DÜZCE ÜNİVERSİTESİ | LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TERMOPLASTİK KAUÇUK İLE TOKLAŞTIRILAN MİNERAL VE ELYAF KATKILI POLİAMİD KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İRFAN AKGÜL

DOKTORA TEZİ
KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. SERKAN APAY

DÜZCE, 2025

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TERMOPLASTİK KAUÇUK İLE TOKLAŞTIRILAN MİNERAL VE ELYAF KATKILI POLİAMİD KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İRFAN AKGÜL tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Serkan APAY

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Serkan APAY
Düzce Üniversitesi _____

Prof. Dr. İlyas UYGUR
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Nuri ŞEN
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Volkan ONAR
Pamukkale Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÖZEN
Batman Üniversitesi _____

Tez Savunma Tarihi: 24/01/2025

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

24 Ocak 2025

İrfan AKGÜL

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Serkan APAY'a ve deneysel çalışmalar boyunca desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

24 Ocak 2025 **İrfan AKGÜL**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ xi
ÇİZELGE LİSTESİ xv
KISALTMALAR xvi
SİMGELER xvii
ÖZET xviii
ABSTRACT xix
EXTENDED ABSTRACT xx
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR 4
2.1. POLİAMİT İKİLİ KOMPOZİTLER 4
2.1.1. **Poliamid Cam Bilye Kompozitleri** 4
2.1.2. **Poliamit EPDM Kompozitleri** 10
2.1.3. **Poliamit EPDM Cam Bilye Kompozitleri** 12
3. POLİAMİDLER 15
3.1. POLİAMİDLER HAKKINDA GENEL BİLGİ 15
3.1.1. **Poliamidlerin Tanımı ve Sınıflandırılması** 16
3.1.2. **Polyamidin Keşfi ve Tarihsel Süreci** 17
3.1.3. **Poliamidlerin Kimyasal Yapısı ve Özellikleri** 19
3.1.4. **Poliamidlerin Moleküler Yapısı** 20
3.1.5. **Poliamidlerin Sentezlenmesi** 21
3.1.6. **Polikondenzasyon Reaksiyonları** 23
3.1.7. **Poliamidlerin Uygulama Alanları** 23
3.1.8. **Poliamid Teknolojisindeki Gelişmeler ve Yenilikler** 28
3.1.9. **Poliamidlerde Nanoteknoloji** 29
3.1.10. **Poliamidlerin Çevresel Etkisi ve Sürdürülebilirliği** 29
3.1.11. **Geri Dönüşüm ve Yenilenebilirlik** 31
3.1.12. **Poliamid Araştırmalarında Gelecek Beklentileri ve Ortaya Çıkan Eğilimler** 32
3.1.13. **Biyobozunur Poliamidler** 33
3.2. TERMOPLASTİK ELASTOMERLER 34
3.3. KAUÇUKLAR 35
3.3.1. **Doğal Kauçuk** 35
3.3.2. **Polibütadien Kauçuk** 35
3.3.3. **Stiren Bütadien Kauçuğu (SBR)** 35
3.3.4. **Akrilonitril Bütadien Kauçuk (NBR)** 36
3.3.5. **Kloropren Kauçuk (CR)** 36
3.3.6. **Etilen-propilen-dien Kauçuğu (EPDM)** 36
3.4. ÇİFT VİDALI EKSTRÜDERLER KULLANILARAK KATKILI POLİAMİD ÜRETİM SÜREÇLERİ 37

3.4.1. **Çift Vidalı Ekstrüzyon Prensipleri** **39**
3.4.2. **Çift Vidalı Ekstrüzyon Kullanım Alanları ve Uygulamaları** **40**
3.4.3. **Poliamid Üretiminde Katkı Maddeleri** **41**
3.4.4. **İşlevleri ve Faydaları** **42**
3.5. MEKANİK ÖZELLİKLERE GENEL BAKIŞ **42**
3.5.1. **Çekme Dayanımı** **45**
3.5.2. **Kopma Uzaması** **46**
3.5.3. **Eğilme Dayanımı ve Modülü** **47**
3.5.4. **Darbe Dayanımı** **48**
3.5.4.1. Charpy Darbe Testi *49*
3.5.4.2. Izod darbe testi *50*
3.5.5. **Sertlik** **51**
3.5.5.1. Shore Sertlik *53*
3.5.5.2. Rockwell sertlik *55*
3.5.6. **Sürünme ve Yorgunluk Davranışı** **56**
3.6. TERMAL ÖZELLİKLER **56**
3.6.1. **Erime Noktası** **58**
3.6.2. **Camsı Geçiş Sıcaklığı** **59**
3.7. KİMYASAL DİRENÇ **60**
3.7.1. **Asitler ve Bazlar** **61**
3.7.2. **Çözücüler** **62**
3.7.3. **Diğer Polimerlerle Karşılaştırma** **63**
3.8. TRİBOLOJİK ÖZELLİKLER **64**
3.9. ÇEVRESEL DAYANIM ÖZELLİĞİ **64**
3.10. PLASTİK MALZEMELERİN AŞINMA DAVRANIŞI **65**
3.10.1. **Aşındırıcı Aşınma Teorisi** **65**
3.10.2. **Yorulma Aşınma Teorisi** **65**
3.10.3. **Yüzeyler arası aşınma** **66**
3.10.4. **Yapışkan Aşınma** **66**

4. MATERYAL VE YÖNTEM **67**

4.1. DENEY MALZEMELERİ **67**
4.2. ÇEKME DAYANIMI **68**
4.3. DARBE TESTLERİ **71**
4.4. SERTLİK TESTLERİ **72**
4.5. AŞINMA TESTİ **73**
4.6. YÜZEY GÖRÜNTÜLEME **76**

5. BULGULAR VE TARTIŞMA **77**

5.1. ÇEKME TESTLERİ **77**
5.1.1. **PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Çekme Testi Sonuçlarının İncelenmesi** **77**
5.1.2. **PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Çekme Testi Sonuçlarının İncelenmesi** **79**
5.1.3. **PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Çekme Testi Sonuçlarının İncelenmesi** **81**
5.1.4. **Çekme Testi Kırık Yüzey İncelemeleri** **83**
5.2. DARBE TESTLERİ **87**
5.2.1. **PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Darbe Testi Sonuçlarının İncelenmesi** **87**
5.2.2. **PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Darbe Testi**

Sonuçlarının İncelenmesi **87**
5.2.3. **PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Darbe Testi Sonuçlarının İncelenmesi** **88**
5.2.4. **Darbe Deneyi Kırık Yüzey Görüntüleri** **89**
5.3. SERTLİK TESTLERİ **91**
5.3.1. **PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sertlik Testi Sonuçlarının İncelenmesi** **91**
5.3.2. **PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sertlik Testi Sonuçlarının İncelenmesi** **92**
5.3.3. **PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sertlik Testi Sonuçlarının İncelenmesi** **93**
5.4. AŞINMA DENEYİ **94**
5.4.1. **PA ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Özeliklerinin İncelenmesi** **94**
5.4.1.1. PA ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sürtünme Katsayısı ile Kayma Yolu İlişkileri *94*
5.4.1.2. PA6 ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkileri *96*
5.4.1.3. PA6 ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Yüzey Görüntüleri *97*
5.4.1.4. Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama *101*
5.4.1.5. PA ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları *101*
5.4.2. **PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Özeliklerinin İncelenmesi** **104**
5.4.2.1. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sürtünme Katsayısı ile Kayma Yolu İlişkileri *104*
5.4.2.2. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkileri *106*
5.4.2.3. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Yüzey Görüntüleri *107*
5.4.2.4. Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama *111*
5.4.2.5. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları *111*
5.4.3. **PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Özeliklerinin İncelenmesi** **115**
5.4.3.1. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sürtünme Katsayısı ile Kayma Yolu İlişkileri *115*
5.4.3.2. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkileri *117*
5.4.3.3. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Yüzey Görüntüleri *118*
5.4.3.4. Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama *122*
5.4.3.5. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları *122*
5.4.4. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Özeliklerinin İncelenmesi **126**
5.4.4.1. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sürtünme Katsayısı ile Kayma Yolu İlişkileri *126*
5.4.4.2. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkileri *128*
5.4.4.3. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Yüzey Görüntüleri *129*
5.4.4.4. Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama *133*
5.4.4.5. PA6-16EPDM-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları *133*
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **140**
7. KAYNAKLAR **142**
ÖZGEÇMİŞ **154**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1 PA Polimerinin Kimyasal Yapısı[7]. ... 20
Şekil 3.2 Poliamid Türlerinin Kimyasal Bağ Yapısı[8]. ... 21
Şekil 3.3 Poliamidlerin Hava Yastıklarında kullanımı[8]. ... 25
Şekil 3.4 Mekanik Geri Dönüşüm Aşamaları[9]. ... 31
Şekil 3.5. Ekstrüder çalışma sisteminin şematik görünümü. ... 40
Şekil 4.1. Çekme testi örnek grafiği. ... 69
Şekil 4.2. ISO 527 Numune teknik resmi. ... 69
Şekil 4.3. Besmak marka üniversal çekme cihazı. ... 71
Şekil 4.4. Charpy darbe deney cihazı. ... 71
Şekil 4.5. Charpy darbe deney numunesi ve V çentik teknik resimleri [67] ... 72
Şekil 4.6. Shore D sertlik cihazı. ... 72
Şekil 4.7. Shore D batıcı uç teknik resmi [100]. ... 73
Şekil 4.8. Aşınma deneyi cihazı. ... 75
Şekil 4.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM). ... 76
Şekil 5.1. PA-6-8EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değişim grafiği. ... 77
Şekil 5.2. PA-6-8EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin elastisite modülünün cam bilye oranına göre değişimi. ... 78
Şekil 5.3. PA-6-8EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin kopma uzaması cam bilye oranına göre değişmektedir. ... 79
Şekil 5.4. PA-6-12EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değişim grafiği. ... 80
Şekil 5.5. PA-6-12EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin elastisite modülünün cam bilye oranına göre değişimi. ... 80
Şekil 5.6. PA6-12EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin kopma uzaması cam bilye oranına göre değişmektedir. ... 81
Şekil 5.7. PA6-16EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değişim grafiği. ... 82
Şekil 5.8. PA6-16EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin elastisite modülünün cam bilye oranına göre değişimi. ... 82
Şekil 5.9. PA6-16EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin kopma uzaması cam bilye oranına göre değişmektedir. ... 83
Şekil 5.10. %0 %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompozitlerin çekme testine tabi tutulan numunelerinin kırılma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri. ... 84
Şekil 5.11. %0 %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-12EPDM kompozitlerin çekme testine tabi tutulan numunelerinin kırılma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri. ... 84
Şekil 5.12. %0 %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-16EPDM kompozitlerin çekme testine tabi tutulan numunelerinin kırılma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri. ... 85
Şekil 5.13. PA6-8EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin Darbe dayanımı değişim grafiği. ... 87
Şekil 5.14. PA6-12EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin darbe dayanımı değişim grafiği. ... 88

Şekil 5.15. PA6-16EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin Darbe dayanımı değişim grafiği. 89
Şekil 5.16. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 polimerinin darbe deneyine tabi tutulan numunelerinin kırık yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. 90
Şekil 5.17. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompozitin darbe deneyine tabi tutulan numunelerinin kırık yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. 91
Şekil 5.18. PA6-8EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin sertliğinin cam bilye oranına göre değişimi. 92
Şekil 5.19. PA6-12EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin sertliğinin cam bilye oranına göre değişimi. 93
Şekil 5.20. PA6-16EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin sertliğinin cam bilye oranına göre değişimi. 94
Şekil 5.21. PA ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayıs-kayma yolu grafiği 95
Şekil 5.22. PA ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği 96
Şekil 5.23. PA ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkisi Grafiği 97
Şekil 5.24. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri. 98
Şekil 5.25. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik mikroskobu görüntüleri. 99
Şekil 5.26. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik profilometre görüntüleri. 100
Şekil 5.27. PA ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama 101
Şekil 5.28. PA ve %10 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 102
Şekil 5.29. PA ve %15 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 103
Şekil 5.30. PA ve %20 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 104
Şekil 5.31. PA6-8EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayıs-kayma yolu grafiği 105
Şekil 5.32. PA6-8EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği 106
Şekil 5.33. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkisi Grafiği 107
Şekil 5.34. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri. 108
Şekil 5.35. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik mikroskobu görüntüleri. 109
Şekil 5.36. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompozitlerin

aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik profilometre görüntüleri. 110
Şekil 5.37. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama 111
Şekil 5.38. PA6-8EPDM ve %5 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 112
Şekil 5.39. PA6-8EPDM ve %10 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 113
Şekil 5.40. PA6-8EPDM ve %15 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 114
Şekil 5.41. PA6-8EPDM ve %20 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 115
Şekil 5.42. PA6-12EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayıs-kayma yolu grafiği 116
Şekil 5.43. PA6-12EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği 117
Şekil 5.44. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkisi Grafiği 118
Şekil 5.45. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri. 119
Şekil 5.46. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik mikroskobu görüntüleri. 120
Şekil 5.47. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik profilometre görüntüleri. 121
Şekil 5.48. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama 122
Şekil 5.49. PA6-12EPDM ve %5 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 123
Şekil 5.50. PA6-12EPDM ve %10 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 124
Şekil 5.51. PA6-12EPDM ve %15 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 125
Şekil 5.52. PA6-12EPDM ve %20 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 126
Şekil 5.53. PA6-16EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayıs-kayma yolu grafiği 127
Şekil 5.54. PA6-16EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği 128
Şekil 5.55. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkisi Grafiği 129
Şekil 5.56. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri. 130
Şekil 5.57. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik mikroskobu görüntüleri. 131
Şekil 5.58. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-16EPDM kompozitlerin

aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik profilometre görüntüleri. 132
Şekil 5.59. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama 133
Şekil 5.60. PA6-16EPDM ve %5 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 134
Şekil 5.61. PA6-16EPDM ve %10 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 135
Şekil 5.62. PA6-16EPDM ve %15 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 136
Şekil 5.63. PA6-16EPDM ve %20 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları 137
Şekil 5.64. %5 ağırlıkça (sol) ve %20 ağırlıkça (sağ) Cam Bilye kullanıldığında film oluşumunun şeması ve önerilen mekanizması[112]..... 138

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Poliamidin genel özellikleri. 44
Çizelge 4.1. Deney numuneleri ve oranları. 68
Çizelge 4.2. ISO 527 Test numune ölçüleri. 70
Çizelge 4.3. Karşı disk kimyasal bileşimi 74

KISALTMALAR

PA	Poliamid
EPDM	Akrilonitril/bütadien/stiren
GB	Glass Bead/Cam Bilye
UV	Ultraviole Işın
PTFE	Poli tetrafloretilen
GFR	Cam Bilye Katkılı
PVC	Poli vinil klorür
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
EDS	Kimyasal bileşim analizi
PP	Poli propilen
D	Çap
PET	Poli etilen tereftalat
E’	Elastikiyet Modülü
SiO_2	Silisyumdioksit
rbc	Pirinç kepeği sermaiği
mm	milimetre
μm	mikrometre
°C	Santigrat Derece
DMTA	Dinamik Mekanik Termal Analiz
S/B	Stiren/bütadien
CA	Selüloz asetat
CN	Selüloz nitrat
CP	Selüloz propiyonat
TBF	Tribütil fosfat
$CaCO_3$	Stiren/bütadien
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
TGA	Termogravimetrik Analiz
tg	Termogravimetri
tm	Ergime Sıcaklığı
PAE	Poliamid Epiklorohidrin Reçine
SEBS	Stiren Etilen Bütilen Stiren
TPE	Termoplastik Elastomer
PE	Polietilen
PVC	Polivinil klorür
NR	Doğal Kauçuk
SBR	Stiren Butadien Kauçuk
HDT	Isılı sapma Sıcaklığı

SİMGELER

G	İletkenlik
P	Güç (elektrik akımı için)
S	Siemens
σ	Öz İletkenlik
Ω	Ohm
	Açı (düzlemde)
	Açı (uzay)
rad	Radyan
	Derece
	Dakika
*	Saniye
sr	Steradyan
L	Uzunluk
b	Genişlik
h	Yükseklik
d,s	Kalınlık
D	Çap
r	Yarıçap
d,r	Uzaklık
p	Eğrilik yarıçapı
	Eğrilik
m	Metre
A,S	Alan
V	Hacim
nm	Nanometre
mm	milimetre
μm	mikrometre

ÖZET

TERMOPLASTİK KAUÇUK İLE TOKLAŞTIRILAN MİNERAL VE ELYAF KATKILI POLİAMİD KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İrfan AKGÜL

Düzce Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı
Doktora Tezi
Danışman: Doç. Dr. Serkan APAY

Ocak 2025, 153 sayfa

Özellikle EPDM ve cam bilyeler gibi termoplastik elastomerlerle güçlendirilmiş kompozit malzemelerin incelenmesi, çeşitli endüstriyel uygulamalar için gerekli olan darbe dayanımı ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesine ve geliştirilmesine yönelik fayda sağladığından çok önemlidir. Bu tez çalışmasının amacı, termoplastik elastomer katkısının (EPDM) cam bilye dolgulu naylon bazlı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktır. Kompozit malzemeler, naylon-6 mühendislik polimerlerine dolgu maddesi olarak cam bilyelar (ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20) ve sabit oranda (ağırlıkça %8-12-16) EPDM termoplastik elastomer eklenerek üretilmiştir. Granül formdaki kompozit malzemelerin üretimi endüstriyel bir çift vidalı ekstrüderde gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri, bir enjeksiyon kalıplama makinesi kullanılarak standartlara göre hazırlanmış bir enjeksiyon kalıbında kalıplanmıştır. Deneysel çalışmalar çekme, darbe, sertlik testleri, sürtünme aşınma gibi fiziksel ve mekanik özellikleri içermektedir. Kompozitlerin aşınma ve kırılan yüzeyinin mikroyapısal özelliklerini ve kimyasal bileşimlerini belirlemek için taramalı elektron mikroskobu, yüzey topografyasını çıkarmak optik emisyon spektrometresi kullanılmıştır. Deneylerin sonuçları, kompozit malzemelerin çekme mukavemeti, çekme modülü, sertlik değerlerinin artan cam bilye dolum oranı ile arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, darbe dayanımı ve kopma uzaması değerleri artan cam bilye dolum oranı ile azalmıştır. Cam bilye dolgulu naylon-6 polimer kompozite EPDM elastomer ilavesi ile kompozit malzemelerin çekme dayanımı, çekme modülü, sertlik değerleri azalırken, darbe dayanımı ve kopma uzaması değerleri artmıştır. Aşınma deneylerinde ise PA6 polymerine EPDM ve cam bilye ilavesiyle sürtünme katsayısı değerleri belirgin olarak azalmış ve aşınma direnci artmıştır.

Anahtar Sözcükler: Polimer, Cam Bilye, Naylon, Kompozit, Elastomer.

ABSTRACT

THE EFFECT OF THERMOPLASTIC ELASTOMER ON THE MECHANICAL PERFORMANCE AND MICROSTRUCTURAL BEHAVIOUR OF GLASS BEAD FILLED NYLON COMPOSITE

İrfan AKGÜL
Düzce University
Graduate School, Department of Composite Material Technologies
Doctoral Thesis
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serkan APAY

January 2025, 153 pages

The study of composite materials, particularly those enhanced with thermoplastic elastomers like EPDM and glass beads, is crucial as it provides valuable insights into improving mechanical properties such as impact strength and wear resistance, which are essential for various industrial applications. The aim of this thesis study was to investigate the effect of thermoplastic elastomer additive (EPDM) on the mechanical properties of glass bead filled nylon-based composite materials. Composite materials were produced by adding glass beads (5, 10, 15 and 20 wt%) as fillers to nylon-6 engineering polymers and a fixed proportion (8-12-6 wt%) of EPDM thermoplastic elastomer. The production of composite materials in granular form was carried out in an industrial twin-screw extruder. The test specimens were moulded in an injection mould prepared according to standards using an injection moulding machine. Experimental studies included physical and mechanical properties such as tensile, impact and hardness tests. Scanning electron microscopy was utilized to ascertain the microstructural properties and chemical composition of the wear and fracture surface of the composites, while optical emission spectrometry was employed to extract the surface topography. The results of the experiments showed that the tensile strength, tensile modulus, hardness values of the composite materials increased with increasing glass bead filling ratio. However, impact strength and elongation at break values decreased with increasing glass bead filling ratio. With the addition of EPDM elastomer to the glass bead filled nylon polymer composite, the tensile strength, tensile modulus, hardness values of the composite materials decreased, while the impact strength and elongation at break values increased. In wear tests, friction coefficient values decreased significantly and wear resistance increased with the addition of EPDM and glass beads to PA6 polymer.

Keywords: Polymer, Glass beads, Nylon, Composite, Elastomer.

EXTENDED ABSTRACT

THE EFFECT OF THERMOPLASTIC ELASTOMER ON THE MECHANICAL PERFORMANCE AND MICROSTRUCTURAL BEHAVIOUR OF GLASS BEAD FILLED NYLON COMPOSITE

İrfan AKGÜL
Düzce University
Graduate School, Department of Composite Material Technologies
Doctoral Thesis
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serkan APAY

January 2025, 153 pages

1. INTRODUCTION

The lack of suitability of the additive-free form of polymers for the developing industry has led to the development of engineered polymer composite materials with additives. The addition of natural minerals and fibers to polymers results in improvements in the mechanical, physical, chemical and thermal properties of the material, as well as an expansion of its usage area. PA6 material is widely used in areas such as automotive, machinery and the chemical industry due to its mechanical and chemical properties. In addition to, PA6 plastics are widely used in electrical appliances, office equipment, and other fields, often used as mechanical parts and structural components.PA6 materials exhibit low resistance to scratching, low temperature impact and UV rays. The incorporation of glass fiber into the PA6 mixture results in the attainment of higher hardness, tensile strength, modulus of elasticity, bending strength and bending modulus. However, the impact strength and elongation at break are reduced by the addition of glass fibre to the PA6 material. EPDM material is characterized by low strength, low elasticity and high elongation at break. The addition of EPDM to PA6 material results in a reduction in tensile strength, modulus of elasticity, flexural strength and flexural modulus, while simultaneously improving elongation at break and impact strength. This study aimed to investigate the potential for improving impact resistance by adding EPDM to glass fiber-doped PA6 material, thereby mitigating the observed reduction in impact resistance against an increase in strength with glass ball. However, because the amount of inorganic filler added is small, the reinforcement ability is limited. In actual production and use, PA6 plastics used as piping, fans, gears, and other parts are particularly prone to damage

and wear due to continuous movement in contact with other objects during the processes of handling and transportation. This leads to high costs for machinery reform and maintenance. Therefore, it is particularly important to increase the wear resistance of PA6 plastics. The excellent wear resistance of rubber is achieved while balancing the mechanical properties such as impact strength at low temperatures, the relative elastic modulus of shear vibration, and the breaking elongation of the rubber material. EPDM is a type of ternary rubber that has excellent comprehensive properties. After compounding, its physical, mechanical, and processing performance can be greatly improved. The wear resistance of rubber-plastic modified materials has been enhanced compared to pure PA6 materials. These modification methods require changes to the structure and performance of the composites.

To improve the wear resistance of PA6, which is easily damaged and worn in later production and use processes, the research will focus on the relevant modification methods of EPDM rubber and the effects on the tribological properties and mechanisms of the rubber composites. The polyamide 6 matrix was selected as the PA6 resin, which was mixed with glass beads as the filling material and EPDM rubber. The glass beads, with a diameter of 10–30 μm, are discussed as the filling material due to their good wear resistance. To achieve optimal performance of wear-resistant glass beads reinforced polyamide/EPDM, orthogonal experiments are designed, and corresponding research on EPDM rubber is conducted. From the wear performance, the beneficial role of EPDM rubber in the composites is evident. Finally, the effect mechanism of glass beads reinforcement and modified EPDM rubber in PA6 composites will be discussed.

2. MATERIAL AND METHODS

In this study, PA6 polymer was employed as the matrix material, procured from Domopolymers in Belgium with the trade code Domamid. The PA6 polymer utilized in the study exhibited a density of 1.14 g/cm³. EPDM elastomer (Exxelor, Exxon Mobil) and glass bead additives (Microperl 1050-20-215, Sovitec) were incorporated. The glass bead and EPDM-enhanced PA6 composites were produced by twin-screw extrusion and injection moulding using a type NR-II-75 extruder (screw diameter: 75, L/D: 32). The temperature distribution between the charging funnel and the extrusion die was found to be between 180°C and 250°C during extrusion. Tensile and impact specimens were injection moulded following the drying of the extruded GB-EPDM-PA6 polymer granules in an oven at 80°C for 4 hours. The temperature distribution between the

charging funnel and the mould was selected to be between 220°C and 245°C for the injection process. Tensile tests were performed in accordance with ISO 527 standards at room temperature and a relative humidity of 50%, with a tensile speed of 50 mm/min. Impact tests were conducted on an TIME-XJJ50W impact machine in accordance with the ISO 179 standard. Hardness tests were carried out on the TIME-TH210 machine in accordance with the ISO 7619 standard. A scanning electron microscope (SEM) was used to obtain images of the samples, which were coated with a thin layer of gold and palladium prior to examination.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The tensile strength of the PA6-8/12/16EPDM polymer in situ increases in direct proportion with the addition of glass balls, reaching a maximum value of 51 MPa when 20% glass balls were added. It can be observed that the PA6 polymer and PA6-8/12/16EPDM composites demonstrate changes in tensile strength, elongation at break and modulus of elasticity in tensile. An in situ investigation of the modulus of elasticity values reveals that the incorporation of glass balls at a rate of 5-10-15-20% into the PA6-8/12/16EPDM polymer results in a notable increase in the modulus of elasticity, with the highest value observed at a 20% contribution. The introduction of rigid and robust additives into the polymer matrix facilitates the transfer of stress, while simultaneously, the 20% augmentation of these additives results in an elevated modulus of elasticity. graph of elongation at break, demonstrating that the amount of elongation decreased as the percentage of glass balls in the PA6-8/12/16EPDM polymer increased. Specifically, the elongation decreased from to of 5%, 10% , 15% and 20% at rates glass ball addition, respectively. The observed decline in the percentage elongation at break can be attributed to the additives effect on the macromolecular chain mobility, which subsequently increases the brittleness of the polymer composite. At a contribution of 20%, the lowest value was observed. It was proposed that glass fibre played a significant role in increasing the composite's strength. The fibre is evidently harder than the PA6 polymer. The creation of a conducive interface between the fibre and the matrix allows for effective stress transfer when a load is applied, thereby enhancing the mechanical properties. In a distinct study, it was shown that the quantity of glass balls could be increased, and that strong or robust bonding could be ensured between the polymer matrix and the additive. Both of these factors resulted in a rise in the tensile strength values of the composite. Presents the Charpy impact strength values of PA6-8/12/16EPDM, with composites comprising 5%,

10%, 15% and 20% glass bead filler ratio. It can be observed from the figure that the addition of glass ball additives to the PA6-8/12/16EPDM polymer composite resulted in a decrease in the impact strength. The observed reduction in impact strength upon the addition of glass balls can be attributed to the limitation of polymer deformation, which restricts the movement of polymer chains, thereby rendering the material less resilient to deformation. The aggregation of particles within the polymer structure creates stress fields that act as microcrack initiators, facilitating crack propagation towards the weak interfacial regions upon the application of force. Scanning electron microscope (SEM) imagery capturing the fracture surface of samples subjected to tensile testing on both PA6-8/12/16EPDM composite polymer and 5%, 10%, 15% and 20% glass bead-filled PA6-8/12/16EPDM composite polymer. Figure 5 presents the microstructure of the PA6-8/12/16EPDM composite polymer, which exhibits a ductile structure, indicating plastic deformation. Nevertheless, an increase in the glass bead filler ratio was accompanied by embrittlement, accompanied by a reduction in plastic deformation. The hardness of the PA6-8/12/16EPDM polymer in situ increases in direct proportion with the addition of glass balls, reaching a maximum value of 65 when 20% glass balls were added.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

The incorporation of glass beads into PA6-8/12/16EPDM composites resulted in enhanced tensile strength. This increase was observed to be directly proportional to the glass bead ratio, with values observed to be 6.25%, 18.75%, 34.4%, and 59,3% for the ratios of 5%, 10%, 15%, and 20%, respectively. The data indicates a decreasing trend in percentage elongation at break with an increase in the glass bead filler ratio. Corresponding values for the glass bead ratios of 5%, 10%, 15% and 20% are 67.9%, 72.1%, 76.7% and 81.25%, respectively. The incorporation of glass bead filler at concentrations of 5%, 10%, 15% and 20% led to a notable decline in the V-notched Charpy impact strength of the composite. The reduction rate was approximately 8.6%, 19.4%, 41.9% and 61.55%, respectively. A positive correlation was observed between the hardness of PA6-8/12/16EPDM -based composites and the glass bead filler ratio. An increase in the hardness was observed for glass bead ratios of 5%, 10%, 15%, and 20% with values of 1.3%, 1.9%, 3.73%, and 5.69%, respectively. A comparison of the SEM images of samples with and without EPDM addition reveals that the fracture surfaces of the PA6 polymer with the EPDM exhibit a very ductile appearance, whereas the surfaces of those samples with the glass beads show a more brittle and fragile nature.

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, ana grup malzemelerin dezavantajlı özelliklerini geliştirmek istenildiğinde tercih edilen karma malzeme gruplarıdır. Farklı imalat yöntemleriyle (Döküm, Toz metalürjisi, enjeksiyon, ekstruzyon vb) üretilebilen kompozit malzemeler, matris (ana malzeme) ve katkı maddelerinden oluşmaktadır. Genelde asıl, sünek ve düşük dayanımlı matris içerisine sert, gevrek dayanımı yüksek katkı malzemeleri belirli oran ve büyüklüklerde ilave edilerek arzu edilen özellikler ayarlanabilmektedir. Katkı elemanları, parçacık, kırpıntı fiber (whisker), sürekli fiber şeklinde olmaktadır. Metal esaslı, polimer esaslı ve seramik esaslı olan türleri bulunmaktadır. Kompozit malzemeler, özellikle, ev eşyaları, uzay, havacılık, taşıma, elektronik gibi birçok alanda çok yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Matris malzeme içerisine katılan katkı miktarının türü, büyüklüğü, miktarı, dağılımı ve şekli üretilecek olan kompozit malzemenin hemen hemen tüm özelliklerini etkilemektedir. Örneğin, Aluminyum esaslı kompozit malzeme içerisine ilave edilen SiC parçacıklarının oranı, büyüklükleri, dağılımları ve imal usulleri kompozit malzemenin yorulma, çekme, sertlik, yoğunluk, ergime sıcaklığı, elastik modül gibi bir çok özellikleri direkt olarak etkilemiştir. Genelde artan katkı miktarı ve küçük parçacık boyutları yorulma dayanımlarını ve çekme dayanımını artırırken, tokluk değerlerinin kısmen düşmesine sebep olmuştur [1]-[6].

Polimerlerin katkısız hali gelişen sanayinin ihtiyaçlarını karşılayamadığından, katkı maddeleri ile geliştirilen mühendislik ürünü polimer kompozit malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Polimerlere eklenen doğal mineraller ve elyaflar gibi katkı maddeleri ile malzemenin mekanik, fiziksel, kimyasal ve termal özelliklerinde çeşitli iyileştirmeler yapılmakta ve kullanım alanı genişletilmektedir [1]. Poliamidler, yüksek performans özellikleriyle ünlüdür ve özellikle otomotiv endüstrisinde olmak üzere çeşitli uygulamalar için idealdir. Dişliler, yataklar, emniyet mekanizmaları, aydınlatma armatürleri, kaput altı bileşenler, hava kanalları, konnektörler, filtreler, motor yağı kapları, dikiz aynaları ve çeşitli elektronik parçalar gibi kritik otomotiv bileşenlerinin ayrılmaz bir parçasıdırlar. Otomotiv kullanımlarının ötesinde, poliamidler kablolar, tekstiller, tüketici ürünleri ve spor ekipmanları dahil olmak üzere bir dizi başka sektörde de hizmet vermektedir. Yüksek kimyasal dayanım, mekanik mukavemetleri, tribolojik

performansları ve termal kararlılıkları, bu uygulamalardaki uyarlana bilirliklerine katkıda bulunur [4]. Bu avantajlara rağmen, belirli uygulamaların özel talepleri araştırmacıları poliamidlerde yenilikçi modifikasyonları araştırmaya yöneltmiştir. Çalışmalar, cam bilyeler ve tozlar gibi çeşitli katkı maddelerinin yanı sıra silisyum karbür, alümina veya silisyum gibi malzemelerden yapılmış diskler, bilyeler ve elyaflardan oluşan takviyeleri dâhil etmeye odaklanmıştır. Bu geliştirmeler, hedeflenen kullanımlarda poliamid performansını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Ek olarak, çevre dostu uygulamalara artan bir vurgu vardır ve bu da verimli bir şekilde geri dönüştürülebilen yağlayıcı içermeyen maddelerin kullanımını teşvik eder. Cam elyafı ve diğer sürdürülebilir katkı maddeleri gibi çevre dostu malzemeler giderek daha popüler seçenekler haline gelmektedir [5].

PA6 malzemelerin çizilmeye, düşük sıcaklıkta darbeye ve UV ışınlarına karşı direnci düşüktür. Cam elyaf malzeme sert ve güçlü olduğu için PA6 ile karışımında daha yüksek sertlik, çekme dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı, eğilme modülü elde edilir. PA6 malzemeye eklenen cam elyaf darbe dayanımını ve kopma uzamasını azaltır.

Özellikle cam bilyeler veya elyaflarla doldurulmuş poliamid kompozitlerin mekanik özelliklerini derinlemesine incelemeyi amaçlayan birçok araştırmacının ilgisini ve dikkatini çekmiştir. Çeşitli yöntemlerin uygulanmasıyla araştırmacılar, camın kısa elyaflar veya sürekli elyaflar şeklinde dâhil edilmesinin, hem poliamidin hem de polimerlere dayalı diğer kompozit malzemelerin hem mukavemetini hem de sertliğini önemli ölçüde artırabileceğini gösteren bir dizi sonuç elde etmişlerdir. Camın bir polimer matris içinde bir bilye veya elyaf dolgusu olarak kullanılması, yalnızca ortaya çıkan kompozitlerin sertliğinde bir artışa katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda zaman içinde boyutsal kararlılıklarını iyileştirmede de önemli bir rol oynar ve bu durum malzeme biliminde devam eden ve gelecekteki çalışmalar için hayati bir öneme sahiptir [7].

EPDM malzeme düşük mukavemet, düşük elastikiyet ancak yüksek kopma uzamasına sahiptir. PA6 malzemeye eklenen EPDM çekme mukavemetini, elastisite modülünü, eğilme mukavemetini, eğilme modülünü azaltırken kopma uzamasını ve darbe mukavemetini artırır. EPDM kauçuğunu çeşitli polimerik malzemeler için tercih edilen katkı haline getirerek, farklı endüstrilerdeki çok sayıda uygulamada performanslarını ve uzun ömürlerini iyileştirir [6]. Çoğunlukla çeşitli başka katkılar kullanılarak doldurulan veya sertleştirilen poliamid kompozitlerin çeşitli özelliklerini kapsamlı bir şekilde

incelemek ve analiz etmek için bu alanda çok sayıda araştırma çalışması yürütülmüştür. Bununla birlikte, poliamid (PA) matrisi içinde dağılmış EPDM kauçuğu ile birlikte cam bilyeler formundaki katkı maddelerinin akademik literatürde kapsamlı bir araştırma veya ilgi görmemiş olması dikkat çekicidir. Ek olarak, bu belirli kompozitlerin mekanik, tribolojik ve termal özelliklerinin eş zamanlı incelenmesine odaklanan yalnızca sınırlı sayıda çalışma yayınlanmıştır.

Bu kapsamlı çalışmanın temel amacı, enjeksiyon kalıplı cam bilye ve EPDM katkılı poliamid kompozitlerle ilişkili mekanik, tribolojik ve termal özellikleri kapsamlı bir şekilde araştırmak ve analiz etmektir. Bu kompozitler, genel performans özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan bir işlem olan etilen-propilen-dien monomer kauçuğu kullanılarak etkili bir şekilde oluşturulmuştur. Hem sertleştirilmiş hem de sertleştirilmemiş kompozitler, ilgili yeteneklerini ve dayanıklılıklarını belirlemek için çekme, darbe, aşınma ve shore D testlerine tabi tutulmuştur. Bu ayrıntılı testlerden elde edilen sonuçlar, EPDM kauçuğuyla ve cam bilye katkısıyla oluşturulan poliamid kompozitlerin, sertleştirilmemiş muadilleriyle karşılaştırıldığında önemli ölçüde iyileştirilmiş mekanik ve tribolojik özellikler sergilediğini açıkça göstermiştir. Dahası, cam bilyeler birbirleriyle ve poliamid matrisiyle iyi birleşme etkileşimine sahip olduğunda, bu durumun EPDM kauçuğu kullanılarak sertleştirilmiş poliamid kompozitlerde kısmen artan performans ölçütlerine yol açtığı gözlemlenmiştir. Konuyla ilgili mevcut literatürden biraz farklı olarak, bu özel araştırma kapsamını yalnızca mekanik ve tribolojik özelliklerle sınırlamamıştır. Bunların yanında ileri düzey görüntüleme ve kimyasal analizleri de titizlikle inceledi. Bu kadar geniş bir yaklaşım, bu gelişmiş kompozitlerin çeşitli koşullar altındaki davranışları ve özellikleri hakkında daha bütünsel bir anlayış sağlar.

2. LİTERATÜR

2.1. POLİAMİT İKİLİ KOMPOZİTLER

2.1.1. Poliamid Cam Bilye Kompozitleri

Düzcükoğlu ve Demirci yaptıkları bir çalışmada katkısız polyamit 66 polimeri, %18 PTFE katkılı PA66, %25 PTFE ve %20 cam elyaf katkılı PA66 kompozitlerine Çekme mukavemeti ve aşınma deneyleri yapmışlardır. Çalışma sonucunda en yüksek mukavemet değeri katksız PA66 polimeri ve en yüsek kopma uzamasının PA66-%25PTFE-%20GFR malzemesinde olduğunu göstermişlerdir. Aşınma deneyleri sonucun 3 farklı kayma hızlarında da PA66-%25PTFE-%20GFR malzemesinin en düşük sürtünme katsayısı ve spesifik aşınma oranı değerlerlerini göstermiştir[2].

Liang ve arkadaşları cam bilye (D: 35 μm; ϕp: hacimce %0-30) ilavesinin visko-elastik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmış ve cam bilye oranını artırarak kompozitlerin elastikiyetini blend açısından incelemişlerdir. Hem (E′) hem de (E″) modüllerinin, özellikle yüksek konsantrasyonlu kompozitlerde doğrusal olmayan bir artış sergilediği gözlemlenmiştir. Silan kaplı cam bilye kompozitlerin elastisite modülleri (E′), kaplanmamış cam bilye kompozitlere göre daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, cam bilye ilavesinin silan kaplı cam bilyelerde camsı geçiş sıcaklıklarının düzensiz bir şekilde artmasına neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, taramalı elektron mikroskobu incelemesinde silan kaplı cam bilye parçacık-matris ara yüzey yapışmasının kompozitlerde yüksek olduğu tespit edilmiştir[3].

Liang ve Li , cam bilye (D: 35μm) oranlarının (ϕp: hacimce %0-30) ve silan ile kaplanmış yüzeylerin PP/cam bilye kompozitlerinin çekme özellikleri ile birlikte incelendiğini bildirmişlerdir. Çalışmada, cam bilye hacminin E-modülü ve gerinim oranlarının artmasıyla doğrusal olarak arttığı (maksimum %25 artış), çekme mukavemetinin ise azaldığı görülmüştür. Silan kaplı cam bilyeler içeren kompozitlerin çekme mukavemeti, kaplanmamış partiküller içeren kompozitlere göre daha yüksek bulunmuştur. Bununla birlikte, cam bilyelerin yüzde 15'inden fazlası silan ile kaplandığında kompozitlerin şekil değiştirme oranlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu da kaplamanın arayüzey yapışmasını artırdığını göstermektedir[4].

Faulkner ve Schmidt'in PP-cam bilye kompozitlerinin reolojik ve mekanik özelliklerinin %0-29 cam bilye oranlarına göre uyumluluğunu araştırdıkları çalışmalarında, düşük akış

hızlarında ve düşük gerinim oranlarında, cam bilye içeriğinin artmasına bağlı olarak kompozitlerin viskozitesi ile modülü arasında doğrudan bir ilişki olmadığı, buna karşılık yüksek akış hızlarında kompozitlerin viskozitesi ile modülü arasında doğrudan bir ilişki olmadığı ortaya çıkmıştır. Partiküllerin etkinliğinin sınırlı olduğu hipotezi ortaya atılmış ve cam bilye oranındaki artışın kompozitlerin viskozite özellikleri üzerinde Elastikiyet modülünden daha büyük bir etkiye sahip olduğu ileri sürülmüştür[5].

Sumita ve arkadaşları, ultra ince (SiO2, D: 7, 16, 40nm) ve normal partikül boyutlarında (kurşun cam, D: 6μm; soda camı, D: 35, 65, 105μm) bilyesel partiküller (ϕp: ağırlıkça %0-20) içeren polipropilen kompozitlerin çekilerek yönlendirildiğini bulmuştur. Yönlendirilmiş kompozitlerin elastik modülü, matris polimerinin moleküler yönelimine, deformasyon sırasında oluşan boşluk alanına bağlıydı (boşluk) oranı, inorganik partikül boyutu ve oranı; ultra ince partiküller takviye edici özelliklere sahiptir[6].

Kumar ve Panneerselvam yaptıkları çalışmada Naylon 6 ve GFR Naylon 6 kompozit numunesini, enjeksiyon kalıplama makinesi kullanarak mekanik ve aşınma testi için üretilmişler. Aşınma testi, pim-disk konfigürasyonu kullanılarak 320 grit boyutlu aşındırıcı kağıda karşı kuru koşullar altında gerçekleştirilmiş. Değişen cam elyaf içeriklerinin (0, 10, 20 ve 30 ağırlık %), uygulanan yüklerin (5, 10, 15 ve 20 N), 500 m kayma mesafesinin etkisini, oda şartları koşullarında incelemişler. Sonuç olarak, cam elyaf içeriği arttıkça, özgül aşınma oranının azaldığını ve en düşük değerin %30 ağırlık cam elyafında elde edildiğini göstermişlerdir. Ayrıca, spesifik aşınma miktarının yük arttıkça arttığını göstermişlerdir. Aşınmış yüzeyleri, taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop kullanılarak incelemişlerdir[7].

Partikül boyutunun, sıcaklığın (30-130°C) ve çekme hızının (20, 200 ve 1000 mm.dak-1) kompozitlerin çekme mukavemeti üzerindeki etkileri, ilgili malzeme olarak polipropilen kullanılarak araştırılmıştır. Bu çalışmanın bulguları, ultra ince partiküller içeren kompozitlerdeki partikül oranının, partikül boyutundaki artışla birlikte akma dayanımında bir artışa yol açtığını göstermektedir. Tersine, normal boyutlu parçacıklara sahip kompozitlerin sıcaklık ve gerinim oranındaki bir artış, akma dayanımında bir azalma ile sonuçlanır. Bu davranış, normal boyutlarda partiküller içeren kompozitlerde gözlenenin tersidir. DMTA analizleri, elastikiyet modülünün (E′) artan partikül oranı ile arttığını, viskozite modülünün ise 40°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda azaldığını göstermektedir. Ayrıca, partikül oranı artan partikül boyutu ile artmakta ve azalan partikül boyutu ile azalmaktadır. Son olarak, ultra ince partiküllerin varlığı polipropilenin

kristalliğini artırır[8], [9].

Shibata ve arkadaşları yaptıkları çalımada, kuru koşullar altında geniş bir normal yük ve kayma hızı aralığında silisyum esaslı seramik (RBC) parçacıkları veya cam bilye (GB) içeren poliamid 66 (PA66) reçine kompozitlerinin tribolojik davranışlarını araştırmış ve düşük sürtünmeli ve yüksek aşınma dirençli bir dolgu maddesi olarak sert parçacık dolgu maddelerinin faydasını tartışmışlardır. PA66/RBC ve PA66/GB kompozitleri, özellikle düşük kayma hızında, saf PA66 ile karşılaştırıldığında düşük sürtünme ve düşük aşınma göstermiştir. Aşınmış yüzeylerdeki gözlemlere dayanarak, RBC parçacıkları ve GB'ler düşük kayma hızlarında aşınma yolunda rulo şeklindeki parçacıkların oluşumunu ve büyümesini önleyerek düşük aşınmaya neden olmuştur. Çalışma sonucunda RBC parçacıklarının GB'lerden daha az agresif olduğunu belirtmişerdir[10].

Kawai ve arkadaşları patentlerinde, silan veya titanyumla kaplanmış cam lifleri içeren PP/cam elyaf kompozitlere maleik anhidrit aşılı PP (PP-g-MA) ilave edildiğinde oluşan reaksiyonları tanımlamışlardır. Ürettikleri kompozit malzemelerde esnemezlik, darbe dayanımı ve eriyik akışı değerlerinin yüksek olduğunu göstermişlerdir[11].

Karsli ve arkadaşları çalışmalarında, cam elyaf, CaCO3 partikül ve cam elyaf/CaCO3 hibrit takviyeli ABS/PA6 karışım bazlı kompozitlerin aşındırıcı aşınma davranışını incelemiştir. Numuneleri ergiyik karıştırma ve enjeksiyon kalıplama teknikleri kullanılarak hazırlanmışlardır. Mekanik, termal, morfolojik özellikler ve aşındırıcı aşınma davranışı, takviye edici madde türü ve bileşimi açısından incelemişlerdir. Hibrit kompozitlerin çekme dayanımı ve modül değerlerinin, yalnızca elyaf takviyeli kompozitlerin ve yalnızca partikül takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı ve modül değerleri arasında bir değer verdiğini gözlemlemlemişlerdir. DSC analizinden, kompozitlerin Tg ve Tm değerlerinin katkıdan önemli ölçüde etkilenmediği; ancak kristalinite derecesinin katkı türüne ve bileşimine duyarlı olduğu göstermişlerdir. Çarpma açısının aşındırıcı aşınma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulmuşlardır. Çalışma Sonucunda, kompozit malzemelerin sünek aşınma davranışlarına uygun olarak 30°'lik darbe açısında maksimum aşınma oranı sergilediğini göstermişlerdir. Aşınma mekanizmalarını araştırmak için, aşınmış yüzey analizi taramalı elektron mikroskobu ile yapmışlardır. Yüzey analizi, sert silika kum parçacıklarının tekrarlanan darbesinin, matrisin lif yüzeyinden yerel olarak çıkarılmasına ve kompozit malzemenin yüzeyinde kraterlerin oluşmasına yol açtığını göstermişlerdir[12].

Meddad ve Fisa, silan kaplı ve kaplanmamış hacimce %0-50 oranlarında cam küre partikülleri içeren i-PP/cam bilye ve PA6/cam bilye kompozitlerinin gerilme-şekil değiştirme davranışlarını %0-8 şekil değiştirme oranları aralığında incelemişlerdir. Cam bilye matris arayüzey yapışmasına bağlı olarak arayüzeyde tam veya kısmi ayrışmanın meydana geldiğini bildirmişlerdir[13].

Hao ve arkadaşı çalışmalarında, Hansen çözünürlük parametresi teorisi ve reolojik yasalarını, etilen propilen dien monomerleri (EPDM)-poliamid elastomerleri (PAE)/grafit bazlı aşınmaya dayanıklı elastomerin mikroskobik çapraz bağlı ağ yapısını araştırmak için kullanmışlardır. Aynı karbon siyahı içeriği koşuluyla, EPDM-PAE'nin aşınma hacmi balmumu tozu eklendikten sonra arttığını ve %5 grafit eklendiğinde azaldığını belirtmişler. Mikroskobik çapraz bağlı ağın aşınma direnci özelliklerindeki rolünün, özellikle aşınma hacmi ve çapraz bağ yoğunluğu arasındaki doğrusal sinerjik ilişki ile karakterize edildiğini belirtmişler. Mikro zincir segmentlerinin hareket kabiliyetini frekans taraması ile karakterize edip ve dolgu ağının etkisini gerinim taraması ile temsil etmişlerdir. Mikro dolgu yapısını karakterize etmek için taramalı elektron mikroskobunu kullanırken, aşınma arayüzünü incelemek için stereomikroskop görüntüleme kullanmışlardır. Aşındırıcı tane aşınmasının üstünde aşındırıcı yüzeyde oluşan grafit ağ tabakasının aşınma mekanizmasını kompozit aşınmaya dönüştürdüğüne dikkat çekmişlerdir[14].

Stricker ve arkadaşları tarafından bildirildiği üzere, i-PP içindeki %0-30 cam küre içeren kompozitlerin cam küre oranının kompozitlerin çeşitli fiziksel özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Elastikiyet modüllerinde artış görülmüş, akma azalmış ve Izod darbe dayanımlarında bir çentik oluşmuştur. Ayrıca, DSC deneyleriyle kristalleşme sıcaklıklarında bir artış tespit edilmiştir. Buna karşılık, ergime sıcaklıklarında belirgin bir değişim olmadığı gözlenmiştir[15].

Sjögren ve Berglund çalışmalarında cam bilye hacim oranlarının %0-21 ve bilye boyutlarının 5 ve 30 μm olan i-PP/cam bilye kompozitlerinin şekil değiştirme mekanizmaları ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kompozitlerin çekme dayanımlarının, gerinim oranlarının, Poisson oranlarının ve darbe mukavemetinin cam küre oranı ve partikül boyutlarındaki artışla azaldığını, partikül boyutunun elastikiyet modülleri üzerinde etkili olmadığını, ancak cam küre oranındaki artışın elastikiyet modüllerini arttırdığını öne sürmüştür. Gerinim oranı %0,7'ye ulaştığında, partiküllerin kutuplarında partikül ve matris arasında ayrışma başladığını, bunun sonucunda büyük

partikül içeren kompozitlerde gevrek kırılma, küçük partikül bulunan kompozitlerde ise sünek kırılma meydana geldiği sonucuna varmışlardır[16].

i-PP/Cam bilye kompozitlerinin İlk aşamadaki kırılması incelenmiştir. Cam bilye oranlarının ve kalıntı gerilmelerin davranış üzerindeki etkileri, arayüzey ayrılması, plastik deformasyon ve kavitasyonu incelemek için sonlu elemanlar analizi kullanılarak araştırılmış ve kalıntı termal gerilmelerin ilk kırılma gerilimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu öne sürülmüştür. Ayrıca, kavitasyon oluşumunun, özellikle yüksek stres koşulları altında, parçacık-matris ayrışmasından ziyade, ağırlıklı olarak artık gerilmelerden etkilendiği gözlemlenmiştir[17].

Liang ve Li, silan ile kaplı %0-20 cam bilye ve 4, 35 ve 219μm çap boyutlarının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kompozitin elastikiyet modülü ve darbe dayanımının artan cam bilye oranlarıyla arttığı, akma dayanımının ise doğrusal olmayan bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Yazarlar tarafından, büyük partikül içeren kompozitlerin elastisite modülü ve akma dayanımının küçük partikül içeren kompozitlere göre daha düşük olduğu ve partiküllerin çatlak ilerlemesini engellediği belirtilmiştir. Bununla birlikte, matris-partikül arayüzeyindeki yapışmanın çok zayıf olduğu kaydedilmiştir[18].

Bir başka çalışmada, 35 μm çap, %0-30 cam küre oranı ve silan kaplamanın polipropilen/cam bilye kompozitlerin çentikli Izod darbe dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmış ve cam bilye oranındaki artışın kompozitlerin darbe dayanımını artırdığı, ancak partiküllerin silan ile kaplanmasının etkisiz olduğu görülmüştür. Kompozitlerdeki %10 cam küre oranı için gevrek-sünek bir geçiş tespit eden araştırmacılar, partiküllerin çevresinde gerilim konsantrasyonlarının meydana gelmesi nedeniyle şekil değiştirmenin bu alanda gerçekleştiğini ve partiküllerin çatlağın ilerlemesini engellediğini belirtti[19].

Liang makalesinde, PP/%0-30 12μm çaplı cam bilye kompozitlerinde artan cam bilye oranının eriyik akış özellikleri üzerindeki etkisi rapor edilmiştir. Ayrıca, cam bilye varlığında düşük viskozite artışlarının kayma hızlarına etkileri ve yüksek kayma hızlarında viskozite artışının cam bilye oranlarına bağımlılığı araştırıldı. Ayrıca, kaplanmış cam bilyelerin silan kaplaması ile viskoziteyi artıracağı belirtilmiştir. Liang ve arkadaşlarının da gözlemlediği gibi, PP/%0-30 12μm çaplı cam bilye kompozitlerinde cam bilye oranının artırılması eriyik akış özelliklerinde iyileşmeye yol açmıştır. Düşük viskozite artışlarının artan cam bilye içeriği ile kayma hızları üzerindeki etkisini

araştırmışlardır. Yüksek kesme hızları için viskozite artışının cam bilye oranlarına daha az bağımlılık gösterdiğini keşfetmişlerdir. Ayrıca, silan ile kaplanmış cam bilyelerin viskozitede artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir. Başka bir çalışmada, cam bilye boyutu artırılmış PP/%0-15 cam bilye kompozitlerinin reolojik davranışını araştırmışlardır. Ekstrüzyon işlemleri sırasında baş şişme oranında doğrusal olmayan bir düşüş tespit etmişlerdir[20],[21].

Kwok ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, cam küre yüzeylerine titanyum dioksit kaplama uygulanmasının, darbe mukavemetinde orijinal mukavemetinden yaklaşık 4,5 kat daha fazla olmak üzere önemli bir artışa yol açtığı ortaya çıkmıştır. Darbe mukavemetindeki bu artışın, cam küre oranlarında %0 ila %25 arasında değişen bir artışla ve 2, 4, 7 ve 11 μm'lik çaplarla birlikte gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, elastisite modülü sabit kalırken, darbe mukavemetinde gözlemlenen artışın büyüklüğünün parçacıkların artan boyutuyla orantılı olarak azaldığı gösterilmiştir[22].

Dubnikova ve arkadaşları, inorganik partikül boyutlarının polipropilen (PP) kompozitlerin toklukları üstündeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalarında, en uygun partikül boyutunun polimer matrisin kırılmasında etkili olan kritik kusur boyutundan daha küçük olması ve partikül ile matris arasındaki arayüzey mukavemetinin matrisin kendi mukavemetinden daha düşük olması koşullarına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Optimum partikül boyutunu belirlemek için farklı oranlarda cam küre içeren PP/cam küre kompozitlerinin ve farklı boyut ve hacim oranlarında Al(OH)3 içeren polipropilen kompozitlerinin çekme, darbe ve SEM incelemeleri yapılmıştır. Sonuçlar, optimum partikül boyutunun çekme testleri için 25μm ve darbe testleri için 1μm olarak belirlendiğini göstermiştir[23].

Yuan ve diğerleri cam küre oranını değiştirerek PP/cam küre kompozitlerinin mekanik ve termal özelliklerini araştırmıştır. Çeşitli sıcaklıklarda çentikli numuneler üzerinde Izod darbe testleri ile belirlendiği üzere, darbe mukavemetinin ve kırılgan-kırılgan geçiş sıcaklığının artan cam küre oranı ile azaldığı tespit edilmiştir. Çekme testlerinde, E-modülü %4 cam küre oranında marjinal olarak azalmış, ancak artan cam küre oranıyla artmıştır; eşzamanlı olarak, akma gerilmeleri ve gerinim oranları sürekli bir şekilde azalmıştır. Araştırmacılar, belirli koşullar altında kompozitin tokluğunun cam küre parçacıkları arasındaki mesafeye bağlı olduğunu öne sürmüşlerdir. Spesifik olarak, parçacıklar arasındaki mesafe kritik bir eşiğin altına düştükçe kompozitin tokluğunun azaldığını; buna paralel olarak, kritik mesafenin sıcaklıktaki artışla birlikte arttığını öne

sürmüşlerdir. DMTA analizleri, cam küre oranının artmasıyla kompozitin camsı geçiş sıcaklığında bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, DSC analizleri polipropilenin kristalinitesinde bir artış olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, erime sıcaklıklarında herhangi bir değişiklik görülmezken, TGA analizleri cam küre oranının artmasıyla kompozitlerin ayrışma sıcaklığında bir artış olduğunu göstermiştir. Bir başka çalışmada, β-kristalleri içeren polipropilen kullanılan kompozitlerde cam küre oranının ve α- ve β-formlu kristallerin oluşumunun (E-modülü ve çekme mukavemeti) mekanik özelliklerinin %0-6 cam küre oranları için azaldığı, daha yüksek cam küre oranları ve daha fazla α-kristalitleri içeren kompozitler için arttığı gözlemlenmiştir. Tersine, α-kristal miktarında bir artış gözlenmiştir. Bununla birlikte, α-kristalleri içeren polipropilen kullanılan kompozitlerde cam küre oranlarındaki artışla mekanik özelliklerde doğrusal bir artış bulunmuştur. Bu tutarsızlık, α-kristallerinden oluşan polipropilenin β-polipropilene kıyasla daha yüksek mekanik özelliklerinin kristal tiplerine atfedilebileceği temelinde açıklanmıştır.DSC ve WAXD analizleri, küçük boyutlu cam kürelerin β-kristallerinin oluşumunu arttırdığını ortaya koymuştur[24],[25],[26].

Yang ve arkadaşları çalışmalarında, %0-30 oranlarında yüksek cam bilye oranlarının ve 0,71, 1,23, 2,15 μm olmak üzere artırılmış partikül boyutlarının eriyik viskozitesi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Araştırmacılar, artan cam bilye oranlarının, artan partikül boyutlarının etkisine kıyasla daha büyük viskozite artışlarına yol açtığı sonucuna varmışlardır. Viskozite başlangıçta cam küre oranındaki artışla artmış ve daha sonra azalmıştır. Kompozitlerin tork ölçümleri de benzer sonuçlar vermiştir[27].

2.1.2. **Poliamit EPDM Kompozitleri**

Demirer ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada propilen malzeme %10,%20,%30,%40,%50 oranlarında kattıkları geri dönüşüm atık etilen propilen dien monomer kauçuk ilave ederek ekstrüzyon üretim ve enjeksiyon kalıplama yöntemiyle kompozit elde edilmiş ve artan etilen propilen dien monomer kauçuk oranın artmasıyla çekme mukavemeti, sertlik, yoğunluk, yüksek sıcaklıktaki deformasyon kabiliyeti, vicat yumuşama noktasının ve vicat yumuşama değerinin azaldığını fakat izod darbe dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Bu değerleri sentetik kauçuk olan etilen propilen dien monomeri yumuşak ve esnek yapısı ile açıklamışlardır. Ayrıca ilave ettikleri kauçuğun partikül boyutları büyük olmasından dolayı istenen seviyede kopma uzamasının gerçekleşmediğini açıklamışlardır[28].

Merz sonrasında Kunz ve diğerleri tarafından öne sürüldüğü gibi, kauçuk parçacıklarının işlevi çatlakları köprülemek ve böylece olumsuz boyuta ulaşmalarını önlemekti. Çok fazlı polimerin tokluğundaki artış, germe sırasında kauçuk partiküllerinde depolanan ve partiküller koptuğunda geri dönülmez bir şekilde dağılan elastik enerji miktarı olarak açıklamışlardır[29],[30] .

Kinloch ve Young, kauçukla modifiye edilmiş polimerler üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunun, ikinci bir fazın dahil edilmesiyle güçlendirilen matristeki deformasyon mekanizmasının toklukta bir iyileşme ile sonuçlandığını gösterdiğini belirtmektedir[31].

DuPont'un patent belgelerinde, darbe dayanımı modifiyeleri etkili olarak kabul edilmesi için darbe modifiyelerinin naylon matrisin onda birinden daha büyük olmaması gerektiği önerilmektedir.Bu ifadenin geçerliliği, kauçuk modifikasyonu alanında kullanılan modifiye naylonların sertleştirilmesi için çeşitli mekanizmalar öneren çok sayıda akademisyenin bulgularıyla desteklenmektedir.

Hobbs ve Wu, kauçuk parçacıklarının naylon gibi polimerlerin sertleştirilmesindeki etkinliğinin, uygulanan bir stres alanı içinde parçacıkların etrafında stres konsantrasyonları oluşturma kapasitelerine atfedilebileceğini öne sürmektedir. Dağılmış faz ve matris arasındaki modül farklılığı, kauçuk partikülleri etrafında stres konsantrasyonuna neden olur ve böylece çatlak veya kayma bandı gibi plastik deformasyonun lokalize çekirdeklerini oluşturur. Kauçuk parçacıkları birbirine yeterince yakın olduğunda, gerilme alanları üst üste biner ve bu da daha fazla sertleştirme etkisi yaratır[32].

Borggreve ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada Naylon-6 polimerine 0.3-1.6 μm partikül boyutlarında ve ağırlıkça %0-20 oranlarında EPDM kauçuk ilave ederek kauçuk konsantrasyonu ve partikül boyutunun karışımların çekme modülü, burulma modülü, akma gerilmesi ve çentikli darbe dayanımı üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Karışım yapılarını ve kırılma yüzeylerini taramalı elektron mikroskobu ile incelemişlerdir. Kauçuk partiküller, naylon matrisin camsı geçiş sıcaklığından bağımsız olan keskin bir sünek-gevrek geçişe neden olduğunu belirtmişler. Çentikli Izod darbe testleri için sünek-gevrek sıcaklığı, kauçuk içeriği arttığında veya partikül boyutu azaldığında daha düşük değerlere kaymasını çatlak ve kayma mekanizmasıyla açıklamışlardır. Partikül boyutu ve arayüzey yapışması, karışımların akma dayanımı ve modülünü etkilemediğini ifade

etmişlerdir[33].

Li Huang ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada Polyamide 6 polimerine %7, %14,9, ve %31.1 oranlarında EPDM ilavesiyle E' modülüs değerlerinin belirgin şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Aynı çalışmada artan cam bilye ilavesiyle kopma uzaması, darbe dayanımı ve çekme mukavemeti azalırken elastikiyet modülünün arttğı belirtmişlerdir. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde artan cam bilye oranı ile cam bilye-polimer matris arayüzeylerinin zayıfladığını göstermişlerdir[34].

Caramitu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada PA6 polimerine %5, %10, %20 oranlarında farklı yapılarda olan EPDM türlerinden ilave etmişlerdir. Bunlar EPDM (etilen-propilen-dien terpolimer), Exxelor (orta viskoziteli yarı kristal etilen maleik anhidrit ile işlevselleştirilmiş kopolimer), Lotader (etilen, etil akrilat ve maleik'in rastgele terpolimeri anhidrit), Marfran (karışım polipropilen, polietilen ve polietilen vinil asetat) ve SEBS (stiren-etilen/bütil-stiren blok kopolimer) yapılarından oluşmuştur. Karışım oranları PA6/elastomer oranları: EPDM için 100/0, 90/10, 80/20, Kauçuk içeren formülasyonlar için 100/0, 95/5, 90/10 ve 80/20 bileşenler Exxelor, Lotader, Marfran den oluşmuştur. Karakterizasyonu malzeme fonksiyonel özellikleri çekme ve eğilme mekanik testleri, üç nokta eğilme dayanımı, termal dayanıklılık testleri ve X-ışını analizlerini gerçekleştirilmişlerdir. Çalışma sonucunda EPDM katkı oranı artışıyla birlikte çekme, akma ve eğilme mukavemetlerinin azaldığını göstermişlerdir[35].

2.1.3. **Poliamit EPDM Cam Bilye Kompozitleri**

Liang ve arkadaşları, PP/%10 EPDM karışımlarına 35 μm çapında %0-30 cam bilye ilavesinin visko-elastik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kompozitlerin elastikiyet ve viskozite modüllerinin, özellikle yüksek oranda cam bilye içeren kompozitlerde, artan cam bilye oranı ile doğrusal olmayan bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. Cam bilye ilavesi camsı geçiş sıcaklıklarını da düzensiz bir şekilde değiştirmiştir. SEM incelemelerinde, silan kaplı cam bilyeli kompozitlerde partikül-matris arayüzey yapışmasının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Doğrusallıktaki bu artış özellikle yüksek oranda cam bilye içeren kompozitlerde belirgin olmuştur. Çalışmada ayrıca, cam bilyelerin dahil edilmesi nedeniyle camsı geçiş sıcaklıklarının düzensiz değişikliklere maruz kaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, numunelerin SEM kullanılarak incelenmesi, cam bilyeler ve matris arasındaki arayüzey yapışmasının silan kaplı cam bilyeli kompozitlerde önemli ölçüde yüksek olduğunu ortaya koymuştur[3].

Sahan ve arkadaşları, tokluk sağlamak için etilen-1-okten (EOC) elastomeri, sertlik için μm boyutlu cam boncuklar (GB) ve her ikisinin belirli oranlarda karışımı polipropilen (PP) polimerine ekleyerek belirlemiştir. %12 ağırlıkça EOC elastomer eklenmiş PP karışımı, %8 ağırlıkça cam bilye dolgulu PP kompozit ve %12 ağırlıkça EOC elastomer ve %8 ağırlıkça cam bilye hibrit dolgulu PP kompozitler ilk olarak çift vidalı bir birleştirme makinesinde granül formunda üretilmiştir. Deneyler sonucunda, cam bilye kompozitin sertliğini artırırken, EOC elastomeri karışımın ve kompozitin tokluğunu artırdı. Cam bilye ile polimer ana matris arasındaki arayüz bağının iyi olmadığı ve bu nedenle mekanik özelliklerin azaldığı belirtmişler[36].

Ayakkabı taban malzemelerinin reolojik davranışı üzerine yapılan bir çalışmada Jolene ve arkadaşları, SBS blok kopolimerinde mineral dolgu maddelerinin, özellikle de kalsiyum karbonat (CaCO3) kullanımının malzemenin mekanik özelliklerinde değişikliklere yol açtığını bulmuştur. Araştırmacılar, CaCO3'ü %10 mika tozu veya %10 cam bilye ile değiştirdiklerinde malzemenin kopma mukavemetinde değişimler gözlemlemişlerdir. Cam küre bilyelerle dolgulanan karışım 5,8 MPa ile en yüksek kopma mukavemetini sergilerken, CaCO3 dolgulu karışım 5,46 MPa'ya ve mika tozu dolgulu karışım 5,41 MPa'ya ulaştı. Ancak cam bilyeler, kopma uzaması deneylerinde diğer dolgu maddelerine kıyasla daha düşük performans göstermeleri nedeniyle uygun görülmemiştir. Hacim kaybı açısından ölçülen aşınma direnci, CaCO3 dolgulu malzeme (307 mm3) ve mika tozu dolgulu karışıma (378 mm3) kıyasla cam bilye dolgulu malzemede (273 mm3) daha düşüktü. Yırtılma mukavemeti açısından, cam bilye dolgulu formül 25 N/m'ye, CaCO3 dolgulu karışım 23 N/m'ye ve mika tozu dolgulu karışım 24 N/m'ye ulaşmıştır. Mika tozu silika için uygun maliyetli bir alternatif olarak değerlendirilirken, hem mika tozu hem de CaCO3 pahalı seçenekler olarak bulunmuştur[37].

Özsarıkaya ve arkadaşları çalışmalarında PA6 polimerine %5 cam bilye , %15 cam elyaf ve %5cam %15 cam elyaf kompozitine %4 EPDM ilave ederek mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Polyamid 6 polimerine %CB ilavesiyle çekme dayanımının %2 artarken elastikiyet modülünü etkilemedğini belirtmişlerdir. PA6 polimerine %15CE ilavesiyle Çekme mukavemetinin %51.5 ve elastikiyet modülünün %85.8 oranında arttığını göstermişlerdir. PA6-%5CB-%15CE kompozitine %4EPDM ilavesiyle Darbe dayanımında %14.2 kopma uzamasında ise %56.2 oranında arttığı göstermişlerdir[38].

Yetgin ve arkadaşları yaptıkları bir çalışamada PA6 polimerine %8 EPDM , %10 cam elyaf ve %10CE-%8EPDM olmak üzere 3 farklı kompozit elde etmişlerdir. EPDM ‘in

%8 oranında ilve edilmesiyle PA6 polimerinin mukavemeti %19,3 ve elastikiyet modülünü %41,4 oranında azalırken darbe mukavemetinin %14.1 oranında arttığı gösterilmiştir. PA6 polimerine %10 cam elyaf ilavesiyle çekme mukavemeti ve elastikiyet modülünde, sırasıyla %23,6 ve %64.8 'lık bir artışla sonuçlanmıştır. Darbe dayanımı ise tersine %63,4 oranında azalmıştır. Ayrıca, PA6 polimerine %10 CE ilavesinin kompozitin eğilme mukavemetini artırdığı ve böylece malzemenin genel dayanıklılığını ve esnekliğini artırma potansiyelini gösterdiği gösterilmiştir Bu ilavenin eğilmedeki mukavemet ve elastikiyet modülü üzerindeki etkisi, sırasıyla %67,0 ve %94,0 artışla önemli bulunmuştur[38] .

3. POLİAMİDLER

3.1. POLİAMİDLER HAKKINDA GENEL BİLGİ

Poliamitler, ilk kez 1935 yılında Wallace Carothers tarafından sentezlenmiştir. Poliamid 6.6 ise Carothers tarafından 1935 yılında sentezlenmiş ve 1938 yılında Dupont firması tarafından üretime geçirilmiştir. Aynı dönemde Almanya'da da PA 6 olarak bilinen bir poliamid türü üretilmiştir. Poliamidlerin özellikleri, amid grupları ile belirlenir. Bu gruplar arasındaki polar bağlar, moleküller arasında ikincil bağların oluşmasına ve moleküler hareketin sınırlanmasına yol açar. Bu ikincil bağlar, poliamidlerin gerilme mukavemetini artırır ve sıkışmalara neden olan kristalleşmeyi sınırlar. Poliamitler, yüksek mukavemet, sertlik, gaz ve buhar geçirgenliği, yarı saydamlık, dar erime aralığı, aşınma direnci, yorulma ömrü ve yüksek sıcaklıklarda işleme özellikleri gibi avantajlara sahiptir. Günümüzde, yılda yaklaşık 3 milyon tondan fazla poliamid üretilmektedir [39]

Amid grubu su gibi polar çözücülere karşı hassastır. Poliamid (ağırlıkça %2,5) diğer tüm mühendislik termoplastiklerinden daha yüksek bir su emme oranı sergiler. Laktam veya amino asit gibi tek bir monomerden türetilen poliamid durumunda, monomerde bulunan karbon atomlarının sayısını belirtmek için tek bir sayı kullanılır. Tek bir monomerden türetilenler poliamid 6, poliamid 7, poliamid 8, poliamid 11 ve poliamid 12 olarak sınıflandırılır. Diamin ve diasitlerin polimerizasyonu ile elde edilen poliamid durumunda, birinci diamin ve ikinci diasitte bulunan karbon atomlarının sayısını belirtmek için tek sayı kullanılır. Elde edilen ürünler aşağıdaki gibidir: Poliamid 4.6, Poliamid 6.6, Poliamid 6.9, Poliamid 6.10 [40].

Poliamidler, mekanik ve fiziksel özellikler açısından en önemli olanları poliamid 6 ve PA 66'dır. Poliamid 6 özel olarak sertlik, mukavemet ve ısı direnci özelliklerine sahiptir. Poliamid 6'nın moleküler ağırlığı 80.000 ila 100.000 arasında değişmektedir. Bu malzemeler döküm yöntemiyle de elde edilebilir ve yüksek kristallik ve düşük nem aktivitesine sahiptirler. Sentetik bir termoplastik olan poliamid 6, mekanik ve fiziksel özellikleri açısından etkili bir malzeme olarak kabul edilir. Yüksek darbe direnci, düşük nem aktivitesi ve işleme kolaylığı gerektiren uygulamalar için tercih edilir. PA 66 ise PA 6 ile benzer özelliklere sahip olmasına rağmen yüksek erime noktası sayesinde yüksek sıcaklık gerektiren bağlamlarda kullanılır. Poliamid 6'nın yoğunluğu 1,12 ile 1,14 g/cm³ arasında değişirken, erime noktası 220 °C'dir ve camsı geçiş sıcaklığı 50 °C'dir[41].

Bu malzemelerin çoğu doğal renklidir; ancak üreticiler kimyasal maddeler kullanarak renklendirme yapabilmektedir. Poliamid 6, kendine özgü kimyasal ve kristal yapıları nedeniyle diğer plastiklerde bulunmayan çok sayıda avantaja sahiptir. Çizelge 2.1'de poliamid 6'nın teknik özellikleri gösterilmektedir. Bunlar arasında yüksek mekanik ve aşınma direnci, geniş bir sıcaklık aralığı (-50 °C / + 60 °C), neme, benzine ve çözücülere karşı direnç, çok kolay mekanik işleme, yüksek darbe direnci ve yüksek elektrik yalıtım özellikleri bulunmaktadır. Ayrıca, poliamid 6 sert ama esnek olarak tanımlanabilir [42]

Poliamidler veya naylonlar, plastik ve kompozit malzemeler dünyasında büyüyen bir pazar payına sahip yaygın polimerlerdir. Bu artış çoğunlukla düşük satın alma fiyatlarına, düşük yoğunluklarına ve nispeten düşük ağırlıkta mükemmel mekanik özelliklerine atfedilir. Bu gerçeklere rağmen, poliamidler malzeme biliminde hem ilginç hem de önemli çalışma konuları olan polimerlerdir. Benzersiz özelliklerin birleşimi onları diğer polimerlerden farklı kılar: ana rol mekanik özellikleridir, ancak başlangıçta daha fazla işlenebilen ve kısmen kristalin olan termoplastik polimerlerdir. Bu özellikler, bu malzemelerin karakteristik portföyüne aittir ve yalnızca bunlarla çeşitli teknik alanlarda uygulama bulurlar. Poliamidler, dayanıklılığı, elastikiyeti, yüzey uyumluluğunu ve günümüzde arzu edilen kolay bakımı benzersiz bir şekilde birleştiren lifler ve tekstiller üretmek için kullanılabilir[43].

Bunlar, saf poliamidlerden veya poliamid kompozit malzemeler formunda, örneğin elektronik cihazların muhafazaları veya tüketiciler ve profesyoneller için bilgi ve iletişim teknolojisindeki konektörler için poliamid 6 bazlı veya poliamid 66 bazlı bileşikler şeklinde üretilir. Poliamidler modern teknoloji için çok önemli olsa da, geçen yüzyılın ilk yarısında icat edildiler ve bu ailenin endüstriyel olarak üretilen en eski üyeleri olarak olgun bir statüye ulaştı. Yaşlanma bozulmaları öngörülebilir, ancak atık önleme uygulamaları, yararlı polimerlerin ömrünü artırmanın yollarını incelemeyi ısrarla destekler. Poliamidler, çok yaygın kullanılan polietilen ve polipropilen plastiklerden sonraki bir polimer sınıfını temsil ederken, naylondan polietilen tereftalat'a geçiş, önceki dönemde polyesterden polipropilen elyafa geçişle paralellik gösterir[44].

3.1.1. Poliamidlerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Poliamid terimi, yapısal birimlerinde amid bağları içeren bir polimeri ifade eder. Ana zincirinde amid bağları bulunan bir polimere poliamid denebilir. Üretim ve uygulamalardaki artışla birlikte, çeşitli poliamid türleri özelliklerine ve uygulamalarına

göre sınıflandırılmıştır. Poliamidler genel olarak alifatik ve aromatik poliamidler olarak sınıflandırılabilir. Alifatik poliamidlerde, doğrusal alifatik poliamidler, yarı aromatik poliamidler ve alifatik poliftalamidler veya alifatik polyesterler yer alırken, aromatik poliamidlerde iki tür vardır: tamamen aromatik ve kısmen aromatik poliamidler. Örneğin, belirli doğrusal alifatik poliamidler tanımlanırken, diğerleri yarı aromatik poliamidlerdir. Alifatik poliamidler, reçine tipi reaktif olmayan poliamidler ve mühendislik plastikleri olarak da sınıflandırılabilir; bunlara mühendislik poliamidleri de denir [45].

Poliamidler, fiziksel ve kimyasal özelliklerine ve ayrıca uygulama alanlarına ve endüstriyel amaç türlerine göre sınıflandırılır. Malzemelerin ürün kodları da bazı durumlarda sınıflandırma için kullanılır, ancak bunlar aslında o malzemeyi icat eden veya ticarileştirmeye başlayan şirket tarafından malzemeleri belirtir. Bu nedenle, bu ürün kodları yalnızca şirketin adını gösterir, malzeme kimliğini değil. Poliamidlerin de isimlendirmede kullanılan bir dizi adı vardır. Bu nedenle, bu çeşitli isim türlerinden, poliamidlerin kimyasal yapıları ve özellikleri anlaşılamaz. Bir poliamidin çok fazla adı varsa, bu çeşitli uygulamalar için olasılıkları olduğu anlamına gelir. Bu nedenle, poliamidlerin özelliklerine ve uygulamalarına göre sınıflandırılması yararlı olacaktır. Poliamidlerin sınıflandırılması, kullanıcıların yaklaşımını kolaylaştırabilir. Dahası, bu sınıflandırma üretim çeşitliliğini, kullanım türünü vb. de gösterecektir. Yukarıdaki nedenlerden dolayı, poliamidlerin sınıflandırılmasının poliamid kullanıcısı için gerçekten gerekli olduğu düşünülmektedir [46].

3.1.2. **Polyamidin Keşfi ve Tarihsel Süreci**

İlk homodimerik, dendritik poliamitler 1950'lerin sonlarında geliştirildi; ancak henüz büyük ölçüde araştırılmadılar. Bu nedenle, modern poliamitler çoğu durumda her çekirdekleşme noktasındaki yer tutucuların sarkıt gruplarla değiştirildiği gerçek dendrimerler olduğundan, bu monografide sunulan poliamitler üzerindeki araştırmalar kademeli büyüme dendrimerleriyle başlamalıdır. Makromoleküler kimyada mimari kontrol ile karakterize edilen dendritik polimerler alanı, nispeten seyrek de olsa uzun tarihsel gelişmelere sahiptir. Dendrimer araştırmalarının başlangıcı esas olarak nadir toprak metallerinin tetrafonksiyonel mimarisine dayanmaktadır. Nadir toprak metal bileşikleri, arketipal poliamitler sentezinin katalizörü ve/veya hedefi idi[47].

Poliamidler, dünya ekonomisi ve endüstrisinin sürecinde ancak 1930'larda naylon olarak bilinen polimer malzeme veya kumaş geliştirildiğinde ve ticari olarak üretildiğinde

önemli bir rol oynamaya başladı. Naylonun kökeni, modern polimer biliminin babası olarak bilinen, ilk sentetik olarak üretilen elyaf, polimer veya poliamid gibi belirli icatlarla ilişkilendirilir. Naylon gibi bir malzemenin keşfi ve o dönemde bir kimya şirketi tarafından ticari üretimi, sentetik elyaf endüstrisinin gerçek başlangıcını ve polimer malzemeler çağının başlangıcını işaret etti. Naylon, dünyaya ipeğin özelliklerine sahip muhteşem bir yeni malzeme olarak geldi; lüks bir mal olarak küresel olarak ihraç edildi. Naylonun bilimsel ve ticari olarak büyük etkisi nedeniyle, insan yapımı makromoleküler bileşiklerden yabancılaşmış modern poliamidlerin gelişim tarihini izlemek mantıklıdır[48].

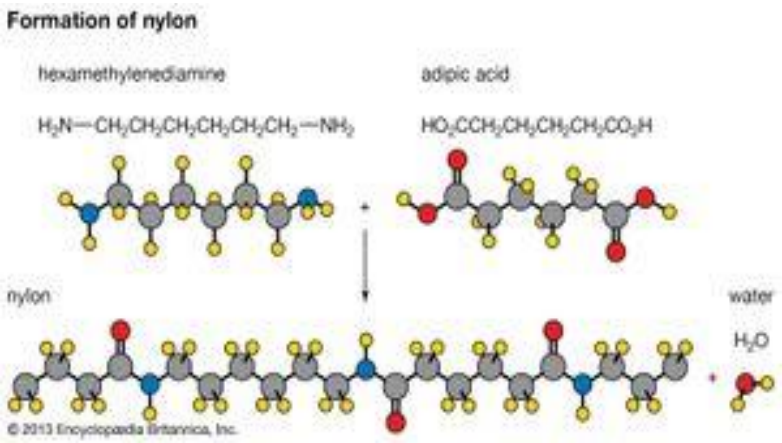
Günümüzde naylon olarak adlandırılan bir iplikçiğin keşfi, polimer bilimi alanında tarihi bir dönüm noktasıydı. 1935 Şubat'ında geç bir gecede DuPont Deney Laboratuvar'ında keşfedildi. Çok içe dönük bir kimyager ve Organik Ekip şefi olan Wallace Carothers, yaklaşık beş yıldır elyaf oluşumu üzerine disiplinler arası bir araştırma programında çalışıyordu. Wallace Carothers akşam yemeğinden sonra laboratuvara girdi ve ayrıldığında masasına geri döndü ve "Polim-oksibenzil-metilenglikol-vetronitril: Doğrusal Polimerik Madde ve Elyafı" yazan bir kapak sayfasıyla dört sayfalık laboratuvar raporunu yazdı. Bugün bu iplikçiği naylon olarak biliyoruz. Carothers bunu saf kimyasal formüllere indirgedi. Peki Carothers'ın o gece geç saatlerde keşfettiği bileşik olan polimerler, monomer adı verilen daha küçük temel birimlerden oluşur. Her 60.000 - 90.000 $C_6H_{11}NO$ monomeri, e-kaprolaktam, amid gruplarıyla birbirine bağlanarak 1:1 stokiyometrik N ve O oranında tekrar eden amid gruplarıyla H(2n+n) +((Nn=2) O)n zinciri oluşturur. Zincir doğrusal olabilir veya farklı boyutlarda yan gruplara sahip olabilir. Her bitişik halkayı yukarıdan aşağıya doğru geçirerek birleştirdiğimiz çok uzun bir zincir bağlantı çiti dizisi gibidir. Polimer, tekrar eden birimleri arasında bir amid grubu olduğu için poliamid olarak adlandırılır [49].

Naylon keşfi, bir laktamın halka genişletilmiş bir formu üzerinde yapılan deneylerden sonra geldi. Bu kimyasal, daha sonra bundan yararlanacak olan bazı çok özel özelliklere sahip bir elyafa yol açtı. O zamanlar "oldukça basit" olarak adlandırılan bu şey, gerçekten de bazı dikkate değer özelliklere sahipti. Bu, esneyen, kırışmaya ve lekelenmeye karşı dayanıklı, kuruduktan sonra kolayca yıkanabilen ve ipek veya yün dokusuna sahip tek sentetik lifti ve hala öyledir. Aynı derecede önemli olan, sertliği, düşük maliyeti ve UV kararlılığı, onu diş fırçası kıllarından paraşütlere ve askeri çuval bezine kadar çok sayıda uygulama için uygun hale getirmiştir. Sahip olduğu çeşitli özellikler nedeniyle, bu lif

giyim ve tekstildeki hemen hemen her ütüsüz, suya duyarlı lifin yerini alma yeteneğine sahipti. Sonuç olarak, savaş sırasında büyük miktarda kaprolaktam mevcut hale geldi çünkü hükümetler büyük miktarlarda naylon yanmaya ve aleve dayanıklı lastik kordu ve kumaşı üretmek için neredeyse saf kaprolaktam kullandılar. Mühendislerin sıkı çalışması, naylon lastik kordu ve kumaşını 1944'e kadar tank ve uçak lastikleri ve kumaşı için standart haline getirdi. Savaşın ardından, 3 ila 6 karbon arasındaki saf moleküllerin geleneksel eriyik eğirmesinde yapılan daha fazla iyileştirme, naylon plastik kalıplama reçinelerinin ticari olarak tanıtılmasına yol açtı. Bu iyi konsolide ürünler, tonaj bakımından dünyanın en büyük üretilen termoplastik malzemesi haline geldi [50].

3.1.3. **Poliamidlerin Kimyasal Yapısı ve Özellikleri**

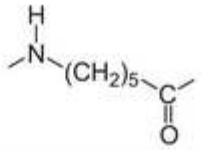
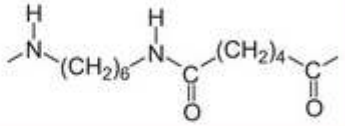
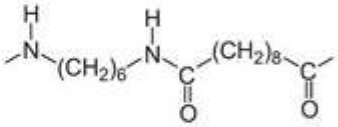
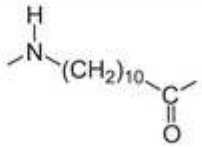
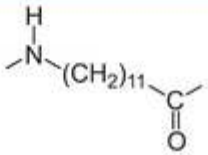
Poliamid malzemelerin avantajlarından biri yüksek çalışma sıcaklıklarıdır. Çeşitli çözücülere ve kimyasallara karşı oldukça dirençlidirler, dayanıklı ve serttirler ve iyi dielektrik özelliklere sahiptirler. Dezavantajları arasında, işleme ve çalışma koşullarında kullanımlarında ek zorluklar getiren higroskopiklik yer alır. Sentetik poliamidler, ana makromolekül zinciri boyunca yer alan sonsuz sayıda tekrarlayan fonksiyonel gruba sahip doğrusal makromoleküler bileşiklerdir. Hem bir diamin veya bir amino asit ve bir diasitin reaksiyonuyla hem de organik laktamların polikondensasyon reaksiyonuyla üretilirler. Ayrıca amid ester, üretan amid ve diğer amid bileşikleri gibi çeşitli kopolimerler sentezlenir. Poliamidlerin kimyasal yapısı ve özellikleri ile elyaf üretiminin farklı teknolojik parametreleri, kullanılan monomerlerin kimyasal yapısına ve polimer zincirinin yapısına önemli ölçüde bağlıdır. Önemli bağ enerjileri ve molekülün önemli esnekliği nedeniyle poliamidler, homo, ko veya terpoliamid amidlerin en yaygın biçimi haline gelmiştir. Ancak kural olarak yapılarında amid grupları bulunan poliamid malzemeler iyi mekanik ve termal özelliklere sahiptirler [51].



Şekil 3.1 PA Polimerinin Kimyasal Yapısı[7].

3.1.4. **Poliamidlerin Moleküler Yapısı**

Moleküler yapı, polimerik malzemelerin özelliklerinde önemli bir rol oynar. Moleküler yapı, kimyasal bileşim ve tekrar eden birimlerin geometrisi tarafından yönetilir. Her iki özellik de polimerleri sınıflandırmak ve birbirleriyle ilişkilendirmek için kullanılır. Buna göre, moleküler özellikler hakkındaki bilgiler, kullanılan monomerik birimleri analiz ederek ve uygun bağlantılar oluşturmak için monomer düzenlemelerini detaylandırarak elde edilir. Bu detaylı konumlarla desteklenen son derece düzenli bağlantılar, yüksek moleküler ağırlıklı polimerik malzemelere yol açabilir ve bu da mükemmel mekanik özellikler sağlar. Aromatik poliheteroarilen polimerleri ve poli(trimellitimidler), mükemmel termal kararlılık ve çekici mekanik özellikler sergiledikleri için bu tür polimerlere örnektir.

Polyamide (nylon)	Repeating unit
6	
6,6	
6,10	
11	
12	

Şekil 3.2 Poliamid Türlerinin Kimyasal Bağ Yapısı[8].

Poliamid oluşumu, öncülleri veya öncül karışımlarını ayrışmanın hemen altındaki bir sıcaklıkta ısıtarak meydana gelir. Bu bazen polikondensasyon ve poliadisyon sırasında serbest bırakılacak kuvveti nötrleştiren termodinamik dengeye neden olabilir. Polimer oluşumu sırasında üretilen kuvvetler arasındaki farklar, polimer yapısını etkileyebilir ve bu da malzeme özelliklerini belirler. Tecoflex eşdeğer olmayan tekrar birimlerine sahipken, polimer bileşeninin sinterlenmesinden elde edilen poliamid, tekrar eden amin ve asit bileşenlerini bağlayarak oluşan daha fazla eşdeğer amid bağlarına sahiptir. Bu topolojik hususlar, bozunma tiplerini ve yeniden birleşme yollarını sınırlar ve sonraki elastomerik özellikler modüle edilir [52].

3.1.5. **Poliamidlerin Sentezlenmesi**

Sentezler genel olarak uygun reaktiflerin veya yöntemlerin uygulanmasıyla atom gruplarının kimyasal veya fiziksel değişimlerinin yönü olarak özetlenebilir. Bu nedenle poliamitler Fisher-Ziegler yöntemi, hekzametilen-diamin, adipik asit, b-amino asitlerin

polimerizasyonundan sonra w-aminokarboksitanın w-aminoester ile polikondensasyonu, anyonik polimerizasyon veya enzimatik polimerizasyon gibi çeşitli yöntemlerle elde edilebilir. Ancak, en sık olarak hidroklorik asit ve suyun ortadan kaldırıldığı her iki bifonksiyonel monomerin (asit ve amin) reaksiyonu yoluyla sentezlenirler. Bu reaksiyon genellikle yükseltilmiş bir sıcaklıkta hava/oksijenin erişimine karşı korunan bir atmosferde gerçekleştirilen başlangıç monomerlerinin polikondensasyonlarına dayanır.

Poliamid sentezinin karmaşık sürecinde kullanılan birkaç önemli katalizör vardır. Bu katalizörler üç geniş gruba ayrılabilir: inorganik katalizörler, organik veya çözücü bazlı katalizörler ve enzimler. Bu bileşiklerin sadece stokiyometrik olarak dengelenmesi değil, aynı zamanda nihai ürünün saflığının herhangi bir kontaminasyonunu veya tehlikeye atılmasını önlemek için zamanla etkili bir şekilde uzaklaştırılması da önemlidir. Bu noktayı daha iyi açıklamak için, α-amino asitlerin ve laktamların polikondensasyon süreçlerinde rol oynayan trietilamin'i belirli bir örnek olarak ele alabiliriz. Ek olarak, bu sentezde yer alan kimyasal reaksiyonlar, farklı basınç seviyeleri, vakum uygulaması veya inert bir atmosferde dahil olmak üzere çeşitli koşullar altında gerçekleşebilir ve tüm bunlar, kullanılan monomerlerin konsantrasyon seviyeleri üzerinde sıkı bir kontrol sağlarken gerçekleşir[53].

Nihai ürünün özellikleri ve kalitesi, doğrudan bu reaksiyonların sonuçlarından etkilenir ve bu da büyük ölçüde, söz konusu monomerlerin stereokimyası, seçilen belirli reaksiyon koşulları ve sıcaklık ve sıcaklığın yükseltildiği hız gibi termal parametreler gibi faktörlere bağlıdır, hatta potansiyel olarak kademeli bir şekilde kademeli değişiklikler bile dikkate alınır. Dahası, monomerlerin kendilerinin oranları da oluşan polimerin ortaya çıkan özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar. Reaksiyon meydana geldikten sonra, reaksiyona girmeyen kaynakları ortadan kaldırmak veya bekleyen nihai ürünlerin belirli özelliklerini değiştirmek için ek işlemler yapılabilir. Bu işlemler, buharlaştırıcı damıtma veya polimerin başlangıçta alkol veya diğer uygun çözücüler içinde olduğunda kristalleştirilmesi gibi yöntemleri içerebilir. Başka bir yöntem, polimerlerin katı haldeyken kendi kendine kristalleştirilmesidir. Poliamidler için adlandırma kuralları genellikle sistematik bir yaklaşımı izler, burada kullanılan geçitlere, sentezlerinde kullanılan monomerlere göre belirlenir ve amid monomerleri genellikle genel işlemi kapsayan standart bir sentez reaksiyon şemasına göre raporlanır [54].

3.1.6. **Polikondenzasyon Reaksiyonları**

Poliamid teknolojisi şu anda poliamidlere, kademeli polikondenzasyonlar veya poliadisyonlar veya döngüsel monomerler ile lityum amidler, lityum imidler ve bunların karışımları arasındaki zincir yürüyüşü kaydırma bazlı reaksiyonlar ile sürekli zincir kırılması ve zincir yeniden yönlendirmesi altında zincir uçları veren olası moleküler ağırlıklar sağlar. Polikondenzasyon, farklı die-elektrofillerin iki ayrı kombinasyonunun farklı diol-nükleofillerin iki ayrı kombinasyonuyla reaksiyonunu içerir. İki ayrı kombinasyonun her biriyle, genel ortalama moleküler iyonlar sıcaklık ve zamanın çok temel kontrolü ile kolayca yönlendirilebilir ve yönetilebilir. Bir dizi on yıllık poliamid türü veya naylon tozu karışımı, ribonlar ve muhtemelen var olan, çoğunlukla gerçekte, içsel olarak kararsız uç bloklarına sahip çeşitli uç bloklu bileşikler, polikondenzasyon ile bugün hala başarıyla dönüştürülmektedir. Bunlar, katalizör nötr koşullarda ilgi çekici olabilir, bildirim uyarınca: ticari marka hakları ve/veya patentler bazı belirli polimer kombinasyonlarına uygulanabilir. Bu lisanslarla, gerçekte, yeni keşifler ve geliştirmeler serbestçe yapılabilir. Poliamidleri sentezlemenin ikinci seçeneği genellikle polikondensasyon olarak adlandırılır ve saf polikondensasyonları gerçekleştiren ilk seçenektir. Diğer çalışmalardan bağımsız olarak, başka bir grup naylon 66'nın poliamid polikondensasyonunu sundu. Birkaç tipik poliamid polikondensasyon yolu mümkündür, dikarboksilik türevlerden (iki işlevselliğe sahip) başlayarak, amin işlevleri birincil, ikincil veya üçüncül olabilir. Ekzo-term ve elektronegatif iç difüzyon, proton dönüşünden ve katyon karşılaştırmalı ekzo-term difüzyonundan her zaman daha kolay ve daha hızlıdır, grupların boyutlarına ve etkilerine bağlı olarak kolay veya zor olabilir ve endosiklik katyonların ters halka formundan halkalı türleri ileri halka formundan daha hızlı açmasına yol açar. Böyle bir tautomerik reaksiyon çok hızlı ve geri dönüşümlüdür. Ayrıca termal olarak geri dönüşümsüzdür, çünkü ΔH değeri sıfıra eşit veya sıfırdan büyüktür. İleri endosiklik dörtlü ve ters endosiklik dublet, ters amino grubunun endosiklik katkısı nedeniyle ekzosiklik homologlarından çok daha kararlıdır, yani köprüdeki yalnız çift kısmen iki bağlanmayan elektron çifti haline gelir, ancak sterik engel nedeniyle birbirlerine yakın kalırlar. Daha hızlı endosiklik reaksiyon, ekzosiklik yoldan çok daha hızlı ve daha kolay gerçekleşir [55].

3.1.7. **Poliamidlerin Uygulama Alanları**

Uygulama alanı çok geniştir. Bu doğrudan en büyük alanla başlar: tekstil. Poliamid lifler

ince ve kalın filament sektörlerinde bol miktarda kullanılır. Uzun elyaf alanlarında kullanım için henüz hiçbir malzeme ikame edilmemiştir, en azından teknolojik kriterler açısından: mukavemet ve boya emilimi açısından son zamanlarda geliştirilen sentetikleri bile geride bırakabilirler. Orta dikişte, özellikle polyester, ancak aynı zamanda polipropilen, bu yönde ilerlemektedir. Tamamen alifatik bir poliamidin piyasaya sürülmesi, muhtemelen bu alanda ticari uygulamalardan daha fazlasını değiştirecektir. Şu anda, böyle bir ürün yalnızca poliamidlerin gelecekteki potansiyelinin bir örneği olarak hareket etmektedir. Şimdiye kadar retrograd eğirmede kullanıma uygun çok az malzeme geliştirilmiştir, ancak tetrapoliamid halihazırda faz sınırları birleşmesi kullanılarak küçük miktarlarda üretilmektedir.

Poliamidler için ikinci önemli konu lisanslama alanıdırlar. Hafiflikleri ve sağlamlıkları, plastikleri otomobil endüstrisinde öne çıkarır ve otomobil pazarındaki net iyileştirmelere birçok ince yolla katkıda bulunur. Öncelikle, harici bir güvenlik geliştirme unsuru vardır - ön cam yıkama tankları genellikle poliamid kompozit karışımı içerir. Ayrı ayrı muhafaza edilen, sert tankların yerini alırlar ve küçük bir çarpışma meydana gelirse, hasar verici kuvvetler daha fazla yapısal elastikiyete sahip daha geniş bir alan boyunca emilir, böylece bir tür yüksek enerjili emici önceden oluşturulur. Tahrik açısından, dağıtımda yer alırlar - yağ kanalları geleneksel olarak metalden yapılır ancak oldukça hızlı bir şekilde karmaşık akış şemalarının tasarlanmasına ve daha eşit bir sıcaklık dağılımının teşvik edilmesine olanak tanıyan poliamid olanlarla değiştirilmektedir. Plastik alanının güvenlik kısmında, yarı aromatik siyanodiamin brülör parçaları üretiminde yer almıştır. Rilsan, özellikle neredeyse sert akışının çok iyi derinlik kontrolü sağladığı yuva kalıplarında benzersiz bir şekilde uyarlanabilirdir. Rilsan baskılı ambalajlar için sıcak eriyiğe yapıştığı için daha az kullanışlı olabilir [56].

PA 6, mükemmel termal ve mekanik özellikler sunan ve olağanüstü bir fiyat/performans oranına sahip olan bir üründür. Bu özellikleri sayesinde, birçok sektörde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde, ayna muhafazaları, jant kapakları, motor pervaneleri, dış paneller, motor kapakları, koltuk gövdeleri gibi birçok parçada kullanılmaktadır. Aynı zamanda taşınabilir el aletleri, ofis mobilye gövdeleri, beyaz eşyalar ve transformatörler gibi ürünlerde de kullanılmaktadır. PA 6, levha veya kütük şeklinde tedarik edilebilir ve metal tezgahlarda kolaylıkla işlenebilir. Torna tezgahında yüksek hız kullanılarak temiz ve pürüzsüz bir yüzey elde edilebilir.

Polyamid 6 ve polyamid 66 tipleri, makaralar ve sessiz dişlilerle birlikte makine alanında

kullanılır. Ayrıca mekanizmalar, contalar, halka contalar, amortisör tertibatları, musluk ve vana contaları, bilyelı ve iğneli valf ve kapak yatakları, rulmanlar, kasnaklar gibi birçok parçanın üretiminde kullanılır. PA 6 ayrıca birçok endüstriyel sektörde de kullanılır. Bu sektörler arasında makine yapımı, taşıma ekipmanları, inşaat makineleri, tekstil makineleri, gemi yapımı, otomotiv endüstrisi, madencilik, gıda endüstrisi ve medikal cihazlar bulunmaktadır. PA 6, sert ve dayanıklı bir malzemedir ve geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

Şekil 3.3 Poliamidlerin Hava Yastıklarında kullanımı[8].

PA 6 ayrıca tekstil sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadır. Baskı silindirleri, ütüleme, renklendirme, boyama gibi işlemlerde kullanılan çeşitli rulman sistemleri, dişliler, kızak rayları gibi parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Poliamidi bir malzeme ailesi olarak ayıran şey her zaman bir "yeşil vadi metaforu", bir hassas sistemler portföyü ve çeşitli yüksek performanslı ürünler repertuvarının birleşimi olmuştur. Tekstil uygulamaları, poliamidin bu başarılı karışımının en ikna edici örneğini vermesine büyük ölçüde katkıda bulunmuştur. 1930'lar ile 1960'lar arasında önemli değişikliklere uğramayan ve şu anda yılda yaklaşık 33 milyon tonluk toplam üretim kaydeden bir tekstil malzemeleri ailesinin kullanılabilir hale gelmesinden sonra, tekstil segmentinde muhtemelen daha zayıf ve bir şekilde ihmal edilebilir bir dönüşüm olacaktır. Birkaç

özellik, poliamidleri ilk bakışta "yüksek performanslı" lifler arasında konumlandırır. Her şeyden önce, kopma mukavemeti değeri, yapısal ve mikro yapısal faktörlere bağlı olarak bazı istisnalar dışında 40 MPa'ın üzerindedir. Çoğu poliamid elyaf, büyük ölçüde %10-12'nin üzerinde kopma uzaması gösterdiğinden, bunlar da göreceli olarak 65 MPa'a yakın değerlerle "yüksek modüllü" elyaflar olarak kabul edilebilir. Aşınmaya karşı direnç, kristalin fazın bu tür elyafların yapısına katkıda bulunduğu kısmi anizotropi sayesinde genellikle yüksektir ve bu nedenle bunlar doğru bir şekilde "yarı kristalin" olarak tanımlanır. Amorf fazın cam geçiş sıcaklığı, bu elyaf sınıfı için mevcut en yüksek değerlerden biridir, yığın değeri çoğunlukla oda sıcaklığına yakındır, ancak elyaf yapısına ve elyaf eğirme işlemine bağlı olarak tutarlı farklılıklar vardır [57].

Bu nedenle, uygulama perspektifinden, amorf fazın cam geçişi pek ilgi çekici değildir. Elyaf uygulamaları için, bir diğer önemli özellik, kristalin düzenin sıcaklığa ve çekme oranına bağımlılığıdır ve bu da 28-20 J/g'lık özgül aralıktaki değerlere yol açar. Bahsedilmesi gereken bir diğer özellik, özellikle daha fazla geliştirme aşamasındaki malzemeler için kullanım konforu gibi pratik uygulamalar için önemli olan tek eksenli yükleme altında zamanın özelliklere katkısıdır. Birçok uygulamada bir diğer son derece arzu edilen özellik, yukarıda belirtilen olayların yaklaşık 80 ila 190 °C arasında değişen bir sıcaklık aralığında meydana gelmesi ve işlenebilirlik gibi diğer tüm yaşam özellikleriyle ortak bir takas hızına göre seçilebilmesidir. Son olarak, yapı ile birleştiğinde davranışıyla ilgili olarak suya karşı nispeten yüksek afiniteyi dikkate almaya değer, bu da genel olarak iyi bir karbonil grubuna izin verir. Dokulu poliamid lifler, sürekli ve uzun sonsuz liflerden oluşur, ancak liflerin belirli dokulandırma işlemlerinde modifikasyonundan kaynaklanan, filamentler arasında veya paralel veya birleştirme yönünde iki farklı iplik arasında oldukça kıvrımlı ve iç içe geçmiştir. Bu tür ürünün birçok farklı işlemi içeren birçok çeşidi vardır. Hidrofobik yüzey ve hava geçirgenliği, kullanımda konfor ve tıbbi sektörde parça oluşturma iletkenliği, pansuman ve bandajlama için özel dokuma kumaşlarda olduğu gibi iyileştirmeler sağlar. Önceki özelliklere ek olarak, düz veya kumaş yapısında çözgü veya atkı yönünü oluşturan bu iplik, masa örtüleri gibi yüksek kaliteli kumaşların üretilmesini sağlar. Gıda endüstrisinde ise şaftlar, vidalar, spiraller, yıldız dişli vericiler, mekanik bileşenler gibi birçok parçada kullanılır. PA 6 ayrıca endüstriyel sektörlerde de çeşitli yerlerde kullanılır. Bu alanlar arasında makaralar, burçlar, rulman bilezikleri, kayar bloklar, koruma şeritleri, eğimli ve alın çarklı çarklar, vidalar, valf yatakları ve kesme plakaları gibi parçalar yer almaktadır.

Elektrik endüstrisinde ise elektrik fişleri, anahtarlar ve iletkenlerde kullanılmaktadır. Sonuç olarak, PA 6 çok yönlü bir malzeme olup birçok endüstriyel sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Termal ve mekanik özelliklerinin yanı sıra mükemmel fiyat/performans oranı, PA 6'yı tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir. Otomotiv endüstrisinden tekstil sektörüne, elektrik endüstrisinden gıda endüstrisine kadar, PA 6 birçok parça ve bileşenin üretiminde kullanılmaktadır [58].

Otomotiv Endüstrisi, yıllar boyunca polimer ve plastik kullanımında istikrarlı bir kar artışı, otomotiv endüstrisi için uygulanabilir bir pazar potansiyeli sağlamıştır. Bu nedenle, poliamid varyasyonlarını telafi etmek, otomotiv endüstrisi yeni kompozit geliştirmeden yararlanmaya hazır itici güçlerden biri olduğundan, belirli uygulama için gereken beklentileri karşılamalıdır. Poliamidlerin otomobil endüstrisi için çok çekici olmasının en önemli teknik nedenleri, hafif ve termoplastik işlemelerine dayanmaktadır. Yakıt verimliliği, kullanım dinamikleri, yüksek güç yoğunlukları ve aracın çevikliği dikkate alınarak hafif tasarım öğelerinin birleşimi, otomotiv endüstrisini termoplastik malzemeleri ve endüstri içindeki sürekli gelişmeleri araştırmaya teşvik etmektedir.

Poliamidler, dolgu nitelikleri, elastikiyetleri, darbe özellikleri ve ısı dirençleri nedeniyle özeldir. Çeşitli ön ve kaput altı bileşenleri, yüksek termal özellikleri nedeniyle PA6 ve PA66'dan yapılmıştır. Otomotiv uygulamalarında, tatmin edici ve kararlı mekanik özellikler elde etmek için polietilen glikol tereftalat ve poliamidler kullanılabilir. Enjeksiyon kalıplama yüksek üretkenliğe, iyi şekillendirilebilirliğe ve yüksek boyutsal doğruluk ve düşük maliyetle karmaşık parçaları seri üretme yeteneğine sahiptir, ancak aynı zamanda yüksek sıcaklıklar, basınç, kesme ısıtması ve uzama gerilmeleri içerir. PA66, orta sertliği, tokluğu ve yüksek ısı direnci nedeniyle otomotiv iç parçaları yapımında kullanılır. PA66, hem mekanik özellikler hem de kısa vadeli termal performans açısından otomotiv uygulamalarında genellikle PBT'den üstün kabul edilir. İlk endüstriyel uygulama, yapısal parçaların ve ön uç modüllerinin imalatıdır. PA66'nın darbe performansı nedeniyle orta seviye darbeler de kapı yan koruması ve hava yastığı kapılarının imalatı için uygundur. PA66-TiO_2 karışımının malzeme özellikleri mükemmeldir. PA66-TiO_2 karışımının ve cam elyaf takviyeli malzemelerin ısı sapma sıcaklığı, çekme modülü ve çekme mukavemeti, cam elyaf takviyeli malzemelere göre yüksek sıcaklıkta daha iyidir. Son zamanlarda, modifiye poliamitler, çekme bağlantı malzemeleri için en iyi seçimlerden biridir. Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan güçlendirilmiş poliamidler, yaya güvenliği ve tampon uygulamalarında

çarpışma kutularının enerji emme kapasitesini artırır. Malzeme, performansı ve araç sıcaklığını düzenlemeye yardımcı olan motor bölmelerinde popülerdir. Çeşitli şekillerin işlenmesi ve üretilmesi kolaydır ve yüksek kaliteli bir yüzeye sahip olup kararlıdır. Poliamidler, yüksek enerji emme verimliliğine sahip oldukları için hava yastıkları gibi güvenlik uygulamaları için kullanılmaktadır. Büyük OEM'ler, bu özellikleri gelecekteki araçların tasarımına dahil etmekle en çok ilgilenmektedir. Bir otomobilin sürdürülebilirliği söz konusu olduğunda, yalnızca bir aracın performansına fayda sağlamakla kalmamalı, aynı zamanda çevreye de yardımcı olmalıdır. Poliamidler, genellikle otomotiv, endüstriyel ve tüketici tabanlı çeşitli uygulamalarda çok yönlü olarak görülmektedir. Genel olarak, poliamidlere olan ilgi yukarıda listelenen tüm nedenlerden dolayı artmıştır. Otomobil satışlarının, gelecekteki otomobillerin tasarımında poliamidlerin varlığını artırması muhtemeldir[59].

3.1.8. **Poliamid Teknolojisindeki Gelişmeler ve Yenilikler**

Son yıllarda, uygulama odaklı araştırmalar giderek daha fazla malzeme tabanlı yeniliklere ve nanoteknolojinin dahil edilmesine odaklanmıştır. Nanopartikülleri ve nanotüpleri inorganik dolgu maddeleri olarak yeni kristal yapı sentetiklerine ve polimer malzemelere entegre etmek, gelişmiş özelliklere sahip poliamidler gibi kompozit sistem geliştirmelerine yol açmıştır. Endüstriyel uygulamalarda, araştırmacılara çeşitli alanlarda mukavemeti ve elastik davranışı iyileştiren çözümler sunulmaktadır. Partikül nano kompozitler çeşitli pazarlara hizmet eder ve demiryolu altyapısı, otomotiv ve elektrik mühendisliği gibi çeşitli sektörlerde kullanılır. Bu gelişmeler genellikle nano ölçekli dolgu maddelerinin eklenmesi nedeniyle artan bir yaşam döngüsü ile karakterize edilir ve müşteri ve tüketici alışkanlıklarında değişikliklere ve ilişkili araştırma ve işletme yapıları üzerinde etkilere yol açmıştır.

Parçacıkların nano ölçekli modifikasyonları ayrıca foto katalitik etki gibi yeni varlıklara sahiptir. Bu, fiziksel özellikleri geri kazandırabilir, yüzeyleri kaplayabilir, malzemeleri koruyabilir ve kaplamalı enerji tasarruflu cam oluşturmak için ilk nano yapılı filmleri olumlu yönde etkileyebilir. Dahası, endüstriler teknik veya biyolojik uygulamalarda kullanım, bakım ve verimlilik için ek işlevlere ve önemli basitleştirme veya iyileştirme etkilerine büyük değer verir. Zaten bugün, yeni işlevler sunan entegre elektronik bileşenlere sahip akıllı malzemelere önemli bir vurgu yapılıyor. Sonuç olarak, poliamid teknolojisi yalnızca daha yüksek performans ve iyileştirilmiş işlenebilirlik, maliyet ve

yüzey özellikleri içermeyecek, aynı zamanda malzemenin işlevsel potansiyeli açısından spektrumunu daha da genişletecektir. Mevcut montajlar tıbbi, otomotiv, havacılık ve robotik sektörlerindedir ve hem grafit matris hem de poliamidin önemli alanlar olduğu yaygın olarak pazarlanmaktadır [60].

3.1.9. **Poliamidlerde Nanoteknoloji**

Nanoteknoloji ve özellikle alt disiplini olan nano malzemeler, çok kullanışlı ve geliştirilmiş özelliklere sahip metal ve plastik benzeri poliamid yapıların geliştirilmesi için yeni çözümler sunar. Nano yapılı metal oksit ile poliamidlerin kompozitleri, mekanik ve elektriksel özelliklerini korurken polimerlere daha az yanıcılık sağlar. Poliamidlerin, özellikle poliamid 6 ve poliamid 6.6'nın özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak füme nano silika kullanılır. Nano silika/poliamid kompozitlerinin ısı sapma sıcaklığı, Young modülü, depolama modülü, akma dayanımı ve akma gerilimi gibi özelliklerinin silika içeriğinin artmasıyla arttığı gösterilmiştir. Nano silika takviyeli poliamidler homojen bir yapıya, iyileştirilmiş ısı sapma sıcaklığına sahiptir, hafiftir ve havacılıkta potansiyel uygulamalara sahiptir. Aktivatör veya çekirdekleştirici ajan olarak nano partiküller poliamidlerin kristalleşme hızını ve kristalliğini artırarak daha yüksek mukavemet, azaltılmış yanıcılık, geliştirilmiş bariyer ve elektret özellikleri, seçici şekil değiştirilebilirlik ve geliştirilmiş tribolojik ve termal davranışlar gibi iyileştirilmiş özelliklere sahip nano partikül modifiye poliamidler elde edilir. POE/volkanik kaya poliamid 6 ve 6/66 kompozitleri mikro elektronik cihaz paketlerinde kullanılabilir. Bazı elektronik ve entegre opto elektronik cihazlar ısı transfer eden yalıtım alt tabakası olarak düşük dielektrik sabitli bir polimer gerektirir. Poliamid 6 ve poliamid 12'nin yüzeyi modifiye edilmiş-yükseltilmiş nanokil takviyeli nano kompozitleri elektronikler için paketleme malzemesi olarak uygulamalar bulur. Bu malzemeler CO_2, H_2O ve O_2'nin geliştirilmiş bariyer özelliklerini sergiler[61].

3.1.10. **Poliamidlerin Çevresel Etkisi ve Sürdürülebilirliği**

Poliamidlerin üretimi enerji ve kaynak gerektirir. Poliamid 6 ve poliamid 6.6, polimerizasyon asit klorürler, kobalt hidrokarbiloksit veya diğer metalik katalizörler tarafından katalize edildikten sonra esas olarak kaprolaktam ve heksametilendiaminin amonolizi yoluyla üretilir. Ancak, bu aktif metal katalizörler polimerden uzaklaştırılmalıdır. Bu adım, eklenen katalizörün kaybı nedeniyle ekonomik olmamakla birlikte, uzaklaştırma sırasında çevreye salınan çeşitli kirleticiler nedeniyle

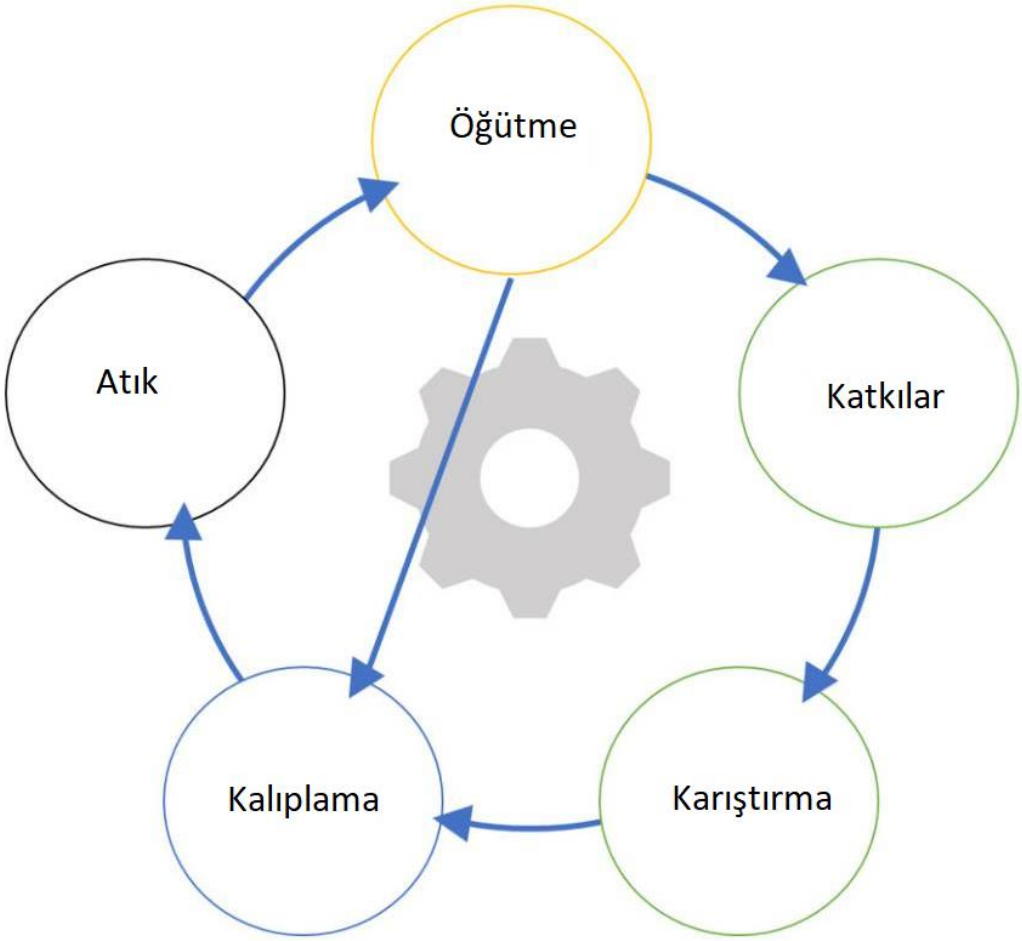
sürdürülebilirlik açısından da dezavantajlıdır. Geleneksel üretim yollarında, HCl'nin yanı sıra az miktarda N_2O, amonyak, klorlu atık ve isin çevreye salındığı unutulmamalıdır. N_2O, metanın parçalanmasını engeller ve sera etkisine katkıda bulunur. Fosil yakıt kullanımı, PVC ve PP gibi diğer polimerlerle karşılaştırıldığında nispeten düşük bir miktardan daha fazla olan CO_2 salındığı için küresel ısınmaya da katkıda bulunur. Poliamidler ve dönüştürülmüş elyaf malzemeler ve tekstiller özünde kararlı olduğundan, kullanılmış ve atılmış poliamidlerin yakılması, ozon ve peroksiasetil nitrat gibi uçucu fotokimyasal olarak üretilen ürünler oluşturmak için fotokimyasal olarak reaksiyona giren uçucu organik bileşikleri serbest bırakabilir. Buna göre, sürdürülebilir ve ekolojik yöntemler, hava, su ve toprak üzerinde daha çevre dostu etkilere sahip olması gereken poliamidlerin yanı sıra karşılık gelen poliamid bazlı malzemeleri üretmek için yeni ve alternatif yaklaşımlara ihtiyaç duymaktadır.

Yeni teknolojiler ve araştırma çalışmaları, gelecekte ihtiyaç duyulan doğal kaynak miktarının ve mevcut üretim yöntemlerinin yarattığı kirliliğin azaltılabileceğini vaat ediyor. Biyolojik olarak parçalanabilir plastikler bazı firmalarda 30 yıldır mevcuttur. Nişasta, kopoliamid gibi biyolojik olarak parçalanabilir plastikler oluşturmak için kullanılan ilk hammaddelerden biriydi. Bu poliamid türlerinin özellikleri, çeşitli uygulamalar için kullanımını teşvik etmektedir. Ancak, bu tür gıda sübvansiyonları ekilebilir arazilerin kullanımında bir çatışmaya, gıda bitkilerinin yetiştirilmesinde azalmaya yol açar ve böylece birçok az gelişmiş ülkenin aç kalmasına katkıda bulunur. İnsan hayatının, doğanın ve onlara verilen yaşam haklarının değeriyle tutarlı değildir. Minimum üretim atığı, biyolojik olarak parçalanabilir polimerlerin ve diğer çevre dostu biyopolimerlerin karışımlarından oluşur. Ham maddeleri kurtarmak için geri dönüşüm, örneğin naylon atıklarından poliamid üretmek ve elyaf üretim artıklarını yeni poliamid bazlı elyaf yapmak için yeniden kullanmak alternatif bir seçenektir. Uluslararası anlayışı ve adil insan ve doğal kaynakların sömürülmesini teşvik etmek için denge ve analize ihtiyaç vardır. Gıda/reçine pazarlarındaki temel faktör doğru ortalamadır. Poliamid bazlı ürünlerin satın alınması veya kullanılması, emtia üretim sınırlarına ve adil insan ve insan olmayan davranışa göre yapılmalıdır. Endüstri, insan nezaketi ve farklı uygulamalar için poliamidler açısından samimi bir sosyal vicdanla poliamid üretimine girebilir. Kozmetik ve tekstil etiketlerinde sürdürülebilir ve doğal köken beyanını pazarlarken, pazarlamacılar bu davranışları izlemelidir. Doğayı kullanma ve ondan zevk alma hakkı temeldir ve sorumlu seçimler ve davranışlarla uyumlu olmalıdır. Poliamid üretim süreçleri, doğal

kaynakların korunması için bir engel olan büyük miktarda üretim kaybıyla ilişkilidir. Bu nedenle, poliamid ve keten tohumunun biyokompozitine dayalı bir biyopolimer olduğu için poliamid gibi poliamidlerin verimli üretimi gereklidir [62].

3.1.11. **Geri Dönüşüm ve Yenilenebilirlik**

Özetle bu bölüm, özellikle geri dönüşüm ve yenilenebilirliğe odaklanarak, ilgi alanındaki sürdürülebilir uygulamaları raporlamaktadır. Polimerleri ve bunların özel malzemelerini farklılaştıran belirli özellikler, zorluklar ve güçlükler ele alınmaktadır. Plastik atıklarla hiçbir şey yapılamadığında ve geri dönüşüm mümkün olmadığında, insanların atıkları uygun şekilde bertaraf etmelerini ummak yeterlidir. Plastik geri dönüşümü, varlıkların bir kısmını ilk büyük ölçekli Avrupa poliamid geri dönüşüm tesisini başlatmaya adama fikri hakkındaki tartışmada doğmuştur.



Şekil 3.4 Mekanik Geri Dönüşüm Aşamaları[9].

Geri Dönüşüm ve yenilenebilirliğe doğrudan plastik işleme atıklarının geri kazanımından veya arızalı naylon malzemelerle birleştirilmiş parça balyalarından başlayarak, iki paralel

mantığa göre çalışılabilir: birincisi, akış aşağı kalıplama işlemleri için uygun termoplastik bileşikler elde etmeyi amaçlar; ikincisi, doğrudan polimerizasyon için uygun monomerler elde etmeyi, saf monomere bir geri dönüşüm biçimini etkili bir şekilde uygulamayı amaçlar. Bazı uygulamalı kimyaya karşı daha geniş bir duyarlılık vizyonuyla ve her şeyden önce krizdeki insanlara değer verilmediğine inanarak, sürdürülebilirlik perspektifinden ilginç olanın, monomer kromatografisiyle doğrudan izlenemeyen karışık plastikten yeni malzemelere dönüştürülebilen daha fazla polimer elde etmek olduğuna inanılmaktadır. Gerçekten de, işlemeye uygun karışık bir polimer üretebilen, çeşitli bağlamlarda kullanılan ve orijinal hammaddenin sertifikasyonu için paylaşılan algoritmalarla polimer üretim zincirinin tabanında yer alan yeni granüller elde edebilen arıtma tesislerini optimize etmiştir. Poliamidlerin geri dönüşümü için birkaç proje finanse edilmiştir, bunların hemen hepsi işlenebilirlikle de birleştirilmiştir. Poliamid tekstil kullanımı için bize yakınsa, geri dönüştürülmüş poliamid aslında 3D baskı açısından neredeyse tek bir filamentte bulunur, burada saf poliamidin aynı performansları gerekmez, ancak rulmanlar, şişe açacakları, bardak altlıkları ve birçok bibloda olduğu gibidir. Yukarıda belirtilen projenin sonuçları, bugün itibariyle dünyanın her yerindeki balıkçı filolarında bulunan balıkçılık atıklarından başlayarak ve en büyük petrol dışı biyorafineri ve biyomedikal merkezi temsil eden bir ortam aracılığıyla naylonun yeniden üretilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Yeniden üretilen malzemenin kalitesi, Tarım sektörüne uygun çok yüksek kaliteli balıkçılık atıklarından kaynaklanmaktadır. Son yıllarda yürütülen ve kozmetiklerin küçük bir bölümünde tanıtılan aktif bileşenlerin içeriğini daha fazla test çalışması ve endüstriyel ölçek için optimize etmeyi amaçlayan çalışmalar sonucunda MAP'ye adanmış bir fizibilite projesi yeni finanse edilmiştir; burada ilk APC'den sonra boyanan aynı iplik liflerinden elde edilen makara, işlemi daha da çevre dostu hale getiren bir kumaş vermiştir ve bu, polimerlerin dairesel ekonomisinin sembolik ürünlerinden birinde de mevcuttur. Yarı-ihale ve sağlık uzun zamandır yüksek bir öncül olmuştur ve son çağrılar sayesinde plastik geri dönüşümü karşı konulamaz bir acil durum ve fırsat haline gelmiştir. Avrupa'da yağ fabrikaları ve bir pist ile yaklaşık 50 geri dönüşüm tesisi, sorumlu yöneticilerin dikkatini çekti. Polimer geri dönüşümünün devrimi ve tarihi, pandemiye karşı finanse edilen varlıkların kurtarılmasına yönelik dikkat konusundaki tartışmada doğdu [63].

3.1.12. **Poliamid Araştırmalarında Gelecek Beklentileri ve Ortaya Çıkan Eğilimler**

Yeni poliamid formülasyonlarının geliştirilmesi yeni uygulama alanları sağlamalı, aynı

zamanda ürünlerin çeşitli özelliklerini iyileştirmeli ve ekolojik olarak kabul edilebilir malzemeler olmalıdır. Disiplinler arası araştırma önemlidir ve teknoloji uzmanları, biyologlar, doktorlar, kozmetologlar, fizikçiler, bilgisayar bilimcileri, ziraatçılar ve ekonomistler arasındaki iş birliği gerçekten gereklidir. Poliamid uygulamalarındaki ortaya çıkan trendler şu yönleri izleyecektir: akıllı ve "zeki" malzemeler kullanan "ortak" teknolojilerden ileri teknolojilere; inorganikten metal parçacıklara ve ardından iletken kompozitlere ve nanokompozitlere; petrokimyasal bazlı poliamidlerin yenilenebilir ham maddelerden üretilen biyo-bazlı malzemelerle değiştirilmesi - "çevreci" malzemelerin üretimi; daha iyi bir yaşam tarzı sağlanması - hijyen normlarının uygulanmasıyla insan konforunun korunması; ve diğerleri. Poliamid uygulamalarının geliştirilmesindeki zorluklar şunlar olacaktır: "ortak" poliamid ürünlerine üstün özelliklere sahip biyo-bazlı malzemelerin yapıştırılması; endüstriyel ekolojinin değerlendirilmesi; ve ekolojik ve sürdürülebilir kalkınmaya saygı gösterilmesi. Gelecekte, "güç", "akıllı malzemeler", "yaşam tarzı" ve "sürdürülebilirlik" gibi gelecekteki anahtar kelimeleri göz önünde bulundurmalıyız. Yeni pazar ürünü geliştirmelerinin büyük bir kısmı "daha yeşil" formülasyonlardır ve son ürünler arzu edilirdir ve yeni trendler ve geleceğe dair daha bilinçli düşünceler açacaktır. Geleceğin tüketicilerinin giderek daha konforlu ürünler istemeleri bekleniyor ve bu nedenle ürünler kullanıcı tercihlerine ve davranışlarına daha iyi uyacak şekilde tasarlanacaktır. Önceki araştırmaların dayanıklılığı ve değerinin, atık geri dönüşümüyle ilgili yeni teknolojiler geliştirme, "yeşil" maddeler ve teknolojiler üretme konusundaki mevcut arzuda giderek daha az dikkate alınması talihsizdir. Bunlar "kolayca" ters etki yapan teknolojilere dönüşebilir. Bu aşamada, "biyopoliamid"in birkaç noktada "başarılmış araştırma" ile örtüşeceğini öngörebiliriz. Sentezde, tarih poliamidleri geliştirmenin yollarını araştırmaya devam ederken, kendimizi neredeyse 70 yıl önce olduğu gibi olan bir poliamid döneminin erken aşamalarında buluyoruz [64].

3.1.13. **Biyobozunur Poliamidler**

Biyobozunur poliamidler, çevre sorununa potansiyel bir anlık çözüm sunar. Petrol bazlı ham maddelerden üretilirler, ancak biyopolimerlerle aynı temel yapıyı paylaşarak daha öngörülebilir, özel özelliklere ulaşmayı ve mevcut süreçleri ve uygulamaları optimize etmeyi mümkün kılarlar, böylece aynı işlevi yerine getirirler. Mikroorganizmalar kullanılarak tamamen bozunabilirler, bu da onları uzun vadeli kullanımın mümkün olmadığı, gerekmediği veya ekonomik olarak makul olmadığı ve gelişmiş, ekolojik olarak daha yavaş ancak daha sürdürülebilir şekilde tasarlanmış değer zincirleri kurmanın henüz

mümkün olmadığı uygulamalar için iyi bir çözüm haline getirir.

Poliamidlerin kimyasal yapısı, yüksek enerjisiz koşullar altında oluştuğu gösterilen ve büyük bir enerji tüketimine sahip olan ve kolay biyolojik bozunma için radikaller şeklinde polimer yüzeyine daha iyi aktarılabilen amid bağlarını içerir. Bunlar şüphesiz dairesel bir biyo-ekonomiye doğru yolculukta potansiyel değer zinciri kısa yollarıdır ve bu, mevcut petrokimya ve plastik değer zincirlerinin çevresel ve sosyo-ekonomik etkilerini önemli ölçüde iyileştirebilir. Aşağıda birkaç ümit verici uygulama listelenmiştir: hayalet balıkçılığı önlemek için ağlar ve ipler vb. için kullanılan poliamidlerden yapılmış topikal olarak parçalanabilir parçalar.

Biyolojik olarak parçalanabilir poliamidler, kavitasyonla geliştirilmiş ilk parçalanabilirlik için polimer zincirinde önemli reaktif gruplar sunar ve toprak, su ve kompost koşullarında parçalanabilir oldukları bildirilmiştir. Ticari belediye kanalizasyonunda ilgili CO_2 kuluçka süreleri boyunca suda iyi parçalanabilirlikleri, iki farklı toprak veya biyokömür-hava koşulunda nispeten anoksik kompostta potansiyel biyolojik olarak parçalanabilirliklerini gösterir. Alifatik bazlı poliamidler, nemli biyo-kömür toprağında karşılık gelen çözünürlükle alifatik alkil zincir uzunluğunu artırarak çok yüksek bir parçalanabilirlik derecesine ulaşabilir. Polioksazolinler piyasada yeterince araştırılmamıştır; ancak poliüretanların yerini almak için mevcut kompostlama/polimer kimyası tabanlı anlatılara ustaca hizalanmalıdırlar [65].

3.2. TERMOPLASTİK ELASTOMERLER

Elastomerler gerilmediğinde amorf yapıya sahiptir ve çok elastiktir. Elastomerler iki ana sınıfa ayrılır: çapraz bağlı elastomerler ve termoplastik elastomerler. Çapraz bağlı elastomerlerde, elastomerik polimer, çapraz bağlama maddesi ve modifiye edici katkı maddeleri bulunur. Bu elastomerler birçok işlemle şekil verilebilir, ancak son adımda çapraz bağlama maddesinin ayrıştırılması gereklidir. Termoplastik elastomerler ise yeniden eritilebilir ve yeniden şekillendirilebilir. Bu elastomerlerin özellikleri, polimer yapısının çapraz bağlanmamış doğası nedeniyle sınırlıdır. Termoplastik elastomerler, bir baz polimerin başka bir organik veya inorganik madde ile karıştırılmasıyla elde edilir. Termoplastik poliüretan elastomerler (TPU) ve termoplastik polyester elastomerler (TPE) bu sınıfın örnekleridir. TPU, diizosiyanatlar, makroglikoller ve zincir uzatıcılar içeren üç bileşenden oluşur. TPU'nun sert segmentinde üretan gruplarının ayrışması, sıcaklık

arttıkça artar. TPE'lerde ise poli(bütilen tereftalat) ve poli(tetrametilen)in sert ve yumuşak segmentleri bulunur. TPE'lerin kristal alanları amorf yapıdaki elastomerik yumuşak segmentlere çapraz bağlanma sağlar. TPE'ler termoplastik işleme sırasında bütünlüklerini korurlar[93].

3.3. KAUÇUKLAR

3.3.1. Doğal Kauçuk

Doğal kauçuk, Hevea Brasilliensis ağacından elde edilen ve tropikal bölgelerde yetişen bir türdür. Vulkanize edilmemiş doğal kauçuğun mukavemeti yüksektir, ancak ozona, UV'ye ve yüksek sıcaklığa dayanıklı değildir. Doğal kauçuk otomobil lastikleri ve mekanik ürünlerin üretiminde kullanılır.

3.3.2. Polibütadien Kauçuk

Polibütadien kauçuk ise izopren dışındaki monomerlerin kullanımıyla sentetik olarak üretilir. Yüksek cis içerikli polibütadien kauçuklar düşük sıcaklık özelliklerine, iyi aşınma direncine ve yüksek elastikiyete sahiptir. Ancak ozon, UV ve yüksek sıcaklığa dayanıklı değillerdir. Polibütadien kauçuklar genellikle araç lastikleri, konveyör bantları ve ayakkabı tabanları gibi yüksek aşınma ve yıpranma gerektiren uygulamalarda kullanılır. Kauçuk karışım bileşenleri hakkında bu bilgiler, kauçuk ve lastik endüstrisinde kullanılan farklı kauçuk türlerinin özetini sunmaktadır.

3.3.3. Stiren Bütadien Kauçuğu (SBR)

Stiren bütadien kauçuğu (SBR), 1929 yılında E.T. Chunkur ve A. Bock tarafından bütadien ve stiren karışımının emülsiyon kopolimerizasyonuyla elde edildi. Ticari SBR'ler genellikle %23-40 stiren içerir ve moleküler ağırlığı 250.000-800.000 arasında değişir. Soğuk üretim ve sıcak üretim olmak üzere iki yöntemle üretilebilir. Soğuk E-SBR, sıcak E-SBR'ye göre daha iyi mekanik mukavemet, daha yüksek aşınma direnci ve dolgu maddesi kabul etme özelliğine sahiptir. S-SBR ise daha iyi dinamik özelliklere, daha düşük ısı üretimine ve daha kolay kontrol edilebilen moleküler ağırlığa sahip olup seyreltik asitlere ve alkollere, polar olmayan çözücülere dayanıklıdır. SBR, diğer polar olmayan kauçuklarla karıştırılabilir ve çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Özellikleri, işleme yöntemi ve dolgu maddesi miktarına bağlıdır. SBR'nin kullanıldığı uygulamalar arasında teknik malzemeler, kablolar, fren ve debriyaj balataları, şeffaf bantlar,

kalıplanmış parçalar ve sırt kauçukları bulunur[94].

3.3.4. **Akrilonitril Bütadien Kauçuk (NBR)**

Akrilonitril ve bütadienin kopolimerizasyonuyla üretilen NBR (nitril butadien kauçuğu) ürünleri düşük viskoziteye sahiptir ve işlemesi kolaydır. Aktronitril oranının artmasıyla birlikte, yağ ve yakıt direnci, sıcaklık direnci, kopma mukavemeti ve sertlik gibi özellikler artar. Ancak esneklik, düşük sıcaklık özellikleri ve peroksit ateşleme oranı azalır. NBR, takviye edici dolgu maddeleriyle kullanıldığında çok iyi mekanik özelliklere sahiptir ve NR ve SBR'ye göre daha iyi termal dirence sahiptir. Dinamik ve kalıcı deformasyon özellikleri iyidir ve yağ ve yakıtlara karşı direnci çok iyidir. Ancak polar çözücüler ve ozon gibi faktörlere toleransı düşüktür. NBR, conta üretimi, hortum üretimi, bağlantı elemanları, konveyör bantları, makara kaplamaları, işçi kıyafetleri ve botları gibi uygulamalarda kullanılır[70].

3.3.5. **Kloropren Kauçuk (CR)**

Kloropren kauçuk (CR), 2-kloro 1-3 bütadienin polimerizasyonu ile elde edilen bir malzemedir. CR'nin üretimi 1930'larda başlamış ve ilk olarak "Duprene" adıyla piyasaya sürülmüştür. CR genellikle emülsiyon polimerizasyonu yoluyla üretilir ve sülfür modifikasyonu, merkaptan modifikasyonu, polimerizasyon sıcaklığı gibi parametreler üretim sürecinde önemlidir. CR üç farklı tipte bulunur: G, W ve T tipi. G tipi CR, sülfür komonomeri kullanarak üretilir ve yüksek sertlik, iyi elastikiyet, aşınma ve yırtılma direnci gibi özelliklere sahiptir. W tipi CR ateşleme kimyasalları içermez ve depolama ömrü daha iyidir. T tipi CR ise jelleştirilmiş bir yapıya sahiptir ve kalender ve ekstrüderlerde kullanılmaya uygundur. CR, hortum imalatı, contalar, motor takozları, kablolarda yalıtım gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca CR'nin polaritesi, yağlara dayanıklılığını artırırken, alev geciktiricilik özelliği de sağlar. Ancak alev geciktirme özelliği toksik gazların ortaya çıkmasına neden olabilir[95].

3.3.6. **Etilen-propilen-dien Kauçuğu (EPDM)**

EPDM (etilen-propilen-dien kauçuk), 1963 yılında ticari olarak üretilmeye başlanmış bir terpolimerdir. EPDM'nin kimyasal yapısı, etilen, propilen ve bir dien monomeri olan sülfürün reaksiyona girmesiyle oluşur. EPDM'nin işlenebilirliği, moleküler yapısıyla ilişkilidir ve düşük moleküler ağırlık dağılımı, karbon siyahının homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. EPDM'nin ana zinciri doymuş olduğu için, UV, ozon, oksijen ve

radyasyona karşı dirençlidir. Karışımlarda antioksidan ve antiozonat miktarı minimum düzeyde tutulabilir. EPDM, düşük Mooney viskozitesine sahip olanlar haricinde rulo halinde işlenebilir. Vulkanizatların mekanik özellikleri, dolgu maddesi kullanımına bağlı olarak değişir. EPDM'nin mekanik özellikleri, düzenli yapıya sahip tiplerde doğal kauçuktan elde edilen vulkanizatların seviyesine yükseltilebilir. EPDM'nin elektrik yalıtım özellikleri yüksek sıcaklık ve yaşlanma durumlarında bile iyidir[96].

3.4. ÇİFT VİDALI EKSTRÜDERLER KULLANILARAK KATKILI POLİAMİD ÜRETİM SÜREÇLERİ

Ekstrüzyon, sürekli bir profil oluşturmak için bir malzemenin şekillendirilmiş bir açıklıktan zorlanmasını içeren çok yönlü bir üretim sürecidir. Polimer harmanlama ve mühendislik poliamidlerinin işlenmesi bağlamında ekstrüzyon, belirli malzeme özelliklerinin elde edilmesinde ve performansın artırılmasında çok önemli bir rol oynar.

Birden Fazla Malzemenin Harmanlanması; ekstrüzyon, polimerler, dolgu maddeleri ve katkı maddeleri dahil olmak üzere birden fazla malzemenin harmanlanması için etkili bir yöntemdir. Süreç, bileşenlerin eritilmesini ve ekstrüder içinde iyice karıştırılmasını içerir. Bu, bileşenlerin bileşimi ve dağılımı üzerinde hassas kontrol sağlayarak özel malzeme özellikleri elde edilmesine olanak tanır.

Mühendislik Poliamidlerinin İşlenmesi; naylon ve poliamid 66 gibi mühendislik poliamidleri, yüksek mukavemetleri, sertlikleri ve kimyasal dirençleri nedeniyle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ekstrüzyon, bu malzemelerin levha, film, boru ve profil gibi çeşitli şekillerde işlenmesi için yaygın bir tekniktir.

Dolgu ve Katkı Maddelerinin Rolü; dolgu maddeleri ve katkı maddeleri genellikle belirli özellikleri geliştirmek için mühendislik poliamidlerine dahil edilir. Cam elyaflar ve mineral dolgu maddeleri gibi dolgu maddeleri mekanik mukavemeti, sertliği ve termal stabiliteyi artırabilir. Alev geciktiriciler, stabilizatörler ve darbe modifiye ediciler gibi katkı maddeleri diğer performans özelliklerini geliştirebilir. Ekstrüzyon, bu dolgu maddelerinin ve katkı maddelerinin polimer matrisi içinde homojen dağılımını kolaylaştırarak tutarlı malzeme özellikleri sağlar. Özel Uygulamalar;

Otomotiv: Ekstrüzyon, tamponlar, ızgaralar ve motor kapakları dahil olmak üzere çeşitli otomotiv bileşenlerini üretmek için kullanılır. Mühendislik poliamidlerinin dolgu maddeleri ve katkı maddeleri ile harmanlanması, bu bileşenlerin darbe direncini, ısı

direncini ve alev geciktiriciliğini artırabilir[63].

Elektronik: Ekstrüzyon, tel kaplamalar ve kablo kılıfları gibi elektrik yalıtım malzemeleri üretmek için kullanılır. Mühendislik poliamidlerinin alev geciktiriciler ve diğer katkı maddeleri ile harmanlanması bu ürünlerin yangın güvenliğini artırabilir.

İnşaat: Ekstrüzyon, inşaat uygulamaları için borular, bağlantı parçaları ve profiller üretmek için kullanılır. Mühendislik poliamidlerinin dolgu maddeleri ve katkı maddeleri ile harmanlanması bu ürünlerin mukavemetini, dayanıklılığını ve kimyasal direncini artırabilir.

Genel olarak ekstrüzyon, belirli özelliklere sahip özelleştirilmiş malzemeler oluşturmak için değerli bir araçtır. Üreticiler malzemeleri, dolgu maddelerini ve katkı maddelerini dikkatlice seçerek ve ekstrüzyon sürecini kontrol ederek çeşitli sektörlerin taleplerini karşılayan yüksek performanslı mühendislik poliamidleri üretebilirler.

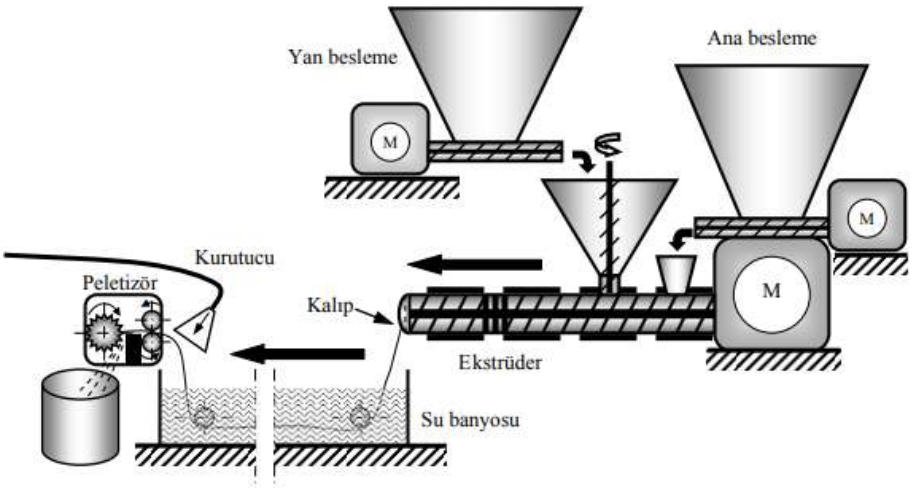
Günümüzde, birden fazla malzemenin özel olarak karıştırılması ve yeni mühendislik poliamidlerinin dolgu maddeleri ve/veya katkı maddeleri ile işlenmesi için ekstrüzyon kullanımı, malzeme özelliklerini ve proses verimliliğini artırma olasılığı nedeniyle güncel bir konudur. Çift vidalı ekstrüder kullanan katkı maddesi üretim süreci, ekstrüderin polimer matrisindeki nanopartikülleri etkili bir şekilde dağıtma potansiyelinden dolayı büyük ilgi görmektedir. Polimer endüstrilerinde kullanılan çift vidalı ekstrüderler genellikle sıkıca oturan bir kovan içine yerleştirilmiş birlikte dönen iki vidadan oluşur.

Vida, bir çift vidalı ekstrüder (TSE)'deki en önemli parçadır ve polimer eriyiğinin fiziksel davranışında, karıştırma kalitesinde, dolgu maddesinin dağılımında ve TSE'nin genel verimliliğinde baskın bir rol oynar. Bir kama şeklinin profiline eşit bir vida konfigürasyonuna sahip bir TSE kullanmanın başlangıç aşamasında, polimer, piston akışının oluşturulduğu düzgün akışlı bölgeye bir basınç biriktirme bölgesinde ekstrüde edilmeye başlandı. Tekli ekstrüderler ve dişli pompalar gibi diğer ekstrüder makineleri yerine ikiz ekstrüder kullanmanın avantajları, daha iyi malzeme karışımı ve termal dağılımdır. Ekstrüderdeki vida tasarımı, operasyonel parametrelerle birlikte, işlenebilen polimerlerin tipolojisi ve nihai çıkış hızı, basınç ve tork gibi proses performansları üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Seramik veya gıda alanında çalışan ekstrüderler, malzemeyi homojenize edebilen bir vida konfigürasyonuna sahiptir, bu nedenle genellikle "karıştırıcı" olarak adlandırılırlar ve optimize edilmesi gereken parametreler karıştırma bölümü şekli, toplam vida uzunluğu ve dönme hızıdır. Mühendislik

malzemelerinin ve poliamid gibi polimerlerin ekstrüzyonu için, katkı maddelerinin eklenmesi amacıyla, polimeri bileşik bölümüne girmeden önce erime sıcaklığına ve akışkanlığına getirmek için normalde bir çiğneme bölgesi gereklidir[97].

3.4.1. Çift Vidalı Ekstrüzyon Prensipleri

Çift vidalı bir ekstrüder aracılığıyla bir ekstrüzyon işlemindeki plastik davranış, dahili taşıma vidası elemanlarına ve işleme koşulunun tasarımına bağlı akış mekaniği kullanılarak özetlenebilir. Çift vidalı bir ekstrüderde, akış mekaniğinden sorumlu ana bileşen vida konfigürasyonu veya yerleşimidir. Çift vidalı ekstrüderlerde kullanılan vida konfigürasyonları, iç içe geçen ve geçmeyen vidalardan dişli pompalara ve eksantrik sıkıştırmalara kadar birçok farklı tasarıma sahiptir. Çift vidalı bir ekstrüderde ortak prensip, vidalar kovanların içinde dönerken, vidanın dönüşünü takip eden malzeme hareketi oluşturmalarıdır. Bunun sonucunda polimer malzemelerin sürekli kesilmesi ve kütle akışı sağlanır. Kesme, karıştırma ve ısı transferi gibi temel işlevler vida konfigürasyonu, elemanlar ve kovan sıcaklıkları ve vida hızları gibi işleme koşullarının seçimine bağlıdır. Poliamid ürünlerin istenen özelliklerini elde etmek için çeşitli kombine vida tasarımları mümkündür. Çift vidalı ekstrüderler ile katı hal kesme ekstrüzyon pulverizasyon tekniği, vida elemanlarının miktarları kullanılarak gerçekleştirilir. Uygun kanallama ve ısı transfer ortamı aracılığıyla her bir kovan üzerinde sıcaklık kontrolü yerleşiktir. Vida tasarımı ve işleme sıcaklıkları gibi uygun koşullara sahip olarak, polimer süreç boyunca eritilecek ve karıştırılacak ve iyi bir şekil veya kalitede sonuçlanacaktır. Bu prensiplerin ve bu temel proses değişkenleri ile vida konfigürasyonları arasındaki etkileşimin tam olarak anlaşılması, çift vidalı ekstrüderde işlemeyi optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Proses bilgisi, işleme ve ürün özellikleri arasındaki doğru ilişkinin belirlenmesine büyük ölçüde yardımcı olur[98].



Şekil 3.5. Ekstrüder çalışma sisteminin şematik görünümü.

3.4.2. Çift Vidalı Ekstrüzyon Kullanım Alanları ve Uygulamaları

Malzeme işlemede çift vidalı ekstrüzyon kullanıldığında, daha yoğun karıştırma, daha kısa bir erime arayüzü ve dolayısıyla daha iyi toz ve pelet beslemesi dahil olmak üzere çeşitli avantajlar tanınabilir. Ayrıca, vidaların çok bölgeli modüler kurulumu ve tipik tasarım, tek vidalı ekstrüderlere kıyasla işleme sırasında daha iyi termal kontrol sağlar. Azaltılmış kovan çapları nedeniyle daha yüksek bir enerji dozajlama oranı ortaya çıkar. Tek vidalı ekstrüderlerin aksine, çift vidalı ekstrüzyon bir dizi sapma gösterir. Örneğin, vakum delikleri her iki ekstrüderin gaz hatlarına bağlanır. Nanopartiküller veya modifiye edici katkı maddeleri eklenmiş ve eklenmemiş ekstrüzyon denemeleri için, uzunluk/çap oranı 40 olan vidalarla donatılmış 18 mm'lik çift vidalı bir ekstrüder mevcuttur. Tipik olarak, bir akış simülasyonu için L/D değerleri iki katına çıkarılır. Tg değeri yaklaşık 100 °C olan WF kaliteleri kullanılarak 2 ila 3 kg/saat aralığında ortalama çıktı beklenebilir.

Geniş uygulama yelpazesiyle ilgili olarak, çift vidalı ekstrüderlerin çok yönlülüğü, bu teknoloji yalnızca belirli bir sıcaklığa kadar gerçekleştirilebilen bölge sıcaklığı aralığıyla sınırlı olduğundan, çok çeşitli farklı polimerlerin kolayca işlenmesine olanak tanır. Düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen, polipropilen, polistiren, PET ve mühendislik polimerleri gibi farklı termoplastiklerin yanı sıra belirli polimer karışımları da üretilebilir. Katmanlı üretim alanında, tipik Erimiş Filament Fabrikasyonu uygulamasına ek olarak, filament ekstrüzyonu da çift vidalı 3D baskı amacıyla yeniden işlenebilir termoplastikler üretmek için kullanılır. Katmanlı üretim bağlamında, (nano-)katmanlı poliamid PA12'nin işlenmesini rapor eden birkaç vaka çalışması mevcuttur. Bunlar, çift vidalı ekstrüzyon

teknolojisinin basitliğini vurgulayarak, geleneksel olarak kullanılan katkı maddesi ithalat yollarına kıyasla nihai üründe CO_2 emisyonlarını azaltma açısından önemli avantajlar sağlarken, kolaylığının ve çok yönlü fırsatlarının altını çizmektedir.

Sonuç olarak, bu bulgular çift vidalı ekstrüzyonun tek bir adımda bir ellagic asit zinciri ekleyerek PA12 bazlı malzemelerin modül reaksiyon sıcaklığını önemli ölçüde düşürmek için kullanılabileceğini, böylece baskı sıcaklığı aralığını azalttığını ve basılabilirliği geliştirdiğini göstermektedir. Genel olarak gerçekleşen düşük kristallik, düşük eğrilme eğilimi ve su emiliminin azalması, katılaşmış 3D baskılı malzemelerin esnekliğinin artmasına neden olmuştur. Tartışılan çok aşamalı ekstrüzyon uygulamasında gösterildiği üzere, çift vidalı ekstrüzyon, PA12 modülünü azaltmak ve yapışkanlığı önlerken kopma anındaki gerilme uzamasını iyileştirmek için yalnızca bir değil birden fazla farklı katkı maddesi ekleyerek ve kimyasal olarak modifiye edilmiş katkı maddelerini bileşik oluşturmada çift vidalı ekstrüderin avantajlarıyla birleştirerek yeni malzeme inovasyon amaçlarına erişim sağlayabilir[99].

3.4.3. **Poliamid Üretiminde Katkı Maddeleri**

Günümüzde ticari olarak mevcut olan polimerlere yönelik tüm katkı maddelerinin sınıflandırılması sorunu, bunların bölünmesini gerçekleştirmek için benimsenebilecek kriterlerin çeşitliliği göz önüne alındığında çok zor ve zahmetlidir. Söz konusu sınıflandırmanın, kimyasal yapıları, moleküler ağırlıkları veya ticari üreticileri temelde göz ardı ederek yalnızca işlevsel kullanımlar açısından yapılması gerektiğinde bu sorun daha da karmaşık hale gelmektedir. İşte böyle bir amaç doğrultusunda, polimerlerde katkı maddesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan çeşitli kısaltmalar veya bileşikler incelenmiştir. Mevcut liste, polimer ürünün görünümünü iyileştirmek amacıyla şeffaflık ve renklendirmenin amaçlandığı boyalar ve pigmentler de dahil olmak üzere oldukça kapsamlıdır. Bu grupları, alev yayılımı ve duman emisyonu olasılıklarını azaltmak için polimerlere dahil edilen alev geciktiriciler ve duman bastırıcılar takip eder. Daha esnek ürünler elde etmek için plastikleştiriciler ve darbe modifiye edicilerin varlığı dahil edilir. UV stabilizatörleri ve antioksidanlar, polimerlerin güneş ışığındaki ömrünü uzatmak ve ürünler genellikle oksidatif saldırılara maruz kalırken koruma sağlamak için eklenir. Son olarak, silikonlar ve yağlayıcılar, kalıplama veya ekstrüzyon işlemleri sırasında kalıp ayırma kolaylığına katkıda bulunmak için kullanılır[47].

3.4.4. İşlevleri ve Faydaları

İnce Film Profili Oluşturma. Çift vidalı ekstrüderler, poliamid matris içindeki dolgu maddeleri veya elyaflar gibi takviye malzemelerini yaymak ve hizalamak için mükemmel yeteneklere sahiptir.

Yüksek Karıştırma Oranları. Çift vidalı ekstrüderlerde kullanılan karıştırma elemanları, daha yüksek üretim çalışma oranlarını kolaylaştıran mükemmel dağıtıcı ve dispersif karıştırma performansı sağlar. Katı madde yüklemesi arttıkça vidalar mükemmel tork ve verim özellikleri gösterir. Daha büyük ekstrüder bazlı üretimde tüm katıların kurutulması gerekir. Kurutma aşamalarını kontrol ederek ve polimer soğuduğunda minimum nem toplanmasını sağlayarak en düşük nem seviyeleri elde edilebilir. En basit ve en kontrollü nem seviyelerini elde etmek için, yüksek kaliteli reçine peletleri ve bir kurutucu, reçine kurutma, nem endişelerini en aza indirme ve malzeme kalitesini koruma arasında en uygun dengeyi sağlar.

Kısa Bekleme Süreleri. En fazla 3 inçlik ekstrüderlerin veya paralel makinelerin kullanılması en kısa bekleme sürelerini sağlayacak ve enerji kaynaklarını idareli kullanacaktır.

Karmaşık Şekil Yetenekleri. Ekstrüder kalıpları çok yönlüdür: büyük profiller üretebilir ve karmaşık ara boşluklar, sabitleme çıkıntıları veya takviye elyaflı parçaları hemen hemen istenen her yönde birleştirebilirler. Küçük yuvarlak hava ve su ceplerinin ekstrüzyona uygulanması kolaydır.

Hat İçi Polimer İşleme. Yeni plastik bileşimlerin geliştirilmesi için çift vidalı ekstrüderler, poliamid reçineyi bir havalandırma deliğinden devolatilize ederek ve ardından dağılması zor bir alev geciktirici katkı maddesi eklemek için bir pervane kullanarak hat içi bileşim gerçekleştirebilir. Bu da daha geniş bir yangın güvenliği mühendisliği reçine çözümleri yelpazesi sağlar[47].

3.5. MEKANİK ÖZELLİKLERE GENEL BAKIŞ

Mühendislik ve performans plastikleri olarak, mekanik özellikler poliamid malzemelerin tasarımı ve mühendisliğinde en önemli endişe kaynağıdır. Çekme dayanımı ve uzama, malzemelerin kalitesini gerçekten yansıtan iki önemli özelliktir. Çekme dayanımı, bir poliamid malzemenin herhangi bir hasar olmadan taşıyabileceği maksimum gerilimdir.

Daha yüksek çekme dayanımına sahip malzemeler, daha yüksek güvenlik faktörlerinin kullanımı için caydırıcıdır. Polimer malzemelerde erime veya yumuşama noktalarının varlığı, malzemelerin elastikiyetini tanımlar. Plastik parçaların tasarımında ve gerilim analizinde malzeme davranışını başlatabilir. Metalik sistemlerde olduğu gibi, malzemenin elastikiyeti genellikle metalde GPa olarak ölçülen elastikiyet modülü olarak adlandırılır.

Polimerlerin çekme özellikleri, polimer yapısı, moleküler ağırlık, deformasyon hızı, sıcaklık, nem ve diğer katkı maddelerinin varlığından etkilenir. Polimerlerin Young modülü, saf poliamidler için geçerli olan maksimum değere kadar artan moleküler ağırlıkla artar. Çapraz bağlama başlatılır başlatılmaz, depolama modülü camsı modülü aşar. Önemli bir modül artışı, polimer matris arasında köprü oluşturan inorganik bir parçacık ağı oluşturmak için sızma eşiğine karşılık gelir. Tek-çift poliesteramidlerin ve poliamidlerin doğrusal poliesteramidlerden ve poliamidlerden daha yüksek çekme mukavemeti gösterdiği gözlemlendi. Saf poliamidlerin çekme mukavemeti yaklaşık 7-12 kg/mm² idi ve saf poliesteramid numuneleri yaklaşık 6 kg/mm² çekme mukavemeti gösterdi. Poliesteramidler 5-6 kg/mm² arasında çekme mukavemeti değerleri gösterdi. Çekme mukavemeti ve malzemelerin modülü, poliamidlerde dolgu yüklemesindeki artışla artarken, poliesteramidlerde daha az artar.

Poliamid 6, mükemmel tokluk ve sürünme özelliklerine sahip olan, termal deformasyona karşı direnç gösteren bir malzemedir. Bu malzemenin özellikleri, çeşitli katkı maddelerinin eklenmesiyle geliştirilebilir ve uygulama yelpazesi genişletilebilir. Katkı maddeleri arasında dolgu maddeleri, sertleştiriciler ve uygun maliyetli malzemeler bulunur. Poliamid 6, katkı maddeleriyle birlikte dört ana kategoride sınıflandırılabilir. Homopolimerler daha fazla darbeye karşı direnç gösterir ve farklı formlarda işlenebilir. Sertleştiriciler daha yüksek sertlik sağlarken, plastikleştiricilerle modifiye edilmiş homopolimerler daha düşük sertlikte ancak daha iyi darbe mukavemetine sahiptir. Cam elyaf takviyesi ve mineral katkıları da poliamid 6'nın özelliklerini değiştirir. Poliamid 6, katkı maddeleriyle birlikte daha gelişmiş özelliklere sahip olabilir, ancak bazı özelliklerinin azalması da mümkündür [66].

Poliamid 6, mükemmel tokluk ve sürünme özelliklerine sahip olan, termal deformasyona karşı direnç gösteren bir malzemedir. Bu malzemenin özellikleri, çeşitli katkı maddelerinin eklenmesiyle geliştirilebilir ve uygulama yelpazesi genişletilebilir. Katkı maddeleri arasında dolgu maddeleri, sertleştiriciler ve uygun maliyetli malzemeler

bulunur. Poliamid 6, katkı maddeleriyle birlikte dört ana kategoride sınıflandırılabilir. Homopolimerler daha fazla darbeye karşı direnç gösterir ve farklı formlarda işlenebilir. Sertleştiriciler daha yüksek sertlik sağlarken, plastikleştiricilerle modifiye edilmiş homopolimerler daha düşük sertlikte ancak daha iyi darbe mukavemetine sahiptir. Cam elyaf takviyesi ve mineral katkıları da poliamid 6'nın özelliklerini değiştirir. Poliamid 6, katkı maddeleriyle birlikte daha gelişmiş özelliklere sahip olabilir, ancak bazı özelliklerinin azalması da mümkündür [67]

Çizelge 3.1. Poliamidin genel özellikleri.

Fiziksel Özellikler			
Özellik	Değer	Birim	
Özgül Ağırlık	1,14	Kg/dm³	
Isı İletkenliği	1,79	Kcal/Sa/Cm/°C	
Genleşme Katsayısı (20-200 °C)	86.4	°C $\times 10^{-6}$	
Isınma Isısı (20 °C)	0.4	Kcal/Kg/°C	
Su Emiciliği (24 Saat)	1.7 - 1.8	%	
Yanma Hızı	Kendiliğinden Söner	-	
Mekanik Özellikler			
Özellik	Minimum Değer	Maksimum Değer	Birim
Gerilmede Elastik Modül	17,58	24,00	Kg/cm³ ×10
Çekme Dayanıklılığı	670	880	Kg/cm³
Akma Dayanımı	600	880	Kg/cm³
Yüzde Uzama (5 cm'de)	30	220	%
Bükülme Dayanıklılığı	Kırılmaz	-	-
Çarpma Dayanıklılığı (IZOD)	4,35	6,52	Kg-M/M
Baskı Dayanıklılığı	680	-	Kg/cm³
Aşınma Direnci (TABER CS-17)	5	-	MG/1000 Saykıl
Elektrik Özellikleri			
Özellik	Değer	Birim	Not
Hacimsel Direnç	$4.5\times10^{-}$	Ω·cm	Üs belirsiz*
Dielektrik Dayanıklılık (Kısa Süre)	152	KV/cm	-

Hava sıcaklığı ve nem, poliamid 6'nın mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye

sahip olduğundan, PA 6'dan üretilen makine parçalarının çalışma koşullarını dikkate almak büyük önem taşımaktadır. Özellikle, ortam sıcaklığı 30 °C'yi aştığında, elastikiyet modülünde fark edilebilir bir azalma gözlenir. Cam elyaf takviyeli varyantlar 150 °C'ye kadar olan ortamlarda kullanım için uygundur.

3.5.1. Çekme Dayanımı

Bir malzemenin üzerine çekme kuvveti uygulandığında nasıl tepki verdiğini anlamak, özellikle polimerlerin karmaşık dünyasıyla meşgul olduğunuzda, her zaman etkileyici bir bakış açısı vardır. Belirli bir malzemenin çekme dayanımı, bu belirli malzemenin nihayetinde kırılıncaya kadar dayanabileceği maksimum çekme gerilimi değerini ifade eder. Bu kritik değer genellikle test sırasında üretilen kuvvet-gerinim eğrisinin tepe noktasıyla temsil edilir. Çekme dayanımı gibi mekanik bir özelliği değerlendirirken elde edilen nihai değerleri etkileyebilecek çok sayıda faktör vardır. Önceden belirlenebilen şey, çeşitli polimerlerin çekme dayanımının, özellikle birçok üretim parametresinden yalnızca biri değiştirilirse, iki farklı bileşim arasında önemli ölçüde farklılık gösterebileceğidir. Üretim süreçleri boyunca uygulanan burulma veya germe sırası da üretilen nesnenin mekanik davranışını önemli ölçüde etkileyebilir. Ek olarak, kullanılan belirli polimer türleri ve bunların destekli veya desteksiz olması, performans sonuçlarında hayati bir rol oynar.

Sadece farklı poliamid sınıfları arasında değil, aynı zamanda metodoloji ipliklere, fibrile edilmiş liflere, bantlara veya hatta poliamid levhalarına uygulandığında da belirgin şekilde farklı olabilen şekil ve doğrusal yoğunluktaki çeşitlilik nedeniyle dikkatli bir karşılaştırma yapılması gerektiğini vurgulamak önemlidir. Bununla birlikte, aynı yönelimi göstermeleri ve karşılaştırılabilir formlara ve doğrusal yoğunluklara sahip olmaları koşuluyla, farklı poliamid çeşitlerini karşılaştırmak mümkün olmaya devam etmektedir. Dahası, farklı tedarikçilerle uğraşırken, çok sayıda polimer özelliklerine göre ayırt edilmelidir. Örneğin, yalnızca uygun maliyetli göründüğü için bir poliamid satın almak tamamen makul olsa da, nihayetinde başka bir türün sahip olduğu dirençten yoksun olabilir. Dolgu maddelerinin boyutlarının temel ilkelere dayanarak çekme mukavemetini önemli ölçüde etkileyebileceği yaygın olarak kabul edilmektedir. Malzemenin içindeki katmanlar daha sonra çekme mukavemetini de etkileyebilir. Daha yoğun pigmentli katmanlar, dış ortamdan kaynaklanan maruziyet nedeniyle belirgin bir mukavemet azalması yaşayabilir.

Bir poliamid borunun iç basınçta bir artışa maruz kaldığındaki performansı, özellikle bulgular bir çekme testinden elde edilen laboratuvar sonuçlarıyla bütünleştirildiğinde, deneysel veriler kullanılarak tanımlanabilir. Muhafazakar görünebilecek teorik tahminler, genellikle bu analiz sırasında keşfedilebilir. Hassas malzemelerin bulunduğu sıcaklık kontrollü odalarda bulunan düşük sıcaklıklara dikkat etmek her zaman ihtiyatlı bir davranıştır. Dahası, 60 °C gibi aşırı sıcaklıklara, özellikle hassas polimerler veya belirli deneysel koşullar söz konusu olduğunda, dikkatli yaklaşılmalı ve hızla sınırlandırılmalıdır. Test kurulumu yanlışsa, test edilen nesnede kolayca istenmeyen davranışlara yol açabilir. Neredeyse kullanılan her nesneye benzer şekilde, çekme dayanımı her zaman ihtiyat eşikleri düşünülerek tasarlanır. Sonuç olarak, kopma anındaki çekme gerilimi tipik olarak yaklaşık 1–48 MPa aralığından, 'kullanıcının' ek güvenlik ve önlem tedbirleri için elde etmeyi amaçladığı bir değere düşer [68].

3.5.2. **Kopma Uzaması**

Kopma uzaması (E), polimerlerin sünekliğini ve tokluğunu değerlendirmek için kullanılan temel bir ölçüdür. Bir polimerin nihayetinde başarısızlığa uğramadan veya kırılmadan önce ne kadar deformasyona uğrayabileceğinin temel bir göstergesi olarak hizmet eder. Malzemenin kopma uzaması yüzdesi ne kadar yüksekse, poliamid aslında kırılmadan o kadar fazla gerilebilir ve deforme edilebilir. Bu ölçü, malzemenin özelliklerini zaman içinde etkileyen fiziksel yaşlanma olgusuyla yakından ilişkilidir. Bu nedenle, farklı gerinim oranlarında kopma uzamasını ölçmek özellikle yararlıdır, çünkü bu, farklı polimer formülasyonları arasında anlamlı karşılaştırmalar yapılmasına olanak tanır. Uzama testi de dahil olmak üzere tüm standart çekme testleri, stroka dayalı kontrollü bir yükleme oranı fonksiyonu kullanılarak servo-hidrolik bir test makinesine uyarlanabilir. Çeşitli yerleşik standartlara uygun olarak 23 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda test yapmayı içeren, uygulanabilir yaygın olarak kabul görmüş standart yöntemler vardır. Kopma anındaki uzama, test sıcaklığı gibi birkaç kritik parametreye bağlıdır ve özellikle işleme veya depolama sırasında denge dışı kristalleşme durumlarında malzemenin başlangıç durumuna bağlı olarak da değişebilir. Polimerin moleküler ağırlığı, katkı maddelerinin varlığı ve işleme koşulları gibi çeşitli diğer faktörler de termoplastiğin uzama özelliklerini etkilemede önemli bir rol oynar. Bu yönleri anlamak, belirli mekanik özellikler gerektiren uygulamaları tasarlarken malzeme bilimcileri ve mühendisler için çok önemlidir, çünkü yüksek düzeyde süneklik, stres altında esneklik ve dayanıklılık gerektiren ürünlerde önemli olabilir.

Kopma uzaması PA11 için gerçekten de en yüksek değerdir ve bu, önceki analizlere ve çalışmalara dayanarak beklenenle mükemmel bir şekilde uyumludur. Daha sonra, L3390, L3421 ve L2125 gibi malzemeler için %36-58 aralığına düşer ve bu sınıflarda tutarlı bir davranış gösterir. Olası eğilimleri incelediğimizde, oda sıcaklığı aralığında, kopma uzamasının PA10 için PA10'a dayalı çeşitli sınıflara göre belirgin şekilde daha yüksek göründüğü ve bunun malzeme özelliklerinde farklılıklar olduğunu gösterdiği ortaya çıkar. Öngörülebileceği gibi, L2125 için kopma uzaması, camsı durumdaki davranışına kıyasla yarı kristalin durumda daha belirgindir ve bu, yapısal değişikliklerin mekanik performans üzerindeki etkisini gösterir. Oda sıcaklığında farklı PA sınıfları için kopma uzaması değerlerini gözlemlediğimizde, gerinim hızı azaldıkça arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, burada birincil etkinin, belirli koşullar altında sünek benzeri davranıştan tamamen kırılgan bir moda geçişle ilişkili olduğunu belirtmek önemlidir. Ek olarak, kopma uzaması aşağı doğru eğilim gösterdiğinde, malzeme tepkilerine daha derin içgörüler sağlayabilen gerilim-şekil değiştirme eğrisinde görünen platonun dikkate alınmasının önemli olduğu ortaya çıkar. Dikkat çekmeye değer bir diğer gözlem, aynı PA bileşimi için, şekil değiştirme hızının malzeme özellikleri üzerindeki etkisinin, sünek moda kıyasla kırılgan modda daha önemli olarak kendini göstermesidir ve bu, malzemede gözlemlenen kırılma moduna bağlı olarak değişen şekil değiştirme hızlarına farklı tepkiler olduğunu gösterir [40].

3.5.3. **Eğilme Dayanımı ve Modülü**

Eğilme dayanımı, malzemenin eğilme gerilimi altındaki performansını ölçer. Eğilme gerilimi altında, belirli alanın çekme kısmı ve belirli alanın basınç kısmı çekme gerilimi ve basınç geriliminin üst sınırındadır. Malzemenin performansı, malzemenin hasar veya dökülme olmadan dış yüklere dayanma kabiliyetinden görülebilir. Test standartlarına göre, bunun aslında prensip olduğunu tespit etmek mümkündür. Farklı test standartlarına dayanarak, karakteristik parametre test parçalarının özelliklerine bağlıdır. Eğilme modülü, eğilme geriliminin eğilme deformasyonuna oranıdır ve yapısal gereksinimlerle ilgili malzeme sertliğini yansıtır. Poliamidin eğilme dayanımı ve modülünün belirlenmesi, yapı mühendislerinin poliamidin yapısal uygulamalardaki performansını değerlendirmesine yardımcı olur.

Farklı test yöntemlerine ek olarak, sonuçlar reaksiyona girmiş poliamidin eğilme özelliklerindeki farklılıkları gösterir. Piyasada poliamid 66, poliamid 6, poliamid 610 ve

biyobazlı poliamid gibi dört tip poliamid olmasına rağmen poliamid 6 ve poliamid 66 en yaygın kullanılan poliamidlerdir. Sonuç olarak poliamid 6 ve poliamid 66'nın eğilme özellikleri diğer tiplere kıyasla daha fazla ilgi çekmektedir. Mühendislik uygulamalarında, uzun süreli sürünme deformasyonuna veya kısa süreli aşırı kapasiteye maruz kaldığında kırılmadan önce malzeme sünekliği azalır, bu da deformasyon geri kazanımı, enerji emme kapasitesi ve işleme kalitesi gibi malzeme aparatında bir azalmaya neden olabilir. Poliamid malzemelerin uzun süreli bükülmeye dayanması gereken endüstri uygulama senaryoları nadirdir. Uzun süreli bükülme genellikle plastik malzemelerde ikinci bir işleme kalıplama adımını gerçekleştirebilmelerinden önce görülür [69].

3.5.4. **Darbe Dayanımı**

Darbe gücü, bir poliamidin ani bir deforme edici kuvvete ve/veya önemli bir darbeye dayanma ve direnme yeteneğini gösteren önemli bir özelliktir. Bu belirli özellik, özellikle mühendislik termoplastikleri olarak çeşitli alanlarda kullanıldıkları için poliamidlerin potansiyel uygulamaları düşünüldüğünde son derece kritiktir. Örneğin, poliamidler, kullanım sırasında olası düşmelere veya darbelere karşı dayanıklılık gerektiren gıda işlemcileri gibi günlük tüketim mallarında bulunabilir. Ek olarak, poliamidler, çamurluklar, hava filtresi muhafazaları ve yoldaki sert koşullara ve darbelere dayanması gereken diğer kritik bileşenler gibi yüksek dayanıklılık gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanıldıkları otomotiv endüstrisindeki daha zorlu bağlamlarda önemlidir.

Bir poliamidin darbe gücü, moleküler yapısına bağlı olarak önemli ölçüde değişecektir; özellikle, poliamidin yapısındaki metilen gruplarının sayısı arttıkça, darbe gücünde buna karşılık gelen bir artış olma eğilimindedir. Moleküler yapı ile performans arasındaki bu ilişki, yalnızca darbe dayanıklılığına değil aynı zamanda güçlendirme yeteneklerine ve genel mekanik performansına göre optimum poliamid tipinin seçilmesinin önemini daha da vurgular.

Poliamidlerin darbe dayanıklılığını test etmeye gelince, sarkaç darbe testi çeşitli uygulamalarda en yaygın kullanılan yöntem olarak öne çıkmaktadır. Ancak, bu birincil teste ek olarak, malzemenin darbeye dayanma kabiliyeti hakkında daha fazla bilgi sağlamak için iki ek test - Izod ve Charpy testleri - de yaygın olarak kullanılır. Tüm bu yöntemler toplu olarak, çeşitli senaryolarda bir poliamidin performans özelliklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olur ve belirli uygulamalar için malzeme

seçimine rehberlik eder.

Poliamidin darbe dayanıklılığını ölçmek için kullanılan testler, bir poliamid reçinesinin yüksek enerjili darbe yüklerine tepkisini değerlendirmek için ölçülebilir ve karşılaştırmalı bir yol sağlamada önemli bir rol oynar. Günümüzde çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan ve ticari olarak mevcut olan yedi adet bu tür test vardır. Bu testler Charpy darbesi, Dart darbesi, Dynatup darbesi, Gardner darbesi, Izod darbesi, Aletli dart darbesi ve Penetrasyon darbe testlerini içerir. Bu testlerin her biri darbe direncinin farklı yönlerini değerlendirmeye yarar ve malzeme seçimi sürecine dair değerli bilgiler sağlar. Belirli bir tasarım senaryosu için reçine seçiminin önemini daha iyi göstermek için, bir otomotiv çamurluk sistemi gibi basit bir son kullanım örneğini ele alın. Çamurluk sistemi bir darbeyle karşılaştığında, seçilen reçinenin eriyik mukavemeti ile darbe mukavemeti arasındaki etkileşim kritik hale gelir. Bu kombinasyon, darbenin oluşturduğu basınç artışı dağılmadan önce çamurluğun yapısal bütünlüğünü koruyup korumadığını nihayetinde belirleyecektir. Ek olarak, benzer bir mekanik tepki rejimi içindeki özellikleri ölçtükleri için darbe testiyle ilişkili başka mekanik test yöntemleri de incelenmektedir, ancak bu testler felaketle sonuçlanmayabilir. Bir poliamidin darbe mukavemeti hakkında kapsamlı bir anlayış kazanmak, malzemenin arızaya ulaşmadan önce uygun plastik deformasyona uğramasını sağlamak için hayati önem taşır. Bu, özellikle son parça uygulamasının "tokluk" gibi, malzemenin enerjiyi emme ve deformasyona etkili bir şekilde dayanma yeteneğini gösteren özellikleri gerektirmesi durumunda önemlidir. Bu faktörleri göz önünde bulundurmak, zorlu uygulamalarda poliamid bileşenlerinin tasarımını ve performansını büyük ölçüde artırabilir [70].

3.5.4.1. Charpy Darbe Testi

Malzemelerin Charpy darbe testi, çentikli bir test numunesinde önceden var olan bir kusuru yaymak için gereken belirli enerji miktarını belirlemek için kullanılan yaygın olarak tanınan ve standartlaştırılmış bir yöntemdir. Bu işlem, malzeme özelliklerinin doğru ve güvenilir ölçümlerini sağlamak üzere tasarlanmış özel bir darbe test makinesi kullanılarak gerçekleştirilir. Cihazın kendisi, numuneye kontrollü bir kuvvetle vurmak için serbest bırakılmadan önce önceden belirlenmiş bir yükseklikte titizlikle tutulan ağır bir sarkaçtan oluşur ve numuneyi etkili bir şekilde iki ayrı parçaya ayırır.

Numunenin kırılması sırasında emilen enerji miktarı daha sonra titizlikle ölçülür ve belirlenmiş referans standartlarıyla karşılaştırılır. Bu karşılaştırma, söz konusu

malzemenin belirli bir uygulama için uygun olup olmadığını veya gerekli performans özelliklerini karşılayıp karşılamadığını değerlendirmede önemli bir amaca hizmet eder. Bilimsel bir bakış açısından, emilen enerji, bu iki bileşenin oranının test edilen malzemenin moleküler yapısı ve bileşimi ile dolaylı ilişkileri olan viskoz bir parça ile elastik bir parçanın birleşimi olarak anlaşılabilir.

Çentikli test numunelerinin kullanılmasının önemi, aynı test koşulları altında farklı malzemeler arasında doğrudan karşılaştırmalar yapmalarını kolaylaştırma ve araştırmacıların ve mühendislerin ilgili performans özelliklerini etkili bir şekilde değerlendirmelerine olanak tanıma yeteneğinde yatmaktadır. Çeşitli malzemelerin darbe kuvvetlerine nasıl tepki verdiğini sistematik olarak analiz ederek, dayanıklılık ve esnekliğin en önemli olduğu uygulamalar için kritik hususlar olan genel toklukları, süneklikleri ve kırılganlıkları hakkında değerli bilgiler edinilebilir. Bu yöntem, çeşitli endüstrilerdeki çok sayıda mühendislik uygulaması için malzeme seçimine rehberlik ederek malzeme bilimi ve mühendisliğinde temel bir araç haline gelmiştir [71].

Standart yöntem, belirli bir şekil ve boyuta yapışan numunelerin hazırlanmasını titizlikle detaylandırır. Bu numuneler hazırlandıktan sonra, belirli bir sıcaklığa ulaşmak için bir soğutma sürecinden geçerler ve ardından darbe makinesinin destek düzenekleri içinde stratejik olarak dik bir konuma yerleştirilirler. Daha sonra çekiç, numunenin çentikli tarafına kuvvetli bir darbe vurmak için önceden belirlenmiş ve tutarlı bir yükseklikten serbest bırakılır; bu arada, numunenin karşı tarafı destekler içinde sabitlenmiş yatay bir örnekleyici üzerinde güvenilir bir şekilde desteklenir. Endüstride tipik olarak kullanılan darbe enerjileri 1 Joule ile 150 Joule aralığında olanlardır. Çok sayıda çalışma, çentikli test parçalarının performansı ile yapıldıkları orijinal malzemenin moleküler yapısı arasındaki ilişkiyi tutarlı bir şekilde göstermiştir. Örneğin, çapraz bağlı olsun veya olmasın amorf termoplastiklerin, daha düşük moleküler ağırlığa sahip yarı kristalin ve doğrusal termoplastiklerle karşılaştırıldığında belirgin şekilde daha yüksek bir darbe direnci gösterdiği bulunmuştur. Gerçekten de, poliamidlerin aynı sıcaklık koşullarını korurken moleküler ağırlık arttıkça daha fazla miktarda enerji emme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu ilişki, darbe koşulları altında malzeme performansını belirlemede moleküler yapının önemini vurgular.

3.5.4.2. Izod darbe testi

Poliamidlerin ara sıra gelen darbelere karşı yeterli direnç gösterip göstermediğini veya

alternatif olarak kırılma olasılığının olup olmadığını belirlerken darbeyi ölçmenin standart yolu, Çentikli Darbe Testi olarak adlandırılan yöntemdir. Bu özel test, malzemelerin stres altındaki dayanıklılığını anlamak için çok önemlidir. "Halter" test parçasının boyutu ve şekli, yaklaşık 70 yıl önce geliştirilen bir standart aracılığıyla belirlenmiştir; bu, test metodolojilerinde önemli bir ilerlemeydi. Ek olarak, atılan bir diğer adım, daha önce test parçasını sabitlemek için kullanılan iki omuz cıvatasının "bıçak" kenarlarıyla değiştirilmesiydi; bu da test sonuçlarının tutarlılığını artırdı. Dahası, "benzer değerlerin Izod darbe makinesi veya Charpy darbe makinesi kullanılarak elde edilebilmesini sağlamak için neyin gerekli olduğunu" anlamak önemlidir. Bu son cümle ders kitaplarımıza dahil edilmiş olsaydı, tartıştığımız bu makale gerekli veya büyük öneme sahip görülmezdi. Izod makinesinin ölçeği, fren serbest bırakıldıktan sonra sarkaçın ileri momentumunu yeterince hesaba katmaz ve bu da sonuçlarda tutarsızlıklara yol açabilir. Charpy makinesi açısından, test edilen malzemenin çok kırılgan olup olmadığına veya daha az tanımlanmış uç özelliklerine sahip olup olmadığına bakılmaksızın tutarlı bir kırılmayı garantilemek için analizörün "çizgi" moduna ayarlanması zorunludur ve bu, malzeme tokluğu ve esnekliğinin güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini sağlar [72].

Çentikli Izod Tipinin testleri, test sırasında ortaya çıkabilecek karmaşık arıza nedenlerini daha net bir şekilde belirlemek için dikkatli bir girişimle, farklı poliamid türlerinin çeşitli numuneleri üzerinde titizlikle gerçekleştirilmiştir. Poliamidlerin birincil bileşimini oluşturan üç atomik element karbon, azot ve oksijendir ve her biri malzemenin genel yapısı ve özelliklerinde önemli bir rol oynar. Poliamiddeki arızanın nedeninin temelde moleküler yapı ile yakından ilişkili olduğu ve belki de karbon, azot ve oksijen atomlarının birbirine bağlanma şeklinin önemli bir etki faktörü olduğu düşünülmektedir. İzod testinin uygulanması çok nadirdir, çünkü özel koşullar ve kurulum gerektirir ve malzemelerin, gözlemlenen ortalamanın üzerindeki çizgilenme rakamlarını açıklamak için gerekli olan testlerde yüksek hizmet gerektiren işler yapması gerektiğinde, Charpy testi, malzeme değerlendirmesi için en güvenilir ve sağlam yöntem olarak kabul edilir.

3.5.5. **Sertlik**

Sertlik, malzemenin lokal deformasyona karşı direncini tanımlayan kritik bir malzeme özelliğidir. Bu direnç yalnızca plastik ve elastik özelliklerden etkilenmez, aynı zamanda malzemenin yüzey özelliklerinden de önemli ölçüde etkilenir. Daha kapsamlı bir

anlamda, sertlik bir malzemenin aşınmaya, yıpranmaya ve çizilmeye etkili bir şekilde dayanma kabiliyeti olarak daha ayrıntılı olarak tanımlanabilir. Örneğin poliamidler tartışılırken, girintiye karşı dirençleri, ister endüstriyel ortamlarda ister tüketici ürünlerinde olsun, malzemenin belirli uygulamalar için genel uygunluğuna ilişkin değerli bilgiler sağlar.

Sertliğin belirlenmesi genellikle söz konusu malzemenin yüzeyinde sıklıkla meydana gelen plastik deformasyonu simüle eden bir girintileme sürecini içerir. Bu, malzemenin çeşitli koşullar altında ne kadar dayanıklı olduğuna dair net bir ölçüm sağlar. Sertliği ölçmek için her biri farklı malzeme ve uygulama türlerine uygun çok sayıda yöntem mevcuttur. En yaygın olarak tanınan metodolojilerden biri, test edilen malzemenin özel gereksinimlerine bağlı olarak girinti olarak bir elmas koni veya bir çelik bilye kullanan Rockwell ölçeğidir.

Sertliği ölçmek için kullanılan bir diğer önemli yöntem, özellikle polimerlerin sertliğini ölçmedeki etkinliği nedeniyle tercih edilen Shore ölçeğidir. Bu ölçek, A, D ve 00 sertlik tiplerinde mevcut olan birden fazla ölçüm seçeneği sunar. Shore A, elastomerler gibi daha yumuşak polimerler için özel olarak tasarlanmıştır; Shore D ise daha sert polimerlere yöneliktir; ancak D ölçeğinde 93 sertlik derecesini aşan malzemelerin bunun yerine Shore 00 kullanılarak değerlendirilmesi gerektiği uyarısı vardır. Bu önemli sınıflandırma, test yönteminin malzemenin özelliklerine uygun şekilde eşleştirilmesini sağlayarak hassas malzeme seçimi gerektiren alanlardaki mühendisler ve tasarımcılar için güvenilir ve ilgili sonuçlar sağlar [73].

Poliamidin sertliği, öncelikle belirli kimyasal bileşimi, üretiminde kullanılan çeşitli yöntemler ve hem üretimin hem de uygulamanın gerçekleştiği koşullar tarafından belirlenir. Çeşitli poliamidlerin sergilediği farklı tribolojik, mekanik ve estetik özellikler, her malzeme türünün sertliğinin ölçülmesiyle açıkça gözlemlenebilir. Çok sayıda çalışma, bir poliamiddeki sertlik seviyesi ile aşınma direnci yetenekleri arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermiştir. Daha yüksek sertlik, yalnızca gelişmiş aşınma direncine katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda gelişmiş işlenebilirlik, daha fazla estetik çekicilik ve çizilmeye ve aşınmaya karşı önemli ölçüde daha yüksek bir dirençle de ilişkilidir. Bu nedenle, belirli bir uygulamanın sertliği, amaçlanan kullanım için bir poliamidin seçim süreci sırasında ve uygulamanın genel tasarımında ve beklenen hizmet ömründe dikkatlice dikkate alınmalıdır. Bu özellikleri anlamak, belirli mühendislik ihtiyaçları için en uygun malzemeyi seçmek için çok önemlidir.

Sertlik, önemli bir fiziksel özellik olarak, poliamidleri içeren çeşitli uygulamalarda inanılmaz derecede faydalı olabilir. Uygulama ne kadar zor olursa, genel kullanım kolaylığı da o kadar iyi olur ve estetik değer kaybında da önemli bir azalma olur. Bunun nedeni, artan sertliğin çizilme direncini önemli ölçüde iyileştirmesidir. Sertliğin birçok yöne olumlu katkıda bulunmasına rağmen, sertlikteki değişim nispeten küçük olduğu sürece nihai ürünün darbe dayanıklılığını mutlaka mahvetmediğini belirtmek önemlidir. Ancak sertlikteki artış, malzemenin işlenebilirliğine zarar verebilir. Bu, enjeksiyon kalıplama gibi işlemlere girerken, ısı birikiminin ilk aşamasına dikkatli bir şekilde dikkat edilmesi gerektiği anlamına gelir, çünkü aşırı ısı, takım aşınmasının artmasına ve sonuçta performansın tehlikeye atılmasına neden olabilir. Bu nedenle, malzemelerin uygun şekilde işlenmesini sağlamak için işleme hızı buna göre ayarlanmalı ve azaltılmalıdır. Ayrıca, uygun sertlik seviyesinin dikkatli ve düşünceli bir şekilde seçilmesinin, bir ürünün amaçlanan uygulamasındaki uzun ömürlülüğü, hizmet ömrü ve genel işlevselliği ile yakından bağlantılı olduğu vurgulanmalıdır. Bu birbirine bağlılık, ürünün yapısal bütünlüğünü korurken performans standartlarını karşılamasını sağlar [74].

3.5.5.1. Shore Sertlik

Shore sertliği, özellikle daha yumuşak plastikler için geçerli olan, polimerlerin girinti sertliğini değerlendirmek için kullanılan köklü bir yöntemdir. Bu teknik, çeşitli uygulamalarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini anlamada etkilidir. Shore sertliği ölçümlerinde kullanılan iki ana test prosedürü türü vardır: Shore A testi, özellikle daha yumuşak poliamid sınıflarını değerlendirmek için tasarlanmıştır; Shore D testi ise daha sert poliamid malzemeleri değerlendirmek için kullanılır. Prosedür, farklı sertlik değerleri gösteren malzeme numunelerinin özel bir Shore cihazına yerleştirilmesini içerir.

Test cihazı, 15 saniye boyunca 1 N'luk sabit bir kuvvetle malzeme numunesine bastırılan, hassas bir şekilde ölçülmüş 0,5 mm yarıçaplı bir uç girintisi kullanır. Bu süre zarfında, girinti, malzemede doğru bir değerlendirmeye olanak tanıyan bir iz oluşturur. Malzemenin sertliği, uygulanan ilk penetrasyon kuvveti ile girinti kuvveti kaldırıldıktan sonra polimer üzerinde kalan derinlik izi arasındaki farka göre hesaplanır. Testler tamamlandıktan sonra, cihaz birden fazla numunenin ortalama sertlik değerini otomatik olarak sağlayarak verimliliği ve doğruluğu artırır.

Genellikle, polimer numunelerin çeşitli özellikleri, performans özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilecek olası bileşim değişikliklerini değerlendirmek için yakından izlenir.

Shore sertlik ölçümleri, malzemenin moleküler yapısıyla içsel olarak ilişkilidir. Farklı poliamid sınıflarını karşılaştırırken, Shore sertlik değerlerindeki değişim, esas olarak malzemenin genel tokluğundaki küçük değişiklikler nedeniyle sürekli olarak gözlemlenir ve raporlanır; bu, çeşitli ortamlardaki belirli uygulamalar için çok önemli olabilir. Yüksek oranda uzun moleküler zincir içeren poliamidler, daha zorlu uygulamalar için uygun hale getiren artan Shore sertlik değerleri sergileme eğilimindedir.

Shore sertlik testi, polimer bileşimindeki en küçük farklılıkları bile doğrulamak ve izlemek için oldukça kullanışlı bir yöntem olarak kabul edilir. Uzun moleküler zincirlerin varlığı, malzeme içinde oldukça kristal bölgelerin oluşumuna katkıda bulunur; bu da kompakt yapıları korumaya yardımcı olur ve bükülme ve bükülme etkileşimlerini kolaylaştırır ve sonuçta gözlemlenen sertlikte bir artışa yol açar. Çekme testi yöntemlerinin aksine, Shore sertlik testi birçok önemli zaman alıcı ve emek yoğun gereksinimi ve ilişkili maliyetleri ortadan kaldırarak çeşitli uygulamalar için daha erişilebilir bir seçenek haline getirir[75].

Son olarak, çekme dayanımı ile Shore sertliği arasındaki regresyon analizlerinde ve V çentik ve çekme ölçümlerinde görülen yüksek korelasyon katsayılarına rağmen, Shore ve V çentik darbe dayanımlarının, düzlem gerilimli çekme darbe makinesiyle test edildiğinde kopma uzamasında yaklaşık %40,17'lik bir azalma ve yaklaşık %14,66'lık daha yüksek bir gerilme gösterdiğini belirtmek önemlidir. Sonuç olarak, Shore cihaz testini kullanmak, hem esnekliğin hem de darbe direncinin en önemli olduğu, örneğin otomobil gövdelerinde kullanılan kaplamalarda olduğu gibi özel uygulamalar için malzeme seçimi sürecinde inanılmaz derecede bilgilendirici olabilir. Bu nedenle, poliamidlerdeki Shore sertliği, mekanik özellik değerlendirme sektöründe kritik bir ölçü olarak öne çıkmaktadır. Akmayı sınırlayabilen veya engelleyebilen ve malzeme özelliklerini etkileyebilen üç moleküller arası kuvvetin nicel olarak belirlenmesi, modern test yöntemleri kullanılarak etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu yaklaşım yalnızca malzeme seçimi için değerli öngörüler sağlamakla kalmaz, aynı zamanda malzeme bileşimine doğal olarak bağlı olan işleme etkilerinin izlenmesini de sağlar. Ek olarak, kullanımı, birleşik çekme ve gerinim sonuçlarının kapsamlı bir istatistiksel değerlendirmesiyle doğrulanır ve pratik uygulamalardaki alaka düzeyini ve önemini daha da vurgular [76].

3.5.5.2. Rockwell sertlik

Önceki bölümde, poliamidlerin esas olarak kimyasal bileşimleri, yapıları ve/veya katkı maddeleri tarafından oluşturulan farklı mekanik özelliklere sahip olduklarından bahsedilmişti. Bu mekanik özelliklerden biri sertliktir. Sertliği ölçmek için kullanılan bir değer Shore sertliğidir. Shore sertliğinin aksine, Rockwell sertlik ölçeği başka bir test prensibine dayanmaktadır. Yük, testin bitirme aşamasında değişir. Bu nedenle, Rockwell sertliğinin avantajı daha kesin bir test sonucudur. Yük artışı ve malzeme yüzeyinin yer değiştirmesi testin sonunda normalleşir. Rockwell sertlik test yöntemi son girinti derinliğini sağlar. Penetrasyon mesafesi sertliğin bir ölçüsüdür. Daha sert malzemeler için, test sonucunu elde etmek için daha küçük bir penetrasyon derinliği vardır ve daha yumuşak malzemeler için de geçerlidir. Rockwell sertliğinin sonucu, parantez içinde bir sembol bulunan bir ölçekte verilir. Farklı ölçekler vardır ve hepsi poliamidler arasındaki farkları söyleyemez. Rockwell test yönteminin güçlü bir avantajı, hem yumuşak hem de sert malzemeleri test etmenin mümkün olmasıdır. Bir diğer nokta ise Rockwell testlerinin küçük ve ince numuneler için uygun olmasıdır. Bu, düz bir yüzey dışında başka bir test numunesi yüzeyinin gerekli olmadığı anlamına gelir. Sınırlamaları aynı numunelerin daha fazla test edilmesidir. Statik yükleme çıkarımı yoluyla sistematik bir analiz gerçekleştirilmeden önce, birkaç test gerçekleştirilmesi gerekir. Testler, genleşme veya sürtünme etkilerinden daha kolay etkilenebilir. Rockwell test yönteminin dinamik yük olarak listelenmesi dikkate alınmaz. Sert-yumuşak karşılaştırmasında, küçük yüzeyler ortalama alınır [77].

Rockwell sertlik sonuçlarını Shore A ölçümleriyle karşılaştırırken, seçilen malzeme daha yumuşak olanıdır. Sonuç olarak daha düşük Rockwell ve Shore sertliği elde edilir, ancak her ikisinin de ölçüm sapmaları nedeniyle standart sapma örtüşmektedir. Rockwell sertliği daha yüksektir; malzeme daha serttir; bu nedenle, işleme sırasında önlemler alınmalıdır. Rockwell sonuçlarının statik bir karşılaştırmasında, farklılıklar daha küçük çalışma sonuçlarını daha uzun çalışma sonuçlarından ayırır çünkü küresel seride daha küçük parametre dağılımları mevcuttur. Ölçüm ortamından, örneğin test süresi koşullarından hiçbir etki yapılmadığından, daha küçük sonuçlar özellikler ve bunların uzun ömürlülüğü açısından da çok avantajlı olabilir, yani daha az aşınma. Daha yüksek bir Rockwell sonucu daha düşük aşınma mukavemeti ile ilişkilendirilebilir.

3.5.6. **Sürünme ve Yorgunluk Davranışı**

Sürünme, bir malzemenin sürekli uygulanan gerilim altında zamana bağlı deformasyonudur ve mühendislik uygulamalarında kullanılan poliamidden yapılmış parçaları olumsuz etkileyen bir olgudur. Etkiler nispeten kısa süreli uygulamalarda ihmal edilebilir olsa da, sürünme sabit yük, uzun süreli uygulamalar ve yük taşıyan yapılarda kritik olabilir. Sürünmenin poliamid parçalar üzerindeki etkisi, malzemenin kalitesine ve uygulanan çalışma koşullarına göre büyük ölçüde değişse de, genellikle nemden etkilenir.

Yorgunluk Rejimi; Bir malzeme tekrarlanan yükleme ve boşaltmaya tabi tutulduğunda, gerilim malzemenin çekme veya basınç direncini aşmasa bile kırılabilir. Bunun "yorgunluk" koşulları altında meydana geldiği söylenir. Çevresel faktörlerin bu davranış üzerinde bir miktar etkisi olabilir. Yorgunluğun aşağıdaki belirtileri ayırt edilebilir:

- Maksimum gerilim sabit olduğunda, sabit sayıda yükleme/boşaltma döngüsünden sonra malzeme arızası;
- Sabit bir gerilim genliği ve yükün değişken pozitif ve negatif aralıklarla uygulandığı sabit sayıda çevrim altında arıza;
- Dalgalanan gerilim seviyeleriyle belirli sayıda çevrimden sonra arıza.

Sürünme ve Yorulma Özellikleri Arasındaki İlişki: Kısa süreli yüksek etkili yüklerin etkileri genellikle sürünme veya yorulma hasarına yol açar. Sürünme, titreşim yükü ortalama, sabit bir kuvvete sahip olduğunda meydana gelebilir. Yorulma direnci belirli olumsuz sıcaklık ve nem seviyelerinde azalabilir. Sürünmeye maruz kalan malzemeler, yalnızca statik yüklemeye maruz kaldıklarında daha yüksek yorulma direncine sahip olabilir. Sürünme örnekleri üretim sektöründe bulunmuştur: sürgülü kapı elemanının rayı ve endüstriyel bir kesme bıçağının bıçağı. Bu örnekler, bir ucun diğerine karşı kayması mekanizmasını göstermektedir; bu mekanizma daha sonraki uygulamalarda da yer almaktadır [47].

3.6. TERMAL ÖZELLİKLER

Poliamidler (PA), özellikle yüksek sıcaklık ve zorlu ortamlarda olmak üzere çeşitli endüstrilerde önemli uygulamalara sahiptir ve termal davranışlarını anlamak, performanslarını optimize etmek için çok önemlidir. Makromoleküler zincir yapısının açılması, erime noktasına ulaşmadan önce gerçekleşebilir ve bu da termal özelliklerinde

yer alan karmaşıklıkları vurgular. Camsı geçiş sıcaklığı, makromolekülün zincirlerinin artan esneklik gösterdiği ve polimerin özelliklerinde önemli bir değişikliğe yol açan kritik bir sıcaklık aralığını temsil eder. Bu dönüşüm, elastikiyetten sünekliğe veya daha basit bir ifadeyle kırılgan bir durumdan daha sert ve dayanıklı bir duruma geçişi ifade eder. PA'nın erime noktasının önemi, özellikle bu malzemeleri şekillendirmek ve oluşturmak için kullanılan işleme teknikleri bağlamında abartılamaz.

Amorf poliamidler için, erime noktaları genellikle yaklaşık 250 ila 270 °C aralığında yer alırken, yarı kristalin poliamidler 215 ila 270 °C'lik biraz daha geniş bir erime noktası aralığı sunar. Özellikle, bu polimerlerin kristal formları en düşük erime noktalarını sergiler, genellikle 105 °C civarındadır. Daha spesifik olarak, değiştirilmemiş yarı kristal PA'lar alanında, Naylon 6, Naylon 6/6 ve Naylon 6/12 gibi çeşitli tipler için erime noktaları sırasıyla 220 °C, 225 °C ve 227 °C olarak kaydedilir.

Bu, poliamidlerin moleküler sarkıt yapısının ve karmaşık kimyasal bileşiminin erime sıcaklığında gözlemlenen değişiklikleri etkilemede önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Amorf plastiklerin genellikle yarı kristal muadillerine kıyasla daha düşük erime noktalarına sahip olduğu ve dolayısıyla saf kristal polimerlerden daha düşük erime noktalarına sahip olduğu yaygın bir gözlemdir. Dahası, PA polimerleri alanında, amid ve hekzametilen gruplarının varlığındaki bir artış, erime sıcaklığında 220 °C'den 270 °C'ye kadar uzanan önemli bir artışla ilişkilidir. Bu ilişki, belirli uygulamalar için poliamid malzemelerin dikkatli tasarımı ve seçiminin önemini vurgular ve mühendislerin ve üreticilerin çeşitli termal ortamların taleplerini karşılamak için özellikleri uyarlamalarına olanak tanır [48].

Poliamidin (PA) üstün termal özellikleri, bir öğenin düzenli olarak önemli sıcaklık dalgalanmalarına maruz kalma olasılığının yüksek olduğu durumlarda çeşitli uygulamalar için özellikle değerli hale getirir. Herhangi bir mühendislik plastik parçasının uygun kullanım sıcaklığının maksimum 150 °C'yi geçmemesi ve benzer şekilde mühendislik dışı olarak sınıflandırılan plastikler için 100 °C'nin üzerine çıkmaması gerektiğini belirtmek önemlidir. Belirlenen sıcaklık aralığının aşılması, malzemenin istenmeyen termal bozulmasına yol açabilir. Poliamid 6 (PA6), PA'ları etkileyen nem emilimi ve hidrolizin ikili süreçleri nedeniyle uzun süre ısıya maruz kaldığında genellikle sertliğinin bir kısmını kaybeder. Normal bir ortamda, PA6 sadece iki hafta içinde önemli miktarda su emebilir ve nem emildiğinde, yüksek higroskopik eğilimleri nedeniyle, daha fazla işleme tabi tutulmadan önce malzemenin bir kurutucuda kurutulması gerekir. Birincil

endişe, neme maruz kalma süresi uzadığında ortaya çıkar; su, PA6'nın amid grubunun hidrolizi yoluyla bozunmasına neden olur ve bu da daha sonra mekanik özelliklerinde bir azalmaya yol açar. Öte yandan, mühendislik polimerleri, oksidasyona karşı geliştirilmiş termal bozunma dirençleri nedeniyle, belirlenmiş tasarım sıcaklık sınırları içinde olsalar bile, daha yüksek sıcaklıklarda tekrar tekrar kullanılma yeteneği sergiler. Ancak, termal bozunma sıcaklık eşiği aşıldığında bu polimerlerin işlenebilirliği tamamen azalır. Kritik işleme sıcaklık aralıklarının üzerinde kullanılan tüm polimerler bozulmaya, zayıflamaya ve çeşitli çevresel streslere karşı önemli ölçüde daha az dirençli hale gelmeye eğilimlidir. Bu bozulma, alt mikro yapılarındaki, kristal içeriklerindeki ve çapraz bağlı bağlarının veya ağlarının durumundaki değişikliklerden kaynaklanır. Bu nedenle, güvenilir ve etkili bir çalışma sağlamak için servis koşullarının kapsamlı bir şekilde anlaşılması çok önemlidir. Sıcaklık ve zaman maruz kalma gereksinimlerini yeterince karşılayacak ve böylece öngörülen servis ömrü içinde amaçlanan işlevselliğini sağlayacak uygun bir malzeme titizlikle seçilmelidir. Belirli üretim proses sektörlerindeki önemli uygulamalar arasında ısıl alev işlemi, plazma işlemleri, X-ışını uygulamaları ve yüksek sıcaklıklı otoklavların kullanımı yer almaktadır [78].

3.6.1. **Erime Noktası**

Poliamidlerin Tm'si, polimerin katı halden sıvı hale net bir dönüşüm geçirdiği belirli sıcaklığı ifade eder. Bu kritik erime noktası, işleme koşullarını doğrudan etkilediği için son derece önemlidir. İstenilen şekilleri elde etmek için, malzemelerin kendi erime noktalarının üzerinde yeterince ısıtılması, etkili şekillendirme ve kalıplama için akıcı, esnek bir hale geçmelerine olanak tanır. Ek olarak, çeşitli belirli çeşitler arasında poliamidin erime noktası dağılımı gösterilerek erime davranışındaki farklılıklar vurgulanır. Genel olarak polimerler için, benzersiz moleküler yapıları Tm'yi belirlemede önemli bir rol oynar, çünkü moleküllerin düzenlenmesindeki farklılıklar farklı erime özelliklerine ve termal özelliklere yol açabilir. Bu nedenle, bu faktörleri anlamak, poliamidleri içeren işleme tekniklerini ve uygulamalarını optimize etmek için çok önemlidir [79].

Üretim Sürecine Etkileri Test koşullarının doğası gereği, erime noktası çeşitli katkı maddelerinin nihai parçanın genel performansını ne ölçüde önemli ölçüde etkileyebileceğini doğru bir şekilde tahmin etmede veya teşhis etmede önemli bir faktör olarak ortaya çıkar. Aşağıda erime noktası ile karşılık gelen mekanik özellikler arasındaki

önemli ilişki özetlenmiştir. Ek olarak, erime noktasının takviye edici maddeler, plastikleştiriciler, antioksidanlar ve renklendiriciler dahil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere çeşitli katkı maddesi türlerinden de önemli ölçüde etkilendiği belirtilmelidir. Bu katkı maddelerinin her biri termal özellikleri benzersiz şekillerde değiştirebilir ve nihai ürünün performansını ve dayanıklılığını etkileyebilir.

Tm ve Nihai Uygulama Pazarı Poliamidin işleme aşamasında, malzemenin erime noktasının hemen altındaki bir sıcaklığa ısıtılması çok önemlidir. Sıcaklığın bu dikkatli kontrolü, hammaddenin üretim süreci sırasında uygun şekilde dönüştürülebilmesini sağlar. Erimiş malzemeler uygulanan basınç altında kalıp boşluğuna girdikçe, daha sonra tekrar katı parçalara dönüşecektir. Bu dönüşümün tamamlanması kritik öneme sahiptir ve yalnızca malzemenin genel büzülme oranı kalıbın kendisinin büzülme oranıyla mükemmel bir şekilde hizalandığında gerçekleşir. Bu hassas senkronizasyonun sağlanması, yüksek kaliteli, mükemmel şekilde tamamlanmış nihai ürünlerin yaratılması için hayati önem taşır [50].

3.6.2. **Camsı Geçiş Sıcaklığı**

Camsı geçiş sıcaklığı (Tg), genellikle camsı durum olarak adlandırılan çok daha sert ve kırılgan bir katı halden, kauçuksu durum olarak bilinen önemli ölçüde daha sünek ve esnek bir katı hale geçişi ifade eder. Bu önemli geçiş, stres, modül ve ısı bozulma sıcaklığı (HDT) dahil olmak üzere bir dizi mekanik özellik ile karakterize edilir. Tipik olarak, bu önemli geçiş yaklaşık 60 ila 100 santigrat derecelik bir sıcaklık aralığında meydana gelir. Tg'nin kesin değeri, polimer zincirleri arasında meydana gelen kritik bir yoğunluk azalması ve buna eşlik eden önemli bir hacim artışı nedeniyle PMX'in ultraviyole şeffaf hale geldiği belirli noktayı gösterir. Özellikle, Tg sıcaklığının üzerindeki yanal sertlik, bu sıcaklık geçişinin önemli bir özelliği olan sertlikte ani ve çarpıcı bir düşüş yaşar. Tg ile ilgili bir diğer dikkat çekici özellik, incelenen polimerlerin belirli kimyasal yapısına göre değişmesidir; örneğin, sert çubuk yapısı kristalleşmesine neden olabilir ve bu da PET'e kıyasla yaklaşık 140 °C derece daha yüksek bir Tg ile sonuçlanır. Tg-alt kütlesi, Tg'nin üzerinde yaşanan belirgin yanal sertlik kaybına işaret eder. Dahası, Tg'nin gelişiyle oluşan modüldeki azalmanın, yönlendirilmiş PA6 cam elyaf kompozitleri mevcut olduğunda genellikle daha kademeli olduğu gözlemlenir. Farklı formülasyon ve işleme koşullarının bu Tg değerini önemli ölçüde değiştirebileceğini belirtmek önemlidir. Gerçekten de, PA6 konakçılarıyla karşılaştırıldığında Tg'deki yaklaşık 30 santigrat

derecelik bağıl sıcaklık farkı, cam elyafların dahil edilmesiyle etkili bir şekilde azaltılır ve birkaç durumda, yalnızca PA66'nın veya modifiye edilmiş versiyonlarının standart kütle durumuna özel olarak uygulanabilen Tg engellenmiş metallerde önemli değişiklikler sergilemiştir. PA6, verimliliğini sergileyen çok sayıda Tg uygulaması sunar - PA66 birçok durumda mükemmeldir. Malzemeyi kullanımı sırasında belirli bir sıcaklık aralığında tutarak, cam geçiş süreci PA etkisini artırmaya yarar ve malzemenin özelliklerine, fiziksel özelliklerine ve korozyon direnci oranlarına olumlu katkıda bulunur. Termoplastik cam geçiş noktasının söz konusu polimerin kalınlığına büyük ölçüde bağlı olduğunu ve daha küçük sanat eserlerinde sıcaklıkta bir artış gözlemlenebileceğini fark etmek son derece önemlidir. Dahası, PA6'nın cam geçiş sıcaklığı, destekleyici maddelerin varlığı gibi çeşitli etki eden faktörler altında önemli ölçüde azalır; PA6 uygulamalarını değiştirmek için kullanıldığında, bu maddeler işlem sırasında sert veya hassas işlemlerden geçmelerine bağlı olarak cam geçiş sıcaklığını artırma veya azaltma kapasitesine sahiptir [80].

3.7. KİMYASAL DİRENÇ

Birçok durumda, poliamid çeşitli maddelere maruz kaldığında yeterli özellik değerlerini korumalıdır. Bu, özellikle poliamidin kimyasallar gibi dolgu ortamlarına yakın bir yerde kullanıldığı durumlarda geçerlidir. Sabit stres ve test stresinin çekme özellikleri üzerindeki etkisi aşağıdaki örneklerde gösterilmiştir. Ancak, eğilme stresi durumunda, seyreltik sülfürik asit durumunda yaklaşık 500 saat sonra yumuşar. Çeşitli poliamid türleri için kimyasal maddelerin karşılaştırılması ve direnci analiz etmek için uygulanabilir test yöntemi önemlidir. Polimerler genellikle çeşitli direnç özelliklerine sahiptir. Genel amaçlı poliamid sınıfları çoğunlukla asitler, bazlar ve çözücüler gibi yağlayıcıları kabul etse de, yalnızca mekanik özellikleri değil, aynı zamanda otomobil antifrizi gibi sulu çözeltilerin dayanıklılığını da koruması beklenir.

Büyük miktarda higroskopik nem sahip poliamidler, sulu çözeltilerde su emilimi nedeniyle yumuşama eğilimindedir. Başka bir deyişle, sulu çözeltiler gibi sıvılar nedeniyle metalin çözündüğü elektrokimyasal korozyonun poliamidde meydana gelmesi olası değildir. Korozyon seviyesi, endüstriyel malzemeler olarak giderek daha fazla kullanılan demir veya bakırdan daha düşüktür. Çeşitli sentetik poliamid sınıfları vardır ve ürünleri uygulama veya performansa göre ayırt etmek için sıklıkla yöntemler uygulanır. Kimyasal maddelere karşı direnç, çok yönlü bir reçine poliamidinin önemli bir özelliğidir.

Direnç, malzeme özelliği değişikliklerini test ederek belirlenir ve test yöntemleri açıklanır. Standartlar, kimyasal maddelerin ürün uygulamasına ve performansına göre nasıl seçileceğini ve üretici türüne odaklanarak malzeme seçimi için verilerin nasıl kullanılacağını belirtir. Poliamid, ekstrüzyon veya enjeksiyon testi ile kontrol için sıcaklık ve kalma süresine ek olarak elektriksel veya performans değeri sağlayan işlevsel bir parametreye de sahip olabilir. Metaller gibi polimerler de uygulamalara bağlı olarak farklı korozyon mekanizmalarına sahiptir. Makine alanında, mühendisler korozyon mekanizmalarına odaklanan teknik malzemeler seçerek güvenli ve güvenilir ürünler tasarlarlar. Bu bölümde, önce poliamidin çeşitli özel uygulamalarını kısaca açıklıyoruz ve ardından özellikle çözücüler tarafından korozyon mekanizmasını açıklıyoruz[81].

Tipik olarak, endüstriyel yapısal plastikler olarak poliamidler, amid grubunun ikincil bağlarını içeren su geçirmez veya doymuş termoplastiklerdir. Bu, hidrolizi iyileştirmek için su geçirmez veya doymuş termoplastikler yerine doymuş termoplastikler gerektiren poliolefinler, polyesterler ve polikarbonatların aksinedir. Başka bir deyişle, termoplastik poliamidlerin mühendislik için avantajı, çok yüksek bir moleküler ağırlığa katılaştırıldığında bile bozulmadan iyi mekanik özellikler göstermek için kullanılabilmeleridir. Poliamidler, özellikle kalıplamadan sonra su geçirmez özelliklerini güvenli ve kararlı bir şekilde koruyan malzemelerdir. Malzemeye derinlemesine su nüfuz etme durumları çok azdır. Yaklaşık bir ay sonra suyun poliamidin fiziksel özellikleri üzerinde çok sınırlı bir bozulma etkisi vardır çünkü gerilim gevşemesi azalır. Yaklaşık 50 yıldır belirtilen aynı güç seviyesinde kullanılan poliamid endüstriyel yapısal plastiklerde su mekanik mukavemet gereksinimlerini bozmamıştır. Yaklaşık 50 yıllık poliamid kalıplanmış ürün mukavemeti, gerilmede %1,2'lik bir değişimle gösterilen su şişmesi nedeniyle çok az değişecektir, ancak gerilim gevşemesi yaklaşık %50 oranında azalacaktır [55].

3.7.1. **Asitler ve Bazlar**

Poliamidlerin asitler ve bazlarla etkileşimi, poliamidlerin kimyasal direnci açısından özellikle önemlidir. Aşındırıcı maddelerin poliamid üzerindeki artan etkisine dayanarak, bunlar saldırgan olmayan, orta derecede saldırgan, saldırgan ve çok saldırgan olarak sınıflandırılabilir. Poliamidin asitlere ve bazlara direncini belirlemek için çeşitli deneysel yöntemler vardır. En yaygın olanı, numunelerin farklı sıcaklıklarda tek bileşenli bir sıvıya veya çok bileşenli bir aşındırıcı karışıma sürekli veya aralıklı olarak daldırılmasıdır.

Belirli bir test süresinden sonra, numuneler aşındırıcı ortamdan çıkarılır, damıtılmış suyla yıkanır ve oda sıcaklığında kurutulur. Kurutmanın ardından kütle, mekanik özellikler, yapı ve morfoloji değerlendirilir. Test süresinin başında elde edilen değerlerin ± %20'si aralığında olan elastiklik modülü, çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerleri dirençli olarak kabul edilir. Aksi takdirde, direnç elde edilemez.

Bazı poliamidler aşındırıcı maddelerin varlığında olabilir veya asit veya bazlarla işlenebilir. İşlenmek veya asit veya bazların varlığında kullanım için bazı alanlar kimyasal ekipman, alkalilere veya mide asitlerine dirençli filtreler, karter havalandırma yağı ayırıcıları ve akü üretimidir. Buna göre, asit ve bazların bulunduğu ve aşındırıcı sıvılarla temas halinde olan alanlarda, işlem uygundur. Bu örneklerden, bazı poliamidlerin kimyasal direncinin iyi olabileceği söylenebilir. Bu alt bölümdeki bilgilerden, poliamidin asitlere ve bazlara direncinin çok önemli bir rol oynadığı görülebilir. Yukarıdakilere dayanarak, kullanılan poliamidin uygun aşındırıcı sıvı ile işlenmesi önemlidir. Poliamidin aşındırıcı sıvılarla olan afinitesi, polimerin kimyasal yapısıyla güçlü bir şekilde ilişkilidir ve birçok gerçek uygulamada, çevresel bileşim uygulamaya özgüdür. Üç özellik için kullanılan belirli testler hakkında bilgi veren kategorizasyon. Açıkça, her bir bölme kriteri bazı operasyonel değişkenlerin, bu durumda çevresel saldırıların, polimer davranışı üzerindeki etkisiyle ilgilidir. Ancak, yavaş/FMHC grubundaki çevresel saldırılarla doğrudan bağlantılı olan yalnızca üç simülasyon, bir mühendislik kararının tasarımı sırasında az ya da çok doğru bilgi verebilir [82].

3.7.2. **Çözücüler**

Poliamidin çözücülerle etkileşimi, kimyasal direncinin bir bölümünü tanımlar. Çözücülerin polimerlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için çekme testleri, bükme testleri veya nano-indentasyon içeren daldırma testleri dahil olmak üzere çeşitli teknikler kullanılmıştır. Bu çalışmada, yalnızca bir uygun test metodolojisi seçilmiş ve daldırma testlerinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Plastik parçaların gerçek çalışma koşulları çok daha karmaşıktır, bazı parçalar kimyasallardan veya organik sıvılardan doğrudan etkilenirken; daha sıklıkla parçalar yalnızca dolaylı olarak etkilenir.

Poliamidlerin işlevsel parçaları (contalar, hortumlar, O-ringler, kesme kafaları) zamanla çevreleyen ortamla, örneğin bir yağ filtresiyle doğrudan temas halindeyse, bu parçalar sızdırmazlık özelliklerini kaybedebilir. Bu arızaların nedenleri çeşitlidir; bazı durumlarda şişme sonucu, diğer durumlarda ise çatlama, malzeme gevrekleşmesi veya parçalanma

sonucu meydana gelir. Bu nedenle, arızanın nedeni mekanik özelliklerdeki değişikliklere kadar izlenebilir. Organik çözücülerin etkileşiminin polimerlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmış ve bazı çözeltilerin artan maruz kalma süresi ve sıcaklıkla mekanik özelliklerde azalmaya neden olabileceği bulunmuştur [83].

3.7.3. Diğer Polimerlerle Karşılaştırma

Poliamidler, onları çeşitli endüstriyel uygulamalarda popüler bir seçim haline getiren, mekanik özelliklerin dikkate değer bir şekilde avantajlı bir kombinasyonunu sergiler. Çağdaş mühendisleri, teknoloji uzmanlarını ve tasarımcıları bu olağanüstü polimeri kullanmaya zorlayan poliamidlerin en önemli özelliklerinden biri, özellikle bu malzemeler inorganik liflerle güçlendirildiğinde elde edilen olağanüstü mekanik özellikler dengesidir. Diğer polimerlerin aksine, poliamid, birçok uygulamada önemli olan etkileyici termal kararlılık ve etkili sönümleme özellikleriyle birleştirilmiş kapsamlı bir mekanik parametre dizisini entegre ederek öne çıkar. Örneğin, polietilen ve polipropilenle karşılaştırıldığında, poliamidler, çeşitli yapılarda dayanıklılık ve sağlamlığı sağlamak için hayati önem taşıyan çekme mukavemeti, eğilme modülü ve kopma uzaması gibi kritik özelliklerde belirgin şekilde üstün bir denge gösterir. Dahası, poliamidlerle ilişkili ek belirgin avantajlar arasında, onları zorlu ortamlar için uygun hale getiren daha yüksek mukavemet ve sertliklerinin yanı sıra malzemelerin ani kuvvetlere dayanmasına yardımcı olan etkileyici darbe veya şok direnci yer alır. Ayrıca, poliamidler olağanüstü termal kararlılıkları ve ısı dirençleriyle ünlüdür ve bu sayede yüksek sıcaklık koşullarında bile güvenilir bir şekilde performans gösterebilirler; bu da malzemelerin bir dizi çevresel faktöre karşı bütünlüğünü ve performansını koruması gereken uygulamalar için çok önemlidir.

Poliamidin mekanik özelliklerini polipropilenle karşılaştırdığımızda, polipropilenin çeşitli diğer malzemelere kıyasla bir polimer olarak gerçekten üstün esneklik gösterdiğini keşfediyoruz. Bu esneklik, öncelikle nispeten düşük çekme mukavemetinden kaynaklanmaktadır. Ancak, belirli açılardan, polipropilenin standart mekanik performans ölçütleri söz konusu olduğunda diğer polimerleri geride bıraktığını belirtmek önemlidir. Bu avantajlar, kristalinitenin genel maliyeti, polipropilenin doğal özelliklerini geliştirmek için kullanılabilen çeşitli gelişmekte olan polimerler ve darbe direnci, çekme mukavemeti ve sertliği gibi belirli alanlarda özellikle belirgindir [84].

Poliamidin çekme mukavemeti ve sertlik açısından gelişmiş performans gösterdiği ve bu

nedenle bazı uygulamalarda tercih edilen bir seçenek haline geldiği yadsınamaz bir gerçek olsa da, pratik zorluk polipropilenin yaygın kullanımında yatmaktadır. Polipropilenin sunduğu özelliklerin benzersiz kombinasyonu, özellikle hem ticari hem de endüstriyel bağlamlarda yaygın olarak benimsenen daha uygun maliyetli bir çözüm statüsü göz önüne alındığında, tamamen değiştirilmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, bu tartışma boyunca açıklanan özelliklerin evrensel olarak uygulanabilir standart sonuçlar olarak kabul edilmemesi gerektiğini belirtmek de önemlidir; bunun yerine, değerlendirildikleri belirli ve ayrıntılı orijinal testler ve teknik koşullarla sınırlı kalırlar.

3.8. TRİBOLOJİK ÖZELLİKLER

PA 6 polimerleri rulmanlar, dişliler, aşınma levhaları, birleştirme elemanları, makaralar, yatak bilezikleri gibi parçaların imalatı için uygundur ve çelik, bronz, pirinç ve paslanmaz çelik yerine kullanılabilir. Düşük ve normal kayma hızlarında, toz, kum ve benzeri aşındırıcı ortamlarda PA 6'nın çalışma ömrü bronz, dökme demir, demir ve çelikten 2-10 kat daha uzundur. Bunun yanı sıra, PA 6'ya PTFE ve grafit ilavesi, uygun kayma özelliklerinin sağlanmasıyla sonuçlanır ve böylece iyi aşınma özelliklerine sahip bir PA 6 tipi elde edilir [85].

3.9. ÇEVRESEL DAYANIM ÖZELLİĞİ

PA 6, diğer poliamid türleri gibi madeni yağlara, yakıtlara, hidrolik sıvılara, temizleme kimyasallarına ve deterjanlara, soğutuculara, alifatik ve aromatik hidrokarbonlara karşı dayanıklıdır. Muhtelif solventlere, yağlayıcılara ve deterjanlara karşı PA 66'dan daha dayanıklıdır.

Poliamit 6 (PA 6), alkollere, esterlere ve ketonlara dayanıklı olmakla birlikte, seyreltilmiş mineral aside dayanıklı değildir. Ayrıca, klorlu hidrokarbonlar, mineral yağlar, hidrolik yağlar, deniz suyu, tuzlar ve bazlara karşı iyi bir dirence sahiptir. Bununla birlikte, formik asit, sülfürik asit gibi asitlere ve oksitlenmiş maddelere karşı direnci düşüktür. PA 6, tamamen çözünebilen çözeltilerde, örneğin formik asit ve sülfürik asit gibi asitlerle etkileşime girerek çözünür. PA 6, diğer tüm poliamitler gibi UV radyasyona karşı düşük bir dirence sahiptir, ancak uygun stabilizasyon maddeleri kullanılarak bu özelliği geliştirilebilir. Termal olarak, PA 6 diğer plastiklere göre daha yüksek bir erime noktasına sahiptir. Poliamit 6, 220°C'de erir ve yarı kristal bir malzemedir. PA 6'nın termal

özellikleri PA 66 ile hemen hemen aynıdır, ancak PA 6 daha yüksek bir erime noktasına sahiptir [86]

3.10. PLASTİK MALZEMELERİN AŞINMA DAVRANIŞI

Polimerler, aşındırıcı ve yapışkan sürtünmeye maruz kalmaktadır ve davranışları yapışkan aşınmasıyla karakterize edilir. Polimer-polimer sistemlerindeki aşınma, polimer-metal sistemlerindeki aşınmadan daha şiddetlidir ve en iyi sonuçlar polimerler arasında farklılıkların olduğu durumlarda elde edilir. Yağlayıcı, plastiklerin birbirine karşı hareket ettiği durumlarda önerilmektedir. Sürtünme katsayısı, aşınma faktörü, spesifik aşınma oranı ve basınç-hız oranı, polimer aşınma direncini belirlemek için kullanılan önemli faktörlerdir. Düşük sürtünme katsayısı genellikle iyi bir aşınma direncinin göstergesidir. Polimerin sürtünme durumları yük, hız, sıcaklık ve yüzeye bağlıdır. Aşınma faktörü aşınma hacmi, uygulanan yük, hız ve test süresi ile hesaplanır. Aşınma direnci, yüksek sıcaklıklarda azalır ve aşınmanın performansı, karşıt malzemenin türü, yüzey pürüzlülüğü ve sertlik gibi faktörlerden etkilenir[88].

3.10.1. Aşındırıcı Aşınma Teorisi

Aşındırıcı aşınma, iki cisim arasındaki sürtünme ve hareket sonucu daha sert olan cismi çizen bir süreçtir. Bu süreçte, cisimler birbirlerine sürtünerek µm düzeyinde talaş kaldırır ve darbe, ufalanma, railbalama ve kesme gibi etkiler meydana gelir. Farklı malzeme kombinasyonlarının olduğu katı-katı, katı-sıvı ve parçacık-katı gibi birçok aşınma türü bulunmaktadır. Laboratuvar testleri genellikle iki prensibe dayanır: sabit aşındırıcı malzeme üzerinde pim şeklinde hazırlanmış bir numune veya dönen bir tekerlek ile temas halinde kayan düz bir numune arasına serbest aşındırıcı parçacıkların sürekli dökülmesi. Bu yöntemlerde aşındırıcı malzemeler olarak genellikle aşındırıcı kağıtlar veya bezler kullanılır ve aşındırıcı malzemelerin aşınma oranı, numunenin tekrarı ile azalır. Aşınma miktarı ve önemi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişir[89].

3.10.2. Yorulma Aşınma Teorisi

Yorulma aşınması, mühendislik malzemelerinin zamanla yorulma başarısızlığına yol açan tekrarlayan gerilmeler altında yüzey aşınmasıyla karakterizedir. Bu aşınma genellikle malzeme yüzeyinde mikro çatlaklar oluşmasıyla başlar. Örneğin, tekrarlayan yuvarlanma veya kayma teması gibi stresler bu mikro çatlaklara neden olur. Mikro

çatlaklar yüzeye kadar ilerlediğinde parçacıklar yüzeyden koparak çukurlar ve oyuklar oluşturur. Bu tür yorulma genellikle elastik aralıkta değişen gerilmelerle gerçekleştiği için uzun ömürlü yorulma olarak adlandırılır. Uzun ömürlü yüzey yorulması, dişli çark mekanizmaları, şaft mekanizmaları, rulmanlı yataklar, demiryolu rayları ve soğuk/sıcak yüzeyler gibi tribolojik sistemlerde yaygın olarak görülür. Haddehaneler ve sirkülasyon pompaları gibi makine elemanlarında da bu tür aşınmaya rastlanabilir[90].

3.10.3. **Yüzeyler arası aşınma**

Aşındırma işlemlerinin yapışkan veya transfer aşındırma ve kimyasal aşındırma olmak üzere ikiye ayrılabileceği belirtilmektedir. Aşınmalar polimer yüzeyinin ince katmanlarını etkilemektedir ve yüksek gerilmeler ve sıcaklıkların deformasyon aşındırmaya neden olduğu ifade edilmektedir. Sünek polimerlerin kimyasal analiz olmaksızın eriyip yumuşayabileceği, bazı polimerlerin ise kimyasal azalmalara dayanabileceği belirtilmektedir. PTFE üzerinde yapılan çalışmalar, kimyasal aşınmanın malzeme kaybını artırabileceğini ve temiz metal yüzeylerin katalitik aktivitesini geliştirebileceğini göstermiştir. Polimerlerin ve kompozitlerin termal analizinin farklı çevresel koşullar altında yapılmasıyla kimyasal aşınma hakkında bilgi edinilebileceği ifade edilmektedir. Kurşun oksidin rolünün belirsiz olduğu durumlarda, bakır veya bir oksidin polietilenin gaz fazının oksidasyonunda katalizör işlevi görebileceği belirtilmektedir[91].

3.10.4. **Yapışkan Aşınma**

Yapışkan aşınma, kayan metal-metal çiftlerinin birbirlerine sürtünme ile temas etmesinden kaynaklanır. Bu sürtünme sonucu yüzeyler arasında çok küçük temas alanı oluşur ve temas noktaları büyük bir basınç altında kalır. Bu basınç, yüzeylerdeki yağ, nem ve oksit tabakalarını parçalayarak adhezyon adı verilen bir çekim kuvvetinin oluşmasına neden olur. Bu çekim kuvveti, parçaların birbirinden kopmasına ve soğuk kaynakların oluşmasına sebep olur. Bu durum adhezif aşınma olarak adlandırılır ve malzeme kaybına yol açar. Temas halindeki malzemelerde bu tür aşınmayı önlemek veya korumak mümkün değildir[92].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Kompozitlerin kullanımı hafiflikleri, sertlikleri, düşük üretim maliyetleri, tasarım esneklikleri, mükemmel özgül özellikleri ve korozyon dirençleri nedeniyle artmıştır. Dayanıklılık, modül ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için termoplastik matrise karbon, bor, cam elyafları ve kısa elyaflar eklenir. Kompozitlerin üç temel sınıflandırması polimer bazlı kompozitler, metal bazlı kompozitler ve seramik bazlı kompozitlerdir. Polimer bazlı kompozitlerdeki bir dizi bilimsel gelişme, onlara farklı endüstriyel uygulamalarda büyük potansiyel kazandırmıştır. Ergonomi ve metale alternatifliği vurgulayan çeşitli uygulamalar için cam elyafları ve elastomerik katkılar içeren bazı termoplastik polimer bileşimleri geliştirilmiştir. Elastomerik katkıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için cam takviyeli bir poliamid incelenmiştir. Daha sonra mekanik özellikler karşılaştırılarak hangi elastomerik katkıların en iyi performansa sahip olduğu doğrulanmıştır. Mevcut çalışmada kullanılan malzeme elastomerik katkılar içeren cam takviyeli poliamiddir[42].

4.1. DENEY MALZEMELERİ

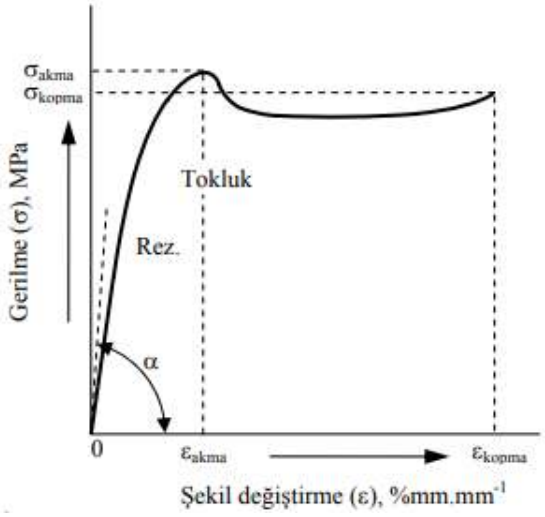
Bu çalışmada matris malzemesi olarak Belçika'daki Domopolymers firmasından Domamid ticari koduyla temin edilen PA6 polimeri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan PA6 polimerinin yoğunluğu 1,14 g/cm³'tür. EPDM elastomer (Exxelor, Exxon Mobil) ve cam bilye katkıları (Microperl 1050-20-215, Sovitec) dahil edilmiştir. Cam bilye ve EPDM ile güçlendirilmiş PA6 kompozitler, NR-II-75 tipi bir ekstrüder (vida çapı: 75, L/D: 32) kullanılarak çift vidalı ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama ile üretilmiştir. Ekstrüzyon sırasında şarj hunisi ile ekstrüzyon kalıbı arasındaki sıcaklık dağılımı 180°C ile 250°C arasında bulunmuştur. Çekme ve darbe numuneleri, ekstrüde edilmiş GB-EPDM-PA6 polimer granüllerinin 80°C'de 4 saat boyunca bir fırında kurutulmasının ardından enjeksiyonla kalıplanmıştır. Şarj hunisi ile kalıp arasındaki sıcaklık dağılımı, enjeksiyon işlemi için 220°C ile 245°C arasında olacak şekilde seçilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney numuneleri ve oranları.

Kısa adı	% Cam Bilye Oranı	% EPDM Kauçuk Oranı
PA6-5GB	5	0
PA6-10GB	10	0
PA6-15GB	15	0
PA6-20GB	20	0
PA6-8 EPDM	0	8
PA6-8 EPDM-5GB	5	8
PA6-8 EPDM-10GB	10	8
PA6-8 EPDM-15GB	15	8
PA6-8 EPDM-20GB	20	8
PA6-12EPDM	0	12
PA6-12EPDM-5GB	5	12
PA6-12EPDM-10GB	10	12
PA6-12EPDM-15GB	15	12
PA6-12EPDM-20GB	20	12
PA6-16EPDM	0	16
PA6-16EPDM-5GB	5	16
PA6-16EPDM-10GB	10	16
PA6-16EPDM-15GB	15	16
PA6-16EPDM-20GB	20	16

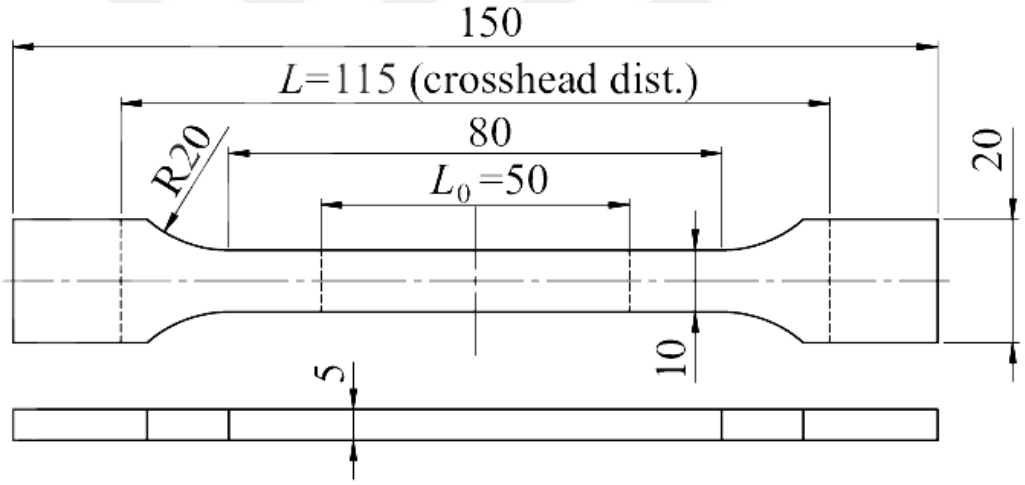
4.2. ÇEKME DAYANIMI

Çekme testlerinde, numune sabit bir hızda uzunlamasına yönde çekilir. Örneğin kırılıncaya veya önceden belirlenmiş bir değere çekilinceye kadar dayanabileceği gerilim ve gerinim ölçülür. Çekme testleri, Şekil ‘de gösterilen ilk test türü olan ISO 527 uyarınca gerçekleştirildi. En az beş numunenin test edilmesiyle elde edilen verilerin ortalamaları elde edilir.



Şekil 4.1. Çekme testi örnek grafiği.

Çekme testleri ISO 527 standartlarına uygun olarak oda sıcaklığında, %50 bağıl nemde ve 50 mm/dak çekme hızında Besmak 500 kN cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2. ISO 527 Numune teknik resmi.

Çekme testleri toplam 36 numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bütün çekme testleri her kompozisyondan 5 numune üzerinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar analiz edilmiş ve ortalamalar alınmıştır. Tüm çekme testlerinde çekme hızı 50 mm/dak olarak ayarlanmış ve testler oda sıcaklığında (23ºC) gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda elde edilen çekme dayanımı, % kopma uzaması ve Young modülü değerleri çekme test cihazına bağlı bir bilgisayar kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. ISO 527 Test numune ölçüleri.

Numune Tipi	Açıklama	l3 mm	l1 mm	b2 mm	b1 mm	h mm	L0 mm	L mm
Tip 2 (Şeritler)	Tavsiye edilen test numunesi	≥150			10 - 25	≤1	50±0,5	100±5 1
Tip 5 (Papyon numune)	Kopmada çok yüksek uzama için önerilen	≥115	33±2	25±1	6±0,4	≤1	25±0,25	80±5
Tip 1B (Papyon numune)	Sert paneller için önerilen	≥150	60±0,5	20±0,5	10±0,2	≤1	50±0,5	115±5 2

Cihaza bağlı bilgisayarda, deney sırasında elde edilen veriler, gerekli hesaplamaları yapan bir yazılım programı tarafından değerlendirilmektedir. Çekme testi ile eş zamanlı olarak cihaza bir ekstansometre cihazı entegre edilmiş ve elastisite modülü değerleri de belirlenmiştir. Çekme mukavemetlerinin hesaplanması (3.1)'de verilmiştir.

$$\sigma_ç = \frac{F}{A_o} \ , \ A_o = DxH \tag{3.1}$$

$\sigma_ç$: Çekme mukavemeti, MPa,

F: Maksimum yük, N,

A_o: Numune kesit alanı, mm^2,

D: Numune genişliği, mm,

H: Numune kalınlığı, mm olarak ifade edilmektedir.

Elastisite Modülü, bir malzemenin elastik deformasyona veya sertliğe karşı direnci. Elastisite modülünü hesaplamak için (3.2) denklemi kullanılmıştır[47].

$$E = \tan\alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{3.2}$$

E: Elastiklik modülü, N/mm2

σ: Gerilme, N/mm2

ε: Birim şekil değiştirme oranı, olarak ifade edilmektedir.

Kopma uzaması (% uzama) değerinin hesaplanmasında ise (3.3) denklemi kullanılmıştır[47].

$$\%uzama = \frac{\Delta l}{l_o} \ x100 \tag{3.3.}$$

Şekil 4.3. Besmak marka üniversal çekme cihazı.

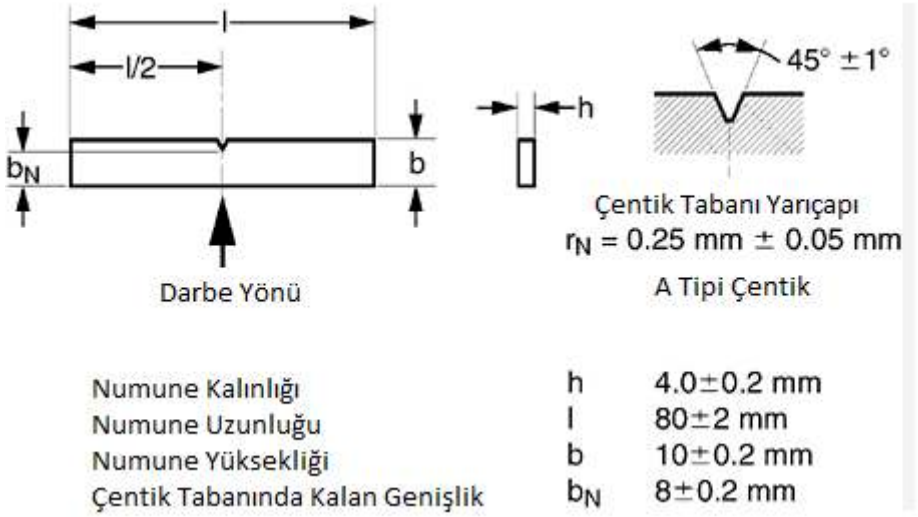
4.3. DARBE TESTLERİ

Birim kesit alanı başına numuneler tarafından absorbe edilen kırılma enerjilerinin belirlenmesi için ISO 179 standardına uygun Charpy çentikli darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Charpy çentikli darbe testleri enjeksiyon kalıplama ile gerçekleştirilmiştir. 4x10x80mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Numunelere V çentik açılmıştır. Çentikli darbe Time XJ dijital göstergeli darbe test cihazı, Şekil 3.4 'de gösterilmiştir.

Şekil 4.4. Charpy darbe deney cihazı.

Deneyler oda sıcaklığında (23°C) gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda oluşan darbe enerjisi numunelerin büyüklüğü, numune sayısı cinsinden kJ/m^2 olarak doğrudan cihazdan girilmektedir. Deneysel çalışmalar kapsamında toplam 36 numuneye darbe testi uygulanmıştır. Her kompozisyon türünden 3 numune, darbe testi gerçekleştirilmiş ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Darbe testleri ISO 179 standardına uygun olarak TIME-

XJJ50W darbe makinesinde gerçekleştirilmiştir.



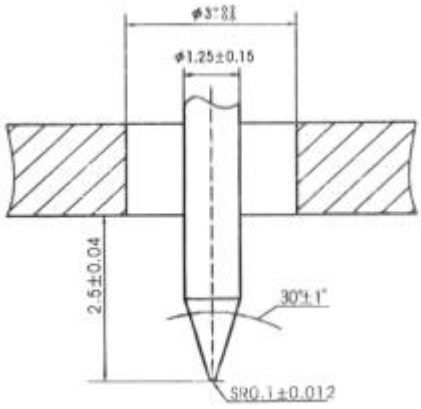
Şekil 4.5. Charpy darbe deney numunesi ve V çentik teknik resimleri [67]

4.4. SERTLİK TESTLERİ

Polimer malzemelerin sertlik değerleri, A tipi ve D tipi olmak üzere iki farklı shoremetre kullanılarak belirlenebilir. Yumuşak plastikler için A tipi shoremetre (Shore A), sert plastikler için ise D tipi shoremetre (Shore D) kullanılır. Shore A sertliği için 1 kg yük uygulanır. Shore D sertliği için 5 kg yük uygulanır. Shore D sertlik ölçüm cihazı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Shore A tipi shoremetre ile sertlik değerlerini belirleyebilmek için numunenin kalınlığı en az 5 mm, Shore D tipi shoremetre için numunenin kalınlığı en az 3 mm olmalıdır.

Şekil 4.6. Shore D sertlik cihazı.

Sertlik testleri ISO 7619 standardına uygun olarak TIME-TH210 makinesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Shore D batıcı uç teknik resmi [100].

4.5. AŞINMA TESTİ

Makine, bir elektrik motoru, bir yük kolu, ana gövdeye bağlı bir yük hücresi ve bir bilgisayardan oluşmaktadır. Aparat, bir elektrik motoru tarafından döndürülen bir diskten oluşmaktadır. Deneylerde kullanılması amaçlanan disk malzemesi aparatta mevcut disk üzerine yerleştirilir ve vidalarla sabitlenir. 6 mm çapındaki polimer pimler, kola bağlı olan çap polimer pim malzemelerine bağlanır. Aşınma testinden önce numuneler alkol ile temizlenir ve 30 dakika kurutulur. Numune bağlanması için belirlenen alana tutturulan pim numunesi daha sonra disk yüzeyine bırakılır ve pim numunesi disk yüzeyine sürtülerek diskin dönüş yönünde hareket etmesi sağlanır. Bu, kolun ileri doğru hareketiyle sonuçlanır ve yanal kuvvet ve yanal kuvvet bir yük hücresi tarafından ölçülür ve değerler ekranda görüntülenir. Aynı zamanda, bu veriler doğrudan bir Excel programına aktarılabilir.

Deney aşamasında, cihaz dakikada 600 veri noktası alacak şekilde yapılandırılmış ve deney süresince ortalama yaklaşık 18.000 veri değeri elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen yanal yük değerleri Excel programının D sütununda görüntülenen değerleri elde etmek için yük değerine bölünmüş ve bu veriler daha sonra kayma mesafesi X ekseninde olacak şekilde Y ekseninde çizilmiştir.

Sonuç grafiği oluşturulmuş ve mesafe arttıkça sürtünme katsayısı grafiği elde edilmiştir. Aşınma testinde, pim numuneleri için özel bir plastik enjeksiyon kalıbı tasarlanmış ve kullanılmıştır. 100 mm çapında ve 5 mm kalınlığında 4340 kalite çeliği karşı disk olarak kullanılmıştır. 4340 kalite çeliğinin kimyasal bileşimi çizelge 4.3. ’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.3. Karşı disk kimyasal bileşimi.

Element	Sembol	Ağırlıkça Yüzde (%)
Karbon	C	0.30 - 0.38
Silisyum	Si	0.15 - 0.40
Mangan	Mn	0.40 - 0.70
Fosfor (Max)	P	0.035
Kükürt (Max)	S	0.035
Krom	Cr	1.40 - 1.70
Molibden	Mo	0.15 - 0.30
Nikel	Ni	1.40 - 1.70
Vanadyum	V	-

Disk yüzeyleri her deney sonucunda 1200 -1500 nolu zımpara ile parlatılmış ve alkol ile temizlenmiştir. Karşı disklerin yüzey profilometresi ile yüzey pürüzlülüğün alınmıştır ve karşı disk malzemenin yüzey pürüzlülüğü 0,25 µm olarak ölçülmüştür.

PA ve kompozitlerinin tek bir disk tipine karşı sürtünmesini belirlemek için tribolojik deneyler yapılmıştır. Sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Yanal sürtünme katsayısı kuvvetin normalde uygulanan kuvvete oranı olarak ifade edilir ve aşağıdaki sürtünme katsayısı denklemi (3.4) ile hesaplanır.

$$\mu = F_S/F_N \tag{3.4}$$

µ: Sürtünme katsayısı

FS: Yanal sürtünme kuvveti N;

FN: Normal kuvvet, N

Aşınma testi süresinin sonunda, kol ilk olarak kaldırılır ve aşınma programı başlatılır. Daha sonra diski döndüren motor üzerindeki durdurma düğmesine basılarak disk durdurulur. Pim, üzerinde aşınma parçacıkları ve çapaklar varsa, bağlı olduğu alandan çıkarılır. Numune nihai ağırlık ölçümü için dijital terazide tartılmıştır. Deneyde kullanılan hassas terazi, 0,0001 g hassasiyetedir. Test numunelerinin nemi alındıktan sonra, ilk ağırlık ile son ağırlık arasındaki fark hesaplanmıştır. Farkın hesaplanmasıyla, belirtilen koşullar için numunenin aşınma değeri bulunur. Denklem (3.5), numunelerin spesifik

aşınma oranını hesaplamak için kullanılır.

$$W_a = \Delta m \div (S \times \rho \times F_N) \tag{3.5}$$

Wa: Spesifik aşınma oranı, m^2/N

Δm: Aşınma miktarı, gr.

S: Kayma yolu, m.

ρ : Test numunesinin yoğunluğu, gr/cm3

FN: Normal kuvvet,N.

Şekil 4.8. Aşınma deneyi cihazı.

Test cihazı, 1000 N'luk bir normal yük, 4000 m kayma mesafesi ve 1 m/s'lik bir ileri geri hızdan oluştu. Aşınma testi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testine başlamadan önce, test numuneleri tam boyutlarını doğrulamak için optik mikroskop altında kontrol edilmiştir. Bundan sonra aşınma testleri başlatılmıştır. Aşınma testi numunelerinin ara parça oranlarından birkaç set üretilmiştir. Ana aşınma değerlendirme testleri, maruz kalmamış durumdaki numuneler kullanılarak gerçekleştirildi Elastomer ve çeşitli parçacık-elyaf oranlarındaki artışın etkilerinin sonuçlarının incelemekti. Her bir test seti için, aşınma yüklerinin deneysel faktörleri değerlendirilmiştir. Her bir test seti için aynı aşınma yükleri uygulanmıştır. Her aşınma testinin tamamlanmasının ardından, test numunelerinin aşınmasını değerlendirmek için bir taramalı elektron ve bir optik mikroskop kullanılmıştır. Aşınma testi tamamlandıktan sonra bazı numuneler başka testlere tabi tutulmuştur. Bu numunelerin kalınlığını kontrol etmek için kalınlık ölçer kullanılmıştır.

4.6. YÜZEY GÖRÜNTÜLEME

Poliamid yapı içerisindeki EPDM ve cam bilye dağılımını incelemek amacıyla ve çekme testi, darbe testi sonrası kırık yüzey görüntülerini ve de aşınma sonrası oluşan aşınma yüzeyleri incelemek için Taramalı elektron mikroskop cihazı kullanılmıştır. Aşınma ve kırık numune yüzeyleri İncelemeden önce altın ve paladyum tabakasıyla kaplanan numunelerin görüntülerini elde etmek için bir taramalı elektron mikroskobu FEI Quanta FEG 250 kullanılmıştır.

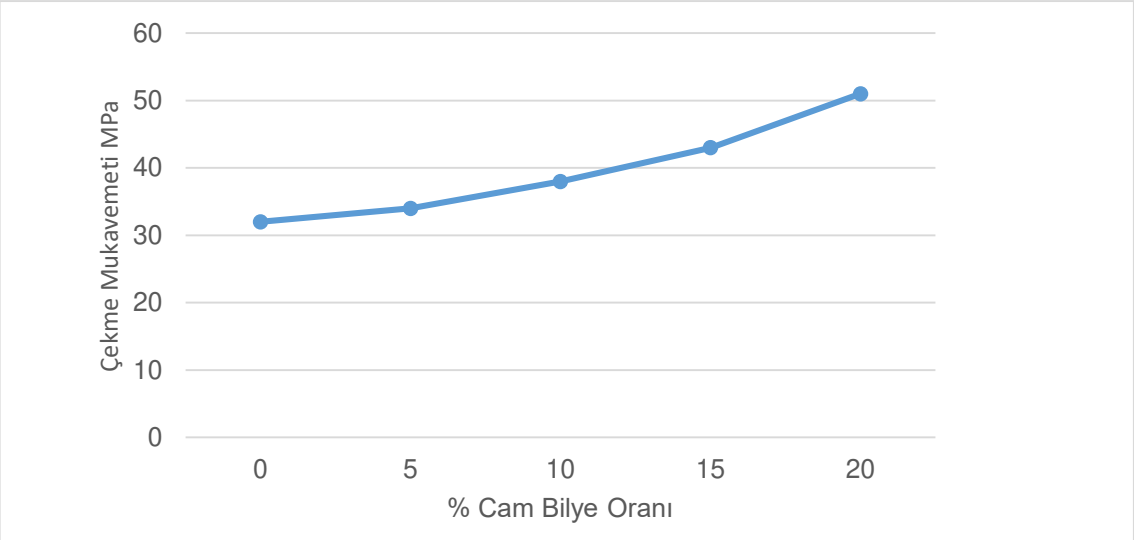
Şekil 4.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. ÇEKME TESTLERİ

5.1.1. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Çekme Testi Sonuçlarının İncelenmesi

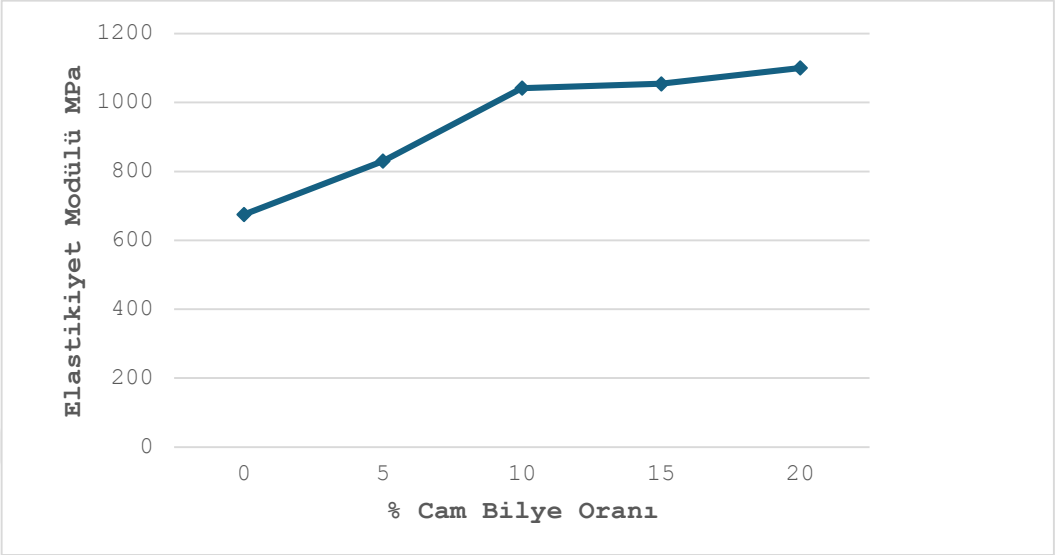
Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'de PA6 polimerinin ve PA6-8EPDM kompozitlerinin çekme mukavemetinde, kopma uzamasında ve çekme elastikiyet modülünde değişiklikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.1, PA6-8EPDM kompozite çekme mukavemetinin cam bilyelerin eklenmesiyle doğru orantılı olarak arttığını ve PA6-8EPDM kompozitine %5, %10, %15, %20 cam bilye eklendiğinde 32MPa değerinden sırasıyla 34MPa, 38MPa, 43MPa, 51MPa değerine ulaştığı görülmektedir. Cam bilye katkısız haline göre %5, %10, %15, %20 cam bilye eklenmesiyle Çekme mukavet değerleri yaklaşık olarak %6, %19, %34 ve %59 oranında artmıştır. En yüksek değerleri %59 artış oranıyla PA6-8EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



Şekil 5.1. PA-6-8EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değişim grafiği.

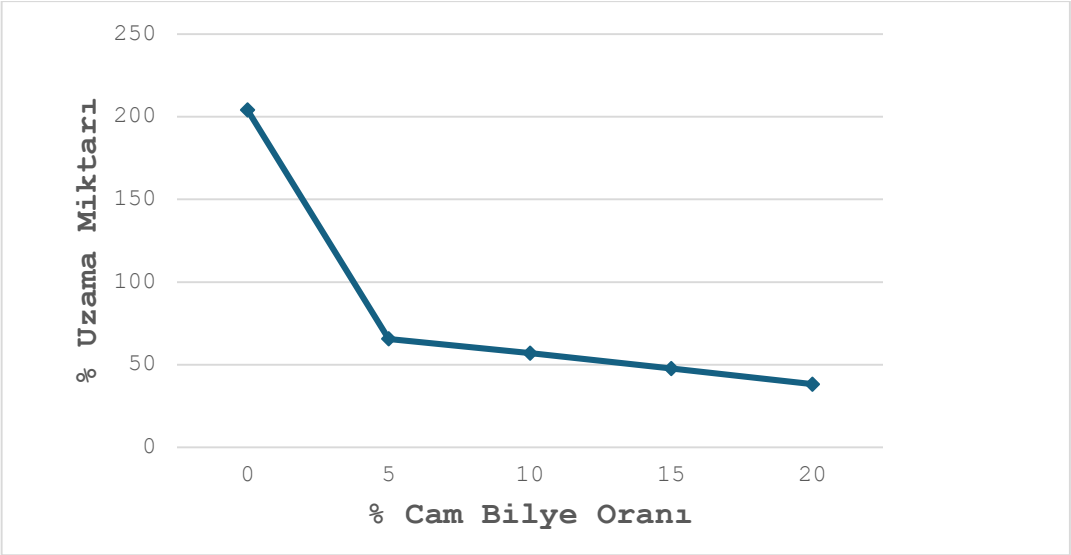
Şekil 5.2'deki elastisite modülü değerlerinin yerinde incelenmesi, PA6-8EPDM polimerine %5, %10, %15, %20 oranında cam bilyelerin dahil edilmesinin elastisite modülünde artışa sebep olmuştur. PA6-8EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde 675MPa değerinden sırasıyla 830 MPa, 1042 MPa, 1054 MPa ve 1100 MPa değerine yükselirken, cam bilye katkısız haline göre %5, %10, %15, %20 cam bilye

eklenmesiyle elastisite modülü değerleri yaklaşık olarak %23, %54, %56 ve %63 oranında artmıştır. En yüksek değeri %63 artış oranıyla PA6-8EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



Şekil 5.2. PA-6-8EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin elastisite modülünün cam bilye oranına göre değişimi.

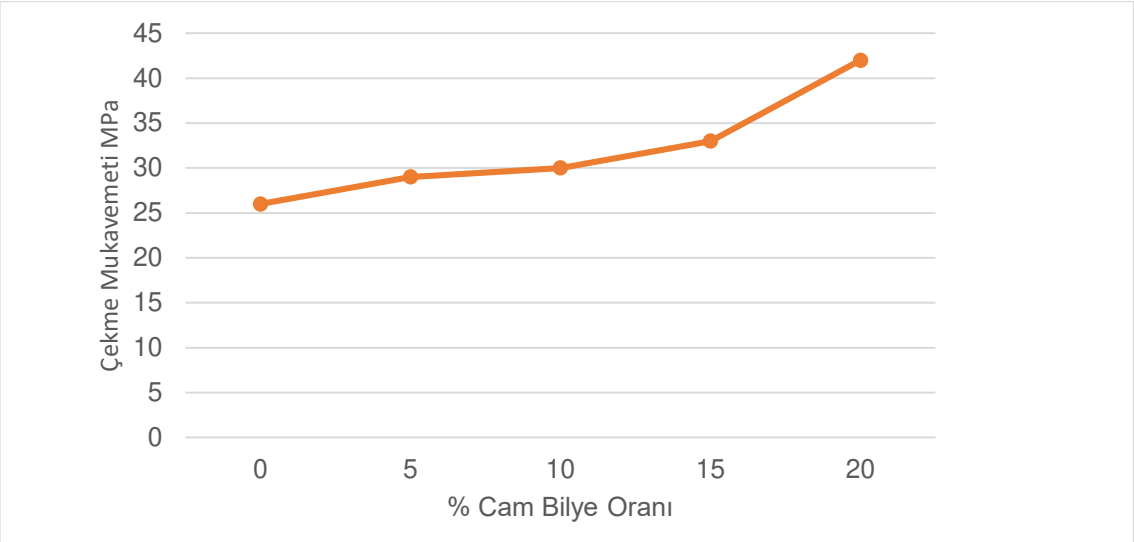
Şekil 5.3, PA6-8EPDM kompozitine %5, %10, %15 ve %20 cam bilye ilavesi oranı arttıkça uzama miktarının azaldığını gösteren bir kopma uzaması grafiği sunmaktadır. PA6-8EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde %204 değerinden sırasıyla %66, %57, %48, %38 değerine düşerken, cam bilye katkısız haline göre %5, %10, %15, %20 cam bilye eklenmesiyle kopma uzaması değerleri yaklaşık olarak %68, %72, %77 ve %81 oranında azalmıştır. En düşük değerleri %81 düşüş oranıyla PA6-8EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



Şekil 5.3. PA-6-8EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin kopma uzaması cam bilye oranına göre değişmektedir.

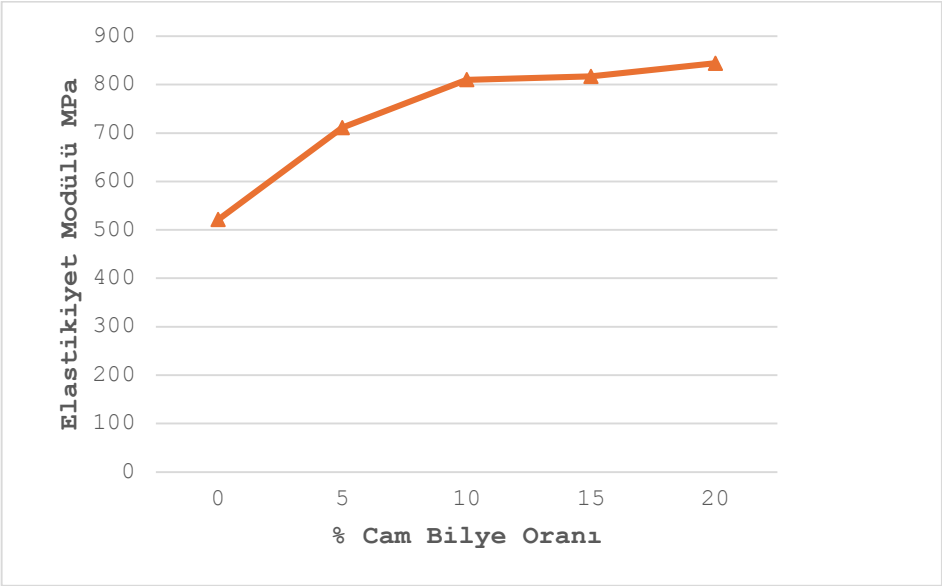
5.1.2. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Çekme Testi Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 5.4, 5.5 ve 5.6'de PA6-12EPDM kompozitlerinin çekme mukavemetinde, kopma uzamasında ve çekme elastikiyet modülünde değişiklikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.4, PA6-12EPDM kompozite çekme mukavemetinin cam bilyelerin eklenmesiyle doğru orantılı olarak arttığını arttığını göstermektedir. PA6-12EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde 26MPa değerinden sırasıyla 29MPa, 30MPa, 33MPa, 42MPa değerine yükselirken cam bilye katkısız haline göre %5, %10, %15, %20 cam bilye eklenmesiyle Çekme mukavet değerleri yaklaşık olarak %11, %15, %27 ve %61 oranında artmıştır. En yüksek değerleri %61 artış oranıyla PA6-12EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



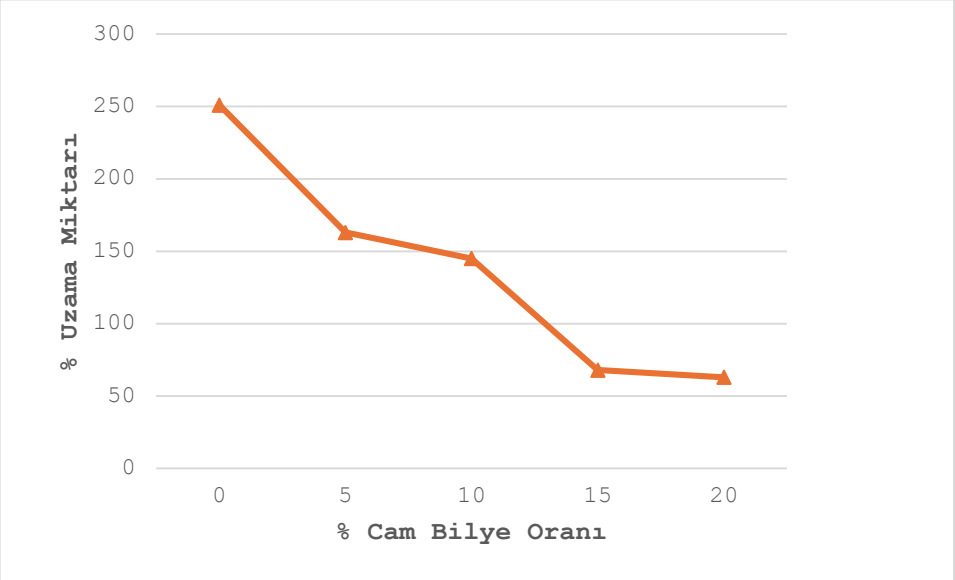
Şekil 5.4. PA-6-12EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değişim grafiği.

Şekil 5.5, PA6-12EPDM kompozitin elastikiyet modülü cam bilyelerin eklenmesiyle arttığı görülmektedir. PA6-12EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde 521 MPa değerinden sırasıyla 711 MPa, 810 MPa, 817 MPa ve 844 MPa değerine yükselirken, cam bilye katkısız haline göre %5, %10, %15, %20 cam bilye eklenmesiyle elastisite modülü değerleri sırasıyla yaklaşık olarak % 36, % 55, % 57 ve % 62 oranında artmıştır. En yüksek değeri %62 artış oranıyla PA6-12EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



Şekil 5.5. PA-6-12EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin elastisite modülünün cam bilye oranına göre değişimi.

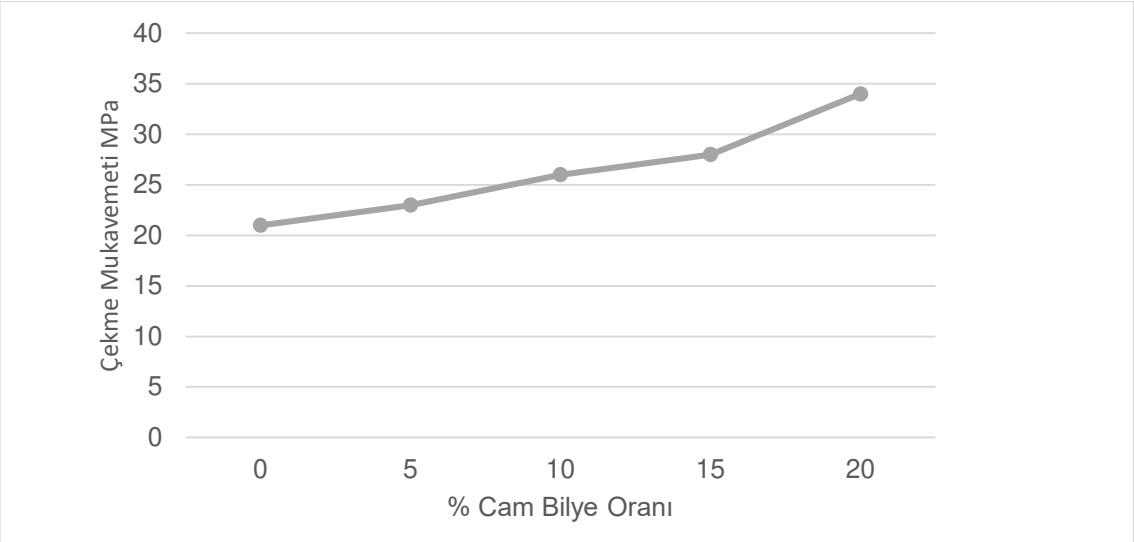
Şekil 5.6, PA6-12EPDM kompozitine %5, %10, %15 ve %20 cam bilye ilavesi oranı arttıkça uzama miktarının azaldığını gösteren bir kopma uzaması grafiği sunmaktadır. PA6-12EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde %251 değerinden sırasıyla %163, %145, %68, %63 değerine düşerken, cam bilye katkısız haline göre %5, %10, %15, %20 cam bilye eklenmesiyle kopma uzaması değerleri yaklaşık olarak %35, %42, %73 ve %75 oranında azalmıştır. En düşük değerleri %75 düşüş oranıyla PA6-12EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



Şekil 5.6. PA6-12EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin kopma uzaması cam bilye oranına göre değişmektedir.

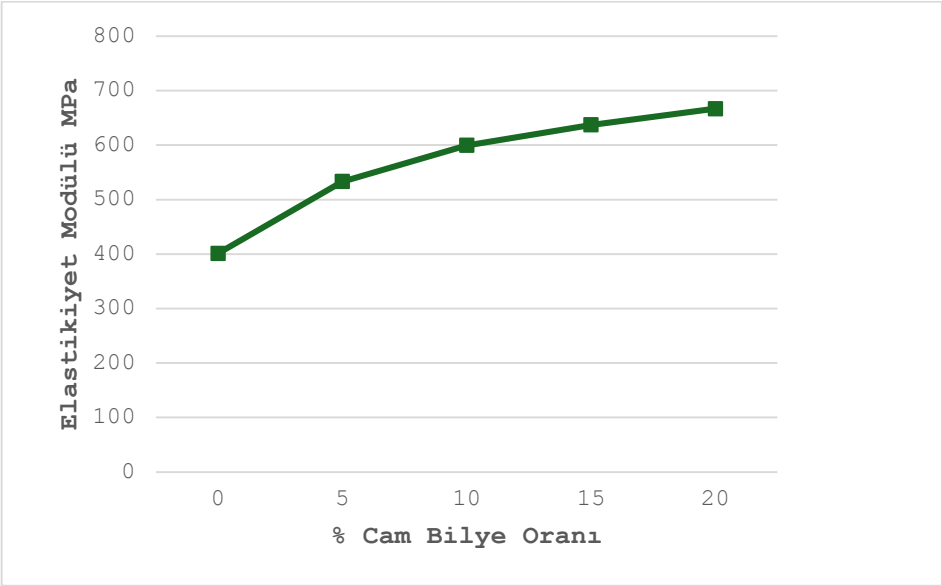
5.1.3. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Çekme Testi Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9'de PA6-16EPDM kompozitlerinin çekme mukavemetinde, kopma uzamasında ve çekme elastikiyet modülünde değişiklikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.7, PA6-16EPDM kompozite çekme mukavemetinin cam bilyelerin eklenmesiyle doğru orantılı olarak arttığını göstermektedir. PA6-16EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde 21MPa değerinden sırasıyla 23MPa, 26MPa, 28MPa ve 34MPa değerine yükselirken cam bilye katkısız haline göre %5, %10, %15, %20 cam bilye eklenmesiyle Çekme mukavet değerleri yaklaşık olarak %9, %24, %33 ve %62 oranında artmıştır. En yüksek değerleri %62 artış oranıyla PA6-16EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



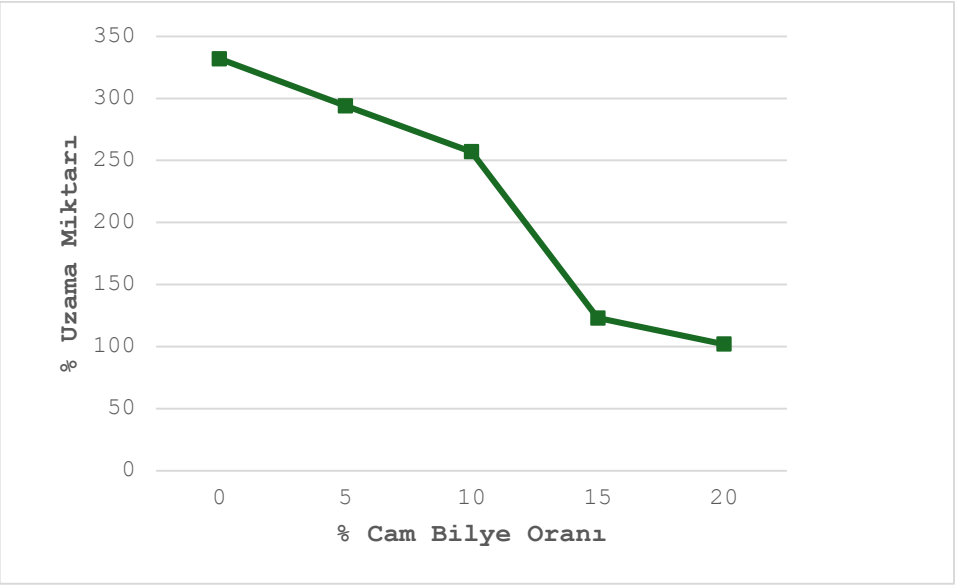
Şekil 5.7. PA6-16EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değişim grafiği.

Şekil 5.8, PA6-16EPDM kompozitin elastikiyet modülü cam bilyelerin eklenmesiyle arttığı görülmektedir. PA6-16EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde 401 MPa değerinden sırasıyla 533 MPa, 600 MPa, 637 MPa ve 667 MPa değerine yükselirken, cam bilye katkısız haline göre %5, %10, %15, %20 cam bilye eklenmesiyle elastisite modülü değerleri yaklaşık olarak % 33, % 49, % 59 ve % 66 oranında artmıştır. En yüksek değeri %66 artış oranıyla PA6-16EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



Şekil 5.8. PA6-16EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin elastisite modülünün cam bilye oranına göre değişimi.

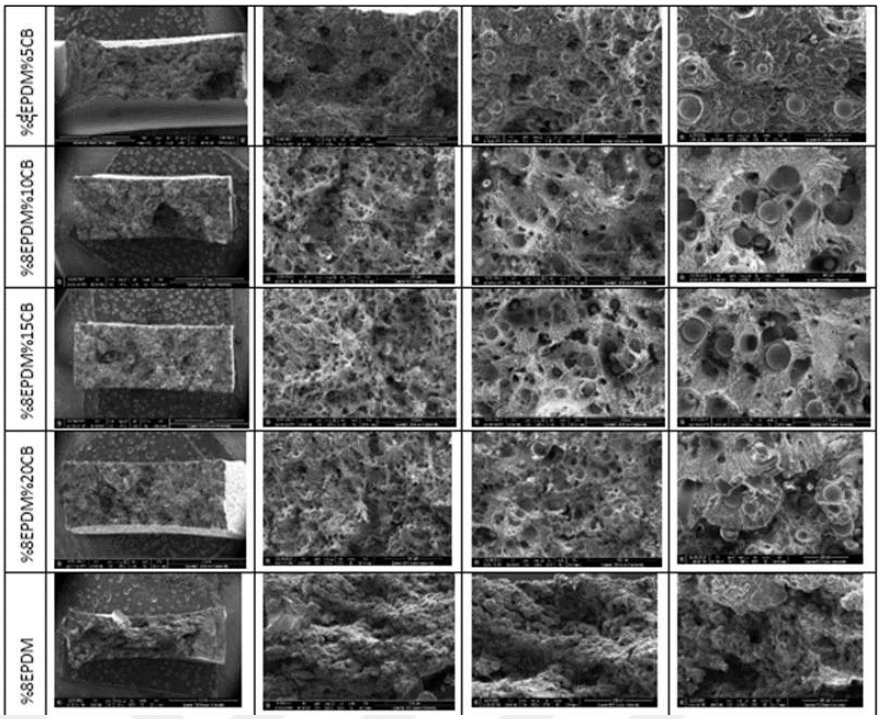
Şekil 5.9, PA6-16EPDM kompozitine %5, %10, %15 ve %20 cam bilye ilavesi oranı arttıkça uzama miktarının azaldığını gösteren bir kopma uzaması grafiği sunmaktadır. PA6-16EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde %332 değerinden sırasıyla %294, %257, %123, %102 değerine düşerken, cam bilye katkısız haline göre %5, %10, %15, %20 cam bilye eklenmesiyle kopma uzaması değerleri yaklaşık olarak %12, %23, %63 ve %70 oranında azalmıştır. En düşük değerleri %70 düşüş oranıyla PA6-16EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



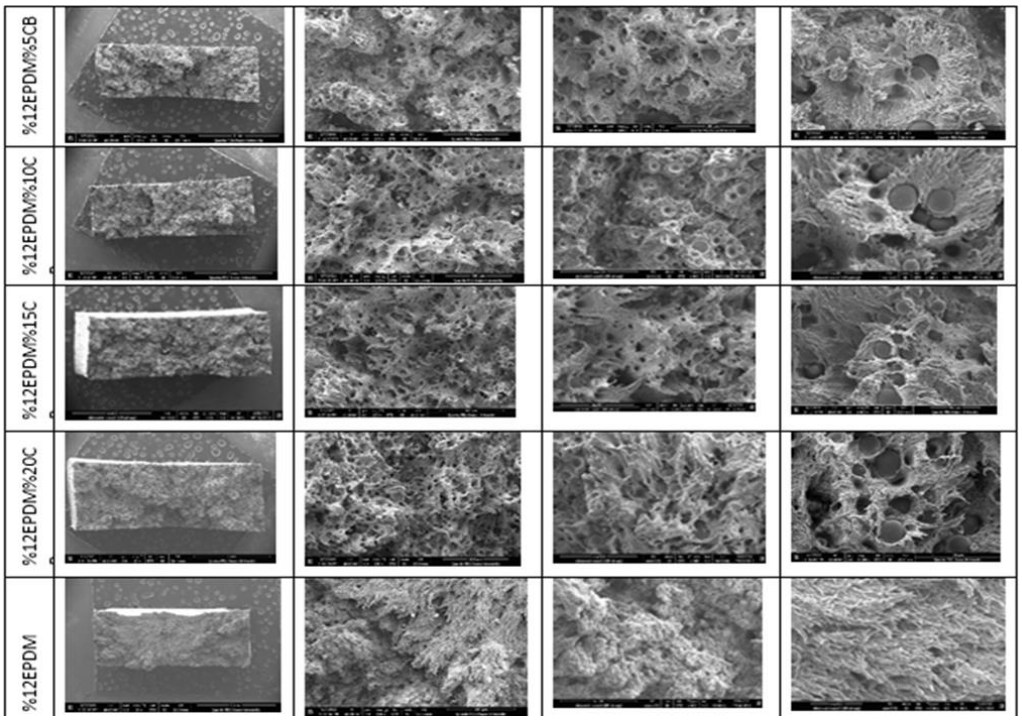
Şekil 5.9. PA6-16EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin kopma uzaması cam bilye oranına göre değişmektedir.

5.1.4. Çekme Testi Kırık Yüzey İncelemeleri

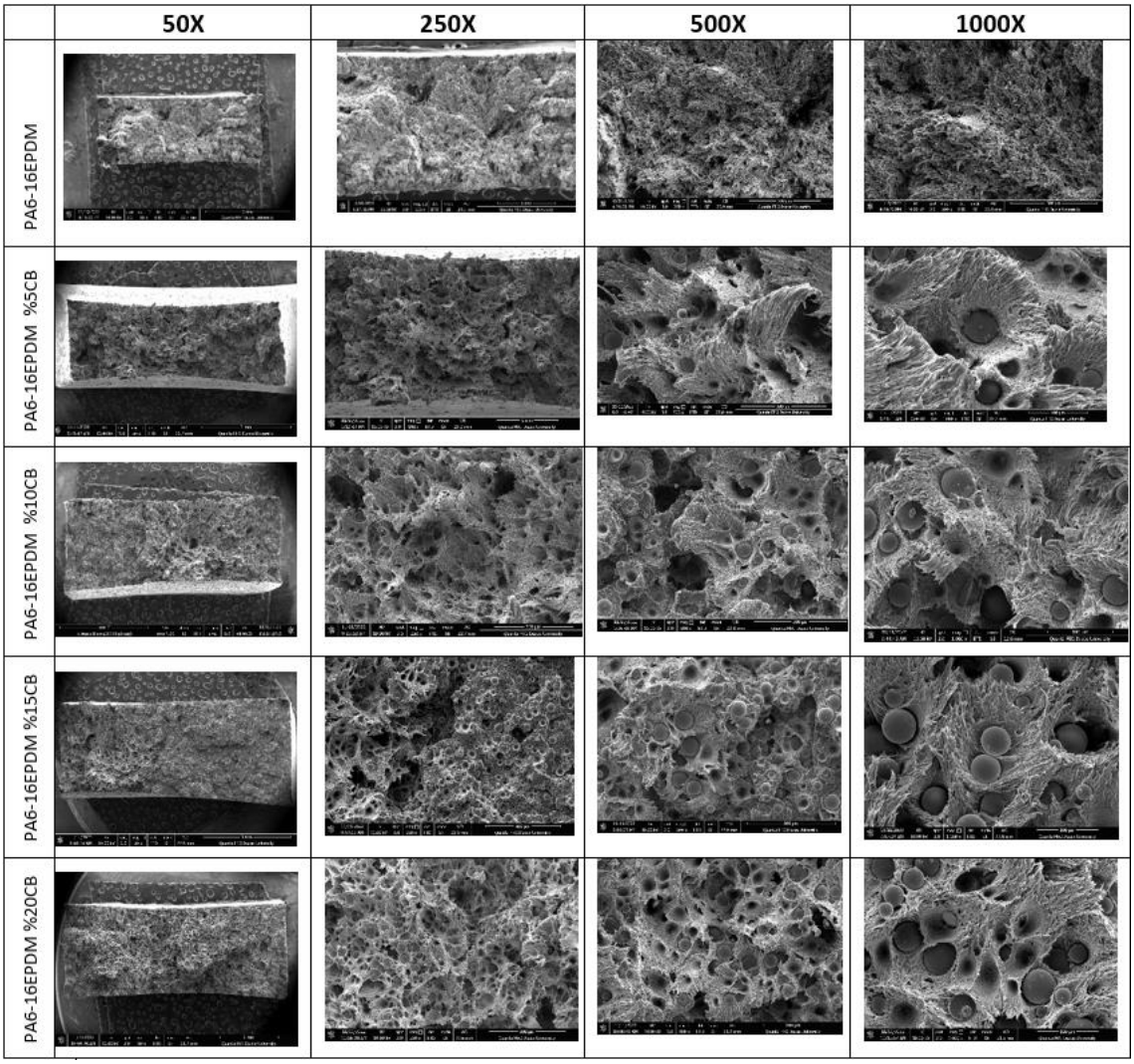
Şekil 5.10, 5.11, 5.12 hem PA6-EPDM kompozit polimer hem de %5, %10, %15 ve %20 cam bilye dolgulu PA6-EPDM kompozit polimer üzerinde çekme testine tabi tutulan numunelerin kırılma yüzeyini yakalayan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerini göstermektedir. Şekil 5.10, 5.11, 5.12 plastik deformasyona işaret eden sünek bir yapı sergileyen PA6-EPDM kompozit polimerlerinin mikro yapısını göstermektedir. Bununla birlikte, cam bilye dolgu oranındaki bir artışa, plastik deformasyonda bir azalma ile birlikte gevrekleşme eşlik etmiştir. Görüntülerden matris içerisinde cam bilyelerin hem kuvvetli bağı ve homojen dağılımı görülmektedir. Bu yapıya sebebin çift vidalı extrüderden kaynaklandığı söylenebilmektedir[54].



Şekil 5.10. %0 %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompozitlerin çekme testine tabi tutulan numunelerinin kırılma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.



Şekil 5.11. %0 %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-12EPDM kompozitlerin çekme testine tabi tutulan numunelerinin kırılma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.



Şekil 5.12. %0 %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-16EPDM kompozitlerin çekme testine tabi tutulan numunelerinin kırılma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

Çekme dayanımlarındaki artışı Şekil 5.10, 5.11, 5.12 'de görüldüğü üzere PA6-EPDM kompozit matris ile içerisinde homojen dağılmış bilyelar arasındaki yapışma bağının iyi olmasından kaynaklanmaktadır. Cam elyafın kompozitin mukavemetini artırmada önemli bir rol oynadığı öne sürülmüştür. Elyafın PA6 polimerinden daha sert olduğu açıktır. Elyaf ve matris arasında elverişli bir arayüz oluşturulması, bir yük uygulandığında etkili stres transferine izin verir ve böylece mekanik özellikleri geliştirir. Farklı bir çalışmada, cam bilye miktarının artırılabileceği ve polimer matrisi ile katkı maddesi arasında güçlü veya sağlam bir bağlanma sağlanabileceği gösterilmiştir. Bu faktörlerin her ikisi de kompozitin çekme mukavemeti değerlerinde artışa neden olmuştur[101].

Ermis ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada PA6.6 polimerine %10-30-50 oranında

yaptıkları cam bilye takviyesiyle Elastikiyet modülünün arttığını, kopma uzaması ve çekme dayanımının azaldığını görmüşlerdir[10].

Özsarıkaya ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada PA6 polimerine kattıkları cam bilye ve cam elyaf ile çekme mukavemetinin ve eğme mukaveti ile eğme alastikiyet modulünün arttığını belirtmişleridir. Yapılan aynı çalışmada EPDM ilavesiyle çekme ve eğmedeki elastikiyet ile mukavemet değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir[102]. Sert ve güçlü katkı maddelerinin polimer matrisine dahil edilmesi stres transferini kolaylaştırır. Aynı zamanda, katkı maddesi içeriğinin artırılması, elastikiyet modülü değerlerinin yükselmesine neden olur[11].

Polimer matrisine sert ve sağlam katkı maddelerinin eklenmesi stres transferini kolaylaştırırken, aynı zamanda bu katkı maddelerinin %20 oranında artırılması elastikiyet modülünün yükselmesine neden olmaktadır [104]. Sovitec firması tarafından yapılan bir çalışmada nylon malzemesine ilave edilen artan cam bilye oranı ile Elastisite modülünü arttırdığı görülmüştür [105].

Kopma uzaması yüzdesinde gözlenen düşüş, katkı maddelerinin makromoleküler zincir hareketliliği üzerindeki etkisine bağlanabilir ve bu durum polimer kompozitin kırılganlığını artırır[54]. Tüm kompozit gruplarında %20'lik cam bilye katkısı ile en düşük değerler gözlenmiştir.

Demirer ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Polipropilen polimerine %10-20-30-40-50 oranlarında ilave etikleri atık EPDM ile Maksimum Çekme Dayanımı, Elastikiyet modülü azalırken kopma uzaması değerlerinin arttığını rapor etmişlerdir[1].

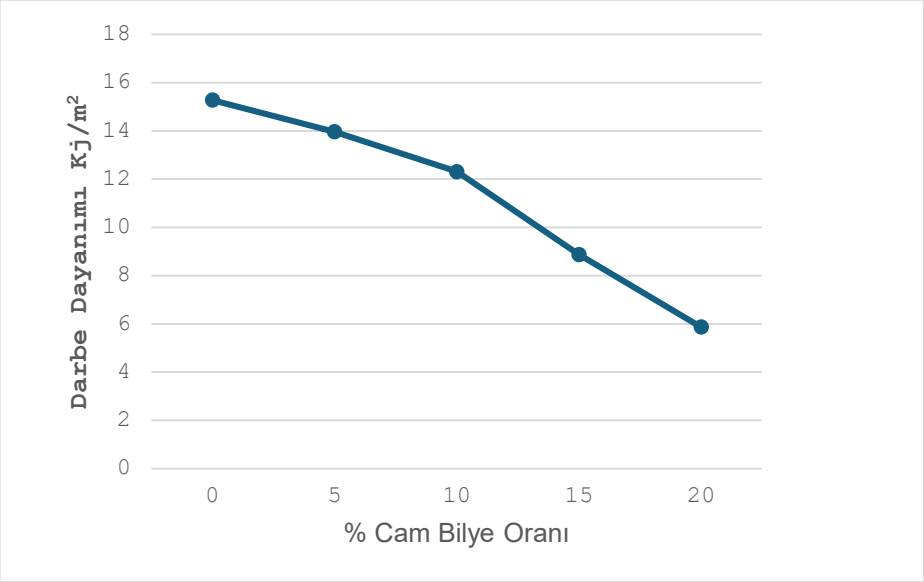
Unal, H. Ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada Pa6.6 polimerine %10-20-30 oranında yaptıkları cam bilye takviyesiyle kopma uzamasınıın azaldığını görmüşlerdir[102]. Yapılan çalışmada cam bilye ilavesiyle kopma uzaması LDPE ile, yani AYPE polimerine ağırlıkça %40 oranında cam bilyelar eklenmiştir. Cam bilye ilavesi yaklaşık %50,6'lık bir düşüşe neden olmuştur [14]. Saumya ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kompozitlerin çekme mukavemetindeki iyileştirmeyi, dolgudan matrise gerilim transferinin iyileştirilmesine katkıda bulunan uçucu külün güçlendirici etkisiyle ilişkilendirmişlerdir. Genel olarak, uçucu kül bazlı kompozitlerin mekanik özellikleri, parçacık boyutu, dipol-dipol etkileşimleri, hacim miktarı ve polimer matrisindeki parçacıkların dağılımı gibi parametrelere bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

5.2. DARBE TESTLERİ

Şekil 5.13, 5.14 ve 5.15'de PA6 polimerinin ve PA6-8EPDM kompozitlerinin Darbe mukavemetinde değişiklikler gösterdiği gözlemlenmiştir.

5.2.1. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Darbe Testi Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 5.13'deki darbe dayanımı değerlerinin incelenmesi sonucu PA6-8EPDM polimerine %5, 10, 15, 20 oranında cam bilyelerin ilave edilmesi darbe dayanımı değerlerinde azalmaya sebep olmuştur. PA6-8EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde 15,28 kJ/m^2 değerinden sırasıyla 13,96 kJ/m^2, 12,32 kJ/m^2, 8.87 kJ/m^2 ve 5.87 kJ/m^2 değerine düşerken, cam bilye katkısız haline göre % 5, % 10, % 15, % 20 cam bilye eklenmesiyle darbe dayanımı değerleri yaklaşık olarak % 8,58, % 19,42, % 41.9 ve % 61.55 oranında düşmüştür. En yüksek değeri % 61.55 azalma oranıyla PA6-8EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.

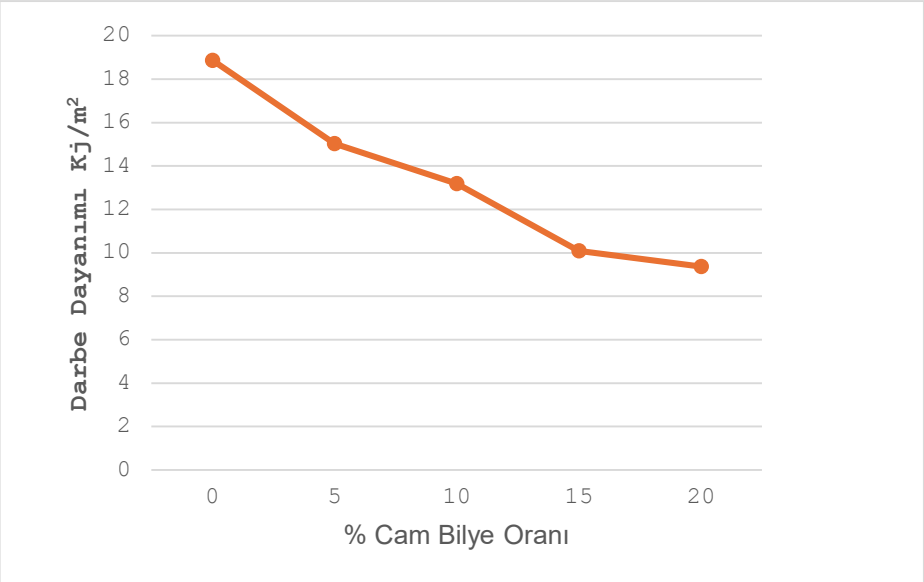


Şekil 5.13. PA6-8EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin Darbe dayanımı değişim grafiği.

5.2.2. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Darbe Testi Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 5.14'deki darbe dayanımı değerlerinin incelenmesi sonucu PA6-12EPDM polimerine %5, 10, 15, 20 oranında cam bilyelerin ilave edilmesi darbe dayanımı değerlerinde azalmaya sebep olmuştur. PA6-12EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam

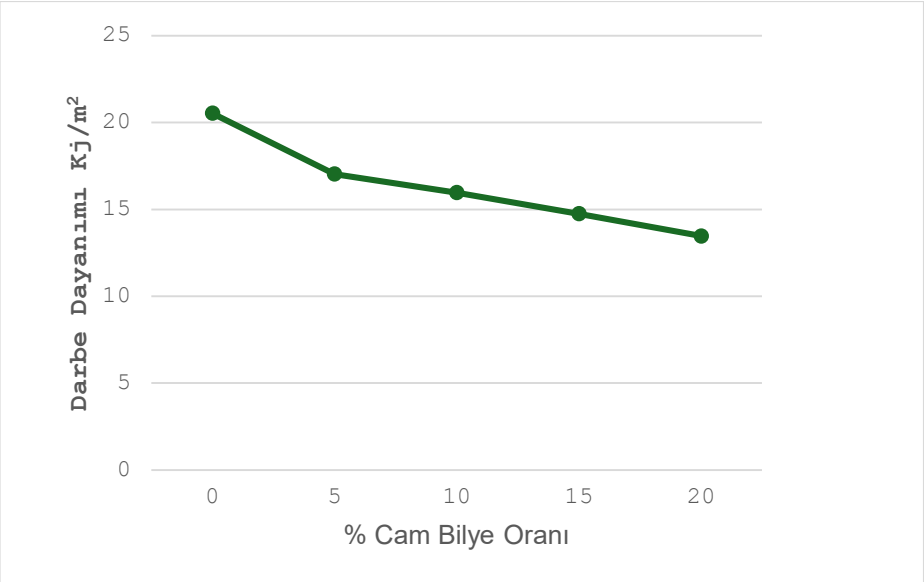
bilye eklendiğinde 18,87 kJ/m2 değerinden sırasıyla 15,03 kJ/m2, 13,18 kJ/m2, 10.09 kJ/m2 ve 9.37 kJ/m2 değerine düşerken, cam bilye katkısız haline göre % 5, % 10, % 15, % 20 cam bilye eklenmesiyle darbe dayanımı değerleri yaklaşık olarak % 20,364, % 30,132, % 46.52 ve % 50.33 oranında düşmüştür. En yüksek değeri % 68,87 azalma oranıyla PA6-12EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



Şekil 5.14. PA6-12EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin darbe dayanımı değişim grafiği.

5.2.3. **PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Darbe Testi Sonuçlarının İncelenmesi**

Şekil 5.15'deki darbe dayanımı değerlerinin incelenmesi sonucu PA6-12EPDM polimerine %5, 10, 15, 20 oranında cam bilyelerin ilave edilmesi darbe dayanımı değerlerinde azalmaya sebep olmuştur. PA6-16EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde 20,53 kJ/m^2 değerinden sırasıyla 17,03 kJ/m^2, 15,97 kJ/m^2, 14,75 kJ/m^2 ve 13,46 kJ/m^2 değerine düşerken, cam bilye katkısız haline göre % 5, % 10, % 15, % 20 cam bilye eklenmesiyle darbe dayanımı değerleri yaklaşık olarak % 17,04 , % 22,21 , % 28,15 ve % 34,39 oranında düşmüştür. En yüksek değeri % 34,39 azalma oranıyla PA6-16EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



Şekil 5.15. PA6-16EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin Darbe dayanımı değişim grafiği.

Cam bilyelerin eklenmesiyle darbe mukavemetinde gözlenen azalma, polimer zincirlerinin hareketini kısıtlayan ve böylece malzemeyi deformasyona karşı daha az dirençli hale getiren polimer deformasyonunun sınırlandırılmasına bağlanabilir. Partiküllerin polimer yapısı içinde toplanması, mikro çatlak başlatıcıları olarak hareket eden ve kuvvet uygulandığında zayıf arayüzey bölgelerine doğru çatlak ilerlemesini kolaylaştıran stres alanları meydana getirir. Huang ve arkadaşları PA malzemesine ilave ettikleri %30 cam bilye ile darbe dayanımının yaklaşık %51 oranında azaldığını görmüşlerdir[98].

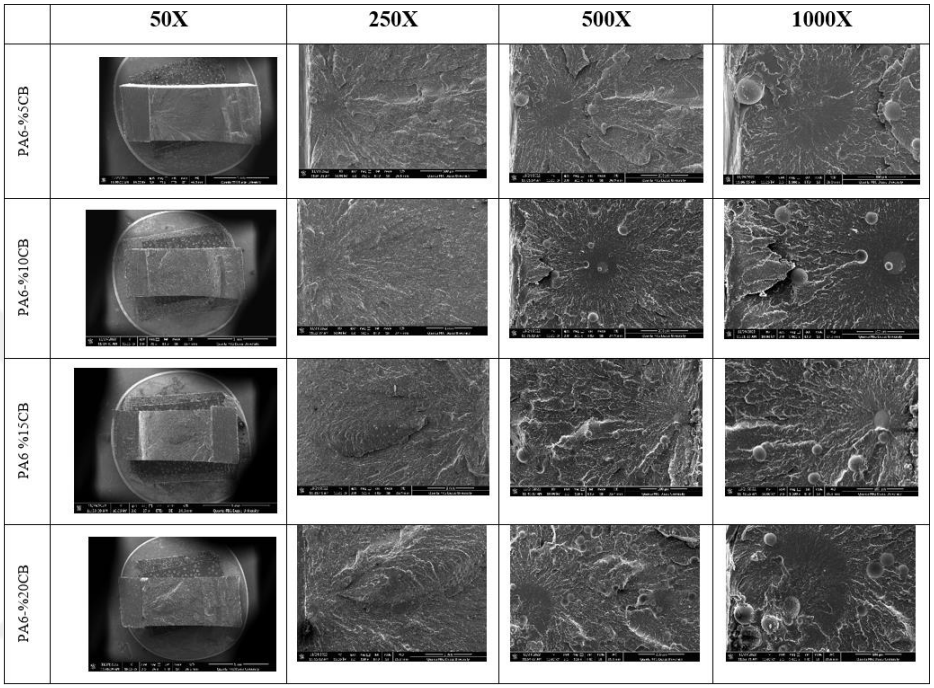
Unal, H. Ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada Nylon 66 polimerine %10-30-30-40-50 oranında yaptıkları cam bilye takviyesiyle darbe dayanımının %86 'ya varan oranda azaldığını rapor etmişler[99].

Demirer ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Polipropilen polimerine %10-20-30-40-50 oranlarında ilave etikleri atık EPDM ile İzod darbe değerlerinin arttığını rapor etmişlerdir[1].

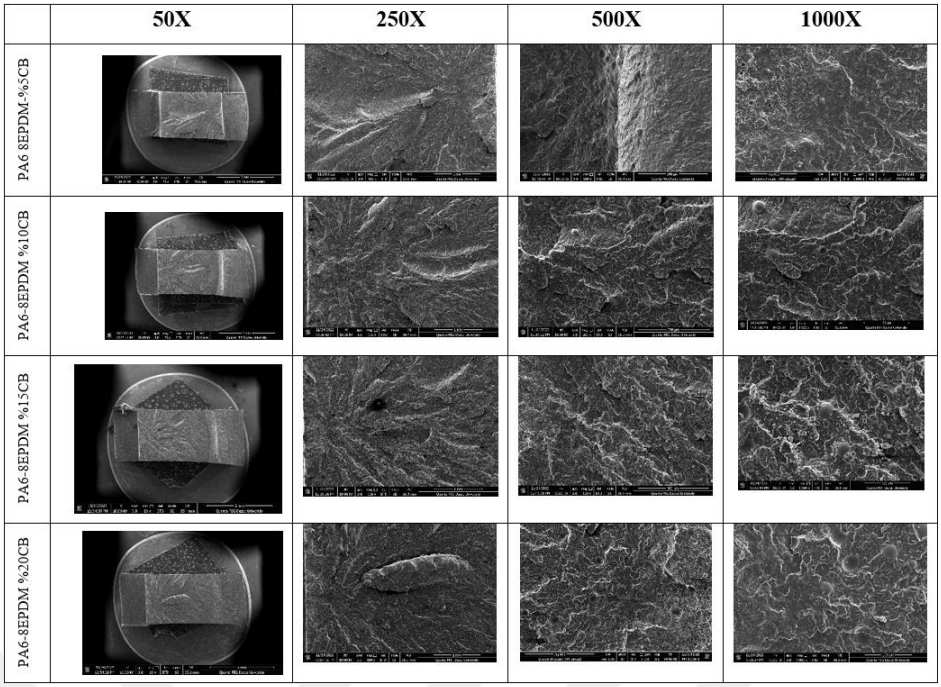
5.2.4. **Darbe Deneyi Kırık Yüzey Görüntüleri**

Şekil 5.16 ve 5.17 hem PA6-EPDM kompozit polimer hem de %5, %10, %15 ve %20 cam bilye dolgulu PA6-EPDM kompozit polimer üzerinde darbe testine tabi tutulan numunelerin kırılma yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerini

göstermektedir. Şekil 5.16 ve 5.17 ani darbelerde plastik deformasyona işaret eden sünek bir yapı sergileyen PA6-EPDM kompozit polimerlerinin mikro yapısını göstermektedir. Bununla birlikte, cam bilye dolgu oranındaki bir artışa, plastik deformasyonda bir azalma ile birlikte gevrekleşme eşlik etmiştir. Görüntülerden matris içerisinde cam bilyelerin hem kuvvetli bağı ve homojen dağılımı görülmektedir. Bu yapıya sebebin hem polimer matris arayüzey bağlayıcı hemde çift vidalı ekstrüderden kaynaklandığını söyleyebiliriz.



Şekil 5.16. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 polimerinin darbe deneyine tabi tutulan numunelerinin kırık yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.



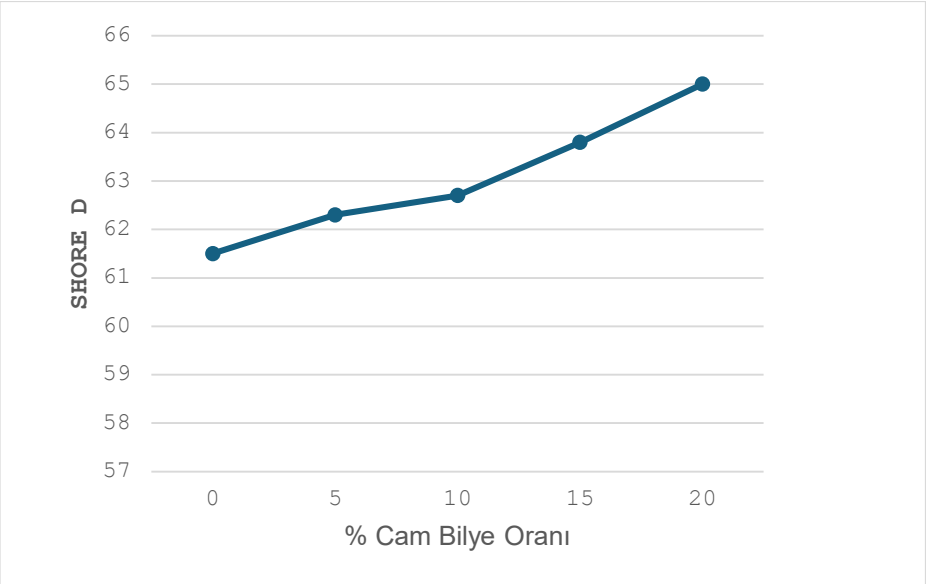
Şekil 5.17. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompozitin darbe deneyine tabi tutulan numunelerinin kırık yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

5.3. SERTLİK TESTLERİ

Şekil 5.18, 5.19 ve 5.20'de PA6 polimerinin ve PA6-8EPDM kompozitlerinin Sertlik mukavemetinde değişiklikler gösterdiği gözlemlenmiştir.

5.3.1. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sertlik Testi Sonuçlarının İncelenmesi

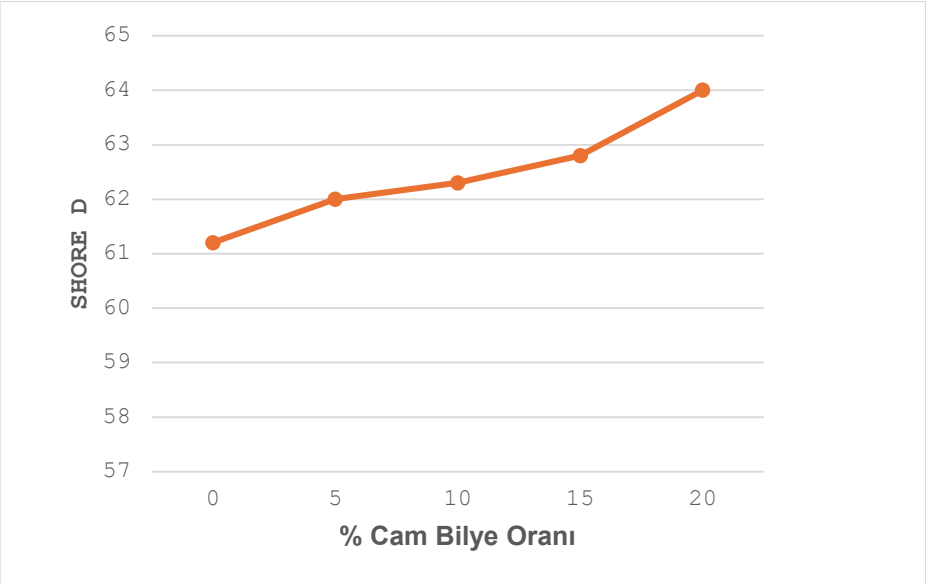
Şekil 5.18. PA6-8EPDM'nin %0, %5, %10, %15 ve %20 cam bilye dolgu oranı içeren kompozitlerinin sertlik Shore D deneyi değerleri cam bilye dolgu oranındaki artışla birlikte yükselme göstermiştir. PA6-8EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde Shore D değerleri 61.2 değerinden sırasıyla 61.5, 62.3, 62.7 ve 65 Shore D değerine yükselirken, cam bilye katkısız haline göre % 5, % 10, % 15, % 20 cam bilye eklenmesiyle darbe dayanımı değerleri yaklaşık olarak % 1.3, % 1.95, % 3.73 ve % 5.69 oranında artmıştır. En yüksek değeri % 5.69 artış oranıyla PA6-8EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



Şekil 5.18. PA6-8EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin sertliğinin cam bilye oranına göre değişimi.

5.3.2. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sertlik Testi Sonuçlarının İncelenmesi

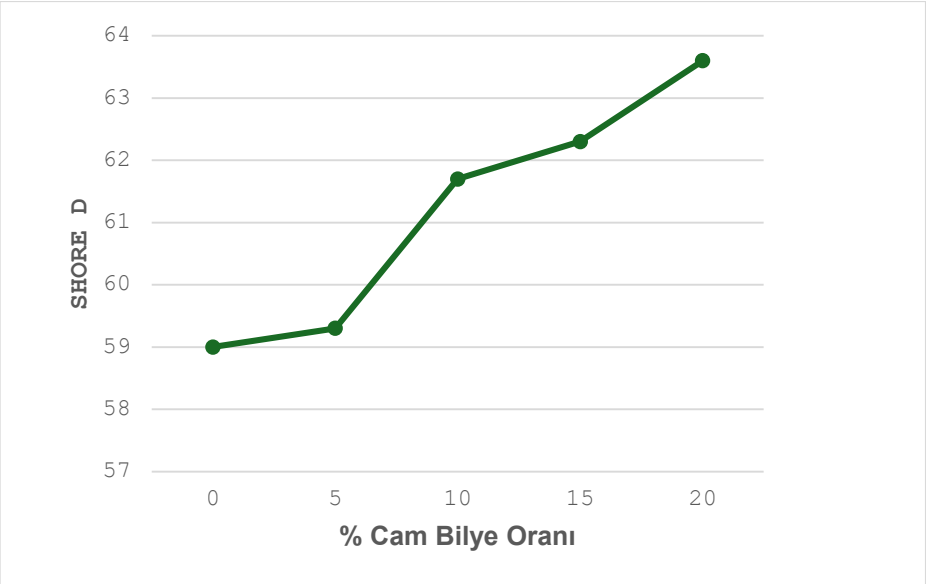
Şekil 5.19, PA6-12EPDM'nin %0, %5, %10, %15 ve %20 cam bilye dolgu oranı içeren kompozitlerinin sertlik Shore D deneyi değerleri cam bilye dolgu oranındaki artışla birlikte yükselme göstermiştir. PA6-12EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde Shore D değerleri 61.5 değerinden sırasıyla 62, 62.3, 62.8 ve 64 Shore D değerine yükselirken, cam bilye katkısız haline göre % 5, % 10, % 15, % 20 cam bilye eklenmesiyle darbe dayanımı değerleri yaklaşık olarak % 1.31, % 1.80, % 2.61 ve % 4.60 oranında artmıştır. En yüksek değeri % 4.60 artış oranıyla PA6-12EPDM kompozitine % 20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



Şekil 5.19. PA6-12EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin sertliğinin cam bilye oranına göre değişimi.

5.3.3. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sertlik Testi Sonuçlarının İncelenmesi

Şekil 5.20, PA6-16EPDM'nin %0, %5, %10, %15 ve %20 cam bilye dolgu oranı içeren kompozitlerinin sertlik Shore D deneyi değerleri cam bilye dolgu oranındaki artışla birlikte yükselme göstermiştir. PA6-16EPDM kompozitine %5, 10, 15, 20 cam bilye eklendiğinde Shore D değerleri 59 değerinden sırasıyla 59,3, 61,7, 62,3 ve 63,6 Shore D değerine yükselirken, cam bilye katkısız haline göre % 5, % 10, % 15, % 20 cam bilye eklenmesiyle darbe dayanımı değerleri yaklaşık olarak % 0.5, % 4.57, % 5.59 ve % 7.79 oranında artmıştır. En yüksek değeri % 7.79 artış oranıyla PA6-16EPDM kompozitine %20 Cam bilye ilave edilen numunede görülmüştür.



Şekil 5.20. PA6-16EPDM ve cam bilye takviyeli kompozitlerin sertliğinin cam bilye oranına göre değişimi.

Elde edilen değerlere bakıldığında, cam bilye dolgu oranındaki bir artışa, plastik deformasyonda bir azalma ile birlikte gevrekleşme eşlik etmiştir. Unay ve arkadaşları %10-15-20 oranlarında cam bilye katkılı PVC kompozitlerine ilave edilen cam bilye katkı oranı ile sertlik değerlerinin arttığını belirtmişlerdir[106].

Demirer ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Polipropilen polimerine %10-20-30-40-50 oranlarında ilave etikleri atık EPDM ile sertlik değerlerinin azaldığını rapor etmişlerdir[11].

Ermis ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada PA6.6 polimerine %10-30-50 oranında yaptıkları cam bilye takviyesiyle artan katkı oranıyla shore D sertlik değerinin arttığını görmüşlerdir[1].

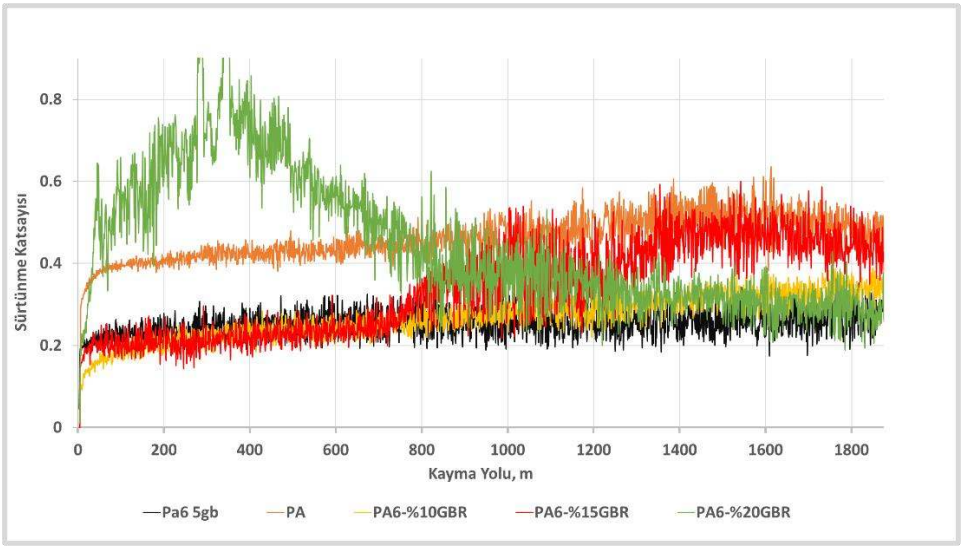
5.4. AŞINMA DENEYİ

5.4.1. PA ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Özeliklerinin İncelenmesi

5.4.1.1. PA ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sürtünme Katsayısı ile Kayma Yolu İlişkileri

Deneylerde kullanılan PA6 polimeri ile Cam Bilye katkılı PA kompozit malzemelerinin 4340 kalite çelik malzeme yüzeyine karşı aşınma analizleri;

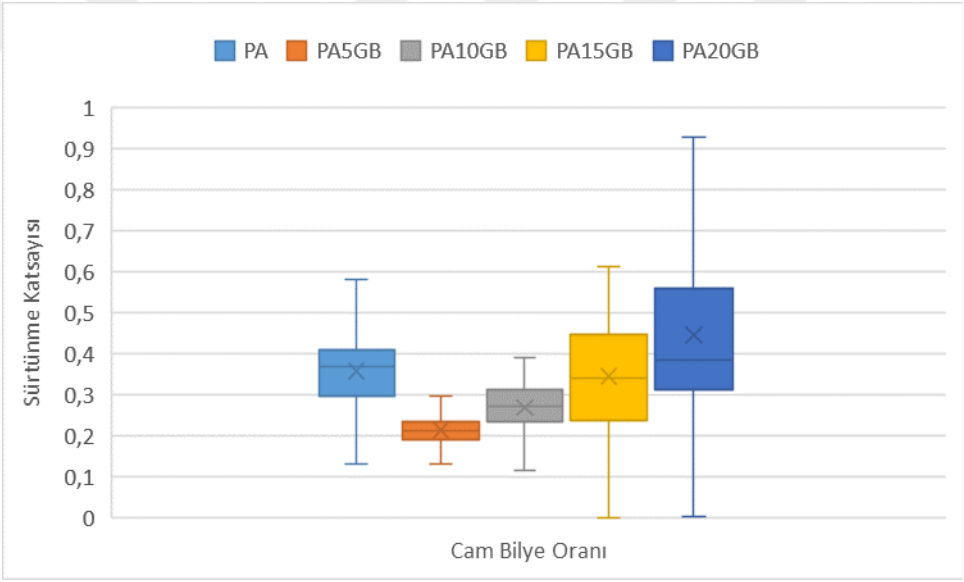
40N yük ve 1m/s kayma hızında yapılan deneyler sonucunda PA6polimeri ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Cam Bilye katkılı PA kompozitlerin sürtünme katsayısı kayma mesafesi ilişkisi Şekil 5.21'de verilmiştir. %20 Cam bilye katkılı PA6 kompoziti haricindeki tüm kompozit ve PA6malzemesinin sürtünme katsayısı kayma yolunu başlangıçtan itibaren kararlı bir şekilde tamamladığı görülmüş olup sürtünme katsayıları sırasıyla 0.58, 0.25, 0.19 ve 0.33 'dir. %20 Cam bilye katkılı PA6 kompoziti ise başlangıçtan itibaren 0.8 'lere varan değerlere çıktıktan sonra 800m mesafe aldıktan sonra stabilize olup ortalama olarak 0.41 sürtünme katsayısı değerinde tamamladığı saptanmıştır. Benzer olarak %15 Cam bilye katkılı PA6 kompoziti ise başlangıçta 0.17 'lere varan değerleri gösterdikten sonra 800m mesafe aldıktan sonra artış göstererek ortalama olarak 0.33 sürtünme katsayısı değerinde tamamlamıştır. %5 Cam bilye katkılı PA6 kompoziti ise başlangıçtan sona kadar sabit sürtünme katsayısı değerinde kalırken %10 Cam bilye katkılı PA6 kompoziti sürtünme katsayısı değerinde ise az ve doğrusal olarak artış eğilimi göstermiştir.



Şekil 5.21. PA ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayıs-kayma yolu grafiği

Şekil 5.22 'de verilen PA ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiğini incelediğimizde Katkısız PA polimerinin sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.13 ile 0.58 değerini gösterirken ayrıca ortalama değer olarak 0.37 değerini göstermektedir. PA ve %5 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme

Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.13 ile 0.29 ayrıca ortalama değer olarak 0.23 değerini göstermektedir. PA ve %10 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.11 ile 0.39 ayrıca ortalama değer olarak 0.27 değerini göstermektedir. PA ve %15 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı geniş bir aralık olarak 0.1 ile 0.61 ayrıca ortalama değer olarak 0.34 değerini göstermektedir. PA ve %20 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı çok geniş bir aralıkta 0.1 ile 0.92 ayrıca ortalama değer olarak 0.38 değerini göstermiştir.

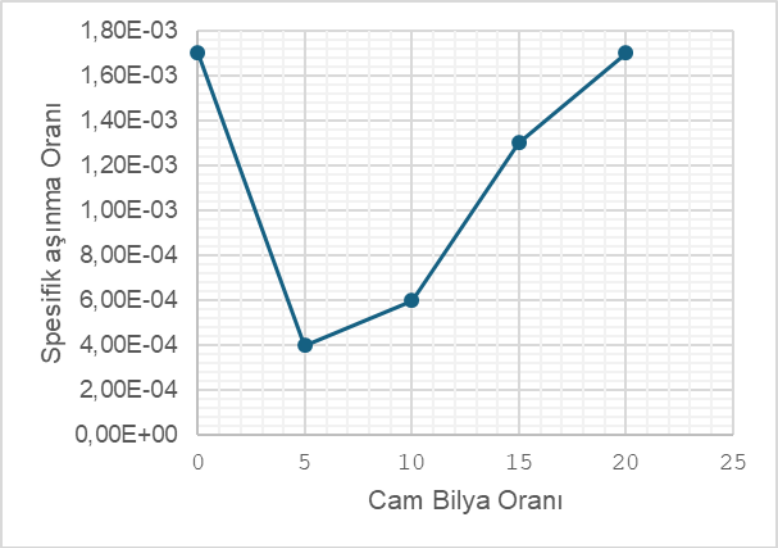


Şekil 5.22. PA ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği

5.4.1.2. PA6 ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkileri

Şekil 5.23'de verilen PA6 ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Spesifik aşınma oranı-kayma yolu grafiğini incelediğimizde Katkısız PA polimerinin Cam Bilye katkısının ilave edilmesiyle aşınma oranında belirgin azalma sonrası artan cam bilye oranıyla artış olduğu gözlemlenmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 40N yükte uygulanan deneylerde PA6 malzemesinin aşınma oranı 1.93E-11 m^2/N değerini verirken %5, %10, %15, %20 oranlarında cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma oranları sırasıyla 4,07941E-12

m^2/N, 5,562E-12 m^2/N, 1,16592E-11 m^2/N ve 1,46498E-11 m^2/N değerlerini göstermiştir.

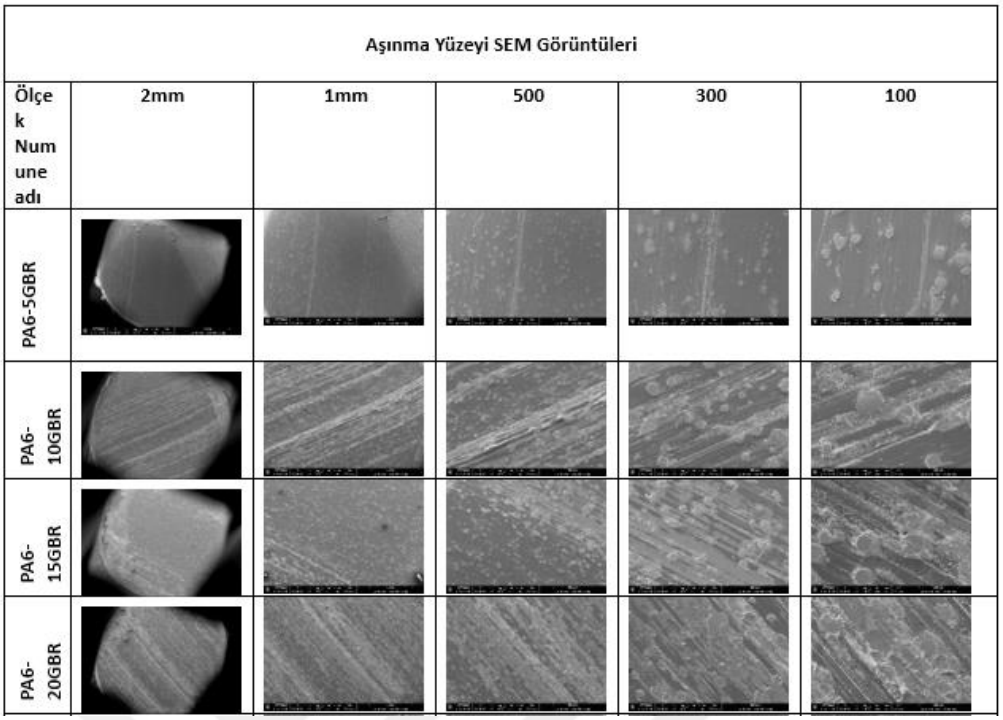


Şekil 5.23. PA ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkisi Grafiği

5.4.1.3. PA6 ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Yüzey Görüntüleri

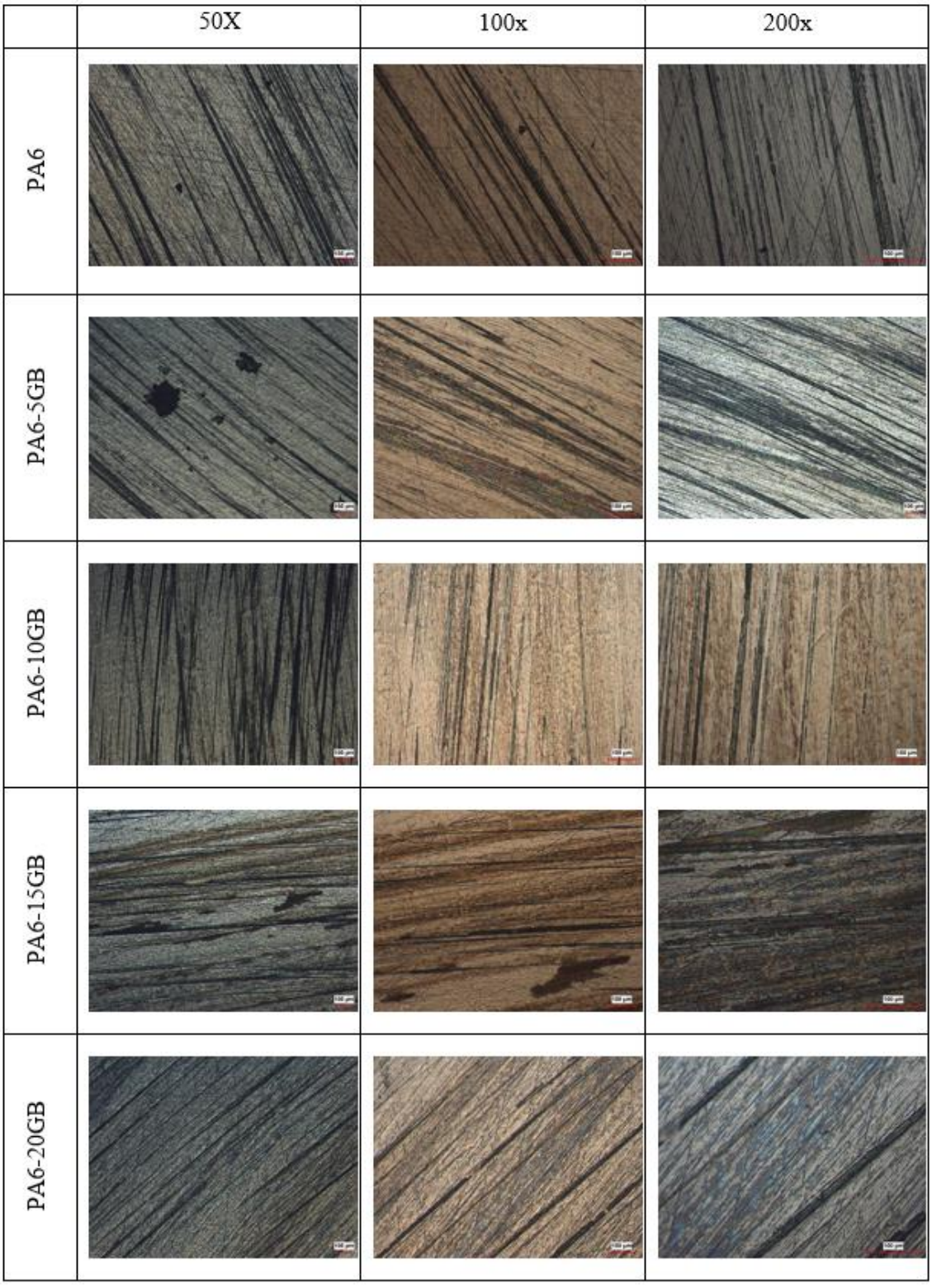
5.4.1.3.1. Elektron Tarama Mikroskobu ile Optik mikroskop ile Görüntüleme
5.4.1.3.1.1 Elektron Tarama Mikroskobu ile Görüntüleme

Şekil 5.24'de PA6 ve %5, %10, %15 ve %20 Cam Bilye Katkılı kompozitlerinin 40N yük ve 1m/s kayma hızında 4340 kalite çelik diske karşı gerçekleştirilen aşınma deneylerinde elde edilen numune ve karşı disk yüzeylerinin çekilmiş taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde ki yüzeyleri incelediğimizde numunelerin cam bilyenın etkisiyle kaygan bir yüzey meydana getirdiği görülmektedir. Cam bilyelerin aşınma sonrası bilye şeklinden düzlem daire haline gelmesiyle çelik diske karşı aşınma direnci gösterdiği anlaşılmaktadır. %5 Cam bilyalı PA kompozitinin yüzeyinde adhesif bir aşınma davranışı gözlemlenirken, artan cam bilye oranıyla abrasif bir aşınma göstermeye başlamıştır. Cam bilye oranı arttıkça kümeleşerek aglomera olmaları ile ve çelik dis karşı yüzeyi ile teması artarak ve yükünde etkisiyle daha ufak parçalara ayrılarak kayma yönüne parelel olarak oluşan uzunlamasına aşınma yüzeyi boşluklarına yerleştiğini ayrıca büyük cam bilyelerin engel teşkil ederek arkasında birikmeler oluştuğunu söyleyebiliriz.



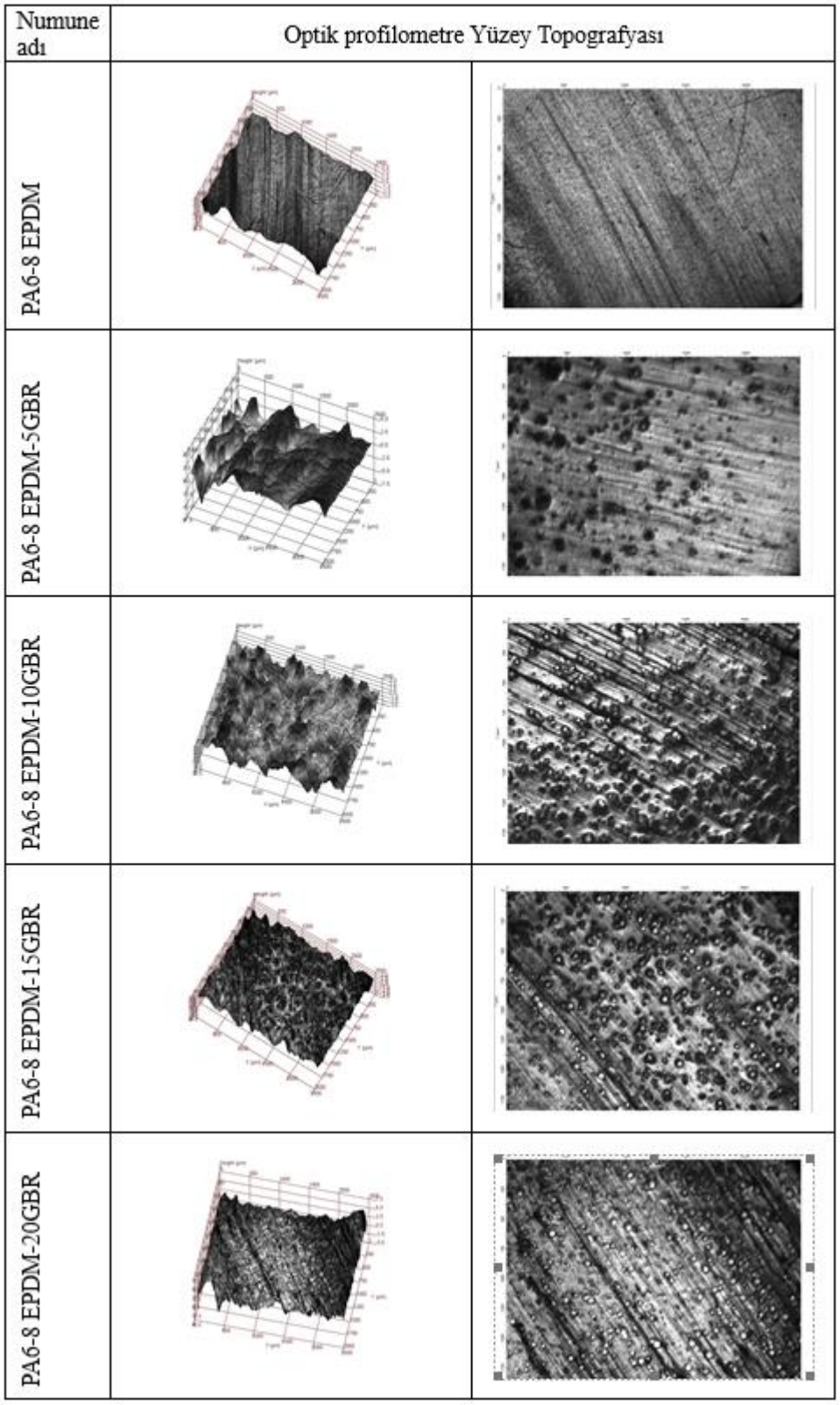
Şekil 5.24. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

5.4.1.3.1.2 Optik mikroskop ile Görüntüleme



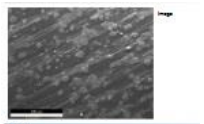
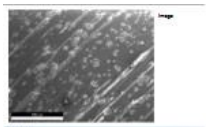
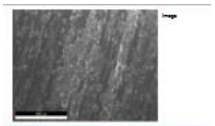
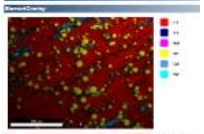
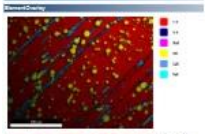
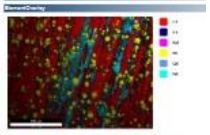
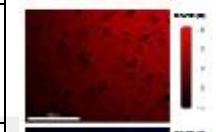
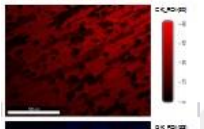
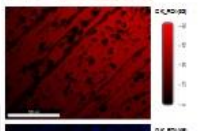
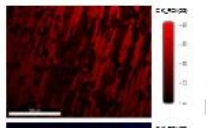
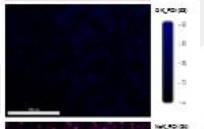
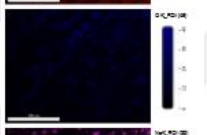
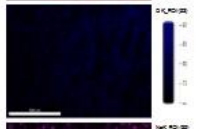
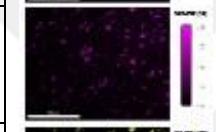
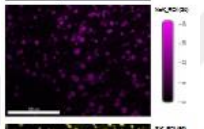
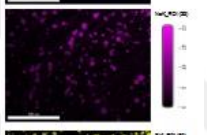
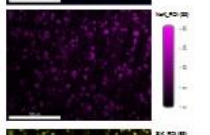
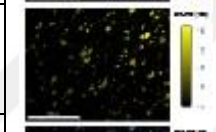
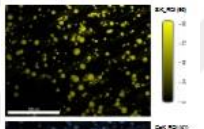
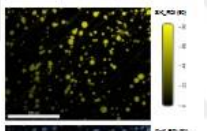
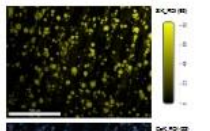
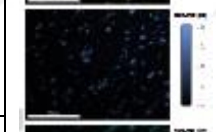
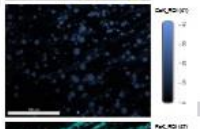
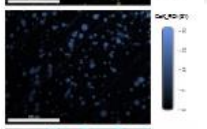
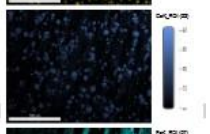
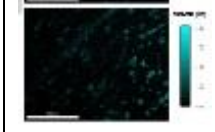
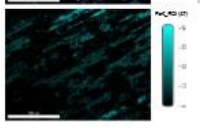
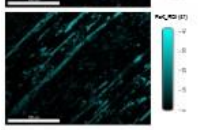
Şekil 5.25. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik mikroskobu görüntüleri.

5.4.1.3.2. Optik profilometre İle Yüzey Topografya Görüntüleme



Şekil 5.26. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik profilometre görüntüleri.

5.4.1.4. Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama

Numune Adı	PA6-5GB	PA6-10GB	PA6-15GB	PA6-20GB
SEM				
Toplam Dağılım				
Karbon				
Oksijen				
Sodyum				
Silisyum				
Kalsiyum				
Demir				

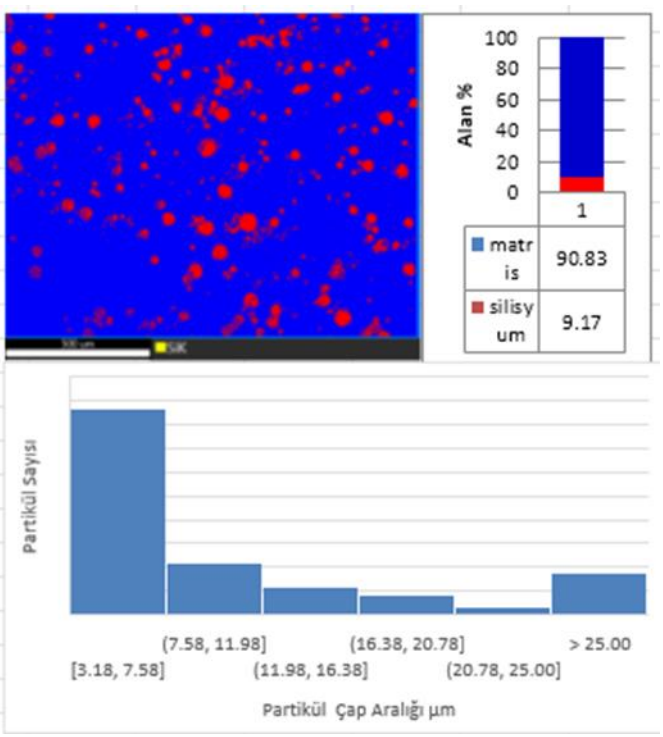
Şekil 5.27. PA ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama

5.4.1.5. PA ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

Deneylerde kullanılan PA6 polimeri ile Cam Bilye katkılı PA kompozit malzemelerinin 4340 kalite çelik malzeme yüzeyine karşı aşınma analizleri sonrası partikül miktarı, dağılımı ve morfolojisi incelemeleri;

40N yük ve 1m/s kayma hızında yapılan deneyler sonucunda PA6 polimeri ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında cam bilye katkılı PA kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojileri Şekil 5.28 ila Şekil 5.30'da verilmiştir.

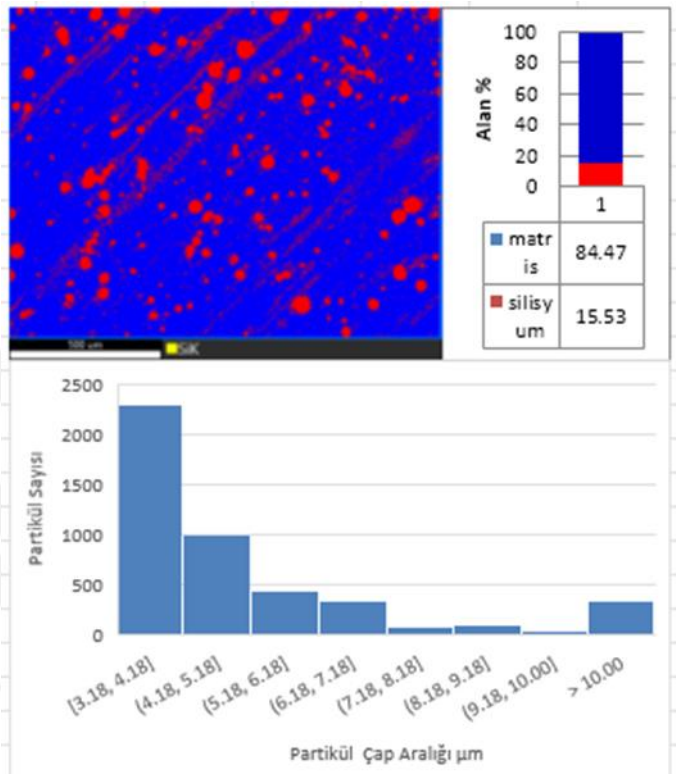
PA6 polimeri ile %10 oranında Cam Bilye katkılı PA kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.28 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %36.13 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %10.17, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %11.51, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %7.10, 8.64-10 µm arası partikül oranı %2.28 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %32.80 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %90.83 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %9.17 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm ve 10 µm üzerindeki boyutlarındaki daha küçük partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.28. PA ve %10 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

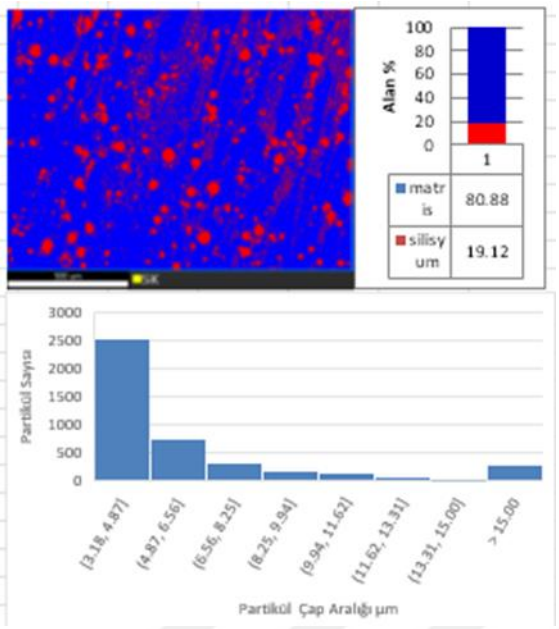
PA6 polimeri ile %15 oranında Cam Bilye katkılı PA kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.29 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %71.03 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %9.69, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %7.19, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %2.94, 8.64-10 µm arası partikül oranı %1.62 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %7.49 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris

yüzeyi %84.47 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %15.53 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4 µm boyutlarındaki daha ufak boyutlu partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.29. PA ve %15 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

PA6 polimeri ile %20 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.30 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %58.03 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %10.81, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %10.68, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %4.57, 8.64-10 µm arası partikül oranı %2.77 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %12.61 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %80.88 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %19.12 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-5 µm boyutlarındaki daha ufak boyutlu partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.30. PA ve %20 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

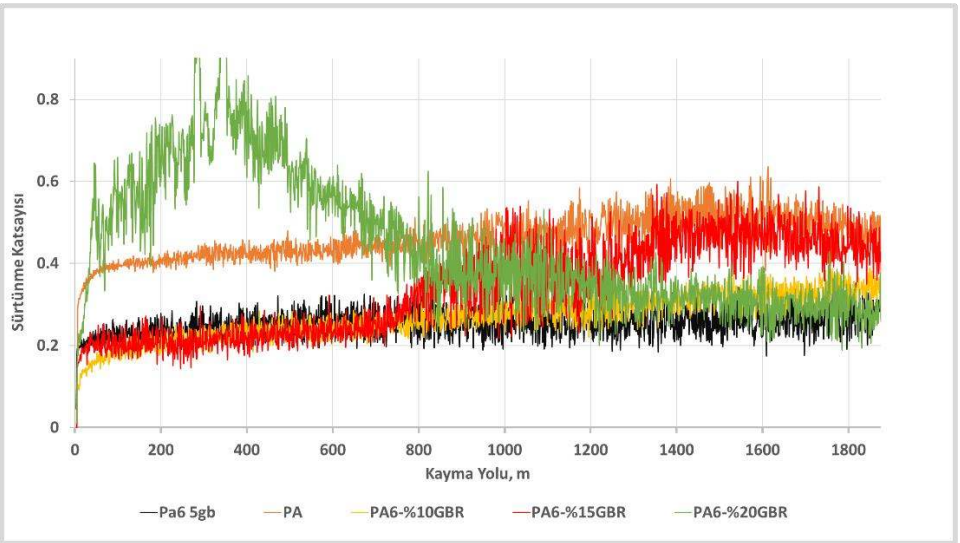
5.4.2. **PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Özeliklerinin İncelenmesi**

5.4.2.1. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sürtünme Katsayısı ile Kayma Yolu İlişkileri

Deneylerde kullanılan PA6-8EPDM ile Cam Bilye katkılı PA6-8EPDM kompozit malzemelerinin 4340 kalite çelik malzeme yüzeyine karşı aşınma analizleri;

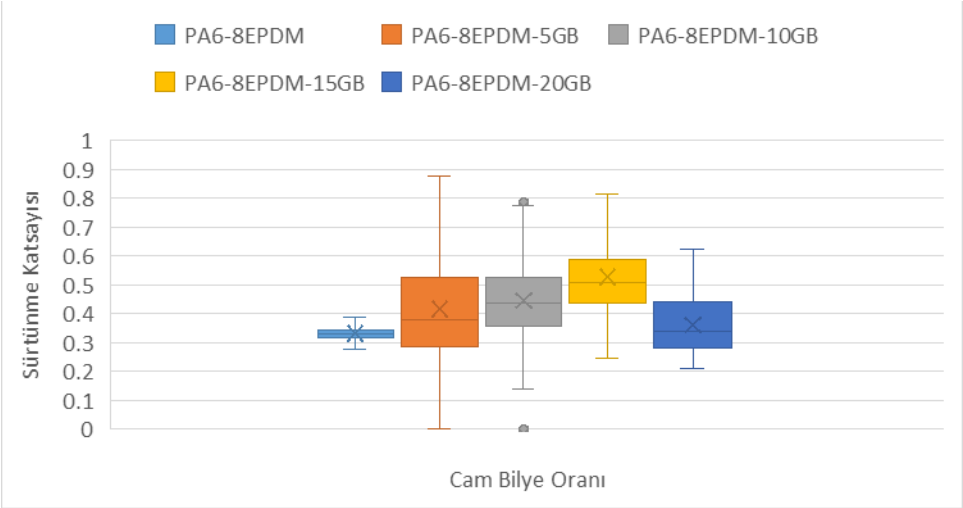
40N yük ve 1m/s kayma hızında yapılan deneyler sonucunda PA6-8EPDM kompoziti ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Cam Bilye katkılı kompozit kompozitlerin sürtünme katsayısı kayma mesafesi ilişkisi Şekil 5,31'de verilmiştir. %20 Cam bilye katkılı PA6 kompoziti haricindeki tüm kompozit ve PA6malzemesinin sürtünme katsayısı kayma yolunu başlangıçtan itibaren kararlı bir şekilde tamamladığı görülmüş olup sürtünme katsayıları sırasıyla 0.58, 0.25, 0.19 ve 0.33 'dir. %20 Cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompoziti ise başlangıçtan itibaren 0.8 'lere varan değerlere çıktıktan sonra 800m mesafe aldıktan sonra stabilize olup ortalama olarak 0.41 sürtünme katsayısı değerinde tamamladığı saptanmıştır. Benzer olarak %15 Cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompoziti ise başlangıçta 0.17 'lere varan değerleri gösterdikten sonra 800m mesafe aldıktan sonra artış göstererek ortalama olarak 0.33 sürtünme katsayısı değerinde tamamlamıştır. %5 Cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompoziti ise başlangıçtan sona kadar sabit sürtünme katsayısı değerinde kalırken %10 Cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompoziti sürtünme

katsayısı değerinde ise az ve doğrusal olarak artış eğilimi göstermiştir.



Şekil 5.31. PA6-8EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayıs-kayma yolu grafiği

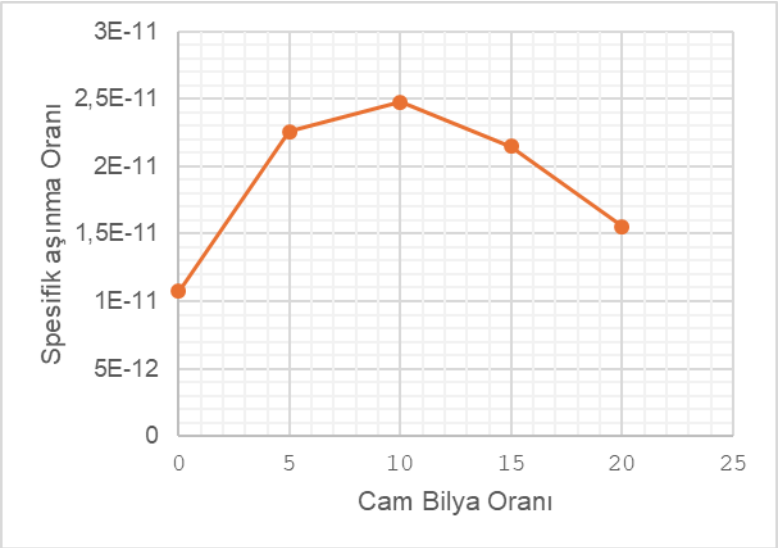
Şekil 5.32 'de verilen PA6-8EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiğini incelediğimizde Katkısız PA6-8EPDM kompozitinin sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.38 ile 0.27 değerini gösterirken ayrıca ortalama değer olarak 0.33 değerini göstermektedir. PA6-8EPDM ve %5 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.0 ile 0.87 ayrıca ortalama değer olarak 0.41 değerini göstermektedir. PA6-8EPDM ve %10 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.13 ile 0.77 ayrıca ortalama değer olarak 0.44 değerini göstermektedir. PA6-8EPDM ve %15 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı geniş bir aralık olarak 0.24 ile 0.81 ayrıca ortalama değer olarak 0.52 değerini göstermektedir. PA6-8EPDM ve %20 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı çok geniş bir aralıkta 0.2 ile 0.62 ayrıca ortalama değer olarak 0.36 değerini göstermiştir.



Şekil 5.32. PA6-8EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği

5.4.2.2. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkileri

Şekil 5.33'de verilen PA6-8EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Spesifik aşınma oranı-kayma yolu grafiğini incelediğimizde Katkısız PA6-8EPDM kompozitlerinin cam bilye katkısının ilave edilmesiyle aşınma oranında belirgin artış sonrası artan cam bilye oranıyla azalma olduğu gözlemlenmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 40N yükte uygulanan deneylerde PA6-8EPDM kompozitlerinin aşınma oranı 1,0735E-11 m^2/N değerini verirken %5, %10, %15, %20 oranlarında cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma oranları sırasıyla 2,2554E-11 m^2/N, 2,47418E-11 m^2/N, 2,148E-11 m^2/N, ve 1,55143E-11 m^2/N değerlerini göstermiştir.



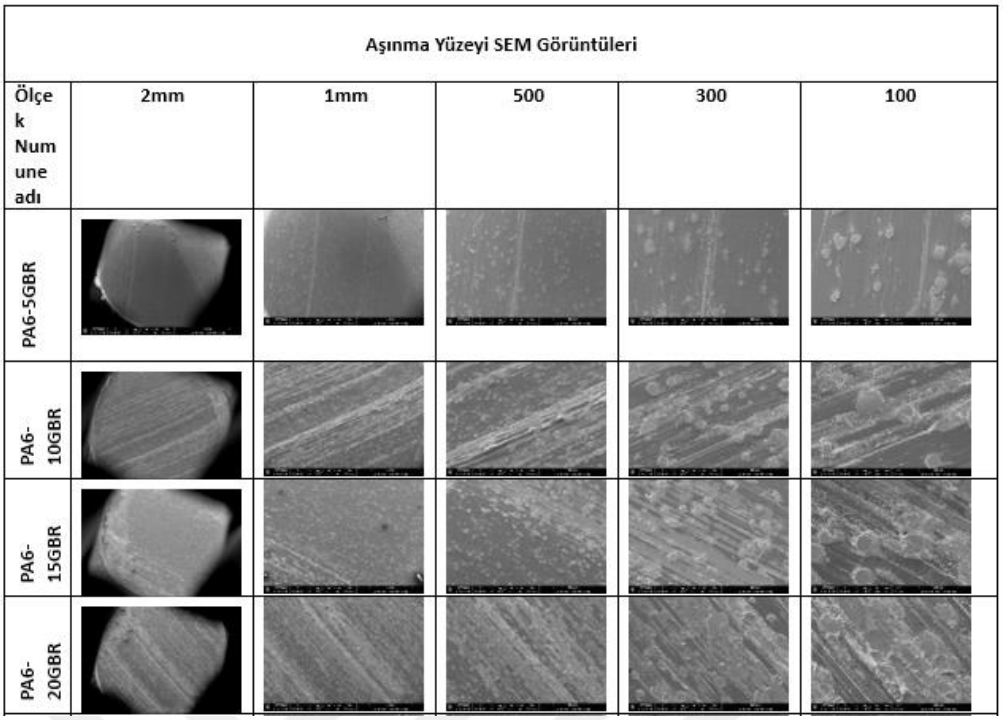
Şekil 5.33. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkisi Grafiği

5.4.2.3. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Yüzey Görüntüleri

5.4.2.3.1. Elektron Tarama Mikroskobu ile Optik mikroskop ile Görüntüleme

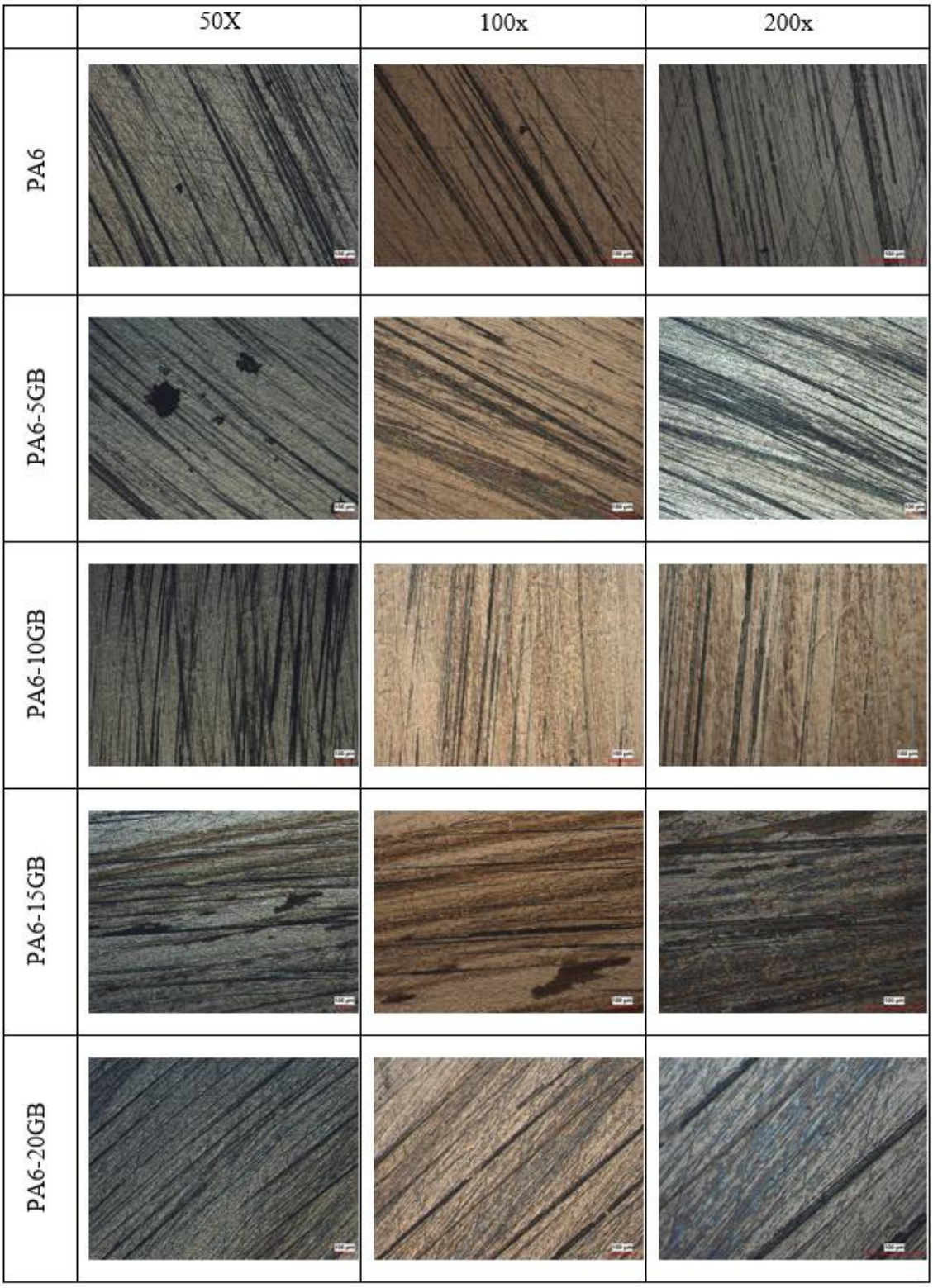
5.4.2.3.1.1 Elektron Tarama Mikroskobu ile Görüntüleme

Şekil 5.34'de PA6 ve %5, %10, %15 ve %20 Cam Bilye Katkılı kompozitlerinin 40N yük ve 1m/s kayma hızında 4340 kalite çelik diske karşı gerçekleştirilen aşınma deneylerinde elde edilen numune ve karşı disk yüzeylerinin çekilmiş taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde ki yüzeyleri incelediğimizde numunelerin cam bilyenın etkisiyle kaygan bir yüzey meydana getirdiği görülmektedir. Cam bilyelerin aşınma sonrası bilye şeklinden düzlem daire haline gelmesiyle çelik diske karşı aşınma direnci gösterdiği anlaşılmaktadır. %5 Cam bilyalı PA6-8EPDM kompozitinin yüzeyinde adhesif bir aşınma davranışı gözlemlenirken, artan cam bilye oranıyla abrasif bir aşınma göstermeye başlamıştır. Cam bilye oranı arttıkça kümeleşerek aglomera olmaları ile ve çelik dis karşı yüzeyi ile teması artarak ve yükünde etkisiyle daha ufak parçalara ayrılarak kayma yönüne parelel olarak oluşan uzunlamasına aşınma yüzeyi boşluklarına yerleştiğini ayrıca büyük cam bilyelerin engel teşkil ederek arkasında birikmeler oluştuğunu söyleyebiliriz.



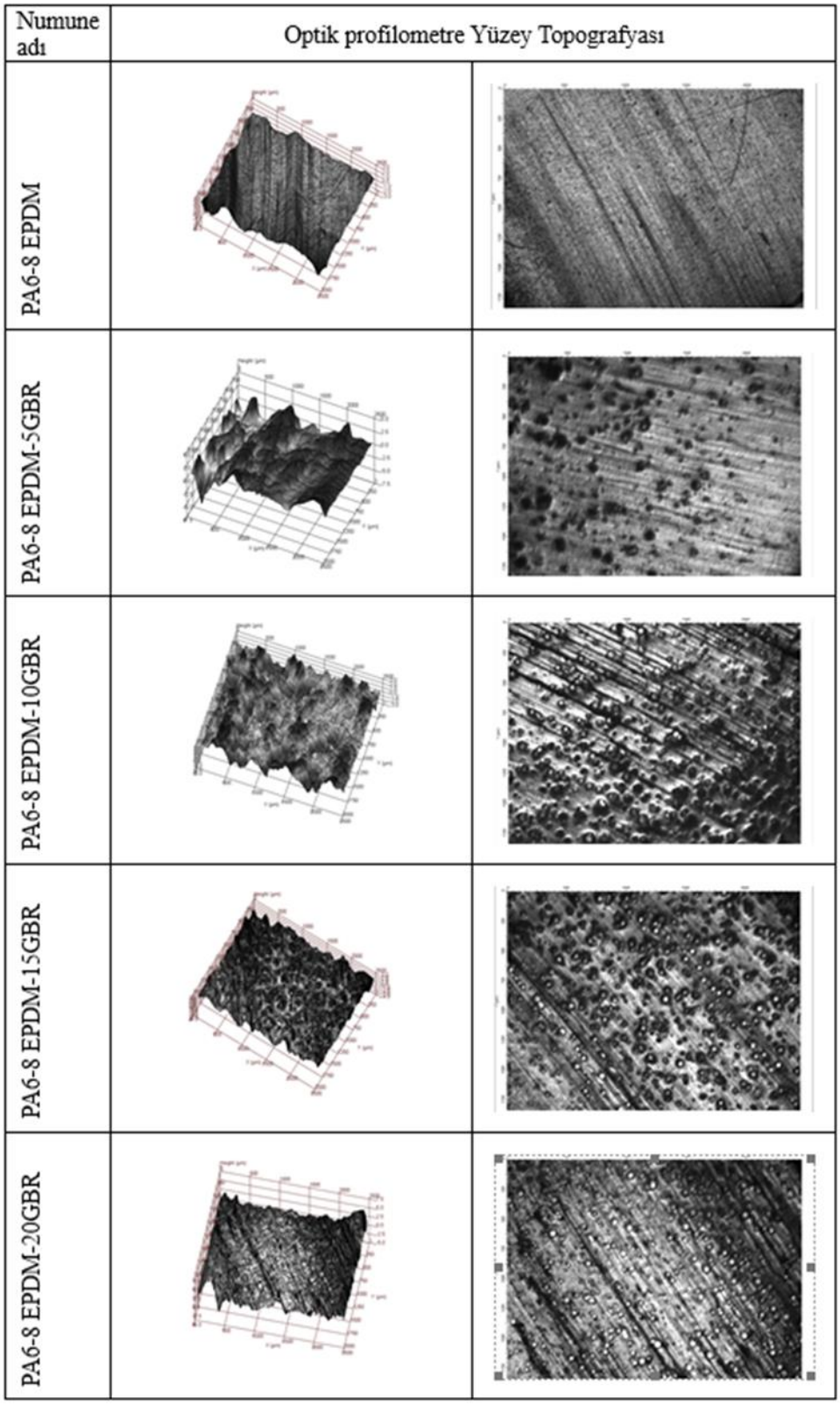
Şekil 5.34. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

5.4.2.3.1.2 Optik mikroskop ile Görüntüleme



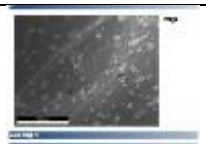
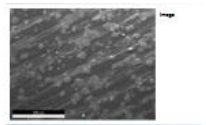
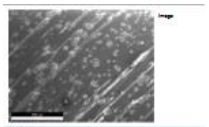
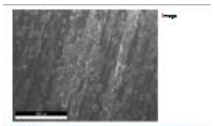
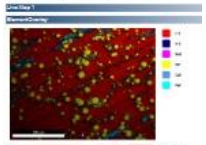
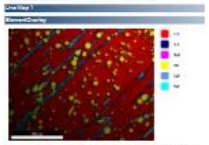
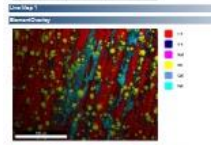
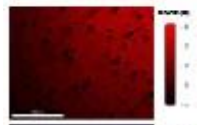
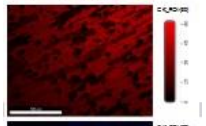
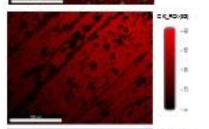
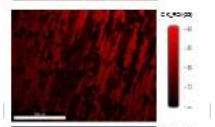
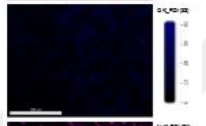
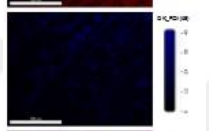
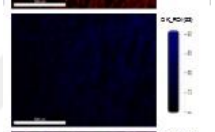
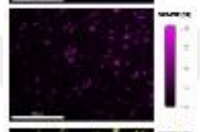
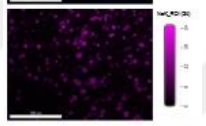
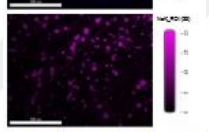
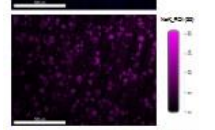
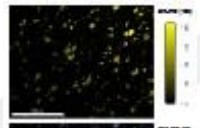
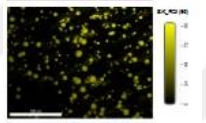
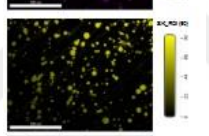
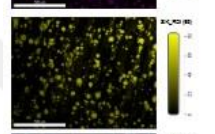
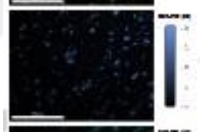
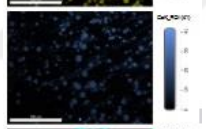
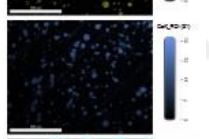
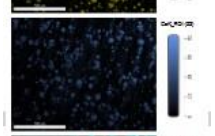
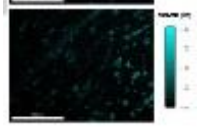
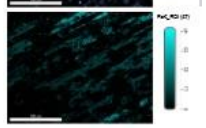
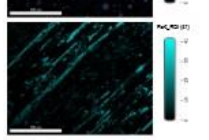
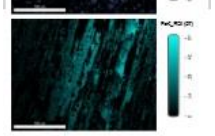
Şekil 5.35. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik mikroskobu görüntüleri.

5.4.2.3.2. Optik profilometre İle Yüzey Topografya Görüntüleme



Şekil 5.36. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik profilometre görüntüleri.

5.4.2.4. Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama

Numune Adı	PA6-5GB	PA6-10GB	PA6-15GB	PA6-20GB
SEM				
Toplam Dağılım				
Karbon				
Oksijen				
Sodyum				
Silisyum				
Kalsiyum				
Demir				

Şekil 5.37. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama

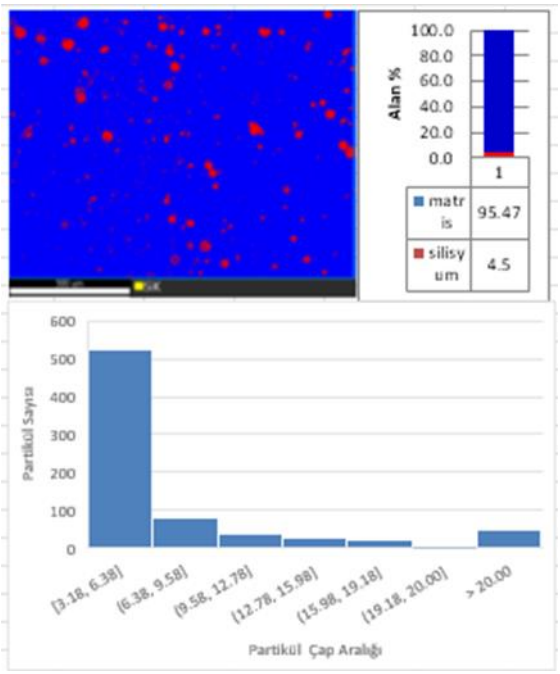
5.4.2.5. PA6-8EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

Deneylerde kullanılan PA6-8EPDM kompoziti ile Cam Bilye katkılı PA6-8EPDM kompozit malzemelerinin 4340 kalite çelik malzeme yüzeyine karşı aşınma analizleri sonrası partikül miktarı, dağılımı ve morfolojisi incelemeleri;

40N yük ve 1m/s kayma hızında yapılan deneyler sonucunda PA6-8EPDM kompozit ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompozitlerin partikül

miktarı, dağılımı ve morfolojileri Şekil 34 ila Şekil 37'de verilmiştir.

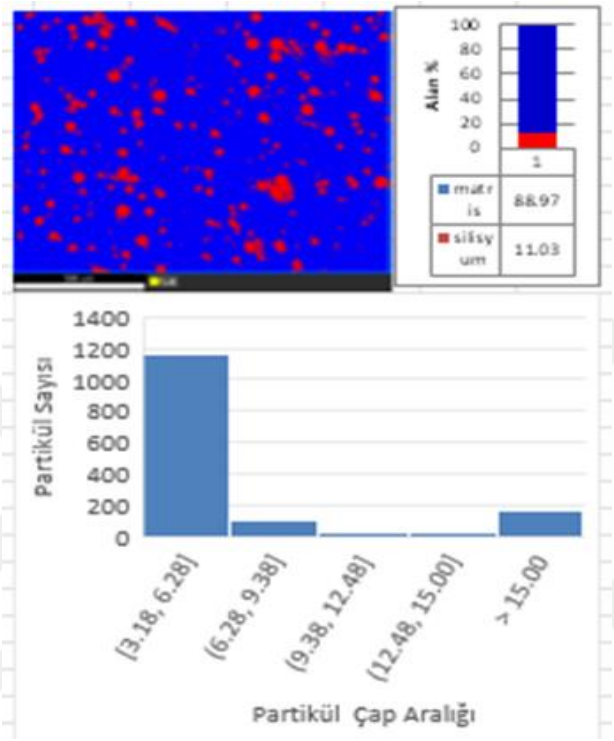
PA6-8EPDM kompoziti ile %5 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.38 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %54.53 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %8.8, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %10.53, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %4.8, 8.64-10 µm arası partikül oranı %2.40 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %18.93 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %95.47 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %4.5 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-6 µm ve 10 µm üzerindeki boyutlarındaki partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.38. PA6-8EPDM ve %5 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

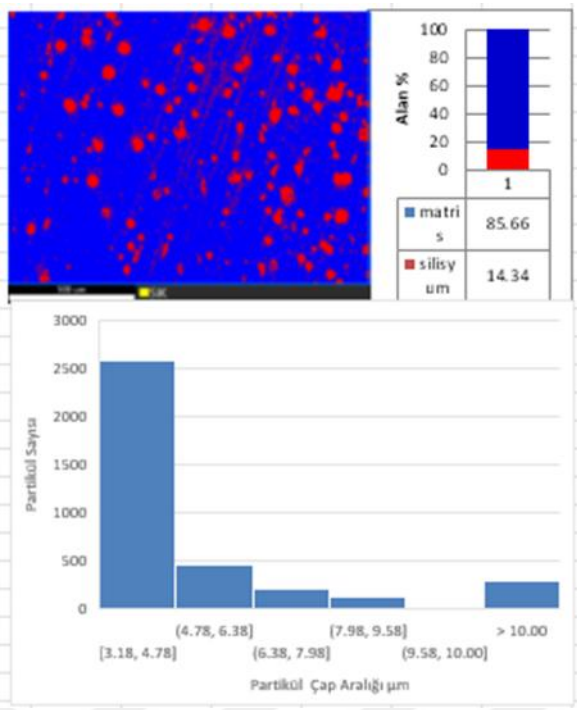
PA6-8EPDM kompoziti ile %10 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.39 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %72.83 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %5.92, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %5.17, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %1.5, 8.64-10 µm arası partikül oranı %0.64 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %13.61 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris

yüzeyi %88.97 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %11.03 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm boyutlarındaki daha ufak boyutlu partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



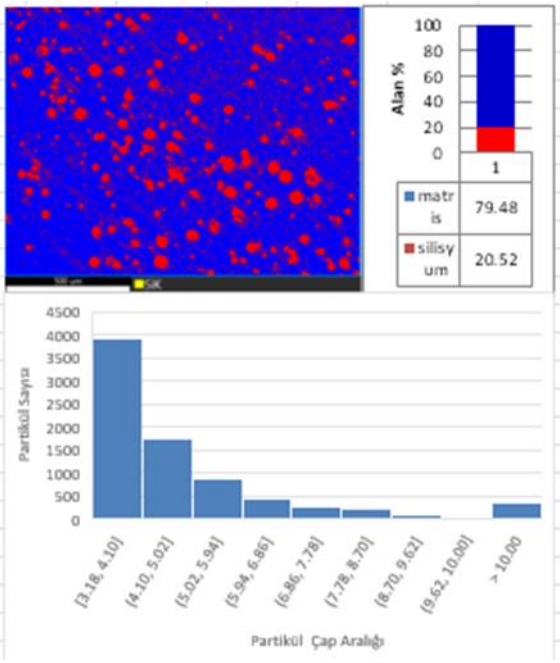
Şekil 5.39. PA6-8EPDM ve %10 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

PA6-8EPDM kompoziti ile %15 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.40 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %71.24 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %7.69, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %8.19, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %3.67, 8.64-10 µm arası partikül oranı %1.64 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %7.55 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %85.66 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %14.34 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm boyutlarındaki daha ufak boyutlu partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.40. PA6-8EPDM ve %15 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

PA6-8EPDM kompoziti ile %20 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.41 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %71.49 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %10.84, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %8.82, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %3.09, 8.64-10 µm arası partikül oranı %1.38 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %4,39 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %85.66 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %14.34 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm boyutlarındaki daha ufak boyutlu partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.41. PA6-8EPDM ve %20 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

5.4.3. **PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Özeliklerinin İncelenmesi**

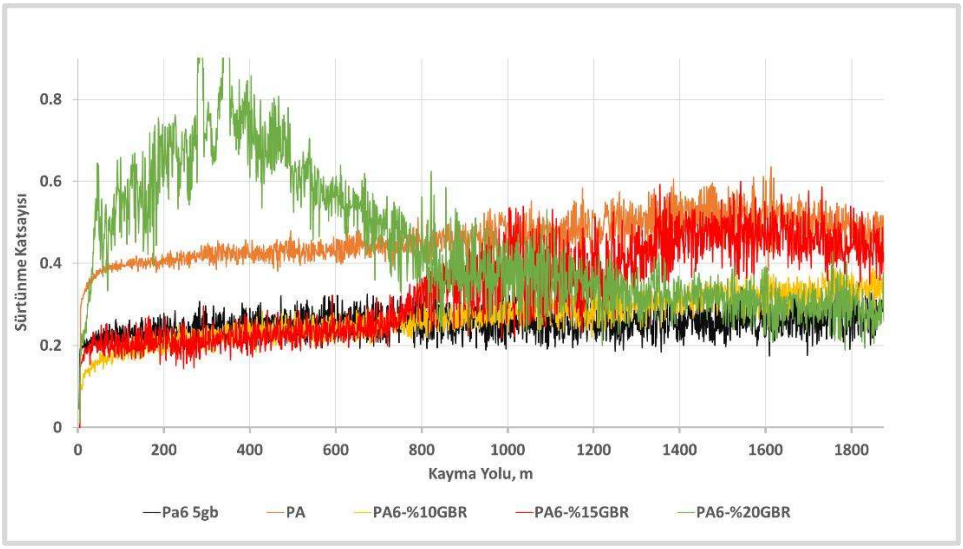
5.4.3.1. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sürtünme Katsayısı ile Kayma Yolu İlişkileri

Deneylerde kullanılan PA6-12EPDM kompoziti ile Cam Bilye katkılı PA6-12EPDM kompozit malzemelerinin 4340 kalite çelik malzeme yüzeyine karşı aşınma analizleri;

40N yük ve 1m/s kayma hızında yapılan deneyler sonucunda PA6-12EPDM ile %5,

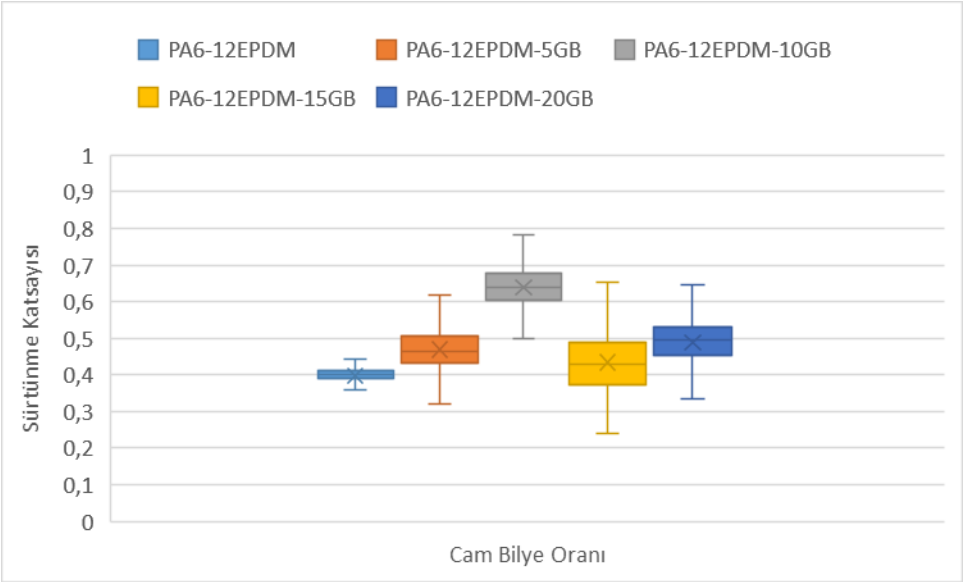
%10, %15 ve %20 oranlarında Cam Bilye katkılı PA6-12EPDM kompozitlerin sürtünme katsayısı kayma mesafesi ilişkisi Şekil 5.42'de verilmiştir. %20 Cam bilye katkılı PA6-12EPDM kompoziti haricindeki tüm kompozit ve PA6-12EPDM malzemesinin sürtünme katsayısı kayma yolunu başlangıçtan itibaren kararlı bir şekilde tamamladığı görülmüş olup sürtünme katsayıları sırasıyla 0.58, 0.25, 0.19 ve 0.33 'dir. %20 Cam bilye katkılı PA6-12EPDM kompoziti ise başlangıçtan itibaren 0.8 'lere varan değerlere çıktıktan sonra 800m mesafe aldıktan sonra stabilize olup ortalama olarak 0.41 sürtünme katsayısı değerinde tamamladığı saptanmıştır. Benzer olarak %15 Cam bilye katkılı PA6-12EPDM kompoziti ise başlangıçta 0.17 'lere varan değerleri gösterdikten sonra 800m mesafe aldıktan sonra artış göstererek ortalama olarak 0.33 sürtünme katsayısı değerinde

tamamlamıştır. %5 Cam bilye katkılı PA6-12EPDM kompoziti ise başlangıçtan sona kadar sabit sürtünme katsayısı değerinde kalırken %10 Cam bilye katkılı PA6-12EPDM kompoziti sürtünme katsayısı değerinde ise az ve doğrusal olarak artış eğilimi göstermiştir.



Şekil 5.42. PA6-12EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayıs-kayma yolu grafiği

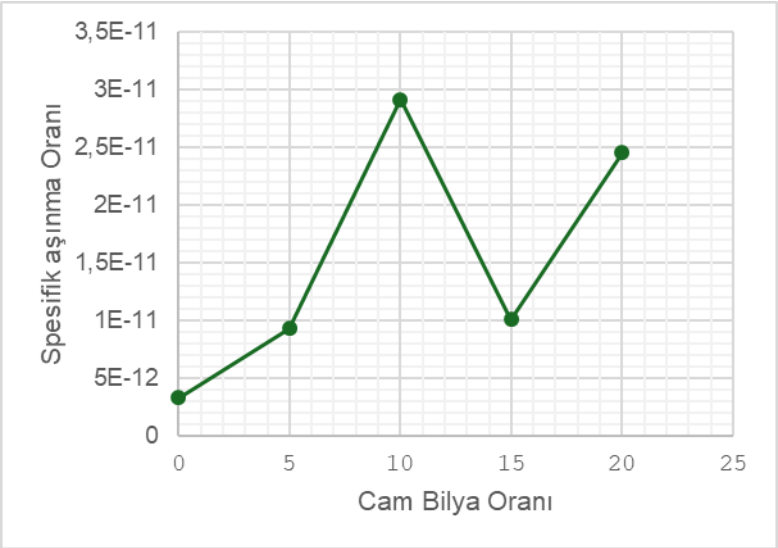
Şekil 5.43'de verilen PA6-12EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiğini incelediğimizde Katkısız PA6-12EPDM kompozitinin sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.35 ile 0.44 değerini gösterirken ayrıca ortalama değer olarak 0.39 değerini göstermektedir. PA6-12EPDM ve %5 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.32 ile 0.62 ayrıca ortalama değer olarak 0.47 değerini göstermektedir. PA6-12EPDM ve %10 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.49 ile 0.78 ayrıca ortalama değer olarak 0.63 değerini göstermektedir. PA6-12EPDM ve %15 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı geniş bir aralık olarak 0.24 ile 0.65 ayrıca ortalama değer olarak 0.43 değerini göstermektedir. PA6-12EPDM ve %20 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı çok geniş bir aralıkta 0.33 ile 0.64 ayrıca ortalama değer olarak 0.48 değerini göstermiştir.



Şekil 5.43. PA6-12EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği

5.4.3.2. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkileri

Şekil 44'de verilen PA6-12EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Spesifik aşınma oranı-kayma yolu grafiğini incelediğimizde Katkısız PA6-12EPDM kompozitlerinin cam bilye katkısının ilave edilmesiyle aşınma oranında %15 cam bilye katkılı kompozite kadar belirgin artış sonrası artan cam bilye oranıyla azalma olduğu gözlemlenmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 40N yükte uygulanan deneylerde PA6-12EPDM kompozitlerinin aşınma oranı 3,34145E-12 m^2/N değerini verirken %5, %10, %15, %20 oranlarında cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma oranları sırasıyla 9,32622E-12 m^2/N, 2,91208E-11 m^2/N, 1,00946E-11 m^2/N, ve 2,45205E-11 m^2/N değerlerini göstermiştir.



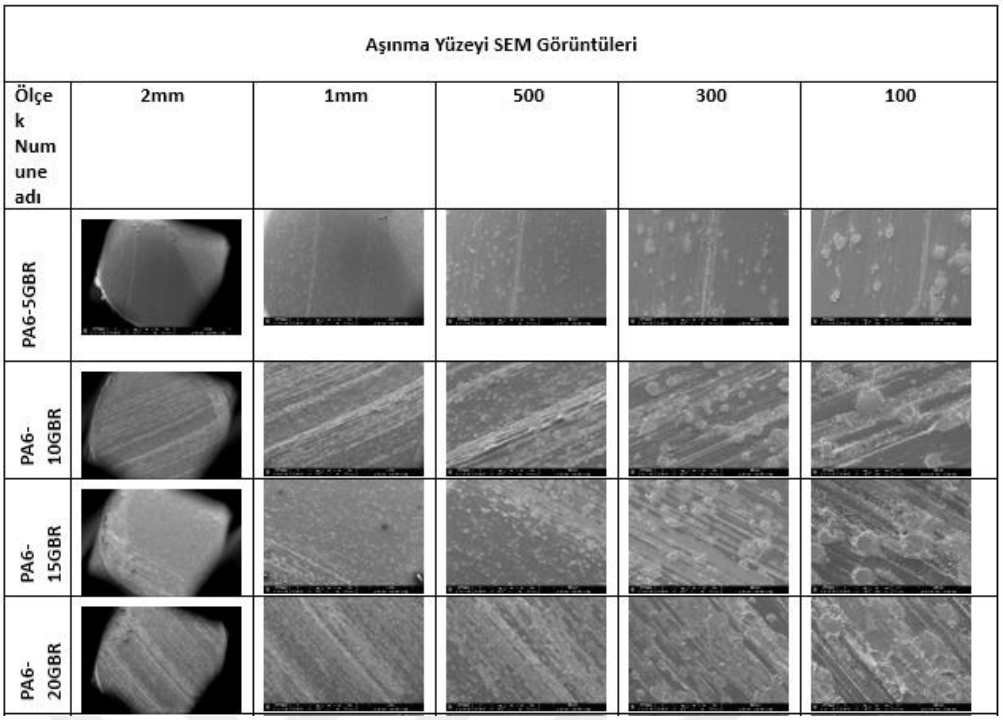
Şekil 5.44. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkisi Grafiği

5.4.3.3. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Yüzey Görüntüleri

5.4.3.3.1. Elektron Tarama Mikroskobu ile Optik mikroskop ile Görüntüleme

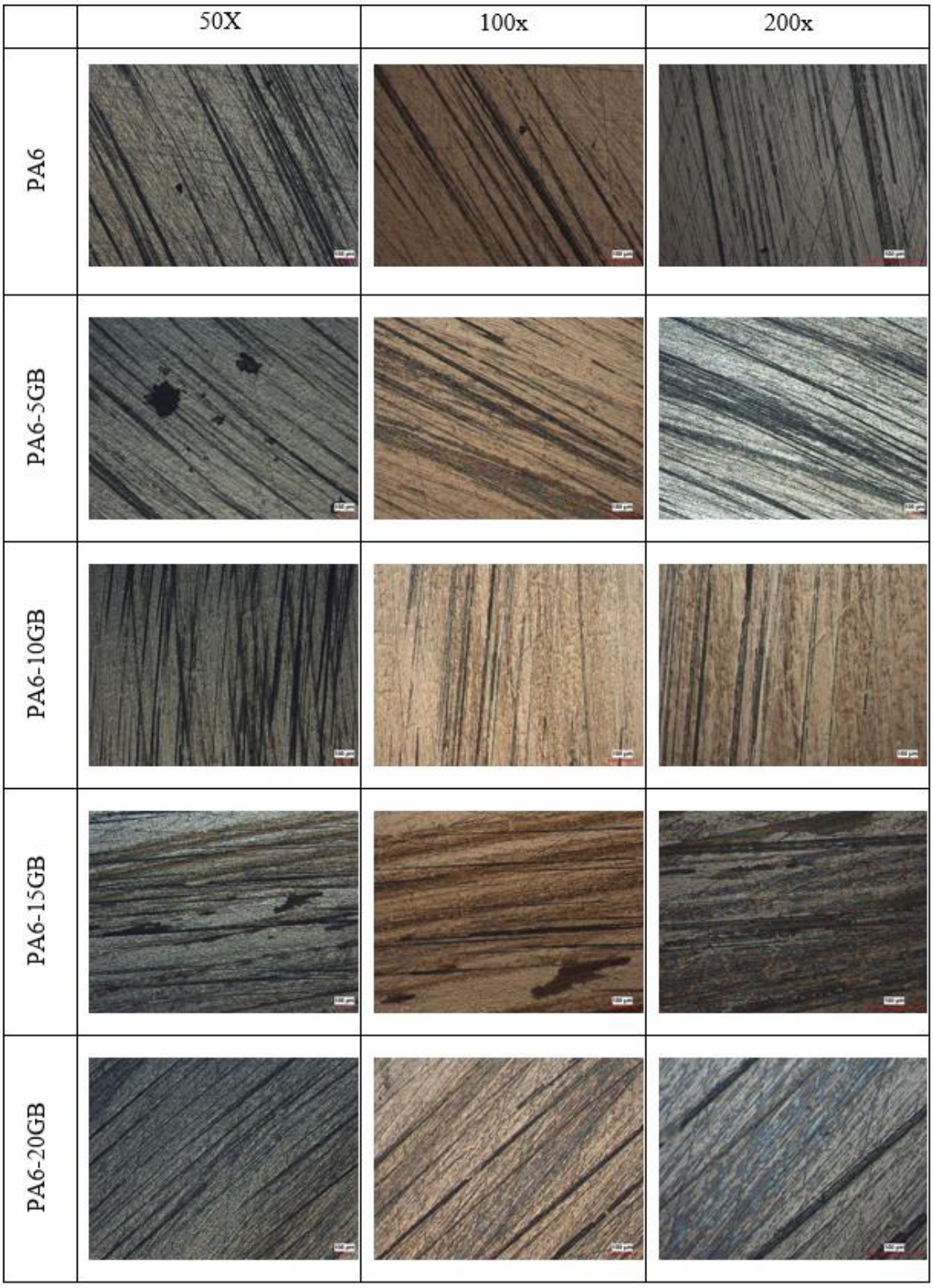
5.4.3.3.1.1 Elektron Tarama Mikroskobu ile Görüntüleme

Şekil 5.45'de PA6 ve %5, %10, %15 ve %20 Cam Bilye Katkılı kompozitlerinin 40N yük ve 1m/s kayma hızında 4340 kalite çelik diske karşı gerçekleştirilen aşınma deneylerinde elde edilen numune ve karşı disk yüzeylerinin çekilmiş taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde ki yüzeyleri incelediğimizde numunelerin cam bilyenın etkisiyle kaygan bir yüzey meydana getirdiği görülmektedir. Cam bilyelerin aşınma sonrası bilye şeklinden düzlem daire haline gelmesiyle çelik diske karşı aşınma direnci gösterdiği anlaşılmaktadır. %5 Cam bilyalı PA6-12EPDM kompozitinin yüzeyinde adhesif bir aşınma davranışı gözlemlenirken, artan cam bilye oranıyla abrasif bir aşınma göstermeye başlamıştır. Cam bilye oranı arttıkça kümeleşerek aglomera olmaları ile ve çelik dis karşı yüzeyi ile teması artarak ve yükünde etkisiyle daha ufak parçalara ayrılarak kayma yönüne parelel olarak oluşan uzunlamasına aşınma yüzeyi boşluklarına yerleştiğini ayrıca büyük cam bilyelerin engel teşkil ederek arkasında birikmeler oluştuğunu söyleyebiliriz.



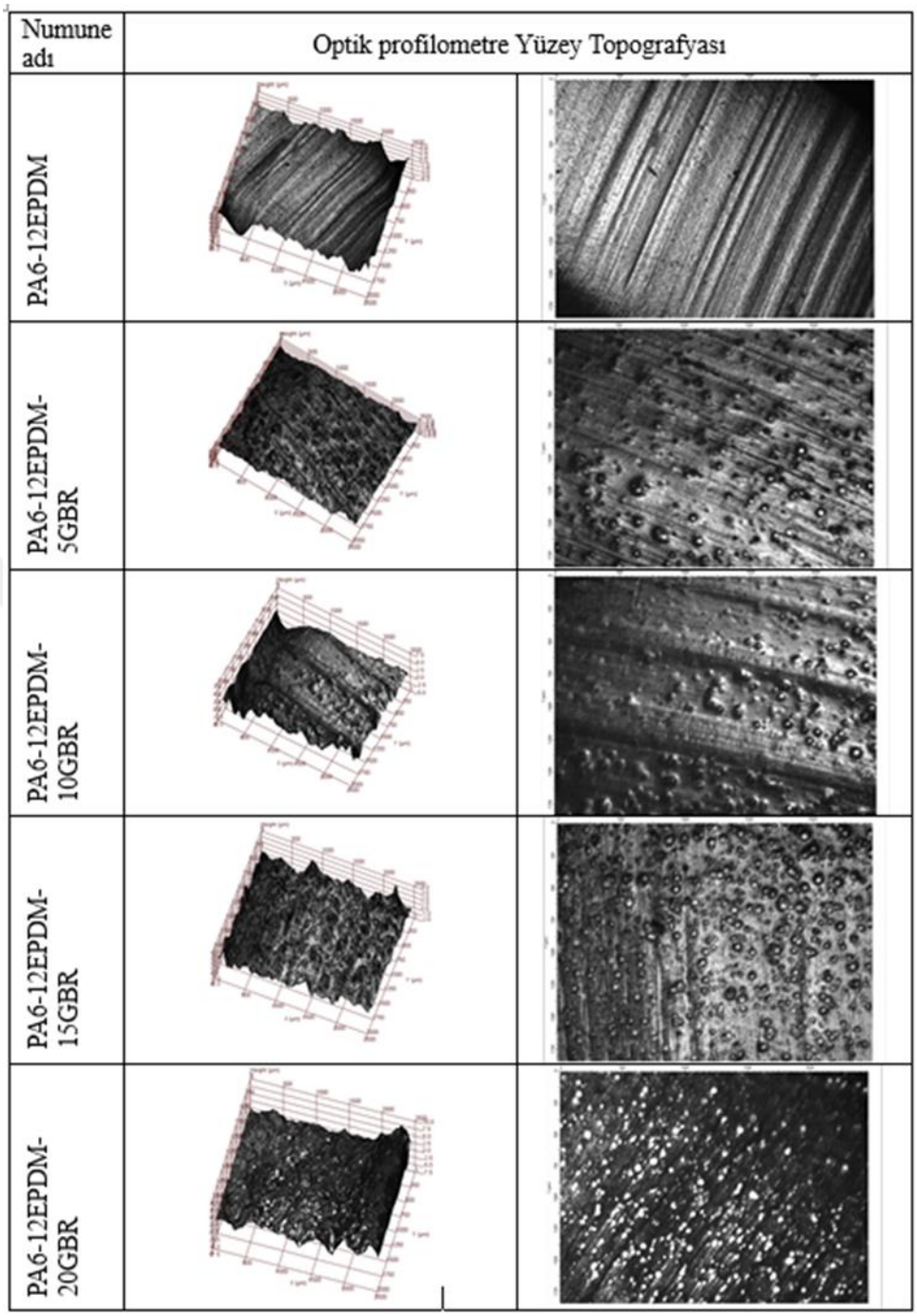
Şekil 5.45. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

5.4.3.3.1.2 Optik mikroskop ile Görüntüleme



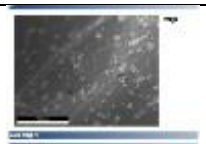
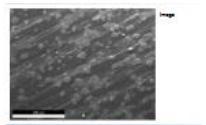
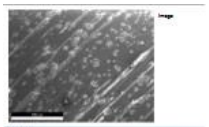
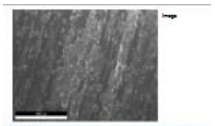
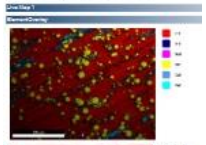
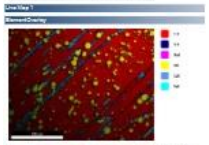
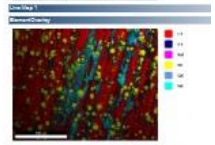
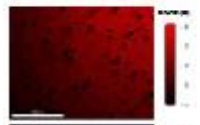
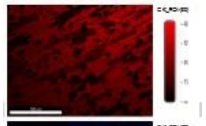
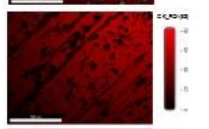
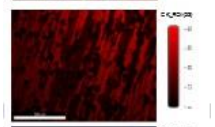
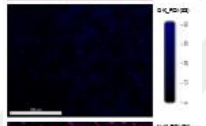
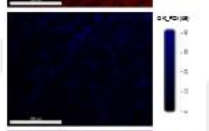
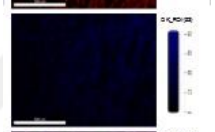
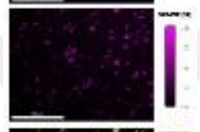
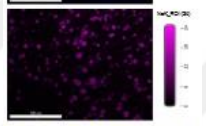
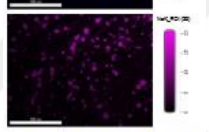
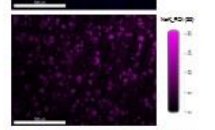
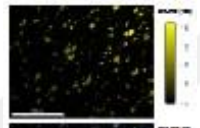
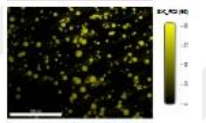
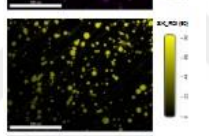
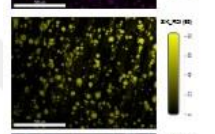
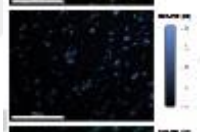
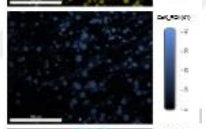
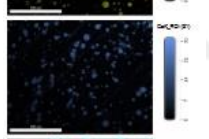
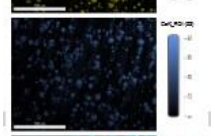
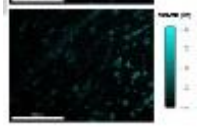
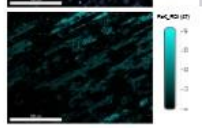
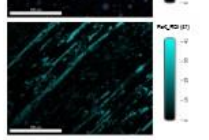
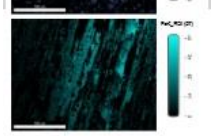
Şekil 5.46. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik mikroskobu görüntüleri.

5.4.3.3.2. Optik profilometre İle Yüzey Topografya Görüntüleme



Şekil 5.47. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-8EPDM kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik profilometre görüntüleri.

5.4.3.4. Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama

Numune Adı	PA6-5GB	PA6-10GB	PA6-15GB	PA6-20GB
SEM				
Toplam Dağılım				
Karbon				
Oksijen				
Sodyum				
Silisyum				
Kalsiyum				
Demir				

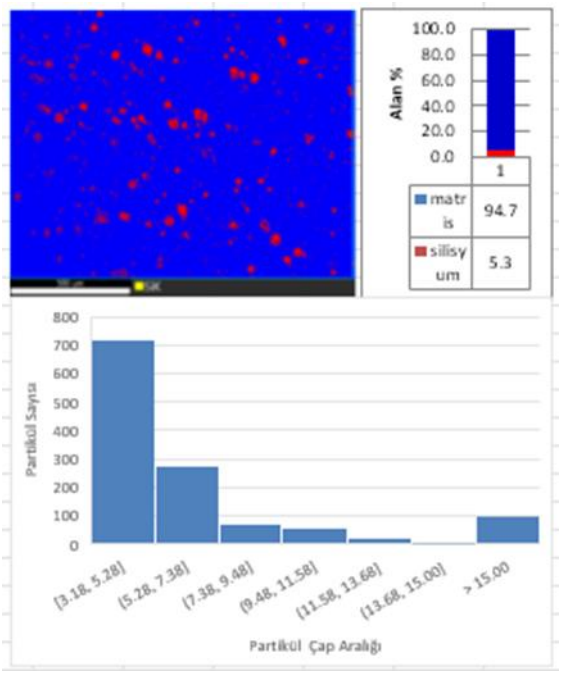
Şekil 5.48. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama

5.4.3.5. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

Deneylerde kullanılan PA6-12EPDM kompoziti ile Cam Bilye katkılı PA6-12EPDM kompozit malzemelerinin 4340 kalite çelik malzeme yüzeyine karşı aşınma analizleri sonrası partikül miktarı, dağılımı ve morfolojisi incelemeleri;

40N yük ve 1m/s kayma hızında yapılan deneyler sonucunda PA6-12EPDM kompozit ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojileri Şekil 5.49 ila Şekil 5.52'de verilmiştir.

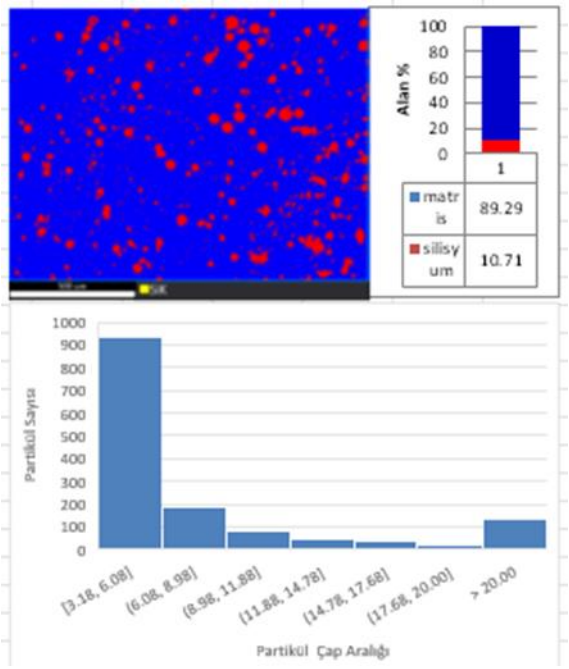
PA6-12EPDM kompoziti ile %5 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.49 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %57.02 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %11.74, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %9.91, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %3.81, 8.64-10 µm arası partikül oranı %3.17 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %14.35 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %94.7 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %5.3 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm boyutlarındaki daha ufak boyutlu partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.49. PA6-12EPDM ve %5 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

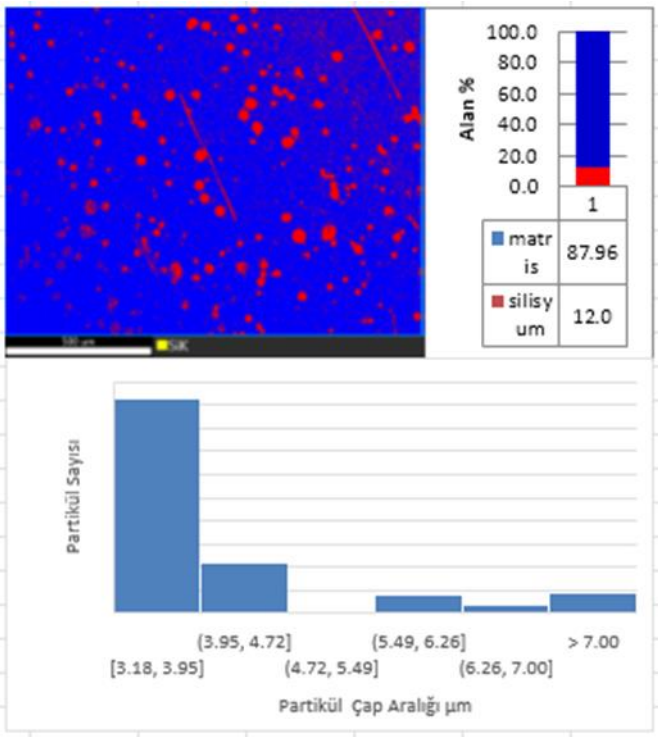
PA6-12EPDM kompoziti ile %10 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.50 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %57.03 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %8.14, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %9.05, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %4.24, 8.64-10 µm arası partikül oranı %2.71 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %18.79 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %89.29 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %10.71 oranında

saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm boyutlarındaki daha ufak boyutlu partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



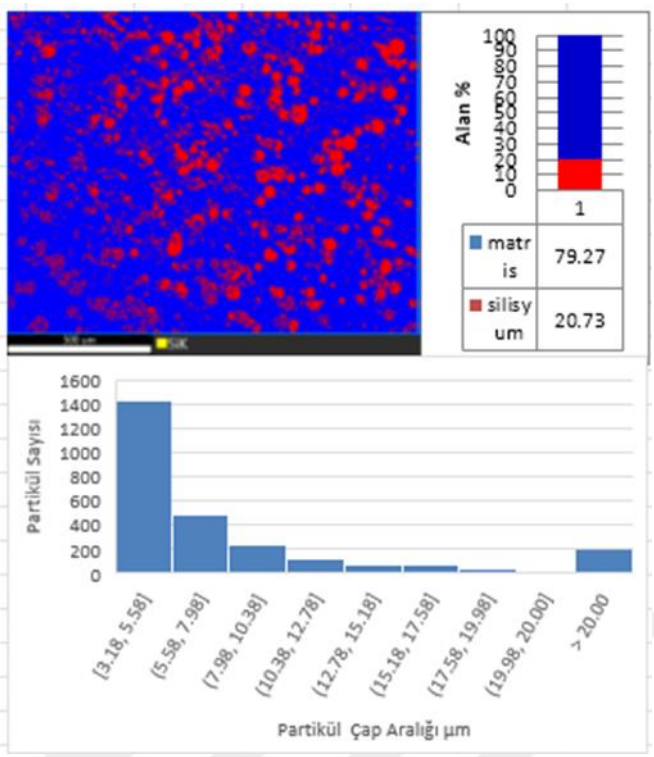
Şekil 5.50. PA6-12EPDM ve %10 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

PA6-12EPDM kompoziti ile %15 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.51 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %84.77 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %5.96, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %4.01, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %1.16, 8.64-10 µm arası partikül oranı %0.6 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %3.49 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %87.96 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %12 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm boyutlarındaki daha ufak boyutlu partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.51. PA6-12EPDM ve %15 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

PA6-12EPDM kompoziti ile %20 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.52 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %42.26 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %11.75, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %14.16, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %7.5, 8.64-10 µm arası partikül oranı %3.99 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %20.34 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %79.27 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %20.73oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm ve 10 µm üzeri boyutlarındaki daha ufak boyutlu partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.52. PA6-12EPDM ve %20 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

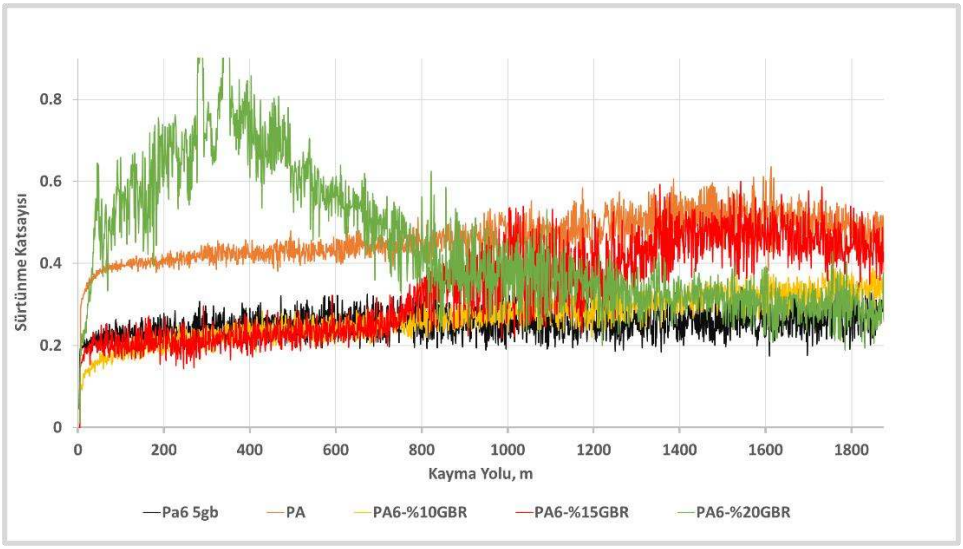
5.4.4. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Özeliklerinin İncelenmesi

5.4.4.1. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Sürtünme Katsayısı ile Kayma Yolu İlişkileri

Deneylerde kullanılan PA6 kompoziti ile Cam Bilye katkılı PA6-16EPDM kompozit malzemelerinin 4340 kalite çelik malzeme yüzeyine karşı aşınma analizleri;

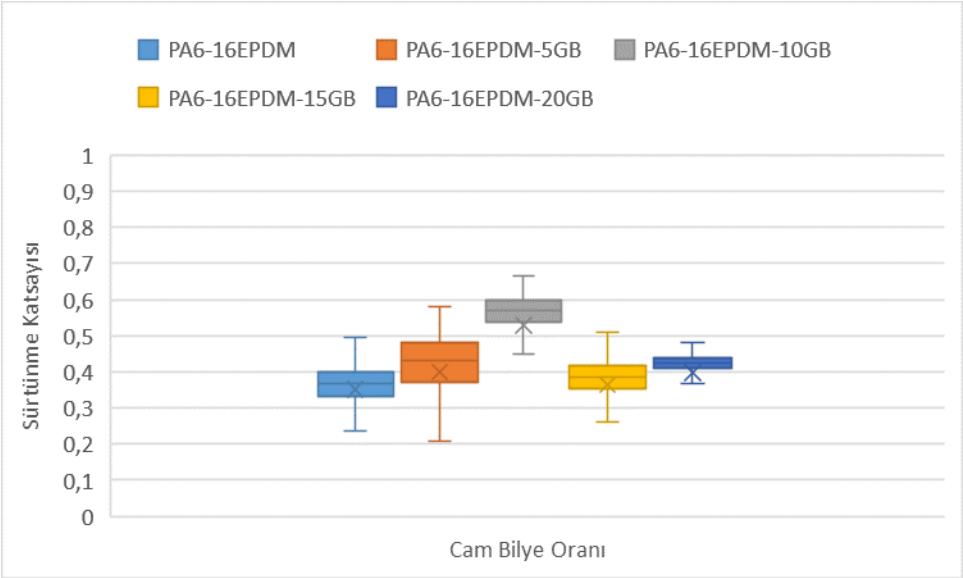
40N yük ve 1m/s kayma hızında yapılan deneyler sonucunda PA6polimeri ile %5,%10, %15 ve %20 oranlarında Cam Bilye katkılı PA6-16EPDM kompozitlerin sürtünme katsayısı kayma mesafesi ilişkisi Şekil 5.53'de verilmiştir. %20 Cam bilye katkılı PA6 kompoziti haricindeki tüm kompozit ve PA6 malzemesinin sürtünme katsayısı kayma yolunu başlangıçtan itibaren kararlı bir şekilde tamamladığı görülmüş olup sürtünme katsayıları sırasıyla 0.58, 0.25, 0.19 ve 0.33 'dir. %20 Cam bilye katkılı PA6 kompoziti ise başlangıçtan itibaren 0.8 'lere varan değerlere çıktıktan sonra 800m mesafe aldıktan sonra stabilize olup ortalama olarak 0.41 sürtünme katsayısı değerinde tamamladığı saptanmıştır. Benzer olarak %15 Cam bilye katkılı PA6 kompoziti ise başlangıçta 0.17 'lere varan değerleri gösterdikten sonra 800m mesafe aldıktan sonra artış göstererek

ortalama olarak 0.33 sürtünme katsayısı değerinde tamamlamıştır. %5 Cam bilye katkılı PA6 kompoziti ise başlangıçtan sona kadar sabit sürtünme katsayısı değerinde kalırken %10 Cam bilye katkılı PA6 kompoziti sürtünme katsayısı değerinde ise az ve doğrusal olarak artış eğilimi göstermiştir.



Şekil 5.53. PA6-16EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayıs-kayma yolu grafiği

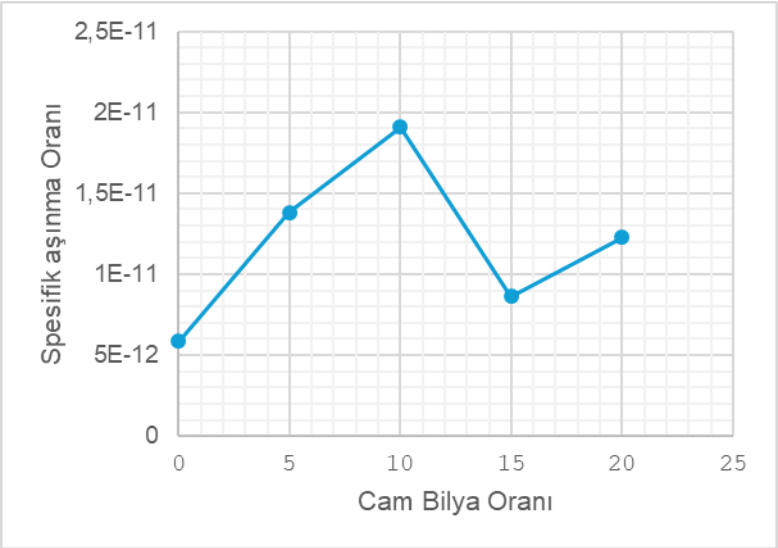
Şekil 5.54 'de verilen PA6-16EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiğini incelediğimizde Katkısız PA6-16EPDM polimerinin sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.23 ile 0.49 değerini gösterirken ayrıca ortalama değer olarak 0.35 değerini göstermektedir. PA6-16EPDM ve %5 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.20 ile 0.58 ayrıca ortalama değer olarak 0.40 değerini göstermektedir. PA6-16EPDM ve %10 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı 0.45 ile 0.66 ayrıca ortalama değer olarak 0.52 değerini göstermektedir. PA6-16EPDM ve %15 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı geniş bir aralık olarak 0.26 ile 0.51 ayrıca ortalama değer olarak 0.36 değerini göstermektedir. PA6-16EPDM ve %20 Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği sürtünme katsayısı grafik bant aralığı çok geniş bir aralıkta 0.36 ile 0.48 ayrıca ortalama değer olarak 0.39 değerini göstermiştir.



Şekil 5.54. PA6-16EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Sürtünme Katsayısı-kayma yolu ortalama değer grafiği

5.4.4.2. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkileri

Şekil 5.55'de verilen PA6-16EPDM ve Cam Bilye katkılı Kompozitlerin Spesifik aşınma oranı-kayma yolu grafiğini incelediğimizde Katkısız PA6-16EPDM kompozitlerinin cam bilye katkısının ilave edilmesiyle aşınma oranında %10 cam bilye katkılı kompozite kadar belirgin artış sonrası artan cam bilye oranıyla azalma olduğu gözlemlenmiştir. 1 m/s kayma hızı ve 40N yükte uygulanan deneylerde PA6-16EPDM kompozitlerinin aşınma oranı 5,87268E-12 m^2/N değerini verirken %5, %10, %15, %20 oranlarında cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma oranları sırasıyla 1,38306E-11 m^2/N, 1,90818E-11 m^2/N, 8,62208E-12 m^2/N, ve 1,22637E-11 m^2/N değerlerini göstermiştir.



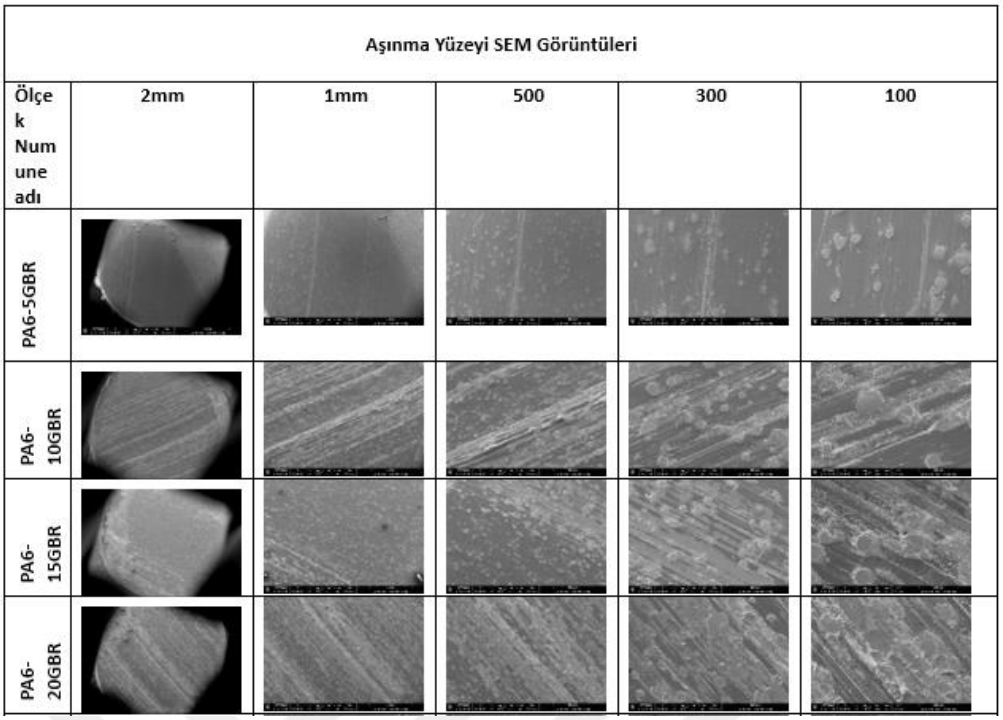
Şekil 5.55. PA6-12EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Spesifik Aşınma oranı ile Kayma Yolu İlişkisi Grafiği

5.4.4.3. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Aşınma Yüzey Görüntüleri

5.4.4.3.1. Elektron Tarama Mikroskobu ile Optik mikroskop ile Görüntüleme

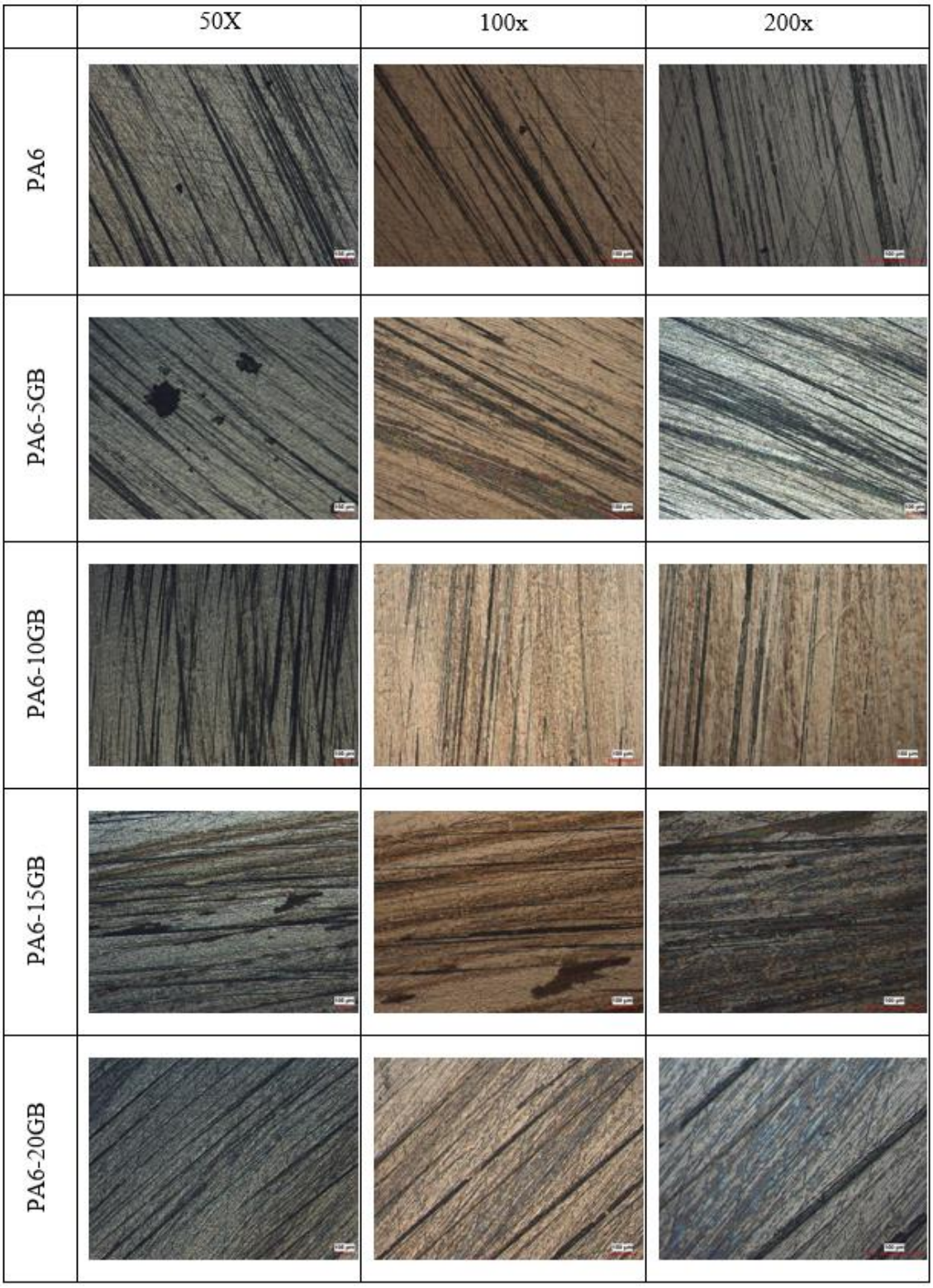
5.4.4.3.1.1 Elektron Tarama Mikroskobu ile Görüntüleme

Şekil 5.56'da PA6-16EPDM ve %5, %10, %15 ve %20 Cam Bilye Katkılı kompozitlerinin 40N yük ve 1m/s kayma hızında 4340 kalite çelik diske karşı gerçekleştirilen aşınma deneylerinde elde edilen numune ve karşı disk yüzeylerinin çekilmiş taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde ki yüzeyleri incelediğimizde numunelerin cam bilyenın etkisiyle kaygan bir yüzey meydana getirdiği görülmektedir. Cam bilyelerin aşınma sonrası bilye şeklinden düzlem daire haline gelmesiyle çelik diske karşı aşınma direnci gösterdiği anlaşılmaktadır. %5 Cam bilyalı PA6-16EPDM kompozitinin yüzeyinde adhesif bir aşınma davranışı gözlemlenirken, artan cam bilye oranıyla abrasif bir aşınma göstermeye başlamıştır. Cam bilye oranı arttıkça kümeleşerek aglomera olmaları ile ve çelik dis karşı yüzeyi ile teması artarak ve yükünde etkisiyle daha ufak parçalara ayrılarak kayma yönüne parelel olarak oluşan uzunlamasına aşınma yüzeyi boşluklarına yerleştiğini ayrıca büyük cam bilyelerin engel teşkil ederek arkasında birikmeler oluştuğunu söyleyebiliriz.



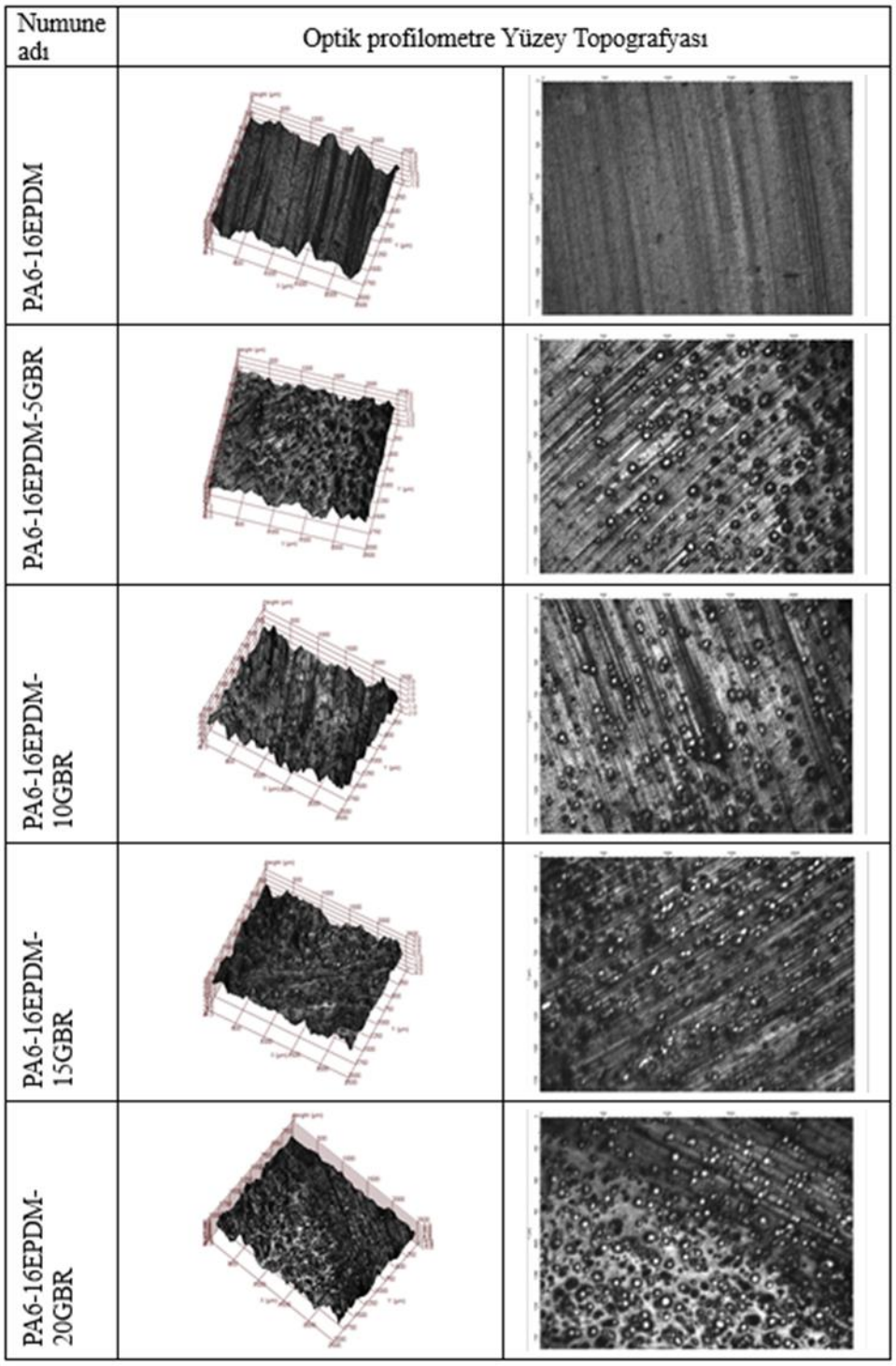
Şekil 5.56. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

5.4.4.3.1.2 Optik mikroskop ile Görüntüleme



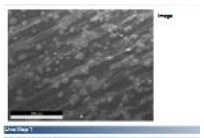
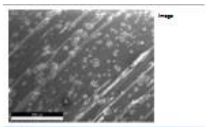
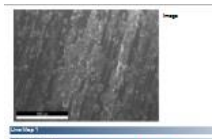
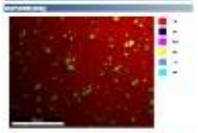
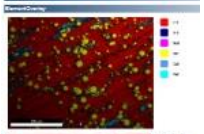
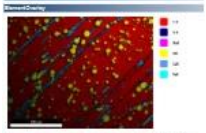
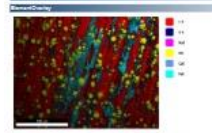
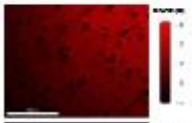
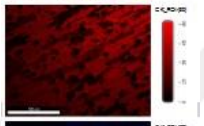
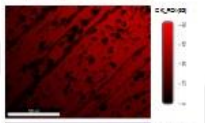
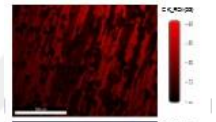
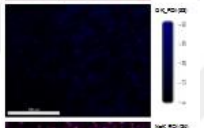
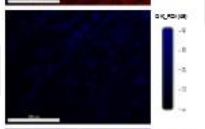
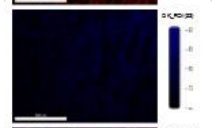
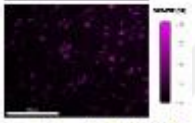
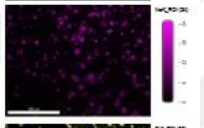
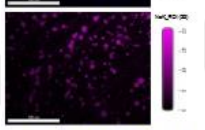
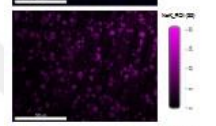
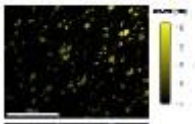
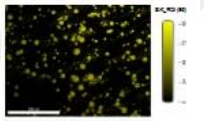
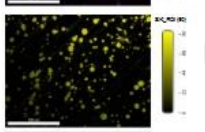
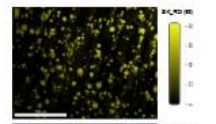
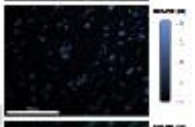
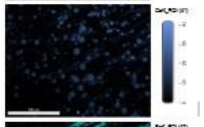
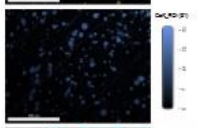
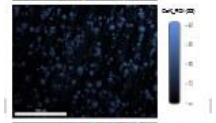
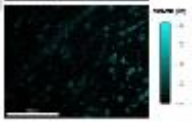
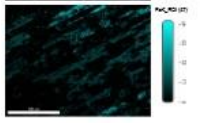
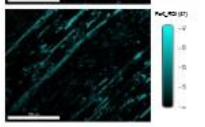
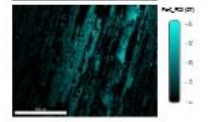
Şekil 5.57. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik mikroskobu görüntüleri.

5.4.4.3.2. Optik profilometre İle Yüzey Topografya Görüntüleme



Şekil 5.58. %5, %10, %15 ve %20 cam bilye katkılı PA6-16EPDM kompozitlerin aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeyinden optik profilometre görüntüleri.

5.4.4.4. Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama

Numune Adı	PA6-5GB	PA6-10GB	PA6-15GB	PA6-20GB
SEM				
Toplam Dağılım				
Karbon				
Oksijen				
Sodyum				
Silisyum				
Kalsiyum				
Demir				

Şekil 5.59. PA6-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Elektron Tarama Mikroskobu ile Kimyasal Bileşim Haritalama

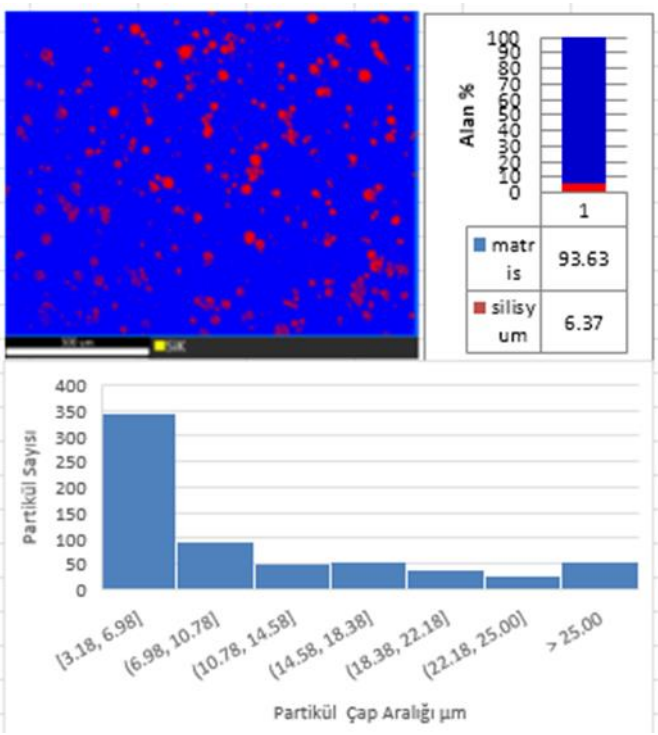
5.4.4.5. PA6-16EPDM-16EPDM ve Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

Deneylerde kullanılan PA6-16EPDM kompoziti ile Cam Bilye katkılı PA6-16EPDM kompozit malzemelerinin 4340 kalite çelik malzeme yüzeyine karşı aşınma analizleri sonrası partikül miktarı, dağılımı ve morfolojisi incelemeleri;

40N yük ve 1m/s kayma hızında yapılan deneyler sonucunda PA6-16EPDM kompozit ile

%5, %10, %15 ve %20 oranlarında cam bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojileri Şekil 5.60 ila Şekil 5.63'de verilmiştir.

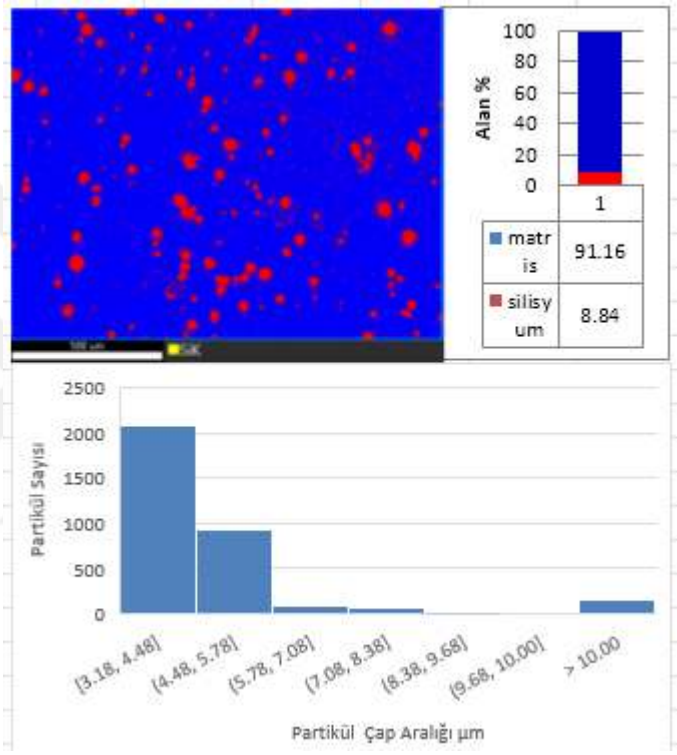
PA6-16EPDM kompoziti ile %5 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.60 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %36.73 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %9.88, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %8.21, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %4.26, 8.64-10 µm arası partikül oranı %4.41 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %36.47 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %93.63 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %6.37 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm ve 10 µm boyutlarındaki partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.60. PA6-16EPDM ve %5 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

PA6-16EPDM kompoziti ile %10 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.61 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %83.63 'ünü oluştururken 4.55-

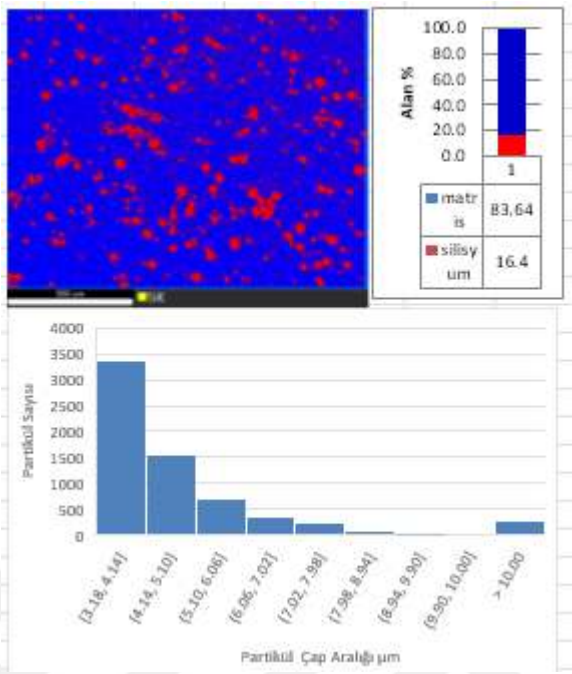
5.91 µm arası partiküller %6.22, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %4.14, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %1.10, 8.64-10 µm arası partikül oranı %0.54 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %4.40 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %91.16 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %8.84 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm boyutlarındaki daha küçük partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.61. PA6-16EPDM ve %10 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

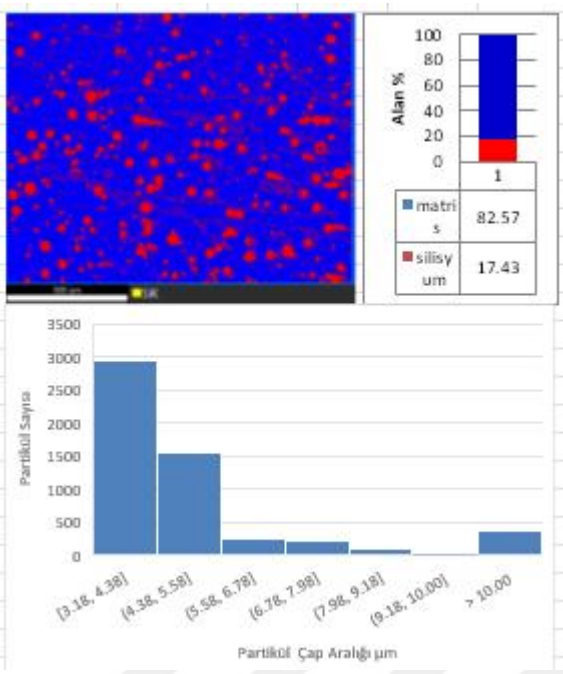
PA6-16EPDM kompoziti ile %15 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.62 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %74.53 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %10.81, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %7.56, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %2.38, 8.64-10 µm arası partikül oranı %0.65 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %4.01 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %83.64 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %16.4 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm boyutlarındaki daha küçük partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda

partikül meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.62. PA6-16EPDM ve %15 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

PA6-16EPDM kompoziti ile %20 oranında Cam Bilye katkılı PA6 kompozitlerin partikül miktarı, dağılımı ve morfolojilerini gösteren Şekil 5.63 incelendiğinde, 3.18-4.55 µm boyutlarındaki partikül miktarı toplam partikül sayısının %73.83 'ünü oluştururken 4.55-5.91 µm arası partiküller %8.21, 5.91-7.27 µm arası partikül oranı %6.85, 7.27-8.64 µm arası partikül oranı %2.89, 8.64-10 µm arası partikül oranı %1.24 ve 10 µm üzeri partikül boyutu oranı %6.92 olduğu görülmüştür. Toplam partikül miktarına bakıldığında matris yüzeyi %82.57 alanı oluştururken silisyum içerikli partiküller %17.43 oranında saptanmıştır. Bu veriler ve dağılım görüntüleme değerlendirildiğinde aşınma sonrası Cam bilyelerin 3-4.5 µm boyutlarındaki daha küçük partiküllere ayrılmasıyla daha fazla sayıda partikül meydana geldiği görülmektedir.



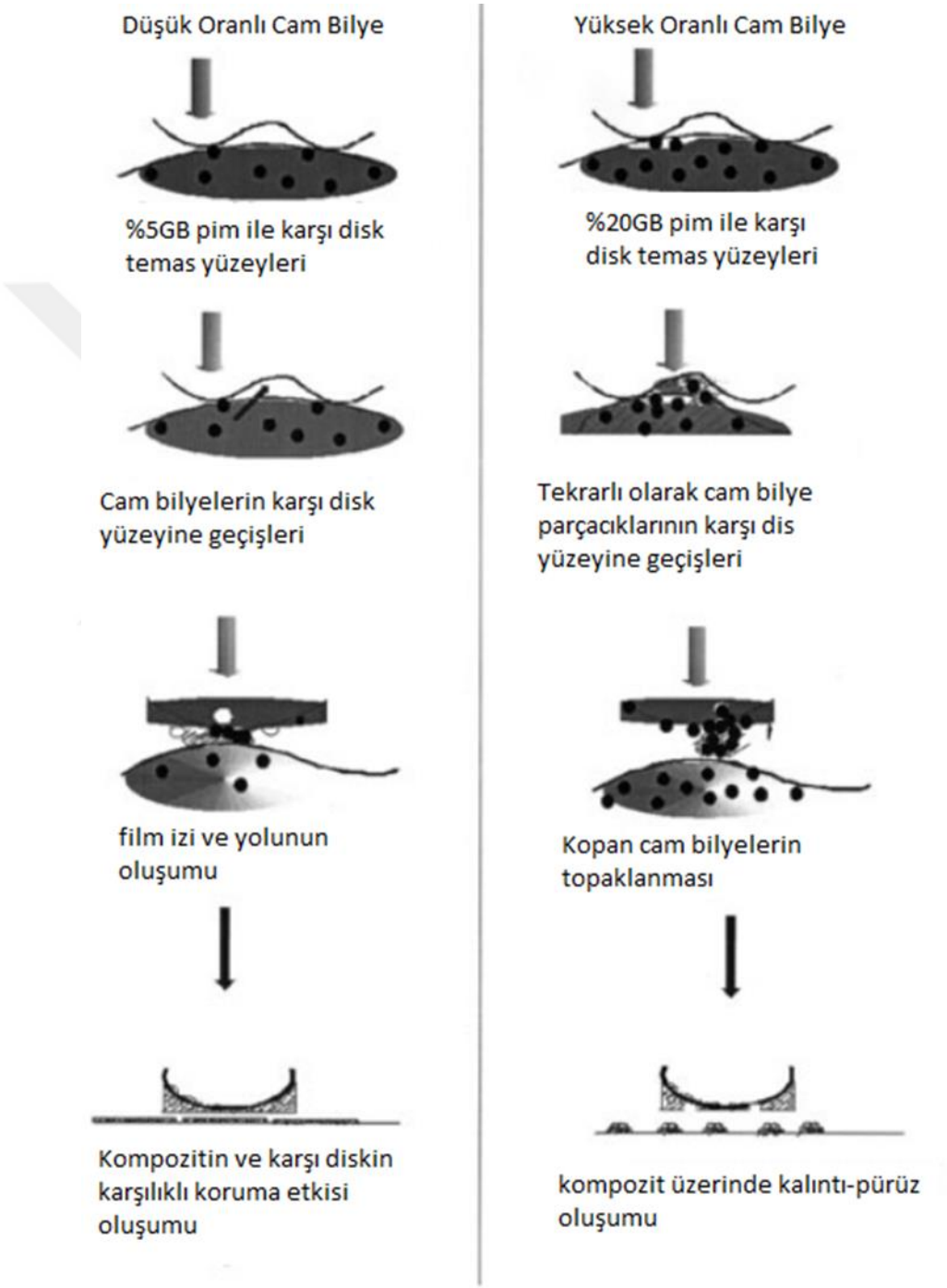
Şekil 5.63. PA6-16EPDM ve %20 Cam Bilye Katkılı Kompozitlerinin Partikül dağılım Histogramları

Gumay M. Ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada pvc polimerine ilave ettikleri %5, %10, %20 cam bilye oranıyla sürtünme katsayısı değerlerinde azalma olduğunu göstermişlerdir[106].

PA6 polimerinin ve PA6-EPDM kompozitlerine ilave edilen seramik silica esaslı cam bilyelar karşı disk olan cam bilye ile aşınmaya karşı yüksek aşınma direnci ve bir nevi kaygan bir zemin meydana getirmiştir[107]. Yapılan bir çalışmada Partikül boyutunun azalmasıyla sürtünme katsayısının yükseldiği gösterilmiştir[108]. Garcia ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada %2 ve %14 SiO2 katkılı PA6 kompozitlerinde %2 oranındaki katkı ile çok düşük sürtünme katsayısı elde ederken %14 katkılı olanda neredeyse Saf haldeki PA6 ile aynı değerleri vermiştir. Bu durumu, düşük sürtünme katsayısına sebep olan transfer film tabakasının %14 oranındaki silisyumunun aşınma esnasında matristen koparak veya daha ufak parçalar haline gelip birikip kümelenerek karşı diskte düzensiz biçimde kirlilik oluşturarak sürtünme katsayısının artmasına sebep olması ile açıklamışlardır[109].

You ve arkadaşları çalışmalarında kullandıkları PA6 polimerine %0-25 aralığında ekledikleri cam elyaf ile sürtünme katsayısının %15 oranından sonra %20 ve %25 oranındaki cam elyaf katkısız halini bile geçecek kadar sürtünme katsayısında artış olduğu rapor etmişlerdir[110].

Vikram ve arkadaşları yaptıkları çalışmada PA6 polimerine %5/%10/%20 oranlarında Cam elyaf ekleyerek aşınma özelliklerini incelediklerinde en iyi sürtünme katsayısı değerini %5 katkılı olanında almışlar ve %10 ve %20 oranındaki katkılarda daha yüksek değerler elde etmişlerdir[111].



Şekil 5.64. %5 ağırlıkça (sol) ve %20 ağırlıkça (sağ) Cam Bilye kullanıldığında film oluşumunun şeması ve önerilen mekanizması[112].

V. Soldi ve arkadaşları, %20 EPDM-g-MA katkılı poliamiddeki en zayıf ve en güçlü C-N ve -C(O)-NH bağlarının kopmasının karışımda aynı anda ve sıcaklıkta gerçekleştiği sonucuna varmışlardır; bu da karışımdaki poliamidin termal kararlılığında saf malzemeye kıyasla bir azalma olduğunu bu da termal kararlılıktaki azalmadan %20 EPDM-g-MA'nın varlığının sorumlu olduğunu belirtmişlerdirdir[83]. Tribolojik analizlerde gözlemlediğimiz sert rijit cam bilye parçalarının sürtünmesiyle artan ısı ve EPDM ilavesiyle azalan ısıl kararlılık nedeniyle artan cam bilye oranıyla sürtünme katsayısında artış görülmüştür. Tüm yapılan deneyler ve sonuçları literatürdeki çalışma ve sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde %5 gibi düşük oranlardaki cam bilye ilavesinde sürtünme katsayısnın azaldığı fakat artan cam bilye oranıyla Şekil 25'de şema ile gösterildiği üzere kompozit matrisinden kopan cam bilyelerin karşı dik ile kompozit ara yüzeyinde aglomere topaklanmaya sebeb olduğu ve bu yüzden sürtünmeyi azaltan film tabakasının oluşumunu engelleyerek kompozit yüzeyinde daha fazla kalıntı ve pürüzler oluşturarak sürtünme katsayısını artırdığı görülmüştür.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler aşağıda sıralanmıştır.

- PA-EPDM malzemesine ilave edilen %5, %10, %15 ve %20 oranlarındaki cam bilye ile Shore D Sertlik değerlerinin tüm kompozitlerde artış göstermişitir. En yüksek artışı %20 cam bilye katkısında görülmektedir.
- PA-EPDM kompozitine %5, %10, %15 ve %20 oranlarındaki cam bilye ilavesiyle Çekme mukavemeti değerleri tüm kompozitlerde artış göstermişitir. En yüksek artışı %20 cam bilye katkısında görülmektedir.
- %5, %10, %15 ve %20 oranlarında cam bilye ilave edilen PA6-8EPDM kompozitinin elastikiyet modülu değerleri tüm kompozitlerde artış göstermişitir. En yüksek artışı %20 cam bilye katkısında görülmektedir.
- PA-EPDM kompozitine ilave edilen cam bilyenın kopma uzaması değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Bu artan cam bilye oranına göre tüm kompozitlerde azalma göstermişitir. En yüksek azalma %20 cam bilye katkısında görülmektedir.
- Benzer olarak %5, %10, %15 ve %20 oranlarında cam bilye ilave edilmesiyle PA-EPDM kompozitinin darbe değerleri azalma göstermiştir. En yüksek azalma %20 cam bilye katkısında görülmektedir.
- Taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden cam bilyenın kompozit matrisi içinde hem homojen hem de iyi bir ara yüzey yapışması göstermiştir.
- Cam Bilye oranı artması ile PA6-EPDM kompozitinin kırılganlığını artmıştır.
- PA-EPDM kompozitine ilave edilen cam bilyenın sürtünme katsayısı değerlerini katkısız PA6 polimerine kıyasla düşürdüğü görülmüştür. Bu %5, %10, %15 ve %20 oranlarında artan cam bilye oranına göre tüm kompozitlerde artış göstermişitir. En yüksek azalma %5 cam bilye katkısında görülmektedir.
- Sürtünme katsayısının düşmesi EPDM ve cam bilyenın kayma mekanizmalarını kolaylaştırarak aşınma direncini yükselttiğini taramalı elektron mikroskobu ve optik profilometre ile elde edilen 2 boyutlu ve 3 boyutlu görüntüleme ile desteklenmiştir.
- Bütün mekanik ve aşınma özelliklerinin gelişmesinde önemli katkı sağladığını

düşündüğümüz cam bilye katkısının homojen dağılımı taramalı elektron mikroskobu ve optik profilometre ile elde edilen 2 boyutlu ve 3 boyutlu görüntüleme ile ispatlanmıştır.

- Deneylerin sonuçları, kompozit malzemelerin çekme mukavemeti, çekme modülü, sertlik değerlerinin artan cam bilye oranı ile arttığını göstermiştir. Darbe dayanımı ve kopma uzaması ve sürtünme katsayısı değerleri ise artan cam bilye oranı ile katkısız PA6 polimerine kıyasla düşürdüğü görülmüştür.

Yapılan çalışma sonucunda aşağıda belirtilen öneriler doğrultusunda çalışma geliştirilebilir.

- Eklenen cam bilye ve EPDM kauçuk oranları değiştirilerek mekanik, tribolojik ve termal özellikleri incelenebilir.
- Matris içerisine ilave edilen Cam bilye ile matris ana yapısı arasındaki yapışmayı kuvvetlendiren ajanların etkisi incelenebilir.
- EPDM ve cam bilyenin hava şartları etkisine karşı yıpranma direncini arttırıcı etkileri laboratuvar cihazları ile incelenebilir.
- Bu çalışmada kullanılmayan DMA, TMA gibi farklı analiz yöntemleri kullanılarak termal davranışları incelenebilir.
- Cam bilye yapısının ve EPDM katkısının kompozitin empedans özelliklerine etkileri incelenebilir.
- Tribolojik davranışları farklı yük, kayma hızı ve mesafeler ile daha detaylı incelenebilir.

7. KAYNAKLAR

[1] I. Uygur, "Influence of particle sizes and volume fractions on fatigue crack growth rates of aerospace Al-Alloys composites,", *Archives of Metallurgy and Materials*, ss. 337–341, 2024.

[2] I. Uygur, A. Cicek, E. Toklu, R. Kara ve S. Saridemir, "Fatigue life predictions of metal matrix composites using artificial neural networks,", *Archives of Metallurgy and Materials*, c. 59, sayı 1, ss. 97–103, 2014.

[3] I. Uygur, "Notch behavior and fatigue life predictions of discontinuously reinforced MMCs,", *Archives of Metallurgy and Materials*, c. 56, sayı 1, 2011.

[4] I. Uygur, W. J. Ewans, M. Bache ve B. Gulenc, "The fatigue behaviour of SiC particulate reinforced 2124 aluminium matrix composites,", *Metallofizıka I Noveıshıe Tekhnologıı*, c. 26, sayı 7, ss. 927–939, 2004.

[5] I. Uygur, "Tensile behaviour of P/M processed (Al-Cu-Mg-Mn) / SiCp composites,", *Iranian Journal of Science ve Technology*, c. B28, sayı B2, ss. 239–248, 2004.

[6] I. Uygur, "Environmentally assisted fatigue response of Al-Cu-Mg-Mn with SiC particulate metal matrix composites," Ph.D. thesis, University of Wales, Swansea, U.K, 1999.

[7] Anonim, (2025, 14 Mart). [Online]. Erişim: https://www.britannica.com/science/polymer/Synthetic-polymers.

[8] Anonim, (2025, 14 Mart). [Online]. Erişim: https://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyamides.html.

[9] L. Zheng, M. Wang, Y. Li, Y. Xiong ve C. Wu, "Recycling and degradation of polyamides,", *Molecules*, c. 29, sayı 8, s. 1742, 2024.

[10] H. Ünal, K. Ermis ve F. Ünal, "Investigating the mechanical performance of nylon 66/glass bead composites", *Journal of Engineering Research and Applied Science*, c. 12 (1), ss 2239-2245, 2023.

[11] H. Demirer, İ. Kartal, K. Ünlü ve K. Büyükkaya, "Investigation of mechanical and thermal properties of waste EPDM and polypropylene mixtures,", *Acta Physica Polonica A*, c. 134, sayı 1, ss. 257–259, 2018.

[12] H. Ünal, S. H. Yetgin, A. Kastan, K. Ermis, ve V. F. Unal, "Improving the specific wear rate and coefficient of friction of polyamide 6 polymer and its composite by adding wax under self-operation conditions", *Materwiss Werksttech*, c. 54, sayı 10, ss. 1249-1260, 2023.

[13] M. T. Demirci ve H. Düzcükoğlu, "Wear behaviors of polytetrafluoroethylene and glass fiber reinforced polyamide 66 journal bearings", *Materials ve Design*, c. 57, ss. 560-567, 2014.

[14] Z. Liang, R. K. Y. Li, ve S. C. Tjong, "Effects of glass bead content and surface treatment on viscoelasticity of filled polypropylene/elastomer hybrid composites", *Polymer International*, c. 48, sayı 11, ss. 1068-1072, 1999.

[15] Z. Liang ve R. K. Y. Li, "Effect of filler content and surface treatment on the tensile properties of glass-bead-filled polypropylene composites", *Polymer International*, c. 49, sayı 2, ss. 170-174, 2000.

[16] D. L. Faulkner ve L. R. Schmidt, "Glass bead-filled polypropylene part I: Rheological and mechanical properties", *Polymer Engineering ve Science*, c. 17, sayı 9, ss. 657-665, 1977.

[17] Sumita, T. Ookuma, K. Miyasaka, ve K. Ishikawa, "Effect of ultra fine particles on the elastic properties of oriented polypropylene composites", *Journal of Materials Science*, c. 17, sayı 10, ss. 2869-2877, 1982.

[18] S. Kumar ve K. Panneerselvam, "Two-body abrasive wear behavior of nylon 6 and glass fiber reinforced (GFR) nylon 6 composite", *Procedia Technology*, c. 25, ss. 1129-1136, 2016.

[19] Sumita, Y. Tsukumo, K. Miyasaka, ve K. Ishikawa, "Tensile yield stress of polypropylene composites filled with ultrafine particles", *Journal of Materials Science*, c. 18, sayı 6, ss. 1758-1764, 1983.

[20] Sumita, H. Tsukihi, K. Miyasaka, ve K. Ishikawa, "Dynamic mechanical properties of polypropylene composites filled with ultrafine particles", *Journal of Applied Polymer Science*, c. 29, sayı 5, ss. 1523-1530, 1984.

[21] Shibata, T. Yamaguchi, ve K. Hokkirigawa, "Tribological behavior of polyamide 66/rice bran ceramics and polyamide 66/glass bead composites", *Wear*, c. 317, sayı 1-2, ss. 1-7, 2014.

[22] Y. Kawai, M. Abe, M. Maki, K. Suzuki, ve M. Hoshino, "Glass-fiber reinforced polypropylene resin composition", *US Patent*, US 4 663 369, 1987.

[23] Gamze Karsli, T. Yilmaz, A. Aytac, ve G. Ozkoc, "Investigation of erosive wear behavior and physical properties of SGF and/or calcite reinforced ABS/PA6 composites", *Composites Part B: Engineering*, c. 44, sayı 1, ss. 385-393, 2013.

[24] A. Meddad ve B. Fisa, "A model for filler matrix debonding in glass-bead-filled viscoelastic polymers", *Journal of Applied Polymer Science*, c. 65, sayı 10, ss. 2013-2024, 1997.

[25] Y. Hao, S. Liu, ve G. Liu, "A novel method for exploring the wear resistance characteristics of ethylene propylene diene monomers-polyamide elastomers with nano-graphite", *Journal of Applied Polymer Science*, c. 141, sayı 14, 2024.

[26] F. Stricker, M. Bruch, ve R. Mülhaupt, "Mechanical and thermal properties of syndiotactic polypropene filled with glass beads and talcum", *Polymer*, c. 38, sayı 21, ss. 5347-5353, 1997.

[27] B. A. Sjögren ve L. A. Berglund, "Failure mechanisms in polypropylene with glass beads", *Polymer Composites*, c. 18, sayı 1, ss. 1-8, 1997.

[28] E. Asp, B. A. Sjögren, ve L. A. Berglund, "Prediction of failure initiation in polypropylene with glass beads", *Polymer Composites*, c. 18, sayı 1, ss. 9-15, 1997.

[29] Z. Liang ve R. K. Y. Li, "Mechanical properties and morphology of glass bead–filled polypropylene composites", *Polymer Composites*, c. 19, sayı 6, ss. 698-703, 1998.

[30] Z. Liang ve R. K. Y. Li, "Brittle–ductile transition in polypropylene filled with glass beads", *Polymer*, c. 40, sayı 11, ss. 3191-3195, 1999.

[31] Z. Liang, "Melt flow properties of polypropylene/EPDM/glass bead ternary composites", *Journal of Materials Science*, c. 40, sayı 2, ss. 329-333, 2005.

[32] Z. Liang, "The melt elastic behavior of polypropylene/glass bead composites in capillary flow", *Polymer Testing*, c. 21, sayı 8, ss. 927-931, 2002.

[33] W. Kwok, Z. M. Gao, C. L. Choy, ve X. G. Zhu, "Stiffness and toughness of polypropylene/glass bead composites", *Polymer Composites*, c. 24, sayı 1, ss. 53-59, 2003.

[34] I. L. Dubnikova, S. M. Berezina, ve A. V. Antonov, "Effect of rigid particle size on the toughness of filled polypropylene", *Journal of Applied Polymer Science*, c. 94, sayı 5, ss. 1917-1926, 2004.

[35] Yuan, W. Jiang, L. An, ve R. K. Y. Li, "The mechanical and thermal behaviors of glass bead filled polypropylene", *Polymers for Advanced Technologies*, c. 15, sayı 7, ss. 409-413, 2004.

[36] Yuan, W. Jiang, L. An, J. D. C. Christiansen, ve R. K. Y. Li, "Competing effect between filled glass bead and induced β crystal on the tensile properties of polypropylene/glass bead blends", *Journal of Applied Polymer Science*, c. 96, sayı 5, ss. 1729-1733, 2005.

[37] Yuan, W. Jiang, L. An, ve R. K. Y. Li, "Effects of filler size and heat treatment on the crystallization behavior of glass bead-filled polypropylene", *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, c. 43, sayı 3, ss. 306-313, 2005.

[38] W. Yang, Z. Y. Liu, G. F. Shan, Z. M. Li, B. H. Xie, ve M. B. Yang, "Study on the melt flow behavior of glass bead filled polypropylene", *Polymer Testing*, c. 24, sayı 4, ss. 490-497, 2005.

[39] H. Demirer, İ. Kartal, K. Ünlü, ve K. Büyükkaya, "Investigation of mechanical and thermal properties of waste EPDM and polypropylene mixtures", *Acta Physica Polonica A*, c. 134, sayı 1, ss. 257-259, 2018.

[40] E. H. Merz, G. C. Claver, ve M. Baer, "Studies on heterogeneous polymeric systems", *Journal of Polymer Science*, c. 22, sayı 101, ss. 325-341, 1956.

[41] Kunz-Douglass, P. W. R. Beaumont, ve M. F. Ashby, "A model for the toughness of epoxy-rubber particulate composites", *Journal of Materials Science*, c. 15, sayı 5, ss. 1109-1123, 1980.

[42] A. J. Kinloch ve R. J. Young, *Fracture Behaviour of Polymers*, Dordrecht, Netherlands: Springer, 1995.

[43] Y. Hobbs, R. C. Bopp, ve V. H. Watkins, "Toughened nylon resins", *Polymer Engineering ve Science*, c. 23, sayı 7, ss. 380-389, 1983.

[44] R. J. M. Borggreve, R. J. Gaymans, J. Schuijer, ve J. F. I. Housz, "Brittle-tough transition in nylon-rubber blends: effect of rubber concentration and particle size", *Polymer*, c. 28, sayı 9, ss. 1489-1496, 1987.

[45] X. Liu vd., "EPDM/polyamide TPV compatibilized by chlorinated polyethylene", *Polymer Testing*, c. 22, sayı 1, 2003.

[46] A. R. Caramitu vd., "Study regarding mechanical, thermal and structural properties of some elastomeric polyamide blends destined to cable insulating", *2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering, ISFEE 2014, IEEE, 2015*, ss. 1-6.

[47] H. Ünal, K. Ermis, ve S. Demirtas, "Determination of mechanical performance and microstructural properties of ethylene-1-octene copolymer (EOC) elastomer and glass beads (GB) filled polypropylene (PP) composites", *Journal of Materials and Mechatronics: A*, c. 3, sayı 1, ss. 91-105, 2022.

[48] A. Akçakale, "NR/SBR tipi elastomer esaslı ayakkabı taban malzemelerinin mekaniksel özelliklerine bazı dolgu maddelerinin etkilerinin incelenmesi", Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2008.

[49] H. Ünal, S. H. Yetgin, ve B. Özsarikaya, "Cam elyaf, cam bilye ve EPDM katkılı poliamit-6 hibrit kompozitlerin mekanik performanslarının belirlenmesi", *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, c. 12, sayı 1, ss. 274-284, 2022.

[50] H. Ünal ve A. Mimaroglu, "Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites under dry sliding conditions", *Wear*, c. 289, ss. 132-137, 2012.

[51] E. Ghorbel, I. Hadriche, G. Casalino, ve N. Masmoudi, "Characterization of thermo-mechanical and fracture behaviors of thermoplastic polymers", *Materials*, c. 7, sayı 1, ss. 375-398, 2014.

[52] S. Kumar, S. N. Maiti, ve B. K. Satapathy, "Super-toughening polyamide-612 by controlling dispersed phase domain size: Essential work of fracture assessment", *Materials ve Design*, c. 62, ss. 382-391, 2014.

[53] H. Ünal, S. H. Yetgin, ve V. F. Ünal, "Cam elyaf/EPDM/poliamit-6 kompozitlerin mekanik performansının ve mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesi", *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 5, sayı 3, ss. 1216-1229, 2022.

[54] I. Ksouri, O. De Almeida, ve N. Haddar, "Long term ageing of polyamide 6 and polyamide 6 reinforced with 30% of glass fibers: physicochemical, mechanical and morphological characterization", *Journal of Polymer Research*, c. 24, sayı 8, ss. 1-12, 2017.

[55] R. Petrucci ve L. Torre, "Filled polymer composites", *Modification of Polymer Properties*, Cambridge, United Kingdom, Elsevier, 2017, böl. 2, ss. 23-46, 2017.

[56] R. M. Wang, S. R. Zheng, and Y. G. Zheng, *Polymer Matrix Composites and Technology*, Sawston, United Kingdom, Woodhead Publishing, 2011.

[57] H. Pereira, "Surface, thermal and other properties", Cork, ss. 227-239, 2007.

[58] Balkan, "Popropilen kompozitlerin termoplastik elastomerler ile modifikasyonlarının mekanik özelliklerine etkisi", Doktora Tezi, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, Türkiye, İstanbul, 2006.

[59] S. Selim, S. A. El-Safty, M. A. Shenashen, ve A. Elmarakbi, "Advances in polymer/inorganic nanocomposite fabrics for lightweight and high-strength armor and ballistic-proof materials", *Chemical Engineering Journal*, c. 493, s. 152422, 2024.

[60] C. DeArmitt, "Functional fillers for plastics", *Applied Plastics Engineering Handbook*, Cambridge, United Kingdom, Elsevier, böl. 26, ss. 455-468, 2011.

[61] Zhu vd., "Additive manufacturing low shrinkage Si-based composite ceramics with SiCO microsphere/polyvinyl silicon acetylene slurry", *Journal of the European Ceramic Society*, c. 42, sayı 15, ss. 6925-6934, 2022.

[62] A. Dorigato ve G. Fredi, "Effect of nanofillers addition on the compatibilization of polymer blends", *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, c. 7, sayı 4, ss. 405-427, 2022.

[63] F. Ma vd., "Toughening of polyamide 6 with β-nucleated thermoplastic vulcanizates based on polypropylene/ethylene-propylene-diene rubber grafted with maleic anhydride blends", *Materials and Design*, c. 33, sayı 1, ss. 104-110, 2012.

[64] A. M. Razavizadeh ve R. Niazmand, "Characterization of polyamide-6/ propolis blended electrospun fibers", *Heliyon*, c. 6, sayı 8, s. e04784, 2020.

[65] H. Ünal ve A. Mimaroglu, "Evaluation of morphological characteristics and mechanical performance of Rockforce mineral fiber- and glass fiber-reinforced polyamide-6 composites", *Science and Engineering of Composite Materials*, c. 21, sayı 3, ss. 323-328, 2014.

[66] D. Tomova, J. Kressler, ve H. J. Radusch, "Phase behaviour in ternary polyamide 6/polyamide 66/elastomer blends", *Polymer*, c. 41, sayı 21, ss. 7773-7783, 2000.

[67] Anonim, "Solid glass beads offer major benefits for polyamide compounds", *Plastics, Additives and Compounding*, c. 4, sayı 6, ss. 32-33, 2002.

[68] H. Ünal ve K. Ermiş, "Determination of mechanical performance of glass fiber reinforced and elastomer filled polyamide 6 composites", *International Advanced Researches and Engineering Journal*, c. 5, sayı 3, ss. 405-411 2021.

[69] A. Gadelmoula ve S. A. Aldahash, "Tribological properties of glass bead-filled polyamide 12 composite manufactured by selective laser sintering", *Polymers*, Vol. 15, Page 1268, c. 15, sayı 5, s. 1268, 2023.

[70] B. Gültürk ve H. Berber, "Effects of mechanical recycling on the properties of glass fiber-reinforced polyamide 66 composites in automotive components", *E-Polymers*, c. 23, sayı 1, 2023.

[71] H. Ünal ve S.H.Yetgin, "Reinforced polyamide-6 composites for use in bearing applications", *TURAN-SAM Uluslararası Bilimsel Hakemli Dergisi*, c. 13, sayı 52, ss. 43-47, 2021.

[72] E. Kuram, "Synergistic effect of glass bead and glass fiber on the crystalline structure, thermal stability, and mechanical, rheological, and morphological properties of polyamide 6 composites", *Journal of Composite Materials*, c. 56, sayı 3, ss. 441-453, 2022.

[73] Petousis vd., "The impact of the glass microparticles features on the engineering response of isotactic polypropylene in material extrusion 3D printing", *Materials Today Communications*, c. 37, s. 107204, 2023.

[74] B. Patel, S. Pardhi, Chopara, ve M. Pal, "Lightweight composite materials for automotive-a review", *International Research Journal of Engineering and Technology*, s. 41, 2008.

[75] Karger-Kocsis, "Glass mat reinforced thermoplastic polypropylene", *Polymer Science and Technology Series*, c. 2, ss. 284-290, 1999.

[76] S. Rjafiallah ve S. Guessasma, "Three-phase model and digital image correlation to assess the interphase effect on the elasticity of carbohydrate polymer-based composites reinforced with glass–silica beads", *Carbohydrate Polymers*, c. 83, sy 1, ss. 246-256, 2011.

[77] J.-Z. Liang, "Impact fracture toughness of hollow glass bead-filled polypropylene composites", *Journal of Materials Science*, c. 42, sy 3, ss. 841-846, 2007.

[78] H. Ünal, K. Ermis, ve V. F. Unal, "Investigating the mechanical performance of nylon 66 / glass bead composites", *Journal of Engineering Research and Applied Science*, c. 12, sy 1, ss. 2239-2245, 2023.

[79] Guttmann ve G. Pilz, "Fibre-reinforced polyamides and the influence of water absorption on the mechanical and thermomechanical behaviour", *Deformation and Fracture Behaviour of Polymer Materials*, Cham, Germany, Springer International Publishing, ss. 377-388, 2017.

[80] H. Ünal, K. Ermiş, ve Ş. Demirtaş, "Investigation of mechanical and microstructural properties of polyolefin rubber and glass beads filled polypropylene composites", *Journal of Materials and Mechatronics: A*, c. 3, sy 1, ss. 91-105, 2022.

[81] R. J. M. Borggreve vd., "Brittle-tough transition in nylon-rubber blends: effect of rubber concentration and particle size", *Polymer*, c. 28, sy 9, ss. 1489-1496, 1987.

[82] S. C. Tjong ve Y. C. Ke, "Fracture toughening behavior of elastomer modified polyphenylene ether/polyamide blends", *European Polymer Journal*, c. 34, sy 11, ss. 1565-1570, 1998.

[83] C. Kontaxis, F. K. Kozaniti, ve G. C. Papanicolaou, "Mechanical behavior modelling and filler geometry effect of glass filler reinforced starch-epoxy hybrid matrix composites", *Materials*, c. 14, sy 21, s. 6587, 2021.

[84] Shirvanimoghaddam vd., "Balancing the toughness and strength in polypropylene composites", *Composites Part B: Engineering*, c. 223, s. 109121, 2021.

[85] I. Ksouri ve N. Haddar, "Long term ageing of polyamide 6 and polyamide 6 reinforced with 30% of glass fibers: temperature effect", *Journal of Polymer Research*, c. 25, sy 7, ss. 1-12, 2018.

[86] Z. Blackman vd., "Sustainable basalt fiber reinforced polyamide 6,6 composites: Effects of fiber length and fiber content on mechanical performance", *Composites Part C: Open Access*, c. 14, s. 100495, 2024.

[87] D. Mann, J. C. Van den Bos, ve A. Way, "Plastics and reinforcements used in automobile construction", içinde *Automotive Plastics and Composites*, Elsevier, 1999, ss. 25-60.

[88] H. Ünal, K. Ermiş ve S. Demirtas, "View of Determination of Mechanical Performance and Microstructural Properties of Ethylene-1-Octene Copolymer (EOC) Elastomer and Glass Beads (GB) Filled Polypropylene (PP) Composites", *Journal of Engineering Research and Applied Science*, c. 11, sy 1, ss. 1954-1966, 2022.

[89] K. Gohatre vd., "Study on thermal, mechanical and morphological properties of recycled poly(vinyl chloride)/fly ash composites", *Polymer International*, c. 69, sy 6, ss. 552-563, 2020.

[90] Khoshnoud ve N. Abu-Zahra, "Properties of rigid polyvinyl chloride foam composites reinforced with different shape fillers", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, c. 30, sy 11, ss. 1541-1559, 2017.

[91] Shirvanimoghaddam vd., "Strategies to resolve intrinsic conflicts between strength and toughness in polyethylene composites", *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, c. 7, sy 2, ss. 151-181, 2024.

[92] Celina vd., "FTIR emission spectroscopy applied to polymer degradation", *Polymer Degradation and Stability*, c. 58, sy 1-2, ss. 15-31, 1997.

[93] N. Darie vd., "On the compatibility of the IPP/PA6/EPDM blends with and without functionalized IPP I. Thermo-oxidative behaviour", *Polymer Degradation and Stability*, c. 80, sy 3, ss. 551-566, 2003.

[94] I. Vieira vd., "Effects of maleated ethylene propylene diene rubber (EPDM) on the thermal stability of pure polyamides, and polyamide/EPDM and polyamide/poly(ethylene terephthalate) blends: kinetic parameters and reaction mechanism", *Polymer Degradation and Stability*, c. 74, sy 1, ss. 151-157, 2001.

[95] N. Kumar, A. Rajadurai, ve T. Muthuramalingam, "Thermal and mechanical behaviour of sub micron sized fly ash reinforced polyester resin composite", *Materials Research Express*, c. 5, sy 4, s. 045303, 2018.

[96] Saylan, H. Ünal, ve S. H. Yetgin, "Cam elyaf takviyeli poli-amit 6 kompozitler ile poliamit-6 polimerinin %30 cam elyaf takviyeli poli-amit 6 kompozitine karşı aşınma ve sürtünme davranışları", *Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik*, c. 26, sy 76, ss. 148-155, 2024.

[97] H. Ünal ve S. H. Yetgin, "Vollastonit ve kaolin katkılı poliamid-6 esaslı kompozitlerin mekanik ve tribolojik performanslarının belirlenmesi", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 22, sy 2, ss. 617-627, 2020.

[98] Rahaman, "Superior mechanical, electrical, dielectric, and EMI shielding properties of ethylene propylene diene monomer (EPDM) based carbon black composites", *RSC Advances*, c. 13, sy 36, ss. 25443-25458, 2023.

[99] H. C. Y. Cartledge ve C. A. Baillie, "Effects of crystallinity, transcrystallinity and crystal phases of GF/PA on friction and wear mechanisms", *Journal of Materıals Science*, c. 37, ss. 3005-3022, 2002.

[100] S. Khan vd., "Friction and wear behaviour of electron beam modified PTFE filled EPDM compounds", *Wear*, c. 266, sy 1-2, ss. 175-183, 2009.

[101] F. Yıldırım, M. Aydın, ve H. Yetgin, "Tribological Properties of PPS/PA46 Polymer Blends", *Research on Engineering Structures and Materials*, c. 6, sy 3, ss. 271-282, 2020.

[102] D. X. Li vd., "Tribological properties of solid lubricants filled glass fiber reinforced polyamide 6 composites", *Materials ve Design*, c. 46, ss. 809-815, 2013.

[103] H. Ünal, T. Saylan, ve A. Mimaroglu, "Thermal, mechanical and tribological performance of polymer composites rubbed against polymer composites in

application in electrical contact breakers", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, c. 228, sy 6, ss. 608-615, 2014.

[104] Y. Guo vd., "Improving the friction and abrasion properties of nitrile rubber hybrid with hollow glass beads", *Tribology International*, c. 101, ss. 122-130, 2016.

[105] D. M. Laura vd., "Effect of rubber particle size and rubber type on the mechanical properties of glass fiber reinforced, rubber-toughened nylon 6", *Polymer*, c. 44, sy 11, ss. 3347-3361, 2003.

[106] E. V. Prut, D. V. Solomatin, ve O. P. Kuznetsova, "Rheological behaviors of blends based on polypropylene and EPDM rubber powder", *Mendeleev Communications*, c. 27, sy 3, ss. 318-320, 2017.

[107] M. A. Khaled vd., "Effect of carbon black on the electrical and creep characteristics of EPDM rubber", *Materials Letters*, c. 19, sy 5-6, ss. 325-328, 1994.

[108] M. I. S. Chowdhury vd., "Polymer nanocomposites for automotive applications", *Advanced Polymer Nanocomposites: Science, Technology and Applications*, ss. 267-317, 2022.

[109] Huang vd., "Mechanical and thermal properties of glass bead–filled nylon-6", *Journal of Applied Polymer Science*, c. 94, sy 5, ss. 1885-1890, 2004.

[110] R. Demirsöz vd., "Evaluation of the mechanical properties and drilling of glass bead/fiber-reinforced polyamide 66 (PA66)-based hybrid polymer composites", *Materials*, c. 15, sy 8, s. 2765, 2022.

[111] H. Ünal ve A. Mimaroglu, "Mechanical and morphological properties of mica and short glass fiber reinforced polyamide 6 composites", *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, c. 61, sy 11, ss. 834-846, 2012.

[112] H. Ünal, S. H. Yetgin, ve B. Özsarıkaya, "Cam elyaf, cam bilye ve EPDM katkılı poliamit-6 hibrit kompozitlerin mekanik performanslarının belirlenmesi", *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, c. 12, sy 1, ss. 274-284, 2022.

[113] H. Ünal, S. H. Yetgin, ve V. F. Ünal, "Cam Bilye Katkılı Poliamit 6.6 Kompozitlerin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Cam Bilye Katkı Oranının

Etkisi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 11, sy 1, ss. 157-169, 2023.

[114] Tomar ve S. N. Maiti, "Mechanical properties of mica-filled PBT/ABAS composites", *Journal of Applied Polymer Science*, c. 117, sy 2, ss. 672-681, 2010.

[115] Anonymous, "Solid glass beads offer major benefits for polyamide compounds", *Plastics, Additives and Compounding*, c. 4, sy 6, ss. 32-33, 2002.

[116] Anonymous, "Glass beads offer surface, processing and mechanical improvements", *Additives for Polymers*, c. 2002, sy 7, ss. 3-4, 2002.

[117] Ermis, H. Unal, ve M. Gunay, "Glass bead effects on tribological and mechanical properties of plasticized polyvinyl chloride cable used in vehicles as a filler", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, c. 235, sy 11, ss. 2432-2439, 2021.

[118] H. Yetgin, H. Ünal, ve M. Çolak, "The ınvestıgatıon of trıbologıcal and mechanıcal propertıes of epdm and nanoclay fılled polyproylene composıtes", *TURAN-SAM Uluslararası Bilimsel Hakemli Dergisi*, c. 10, sy 40, ss. 420-427, 2018.

[119] E. Mcelwain vd., "Effect of Particle Size on the Wear Resistance of Alumina-Filled PTFE Micro-and Nanocomposites", *Tribology Transactions*, c. 51, sy 3, ss. 247-253, 2008.

[120] M. García vd., "Friction and wear studies on nylon-6/SiO_2 nanocomposites", *Journal of Applied Polymer Science*, c. 92, sy 3, ss. 1855-1862, 2004.

[121] Y. L. You vd., "Improvement in the tribological properties of polyamide 6", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, c. 29, sy 4, ss. 494-507, 2016.

[122] K. Vikram, S. Pramanik, ve S. Bhaumik, "Thermal kinetic, mechanical and wear properties of glass fiber reinforced polyamide 6 thermoplastic composites", *Journal of Applied Polymer Science*, c. 141, sy 42, s. e56119, 2024.

[123] M. García vd., "Polyamide-6/Silica Nanocomposites", *Advanced Engineering Materials*, c. 6, sy 9, ss. 724-729, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İrfan AKGÜL

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Doktora	Kompozit Malzeme Teknolojileri	Düzce Üniversitesi	2025
Y. Lisans	Metal Eğitimi	Karabük Üniversitesi	2011
Lisans	Metal Öğretmenliği	Zonduldak Karaelmas Üniversitesi	2007
Lise	Elektrik Bölümü	Fatih Teknik Lisesi	2002

Tezden Çıkan YAYINLAR

- Akgül, İ., Apay S. & Ünal, H., The Evaluation Of The Effect Of Thermoplastic Elastomers On The Mechanical Properties And The Microstructural Changes Of A Nylon Composite Reinforced By Glass Beads, *12th International Istanbul Scientific Research Congress*, May 29-31, 2024, Istanbul, Turkiye.
- Akgül, İ., Apay S. & Ünal, H., *The Effect Of Thermoplastic Elastomer On The Mechanical Performance And Microstructural Behaviour Of Glass Bead Filled Nylon Composite, 12th International Istanbul Scientific Research Congress*, May 29-31, 2024, Istanbul, Turkiye.