitlerin sertliğinin artan katkı oranıyla

birlikte saf epoksiye göre gelişme kaydettiği görülmektedir [35]. Literatürde görülen sonuçlarda nano katkıların kompozitin sertliğini arttığı görülmekte ve yapılan bu deneysel çalışmayı destekler niteliktedir.

3.3. Aşınma Deneyi Sonucu

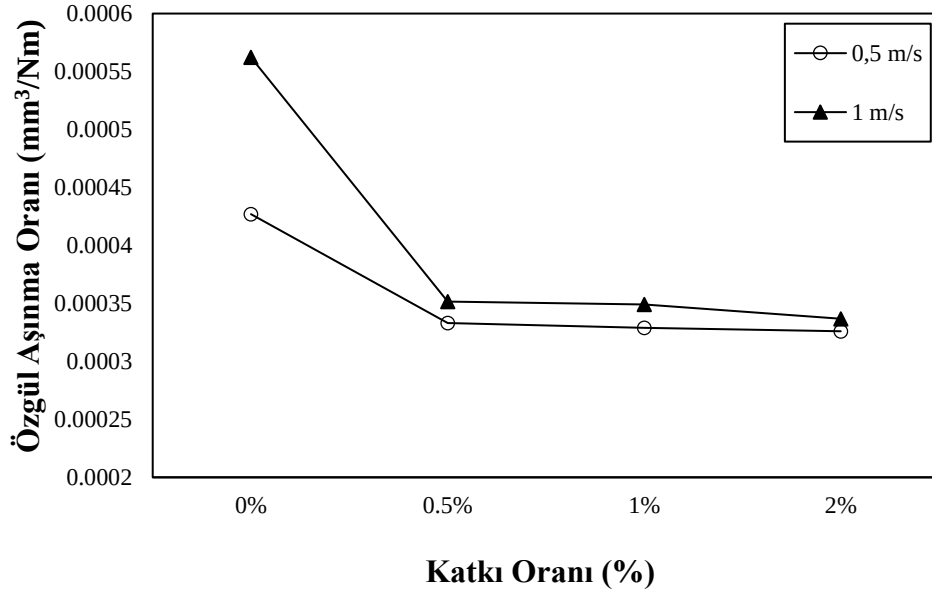
3.3.1. Nano SiO₂ katkılı polyester kompozitler

Şekil 3.3.'te nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının 2N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir. Saf polyester ve nano SiO₂ katkılı kompozitlerin sürtünme katsayıları artan katkı oranı ve artan kayma hızı ile azalmaktadır. En düşük sürtünme katsayısı 1 m/s kayma hızında %2 nano SiO₂ katkılı kompozitlerde olmaktadır. 2N yük altında 0,5 m/s kayma hızında %2 nano SiO₂ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı saf polyestere göre %6,4 azalarak 0,514'den 0,481 değerine düşmektedir. 1 m/s kayma hızında ise %2 nano SiO₂ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı 0,430'dan 0,407 değerine düşerek %7 azalmaktadır.



Şekil 3.3. Nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (2N yük altında)

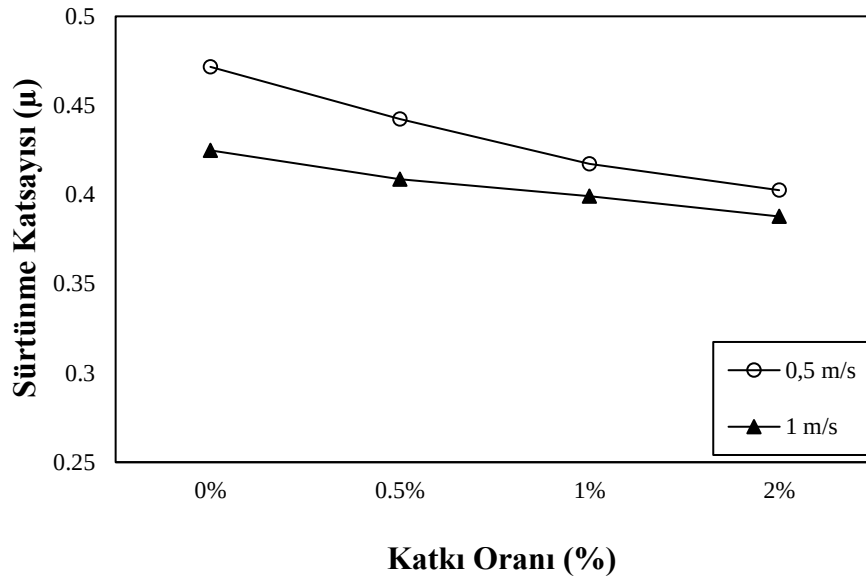
Şekil 3.4.'te nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin aşınma oranlarının 2N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir. Saf polyester ve katkılı kompozitlerin aşınma oranları artan katkı oranı ile azalmaktadır.



Şekil 3.4. Nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (2N yük altında)

En düşük aşınma oranları %2 nano SiO₂ katkılı kompozitlerde olmaktadır. 0,5 m/s aşınma hızında $4,27 \times 10^{-4}$ mm³/Nm özgül aşınma oranına sahip saf polyestere %2 nano SiO₂ katkısı eklendiğinde özgül aşınma oranı %24 oranında azalarak $3,26 \times 10^{-4}$ mm³/Nm değerine gelmektedir. 1 m/s aşınma hızında ise $5,62 \times 10^{-4}$ mm³/Nm özgül aşınma oranına sahip saf polyester %2 nano SiO₂ katkısı ile birlikte özgül aşınma oranı %40 azalarak $3,37 \times 10^{-4}$ mm³/Nm değerine gelmektedir. Kayma hızının artması ile özgül aşınma oranında artış gözlenmiştir. Aynı zamanda kayma hızının artması ile temas ara yüzeyde daha fazla ısı meydana geldiği ve özgül aşınma oranını artırdığı düşünülmektedir. Nano partiküller yüksek ısı ile birlikte matriksten ayrılıp ara yüze girerek abrasif aşınmaya neden olabilmektedir [22].

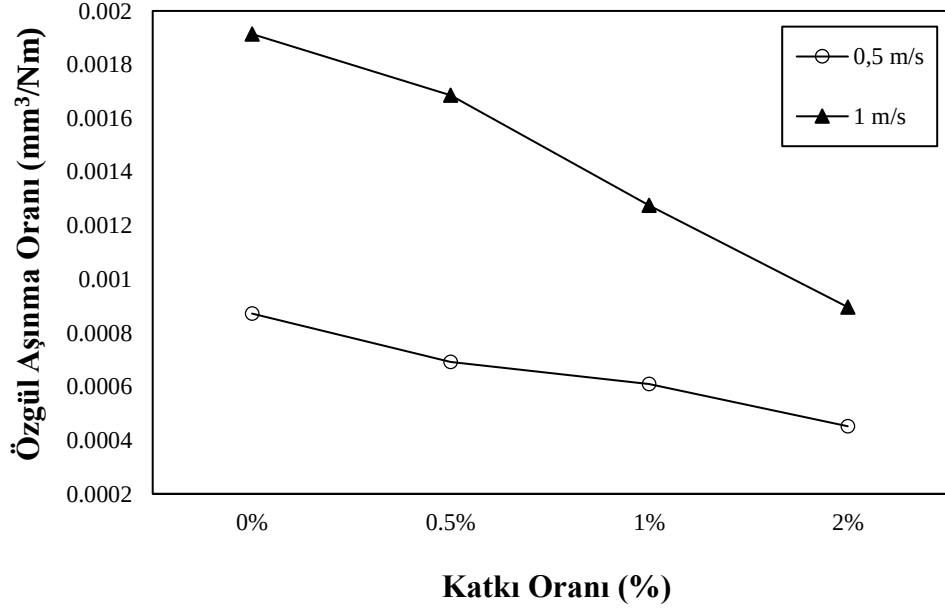
Şekil 3.5.'te nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının 5N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.5. Nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (5N yük altında)

Saf polyester ve nano SiO₂ katkılı kompozitlerin sürtünme katsayıları artan katkı oranı ve artan kayma hızı ile azalmaktadır. En düşük sürtünme katsayısı 1 m/s kayma hızında %2 nano SiO₂ katkılı kompozitlerde olmaktadır. 5N yük altında 0,5 m/s kayma hızında %2 nano SiO₂ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı %15 azalarak 0,471'den 0,402 değerine düşmektedir. 1 m/s kayma hızında ise %2 nano SiO₂ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı 0,424'den 0,388 değerine düşerek %8 azalmaktadır.

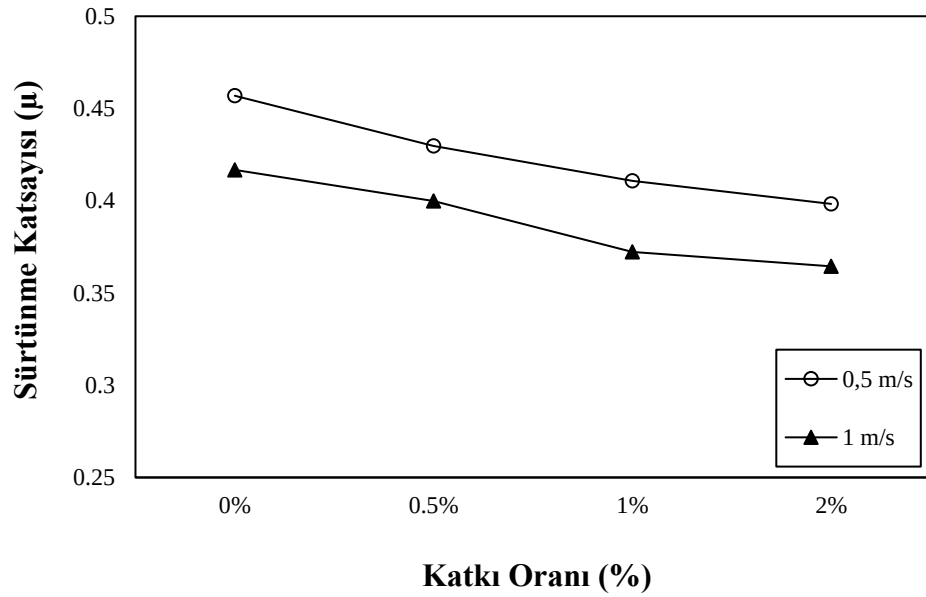
Şekil 3.6.'da nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin aşınma oranlarının 5N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir. Saf polyester ve nano SiO₂ katkılı kompozitlerin aşınma oranları artan katkı oranı ile azalmaktadır.



Şekil 3.6. Nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (5N yük altında)

En düşük aşınma oranları %2 nano SiO₂ katkılı kompozitlerde olmaktadır. 0,5 m/s aşınma hızında $8,7 \times 10^{-4}$ mm³/Nm özgül aşınma oranına sahip saf polyestere %2 nano SiO₂ katkısı eklendiğinde özgül aşınma oranı %48 oranında azalarak $4,52 \times 10^{-4}$ mm³/Nm değerine gelmektedir. 1 m/s kayma hızında ise $1,9 \times 10^{-3}$ mm³ /Nm özgül aşınma oranına sahip saf polyestere %2 nano SiO₂ katkısı ile özgül aşınma oranı %53 azalarak $8,9 \times 10^{-4}$ mm³/Nm değerinde olmaktadır. Kayma hızının artması ile özgül aşınma oranında artış gözlenmiştir.

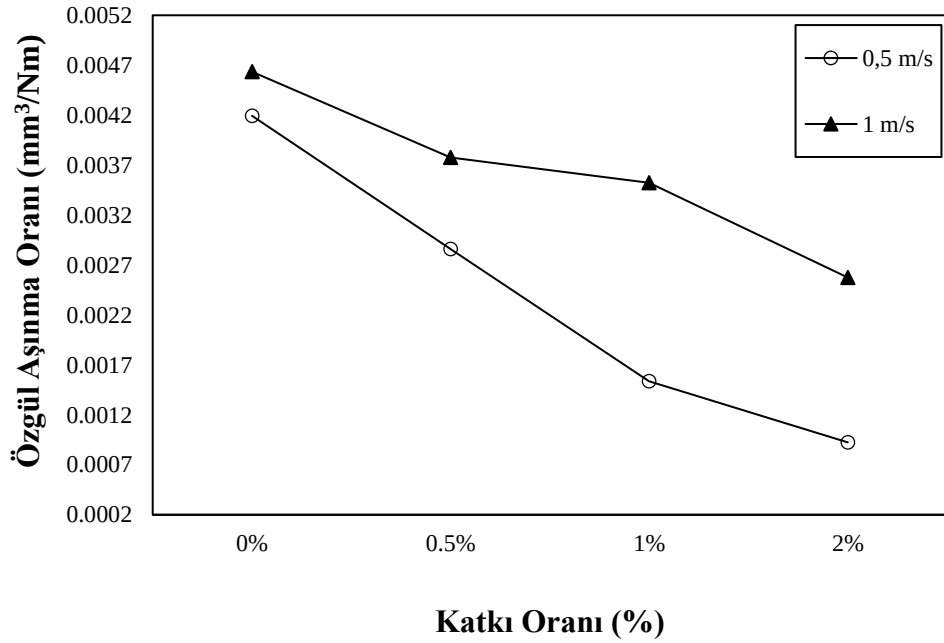
Şekil 3.7.'de nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının 10N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir. Saf polyester ve nano SiO₂ katkılı kompozitlerin sürtünme katsayıları artan katkı oranı ve artan kayma hızı ile azalmaktadır.



Şekil 3.7. Nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (10N yük altında)

En düşük sürtünme katsayısı 1 m/s kayma hızında %2 nano SiO₂ katkılı kompozitlerde olmaktadır. 10N yük altında 0,5 m/s kayma hızında %2 nano SiO₂ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı %13 azalarak 0,457'den 0,398 değerine düşmektedir. 1 m/s kayma hızında ise %2 nano SiO₂ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı 0,416'dan 0,364 değerine düşerek %12,5 azalmaktadır. Kayma hızının artması ile sürtünme katsayısında artış gözlenmiştir.

Şekil 3.8.'de nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin aşınma oranlarının 10N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir. Saf polyester ve katkılı kompozitlerin aşınma oranları artan katkı oranı ile azalmaktadır.

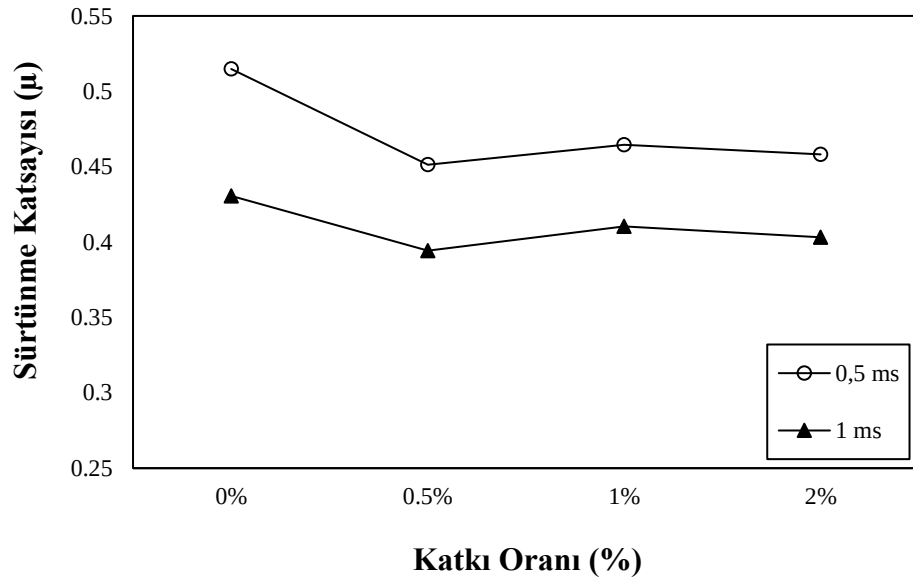


Şekil 3.8. Nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (10N yük altında)

En düşük aşınma oranları %2 nano SiO₂ katkılı kompozitlerde olmaktadır. 0,5 m/s kayma hızında 10N yük altında $4,19 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf polyester %2 nano SiO₂ katkısı eklendiğinde özgül aşınma oranı %78 oranında azalarak $9,2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerine gelmektedir. 1 m/s kayma hızında ise $4,63 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf polyestere %2 nano SiO₂ katkısı ile özgül aşınma oranı %45 azalarak $2,57 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. Kayma hızının artması ile sürtünme katsayısında artış gözlenmiştir.

3.3.2. Nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitler

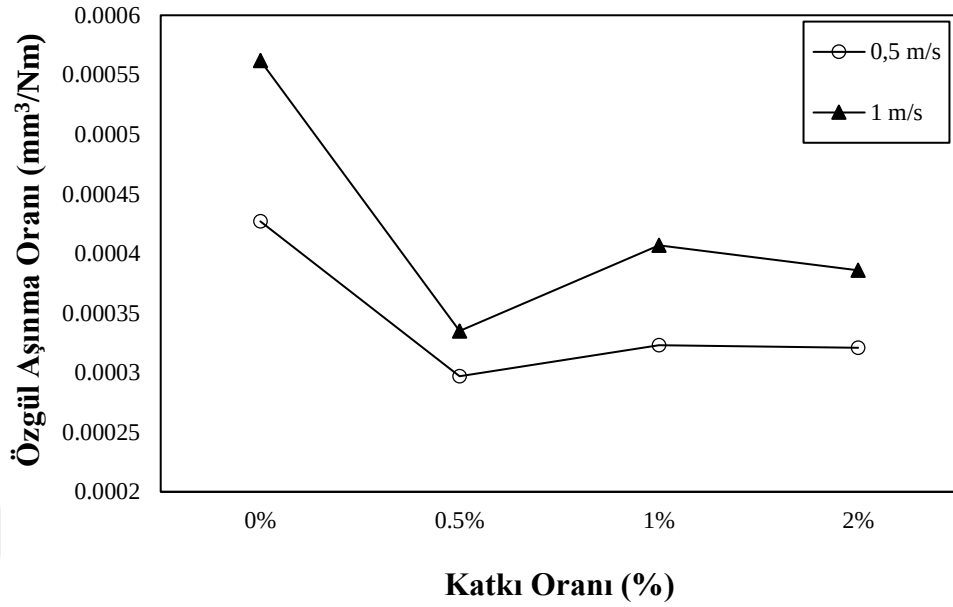
Şekil 3.9.'da nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının 2N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.9. Nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (2N yük altında)

En düşük sürtünme katsayısı 1m/s kayma hızında %0,5 nano ZrO₂ katkılı kompozitlerde olmaktadır. 2N yük altında 1 m/s kayma hızında %0,5 nano ZrO₂ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı %8,5 azalarak 0,430'dan 0,394 değerine düşmektedir. 0,5 m/s kayma hızında ise %0,5 nano ZrO₂ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı 0,514'den 0,451 değerine düşerek %12 azalmaktadır.

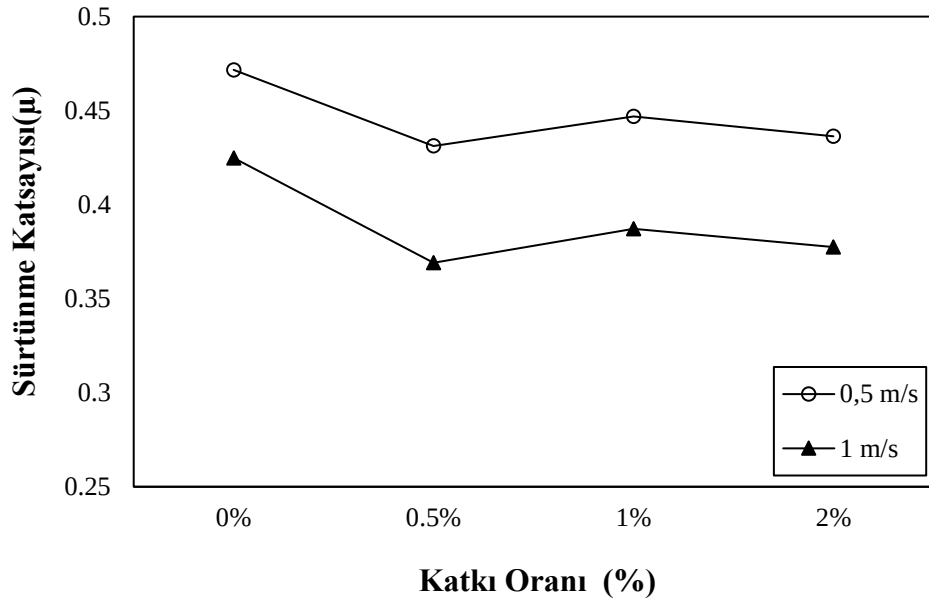
Şekil 3.10.'da nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin aşınma oranlarının 2N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.10. Nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (2N yük altında)

En düşük aşınma oranları %0,5 nano ZrO₂ katkılı kompozitlerde olmaktadır. 0,5 m/s kayma hızında 2N yük altında $4,27 \times 10^{-4}$ mm³/Nm özgül aşınma oranına sahip saf polyester %0,5 nano ZrO₂ katkısı eklendiğinde özgül aşınma oranı %31 oranında azalarak $2,97 \times 10^{-4}$ mm³/Nm değerine gelmektedir. 1 m/s kayma hızında ise $5,62 \times 10^{-4}$ mm³/Nm özgül aşınma oranına sahip saf polyestere %0,5 nano ZrO₂ katkısı ile özgül aşınma oranı %40 azalarak $3,35 \times 10^{-4}$ mm³/Nm değerinde olmaktadır.

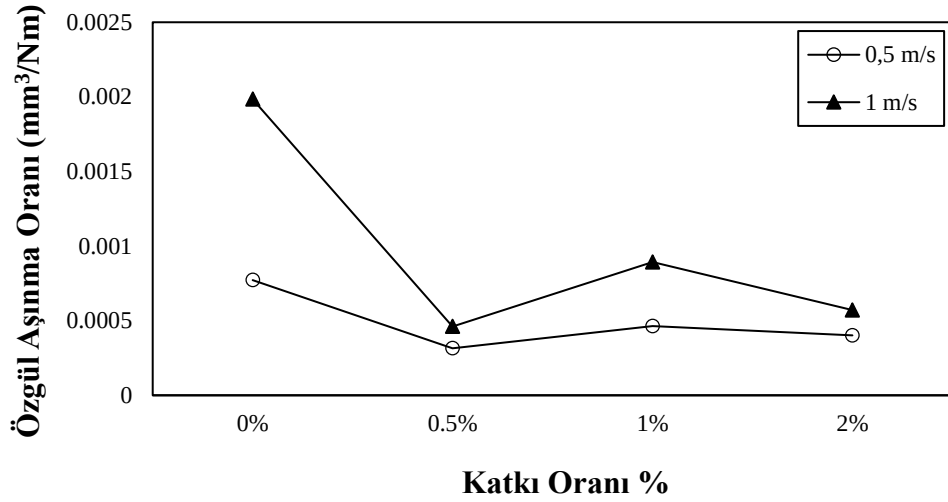
Şekil 3.11.'de nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının 5N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.11. Nano ZrO_2 katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (5N yük altında)

En düşük sürtünme katsayısı 1m/s kayma hızında %0,5 nano ZrO_2 katkılı kompozitlerde olmaktadır. 2N yük altında 1 m/s kayma hızında %0,5 nano ZrO_2 katkılı kompozitin sürtünme katsayısı %13 azalarak 0,424'den 0,369 değerine düşmektedir. 0,5 m/s kayma hızında ise %0,5 nano ZrO_2 katkılı kompozitin sürtünme katsayısı 0,471'den 0,432 değerine düşerek %8,5 azalmaktadır.

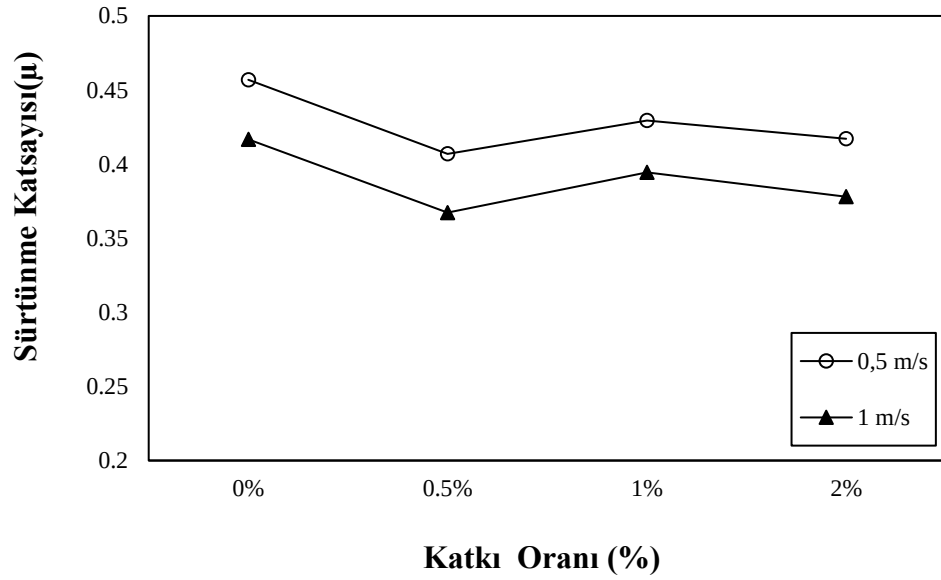
Şekil 3.12.'de nano ZrO_2 katkılı polyester kompozitlerin aşınma oranlarının 5N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.12. Nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (5N yük altında)

En düşük aşınma oranları %0,5 nano ZrO₂ katkılı kompozitlerde olmaktadır. 0,5 m/s kayma hızında 5N yük altında $7,72 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf polyester %0,5 nano ZrO₂ katkısı eklendiğinde özgül aşınma oranı %59 oranında azalarak $3,15 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerine gelmektedir. 1 m/s kayma hızında ise $1,98 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ özgül aşınma oranına sahip saf polyestere %0,5 nano ZrO₂ katkısı ile özgül aşınma oranı %76 azalarak $4,61 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değerinde olmaktadır. Kayma hızının artması ile sürtünme katsayısında artış gözlenmiştir.

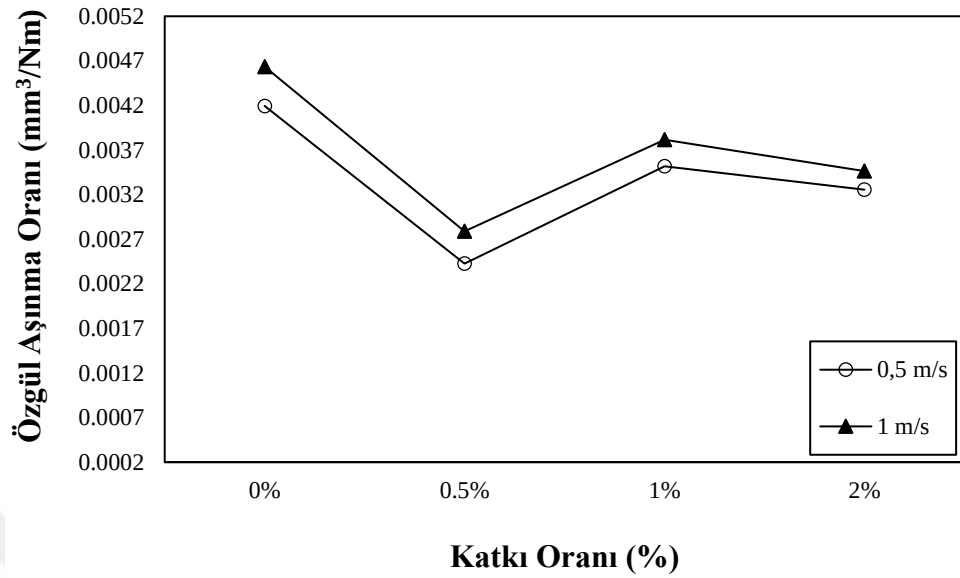
Şekil 3.13.'de nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının 10N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.13. Nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (10N yük altında)

En düşük sürtünme katsayısı 1m/s kayma hızında %0,5 nano ZrO₂ katkılı kompozitlerde olmaktadır. 10N yük altında 1 m/s kayma hızında %0,5 nano ZrO₂ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı %12 azalarak 0,417'den 0,367 değerine düşmektedir. 0,5 m/s kayma hızında ise %0,5 nano ZrO₂ katkılı kompozitin sürtünme katsayısı 0,456'dan 0,407 değerine düşerek %11 azalmaktadır.

Şekil 3.14.'de nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin aşınma oranlarının 10N yük altında katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi görülmektedir.

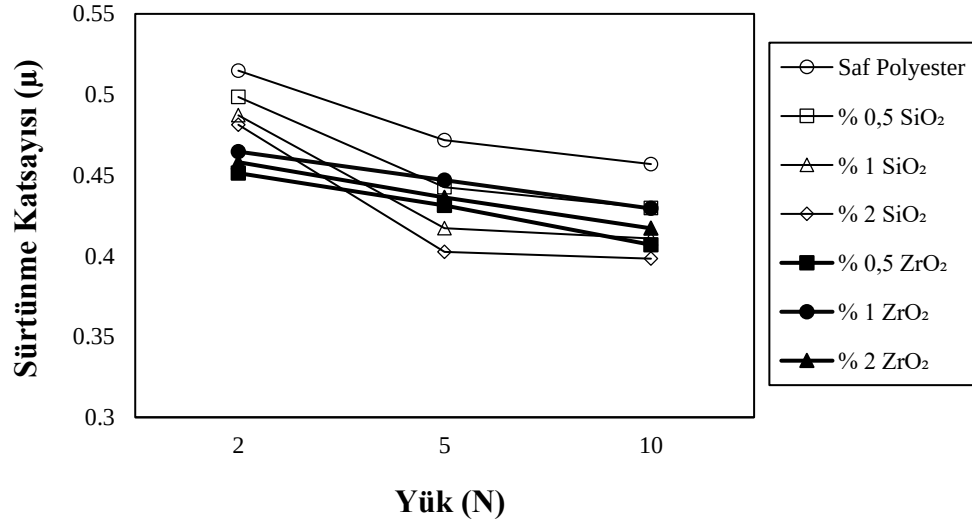


Şekil 3.14. Nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin aşınma oranlarının katkı oranına ve kayma hızına göre değişimi (10N yük altında)

En düşük aşınma oranları %0,5 nano ZrO₂ katkılı kompozitlerde olmaktadır. 0,5 m/s kayma hızında 10N yük altında $4,19 \times 10^{-3}$ mm³/Nm özgül aşınma oranına sahip saf polyester %0,5 nano ZrO₂ katkısı eklendiğinde özgül aşınma oranı %42 oranında azalarak $2,42 \times 10^{-3}$ mm³/Nm değerine gelmektedir. 1 m/s kayma hızında ise $4,63 \times 10^{-3}$ mm³/Nm özgül aşınma oranına sahip saf polyestere %0,5 nano ZrO₂ katkısı ile özgül aşınma oranı %40 azalarak $2,78 \times 10^{-4}$ mm³/Nm değerinde olmaktadır. Kayma hızının artması ile sürtünme katsayısında artış gözlenmiştir.

3.4. Sürtünme Davranışlarının Değerlendirilmesi

Şekil 3.15.'te nano katkılı polyester matriksli nano kompozitlerin katkı oranı ve yüke bağlı olarak 0,5 m/s kayma hızında sürtünme katsayılarındaki değişimler verilmektedir. Polyester reçinesine eklenen katkılar kompozitlerin sürtünme davranışlarını değiştirmiştir.



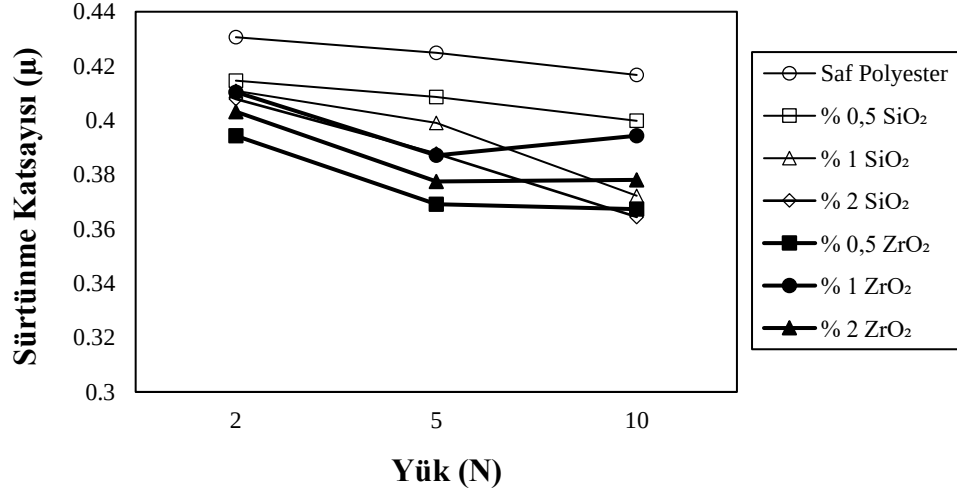
Şekil 3.15. Nano katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve yüke bağlı 0,5 m/s kayma hızında değişimleri

Nano kompozitlerde 0,5 m/s kayma hızında en düşük sürtünme katsayısı 10N yük altındaki %2 oranındaki nano SiO₂ katkılı polyester kompozit de meydana gelmektedir. Katkı oranının artması ile sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir. %2 nano SiO₂ katkısı ile birlikte sürtünme katsayısı %13 oranında düşmüştür. Bunun sebebinin, eklenen nano partiküllerin artan yük altında ayrılarak ara yüzeyde yuvarlanma hareketi yapıp kaymayı kolaylaştırması dolayısıyla polimerin disk yüzeyi ile temasını minimize edip sürtünme katsayısını azaltması olarak açıklanabilmektedir. Bilge ve ark. yaptıkları çalışmada kayma uzunluğu boyunca temas bölgesinde katkıların ara yüzeye girerek polimer ile disk arasındaki teması azalttığı dolayısıyla sürtünme katsayısını düşürdüğünü tespit etmişlerdir [27]. Özsoy, nano katkılı epoksi kompozitlerin tribolojik davranışını da incelediği doktora tezi çalışmasında, %2,5 katkı oranında 0,4 m/s kayma hızında 10N yüke kadar sürtünme katsayısında düşüş meydana geldiğini ve kayma hızının artması ile sürtünme katsayısında da artış olduğunu saptamışlardır [22].

He ve ark. polimer matriks içerisine SiO₂ katkısı ile birlikte sürtünme katsayılarında düşüş tespit etmişlerdir. Nano SiO₂ katkısının dahil edilmesiyle, polimer/SiO₂ kompozitlerinde daha fazla polimer malzemesinin sürtünme yüzeyi ile etkileşime

girmesinin önleildiği bu nedenle sürtünme katsayısının ve özgül aşınma oranının daha düşük değerlerine yol açtığı sonucuna varmışlardır [28]. Friedrich ve ark. çeşitli katkıların malzemenin aşınma ve sürtünme performansına etkisini inceledikleri çalışmalarında, PA-6,6 polimer matriksi içerisine %5 oranda dahil ettikleri nano TiO_2 ile birlikte sürtünme katsayısının $\sim 0,55\mu$ değerinden $\sim 0,3\mu$ değerine düştüğü dolayısıyla nano katkıların polimerlerin sürtünme katsayısını düşürebildiği sonucuna ulaşılabilmektedir [70].

Şekil 3.16.'da nano katkılı polyester kompozitlerin katkı oranı ve yüke bağlı olarak 1 m/s kayma hızında sürtünme katsayılarındaki değişimler verilmektedir.



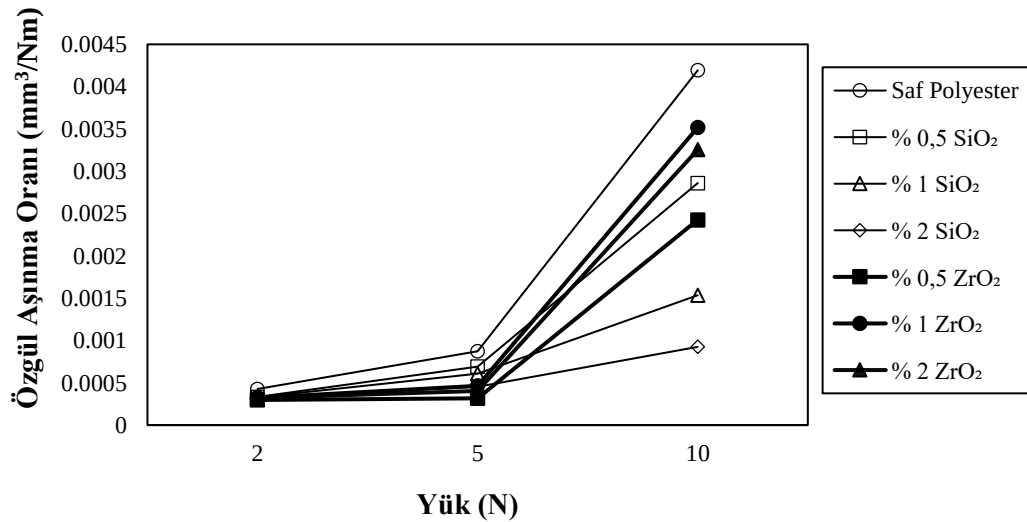
Şekil 3.16. Nano katkılı polyester kompozitlerin sürtünme katsayılarının katkı oranına ve yüke bağlı 1 m/s kayma hızında değişimleri

Nano kompozitlerde 1 m/s kayma hızında en düşük sürtünme katsayısı 10N yük altında %2 oranındaki nano SiO_2 katkılı polyester kompozit de meydana gelmektedir. Katkı oranının artması ile sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir. %2 nano SiO_2 katkısı ile birlikte sürtünme katsayısı %12,5 düşmüştür. Garcia ve ark. PA-6 matriksi içerisine nano SiO_2 ekleyerek elde ettikleri kompozitin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. 0,1 m/s kayma hızında ve 1N yük altında %2 nano SiO_2 katkılı kompozitin sürtünme katsayısında saf PA-6 matrikse göre azalma görülmüştür. %2 nano SiO_2 katkısı ile saf PA-6 matriksin sürtünme katsayısının 0,45 değerinden 0,20 değerine düşerek azaldığı saptanmıştır [71]. Nano ZrO_2 katkılı kompozitlerin sürtünme

katsayısında ise; 10N yük altında, %0,5 katkılı kompozite göre %1 ve %2 katkı oranında artış meydana gelmektedir. Artan yük ve kayma hızı ile birlikte sürtünme yüzeyinde meydana gelen sıcaklık artışı ile nano partiküllerin homojen olmayan dağılımının buna sebep olabileceği ve aynı zamanda optimum katkı oranının üzerindeki karışımlarda yüzeyden kopan nano partiküller abrasif aşınmaya neden olarak sürtünme katsayısını artırabilmektedir [22]. SiO₂ katkılı kompozitlerde benzer mekanizmanın görülmemesi ise nano SiO₂ tozlarının matriksle ara yüzey bağ mukavemetinin ve dispersiyon oranının ZrO₂ tozlarına göre daha yüksek olması olarak açıklanmaktadır [72]. Friedrich ve ark. araştırmalarında, nano SiO₂ partiküllerinin matriks içinde dispersiyon oranının, nano ZrO₂ partiküllerine göre daha iyi olduğu ve nano ZrO₂ partiküllerinde optimum katkı oranı hacimce %1,5 iken SiO₂ katkılarında %3,4'e kadar çıkabildiğini göstermişlerdir [70].

3.5. Aşınma Davranışlarının Değerlendirilmesi

Şekil 3.17.'de nano katkılı polyester kompozitlerin 0,5 m/s kayma hızında, aşınma oranlarının katkı oranına ve yüke bağlı olarak değişimleri verilmektedir. Aşınma oranları artan yük ile artış göstermektedir.



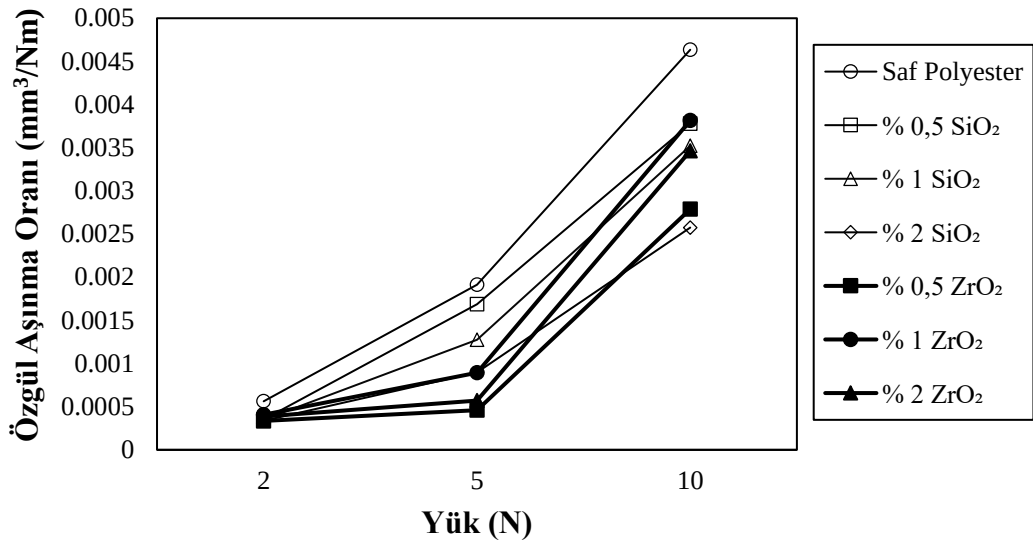
Şekil 3.17. Nano katkılı polyester kompozitlerin 0,5 m/s kayma hızında özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve yüke bağlı değişimleri

Polyester matrikse nano katkıların eklenmesi özgül aşınma oranını azaltmıştır. En düşük özgül aşınma oranları 2N yük altında olurken en iyi aşınma performansı 10N yükte saf polyestere göre %78 azalma ile %2 SiO₂ katkılı kompozitte olmuştur. Literatürde nano SiO₂ katkılı kompozitlerde özgül aşınma oranının, %2 katkı miktarına kadar düştüğü görülmektedir [13].

Garcia ve ark. PA-6 polimer matriksi içerisine %2 nano SiO₂ ekleyerek elde ettikleri kompozitin tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışmada, %2 nano SiO₂ katkılı kompozitin aşınma oranının, $5,29 \times 10^{-5}$ değerinden 2×10^{-7} değerine düştüğünü saptamışlardır [71]. Ayrıca 10N yükte %0,5 ZrO₂ katkılı kompozitlerin aşınma oranları saf polyestere göre %42, %1 SiO₂ katkıda %63, %0,5 SiO₂ katkıda %32, %2 ZrO₂ katkıda %22 ve %1 ZrO₂ katkıda %16 oranında bir azalma olmuştur. Literatüre baktığımızda; Wang ve ark. nano SiO₂ katkılarının nano ZrO₂ katkılara göre daha iyi aşınma performansı gösterdiğini ve ZrO₂ partiküllerinde dispersiyonun zor ve dolayısıyla topaklanma sorunun daha fazla olduğunu kanıtlamışlardır [73, 74].

Nano katkılı kompozitlerin aşınma performansları, nano katkıların kompozit içerisindeki homojen dağılımına bağlıdır. Nano partiküllerin çeşidi, boyutu, yüzey alanı, kompozit içindeki oranı ve karışım mekanizmaları homojen dağılımına etki etmektedir [13].

Şekil 3.18.'de nano katkılı polyester kompozitlerin aşınma oranlarının 1 m/s kayma hızında, katkı oranına ve yüke bağlı olarak değişimleri verilmektedir. Aşınma oranları artan yük ile artış göstermektedir. Polyester matrikse nano katkıların eklenmesi özgül aşınma oranını azaltmıştır. Kayma hızının artması ile birlikte özgül aşınma oranında artış görülmektedir.



Şekil 3.18. Nano katkılı polyester kompozitlerin 1 m/s kayma hızında özgül aşınma oranlarının katkı oranına ve yüke bağlı değişimleri

En düşük özgül aşınma oranları 2N yük altında olurken, kompozitlerde en iyi performans ise 10N yükte saf poliestere göre %44 azalma ile %2 SiO₂ katkılı kompozitte olmuştur. Ayrıca 10N yükte %0,5 ZrO₂ katkılı kompozitlerin aşınma oranları saf poliestere göre %39, %1 SiO₂ katkıda %24, %0,5 SiO₂ katkıda %18, %2 ZrO₂ katkıda %25 ve %1 ZrO₂ katkıda %17 oranında bir azalma olmuştur. ZrO₂ katkısı içeriğinin belirli bir orandan topaklaşmaya sebep olması nedeniyle matriks ve katkı arasında ara yüzey bağ mukavemetinin azaldığı düşünülmektedir. Bu nedenle kayma hızının artışıyla numune yüzeyinden partiküllerin kopması ve sert partiküllerin yüzeye abrasif etki yapması daha kolay gerçekleşmektedir. Aynı zamanda artan nano katkısıyla birlikte reçine içinde nano tozların homojenliği azalmakta ve topaklanma davranışı göstererek kompozit içerisinde yığılma alanları oluşturmaktadırlar. Böylece kaymalı temas sırasında sert nano partiküllerin matriksten kopması kolaylaşmaktadır [75]. Literatürdeki çalışmalar bu sonucu destekler niteliktedir. Özsoy, epoksi matriks içerisine nano boyutlarda ve %2,5-5,0-10,0 oranlarında TiO₂, Al₂O₃ ve nano kil katkıları ilave ederek elde ettiği kompozitin tribolojik özelliklerini de incelediği doktora tezi çalışmalarında, artan yük ve katkı oranıyla birlikte özgül aşınma oranında artış yaşandığı görülmüştür. %2,5 nano kil katkısında özgül aşınma oranı %18

düşerken daha yüksek katkı oranıyla birlikte özgül aşınma oranında artış meydana gelmektedir [22].

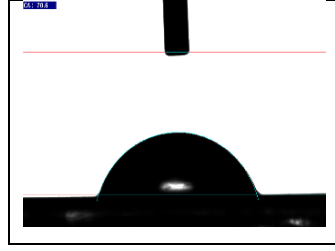
Friedrich ve ark. epoksi matriks içerisine nano TiO_2 ilave ederek elde ettikleri nano kompozitin tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışmada, $47 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ aşınma oranına sahip saf epoksiye %5 nano TiO_2 katkısı ile birlikte aşınma oranı $5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}$ değerine düşerek ciddi azalma sergilemiştir. Ancak daha yüksek katkı oranlarında saf epoksiye göre düşük olmasa bile %5 katkıya göre aşınma performansında düşüş gözlemlenmektedir [76].

Garcia ve ark. PA-6 polimer matriksi içerisine %2 nano SiO_2 ekleyerek elde ettikleri kompozitin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Saf PA-6 polimerin aşınma oranı $5,29 \times 10^{-5}$ iken %2 nano SiO_2 katkısı ile birlikte aşınma oranının 2×10^{-7} değerine düştüğü ancak %14 SiO_2 katkı oranında aşınma oranı artarak $2,81 \times 10^{-5}$ değerine yükseldiği tespit edilmiştir [71]. Bu çalışmalar ışığında, optimum katkı oranının aşılması durumunda aşınma performansının düşebileceği saptanmaktadır.

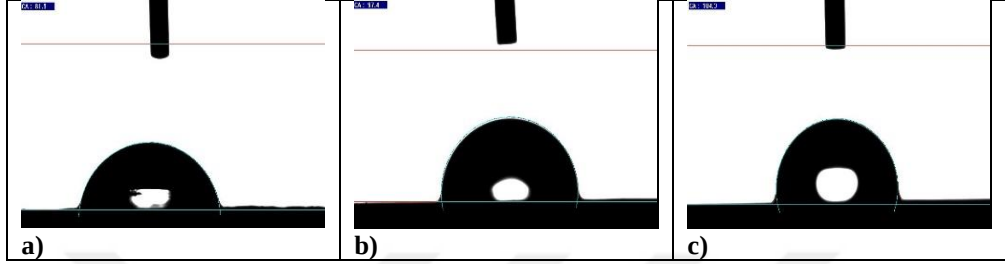
3.6. Temas Açısı ve Yüzey Enerjisi Sonuçları

3.6.1. Temas açısı ölçümü sonucu

Şekil 3.19.'da saf polyesterin, Şekil 3.20.'de nano SiO_2 katkılı polyester kompozitlerin temas açıları verilmiştir. Nano SiO_2 katkı oranının artması ile kompozitin saf su temas açısı değerleri artmıştır. En yüksek temas açısı sonucu %2 nano SiO_2 katkılı kompozitlerde elde edilmiştir. 70.6° temas açısına sahip saf polyestere %2 SiO_2 katkısı eklendiğinde temas açısı %30 artarak 101.4° 'ye yükselmiştir. Literatürde; Deepshikha ve Karak yapmış oldukları çalışmada bu sonuçları destekler niteliktedir. Çalışmalarında, polyester matriks içerisine ağırlıkça %0,1-0,5-1,0 oranlarında ekledikleri nano SiO_2 ile elde ettikleri kompozitin yüzey temas açısını incelemişlerdir. Nano katkılar sonucu polyester kompozitin temas açısını 103.9° – 106.3° değerleri arasında elde etmişlerdir [77].

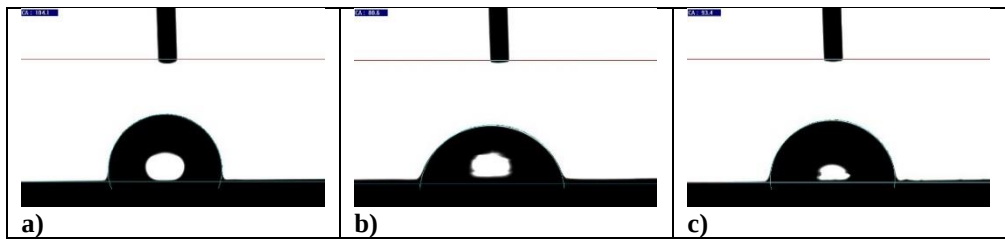


Şekil 3.19. Saf polyesterin saf su temas açısı sonucu (70.6°).



Şekil 3.20. Nanokompozitlerin af su temas açısı sonuçları; a) 0,5% SiO_2 (81.9°) b) 1% SiO_2 (97.4°) c) 2% SiO_2 (101.4°)

Şekil 3.21.'de Nano ZrO_2 katkılı polyester kompozitlerin temas açıları verilmiştir. Nano ZrO_2 katkı oranıyla birlikte polyesterin saf su temas açısı değerleri artmıştır. En yüksek temas açısı sonucu %0,5 nano ZrO_2 katkılı kompozitlerde elde edilmiştir. 70.6° temas açısına sahip saf polyestere %0,5 ZrO_2 katkısı eklendiğinde temas açısı %32 artarak 104.1° 'ye yükselmiştir. Xu ver ark. polyester kumaşa nano SiO_2 partiküllerini adapte ederek yapmış oldukları temas açısı ölçümlerinde, $132,3^\circ$ değerindeki polyester kumaş yüzeyine SiO_2 etkisiyle temas açısında $151,5^\circ$ değerine ulaşmışlardır [57]. Friedrich ve ark. araştırmalarında farklı katkıların optimum karışım oranını belirlediği çalışmada, nano SiO_2 partiküllerinin ZrO_2 partiküllerine göre daha yüksek karışım oranı yakalayabildiği ve dispersiyonunun yüksek olduğunu saptamışlardır [70]. Bu sonuç, nano SiO_2 ve ZrO_2 temas açıları arasındaki farklı sonuçları açıklayabilmektedir.



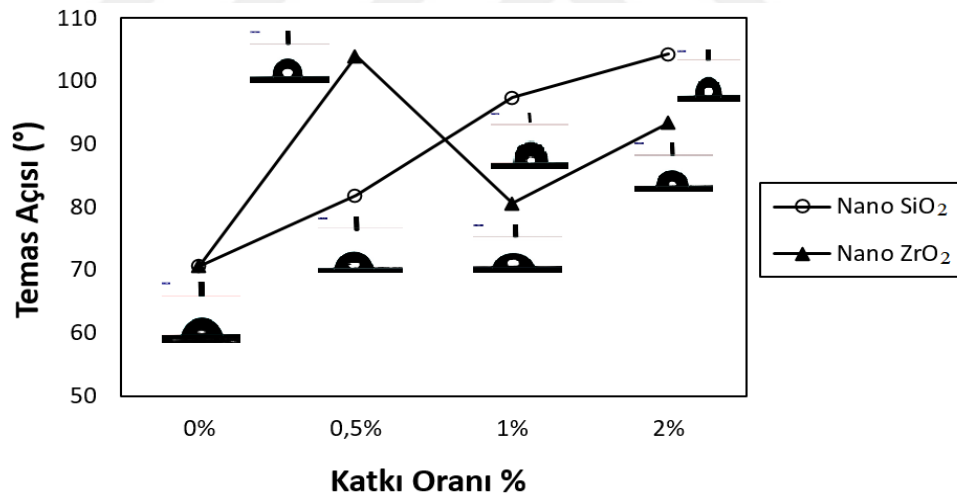
Şekil 3.21. Nano kompozitlerin saf su temas açısı sonuçları; a) 0,5% ZrO_2 (104.1°) b) 1% ZrO_2 (80.6°) c) 2% ZrO_2 (93.4°)

Saf ve nano partikül katkılı kompozitlerin saf su, DMSO ve etilen glikol sıvıları kullanılarak alınmış temas açısı ölçüm sonuçları Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Saf polyester ve nano katkılı kompozitlerin temas açısı ölçüm sonuçları (°)

	Saf Su	DMSO	Etilen Glikol
Saf Polyester	70.6°	47.7°	37.1°
SiO₂ 0,5%	81.9°	62.0°	49.3°
SiO₂ 1.0%	97.4°	68.4°	62.5°
SiO₂ 2.0%	104.3°	70.0°	72.5°
ZrO₂ 0,5%	104.1°	74.6°	44.6°
ZrO₂ 1.0%	80.6°	70.2°	56.0°
ZrO₂ 2.0%	93.4°	73.0°	65.3°

Şekil 3.22.'de nano katkılı polyester kompozitlerin temas açısı değerleri katkı oranına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.22. Nano katkılı polyester kompozitlerin temas açılarının katkı oranına göre değişimi

Şekilde 3.22.'de nano SiO₂ katkılarının artan oranı ile birlikte kompozitlerin temas açıları yükselmektedir. %2 SiO₂ katkıda temas açısı saf polyestere göre %32 oranında artarak 104,3° ile en yüksek değerine ulaşmaktadır. Nano ZrO₂ katkılarında ise %0,5 katkı oranında 104,1° temas açısı değerine ulaşarak nano ZrO₂ katkı oranları içerisinde en yüksek değerini elde etmektedir. Ayrıca %0,5 SiO₂ katkılı kompozitlerin temas açısı değerlerinde saf polyestere göre %14, %1 SiO₂ katkıda %27, %1 ZrO₂ katkıda

%12, %2 ZrO₂ katkıda %24 oranında bir artış olmuştur. Nano SiO₂ katkı oranının artması ile temas açısı değerleri artış gösterirken ZrO₂ katkılı kompozitlerde en yüksek temas açısı değeri %0,5 katkı oranında elde edilmektedir. Bunun sebebinin nano ZrO₂ katkısının hem optimum katkı oranının hem de elektrokinetik potansiyelinin nano SiO₂ katkısına göre daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [70, 72]. Böylelikle ZrO₂ katkılarda topaklaşma eğilimi daha fazla olmaktadır. Topaklaşma ile birlikte daha yüksek karışım oranlarında istenilen performans elde edilememektedir.

3.6.2. Yüzey enerjisi ölçümü sonucu

Üç farklı oranda hazırlanan nano SiO₂ ve ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin yüzey enerjisi testleri sonuçları Tablo 3.3.'te verilmiştir. Yüzey enerjisi doğrudan ölçülemez ve bu nedenle temas açısı ölçümlerini kullanan birkaç model bulunmaktadır. Çalışmalarımızda OWRK (Owens, Wendt, Rabel ve Kaelble) modeli esas alınmıştır. OWRK en çok kullanılan yüzey serbest enerji teorilerinden biridir. Arayüzeysele etkileşimleri dispersif ve polar olmak üzere iki bölüme ayırmaktadır. Bu modelle yüzey serbest enerjisinin hesaplanabilmesi temas açılarının, saf suya ek olarak iki sıvı ile daha ölçülmesini gerekmektedir [78]. Test sıvıları olarak saf suya ile birlikte etilen glikol ve dimetilsülfoksit kullanılmıştır.

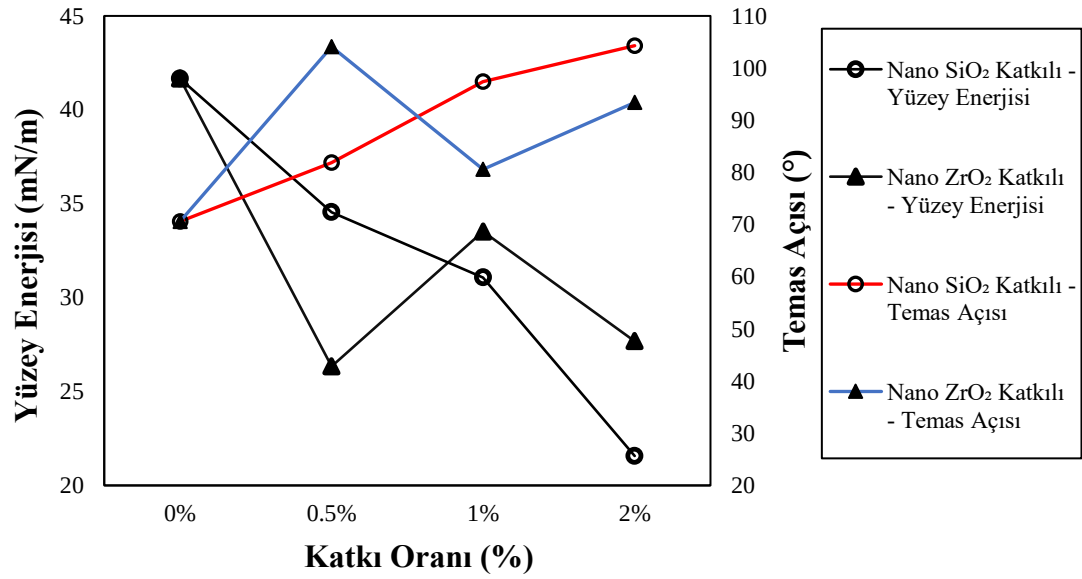
Tablo 3.3. Yüzey enerjisi sonuçları (mN/m)

	Yüzey Enerjisi (mN/m)	Dispersif kısım (mN/m)	Polar kısım (mN/m)
Saf Polyester	41.66	19.12	22.54
SiO₂ 0,5%	34.55	9.59	24.96
SiO₂ 1.0%	31.07	15.51	15.56
SiO₂ 2.0%	21.57	14.33	7.24
ZrO₂ 0,5%	26.34	8.17	18.17
ZrO₂ 1.0%	33.52	6.03	27.49
ZrO₂ 2.0%	27.68	8.52	19.16

Elde edilen sonuçlarda temas açısı değeri arttıkça yüzey enerjisinin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda artan katkı oranı ile birlikte yüzey enerjilerinde azalma olduğu görülmektedir. Literatürde Chen ve ark. yapmış oldukları çalışmada buna

benzer sonuçların alındığı saptanmaktadır; saf polyester esaslı poliüretanın yüzey enerjisi 30,7 mN/m iken içerisine nano SiO₂ katkısı ile birlikte elde ettikleri kompozit filmlerin yüzey enerjilerinde 26,4 mN/m değerine kadar düşüş meydana geldiği görülmektedir [79].

Şekil 3.23.'te Nano katkılı polyester kompozitlerin yüzey enerjilerinin ve temas açılarının katkı oranına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 3.23. Nano katkılı polyester kompozitlerin yüzey enerjilerinin ve temas açılarının katkı oranına göre değişimi

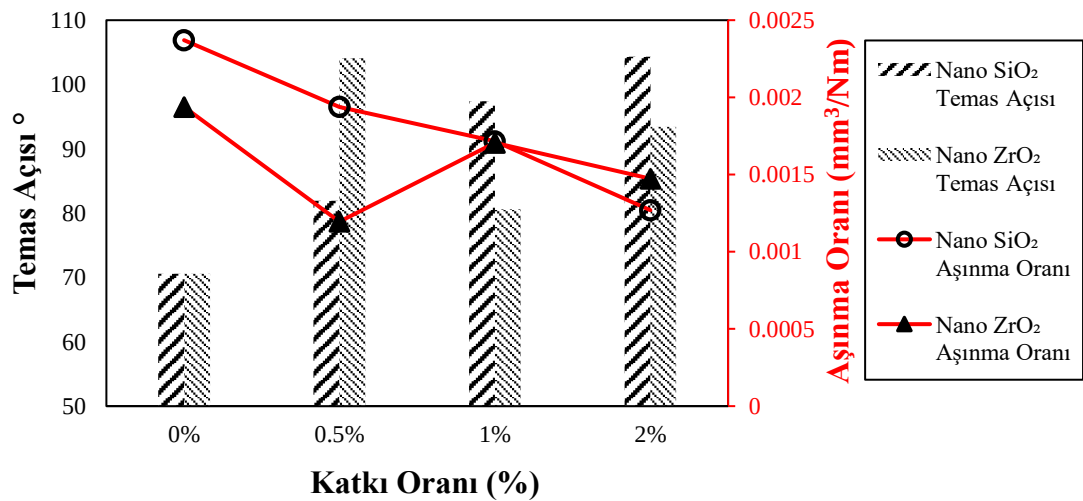
Polar veya dispersif kısımlardaki etkileşim arttıkça, yüzey enerjisi azalmakta ve daha zayıf ıslatma değerleri elde edilmektedir. Böylece daha büyük bir temas açısı elde edilir. En yüksek etkileşim % 0,5 ZrO₂ ve % 2 SiO₂ katkısında görülmüştür. Artan katkı oranı ile birlikte yüzey enerjisi azalırken, yalnızca %1 ve %2 ZrO₂ katkılı kompozitlerin yüzey enerjilerinde, %0,5 ZrO₂ katkılı kompozite göre artış meydana gelmektedir. Bunun nedeninin, yüksek katkı oranında partiküllerin matriks içerisine homojen karışmamış olması veya ideal katkı oranının üzerine çıkmış olmaktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlarda temas açısı ve yüzey enerjisi verileri birbirini desteklemektedir. Yüksek temas açısı yüzey enerjisinin düşüklüğünü ifade ederken, daha düşük temas açısı ise yüzey enerjisinin yüksek olduğunu göstermektedir. Yüksek ıslatma yüzeyi, sıvı damlacığı aşağı çekmek için güçlü bir

çekim kuvveti yaratan ve yayılmasına neden olan bir yüzey enerjisine sahiptir. Bu ıslanabilirlik olarak bilinir ki bu yüzey enerjisi, normalde onu damlacık biçiminde tutan sıvı moleküllerinin yüzey geriliminden daha güçlüdür. Temas anında sıvının yüzey gerilimi değişmez, bunun yerine katının yüzey enerjisi sıvının yüzey geriliminden daha güçlü olduğu için onu aşarak sıvının katı yüzeye yayılmasına neden olur [80, 81].

Ultrasonik karıştırma süresinin uzun tutulması ve nano tozların reçineye dahil edilmeden önce çeşitli yöntemlerle modifiye edilmesi ile matriks ve partikül arasındaki bağ mukavemeti artıp daha homojen bir yapı edilerek temas açısı değerlerinin daha da artacağı öngörülmektedir.

3.7. Temas Açısı ve Aşınma Oranı İlişkisi

Aşınma sonuçlarını incelediğinde temas açısı sonuçları ile ilişkili olduğu görülmektedir. Şekil 3.24.'te temas açısı ve aşınma oranı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmektedir.



Şekil 3.24. Temas açısı ve aşınma oranı ilişkisi

Artan temas açısı ile malzemenin aşınma performansından artış meydana gelmektedir. En yüksek temas açısı sonucu 104,3° ile %2 SiO₂ katkılı kompozitlerde meydana

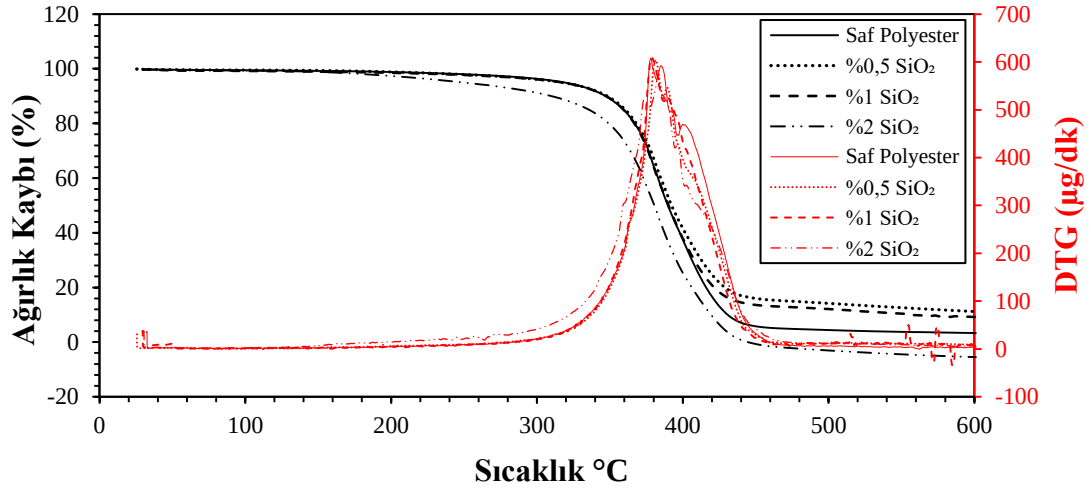
gelirken yine en düşük özgül aşınma oranı da bu kompozit malzemede görülmektedir. Aynı zamanda %0,5 ZrO₂ katkılı kompozitin temas açısı 104,1° ile en yüksek ikinci temas açısı sonucunu vermektedir ve en iyi ikinci özgül aşınma oranı bu kompozitte meydana gelmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda yüzey ıslanabilirliği ile aşınma performansı arasında doğrusal bir ilişki olduğu ve aşınma performansına direkt etki edebileceği görülmektedir. Literatürde de düşük temas açısından kaynaklı fonksiyon ara yüzeyinde meydana gelen su oluşumunun özgül aşınma oranını artırdığı sonucuna ulaşmışlardır [13]. Kasai ve ark. SiO₂/silan ve Perfloroalkalisilan/alkilsilan bileşik yüzeyleri üzerine yapmış oldukları çalışmalarda; temas açısı ve yüzey enerjisinin, aşınma performansı ile arasındaki ilişkisini incelemişlerdir. Silan ve SiO₂ eklenmesiyle temas açısı artıp yüzey enerjisinin ise düşüş gösterdiği, artan temas açısı sonucunda aşınma oranı ve sürtünme katsayısında azalma meydana geldiği dolayısıyla yüksek temas açısı ve buna bağlı düşük yüzey enerjisinin tribolojik performansı geliştirebileceğini tespit etmişlerdir [82]. Kang ve ark. epoksi matriks içerisine nano SiO₂ dahil ederek (16:1, 8:1, 4:1, 8:3) elde ettikleri kompozitin temas açısı, yüzey enerjisi ve tribolojik performansını incelemişlerdir. 79,3° temas açısına sahip saf epoksiye modifiye edilmemiş nano SiO₂ takviyesi ile birlikte temas açısı değerlerinde 104,8° değerine ulaşan sonuçlar elde etmişlerdir. Artan katkı miktarı ve buna bağlı olarak artan temas açısı ile birlikte 4N yük altında sürtünme katsayısında 0,46'dan 0,04'e varan düşüş meydana geldiğini tespit etmişlerdir [83].

3.8. Termal Analiz Sonucu

Kompozitlerin termal kararlılıklarını saptamak için TG (termogravimetrik) ve DTG (diferansiyel termogravimetrik) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, azot atmosferinde, 10°C/dk ısıtma hızında, 25°C-600 °C sıcaklık aralığında yapılmıştır.

Şekil 3.25.'te ağırlıkça %0,5, %1 ve %2 oranında nano SiO₂ katkılı polyester kompozitler ile saf polyester matriksin TG/DTG eğrileri verilmektedir. TG eğrileri incelendiğinde numunelerin benzer bozunma eğrisine sahip olmasına rağmen minimal bozunma farklılıklarının olduğu görülmüştür. %2 katkı oranında başlangıç ve son termal ayrışma sıcaklığında az miktarda düşüş görülse de %0,5 ve %1 katkı

oranlarında saf polyestere kıyasla termal kararlılık artmaktadır. Yüksek katkı oranlarında yığılma alanları oluşması termal kararlılığa olumsuz etki etmektedir.



Şekil 3.25. Saf ve nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin TG/DTG grafiği

Tablo 3.4.'te saf ve nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin TG/DTG analiz sonuçları görülmektedir.

Tablo 3.4. Saf ve nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin TG/DTG analiz sonuçları

	Başlangıç Ayrışma Sıcaklığı °C	Son Ayrışma Sıcaklığı °C	DTG Pik Sıcaklığı °C
Saf Polyester	284,7	466,8	378,0
%0,5 SiO ₂ Katkılı	286,5	469,4	381,4
%1 SiO ₂ Katkılı	285,2	469,2	378,4
%2 SiO ₂ Katkılı	225,8	461,5	382,9

Anggaravidya ve ark. polyester matriks içerisine nano SiO₂ ilave ederek elde ettikleri kompozitin termal kararlılığını incelemişlerdir. Yüksek katkı oranlarının, homojenliğin sağlanmasına negatif etki etmesinden kaynaklı termal kararlılığın düşüş gösterebileceğini saptamışlardır. Aynı zamanda silikanın, polyesterin çapraz bağlanma mekanizmasına etki etmesi dolayısıyla da termal dayanım düşebilmektedir [84].

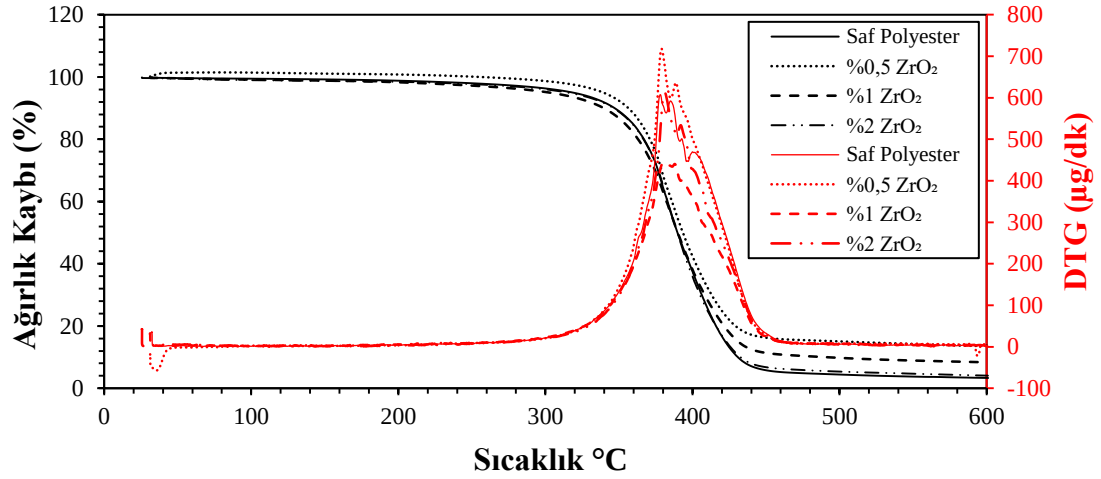
Khankrua ve ark. polyester-nano SiO₂ kompozitlerinin termal kararlılığını inceledikleri çalışmada, %0,1-%5 oranlarında ekledikleri SiO₂ katkısında en ideal

termal sonuçların %0,5-%1 katkı oranlarında elde edildiğini tespit etmişlerdir. Saf polyesterin 273,2 °C başlangıç ayrışma sıcaklığı, %1 nano SiO₂ katkısı ile birlikte 288 °C sıcaklığa yükselmiştir. Aynı zamanda 364,4 °C sıcaklıkta son ayrışma sıcaklığı, %1 nano SiO₂ katkısı ile birlikte 366,4 °C sıcaklığa yükseldiği sonuçları görülmektedir. %2,5 katkı oranında ise termal ayrışma sıcaklıkları düşmektedir. Bunun sebebi, partiküllerin polimer içerisindeki dağılımı ve silikanın polyesterin çapraz bağ oranına etki etmesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir [84, 85]. Bu sonuçlar doğrultusunda uygun oran ve dağılım sağlanarak ilave edilen nano SiO₂ katkısının polyesterin termal kararlılığını az da olsa geliştirdiği söylenebilmektedir.

DTG eğrileri incelendiğinde saf polyester ve nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin tek bir pik halinde reaksiyon verdiği görülmektedir. Pik sıcaklık aralığının 200-470 °C olduğu bozunmanın bu sıcaklık aralığında gerçekleştiği saptanmıştır. Nano ZrO₂ katkılarında da aynı aralıkta sonuçlar alınmaktadır. Bastiurea ve ark. polyester matrikse nano grafen ilave ederek elde ettikleri kompozitin termal davranışını inceledikleri çalışmalarında, saf polyesterin DTG eğrilerinde pik noktasını 384,2 °C saptamışlardır. %0,1 grafen ilavesiyle pik noktası 385,3 °C değerine ulaşmıştır. Nano katkıların termal dayanımı az miktarda da olsa geliştirmiş olsa da önemli bir etki etmediği görülmüştür. Aynı zamanda saf polyester için görülen pik değeri, elde edilen sonuçları destekler niteliktedir [86]. Da Luz ve ark. saf polyesterin termal analizine yer verdiği çalışmada, DTG pik noktasının 369,6 °C olduğu görülmektedir [87]. Literatürdeki sonuçların saf polyester için ~370-385 °C arasında olduğu dolayısıyla bu çalışmada elde edilen sonuçlarla tutarlılık gösterdiği saptanmaktadır.

Şekil 3.26.'da ağırlıkça %0,5, %1 ve %2 oranında nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitler ile saf polyester matriksin TG/DTG eğrileri verilmektedir. TG eğrileri incelendiğinde, numuneler benzer bozunma eğrisine sahip olmasına rağmen minimal bozunma farklılıklarının olduğu görülmüştür. En yüksek başlangıç ayrışma sıcaklığı %0,5 ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerde elde edilmektedir. %1 ZrO₂ katkılı kompozitlerin başlangıç ayrışma sıcaklığı en düşüktür. Son ayrışma sıcaklığına baktığımızda en yüksek değer yine %0,5 ZrO₂ katkılı kompozitler elde edilmektedir. En düşük son ayrışma sıcaklığı ise saf polyesterde görülmektedir. Nano ZrO₂ katkılı

kompozitlerin başlangıç ve son ayrışma sıcaklıkları saf polyestere göre artmış olsa da %0,5 katkı oranından sonra düşme eğilimi göstermektedir. Bu durum yüksek katkı oranlarındaki karışım homojenliğinin sağlanması ile ilişkilidir [84].



Şekil 3.26. Saf ve nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin TG/DTG grafiği

Tablo 3.5.'te saf ve nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin TG/DTG analiz sonuçları görülmektedir.

Tablo 3.5. Saf ve nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin TG/DTG analiz sonuçları

	Başlangıç Sıcaklığı °C	Ayrışma Sıcaklığı °C	Son Ayrışma Sıcaklığı °C	DTG Pik Sıcaklığı °C
Saf Polyester	284,7	462,8	378,0	
%0,5 ZrO ₂ Katkılı	290,3	466,4	379,3	
%1 ZrO ₂ Katkılı	282,6	463,7	379,8	
%2 ZrO ₂ Katkılı	287,2	464,5	381,5	

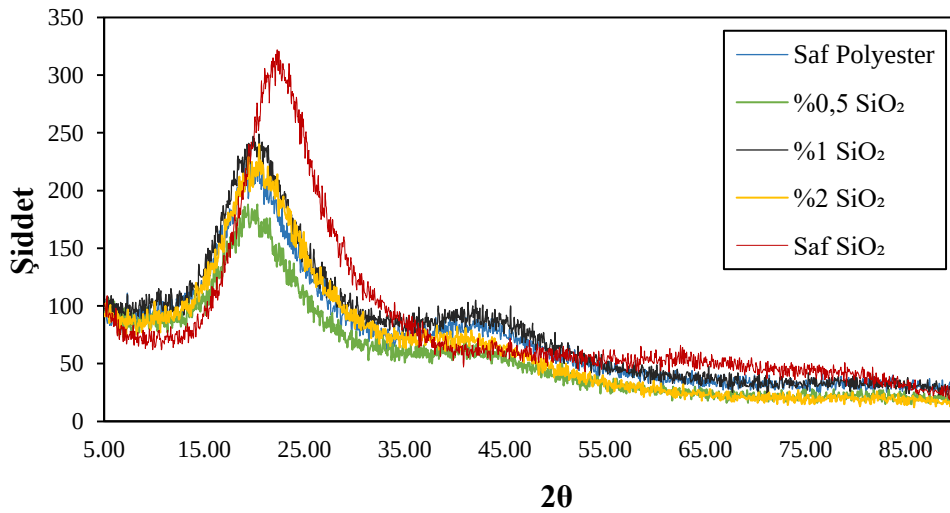
Farha ve ark. yapmış olduğu çalışmada, polistren matriks içerisine nano ZnO katkılı olarak elde ettikleri nano kompozitin termal kararlılığını incelemişler. 403,3 °C ayrışma pik sıcaklığına sahip PS matrikse, %1 ZnO ilavesi ile birlikte pik sıcaklığı 413,2 °C sıcaklığa ulaşmaktadır. %3 nano ZnO ilavesi ile birlikte pik sıcaklığı 408,3 °C sıcaklığa gerilemiştir. Bu durum nano katkıların termal dayanımı artırdığını kanıtlamakla birlikte düşük nano katkı oranlarında termal kararlılık sabit veya çok az değişkenlik gösterirken, daha yüksek nano katkı oranlarında kompozit içerisinde

partikül dağılımının zor olması nedeniyle termal kararlılıkta azalma olabileceğini göstermiştir [88].

Halder ve ark. epoksi matriks içerisine ilave ettikleri ZrO_2 katkısı ile birlikte elde edilen nano kompozitin termal kararlılığının saf epoksiye daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Bu sonuçlar neticesinde nano ZrO_2 katkısının kompozit içerisindeki varlığının termal kararlılığını artırdığı sonucuna ulaşılmaktadır. $307,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ilk ayrışma sıcaklığına sahip epoksiye %55 genlikte ultrasonik karışım yapılarak hazırlanmış %0,5 ZrO_2 takviyesi ile birlikte ilk ayrışma sıcaklığı $345,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerine ulaşmaktadır. Ancak nano partikül içeriği arttıkça termal dayanım azalmaktadır. Bunun yüksek katkı oranlarında meydana gelen topaklaşmanın sebep olduğu bildirilmiştir [89].

3.9. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi Sonucu

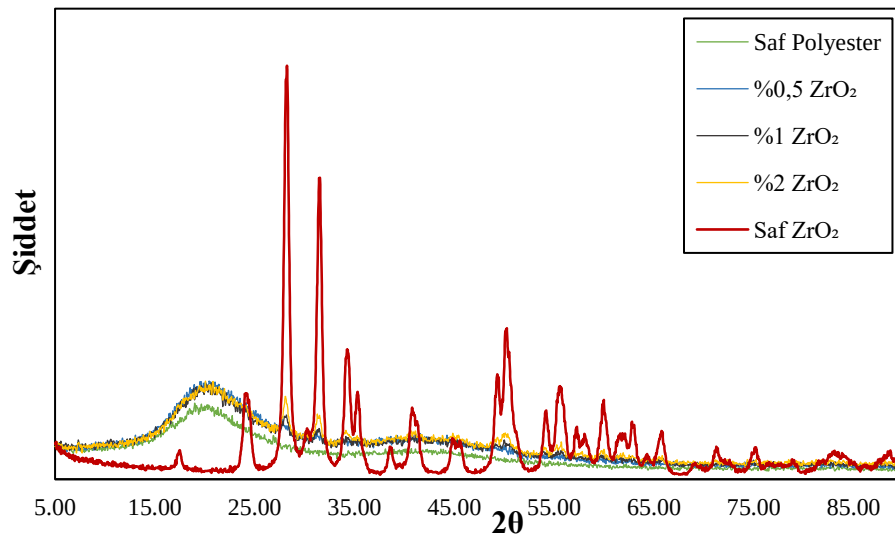
Şekil 3.27.'de nano SiO_2 katkılı polyester kompozitlerin XRD görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 3.27. Nano SiO_2 katkılı polyester kompozitlerin XRD analizi

Saf polyester $2\theta=15^{\circ}$ - 35° 'de görülen geniş pik amorf bir yapıyı göstermektedir. Polyester matrikse %0,5, %1 ve %2 nano SiO_2 ilave edilmesiyle üretilen kompozitlerin XRD görüntülerinde SiO_2 'ye ait pikler belirgin olarak görülememiştir. Bu nedenle

nano SiO₂ tozunun da XRD analizi yapılmıştır ve Şekil 3.27.'ye bakıldığında saf SiO₂ amorf pik göstermektedir. Polyester ile benzer şekilde geniş bir spektrumda dağılım gösterse de nano SiO₂ katkısı ile birlikte piklerin şiddeti daha da artmaktadır. Nano SiO₂'de XRD verileri, kristal fazlara atfedilebilecek keskin Bragg kırınım zirveleri olmaksızın yalnızca geniş bir bant göstermiştir. Bu sonuçlar nano silikanın amorf yapısını ve matriks içerisindeki varlığını teyit etmektedir [90]. Danushika ve ark. nano SiO₂ katkısını tekstil ürünlerinde kullanarak yüzeyi hidrofobik hale getirmek için yaptığı çalışmada XRD analizine de yer vermiştir. Testler sonucunda SiO₂ nano katkıları yapısının amorf olduğu ve 15-35° aralığında geniş spektrum pik verdiğini saptamışlardır [91]. Asmaa ve ark. nano SiO₂ yapısını inceledikleri çalışmada yapılan XRD analizinde de SiO₂'nin amorf yapıda olduğu ve 15-35° aralığında geniş dağılım gösteren pik verdiği tespit edilmiştir [92]. Literatürde yapılan bu çalışmalar elde edilen verileri destekler niteliktedir. Şekil 3.28.'de nano ZrO₂ takviyeli kompozitlerin XRD görüntüsünü göstermektedir. $2\theta=28^{\circ}-31,4^{\circ}-50,3^{\circ}-60,1^{\circ}$ 'deki pikler yapıda ZrO₂ varlığını göstermektedir. Ayrıca ZrO₂'in ağırlıkça oranının artmasıyla pik şiddetini artmakta ve ZrO₂ takviyesi kristalleşmeyi artırıcı bir etki yapmaktadır [93].



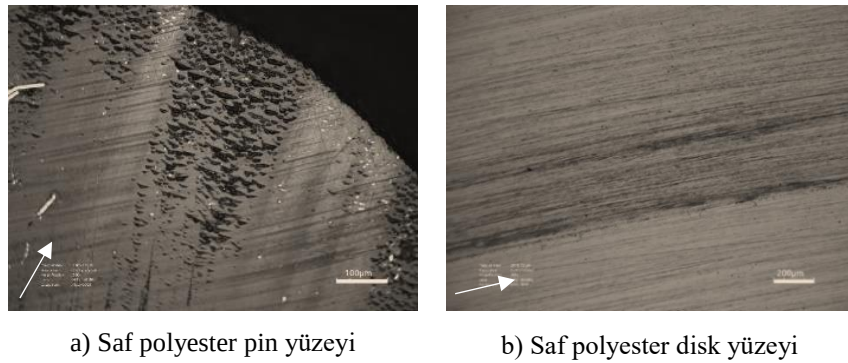
Şekil 3.28. Nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin XRD analizi

Şekilde 3.28.'de polyester kompozitlerde artan nano ZrO₂ takviyesi ile birlikte $2\theta=28^{\circ}-31,4^{\circ}-50,3^{\circ}$ 'deki piklerde artış görülmektedir. Bu sonuçlar yapıda ZrO₂ katkısının varlığını kanıtlar niteliktedir. Anku ve ark. boyar maddelerin yapısını geliştirmek için

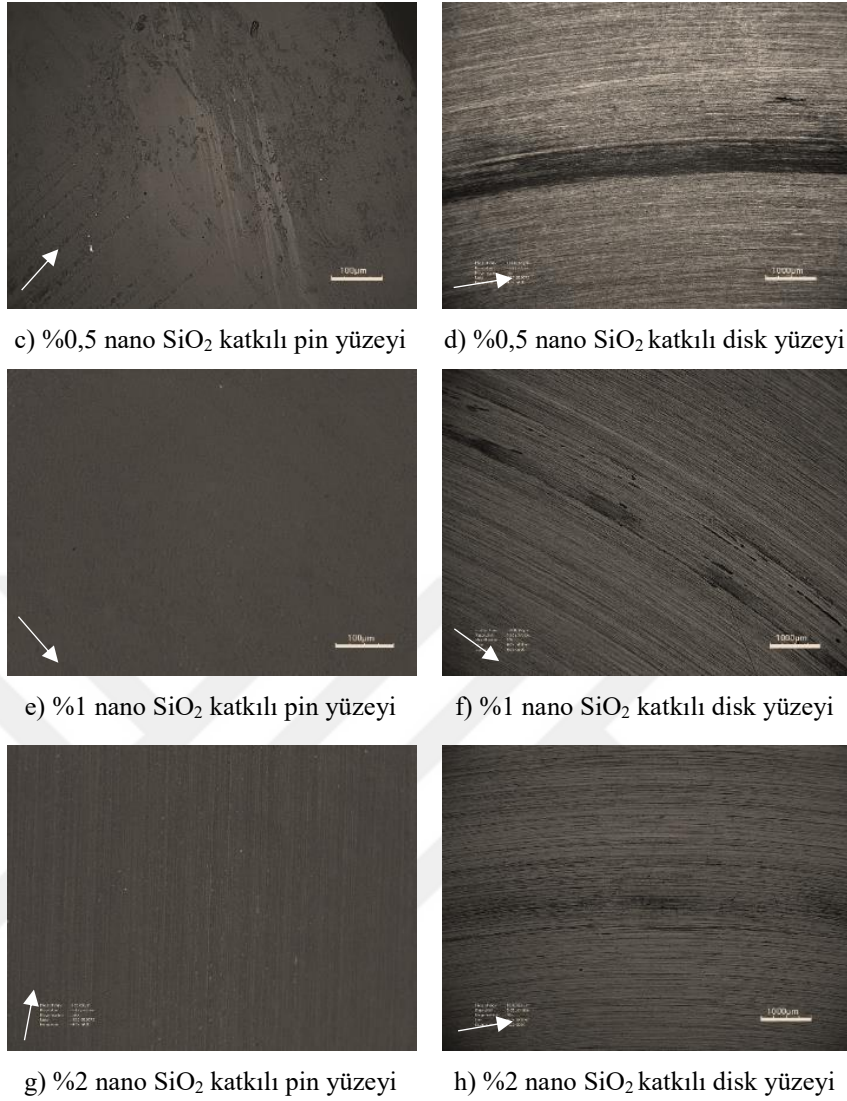
nano ZrO_2 kullandığı çalışmasında yapmış olduğu XRD analizi sonucu yaptıkları çalışmada nano ZrO_2 katkısının $2\theta=30,2^\circ-34,5^\circ-50,2^\circ-60,2^\circ$ noktalarında pik verdiğini tespit etmişlerdir [94]. Behbahani ve ark. nano ZrO_2 tozu üretim çalışmalarının sonucunda elde ettikleri ZrO_2 partiküllere yapmış oldukları XRD testinde $2\theta=30,4^\circ-35,1^\circ-50,6^\circ-60,2^\circ$ noktalarında pik tespit etmişlerdir [95]. Araştırmacıların nano ZrO_2 için elde ettikleri pikler ile bu deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar birbirini destekler niteliktedir.

3.10. Optik Mikroskop İncelemesi Sonucu

Şekil 3.29.'da SiO_2 katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 2N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Şekil 3.29.'da saf polyesterin aşınma izleri kayma yönünde dalgalı biçimdedir ve yüzeyde hasarlar vardır. Transfer film tabakası mevcuttur. Artan katkı oranı ile birlikte partiküllerin etkisiyle transfer film tabakası azalmaktadır. SiO_2 katkısı ile birlikte yüzeydeki izler kaybolmaktadır. Aynı zamanda Şekil 3.3.'de SiO_2 katkısının artması ile sürtünme katsayısında azalma olduğu görülmektedir. Disk yüzeyine baktığımızda izlerin azaldığı dolayısıyla nano partiküllerin kaymayı kolaylaştırdığı söylenebilmektedir.

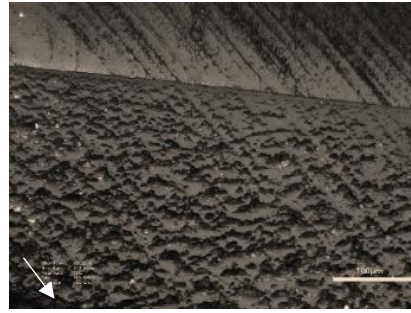


Şekil 3.29. Saf ve nano SiO_2 katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 2N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

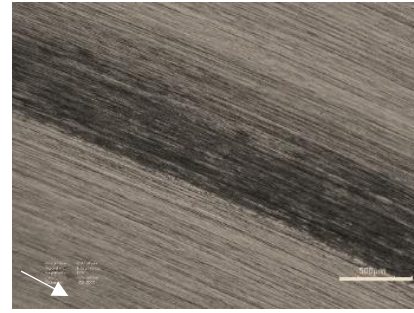


Şekil 3.29. (Devamı)

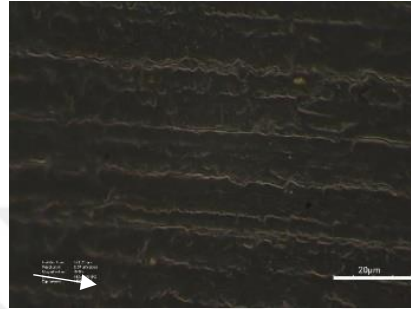
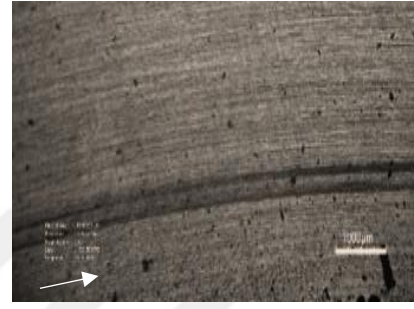
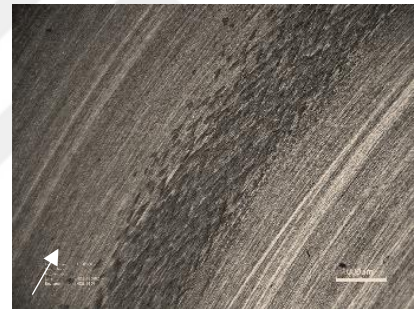
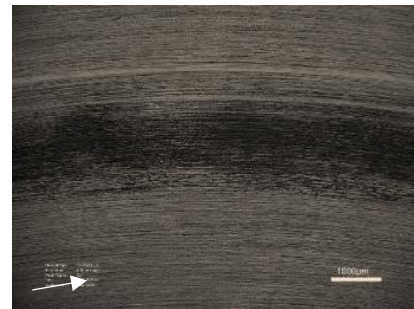
Şekil 3.30.'da SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 2N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Kayma hızının artması ile izlerin daha bariz ve derin olduğu görülmektedir. Yüksek kayma hızında kayma ara yüzeyinde meydana gelen fazla ısı ve yüzeyden kopan SiO₂ partiküllerin, numune-disk ara yüzüne girmesinin aşınma oranının artmasına sebep olduğu düşünülmektedir.



a) Saf polyester pin yüzeyi



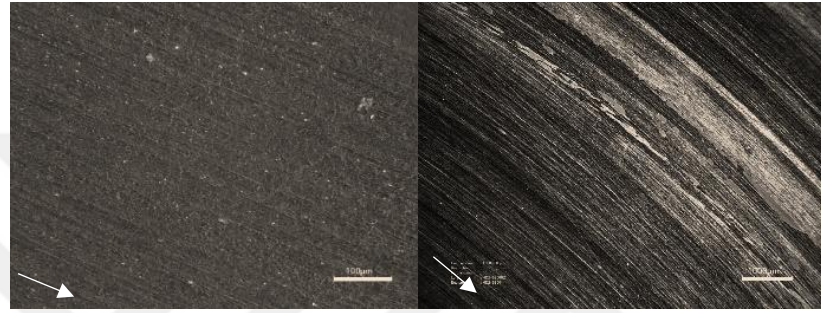
b) Saf polyester disk yüzeyi

c) %0,5 nano SiO₂ katkılı pin yüzeyid) %0,5 nano SiO₂ katkılı disk yüzeyie) %1 nano SiO₂ katkılı pin yüzeyif) %1 nano SiO₂ katkılı disk yüzeyig) %2 nano SiO₂ katkılı pin yüzeyih) %2 nano SiO₂ katkılı disk yüzeyi

Şekil 3.30. Saf ve nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 2N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

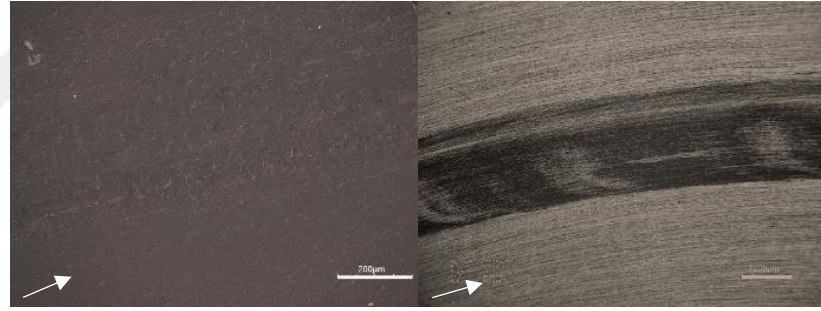
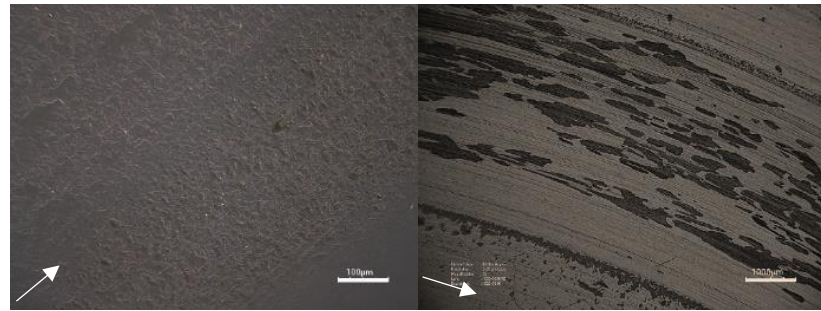
Şekil 3.31.'de SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 5N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Şekil 3.31.'de saf polyesterin aşınma izleri kayma yönünde dalgalı biçimdedir ve

yüzeyde hasarlar vardır. SiO_2 katkısı ile birlikte aşınma esnasında kopan partiküller yüzey ile numune arasında pürüzlü noktaları doldurarak izleri azaltmaktadır. Görüntülerde transfer film tabakası mevcuttur. Artan katkı oranı ile birlikte partiküllerin etkisiyle transfer film tabakası azalmaktadır. Aynı zamanda şekil 3.5.'te SiO_2 katkısının artması ile sürtünme katsayısında azalma olduğu görülmektedir. Disk yüzeyine baktığımızda izlerin azaldığı dolayısıyla nano partiküllerin kaymayı kolaylaştırdığı söylenebilmektedir.

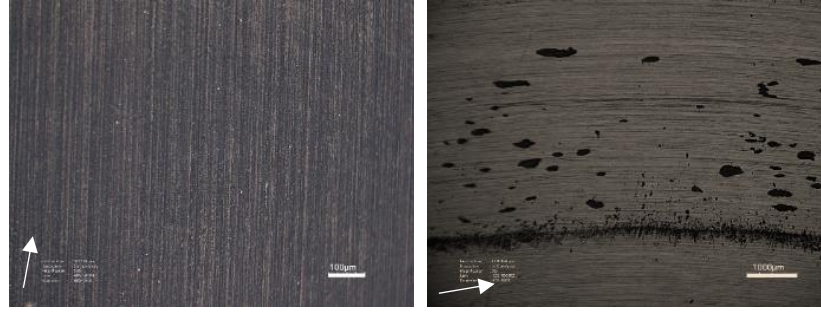


a) Saf polyester pin yüzeyi

b) Saf polyester disk yüzeyi

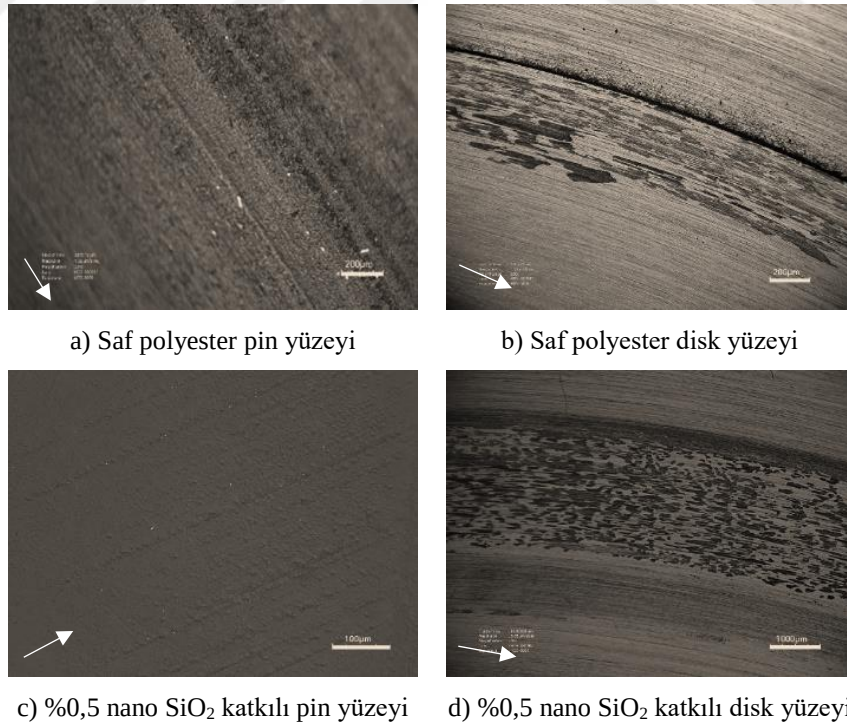
c) %0,5 nano SiO_2 katkılı pin yüzeyid) %0,5 nano SiO_2 katkılı disk yüzeyie) %1 nano SiO_2 katkılı pin yüzeyif) %1 nano SiO_2 katkılı disk yüzeyi

Şekil 3.31. Saf ve nano SiO_2 katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 5N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri



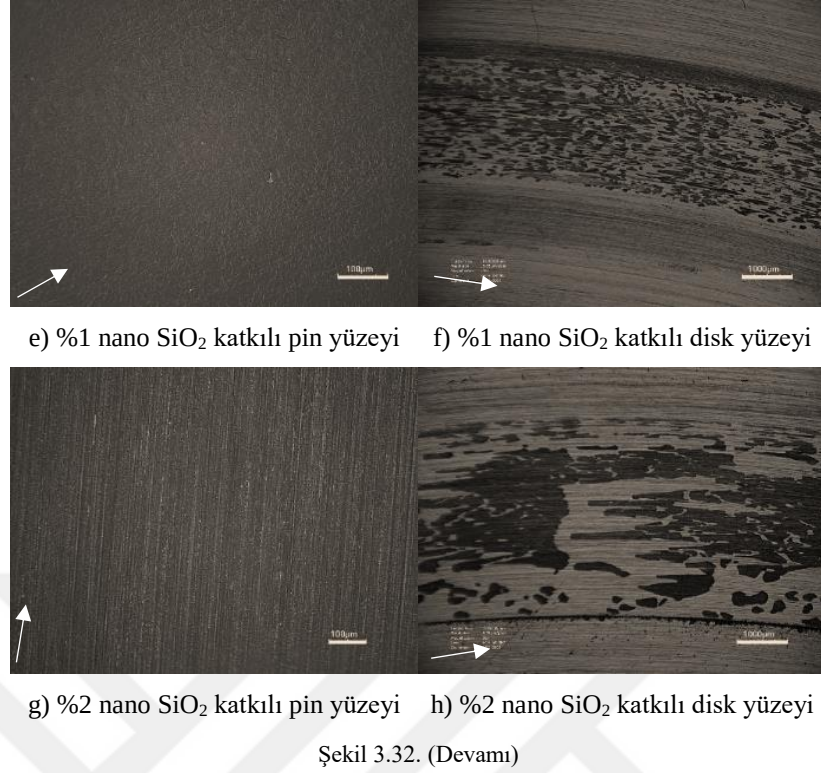
g) %2 nano SiO₂ katkılı pin yüzeyi h) %2 nano SiO₂ katkılı disk yüzeyi
Şekil 3.31. (Devamı)

Şekil 3.32.'de SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 5N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Şekil 3.32.'de saf polyesterin aşınma izleri kayma yönünde biçimdedir ve yüzeyde hasarlar vardır. Kayma hızının artması ile yüzeydeki çizikler derinleşmektedir. SiO₂ katkısı ile birlikte aşınma esnasında kopan partiküller yüzey ile numune arasında pürüzlü noktaları doldurarak aşınma izlerini azaltmaktadır. Aynı zamanda disk yüzeylerinde ince film tabakasının oluştuğu görülmektedir.

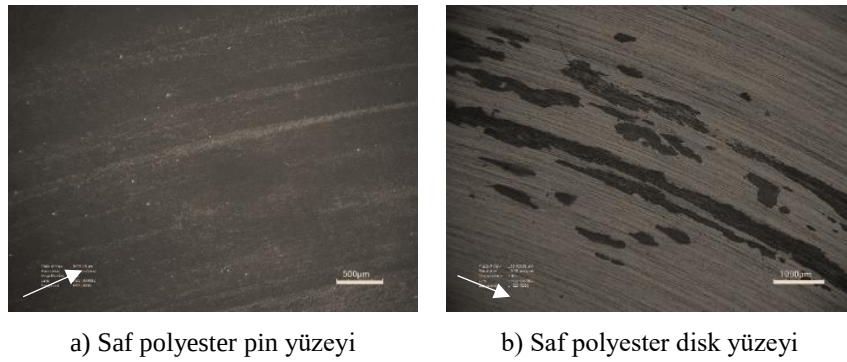


a) Saf polyester pin yüzeyi b) Saf polyester disk yüzeyi
c) %0,5 nano SiO₂ katkılı pin yüzeyi d) %0,5 nano SiO₂ katkılı disk yüzeyi

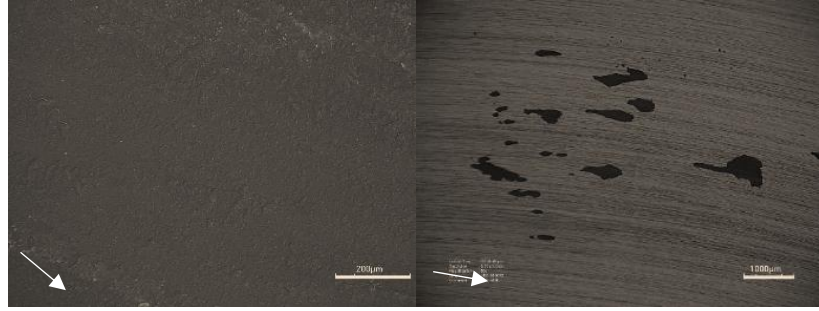
Şekil 3.32. Saf ve nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 5N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri



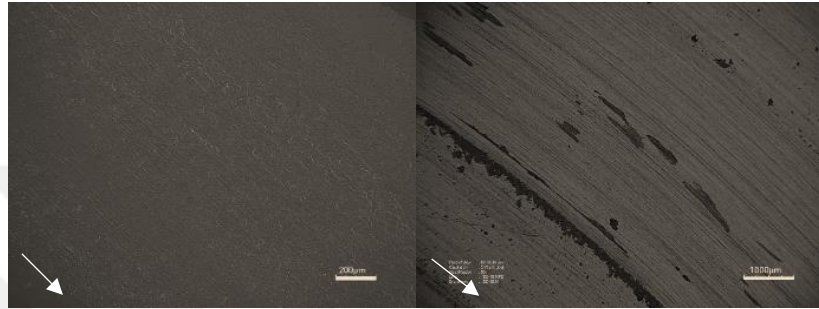
Şekil 3.33.'te SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 10N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Şekil 3.33.'te saf polyesterin aşınma izleri kayma yönünde biçimdedir ve yüzeyde hasarlar vardır. SiO₂ katkısı ile birlikte aşınma esnasında kopan partiküller yüzey ile numune arasında pürüzlü noktaları doldurarak aşınma izlerini azaltmaktadır. Aynı zamanda disk yüzeylerinde ince film tabakasının oluştuğu görülmektedir. Artan katkı oranı ile birlikte sert partiküllerin etkisiyle transfer film tabakası azalmaktadır. Nano katkı oranı ile birlikte disk üzerinde ayrılan malzeme miktarı azalmıştır.



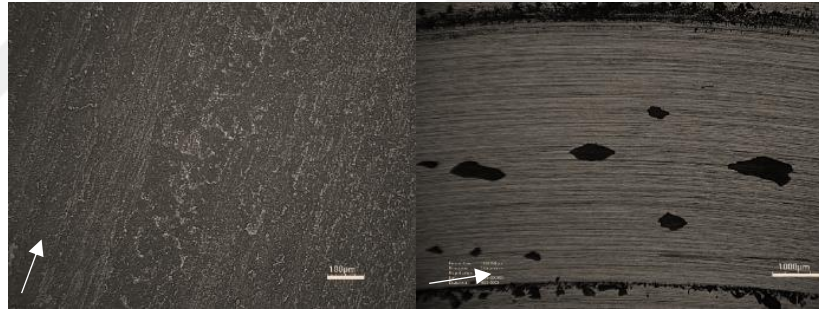
Şekil 3.33. Saf ve nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 10N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri



c) %0,5 nano SiO₂ katkılı pin yüzeyi d) %0,5 nano SiO₂ katkılı disk yüzeyi



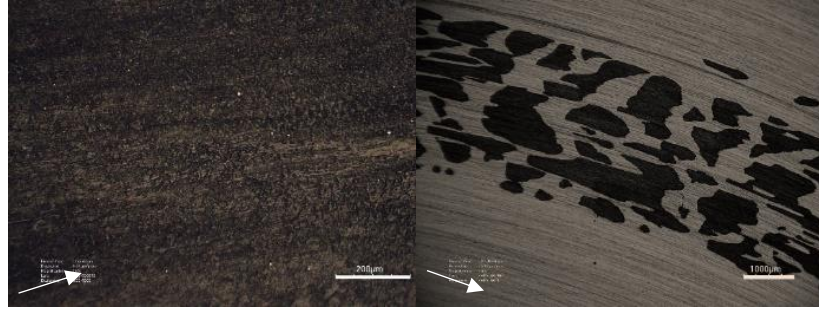
e) %1 nano SiO₂ katkılı pin yüzeyi f) %1 nano SiO₂ katkılı disk yüzeyi



g) %2 nano SiO₂ katkılı pin yüzeyi h) %2 nano SiO₂ katkılı disk yüzeyi

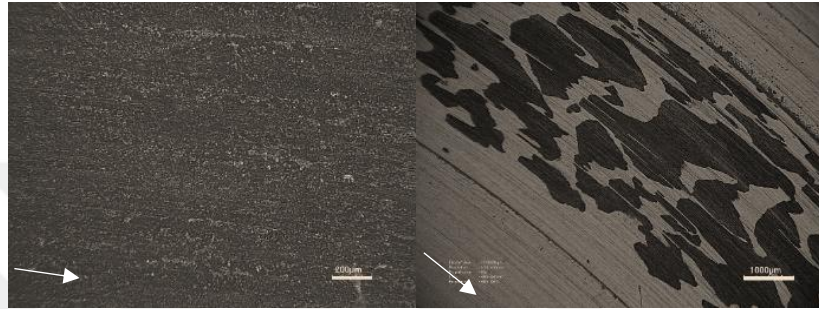
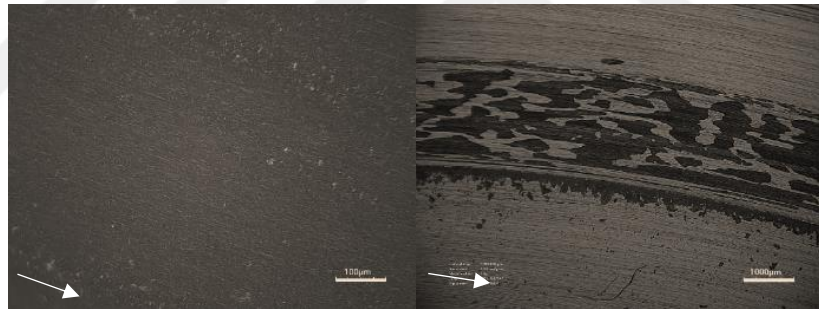
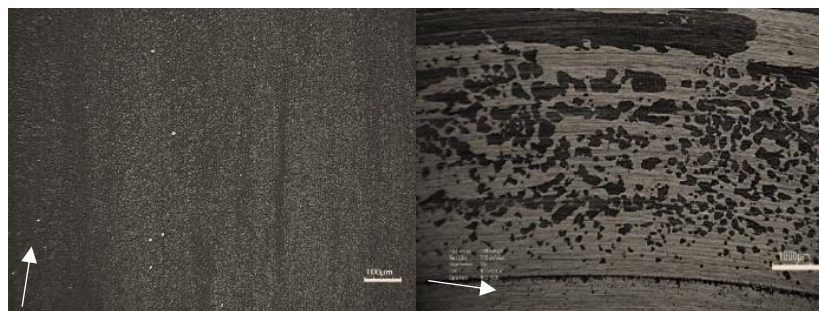
Şekil 3.33. (Devamı)

Şekil 3.34.'te SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 10N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Şekil 3.34.'te saf polyesterin aşınma izleri kayma yönünde dalgalı biçimdedir. Kayma hızının artması ile yüzeydeki çizikler derinleşmektedir. SiO₂ katkısı ile birlikte aşınma esnasında kopan partiküller yüzey ile numune arasında pürüzlü noktaları doldurarak aşınma izlerini azaltmaktadır. Aynı zamanda disk yüzeylerinde ince transfer film tabakasının oluştuğu görülmektedir. Nano katkı ile birlikte sert partiküllerin etkisiyle transfer film tabakası ve disk üzerinde ayrılan malzeme miktarı azalmıştır.



a) Saf polyester pin yüzeyi

b) Saf polyester disk yüzeyi

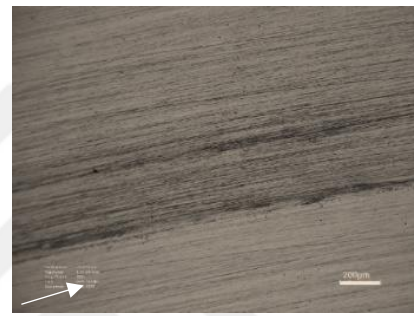
c) %0,5 nano SiO₂ katkılı pin yüzeyid) %0,5 nano SiO₂ katkılı disk yüzeyie) %1 nano SiO₂ katkılı pin yüzeyif) %1 nano SiO₂ katkılı disk yüzeyig) %2 nano SiO₂ katkılı pin yüzeyih) %2 nano SiO₂ katkılı disk yüzeyi

Şekil 3.34. Saf ve nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 10N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 3.35.'te ZrO_2 katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 2N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Şekil 3.35.'te saf polyesterin aşınma izleri kayma yönünde biçimdedir. ZrO_2 katkısı ile birlikte aşınma esnasında kopan partiküller yüzey ile numune arasında pürüzlü noktaları doldurarak aşınma izlerini azaltmaktadır. En düşük yüzey hasarı %0,5 ZrO_2 katkılı polyester kompozitte meydana gelmektedir. Aynı zamanda disk yüzeylerinde ince film tabakasının oluştuğu görülmektedir. En ince transfer film tabakası %5 ZrO_2 katkılı kompozitte meydana gelmektedir.



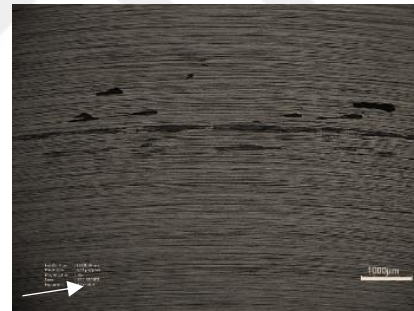
a) Saf polyester pin yüzeyi



b) Saf polyester disk yüzeyi



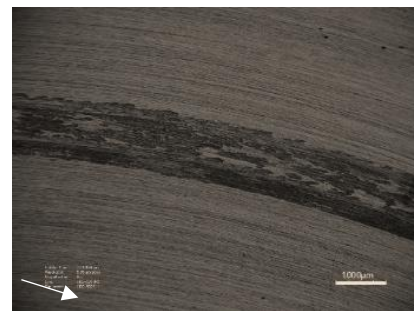
c) %0,5 nano ZrO_2 katkılı pin yüzeyi



d) %0,5 nano ZrO_2 katkılı disk yüzeyi

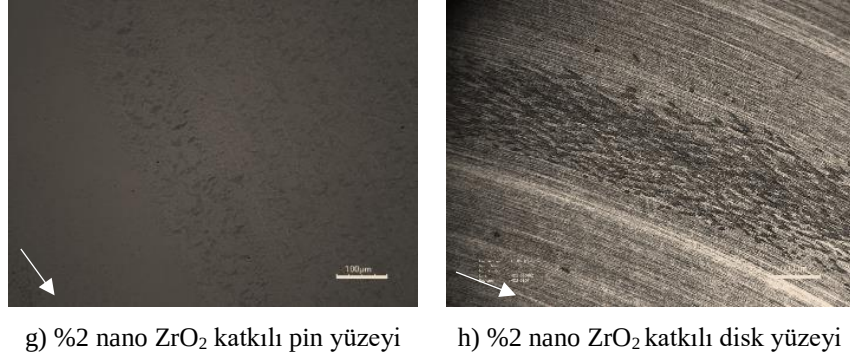


e) %1 nano ZrO_2 katkılı pin yüzeyi



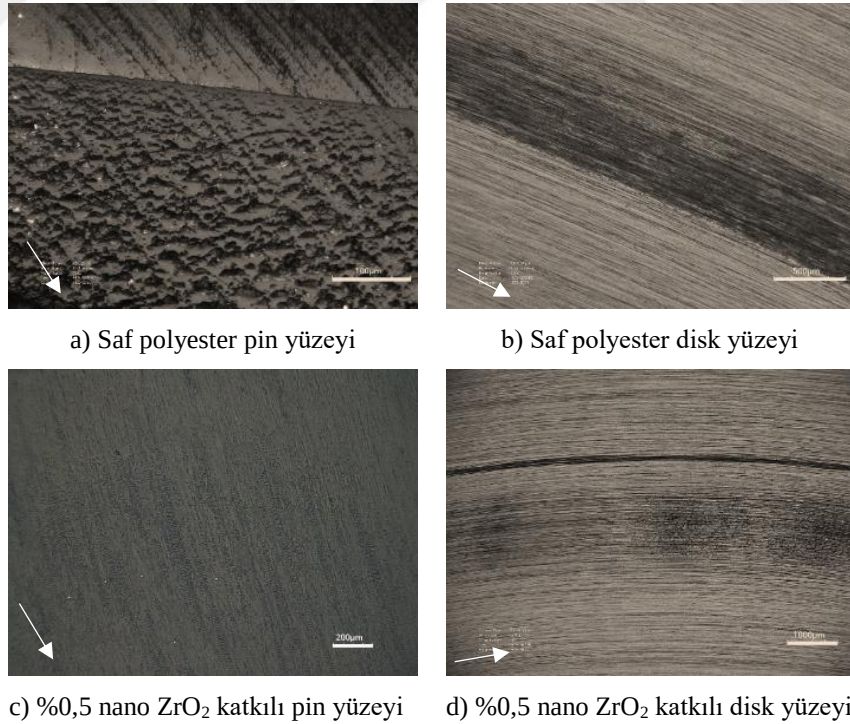
f) %1 nano ZrO_2 katkılı disk yüzeyi

Şekil 3.35. Saf ve nano ZrO_2 katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 2N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

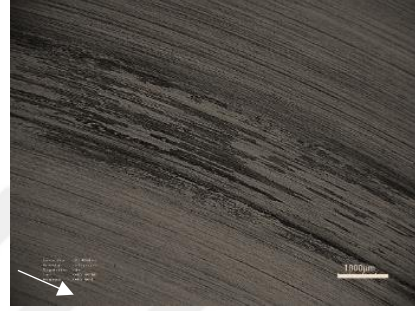


Şekil 3.35. (Devamı)

Şekil 3.36.'da ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 2N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Kayma hızının artması ile izlerin daha bariz ve derin olduğu görülmektedir. Yüzeyden kopan ZrO₂ partiküllerin, numune-disk ara yüzüne girerek sürtünme katsayısının ve özgül aşınma oranının düşmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Disk yüzeyinde transfer film tabakası mevcuttur. En ince transfer film tabakası %5 ZrO₂ katkılı kompozitte meydana gelmektedir.



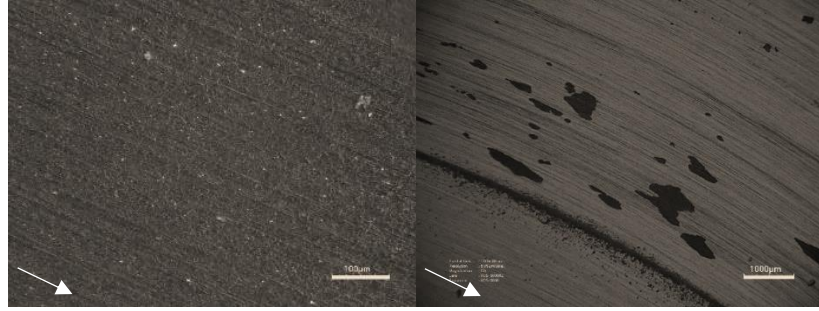
Şekil 3.36. Saf ve nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 2N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

e) %1 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyif) %1 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyig) %2 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyih) %2 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyi

Şekil 3.36. (Devamı)

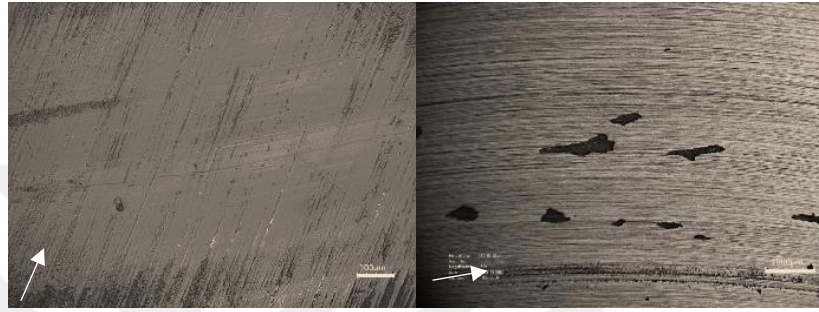
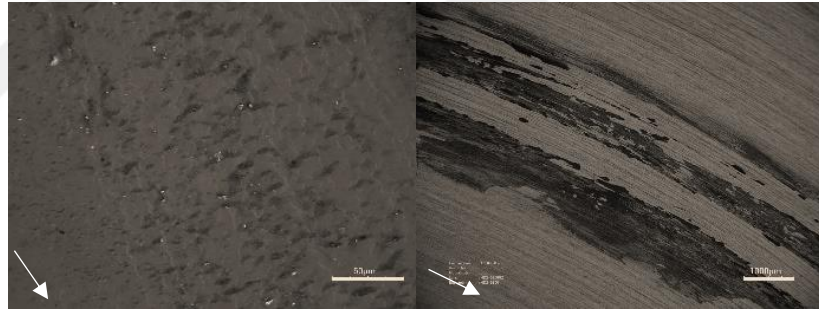
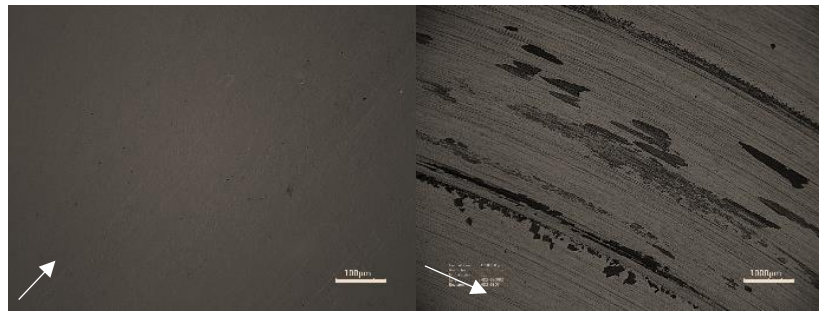
Şekil 3.37'.de ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 2N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Şekil 3.37.'de saf polyesterin aşınma izleri kayma yönünde biçimdedir. ZrO₂ katkısı ile birlikte aşınma esnasında kopan partiküller yüzey ile numune arasında pürüzlü noktaları doldurarak aşınma izlerini azaltmaktadır.

En düşük yüzey hasarı %0,5 ZrO₂ katkılı polyester kompozitte meydana gelmektedir. Diğer katkı oranlarında partikül topaklaşmasından dolayı kopan sert nano partiküllerin ara yüzeye girerek hasarı artırdığı düşünülmektedir. Disk yüzeyinde transfer film tabakası mevcuttur. En az ve en ince transfer film tabakası %5 ZrO₂ katkılı kompozitte meydana gelmektedir.



a) Saf polyester pin yüzeyi

b) Saf polyester disk yüzeyi

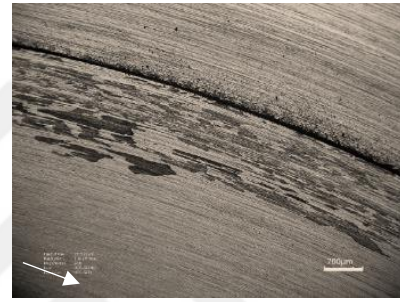
c) %0,5 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyi d) %0,5 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyie) %1 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyif) %1 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyig) %2 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyih) %2 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyi

Şekil 3.37. Saf ve nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 5N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 3.38.'de ZrO_2 katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 5N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Şekil 3.38.'de saf polyesterin aşınma izleri kayma yönünde dalgalı biçimdedir. ZrO_2 katkısı ile birlikte aşınma esnasında kopan partiküller yüzey ile numune arasında pürüzlü noktaları doldurarak aşınma izlerini azaltmaktadır. En düşük yüzey hasarı %0,5 ZrO_2 katkılı polyester kompozitte meydana gelmektedir. Diğer katkı oranlarında partikül topaklaşmasından dolayı kopan sert nano partiküllerin ara yüzeye girerek hasarı artırdığı düşünülmektedir.



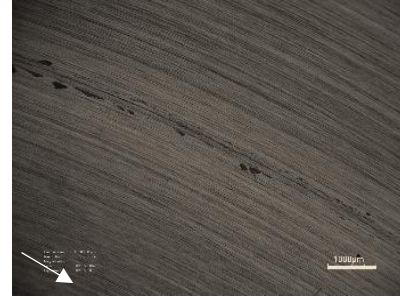
a) Saf polyester pin yüzeyi



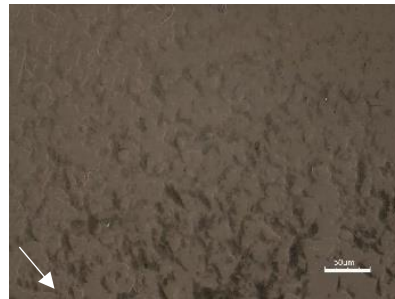
b) Saf polyester disk yüzeyi



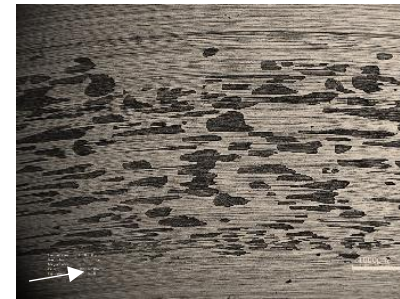
c) %0,5 nano ZrO_2 katkılı pin yüzeyi



d) %0,5 nano ZrO_2 katkılı disk yüzeyi

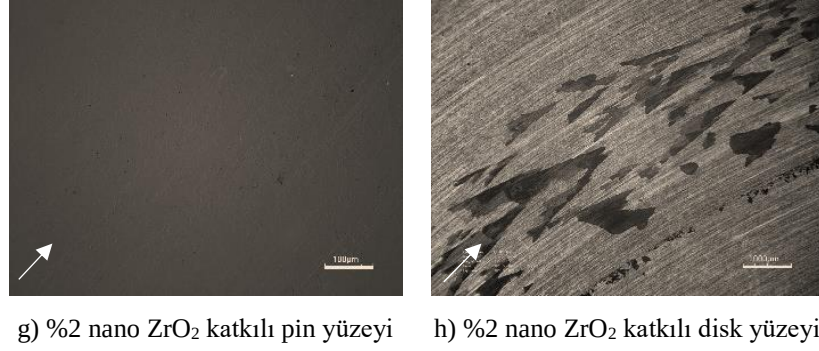


e) %1 nano ZrO_2 katkılı pin yüzeyi



f) %1 nano ZrO_2 katkılı disk yüzeyi

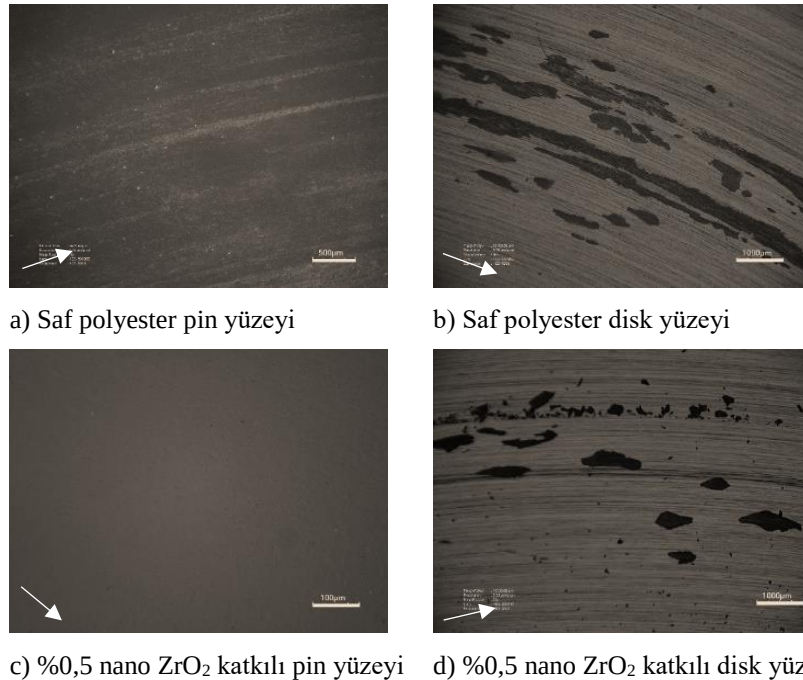
Şekil 3.38. Saf ve nano ZrO_2 katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 5N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri



g) %2 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyi h) %2 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyi

Şekil 3.38. (Devamı)

Şekil 3.39.'da ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 10N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Şekil 3.39.'da saf polyesterin aşınma izleri kayma yönünde dalgalı biçimdedir. ZrO₂ katkısı ile birlikte aşınma esnasında kopan partiküller yüzey ile numune arasında pürüzlü noktaları doldurarak aşınma izlerini azaltmaktadır. En düşük yüzey hasarı ve diske doğru parçalanma %0,5 ZrO₂ katkılı polyester kompozitte meydana gelmektedir. Diğer katkı oranlarında partikül topaklaşmasından dolayı kopan sert nano partiküllerin ara yüzeye girerek yüzeyde meydana gelen hasarı artırdığı düşünülmektedir. Disk yüzeyinde transfer film tabakası görülmektedir.



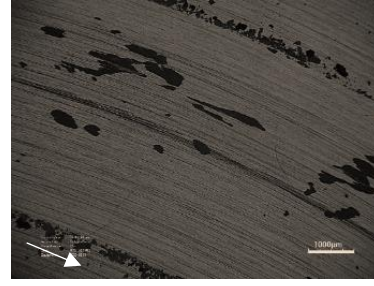
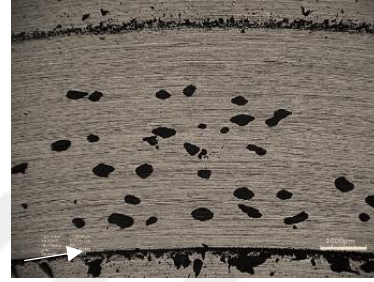
a) Saf polyester pin yüzeyi

b) Saf polyester disk yüzeyi

c) %0,5 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyi

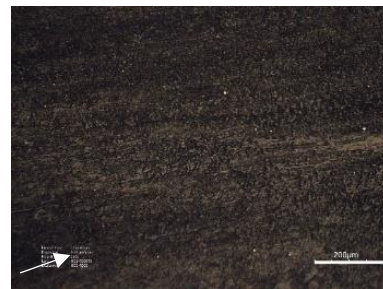
d) %0,5 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyi

Şekil 3.39. Saf ve nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin 0,5m/s ve 10N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

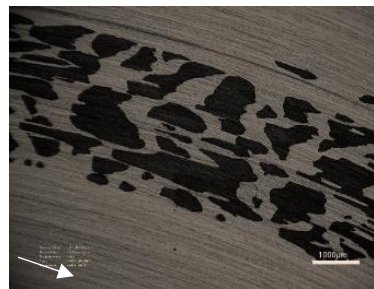
e) %1 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyif) %1 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyig) %2 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyih) %2 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyi

Şekil 3.39. (Devamı)

Şekil 3.40.'ta ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 10N yük koşullarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış görüntüleri verilmektedir. Şekil 3.40.'ta saf polyesterin aşınma izleri kayma yönünde dalgalı biçimdedir. ZrO₂ katkısı ile birlikte aşınma esnasında kopan partiküller yüzey ile numune arasında pürüzlü noktaları doldurarak aşınma izlerini azaltmaktadır. Kayma hızının artması ile çizikler derinleşmektedir. En düşük yüzey hasarı ve diske doğru parçalanma %0,5 ZrO₂ katkılı polyester kompozitte meydana gelmektedir. Diğer katkı oranlarında partikül topaklaşmasından dolayı kopan sert nano partiküllerin ara yüzeye girerek hasarı artırdığı düşünülmektedir.

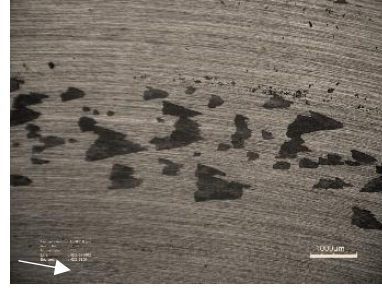
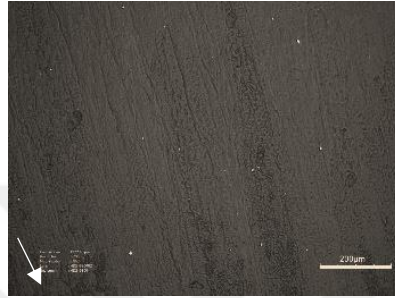
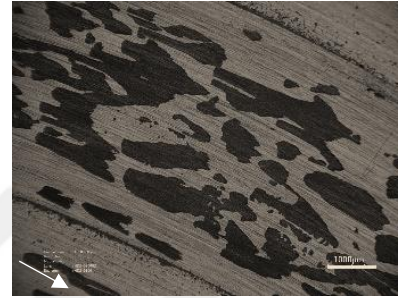
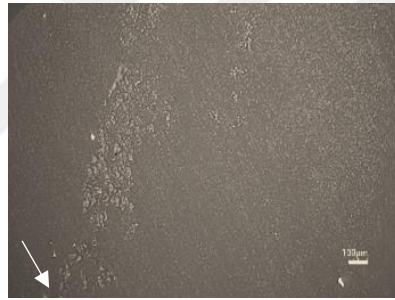
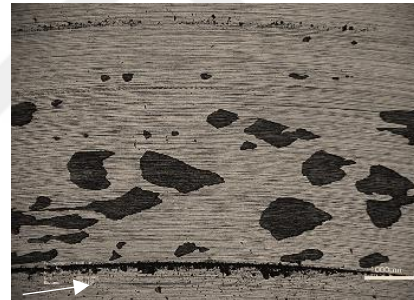


a) Saf polyester pin yüzeyi



b) Saf polyester disk yüzeyi

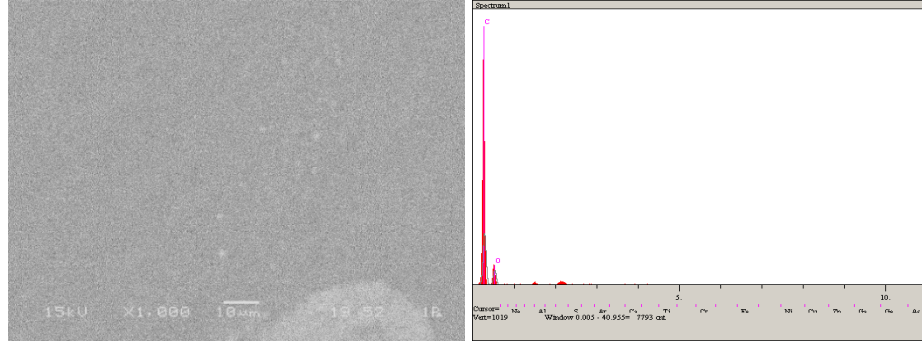
Şekil 3.40. Saf ve nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin 1m/s ve 10N yük şartlarında pin ve disk aşınma yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

c) %0,5 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyid) %0,5 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyie) %1 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyif) %1 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyig) %2 nano ZrO₂ katkılı pin yüzeyih) %2 nano ZrO₂ katkılı disk yüzeyi

Şekil 3.40. (Devamı)

3.11. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve Enerji Dağılımlı Spektrum (EDS) Analizi Sonucu

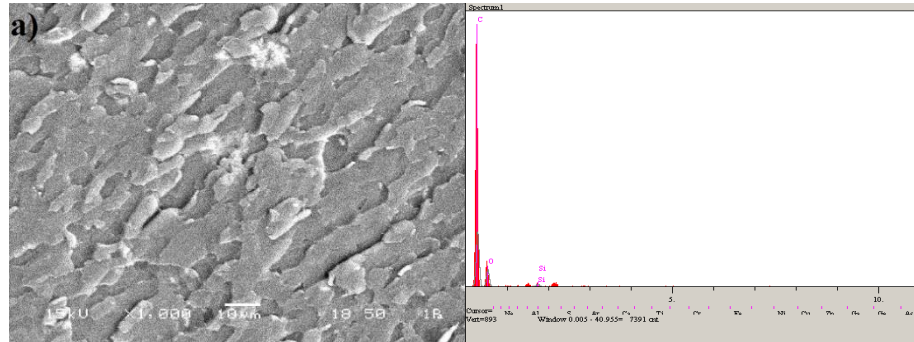
Aşağıdaki şekillerde saf polyester ve katkılı polyester kompozitlerin kırık iç yüzeylerinin SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri ve enerji dağılımlı spektrum (EDS) analizleri yapılmıştır. Şekil 3.41.'de 1000x büyütme altında matriks olarak kullanılan izoftalik polyesterin yüzey görüntüsü ve EDS analiz sonuçları görülmektedir.



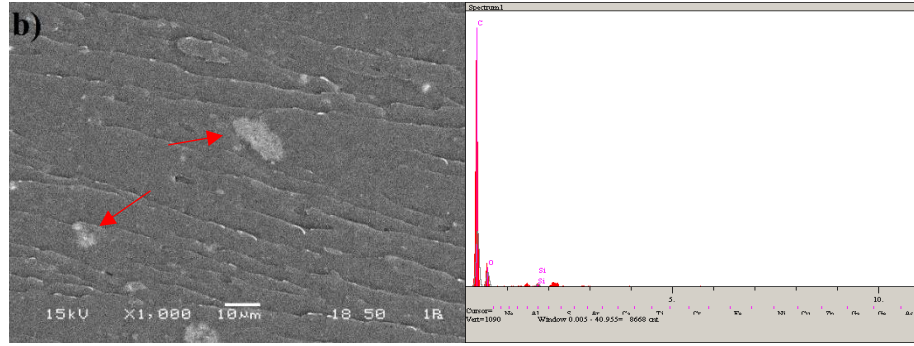
Şekil 3.41. Saf polyesterin SEM ve EDS analizi

3.11.1. Nano SiO₂ katkılı polyester kompozitler

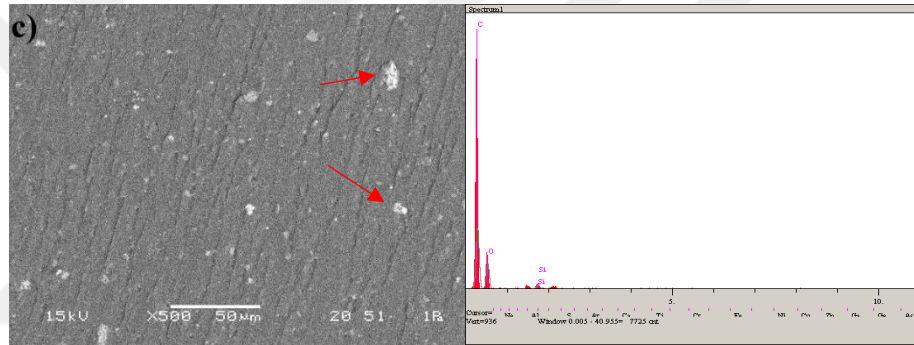
Nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin kırık iç yüzeylerinin SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri ve enerji dağılımlı spektrum (EDS) analizleri yapılmıştır. Şekil 3.42.'de 1000x büyütme altında SiO₂ katkılı polyester kompozitin yüzey görüntüleri ve EDS analiz sonuçları verilmektedir.



Şekil 3.42. Nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri a) %0,5 SiO₂ b) %1 SiO₂ c) %2 SiO₂



Elmnt.	Hat	Yoğunluk (c/s)	Error 2-sig	Atomik %	Conc	Units	
C	Ka	204.93	9.052	66.807	59.716	wt.%	
O	Ka	49.75	4.460	32.345	38.513	wt.%	
Si	Ka	11.42	2.137	0.847	1.771	wt.%	
				100.000	100.000	wt.%	Total



Elmnt.	Hat	Yoğunluk (c/s)	Error 2-sig	Atomik %	Conc	Units	
C	Ka	192.10	8.762	60.420	52.920	wt.%	
O	Ka	73.26	5.411	38.557	44.986	wt.%	
Si	Ka	15.04	2.452	1.022	2.094	wt.%	
				100.000	100.000	wt.%	Total

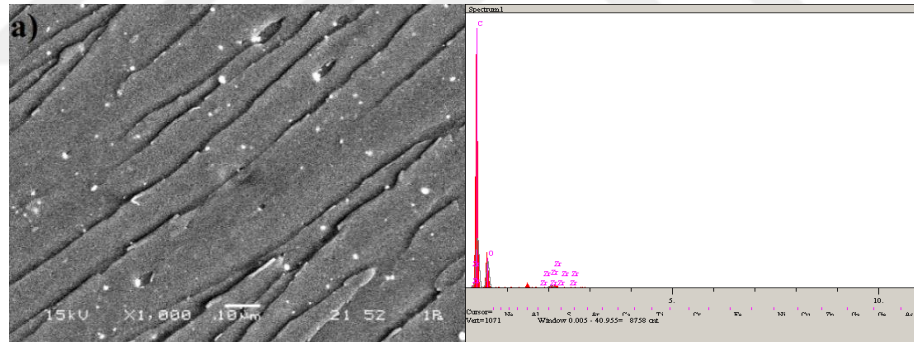
Şekil 3.42. (Devamı)

Şekil 3.42.'de %0,5 nano SiO₂ katkılı polyester kompozitin kırık yüzey görüntüsüne baktığımızda topaklanmış partiküller kısmen olsa bile homojen dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. EDS analizi sonucunda nano SiO₂ partiküllerinin atomik yüzde oranının 0,844 olduğu görülmektedir. %1 nano SiO₂ katkılı polyester kompozitlerin görüntüsünde de kısmi topaklaşma mevcut olmasına rağmen genel yüzey görüntüsünde homojen dağılım olduğu söylenebilmektedir. %1 nano SiO₂ katkı oranında partiküllerin atomik yüzde oranının 0,847 olduğu görülmektedir. %2 nano SiO₂ katkı polyester kompozitlerin yüzey görüntüsünde nano partiküllerin

yoğunluğunun daha da arttığı görülebilmektedir. Atomik yüzde oranı, %2 nano SiO₂ katkılı kompozitlerde 1,022 olarak ölçülmektedir. Artan katkı oranı ile birlikte atomik yüzde oranında artış meydana gelmektedir. Analizler sonucunda nano SiO₂ takviyesinin matriks içerisindeki dağılımı ve katkı oranında ki değişimlerin kompozit içyapısında meydana getirdiği değişimler ve topaklanmalar görülmektedir. Artan katkı oranının matriks içerisindeki dağılımı, aşınma ve sürtünme sonuçları ile tutarlılık göstermektedir. Aynı zamanda temas açısı sonuçlarına baktığımızda artan nano SiO₂ katkı oranı ile birlikte temas açısı değerlerinde de artış meydana geldiği görülmüştür.

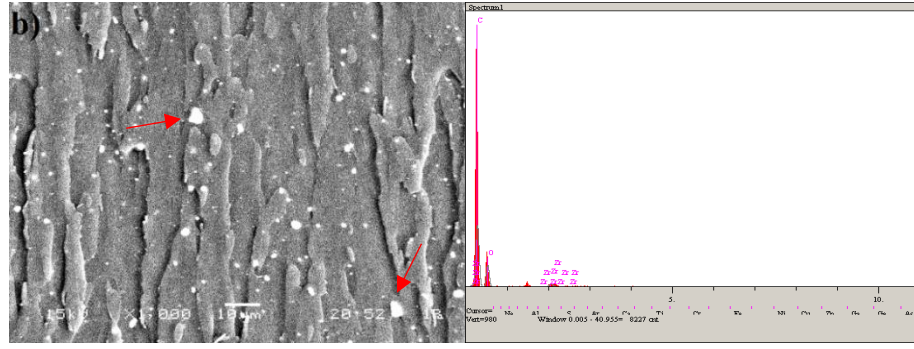
3.11.2. Nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitler

Nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin kırık iç yüzeylerinin SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri ve enerji dağılımlı spektrum (EDS) analizleri yapılmıştır. Şekil 3.43.'te 1000x büyütme altında ZrO₂ katkılı polyester kompozitin yüzey görüntüleri ve EDS analiz sonuçları verilmektedir.

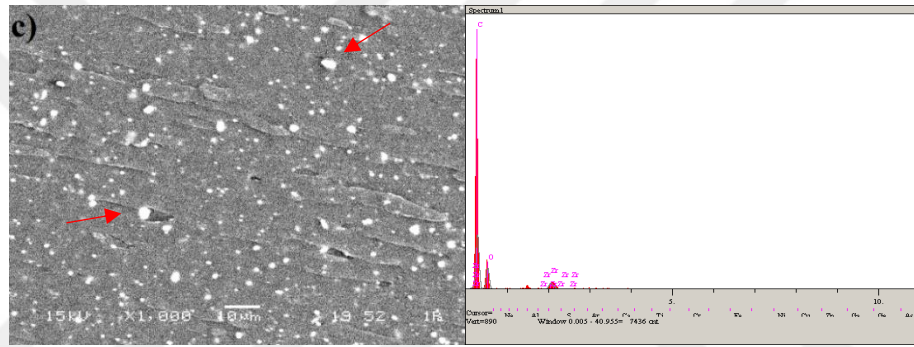


Elmnt.	Hat	Yoğunluk (c/s)	Error 2-sig	Atomik %	Conc	Units	
C	Ka	180.07	8.485	56.592	48.294	wt. %	
O	Ka	87.86	5.927	42.966	48.841	wt. %	
Zr	La	8.90	1.887	0.442	2.865	wt. %	
				100.000	100.000	wt. %	Total

Şekil 3.43. Nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri a) %0,5 ZrO₂ b) %1 ZrO₂ c) %2 ZrO₂



Elmnt.	Hat	Yoğunluk (c/s)	Error 2-sig	Atomik %	Conc	Units	
C	Ka	202.37	8.997	62.757	54.301	wt. %	
O	Ka	67.18	5.184	36.731	42.335	wt. %	
Zr	La	10.35	2.035	0.512	3.364	wt. %	
				100.000	100.000	wt. %	Total



Elmnt.	Hat	Yoğunluk (c/s)	Error 2-sig	Atomik %	Conc	Units	
C	Ka	162.51	8.060	63.072	53.194	wt. %	
O	Ka	57.91	4.811	35.921	40.355	wt. %	
Zr	La	18.29	2.704	1.007	6.451	wt. %	
				100.000	100.000	wt. %	Total

Şekil 3.43. (Devamı)

Şekil 3.43.'te %0,5 nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitin kırık yüzey görüntüsüne baktığımızda partiküllerin homojen dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. EDS analizi sonucunda nano ZrO₂ partiküllerinin atomik yüzde oranının 0,442 olduğu görülmektedir. %1 nano ZrO₂ katkılı polyester kompozitlerin görüntüsünde de partiküllerde topaklanma mevcut olduğu görülmektedir. %1 nano ZrO₂ katkı oranında partiküllerin atomik yüzde oranının 0,512 olduğu görülmektedir. %2 nano ZrO₂ katkı polyester kompozitlerin yüzey görüntüsünde nano partiküllerin yoğunluğunun daha da arttığı anlaşılmaktadır. Atomik yüzde oranı %2 nano ZrO₂ katkılı kompozitlerde 1,007 olarak ölçülmektedir. Artan katkı oranı ile birlikte atomik yüzde oranında artış

meydana gelmektedir. Analizler sonucunda nano ZrO_2 takviyesinin matriks içerisindeki dağılımı ve katkı oranındaki değişimlerin kompozit iç yapısında meydana getirdiği değişimler görülmektedir. %1 ve %2 katkı oranlarında partiküllerde topaklaşma meydana gelmesi; aşınma ve temas açısı sonuçlarını destekler niteliktedir. En homojen karışımın %0,5 nano ZrO_2 katkılı kompozitlerde meydana geldiği ve topaklaşmanın minimum olduğu görülmektedir. Zhang ve ark. yaptıkları çalışmada nano SiO_2 katkısının nano ZrO_2 katkısına göre daha iyi dağılım gösterdiğini ve optimum katkı oran yüzdesinin nano SiO_2 katkılarında daha yüksek olduğunu açıklamışlardır [96]. Bu sonuçlara ek olarak, Ayman ve ark. yaptığı çalışmada nano katkı yüzdesinin %2'nin üzerine çıkması ile birlikte topaklanma ve aşınma oranında artış olduğu sonucuna ulaşmışlardır [97].

BÖLÜM 4. SONUÇ VE ÖNERİ

Yapılan çalışmalarda polyester matriks içerisine nano boyutlu ZrO_2 ve SiO_2 katkıları eklenerek kompozit malzemeler hazırlanmıştır. Farklı oranlarda katkıları eklenerek elde edilen kompozit malzemelerin aşınma, sürtünme, temas açısı, yüzey enerjisi, termal, morfolojik özellikleri ve temas açısı-yüzey enerjisi değerlerinin aşınma sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Aynı zamanda literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırmalar yapılarak elde edilen sonuçların geçerliliği araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde polyester matriks içerisine eklenen nano katkıların malzemenin tribolojik, yüzey ve termal özelliklerini geliştirdiği görülmüştür.

4.1. Sonuçlar

- Tüm deney sonuçlarına bakıldığında nano katkıları ile elde edilen kompozitlerin saf poliestere göre daha gelişmiş olduğu görülmektedir.
- Polyester matriks içerisindeki nano katkı oranının artmasıyla birlikte kompozitlerin yoğunluklarında artış meydana gelmektedir.
- Polyester matriks içerisindeki nano katkı oranının artmasıyla birlikte kompozitlerin sertliklerinde artış meydana gelmektedir.
- İzotalik polyester reçineye eklenen nano katkıları ile aşınma ve sürtünme özelliklerinde iyileşme olmaktadır.
- En iyi aşınma ve sürtünme performansı %2 nano SiO_2 katkılı ve %0,5 ZrO_2 katkılı kompozitlerde elde edilmektedir.
- Aşınma ve sürtünme deneylerinde yükün artmasıyla saf polyester ve nano katkılı kompozitlerin sürtünme katsayılarında genel olarak bir düşüş gözlemlenmiştir. Ancak aşınma oranlarında artış meydana gelmektedir.
- Kayma hızının artmasıyla birlikte sürtünme katsayıları azalmaktadır. Aşınma oranları ise artmaktadır.

- Aşınma mekanizmalarında adezif ve abrasif mekanizmaların etkili olduğu görülmektedir.
- Polyester reçine içerisine nano katkı eklenmesi ile temas açısı değerlerinde artış meydana gelmektedir. Yüzey, saf polyestere kıyasla hidrofobik yapıda olmaktadır.
- En yüksek temas açısı değerleri %2 nano SiO₂ katkılı ve %0,5 ZrO₂ katkılı kompozitlerde elde edilmektedir.
- Polyester reçine içerisine nano katkı eklenmesi ile birlikte malzemenin termal kararlılığında değişim meydana gelse de önemli bir etkinin olmadığı tespit edilmiştir.
- Temas açısının aşınma performansına direkt etki ettiği görülmüş ve temas açısı ile tribolojik performans arasında doğrusal bir ilişki olduğu saptanmıştır.

4.2. Öneriler

- Nanokompozit üretim aşamalarından olan ultrasonik karıştırmada daha iyi soğutma sağlanarak sürenin uzun tutulması homojenliğe olumlu katkı yapabilir.
- Nano tozların reçineye dahil edilmeden önce çeşitli yöntemlerle yüzeyinin modifiye edilmesi ile daha homojen karışım sağlanarak kompozitin temas açısı değerlerinde ve tribolojik performansında gelişme kaydedilebilir.
- Nano katkılar farklı oranlarda eklenerek kompozit içerisindeki kritik oranları tespit edilebilir.
- Farklı nano boyutlarda tozlar kullanılarak, partikül boyutunun etkisi araştırılabilir.
- Nano tozların polyesterin alev geciktiriciliğine etkisi incelenebilir.
- Numunelerin aşınma deneyleri sırasında sıcaklık ölçümü yapılması ile yüzey sıcaklık değişimleri gözlemlenebilir. Aşınma esnasında meydana gelen sıcaklığın aşınma performansına etkisi incelenebilir.
- Kompozitlere mekanik testler yapılarak nano katkılarının, polyesterin mekanik davranışlarına etkisi incelenebilir.
- Korozyon testi yapılarak, nano katkılarının polyesterin korozyon direncine etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] S. Thomas, K. Joseph, S. K. Malhotra, K. Goda, and M. S. Sreekala, Polymer composites, macro-and microcomposites. John Wiley & Sons, 2012.
- [2] D. Gay, Composite materials: design and applications. CRC press, 2014.
- [3] M. K. Rawat, N. Kukreja, and S. K. Gupta, "Effect of reinforcing micro sized aluminium oxide particles on mechanical properties of polymer based composite," Materials Today: Proceedings, vol. 26, pp. 1306-1309, 2020.
- [4] K. Nagaraja, S. Rajanna, G. Prakash, and G. Rajeshkumar, "Mechanical properties of polymer matrix composites: Effect of hybridization," Materials Today: Proceedings, vol. 34, pp. 536-538, 2021.
- [5] C. Navin and F. Mohammed, Tribology of natural fiber polymer composites. Woodhead Publishing Limited, 2008, pp. 77-78.
- [6] H. T. Hahn and S. W. Tsai, Introduction to composite materials. CRC Press, 1980.
- [7] A. Srinivasan and S. Bandyopadhyay, Advances in polymer materials and technology. CRC Press, 2016.
- [8] R. J. Young and P. A. Lovell, Introduction to polymers. CRC press, 2011.
- [9] B. T. Astrom, Manufacturing of polymer composites. CRC press, 1997.
- [10] C. C. Ibeh, Thermoplastic materials: properties, manufacturing methods, and applications. CRC Press, 2011.
- [11] D. Ratna, Handbook of thermoset resins. iSmithers Shawbury, UK, 2009.
- [12] N. P. Cheremisinoff and P. N. Cheremisinoff, Elastomer technology handbook. CRC press, 1993.
- [13] F. S. Friedrich K, Zhang Z, Polymer Composites: From Nano-to Macro-Scale. New York: Springer, 2005.
- [14] A. Mehmet, V. DEMİR, and H. İMAMOĞLU, "Nanoparçacıkların Özellikleri ve Akuatik Çevreye Etkisi," Ziraat Mühendisliği, no. 360, pp. 52-59.

- [15] C. Baillie, Green composites: polymer composites and the environment. CRC Press, 2005.
- [16] S. GW, "Engineering tribology. Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor," ed: Elsevier Butterworth–Heinemann, 2013.
- [17] B. Bhushan and P. L. Ko, "Introduction to tribology," Appl. Mech. Rev., vol. 56, no. 1, pp. B6-B7, 2003.
- [18] P. L. Menezes, M. Nosonovsky, S. P. Ingole, S. V. Kailas, and M. R. Lovell, Tribology for scientists and engineers. Springer, 2013.
- [19] G. W. Stachowiak, "Wear: materials, mechanisms and practice," 2006.
- [20] W. Brostow, V. Kovačević, D. Vrsaljko, and J. J. J. o. M. E. Whitworth, "Tribology of polymers and polymer-based composites," vol. 32, no. 5, p. 273, 2010.
- [21] N. Myshkin, S. Pesetskii, and A. Y. Grigoriev, "Polymer Tribology: Current State and Applications," Tribology in Industry, vol. 37, no. 3, 2015.
- [22] Ö. Mehmet İskender, "Mikro ve Nano Dolgulu Epoksi Kompozitlerin Tribolojik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ve Modellenmesi," Makine Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, 2014.
- [23] Z. Zhang, C. Breidt, L. Chang, F. Hauptert, and K. Friedrich, "Enhancement of the wear resistance of epoxy: short carbon fibre, graphite, PTFE and nano-TiO₂," Composites Part A: Applied Science Manufacturing, vol. 35, no. 12, pp. 1385-1392, 2004.
- [24] L. Chang and Z. J. W. Zhang, "Tribological properties of epoxy nanocomposites: Part II. A combinative effect of short carbon fibre with nano-TiO₂," vol. 260, no. 7-8, pp. 869-878, 2006.
- [25] K. Friedrich, Friction and wear of polymer composites. Elsevier, 2012.
- [26] M. Avalor and E. Romanello, "Tribological characterization of modified polymeric blends," Procedia Structural Integrity, vol. 8, pp. 239-255, 2018.
- [27] B. Y. Islak, G. Açıkbaş, and N. Ç. Açıkbaş, "Epoksi Matriksli Kompozitlerde Katı Yağlayıcı İlavesinin Sürtünme Kaybının Azaltılmasına Etkisinin İncelenmesi," Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 8, no. 1, pp. 583-592.

- [28] E. He, S. Wang, Y. Li, and Q. Wang, "Enhanced tribological properties of polymer composites by incorporation of nano-SiO₂ particles: A molecular dynamics simulation study," *Computational Materials Science*, vol. 134, pp. 93-99, 2017.
- [29] X. Zhaohong, L. Zhenhua, L. Jian, and F. Y. Fei, "The effect of CF and nano-SiO₂ modification on the flexural and tribological properties of POM composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 27, no. 3, pp. 287-296, 2014.
- [30] Y. Li, S. Wang, and Q. Wang, "A molecular dynamics simulation study on enhancement of mechanical and tribological properties of polymer composites by introduction of graphene," *Journal of Carbon*, vol. 111, pp. 538-545, 2017.
- [31] S. Beckford, Y. Wang, and M. Zou, "Wear-resistant PTFE/SiO₂ nanoparticle composite films," *Tribology Transactions*, vol. 54, no. 6, pp. 849-858, 2011.
- [32] R. Kurahatti, A. Surendranathan, A. R. Kumar, C. Wadageri, V. Auradi, and S. Kori, "Dry sliding wear behaviour of epoxyreinforced with nanoZrO₂ particles," *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 274-280, 2014.
- [33] W. Li, S. Zheng, B. Cao, and S. Ma, "Friction and wear properties of ZrO₂/SiO₂ composite nanoparticles," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 13, no. 5, pp. 2129-2137, 2011.
- [34] Q. Wang, Q. Xue, H. Liu, W. Shen, and J. J. W. Xu, "The effect of particle size of nanometer ZrO₂ on the tribological behaviour of PEEK," vol. 198, no. 1-2, pp. 216-219, 1996.
- [35] N. A. Ai, S. Hussein, M. Jawad, and AL-Ajaj, "Effect of Al₂O₃ and SiO₂ nanoparticle on wear, hardness and impact behavior of epoxy composites," *Chemistry Materials Research*, vol. 7, no. 4, pp. 34-40, 2015.
- [36] Y. Canpolat, "Grafen oksidin kontrollü kimyasal indirgenmesi ile yüzeyde temas açısı kontrolü sağlanması," *Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü Gebze Teknik Üniversitesi*, 2018.
- [37] M. C. Searle, *Thermal Transport at Superhydrophobic Surfaces in Impinging Liquid Jets, Natural Convection, and Pool Boiling*. Brigham Young University, 2018.
- [38] F. Zhang et al., "Superhydrophobic carbon nanotubes/epoxy nanocomposite coating by facile one-step spraying," *Surface Coatings Technology*, vol. 341, pp. 15-23, 2018.
- [39] X. Huang et al., "A survey of icephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 105, pp. 74-97, 2019.

- [40] P. Roach, N. J. Shirtcliffe, and M. Newton, "Progress in superhydrophobic surface development," *Journal of Soft matter*, vol. 4, no. 2, pp. 224-240, 2008.
- [41] G. Gözde. Yüzey Gerilimi ve Temas Açısı Ölçümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Laboratuvar Föyü.
- [42] Y. Erayman and Y. Korkmaz, "Süperhidrofob tekstil yüzeylerin florsuz bileşikler kullanılarak sol-jel yöntemi ile modifikasyonu," *Tekstil ve Mühendis*, vol. 24, no. 105, pp. 41-52, 2017.
- [43] T. Zhao, L. J. C. Jiang, and S. B. Biointerfaces, "Contact angle measurement of natural materials," vol. 161, pp. 324-330, 2018.
- [44] Y. Okumuş, "Cam yüzeyinin hidrofobik özelliğinin fiziksel ve kimyasal modifikasyon yoluyla iyileştirilmesi," *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Doktora Tezi*, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, 2020.
- [45] T. P. Dos Santos Barros, D. G. de Lima Cavalcante, D. F. de Oliveira, R. E. Caluete, and S. J. G. de Lima, "Study of the surface properties of the epoxy/quasicrystal composite," *Journal of Materials Research Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 590-598, 2019.
- [46] Optical contact angle measuring and contour analysis systems, Dataphysics.
- [47] R. Hebbar, A. Isloor, and A. Ismail, "Contact angle measurements," in *Membrane characterization*: Elsevier, 2017, pp. 219-255.
- [48] S. Düzyol, "Cevher Hazırlama İşlemlerinde Yüzey Gerilimi Ve Temas Açısı Ölçümünün Genel Bir Değerlendirmesi," *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, vol. 2, no. 22, pp. 21-31, 2016.
- [49] A. F. Taggart, T. C. Taylor, and C. R. Ince, *Experiments with flotation reagents*. American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Incorporated, 1929.
- [50] S. Ammar, K. Ramesh, B. Vengadaesvaran, S. Ramesh, and A. K. Arof, "Amelioration of anticorrosion and hydrophobic properties of epoxy/PDMS composite coatings containing nano ZnO particles," *Progress in Organic Coatings*, vol. 92, pp. 54-65, 2016.
- [51] S. Ibrahim et al., "Synthesis of super-hydrophobic polymer nanocomposites as a smart self-cleaning coating films," *Polymer Composites*, vol. 38, pp. E147-E156, 2017.

- [52] J. H. Li, R. Weng, X. Q. Di, and Z. W. Yao, "Gradient and weather resistant hybrid super-hydrophobic coating based on fluorinated epoxy resin," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 131, no. 20, 2014.
- [53] P. N. Manoudis and I. Karapanagiotis, "Modification of the wettability of polymer surfaces using nanoparticles," *Progress in Organic Coatings*, vol. 77, no. 2, pp. 331-338, 2014.
- [54] R. J. Robert, G. Hikku, K. Jeyasubramanian, J. Jacobjose, and R. M. R. J. M. R. E. Prince, "ZnO nanoparticles impregnated polymer composite as superhydrophobic anti-corrosive coating for Aluminium-6061 alloy," vol. 6, no. 7, p. 075705, 2019.
- [55] G. Goncalves, P. A. Marques, R. J. Pinto, T. Trindade, and C. P. Neto, "Surface modification of cellulosic fibres for multi-purpose TiO₂ based nanocomposites," *Composites Science and Technology*, vol. 69, no. 7-8, pp. 1051-1056, 2009.
- [56] R. N. Darie et al., "Effect of nanoclay hydrophilicity on the poly (lactic acid)/clay nanocomposites properties," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 19, pp. 7877-7890, 2014.
- [57] L. Xu, Y. Shen, L. Wang, Y. Ding, and Z. Cai, "Preparation of vinyl silica-based organic/inorganic nanocomposites and superhydrophobic polyester surfaces from it," *Colloid and Polymer Science*, vol. 293, no. 8, pp. 2359-2371, 2015.
- [58] R. Rafiee, "Experimental and theoretical investigations on the failure of filament wound GRP pipes," *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 257-267, 2013.
- [59] R. Rafiee, "On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting-resin pipes: A review," *Composite Structures*, vol. 143, pp. 151-164, 2016.
- [60] J. d'Almeida, R. de Almeida, and W. De Lima, "Effect of water absorption of the mechanical behavior of fiberglass pipes used for offshore service waters," *Composite structures*, vol. 83, no. 2, pp. 221-225, 2008.
- [61] F. Abbas, E. S. Al-Ameen, and F. A. A. M. Mahmoud, "Effect of Adding Nano-Powder on Composite Pipes Behavior Subjected to Multi Stresses," *Journal of Engineering and Sustainable Development*, vol. 21, no. 04, 2017.
- [62] D. Del Ángel-López, A. M. Torres-Huerta, M. A. Dominguez-Crespo, and E. Onofre-Bustamante, "Effect of ZrO₂: SiO₂ dispersion on the thermal stability, mechanical properties and corrosion behavior of hybrid coatings deposited on carbon steel," *Journal of alloys compounds*, vol. 615, pp. S423-S432, 2014.

- [63] D-2240, Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness, ASTM, 2015.
- [64] G99 - 05 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM, 2010.
- [65] L. Esatoğlu, "Elyaf takviyeli pps kompozitlerinin sürtünme ve aşınma karakterizasyonu," Sakarya Üniversitesi, 2018.
- [66] D. A. Skoog, F. J. Holler, and S. R. Crouch, Principles of instrumental analysis. Cengage learning, 2017.
- [67] A. Nassar and E. Nassar, "Study on mechanical properties of epoxy polymer reinforced with NanoSiC particles," nanoscience and nanoengineering, vol. 1, no. 2, pp. 89-93, 2013.
- [68] A. S. Khalil, M. K. Jawad, A. M. Alsammarraie, and H. Jaafar, "Effect of SiO₂ Nanoparticles on Some Mechanical Properties of Epoxy/MWCNT Composites," Asian Journal of Chemistry, vol. 29, no. 3, p. 675, 2017.
- [69] H. K. Hameed and H. A. Rahman, "The effect of addition nano particle ZrO₂ on some properties of autoclave processed heat cure acrylic denture base material," Journal of baghdad college of dentistry, vol. 27, no. 1, pp. 32-39, 2015.
- [70] K. Friedrich, Z. Zhang, and A. K. Schlarb, "Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites," Composites science and technology, vol. 65, no. 15-16, pp. 2329-2343, 2005.
- [71] M. García, M. De Rooij, L. Winnubst, W. E. van Zyl, and H. Verweij, "Friction and wear studies on nylon-6/SiO₂ nanocomposites," Journal of applied polymer science, vol. 92, no. 3, pp. 1855-1862, 2004.
- [72] S. Gnedenkov, S. Sinebryukhov, D. Mashtalyar, I. Imshinetskiy, A. Samokhin, and Y. V. Tsvetkov, "Fabrication of coatings on the surface of magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation using ZrO₂ and SiO₂ nanoparticles," Journal of Nanomaterials, vol. 2015, 2015.
- [73] Q. Wang, Q. Xue, and W. Shen, "The friction and wear properties of nanometre SiO₂ filled polyetheretherketone," Tribology International, vol. 30, no. 3, pp. 193-197, 1997.
- [74] Q. Wang, Q. Xue, W. Shen, and J. Zhang, "The friction and wear properties of nanometer ZrO₂-filled polyetheretherketone," Journal of applied polymer science, vol. 69, no. 1, pp. 135-141, 1998.

- [75] P. Jawahar, R. Gnanamoorthy, and Balasubramanian, "Tribological behaviour of clay–thermoset polyester nanocomposites," *Journal of Wear*, vol. 261, no. 7-8, pp. 835-840, 2006.
- [76] K. Friedrich, R. Reinicke, and Z. Zhang, "Wear of polymer composites," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 216, no. 6, pp. 415-426, 2002.
- [77] D. Hazarika and N. Karak, "Environmentally Benign Hydrophobic Hyperbranched Waterborne Polyester/SiO₂–Carbon Dot Nanocomposite as an Efficient Photocatalyst and White-Light Emitter," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 58, no. 51, pp. 23068-23082, 2019.
- [78] S. Laurén, "OWRK method – Owens, Wendt, Rabel and Kaelble model," ed, 2020.
- [79] X. Chen, B. You, S. Zhou, and L. Wu, "Surface and interface characterization of polyester-based polyurethane/nano-silica composites," *Surface Interface Analysis: An International Journal devoted to the development application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces thin films*, vol. 35, no. 4, pp. 369-374, 2003.
- [80] A. Ranowsky, "Contact Angle and Surface Tension - A Fascinating Liaison," ed: CSC Scientific Company Inc., 2016.
- [81] M. Aycicek, S. C. Okumus, and A. Akinci, "Production of PTFE Powder Reinforced Polyester Composite Material and Investigation of the Contact Angle and Surface Energy," presented at the International Materials Technologies and Metallurgy Conference, 2019.
- [82] T. Kasai, B. Bhushan, G. Kulik, L. Barbieri, and P. Hoffmann, "Micro/nanotribological study of perfluorosilane SAMs for antistiction and low wear," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 23, no. 3, pp. 995-1003, 2005.
- [83] Y. Kang, X. Chen, S. Song, L. Yu, and P. Zhang, "Friction and wear behavior of nanosilica-filled epoxy resin composite coatings," *Applied Surface Science*, vol. 258, no. 17, pp. 6384-6390, 2012.
- [84] M. Anggaravidya, E. Budianto, and I. Gunawan, "Synthesis and characterization of polyester-based nanocomposite," *Procedia chemistry*, vol. 4, pp. 107-113, 2012.
- [85] R. Khankruea, S. Pivsa-Art, H. Hiroyuki, and S. Suttiruengwong, "Thermal and mechanical properties of biodegradable polyester/silica nanocomposites," *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 705-713, 2013.

- [86] M. Bastiurea, M. Rodeanu, D. Dima, M. Murarescu, and G. Andrei, "Thermal and Mechanical Properties of Polyester Composites with Graphene Oxide and Graphite," *Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures (DJNB)*, vol. 10, no. 2, 2015.
- [87] F. S. da Luz, V. S. Candido, A. C. R. Da Silva, and S. N. Monteiro, "Thermal behavior of polyester composites reinforced with green sugarcane bagasse fiber," *JOM*, vol. 70, no. 10, pp. 1965-1971, 2018.
- [88] A. H. Farha, A. F. Al Naim, and S. A. Mansour, "Thermal Degradation of Polystyrene (PS) Nanocomposites Loaded with Sol Gel-Synthesized ZnO Nanorods," *Polymers*, vol. 12, no. 9, p. 1935, 2020.
- [89] S. Halder, M. Goyat, and P. Ghosh, "Morphological, structural, and thermophysical properties of zirconium dioxide–epoxy nanocomposites," *High Performance Polymers*, vol. 28, no. 6, pp. 697-708, 2016.
- [90] S. Joana et al., "Effects of Amorphous Silica Nanopowders on the Avoidance Behavior of Five Soil Species—A Screening Study," *Journal of Nanomaterials*, vol. 10, p. 402, 2020.
- [91] C. M. Danushika, M. S. Rohini, and N. S. K. M., "Double layer approach to create durable superhydrophobicity on cotton fabric using nano silica and auxiliary non fluorinated materials," *Applied Surface Science*, vol. 360, pp. 777-778, 2016.
- [92] M. Asmaa, K. Mariam, E. H. Adnane, K. Mohammed, H. Mohammed, and A. Said, "The Synthesis and Characterization of Low-cost Mesoporous Silica SiO₂ from Local Pumice Rock," *Nanomaterials and Nanotechnology*, vol. 5, p. 35, 2015.
- [93] D. Amrishraj and T. Senthilvelan, "Dry Sliding wear behavior of ABS Composites reinforced with nano Zirconia and PTFE," *Materials Today: Proceedings* vol. 5, pp. 7068-7077, 2018.
- [94] A. William Wilson, O.-B. O. Samuel, K. S. Sudheesh, A. Eric Selorm, and G. Poomani Penny, "Cobalt doped ZrO₂ decorated multiwalled carbon nanotube: A promising nanocatalyst for photodegradation of indigo carmine and eosin Y dyes," *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 26, pp. 354-361, 2016.
- [95] A. Behbahani, S. Rowshanzamir, and A. Esmaeilifar, "Hydrothermal synthesis of zirconia nanoparticles from commercial zirconia," *Procedia Engineering*, vol. 42, pp. 908-917, 2012.
- [96] Z. Zhang and K. Friedrich, "Tribological characteristics of micro- and nanoparticle filled polymer composites," in *Polymer composites*: Springer, 2005, pp. 169-185.

- [97] A. A. Aly, E.-S. B. Zeidan, A. A. Alshennawy, A. A. El-Masry, and W. A. Wasel, "Friction and wear of polymer composites filled by nano-particles: a review," *World Journal of Nano Science Engineering*, vol. 2, no. 01, p. 32, 2012.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : MUHAMMET AYÇİÇEK

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2021
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2017
Lise	Necip Fazıl Kısakürek Lisesi	2012

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2020-Halen	Millî Savunma Bakanlığı	Metalurji Mühendisi
2019-2021	TÜBİTAK/Toyota Boshoku Türkiye	Proje Bursiyeri

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. Termoplastik iç trim parçalarında köpüklendirici katkı malzemeleri kullanılarak yeni formül geliştirilmesi, parça ağırlığı ile enjeksiyon çevrim süresinin azaltılması ve parça yüzeyi iyileştirilmesi, 5190030 / TÜBİTAK 1505 Üniversite – Sanayi İşbirliği Projesi – Proje tamamlandı 31/05/2021.
2. Cakir S., Aycicek M., Ozsoy N., Ozsoy M., Usta M., Akinci A., “Using Foamed Polypropylene to Reduce Weight and Injection Molding Cycle Time in Toyota C-

HR SUV Door Panel Production”, El-Cezerî Journal of Science and Engineering, Vol. 8(2), 800-808, DOI: 10.31202/ecjse.893850, 2021.

3. Aycicek M., Cakir S., Yuksel G., Akinci A., “Development of Surface Features by Adding Nanoparticles in Isophthalic Polyester Resin”, 7th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering – ICCESSEN, Turkey, 2020.
4. Aycicek M., Akinci A., Okumus S.C., “Production of PTFE Powder Reinforced Polyester Composite Material and Investigation of The Contact Angle and Surface Energy”, International Materials Technologies and Metallurgy Conference, Istanbul Technical University, Turkey, 2019.
5. Aycicek M., Cakir S., Akinci A., “Prepare Foam with Injection Molding Method in Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Matrix Using Chemical Foam Agent”, Materials Science: Advanced Composite Materials, Vol. 2(4), DOI: 10.18063/msacm.v2il4.917, 2018. 2018.
6. Cakir S., Aycicek M., Akinci A., “The Effect of Foaming Agent on Mechanical and Physical Properties of Polypropylene”, Materials Science: Advanced Composite Materials, Vol. 2(2), ISSN: 2529-7783, DOI:10.18063/msacm.v2il1.693, 2018.
7. Cakir S., Aycicek M., Akinci A., “Investigation of The Mechanical and Physical Properties of PLA Produced By Injection Molding for Matrix Material of Polymer Composites”, Materials Science: Advanced Composite Materials, Vol. 2(1), ISSN: 2529-7783, DOI: 10.18063/msacm.v2il.607, 2018.