

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YEREL KAYNAKLAR KULLANILARAK POLİ(LAKTİK
ASİT) MATRİSLİ DOĞAL KOMPOZİT MALZEME
GELİŞTİRİLMESİ**

UĞUR DİNÇER

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YEREL KAYNAKLAR KULLANILARAK POLİ(LAKTİK
ASİT) MATRİSLİ DOĞAL KOMPOZİT MALZEME
GELİŞTİRİLMESİ**

UĞUR DİNÇER

Prof. Dr. Taner YILMAZ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Ayşe Şükran DEMİRKİRAN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi
Doç. Dr. Tülin ŞAHİN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 21.01.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Malzeme teknolojisindeki gelişmelerle birlikte polimer esaslı kompozit malzemeler hayatımızın birçok bölümünde geniş kullanım alanı bulmuştur. Bunun yanında çevre bilincinin artması da kullanılan bu plastik malzemelerin doğal ve çevre dostu olması konusunda büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında biyo-bozunur bir malzeme olan Poli(laktik asit) polimerinden pomza, borik asit ve bazalt elyaf yerel kaynaklarını kullanarak doğal kompozit malzeme geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmaya 117M547 no.lu TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı-1001 kapsamında sağladığı destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu'na teşekkürlerimi sunarım.

Hali hazırda devam etmekte olan lisansüstü eğitimimin ilk gününden itibaren gerek akademik gerekse kişisel gelişimime olan katkılarıyla ve beni her zaman en iyiyi aramaya cesaretlendiren motivasyonu ile danışman hocam Prof. Dr. Taner YILMAZ'a, danışmanım kadar bilgisini ve tecrübesini benimle paylaşan ayrıca bilimsel araştırma projesinin bir parçası olmam konusunda bana güvenip görev veren değerli hocam Doç. Dr. Nevin Gamze KARSLI YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarında tecrübesini ve yardımlarını eksik etmeyen hocam Doç. Dr. Tülin ŞAHİN ve ekibin en yeni üyesi Mak. Müh. Yahya Gökberk KARTAL'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Ayrıca hem lisans eğitimimde hem de yüksek lisans eğitimimde birçok çalışmayı birlikte tamamladığım, çalışma disiplinine, karakterine ve başarısına her daim güvendiğim yol, takım arkadaşım olan Mak. Yük. Müh. Aytunç Kızıllı'ya bana kazandırdıklarından dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yaz-kış, gece-gündüz demeden, günlerimi adeta evimin bir odası gibi olan laboratuvarlarda birlikte geçirdiğim, aynı ekibin bir parçası olmaktan gurur duyduğum, sıkıntımı, sevincimi paylaştığım ve daha laboratuvara ilk girdiğim günden itibaren bilgisini, fikirlerini ve tecrübesini her zaman benimle paylaşan sayısız anılar biriktirdiğim takım arkadaşım, hocam Arş. Gör. Okan GÜL'e sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Teşekkürlerin en önemlisi, uzun yıllardır evden her ne kadar uzak olsam da her zaman desteklerini hissettiğim, fikirlerimi, isteklerimi hayata geçirmemde bana olan güvenlerini her seferinde hissettiren, ulaştığım ve ulaşacağım tüm başarıların en büyük kahramanları, evlatları olmaktan gurur duyduğum, asla ödeyemeyeceğim emekleri ve özverilerinden dolayı babam Orhan DİNÇER'e, annem Sevda DİNÇER'e ve ayrıca kardeşim Arda DİNÇER'e en kalbi teşekkürlerimi sunarım. İyi ki varsınız.

Ocak - 2020

Uğur DİNÇER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	3
1.1. Kompozit Malzemeler	3
1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ve Özellikleri	3
1.3. Polimer Matrisli Kompozitler	7
1.4. Kompozit Malzemelerde Takviye Modifikasyonu.....	8
1.4.1. Silanlama yöntemi ile takviye yüzeylerinin modifikasyonu.....	9
1.5. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	10
1.5.1. Ekstrüzyon	11
1.5.2. Laboratuvar tipi karıştırıcılar	12
1.5.3. Enjeksiyon yöntemi ile kalıplama.....	13
1.6. Kompozit Malzemelerin Karakterizasyon Yöntemleri	14
1.6.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi analizi (FTIR)	14
1.6.2. Çekme testi	15
1.6.3. Dinamik mekanik analiz (DMA)	16
1.6.4. Termomekanik analiz (TMA)	17
1.6.5. Aşınma testi	17
1.6.6. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC).....	18
1.6.7. Termogravimetrik analiz (TGA).....	19
1.6.8. Boyutsal kararlılık analizi (BKA).....	20
1.6.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	20
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	22
3. MALZEMELER VE YÖNTEM	31
3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	31
3.1.1. Poli(laktik asit).....	31
3.1.2. Pomza.....	32
3.1.3. Borik asit.....	32
3.1.4. Bazalt elyaf	32
3.1.5. Tez kapsamında kullanılan malzemeler ve özellikleri.....	33
3.2. Takviye Malzemelerinin Yüzey Modifikasyonu.....	34
3.2.1. Pomzanın yüzey modifikasyonu	34
3.2.2. Borik asidin yüzey modifikasyonu	37
3.2.3. Bazalt elyafın yüzey modifikasyonu.....	39
3.3. Kompozit Numunelerin Üretilmesi	42
3.3.1. Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin karışım oranları	43

3.4. Kompozitlerin Karakterizasyonu	44
3.4.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR).....	44
3.4.2. Dinamik mekanik analiz	44
3.4.3. Termomekanik analiz	45
3.4.4. Çekme testi	46
3.4.5. Aşınma testi	47
3.4.6. Diferansiyel taramalı kalorimetre	49
3.4.7. Boyutsal kararlılık analizi	50
3.4.8. Termogravimetrik analiz.....	51
3.4.9. Taramalı elektron mikroskobu.....	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	53
4.1. Takviye Malzemelerinin FTIR Analizi Sonuçları.....	53
4.1.1. Pomza partikül yüzeyinin FTIR analizi sonuçları	53
4.1.2. Borik asit partikül yüzeyinin FTIR analizi sonuçları.....	55
4.1.3. Bazalt elyaf yüzeyinin FTIR analizi sonuçları	57
4.2. Dinamik Mekanik Analiz Sonuçları.....	58
4.2.1. Pomza takviyeli kompozitlerin dinamik mekanik analiz sonuçları.....	58
4.2.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin dinamik mekanik analiz sonuçları.....	62
4.2.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin dinamik mekanik analiz sonuçları.....	65
4.2.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin dinamik mekanik analiz sonuçları	67
4.2.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin dinamik mekanik analiz sonuçları	71
4.3. Termomekanik Analiz Sonuçları.....	74
4.3.1. Pomza takviyeli kompozitlerin termomekanik analiz sonuçları.....	74
4.3.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin termomekanik analiz sonuçları.....	76
4.3.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin termomekanik analiz sonuçları.....	77
4.3.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin termomekanik analiz sonuçları	78
4.3.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin termomekanik analiz sonuçları	79
4.4. Çekme Testi Sonuçları	81
4.4.1. Pomza takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçları	81
4.4.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçları.....	85
4.4.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçları	88
4.4.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları.....	91
4.4.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları	97
4.5. Aşınma Testi Sonuçları	103
4.5.1. Pomza takviyeli kompozitlerin aşınma testi sonuçları	103
4.5.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin aşınma testi sonuçları.....	107
4.5.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin aşınma testi sonuçları.....	115

4.5.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin aşınma testi sonuçları	119
4.6. Boyutsal Kararlılık Analizi (BKA) Sonuçları	123
4.6.1. Pomza takviyeli kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonuçları.....	123
4.6.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonuçları.....	126
4.6.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonuçları.....	128
4.6.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonuçları	129
4.6.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonuçları	132
4.7. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Analizi Sonuçları.....	135
4.7.1. Pomza takviyeli kompozitlerin DSC analizi sonuçları.....	135
4.7.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin DSC analizi sonuçları	136
4.7.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin DSC analizi sonuçları.....	138
4.7.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin DSC analizi sonuçları.....	139
4.7.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin DSC analizi sonuçları	140
4.8. Termogravimetrik Analiz (TGA) Sonuçları	141
4.8.1. Pomza takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları	142
4.8.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları	143
4.8.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları.....	144
4.8.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin TGA sonuçları.....	144
4.8.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin TGA sonuçları.....	145
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	147
KAYNAKLAR	154
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	161
ÖZGEÇMİŞ	162

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Silan bağlayıcının kimyasal yapısı	9
Şekil 1.2.	İnorganik bir takviye yüzeyinin silanlama ile yüzey modifikasyonu	10
Şekil 1.3.	Bir ekstrüder cihazının genel yapısı.....	11
Şekil 1.4.	Çift vidalı ekstrüderlerin vida tipleri.....	12
Şekil 1.5.	Laboratuvar tipi ekstrüder.....	13
Şekil 1.6.	Plastik enjeksiyonla kalıplama cihazı	13
Şekil 1.7.	FTIR cihazının çalışma prensibi	14
Şekil 1.8.	Çekme testi cihazının şematik gösterimi	15
Şekil 1.9.	Dinamik mekanik analiz cihazının temel yapısı	16
Şekil 1.10.	Termomekanik analiz cihazı	17
Şekil 1.11.	Aşınma cihazı ve uygulandığı	18
Şekil 1.12.	Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazının şematik görünümü.....	19
Şekil 1.13.	Termogravimetrik analiz cihazının şematik görünümü	20
Şekil 1.14.	Taramalı elektron mikroskopunun şematik görünümü.....	21
Şekil 3.1.	PLA'nın moleküler yapısı.....	31
Şekil 3.2.	Ultrasonik karıştırıcı	35
Şekil 3.3.	Silanlanmış pomza partiküllerinin kurutulması	37
Şekil 3.4.	Manyetik karıştırıcılar.....	40
Şekil 3.5.	Bazalt elyafın silan çözeltisinde bekletilmesi	39
Şekil 3.6.	Bazalt elyafın silanlanma sonrası süzülmesi	41
Şekil 3.7.	Laboratuvar tipi mikro karıştırıcı.....	42
Şekil 3.8.	Laboratuvar tipi enjeksiyonla kalıplama cihazı	42
Şekil 3.9.	Tez çalışması kapsamında üretilen kompozitler.....	44
Şekil 3.10.	TA Instruments marka ve Q800 model DMA cihazı.....	45
Şekil 3.11.	DMA'da kullanılan numune örneği	45
Şekil 3.12.	Shimadzu marka TMA-50 model termomekanik analiz.....	46
Şekil 3.13.	Termomekanik analiz numunesi hazırlanması.....	46
Şekil 3.14.	Instron marka 4411 model çekme testi cihazı.....	47
Şekil 3.15.	Pin-on-disk test cihazı (Nanovea Tribometer).....	47
Şekil 3.16.	Aşınma izi ölçülen numune örneği	48
Şekil 3.17.	Nikon SMZ 745T optik mikroskopu	49
Şekil 3.18.	TA Instruments-Q200 model DSC analiz cihazı	50
Şekil 3.19.	TA Instruments-Q50 model TGA test cihazı.....	51
Şekil 3.20.	JEOL JCM-6000 model SEM cihazı	52
Şekil 4.1.	Pomza yüzeylerine ait FTIR spektrumları	54
Şekil 4.2.	Borik asit yüzeylerine ait FTIR spektrumları	56
Şekil 4.3.	Bazalt elyaf yüzeylerine ait FTIR spektrumları.....	57
Şekil 4.4.	Silanlanmamış pomza takviyeli kompozitlerin depo modülü eğrileri.....	59
Şekil 4.5.	Silanlanmış pomza takviyeli kompozitlerin depo modülü eğrileri.....	60

Şekil 4.6.	Silanlama işleminin pomza takviyeli kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisi.....	61
Şekil 4.7.	Silanlanmamış borik asit takviyeli kompozitlerin depo modülü eğrileri.....	62
Şekil 4.8.	Silanlanmış borik asit takviyeli kompozitlerin depo modülü eğrileri.....	63
Şekil 4.9.	Silanlama işleminin borik asit takviyeli kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisi.....	65
Şekil 4.10.	Silanlama işleminin bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisi.....	66
Şekil 4.11.	Silanlanmamış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin depo modülü eğrileri	68
Şekil 4.12.	Silanlanmış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin depo modülü eğrileri.....	69
Şekil 4.13.	Pomza ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisi.....	70
Şekil 4.14.	Silanlanmamış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin depo modülü eğrileri	71
Şekil 4.15.	Silanlanmış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin depo modülü eğrileri	73
Şekil 4.16.	Borik asit ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisi.....	73
Şekil 4.17.	Pomza takviyeli kompozitlerin boyut değişimi eğrileri.....	74
Şekil 4.18.	Borik asit takviyeli kompozitlerin boyut değişimi eğrileri.....	76
Şekil 4.19.	Silanlama işleminin bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin boyut değişimi özelliği üzerine etkisi	78
Şekil 4.20.	Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin boyut değişimi eğrileri	79
Şekil 4.21.	Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin boyut değişimi eğrileri	80
Şekil 4.22.	Silanlanmamış pomza takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri	81
Şekil 4.23.	Silanlanmış pomza takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri	82
Şekil 4.24.	Silanlama işleminin pomza takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisi.....	83
Şekil 4.25.	Silanlanmamış/silanlanmış ağırlıkça %1 pomza içeren kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	84
Şekil 4.26.	Silanlanmamış ağırlıkça %20 pomza içeren kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	84
Şekil 4.27.	Silanlanmamış borik asit takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri	85
Şekil 4.28.	Silanlanmış borik asit takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri	86
Şekil 4.29.	Silanlama işleminin borik asit takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisi.....	87
Şekil 4.30.	Silanlanmamış ağırlıkça %1 ve silanlanmış ağırlıkça % 0,25 borik asit içeren kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	88

Şekil 4.31.	Silanlama işleminin bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisi	88
Şekil 4.32.	Silanlama işleminin bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin yük-uzama eğrileri üzerine etkisi	89
Şekil 4.33.	Silanlanmamış ağırlıkça %10 bazalt elyaf içeren kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri	90
Şekil 4.34.	Silanlanmış ağırlıkça %10 bazalt elyaf içeren kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri	91
Şekil 4.35.	Silanlanmamış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri	92
Şekil 4.36.	Silanlanmış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri	93
Şekil 4.37.	Pomza ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisi	94
Şekil 4.38.	Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %3 pomza içeren hibrit kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	95
Şekil 4.39.	Silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış ağırlıkça %3 pomza içeren hibrit kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri	96
Şekil 4.40.	Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %20 pomza içeren hibrit kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	97
Şekil 4.41.	Silanlanmamış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri	98
Şekil 4.42.	Silanlanmış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri	99
Şekil 4.43.	Borik asit ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisi	100
Şekil 4.44.	Borik asit ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin yük-uzama eğrileri üzerine etkisi.....	101
Şekil 4.45.	Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %0,25 borik asit içeren hibrit kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	102
Şekil 4.46.	Silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış ağırlıkça %0,25 borik asit içeren hibrit kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	102
Şekil 4.47.	Pomza takviyeli kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları.....	103
Şekil 4.48.	Pomza takviyeli kompozitlerin aşınma eğrileri	105
Şekil 4.49.	Pomza takviyeli kompozitlerin ortalama aşınma oranları	106
Şekil 4.50.	Saf PLA matrisinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri	106
Şekil 4.51.	Silanlanmamış/silanlanmış ağırlıkça farklı oranlarda pomza içeren kompozitlerin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri	107
Şekil 4.52.	Borik asit takviyeli kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları.....	108
Şekil 4.53.	Borik asit takviyeli kompozitlerin aşınma eğrileri.....	109
Şekil 4.54.	Borik asit takviyeli kompozitlerin ortalama aşınma oranları.....	110
Şekil 4.55.	Ağırlıkça %1 silanlanmış oranında borik asit içeren kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü.....	110

Şekil 4.56.	Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerinin ortalama sürtünme katsayıları.....	111
Şekil 4.57.	Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerinin aşınma eğrileri.....	112
Şekil 4.58.	Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerinin ortalama aşınma oranları.....	113
Şekil 4.59.	Silanlanmamış ağırlıkça %10 bazalt elyaf içeren kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	114
Şekil 4.60.	Silanlanmış ağırlıkça %10 bazalt elyaf içeren kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	114
Şekil 4.61.	Bazalt elyaf ve pomza içeren hibrit kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları.....	115
Şekil 4.62.	Bazalt elyaf ve pomza içeren hibrit kompozitlerin aşınma eğrileri.....	116
Şekil 4.63.	Bazalt elyaf ve pomza içeren hibrit kompozitlerin ortalama aşınma oranları.....	117
Şekil 4.64.	Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %20 pomza içeren hibrit kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	118
Şekil 4.65.	Silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış ağırlıkça %20 pomza içeren hibrit kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	119
Şekil 4.66.	Bazalt elyaf ve borik asit içeren hibrit kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları.....	119
Şekil 4.67.	Bazalt elyaf ve borik asit içeren hibrit kompozitlerin aşınma eğrileri.....	121
Şekil 4.68.	Bazalt elyaf ve borik asit içeren hibrit kompozitlerin ortalama aşınma oranları.....	121
Şekil 4.69.	Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %0,25 borik asit içeren hibrit kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	122
Şekil 4.70.	Silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış ağırlıkça %1 borik asit içeren hibrit kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri.....	123
Şekil 4.71.	Silanlanmamış pomza takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları.....	124
Şekil 4.72.	Silanlanmış pomza takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları.....	125
Şekil 4.73.	Ağırlıkça %20 pomza takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları.....	125
Şekil 4.74.	Silanlanmamış borik asit takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları.....	126
Şekil 4.75.	Silanlanmış borik asit takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları.....	127
Şekil 4.76.	%1 borik asit takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları.....	127
Şekil 4.77.	Silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları.....	128
Şekil 4.78.	Silanlanmamış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları.....	129
Şekil 4.79.	Silanlanmış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları.....	130
Şekil 4.80.	Ağırlıkça %20 pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları.....	131
Şekil 4.81.	Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçlarının karşılaştırılması.....	131
Şekil 4.82.	Silanlanmamış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları.....	132

Şekil 4.83. Silanlanmış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları.....	133
Şekil 4.84. Ağırlıkça %1 borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları.....	133
Şekil 4.85. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçlarının karşılaştırılması.....	134
Şekil 4.86. Pomza, borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçlarının karşılaştırılması.....	134



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1.	Tez çalışması kapsamında temin edilen hammaddeler ve özellikleri	33
Tablo 3.2.	Pomzanın silanlanması prosesine ait proses parametreleri.....	36
Tablo 3.3.	Borik asidin silanlanması prosesine ait proses parametreleri	38
Tablo 3.4.	Bazalt elyafın silanlanması prosesine ait proses parametreleri	40
Tablo 3.5.	Numunelerin bileşim oranları ve kodları	43
Tablo 4.1.	Pomza takviyeli kompozitlerin DSC sonuçları.....	135
Tablo 4.2.	Borik asit takviyeli kompozitlerin DSC sonuçları	137
Tablo 4.3.	Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin DSC sonuçları	138
Tablo 4.4.	Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin DSC sonuçları.....	139
Tablo 4.5.	Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin DSC sonuçları.....	140
Tablo 4.6.	Pomza takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları	142
Tablo 4.7.	Borik asit takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları	143
Tablo 4.8.	Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları.....	144
Tablo 4.9.	Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin TGA sonuçları.....	145
Tablo 4.10.	Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin TGA sonuçları.....	146

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ΔH	: Entalpi değişimi, (J/g)
ΔH_m^0	: Katkısız matris malzemesinin füzyon ısısı, (J/g)
ΔH_{cc}	: Soğuk kristalleşme entalpisi, (J/g)
ΔH_m	: Erime entalpisi, (J/g)
$CaCO_3$: Kalsiyum Karbonat
D	: Aşınma izi genişliği, (mm)
D	: Boyutsal değişiklik, (%)
E'	: Depo modülü, (MPa)
E''	: Kayıp modül, (MPa)
H_3BO_3	: Ortoborik asit
K	: Aşınma oranı, (mm^3/Nm)
L	: Yük, (N)
L_a	: Son boy, (mm)
L_b	: İlk boy, (mm)
MoS_2	: Molibden disülfid
NaOH	: Sodyum hidroksit
NH_2	: Amin grubu
OH	: Hidroksi grubu
R	: Aşındırıcı bilye yarıçapı, (mm)
R	: Sürtünme yarıçapı, (mm)
$T_{%10}$: %10 ağırlık kaybı yaşanan sıcaklık, ($^{\circ}C$)
$T_{%5}$: %5 ağırlık kaybı yaşanan sıcaklık, ($^{\circ}C$)
T_c	: Kristalizasyon sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_m	: Erime sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
V	: Aşınma hacmi, (mm^3)
X	: Kayma mesafesi, (m)
X_c	: Kristalinite oranı, (%)
π	: Pi sayısı
$\omega_{f/p}$: Takviye elemanı ağırlık oranı, (%)

Kısaltmalar

ADP	: Alüminyum Dietil Fosfinat
AP	: 3-aminopropil-trietoksisilan
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
BKA	: Boyutsal Kararlılık Analizi
DMA	: Dinamik Mekanik Analiz
DSC	: Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri)

FTIR	: Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Fourier DönüŖümlü Kızılötesi Spektroskopisi)
GP	: 3-Glisidyloxipropil-trimetoksisilan
KH550	: 3-aminopropyl-triethoxysilane (3-aminopropil-trietoksisilan)
KH560	: 3-glycidyloxypropyl-trimethoxysilane (3-Glisidyloxipropil-trimetoksisilan)
MA	: 3-trimetoksisilil-propilmetakrilat
PC	: Polikarbonat
PLA	: Poli(Laktik Asit)
PP	: Polipropilen
PPS	: Poli(Fenilen Sülfid)
PVA	: Polivinil Alkol
PVP	: Polivinil Prolidon
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TMA	: Termomekanik Analiz

YEREL KAYNAKLAR KULLANILARAK POLİ(LAKTİK ASİT) MATRİSLİ DOĞAL KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, Poli(laktik asit) (PLA) malzemesine hem silan bağlama ajanı ile yüzey modifikasyonu uygulanarak hem de uygulamadan pomza, borik asit partikülleri ve kısa bazalt elyaf takviyesi ayrı ayrı ve hibrit etki oluşturacak şekilde birlikte takviye edilmiştir. Kompozitlerin üretimi ekstrüzyon ve enjeksiyon ile kalıplama yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm tez çalışması boyunca bazalt elyaf takviyesi ağırlıkça %10, pomza takviyesi ağırlıkça %1, 3, 5, 10, 20 ve borik asit takviyesi ağırlıkça %0,25, 0,5, 1 olacak şekilde kullanılmıştır. Öncelikle bazalt elyaf ve partiküllere çeşitli yüzey modifikasyon prosesleri uygulanmış ve başarıyı FTIR analizi ile değerlendirilmiştir. Daha sonra her takviye malzemesi için ayrı ayrı belirlenen proseslerde yüzey modifikasyonu uygulanmış ve kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerde takviye türünün, oranının, sinerjik etkinin ve yüzey modifikasyonunun mekanik, tribolojik, termal, termomekanik ve morfolojik etkileri araştırılmıştır. Mekanik özelliklerin incelenmesi için çekme testi, tribolojik özelliklerin incelenmesi için aşınma testi, termomekanik özelliklerin incelenmesi için dinamik mekanik analiz (DMA), boyutsal kararlılığın incelenmesi için termomekanik analiz (TMA) ve boyutsal kararlık analizi, termal özelliklerin incelenmesi için diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi ve termogravimetrik analiz (TGA) ayrıca morfolojik özelliklerin incelenmesi için çekme ve aşınma yüzeylerine tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) analizi uygulanmıştır. Yapılan tüm bu analiz ve testler sonrasında silanlama işleminin tüm takviye elemanları için başarıya ulaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca partikül ve elyaf takviyesinin tek başına takviye edildiğinde beklenen etkiyi gösteremediği fakat birlikte takviye edildiklerinde hibrit etki sayesinde oluşturulan kompozitlerde mekanik, tribolojik ve termomekanik özelliklerinde dikkat çeken gelişmeler sağlanmıştır. Bununla birlikte en iyi özellikler yüzey modifikasyonu uygulanmış bazalt elyaf ve pomza içeren hibrit kompozitlerde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bazalt Elyaf, Borik Asit, Poli(laktik asit) (PLA), Pomza, Silanlama.

IMPROVEMENT OF POLY(LACTIC ACID) BASED NATURAL COMPOSITE MATERIAL USING LOCAL SOURCES

ABSTRACT

In this study, to improve Poly (lactic acid) (PLA), fillers was reinforced both surface modification with silane coupling agent, and as received. Pumice, boric acid particles and short basalt fiber reinforcement were applied separately and together to create hybrid effect. The production of composites was carried out using extrusion and injection molding methods. During the whole thesis study, basalt fiber reinforcement was used as 10% by weight, pumice reinforcement as 1, 3, 5, 10, 20% and boric acid reinforcement as 0.25, 0.5, 1% by weight. Firstly, various surface modification processes were applied to basalt fibers and particles and their performance was evaluated by FTIR analysis. Subsequently, surface modification was applied for each reinforcing material separately and composite samples were produced. The mechanical, tribological, thermal, thermomechanical and morphological effects of reinforcement type, ratio, synergistic effect and surface modification of the composite materials were investigated. Tensile test for examination of mechanical properties, wear test for examination of tribological properties, dynamic mechanical analysis (DMA) for examination of thermomechanical properties, thermomechanical analysis for examination of dimensional stability (TMA) and dimensional stability analysis, differential scanning calorimetry (DSC) for examination of thermal properties analysis and thermogravimetric analysis (TGA) and scanning electron microscopy (SEM) analysis were applied to the tensile and wear surfaces to investigate the morphological properties. After all these analyzes and tests, it was found that the surface modification process was successful for all reinforcement elements. In addition, the particle and fiber reinforcement alone does not show the expected effect when reinforced, but when combined together, thanks to the hybrid effect, remarkable improvements in mechanical, tribological and thermomechanical properties have been achieved. However, the best properties were obtained in hybrid composites containing surface-modified basalt fibers and pumice.

Keywords: Basalt Fiber, Boric Acid, Poly (lactic acid) (PLA), Pumice, Coupling Agent.

GİRİŞ

Son yıllarda hızla ilerleyen teknolojik gelişmeler malzeme alanında da kendine yer bulmuştur. Alternatif ürünlere olan ihtiyaçlar ve kaliteye verilen önemin artmasıyla birlikte yeni nesil ileri malzemeler geliştirilmeye başlanmıştır. Bu sayede geleneksel mühendislik malzemelerine karşı avantaj sağlayacak malzemeler elde etmek amaçlanmıştır.

Polimer ya da bir diğer deyişle plastik malzemeler günümüzde hem günlük hayatta hem de endüstriyel olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun sebepleri olarak geleneksel malzemelere kıyasla hafif, düşük maliyetle elde edilebilir ve şekillendirilebilir olmaları, kısmen de olsa geri dönüştürülebilir özellikler göstermeleri sayılabilir. Bu özellikleriyle birlikte havacılıktan otomotive, ev eşyalarından ambalaj sektörüne kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmaktadır.

Plastik malzemeler bazı özellikleri bakımından isteneni karşılarsa da eksik kaldığı ve geliştirilmesi gereken yönleri de bulunmaktadır. Bu sebeple plastik malzemeler elyaf ve partikül takviyeleriyle birlikte güçlendirilerek kompozit yapılar elde etmek amaçlanmaktadır. Böylece hedeflenen özellikler iyileştirilerek ileri mühendislik malzemeleri ortaya çıkmaktadır. Oluşturulan bu kompozit yapıların en önemli özelliği yoğunluk başına düşen dayanım değerlerinin geleneksel malzemelere göre çok yüksek olmasıdır. Ayrıca günümüzde doğaya verilen önemin artmasıyla çevre dostu malzemelerin geliştirilmesi ve kullanımı büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple biyo-bozunur plastiklerin ve bunların kompozitlerinin geliştirilmesi çalışılması gereken bir konudur.

Çalışmanın 1. bölümünde, kompozit kavramı hakkında genel bilgilerle birlikte kompozit yapıların sınıflandırılması, üretim ve özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan karakterizasyon yöntemleri yer almaktadır. Çalışmanın 2. bölümünde literatür bilgileri araştırılmış ve sunulmuştur. Çalışmanın 3. bölümü tez

kapsamında kullanılan malzemelerin özelliklerinin, üretim yönteminin ve karakterizasyon yöntemlerinin açıklandığı kısımları içermektedir. Çalışmanın 4. bölümünde elde edilen kompozit malzemelere uygulanan testlerin sonuçları ve bu sonuçların yorumlanması kısımları bulunmaktadır. Bu bölüm, takviye malzemelerinin polimer özelliklerinin üzerindeki etkisinin detaylı incelenmesi adına, partikül takviyeli, fiber takviyeli ve hibrit kompozitler olmak üzere alt başlıklara ayrılmıştır. Son bölümde ise tez çalışmasına ait sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

Tez çalışması kapsamında, bazalt elyaf, borik asit ve pomza yerel kaynakları kullanılarak Poli(laktik asit) esaslı doğal kompozit malzeme geliştirilmesi amaçlanmış, bu doğrultuda üretilen kompozitlerin tribolojik, mekanik, termal ve termomekanik özellikleri incelenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit kavramı, iki ya da daha fazla malzemenin birbiri içerisinde çözünmeden makro boyutta bir araya gelerek oluşturduğu yapı olarak tanımlanmaktadır. Yapıyı oluşturan fazlar takviye ve matris olarak adlandırılmaktadır (Barbero, 2017). Matris fazı olarak adlandırılan ve takviye fazını yapı içerisinde tutan faz sürekli bir yapıdadır. Takviye fazı ise matris içerisinde bulunan ve esas işi yapan kısımdır. Takviye fazı elyaf, partikül ya da pul benzeri yapılar olabilmektedir (Kaw, 2006). Ayrıca takviye ve matris fazı arasında kompozit yapının mukavemetini belirlemede büyük etkiye sahip ara yüzey fazı da son yıllarda çalışma konusu olarak önem kazanmıştır.

Kompozit yapıların son yıllarda hayatımızın büyük bölümünde yer aldığı düşünülse de aslında tarih boyunca insanoğlunun çokça kullandığı ve tercih edilen yapılar olduğunu bilinmektedir. Örneğin, antik Mısır'da evlerin inşaatında yapı malzemesi olarak kullanılması bunun bir göstergesidir. Bununla birlikte kompozit yapıların gelişimi incelendiğinde ilk olarak doğal liflerle takviye edilmiş kil esaslı yapılar görülmüş, daha sonrasında araştırmaların artması ve geliştirilen üretim yöntemleriyle birlikte ayrıca yeni malzemelerin de keşfiyle modern kompozit yapılar ortaya çıkartılmıştır. Böylece kompozitler el yapımı bambu takviyeli kil esaslı yapılardan cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlere, metal tabakalı sandviç yapılardan hem partikül hem elyaf içeren ve kullanım amacına göre tasarlanabilen hibrit kompozitlere evrilmiştir. Bu gelişmelerle birlikte kompozit yapılar havacılık, otomotiv sanayi gibi dayanıklılık gerektiren sektörlerde kendine geniş bir kullanım alanı bulmuştur (Barbero, 2017; Kaw, 2006).

1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ve Özellikleri

Kompozit yapıların çeşitli sınıflandırma yöntemleri bulunmaktadır. En yaygın kullanılan sınıflandırma yöntemleri ise matris malzemesine göre sınıflandırma ve

takviye elemanlarına göre sınıflandırmadır. Kompozit malzemeler matris malzemesine göre sınıflandırıldığında dört ana başlık altında toplanmaktadır. Bunlar aşağıda belirtilen şekilde sayılabilir (Kaw, 2006);

1. Seramik matrisli kompozitler
2. Metal matrisli kompozitler
3. Karbon – karbon kompozitler
4. Polimer matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler, silisyum karbür ya da karbon gibi malzemelerle takviye edilmiş alümina kalsiyum, alümina silikat matrisli yapılardır. Yüksek sertlik ve dayanım, iyi kimyasal direnç, yüksek çalışma sıcaklığı gibi olumlu özelliklerle bilinirler. Fakat düşük kırılma tokluğuna sahip olmaları, çekme ve darbe yüklerinde olumsuz özellikler sergilemelerine neden olmaktadır. Tüm bu özellikler değerlendirildiğinde seramik matrisli kompozitler polimer ve metal matrisli malzemelerin kullanılmadığı yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Böylece oksitleyici ortamda ve yüksek sıcaklıklarda rahatlıkla çalışabilen kesici takım ucu olarak kullanıldığı bilinmektedir (Kaw, 2006).

Metal matrisli kompozitler, tasarıma uygun malzeme geliştirmek ve böylece monolitik metallere göre (çelik, alüminyum vb.) avantaj sağlamak amacıyla kullanılmaktadırlar. Bu avantajlar, düşük yoğunlukta metalleri takviye ederek dayanım değerlerini yükseltmek, daha düşük termal genleşme katsayısı elde etmek olarak sayılabilmektedir. Metal matrisli kompozitlerin kullanım alanlarına örnek olarak; boron/alüminyum kompozitlerin kullanıldığı havacılık sanayi, silisyum karbür/ alüminyum kompozitlerin kullanıldığı askeri uygulamalar ve çok çeşitli kombinasyonlarla oluşturulan metal kompozitlerin kullanıldığı otomotiv sektörü sayılmaktadır (Kaw, 2006).

Karbon – karbon kompozitler adından da anlaşılacağı üzere karbon matris içerisine karbon elyaf takviye edilerek elde edilen kompozitler olarak tanımlanır. Başlıca avantajları arasında yüksek sıcaklıkta çalışabilmeleri, düşük yoğunluğa sahip olmaları, yüksek ısı iletkenlik ve sürünme dayanımı sayılabilmektedir. Fakat ekonomik açıdan yüksek maliyetli olması, düşük kayma dayanımına sahip olması ve

yüksek sıcaklıklarda oksidasyona yatkınlığının bulunması dezavantajlarıdır (Kaw, 2006).

Tüm bu özellikler düşünüldüğünde uzay mekiklerinin burun konilerinde, uçak frenlerinde ve ısı uygulamalarındaki mekanik bağlantılarda karbon-karbon kompozitler tercih edilmektedir (Kaw, 2006).

Polimer matrisli kompozitler ile ilgili detaylı bilgiler çalışmanın özünü oluşturduğu için bir sonraki başlıkta altında verilmiştir.

Kompozit malzemelerin diğer sınıflandırma yöntemi takviye elemanına göre sınıflandırmadır. Böyle bir sınıflandırma yapıldığında kompozit malzemeler aşağıdaki gibi incelenir (Barbero, 2017);

1. Elyaf takviyeli kompozitler
 - 1.1. Sürekli elyaf takviyeli kompozitler
 - 1.2. Kısa elyaf takviyeli kompozitler
 - a. Yönlendirilmiş kısa elyaf takviyeli kompozitler
 - b. Rastgele kısa elyaf takviyeli kompozitler
2. Partikül takviyeli kompozitler
 - a. Yönlendirilmiş partikül takviyeli kompozitler
 - b. Rastgele partikül takviyeli kompozitler
3. Hibrit kompozitler

Elyaf takviyesinin kompozit malzemelerde kullanılmasının başlıca sebepleri iyi yük taşıma performansı ile birlikte elyafların matris malzemelerine göre yüksek rijitliğe ve dayanıma sahip olmasıdır. Ayrıca elyaflar yüksek spesifik dayanım, yüksek spesifik modül değerlerine sahip malzemelerdir. Elyafların tüm bu özellikleri sağlamanın nedeni elyaf formundaki yapılarının yığın haldeki yapılarına göre daha az yapısal kusur bulundurması olarak açıklanır (Barbero, 2017).

Elyaf matris malzemesi içerisine sürekli olacak şekilde yani diğer bir deyişle yapının tamamında belirli bir yönelimde takviye edilebileceği gibi kısa elyaf şeklinde de belirli bir yönelimle ya da rastgele dağılımlı takviye edilebilirler. Elyafların yapı içerisinde belirli bir yönelimde takviye edilmesi oluşturulan kompozit malzeme

anizotropik özellik meydana getirir. Fakat elyaf takviyesi kısa ve rastgele olduğunda, iyi bir elyaf dağılımı da yapı içerisinde sağlanmışsa, oluşturulan kompozit malzeme sanki izotropikmiş (quasi-isotropic) gibi bir yapı sergiler (Barbero, 2017).

Ayrıca maliyeti düşürmek için de rastgele dağılımlı kısa elyaf takviyeli yapılar tercih edilir, ancak bu yapıların performansları sürekli elyaf takviyeli kompozitlere göre daha düşüktür (Barbero, 2017).

Kompozit yapılarda kullanılan bir diğer takviye elemanı partiküldür. Partikül takviyesi genel olarak maliyeti düşürme, alev geciktirme etkisi sağlama, ağırlık azaltma veya ultraviyole etkisinden polimerleri koruma gibi özellikleri sağlamak amacıyla matris malzemelerine dolgu olarak takviye edilir. Partikül takviyesi matris malzemesine belirli bir yönlendirme şeklinde yapılacağı gibi rastgele olacak şekilde de uygulanır. Rastgele partikül takviyesi hem üretim kolaylığı hem de yapıda homojen dağılım özelliği sağlanmasıyla daha sık tercih edilir (Barbero, 2017; Rotheron, 2003).

Hibrit kompozit yapılar oluşturmak için genel olarak iki farklı yöntem kullanılmaktadır. İlk yöntem tabakalı kompozit oluşturmaktır. Tabakalı kompozitler farklı malzeme içeriklerine sahip tabakaların bir araya gelmesiyle ya da aynı malzeme içeriğine sahip fakat farklı yönelme düzeninde takviye içeren tabakaların birleştirilmesiyle oluşturulan yapılardır. Örneğin, karbon elyaf, aramid elyaf ve cam elyaf içeren bir tabakalı kompozit yapı tasarlandığında, karbon elyaflar yapıda dayanım ve rijitlik sağlarken, cam ve aramid elyaflar yapının darbelere karşı dayanım özelliğini iyileştirir (Barbero, 2017).

Tabakalı kompozitlerin dışında diğer hibrit kompozit oluşturma yönetimi aynı matris içerisinde farklı takviye malzemesi kullanılmasıdır. Örneğin elyaf ve partikül birlikte takviye edilerek aynı matris içerisinde hibrit bir yapı oluşturmaktadır. Kompozit yapıların özelliklerini daha da ileriye taşımak ve kullanım alanına uygun malzeme geliştirmek amacıyla hibrit kompozitler sıklıkla tercih edilmektedir (Barbero, 2017; Biron, 2013).

1.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer malzemeler genel olarak düşük maliyete sahip olmaları, seramik ve metal malzemelere göre daha kolay işlenebilmeleri gibi olumlu özelliklerinin yanında, yüksek nem absorpsiyonu ve termal genişleme, düşük termal dayanım ve elastik özellikleriyle bilinir (Kaw, 2006; Biron, 2013). Fakat polimerler, partikül ve/veya elyaf ile takviye edilerek elde edilen kompozit malzemelerin, saf polimerlerin yeteri kadar iyi olmayan özelliklerini geliştirdiği ve mevcut özelliklerini daha da iyileştirdiği bilinmektedir. Polimer matrisli kompozitleri daha iyi incelemek için polimerler termoplastikler, termosetler ve termoplastik elastomerler olarak ayrılmaktadır (Biron, 2013).

Termoplastikler, kimyasal olarak makro boyutta birbirinden bağımsız zincirlerden oluşan basit moleküler yapıya sahiptir. Isıtılarak yumuşatılabilir ya da eritilebilirler ve sonrasında şekillendirilip soğuduğunda katılaşır. Bu işlemin birden fazla yapılması yapıda ciddi hasar oluşturmamakla birlikte termoplastiklere yeniden işleme ve geri dönüşüm özelliği kazandırır. Sıklıkla termoplastik malzemelere, kimyasal veya termal stabilite, ultraviyole direnci gibi özelliklerini geliştirmek için bazı katkı ya da dolgular ilave edilerek kompozit yapılar oluşturulur. Termoplastik kullanımı toplam polimer kullanımının %80'den fazlasını oluşturmaktadır (Biron, 2013).

Termoplastiklerin moleküler yapısında zincirler arası çapraz bağlar bulunmaması nedeniyle geri dönüşüm prosesi süresi kısadır ve kontrol edilmesi kolaydır. Proses atıkları geri dönüştürülebilirlik sayesinde kısmen de olsa tekrar kullanılabilir. Termoplastiklere üretimden önce doğru şartlarda kurutma işlemi yapılırsa gaz ve su buharı oluşumu gözlenmez. Tüm bu avantajların yanında, sıcaklık arttırıldığında zincirler arası bağlar bulunmadığından zincirler kolayca harekete geçebilir ve bu durum dayanım değerinin daha kolay düşmesine neden olur. Yine bu nedenden dolayı sünme ve gevşeme davranışları termosetler kadar iyi değildir. Termoplastiklere örnek olarak polilaktik asit, naylon, polieter eter keton, polistren ve polipropilen verilebilir (Biron, 2013).

Termosetler, sertleşmeden önce tıpkı termoplastikler gibi bağımsız zincirlere sahip makro moleküler yapıdadır. Fakat nihai hale geçtiklerinde, yani sertleşme işlemi

tamamlandığında, yapıda zincirler arası çapraz bağlar oluşmaktadır. Çapraz bağlar, zincirler arasındaki hareketliliği ve yer değiştirme olasılığını sınırlar. Bu durumun bazı avantajları ve dezavantajları vardır (Biron, 2013).

Termosetler sıvı hale geçmeden direkt ısı ile bozulur. Bu durum yavaşça bozulmadansa birden bozulduğu için bariyer etkisi yaratmak adına avantaj sağlayabilir. Ayrıca sıcaklık arttığında çapraz bağlar sayesinde zincir hareketi kısıtlanacağından, dayanım termoplastiklere göre daha iyi olacaktır. Yine aynı sebeple termosetler daha iyi sürünme davranışı sergilemektedir. Proses edilebilirlik açısından bazı durumlarda sıvı haldeki termosetle çalışmak üretim kolaylığı sağlayabilir (Biron, 2013).

Termosetlerin dezavantajları olarak da çapraz bağların oluşumu için fazladan ısıtma süresi ve maliyeti, bununla birlikte bağlanma reaksiyonunun şekillendirme esnasında kontrol edilebilirliğinin zor olması sayılmaktadır. Ayrıca sertleşme işlemi gerçekleşikten sonra termosetlerin geri dönüşümü mümkün olmaz. Bu nedenle proses atıkları tekrar kullanılamazlar. Sadece öğütülüp dolgu maddesi olarak değerlendirilebilirler. Termosetlere örnek olarak polyesterler, epoksi reçine, poliüretan verilebilir (Biron, 2013).

Termoplastik elastomerler, kauçuk ve termoplastik bileşenli malzemelerdir. Yüksek kopma uzaması ve düşük dayanıma sahiptirler. Elastikiyet özelliğinin iyi olmasıyla bilinirler. Çapraz bağlı moleküler yapıya sahiptirler. Fakat yapılarında termosetlerde olduğu gibi bir bağ yoğunluğu bulunmamaktadır. Proses edilebilme özellikleri termoplastiklere benzerdir. Ayrıca termoplastikler gibi geri dönüştürülebilirler. Termoplastiklere benzer olmanın getirdiği olumsuz bir özellikte sıcaklık arttığında mekanik özelliklerin kötüleşmesidir. Termoplastik elastomerlere örnek olarak termoplastik olefin, stiren bütadien stiren verilebilir (Biron, 2013).

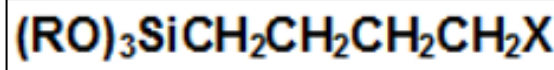
1.4. Kompozit Malzemelerde Takviye Modifikasyonu

Kompozit malzemelerden beklenen performansın iyileştirilmesinde rolü olan en önemli etkenlerden biri matris ve takviye malzemeleri arasındaki arayüzey etkileşiminin kalitesidir. Bu etkileşimi güçlendirmek için başvurulabilecek iki ana yöntem vardır. Bunlardan ilki takviye malzemesinin yüzeyinin uygulanacak kimyasal

veya fiziksel işlemlerle modifiye edilmesi ve böylece yüzeyde fonksiyonel gruplar oluşturulması ya da mevcut fonksiyonel grupların sayısının veya çeşitliliğinin artırılmasıdır. Bir diğer yöntem ise matris modifikasyonu yöntemidir. Matris malzemesinin kimyasal yapısına benzeyen ve ayrıca yapısında çeşitli fonksiyonel gruplar bulunduran kimyasallar ya da polimerler kullanılarak bunların matrise ilavesiyle matris malzemesinin fonksiyonelliği artırılmış olur. Bu işlemlerle birlikte takviye malzemesi ile matris malzemesi arasındaki ara yüzey etkileşimi, yapıda artan fonksiyonel gruplar aracılığıyla iyileştirilmekte ve böylece malzeme özelliklerinde ve performansında iyileşmeler sağlanmaktadır (Etcheverry ve Barbosa, 2012). Tez çalışması kapsamında takviye elemanlarına silanlama ile yüzey modifikasyonu işlemi uygulandığından dolayı bu yönteme ait ayrıntılı bilgiler devam eden başlık altında verilmiştir.

1.4.1. Silanlama yöntemi ile takviye yüzeylerinin modifikasyonu

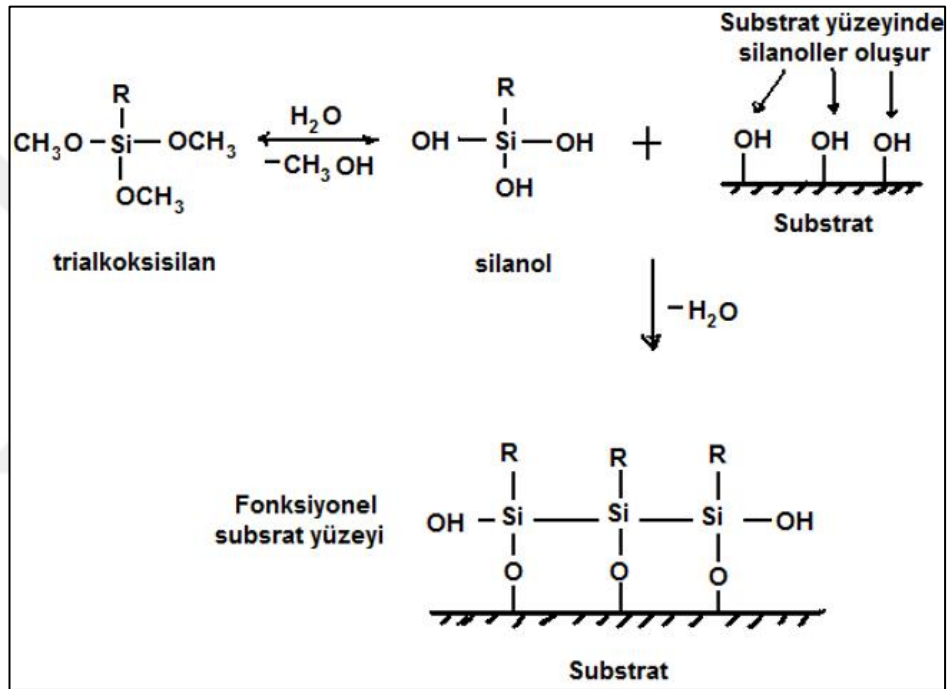
Silanlama yöntemi temel olarak uygulanma sebebi malzemeler arasında ara yüzey etkileşimini artırarak inorganik malzemelerle (metaller, seramik ve dolgu malzemeleri gibi) organik malzemeler arasındaki yüzeye etki edip bu malzemelerin birbirlerine kimyasal olarak daha iyi bağlanmasını sağlamaktır. Genel olarak silanlama işlemi için inorganik olan katkı maddesinin yüzeyi tercih edilmektedir (Kemaloğlu, 2009).



Şekil 1.1. Silan bağlayıcının kimyasal yapısı (Kemaloğlu, 2009)

Silikon temelli kimyasallar olan silan bağlama ajanları, yapısında inorganik ve organik olarak iki reaktif grup içermektedir. Şekil 1.1’de genel olarak bir silan bağlayıcının temel kimyasal yapısı verilmiştir. Şekil incelendiğinde yapıda “RO” ile gösterilen kısım hidroliz edilebilir grubu, ortada bulunan kısım alkoksi gurubunu (etoksi, metoksi vb.) ve “X” ile gösterilen kısım ise organik grubu (epoksi, amino vb.) ifade etmektedir. Ayrıca “R” ile ifade edilen kısım polimer ile bağ kuracak organik fonksiyonel grubu ifade etmektedir (Kemaloğlu, 2009).

Takviye yüzeylerinin silan ile modifikasyon işlemi genel anlamda, trialkoksi silan ve suyun etkisiyle silanol grupların elde edilmesi aşaması olan hidrolizden sonra takviye malzemesi üzerindeki hidroksil grubuyla reaksiyona girmesi aşamalarını içeren ve hidroliz, kondenzasyon ve bağlanma olarak üç adımda incelenebilen bir işlemdir. Kimyasal açıdan uyumlu silan bileşiği seçildiği takdirde takviye malzemesi, silan bileşiği ve polimer malzeme arasında çapraz bağlar oluşarak ara yüzey etkileşimi gerçekleşir (Kemaloğlu, 2009). Şekil 1.2’de inorganik bir takviye yüzeyinin silanlama prosesi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.2. İnorganik bir takviye yüzeyinin silanlama ile yüzey modifikasyonu (Kemaloğlu, 2009)

1.5. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

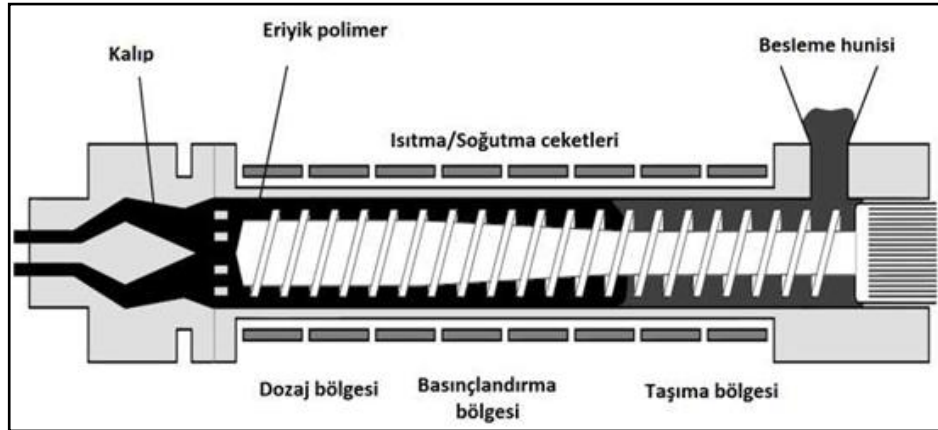
Polimer matrisli kompozitlerin üretim süreçlerinin belirlenmesinde birçok faktör bulunmaktadır. Matris malzemesi, kullanılacak takviye türü ve yönelimi başta olmak üzere, üretilecek parçanın tasarımı, adedi ve beklenen üretim hızı üretim yönteminin belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Bu nedenlerden dolayı kompozit malzemenin tasarımından üretimine kadarki sürecin en verimli şekilde yönetilebilmesi için çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Her üretim yöntemi tüm kompozit üretimleri için uygun olmamakla birlikte polimerlerin tamamı da herhangi bir üretim yöntemine uygun değildir (Biron, 2013).

Termosetlerin üretim yöntemi temel olarak, termoset malzemenin çapraz bağlarının oluşması için ısıtılmasına ve yapının sertleşmesine dayanmaktadır. Sıkıştırma, sıkıştırma ve aktarım ya da enjeksiyon temeline dayanan çeşitli üretim yöntemleriyle kalıplanabilirler. Bu yöntemlere örnek olarak; el yatırma, reçine transfer kalıplama, flaman sarma, sprey püskürtme verilebilir (Biron, 2013).

Termoplastiklerin de tıpkı termosetler gibi çeşitli üretim yöntemleri bulunmaktadır. Fakat en sık kullanılan üretim yöntemleri ekstrüzyon ve enjeksiyon ile kalıplamadır (Biron, 2013). Bu tez çalışması kapsamında da bu iki yöntem kullanıldığından konu, daha detaylı bir şekilde sonraki alt başlıklarda incelenmiştir.

1.5.1. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon, granül ve/veya toz formdaki malzemeyi eriyik hale getirmek, homojen bir şekilde karıştırmak ve son olarak şekillendirme işlemlerinin yapıldığı bir termoplastik üretim yöntemidir. Bu üretim yöntemi ekstrüder adı verilen cihaz vasıtasıyla gerçekleştirilir. Ekstrüderin ana işlevi, malzemenin akış özelliklerine ve kalıp geometrisine uygun olarak gerekli basıncı uygulamak ve bu sayede eriyiğin kalıba doğru ilerlemesini sağlamaktır (Karlı, 2014).



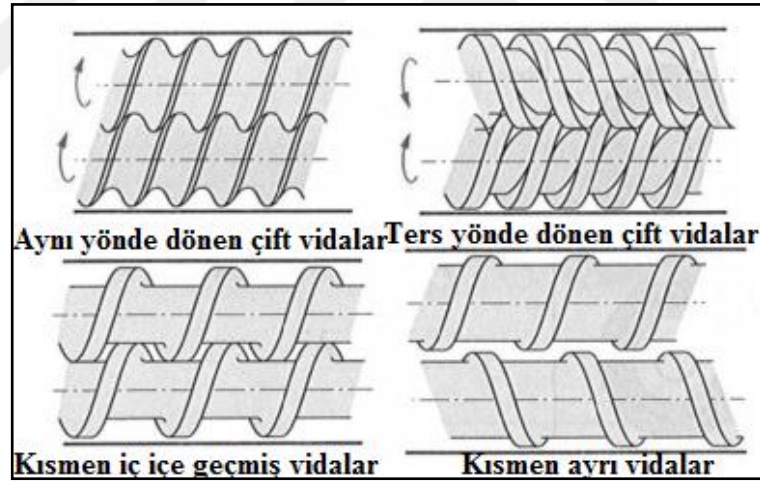
Şekil 1.3. Bir ekstrüder cihazının genel yapısı (Karlı, 2014)

Ekstrüder, çalışma ilkesinin daha kolay inceleyebilmesi için çeşitli kısımlara ayrılmıştır (Şekil 1.3). Bunlar; ısıtma, erime, karıştırma ve taşıma işleminin yapıldığı bununla birlikte ürün kalitesi ve üretim sürecinin kararlılığını belirleyen vida kısmı, vidanın da içinde yer aldığı silindirik geometrideki aşınma direnci yüksek ve genelde çelikten imal edilen kovan kısmı, plastiğe istenilen şeklin verilmesine sağlayan ve

ekstrüderin ucunda bulunan kalıp kısmı ve son olarak tüm üretim sürecinin takip edilip yönetildiği, sıcaklığın, kalıp basıncının ve vida hızının kontrol edildiği kontrol panelidir (Kemaloğlu, 2009).

Ekstrüderler vida sayısına ve tipine göre sınıflandırılmaktadır. Tek vidalı ekstrüderler ve çift vidalı ekstrüderler arasında genellikle çift vidalı ekstrüderler tercih edilmektedir (Karlı, 2011).

Çift vidalı ekstrüderler de dönme yönü ve vidaların iç içe geçmesine göre ayrılırlar. Vidalar aynı yönde dönüyorsa aynı yönde dönen çift vidalı ekstrüder, zıt yönde dönüyorsa ters yönde dönen çift vidalı ekstrüder olarak ayrılırlar. Ayrıca aynı yönde dönen çift vidalı ekstrüderde yüksek hızlarla çalışmak mümkündür. Bununla birlikte çift vidalı ekstrüderlerde vidalar tamamen ayrı, tamamen iç içe geçmiş ya da kısmen iç içe geçmiş şekilde de olabilirler (Şekil 1.4). Vidalar birbirine paralel durabileceği gibi konikte durabilirler (Kızıl, 2019).



Şekil 1.4. Çift vidalı ekstrüderlerin vida tipleri (Kızıl, 2019)

1.5.2. Laboratuvar tipi karıştırıcılar

Deneysel çalışmalarda hem zamandan kazanç sağlamak hem de daha düşük maliyet ile araştırmalar yapabilmek için, küçük boyutlu ve düşük üretim kapasitesine sahip laboratuvar ölçeli karıştırıcılar tercih edilmektedir (Karlı, 2011). Bu tez çalışması kapsamında da laboratuvar tipi çift ve konik vidalı bir mikro harmanlayıcı ekstrüder kullanılmıştır (Şekil 1.5).

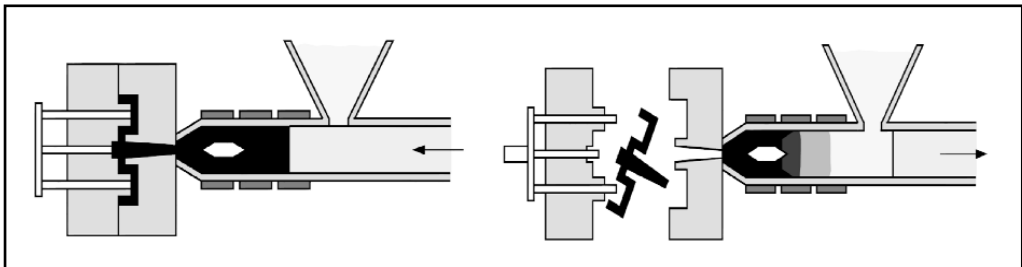


Şekil 1.5. Laboratuvar tipi ekstrüder (Kızıllı, 2019)

1.5.3. Enjeksiyon yöntemi ile kalıplama

Bazı termosetlerin ve termoplastik malzemelerin pelet ve/veya toz halden eriyik hale getirilerek basınçla birlikte istenilen tasarımda bir kalıba alınması ve katılaşıp nihai ürün elde edilmesi işlemini temeline dayanan üretim yöntemine enjeksiyon kalıplama yöntemi denilmektedir. Şekil 1.6'da da şematik bir yapıyı verilmiş olan enjeksiyon makinesinin üç temel işlevi bulunmaktadır. Bu işlevler (Karşlı, 2011);

1. Polimerin eriyerek basınçla birlikte akmasını sağlamak,
2. Eriyen polimerin kalıba enjeksiyon yöntemiyle iletilmesi,
3. Kalıba enjekte edilen polimerin katılaşıp kadar beklemesi ve nihai ürünün kalıptan alınmasıdır.



Şekil 1.6. Plastik enjeksiyonla kalıplama cihazı (Karşlı, 2011)

Ayrıca maliyet ve ürün kalitesi açısından enjeksiyon cihazı yukarıdaki temel işlemlere uygun olacak şekilde optimize edilmemiş bir sisteme sahip olmalıdır (Karlı, 2011).

1.6. Kompozit Malzemelerin Karakterizasyon Yöntemleri

Kompozit malzemelerin termal, tribolojik, mekanik ve termomekanik özelliklerini belirlemek ve ayrıca yüzey morfolojilerini incelemek için çeşitli karakterizasyon yöntemleri bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında malzemelerin özelliklerini belirlemek ve incelemek için kullanılan analiz ve testler; Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy-FTIR) analizi, çekme testi, dinamik mekanik analiz (DMA), termomekanik analiz (TMA), aşınma testi, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), termogravimetrik analiz (TGA), boyutsal kararlılık analizi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) olarak seçilmiştir. Bu bölüm belirlenen karakterizasyon yöntemlerinin özellikleri hakkında bilgileri içermektedir.

1.6.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi analizi (FTIR)

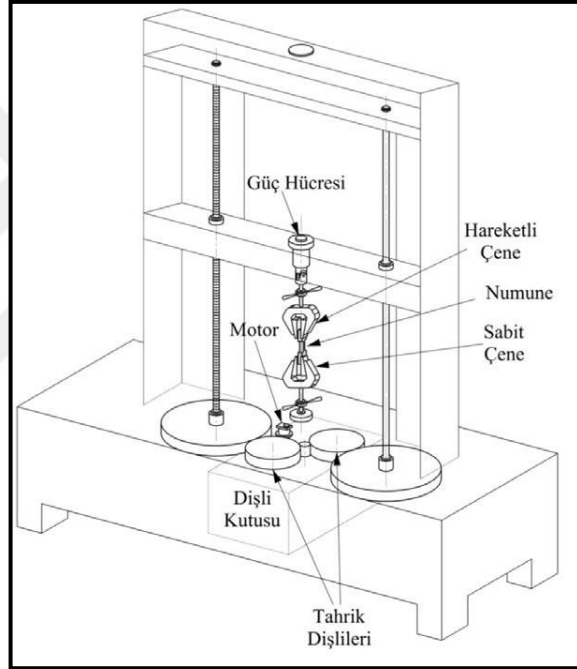
Kızılötesi spektroskopisi, son yıllarda sıklıkla tercih edilen ve bileşikleri atomsal boyutta karakterize etmeyi sağlayan analitik bir yöntemdir. Her madde kendine ait bir kızılötesi spektruma sahiptir. Bu spektrum, özelliği belirlenmek istenen maddeden kızılötesi ışınlar geçirilerek elde edilir. FTIR cihazının karakterizasyon prensibi, maddeyi oluşturan moleküllerin atomlar arası bağlarının titreşimi ile açıklanmaktadır. Şekil 1.7'den de görüleceği üzere bir ışın kaynağından üretilen radyasyon detektörden önce interferometre vasıtasıyla analizi yapılacak numuneye gönderilir. Detektörden alınan sinyaller amplifikasyonu aracılığıyla çoğaltılıp oluşturulan analog veriler dijital dönüştürücüyle Fourier dönüşümü için bilgisayara gönderilir (Kodal, 2014).



Şekil 1.7. FTIR cihazının çalışma prensibi (Kodal, 2014)

1.6.2. Çekme testi

Malzemelerin elastik ve plastik davranışlarını anlamak, mekanik özelliklerini belirlemek ve doğrudan mühendislik hesaplarında kullanabilmek amacıyla en çok kullanılan karakterizasyon yöntemi çekme testidir. Malzemenin taşıyabileceği maksimum gerilmeyi ya da plastik deforme olma eşiğini tayin etmeye yarayan çekme testi, malzemenin mukavemetini anlamak açısından oldukça önemlidir. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme-gerinme eğrileri sayesinde numuneye ait çekme ve akma dayanımı, elastisite modülü, kopma uzaması gibi veriler elde edilmektedir (Yılmaz, 2015).



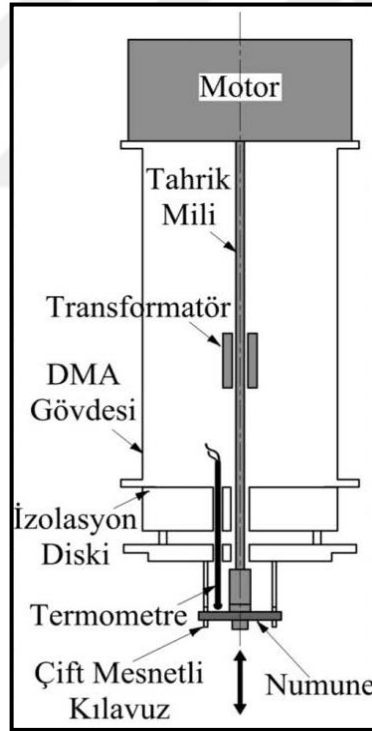
Şekil 1.8. Çekme testi cihazının şematik gösterimi (Yılmaz, 2015)

Şekil 1.8'den bir çekme cihazının temel yapısı ve çalışma prensibi incelenecek olursa, biri hareketli diğeri sabit olan iki çene arasına standartlara uygun test numunesi yerleştirilir ve numune sabitlenerek hareketli çene vasıtasıyla belirlenen parametrelerde ve sabit hızda hareket ettirilir. Buradan çekme kuvvetine karşılık gelen uzama ölçülerek kaydedilir ve eğrilere dönüştürülür (Yılmaz, 2015).

1.6.3. Dinamik mekanik analiz (DMA)

Özellikle polimer malzemelerin belirli frekansta dinamik bir yük altında sıcaklığın da etkisiyle reolojik ve termal davranışlarının belirlenmesi ve viskoelastik özelliklerinin incelenmesi için dinamik mekanik analiz sıklıkla kullanılan bir karakterizasyon yöntemidir (Kızıllı, 2019).

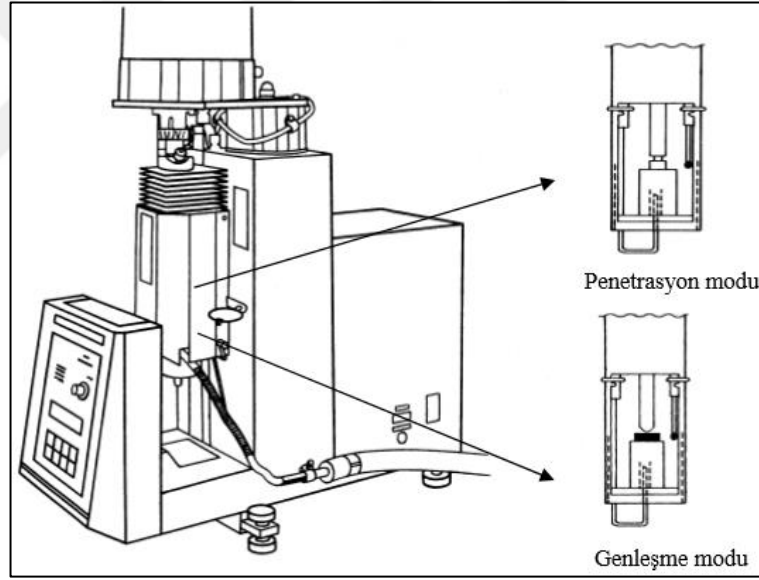
Dinamik mekanik analiz sinüzoidal titreşim kuvveti uygulanan numunenin verdiği cevabın analiz edilmesi temeline dayanmaktadır. Test sonucunda numunenin elastik davranışı hakkında ve enerji depolama miktarı bilgi veren depo modülü (E') ve viskoz davranışını temsil eden ve ısı enerji dağıtabilme kabiliyetini gösteren kayıp modül (E'') elde edilir. Bu iki modülün birbirine oranıyla kayıp faktör adı verilen tan delta'yı değerleri elde edilir. Şekil 1.9'da bir DMA cihazının temel olarak yapısı verilmiştir (Kızıllı, 2019).



Şekil 1.9. Dinamik mekanik analiz cihazının temel yapısı (Kızıllı, 2019)

1.6.4. Termomekanik analiz (TMA)

Termomekanik analiz, termoplastik ve/veya termoplastik kompozit bir malzemede sıcaklığın etkisinde oluşan boyutsal değişimlerin ve deformasyonun ölçülebildiği bir karakterizasyon yöntemidir. Belirlenen metotlara göre malzemeye ait elastik davranışlar, viskoz akış ve termal genleşme özellikleri tespit edilebilir. Numune, sabit, artan veya ayarlanmış kuvvet uygulanarak dilatometre vasıtasıyla şişme ya da çekme, yumuşama, genleşme gibi boyutsal değişimlerin ölçülmesi prensibine dayanarak analiz edilmektedir. Termomekanik analiz uygulamaları, genleşme, tek eksenli çekme ya da deformasyon modüllerini içerebilir. Tüm bunlarla birlikte malzemeye ait camsı geçiş sıcaklığı, erime ve yumuşama sıcaklığı da bu test vasıtasıyla belirlenebilir (Ertürk, 2007). Şekil 1.10’da termomekanik analiz cihazının şematik görünümü verilmiştir.

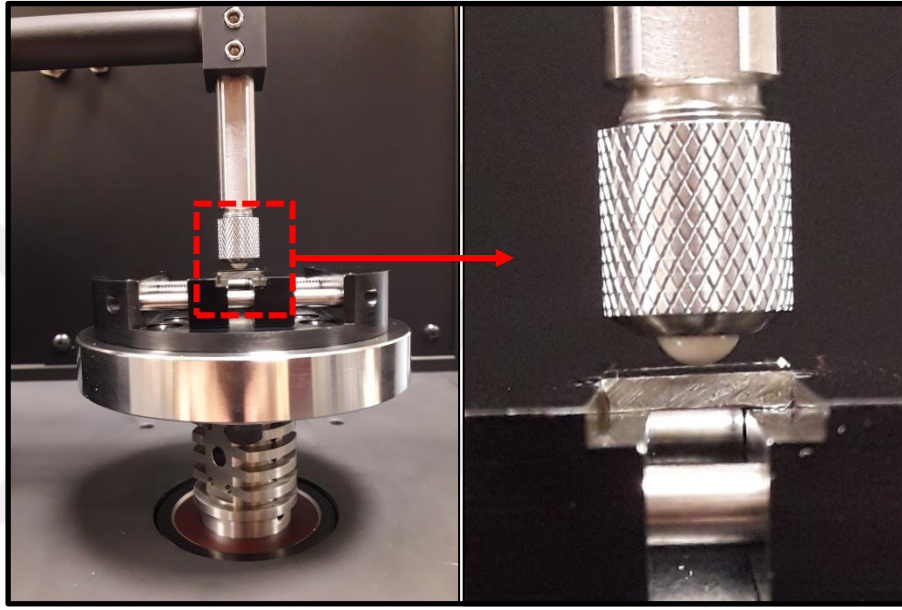


Şekil 1.10. Termomekanik analiz cihazı (Ertürk, 2007)

1.6.5. Aşınma testi

Genel olarak aşınma, temas eden yüzeyler ya da yüzey parçacık sistemleri arasında mekanik etkilerle birlikte yüzeyden parça ayrılması şeklinde tanımlanır. Aşınma çoğu zaman istenmeyen bir durumdur (Kızıl, 2019). Çeşitli aşınma mekanizmaları bulunmakla birlikte tez çalışması kapsamında numunelere pin-on-disk metodu kullanılarak aşınma testi uygulanmıştır. Şekil 1.11’de pin-on-disk cihazının yapısı verilmiştir.

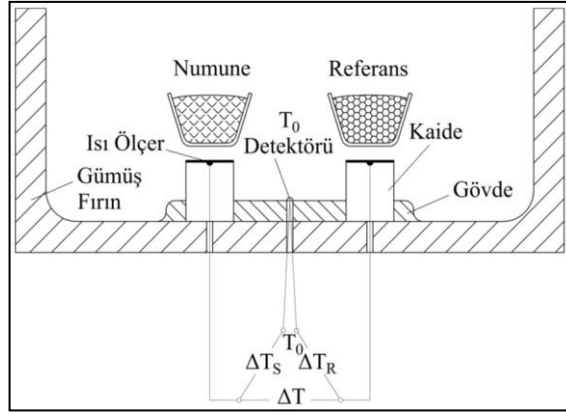
Pin-on-disk yöntemi ile aşınma testi, kayma mesafesi ve hızı, sürtünme yarıçapı ve yük değişkenleri kullanılarak hareketli bir disk üzerine numunenin yerleştirilip, yük koluna ağırlık yükleyerek aşındırıcı bir uç vasıtasıyla numunenin aşındırılması ve kol içerisindeki yük hücresinin aşınma sırasında oluşan sürtünme kuvvetini algılayarak buradan ortalama sürtünme katsayısını hesaplaması prensibiyle çalışmaktadır. Böylece test sonrasında malzemenin tribolojik özellikleri hakkında bilgi edinilebilir (Kızıllı, 2019).



Şekil 1.11. Aşınma cihazı ve uygulaması (Kızıllı, 2019)

1.6.6. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)

Polimer esaslı malzemelerin ısı özelliklerini belirlemede diferansiyel taramalı kalorimetre sıklıkla kullanılan bir karakterizasyon yöntemidir. Numune, bir referans malzemeye göre sıcaklıkların aynı olacak şekilde ısı akış durumuna göre test edilir. Böylece malzemeye ait entalpi değişimleri (ΔH), camsı geçiş sıcaklığı (T_g), erime sıcaklığı (T_m) ve kristalizasyon sıcaklığı (T_c) gibi değerler tespit edilebilir (Kızıllı, 2019).

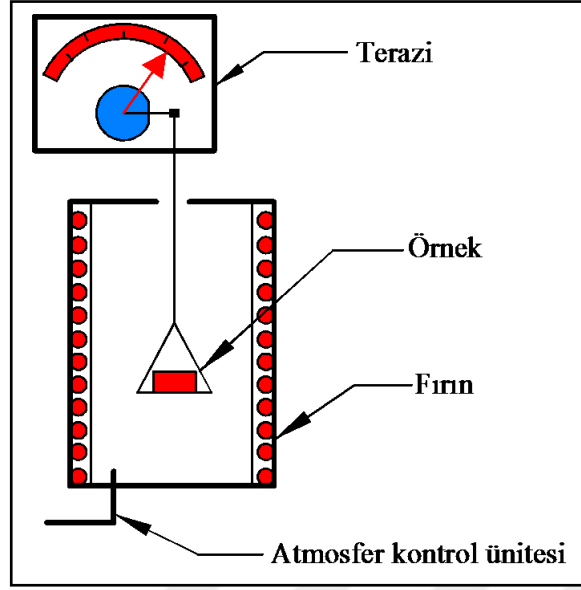


Şekil 1.12. Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazının şematik görünümü (Kızıl, 2019)

Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazında (Şekil 1.12) iki adet hazne bulunmaktadır. Bunlardan biri numune diğeri referans içindir. Pan adı verilen numune kaplarından boş bir tanesi referans haznesine, diğeri ise içerisine test edilecek örnek koyularak numune haznesine yerleştirilir ve bir bilgisayar programı vasıtasıyla haznelere testin başlama sıcaklığına getirilir. Daha sonra belirlenen ısıtma hızında ve ısıtma derecesine kadar gerekli soğutma-ısıtma işlemi uygulanır. Test sonucunda elde edilen grafikler yardımıyla yukarıda belirtilen numuneye ait ısıl özellikler hesaplanır (Kızıl, 2019).

1.6.7. Termogravimetrik analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz bir malzemenin ısıl kararlılığını, içerdiği uçucu maddeyi ve/veya nem miktarını ve en önemlisi bozunma sıcaklığı hakkında bilgi veren, kontrollü bir ısıtma atmosferinde malzemenin ağırlığındaki değişimi zamana göre ölçme prensibine dayanan bir karakterizasyon yöntemidir (Karlı 2014).



Şekil 1.13. Termogravimetrik analiz cihazının şematik görünümü (Karşlı 2014)

Şekil 1.13’de verilen şematik gösterimde test edilecek numune cihazın hassas terazisine yerleştirilerek fırının içerisine gönderilir. Daha sonra belirlenen ısıtma hızında ve sıcaklık aralığında fırın ısıtılarak numunenin kütlesinde meydana gelen değişime ait veriler cihazı kontrol eden bilgisayar tarafından işlenir. Böylece testin sonunda numuneye ait kütle kaybının sıcaklığa veya zamana bağlı değişimi gösteren eğriler elde edilerek numuneye ait ısıl kararlılık özellikleri belirlenebilir (Karşlı 2014).

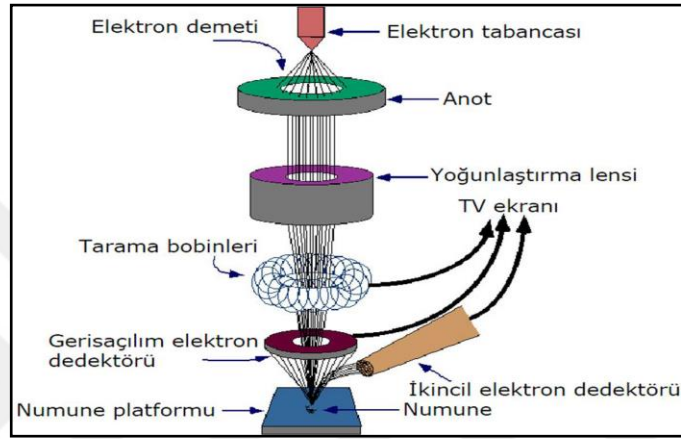
1.6.8. Boyutsal kararlılık analizi (BKA)

Boyutsal kararlılık analizi, malzemelerin farklı sıcaklıklarda değişen boyutsal davranışlarını inceleyebilmek amacıyla belirli ölçülerde hazırlanmış numunelerin bir plaka üzerinde belirli bir süre fırın içerisinde belirlenen sıcaklıklarda bekletilmesi ve daha sonra oda sıcaklığındaki bir ortama alınarak yine belirli bir süre bekletildikten sonra son boyutlarının ölçülüp ilk boyutlarıyla karşılaştırılması ve numunelerin sadece tek yönde boyutlarında meydana gelen yüzde değişimlerin hesaplanıp analiz edilmesi prensibine dayanan bir karakterizasyon yöntemidir (Tabi ve diğ., 2013).

1.6.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu malzemelerin yüzey morfolojilerini ayrıntılı bir şekilde incelemek amacıyla 10 ile 50.000 kat arasında büyütme sağlayabilen yüksek

voltaj kullanılarak hızlandırılan elektronların vakum altında numune yüzeyine gönderilerek bu elektronların yansması ya da geri saçılması sonrasında algılayıcılarda toplanıp bir monitör vasıtasıyla görüntülenmesi prensibine dayanmaktadır (Kızıllı, 2019). Taramalı elektron mikroskobundan net görüntüler elde edebilmek için polimer malzemelerin yüzeylerinin altın ya da alüminyum gibi iletken bir film tabakayla kaplanması gerekir (Kızıllı, 2019). Taramalı elektron mikroskobuna ait şematik bir gösterim Şekil 1.14’de verilmiştir.



Şekil 1.14. Taramalı elektron mikroskobunun şematik görünümü (Kızıllı, 2019)

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde tez konusu kapsamında yapılan çalışmaları desteklemek amacıyla ve benzer konularla ilgili bilimsel araştırmaları inceleyip tez kapsamında yapılan çalışmaların literatürdeki eksikliği ne şekilde dolduracağını daha iyi anlayabilmek adına bir araştırma yapılmıştır.

Günlük hayatta kullanılan malzemelerin çevreye ve doğanın bütünlüğüne verdiği zararın önlemek amacıyla biyo-bozunur türde polimer malzemelerin kullanılması son yıllarda çokça çalışılan bir konu haline gelmiştir. Petrol türevi polimerlerin aksine mısır nişastası, atık bitkisel yağlar ve tarımsal hammaddelerden elde edilebilen poli(laktik asit) (PLA), paketlenme endüstrisinden otomotiv sanayiine kadar geniş kullanım alanına sahip bir polimer çeşididir. Fakat bazı polimerlerle kıyaslandığında mekanik, termomekanik, termal ve tribolojik özelliklerinin düşük performans gösterdiği bilinmektedir. Bu sebeple PLA'nın biyo-bozunur özelliğinden ödün vermeden daha yüksek performanslı malzeme elde edebilmek amacıyla yine doğal takviye malzemeleri kullanılarak kompozit yapılar elde edilmesi yapılan araştırmalara sıklıkla konu olmuştur (Yusoff ve diğ., 2016; Moustafa ve diğ., 2019; Kassegn ve diğ., 2019; Cheng ve diğ., 2009; Botta ve diğ., 2015).

PLA matrisi içerisine birer doğal lif olan, Hindistan cevizi lifi, bambu lifi ve kenaf lifi tek yönde yönlendirilmiş şekilde takviye edilerek oluşturulan kompozit malzemelerle yapılan çalışmada, kenaf lifi- Hindistan cevizi lifi / PLA, bambu lifi - Hindistan cevizi lifi /PLA ve Hindistan cevizi lifi - bambu lifi - kenaf lif /PLA şeklinde 3 farklı kompozit yapı oluşturularak çekme ve eğme testine tabi tutulmuştur. Tüm kompozit yapılarda çekme dayanımının saf PLA matrisine göre artış gösterdiği ve 3 lif türünün birlikte kullanıldığı kompozit yapıda liflerin ikiye katlanarak kullanılmasına göre çekme dayanımında daha fazla artış olduğu bulgusuna varılmıştır. Bununla birlikte eğme dayanımları incelendiğinde yine aynı şekilde saf PLA matrisine göre artış olduğu belirtilmiştir. En yüksek eğme dayanımının da yine üç lif türünün birlikte kullanıldığı kompozitte elde edildiğini bildirmişlerdir (Yusoff ve diğ., 2016).

Enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmiş rastgele dağılımlı ağırlıkça %15 kısa sisal lif içeren PLA matrisli kompozitlerin çekme ve eğme dayanımlarının incelendiği bir çalışmada, ASTM standartlarına göre yapılan testlerin sonucunda yaklaşık 44 MPa çekme dayanımı ve yaklaşık 75 MPa eğme dayanımı bulguları elde edilmiştir (Kassegn ve diğ., 2019).

Yüzeyi modifiye edilmiş nano kil ve zincir uzatıcı olarak kullanılan Joncryl takviyesiyle elde edilen PLA matrisli kompozitlerin özellikleri incelenmiştir. Yapılan morfolojik analizler sonrasında matrise zincir uzatıcı eklenmesinin takviye malzemesinin dağılımının iyileştiği bulgusuna varılmıştır. Ayrıca Joncryl eklenmesiyle polimer zincirlerinin uzayıp dallanarak moleküler ağırlığının arttığı böylece uzayan zincirlerin dallanması polimer yapının dolanmış zincir yoğunlunu arttırarak uzama esnasında zincirlerin birbirleri üzerinde kaymasını engellediği bununda kompozitlerin modül ve tokluk değerlerinde dikkat çeken derecede iyileşmeler sağlandığı yönünde bilgiler de eklenmiştir. Fakat yapıya joncryl eklenmesiyle uzun zincirli dallanmış bir yapı oluşması sebebiyle diferansiyel taramalı kalorimetre analizi sonrasında oluşturulan kompozitte yüzde kristalinite değerinde azalma görülmüştür (Najafi ve diğ., 2012).

Çift vidalı ekstrüder yöntemiyle üretilen ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında selüloz nanofiber takviyesiyle elde edilen PLA matrisli kompozitlere çekme testi ve dinamik mekanik analiz uygulayan araştırmacılar çekme dayanımının, çekme modülünün artan takviye oranıyla arttığını, ayrıca depolama modülünün de aynı şekilde tüm oranlar için arttığı bulgusuna ulaşmışlardır. Bununla birlikte %5 ağırlıkça selüloz nanofiber içeren kompozitte dinamik mekanik analiz sonucunda pik sıcaklık değerinin saf PLA'ya göre 6 °C daha iyileşme gösterdiği bulgusunu elde etmişlerdir (Jonoobi ve diğ., 2010).

Ağırlıkça %2, 5, 8 ve 10 oranlarında rastgele dağılımlı kısa tavuk tüyü elyaf takviye edilerek çift vidalı ekstrüder ve enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilen PLA matrisli kompozitlere çekme testi, dinamik mekanik analiz, termomekanik analiz diferansiyel taramalı kalorimetri analizi ve termogravimetrik analiz araştırmacılar tarafından uygulanmıştır. Çekme testi sonucunda saf PLA matrisine kıyasla artan tavuk tüyü takviyesiyle çekme dayanımında 10 MPa'dan daha az bir düşüş meydana

geldiği bulgusuna varmışlar fakat her ağırlık oranı için çekme modülünün saf PLA'ya kıyasla daha yüksek olduğu verisini elde etmişlerdir. Dinamik mekanik analiz sonucunda, PLA matrisine artan oranda takviye miktarıyla birlikte depolama modülünde artış elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Bununla birlikte termomekanik analiz sonucunda termal genleşme katsayısı tüm ağırlık oranları için saf PLA'dan yüksek çıktığı sonucunu elde etmişlerdir. Diferansiyel kalorimetri ve termogravimetrik analiz sonuçlarına bakıldığında, DSC analizi sonucunda malzemenin sadece kristalinite değişiminde küçük bir değişim meydana geldiği, TGA testi sonucunda ise artan takviye oranıyla malzemenin ağırlık kaybına uğradığı sıcaklık değerinde düşüş gözlemlenmiştir (Cheng ve diğ., 2009).

Ağırlıkça %80 PLA, %10 PC ve %10 alkaliyle yüzey muamelesi görmüş keten lifi içeren, laboratuvar tipi ekstrüder ve enjeksiyon kalıplamayla üretilen kompozitlerin termal ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Alkali ile yüzey muamelesi işleminde NaOH oranı %2, 5 ve 10 olacak şekilde değiştirilerek keten lifine uygulanmıştır. Keten lifine uygulanan NaOH oranının kompozit malzemenin özellikleri üzerine etkisi incelendiğinde, sadece %2 NaOH ile yüzey işlemi görmüş keten lifinin doğal keten lifi eklenmiş kompozite göre çekme dayanımını ve modülünü arttırdığı ve bu oranın optimum özellikleri verdiği bulgusuna varılmıştır. Dinamik mekanik analiz sonuçları incelendiğinde, tıpkı çekme sonuçlarına benzer şekilde %2 NaOH ile işlem görmüş keten lifin en iyi depo modülü değerini gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Diferansiyel kalorimetre sonuçları, tüm kompozitler için camsı geçiş sıcaklığının ve erime sıcaklığının dikkat çeken bir şekilde değişmediğini ancak %2 NaOH ile işlem görmüş keten lifin en iyi kristalinite yüzdesini verdiğini ortaya çıkartmıştır (Karsli ve Aytac, 2014).

Yapılan bir çalışmada ağırlıkça %20, 40 ve 60 oranlarıyla trietoksi-vinilsilan kullanılarak silanlama ile yüzey modifikasyonu işlemi uygulanmış ve ağırlıkça %20 işlem uygulanmamış muz lifi takviye edilerek üretilen PLA matrisli kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri araştırılmıştır. Muz lif eklenmesiyle camsı geçiş sıcaklığında bir miktar artış elde edildiği bulgusuna varılmıştır. Fakat yüksek oranda lif katkısının malzemenin camsı geçiş sıcaklığını düşük oranda olduğu kadar değiştirmede eklenmişlerdir. Kompozitlerin %5 ağırlık kabına uğradığı sıcaklık değerleri incelendiğinde artan muz lifi oranıyla bozunmaya başladığı sıcaklığının

düştüğü gözlemlenmiştir. Bununla birlikte ısı genleşme sıcaklık değerinin silanlama ile yüzey modifikasyonun da etkisiyle 2 katından daha fazla arttığı bulgusu elde edilmiştir. Mekanik özellikler incelendiğinde, çekme dayanımı ve modülünün arttığı ayrıca ağırlıkça %20 lif içeren silanlı/silansız kompozit karşılaştırıldığında silanlama işleminin çekme dayanımını daha da iyileştirdiği sonucu elde edilmiştir. Aynı bulgular eğme dayanımı için de benzerlik göstermektedir. Ancak darbe dayanımı değerlendirildiğinde, tüm kompozitler için saf PLA'nın altında kaldığı gözlemlenmiş bunun sebebinin lif takviyesiyle malzemenin yüzde uzama değerinin düşerek rijitliğinin arttığını bu sebeple kırılma eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir (Shih ve Huang, 2011).

Epoksi reçine ve poliüretan karışımı matris malzemesine nitrik asit ve KH560 silan bileşiği ile ayrı ayrı yüzey modifikasyonu yapılmış %1, 2 ve 3 ağırlık oranında bazalt elyaf içeren kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada iki yüzey modifikasyonu içinde kompozit malzemelerin kayma dayanımının saf matrise göre büyük oranda artış gösterdiği fakat bu artışın %2 elyaf içeren kompozitte maksimum değerine ulaştığı bilgisine varılmıştır. Ayrıca termal özellikler incelendiğinde artan elyaf oranıyla birlikte malzemenin bozunma sıcaklığında iyileşme elde edilmiştir. Ancak KH560 bileşiğiyle yapılan modifikasyon sonucunda bu iyileşmenin nitrik asit ile yapılan iyileşmeden daha düşük olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Bunun sebebi olarak KH560 bileşiğinin içerdiği organik karbon-karbon bağlarından kaynaklanan düşük termal özellik olduğunu belirtmişlerdir (Chen ve diğ., 2012).

(3-aminopropil) trietoksisilan (AP), (3-Glisidyloxipropil) trimetoksisilan (GP) ve (3-trimetoksisilil) propilmetakrilat (MA) bileşiklerini ayrı ayrı kullanılarak silanlama işlemi yapılan bazalt elyaf, Poli(bütlen tereftalat) matris içerisine laboratuvar tipi çift vidalı ekstrüder ve enjeksiyon kalıplama yöntemi ile ağırlıkça %20 olacak şekilde takviye edilmiştir. Oluşturulan kompozitlerin özelliklerini incelemek için silanlanmış bazalt elyafa uygulanan spektroskopi analizi sonucunda, tüm silan bileşiklerine ait karakteristik pikler gözlemlenmiş ve silanlama işleminin başarıldığı bilgisi verilmiştir. Çekme testi sonuçları tüm silanlama prosesleri için çekme dayanımı ve Young modülü değerlerinin saf matristen ve silanlanmamış bazalt elyaftan oldukça yüksek olduğunu göstermiştir. Dinamik mekanik analiz sonucunda yine aynı şekilde

ara yüzey iyileşmesini destekleyecek şekilde en yüksek depo modülü silanlı bazalt elyaf içeren kompozitlerde gözlemlenmiştir. Yapılan testler sonucunda silan verimliliği karşılaştırıldığında $GP > AP > MA$ şeklinde bir sıralama yapılmıştır (Arslan ve Dogan, 2018).

Bazalt elyafa sodyum hidroksit (NaOH) ve bir silan bağlama ajanıyla (KH550) yüzey modifikasyonu işlemi uygulanmıştır. Yapılan analizler sonrasında mekanik özelliklerin geliştirilmesi adına gereken optimum silan bağlama ajanı miktarını belirleyebilmek için alkali ile yüzey modifikasyonu uygulanan bazalt elyaf ve PLA matrisiyle oluşturulan kompozitlere çekme testi uygulanmış ve NaOH oranının en iyi değeri 15 g/l'de verdiği bulgusuna ulaşılmıştır. Aynı şekilde KH550 oranı belirlemek için de farklı oranlarda silan bileşiğiyle silanlanmış bazalt elyaflar ile oluşturulan kompozitlere çekme testi yapıldığında belirli bir orana kadar çekme dayanımının artış göstererek en iyiye ulaştığı, sonrasında çekme dayanımının tekrar düştüğü belirtilmiştir ve böylece en iyi silan bağlama ajanının %2 oranında olması gerektiği bulgusu elde edilmiştir (Liu ve diğ., 2019).

Naylon 6 matris içerisine 3-glisidoksipropiltrimetoksisilan (GF80), N- (2-Aminoetil) -3-aminopropiltrimetoksisilan (GF91) ve 3-Aminopropiltrioksisilan (GF93) bileşikleriyle ayrı ayrı yüzey modifikasyonu yapılmış bazalt elyaf eklenen kompozitlerin özellikleri çekme, eğme testi ve dinamik mekanik analiz ile incelenmiştir. Öncelikle ağırlıkça %30 üç farklı silan bileşiğiyle silanlanmış bazalt elyaf takviye edilerek yapılan testler sonucundan en uygun silan bileşiğinin GF80 olduğuna karar verilmiştir. Daha sonra optimum silan oranını bulmak adına %0,5, 1, 2, 4 oranlarında GF80 bileşiğiyle hazırlanan çözeltilerde bazalt elyafa silanlama işlemi yapılmış ve testler sonucunda çözeltideki silan oranının %4 olmasına karar verilmiştir. En uygun silan bileşiği ve optimum silan miktarı belirlendikten sonra ağırlıkça % 10, 20, 30 ve 40 silanlanmış bazalt elyaf takviye edilen kompozitlerin özellikleri incelendiğinde, artan elyaf oranıyla birlikte malzemenin çekme, eğme ve darbe dayanımlarının dikkat çeken bir şekilde arttığı bilgisine varılmıştır. Ayrıca aynı şekilde dinamik mekanik analiz testi sonuçları da ara yüzey mukavemetinin silanlama ile iyileştirildiğini ve artan elyaf oranıyla malzemenin depo modülünün arttığını göstermiştir (Deak ve diğ., 2010).

Kısa bazalt elyaf takviyeli poliimid matrisine ağırlıkça % 10, 20, 30, 35, 40 oranlarında grafit ve ağırlıkça % 10, 20, 30, 40, 50 oranlarında MoS₂ katılarak oluşturulan kompozitlere kayma hızı ve uygulanan yük gibi çeşitli parametreler değiştirilerek ring-on-block modunda aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma oranı ve sürtünme katsayısının araştırıldığı testte, %40 ağırlık oranında MoS₂ ve %35 oranında grafitin ayrı ayrı katıldığı kompozitlerin en iyi aşınma davranışını gösterdiği ayrıca iki katkı karşılaştırıldığında en iyi sonucu MoS₂ katkısının verdiği bulgusuna varılmıştır. Bununla birlikte sürtünme katsayısı ve aşınma arasındaki ilişkinin, sürtünme durumuyla yani sürtünme hızı ve yük gibi parametrelerle yakından ilgisi olduğu bilgisini eklemiştir (Zhang ve diğ., 2009).

Ağırlıkça %5 kısa cam elyaf, %15, 20, 30 borik asit ve %15 çinko borat - magnezyum hidroksit içeren polyester matrisli kompozitlerin alev geciktirme, termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. En iyi alev geciktirme özelliğini cam elyaf ve borik asit içeren kompozit malzemeler vermiş, artan oranda borik asit takviyesinin alev geciktirme özelliğini iyileştirdiği bulgusuna varılmıştır. Yapılan termogravimetrik analiz testi sonucunda borik asit ilavesiyle kompozitin bozulmaya başladığı sıcaklık değerinin düştüğü tespit edilmiştir. Mekanik testler sonucunda alev geciktirici katkısının çekme ve eğme modülünü arttırdığı fakat çekme ve eğme dayanım değerlerini düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Ayrıca çekme dayanım değerinin artan borik asit oranıyla düştüğü de sonuçlar arasına eklenmiştir (Demirel ve diğ., 2010).

Doğa dostu yağlayıcı olarak bilinen borik asidin sürtünme ve aşınma özelliklerinin diğer sıvı yağlayıcılarla birlikte etkisi pin-on-disk modunda, bakır alaşımı üzerinde yapılan bir çalışmada incelenmiştir. Tek başına borik asidin kullanılması aşınma davranışını iyileştirmede beklenen verimi gösterememiştir. Fakat ticari şanzıman yağı ile kullanıldığında hem sürtünme hem de aşınma davranışında dikkat çeken bir iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca kanola yağı ile borik asit birlikte kullanıldığında hem tamamıyla doğal hem de iyi aşınma ve sürtünme performansı gösteren bir yağlayıcı elde edildiği ve bunun da mühendislik uygulamalarında kullanılabileceği bulgusuna varılmıştır (Deshmukh ve diğ., 2006).

Poliamid-6 matrisi içerisine artan ağırlık oranında bor oksit, borik asit, ağırlıkça %15 kısa cam elyaf ve alev geciktirici özellikte alüminyum dietil fosfinat (ADP) tipi organik fosfor çift vidalı ekstrüder ve enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle takviye edilerek oluşturulan kompozitlere çeşitli testler yapılarak sonuçları incelenmiştir. ADP ile birlikte borik asit ve bor oksit katkısının malzemenin alev geciktirme özelliğini büyük ölçüde geliştirdiği sonucu elde edilmiştir. Termogravimetrik analiz sonuçları incelendiğinde sadece elyaf takviyesinin malzemenin ağırlıkça %10 bozunma sıcaklığını bir miktar yükselttiği, fakat borik asidin tek başına ilavesinin bozunma sıcaklığını ciddi miktarda düşürdüğü sonucu elde edilmiştir. Bununla birlikte borik asit ve cam elyaf birlikte kullanılarak oluşturulan hibrit kompozitin de aynı şekilde bozunma sıcaklığının saf matrise göre düşük olduğu tespit edilmiştir. Çekme test sonuçları incelendiğinde matrise katkı eklenmesiyle Young modülünün arttığı, kopma uzamanın düştüğü bulgusuna varılmıştır. Ancak matrise borik asit ilavesiyle çekme dayanım değerinin hem tek başına hem de cam elyaflı hibrit kompozitlerde düştüğü sonucu elde edilmiştir. Ayrıca yüksek oranda borik asit ve bor oksit katkısının bu üretim yöntemine uygun olmadığı da araştırmacılar tarafından eklenmiştir (Polat ve Kaynak, 2014).

Yarı yarıya Poli (vinil alkol) (PVA) ve Poli (vinil piroolidon) (PVP) polimerleri kullanılarak hazırlanan matris malzemesine ağırlıkça %5, 10, 15, 20 oranında kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış pomza ilave edilerek kompozit malzemeler oluşturulmuştur. Yapılan taramalı elektron mikroskobu incelemesi sonucunda artan pomza oranıyla malzeme içerisindeki homojen dağılımın azaldığı bulgusuna varılmıştır. Diferansiyel taramalı kalorimetre analizi sonuçları incelendiğinde artan pomza oranıyla malzemenin camsı geçiş sıcaklığında büyük bir düşüş olduğu sonucu elde edilmiştir. Bununla birlikte termal bozunma sıcaklığı artan pomza oranıyla bir miktar artış gösterdiği bulgusu elde edilmiştir. Ayrıca çekme dayanımının da artan pomza oranıyla arttığı ve %15 ağırlık oranında maksimuma ulaştığı daha soran yine polimer karışımından yüksek olacak şekilde bir değere ulaştığı bilgisi eklenmiştir (Ramesen ve diğ., 2016).

Kalsiyum karbonat (CaCO_3) ve pomza partiküllerinin ağırlıkça %1, 5, 10 olarak Poli(fenilen sülfid) (PPS) matrisine laboratuvar tipi çift vidalı ekstrüder ve enjeksiyon kalıplamayla takviye edilmesiyle kompozit malzemeler oluşturulmuştur. Çekme testi sonuçları incelendiğinde CaCO_3 partikülü için saf PPS'e kıyasla sadece ağırlıkça %1 oranda çekme dayanımı değerinin arttığı ve artan oranda CaCO_3 ilavesinin çekme dayanımını düşürdüğü bulgusuna varılmıştır. Pomza partikülü incelendiğinde tüm oranlar için çekme dayanımında artış sağlanmış ve en yüksek artış %1 ağırlık oranı için elde edilmiştir. Yapılan sertlik testi sonucunda matris malzemesine eklenen partiküllerle birlikte %1 ve 5 CaCO_3 dışında artan oranda sertlik değerinde artış meydana gelmiştir. Diferansiyel taramalı kalorimetri analizi sonucunda malzemenin camsı geçiş sıcaklığında %1, 5 CaCO_3 ve pomza katkısıyla artış elde edilmekle beraber %10 oranından katkıyla bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Yüzde kristalinite değişimleri incelendiğinde partikül ilavesiyle saf matrise göre kristalinite oranında artış edilmiş fakat artan oranda partikül miktarıyla birlikte bu artış miktarı düşüşe geçmiştir. Bunun sebebi olarak da partiküllerin düşük ağırlık oranında daha homojen dağılım sağlayarak çekirdeklenmeye neden olduğu bilgisi eklenmiştir (Sahin ve diğ., 2016).

Asidik ve bazik olmak üzere iki tür pomza, amino propil trietoksi silan bağlama ajanı kullanılıp yüzey modifikasyon işlemi uygulanarak ve maleik anhidrit aşılması da uygulanan polipropilen matris içerisine laboratuvar tipi çift vidalı ekstrüder aracılığıyla ağırlıkça %10 olacak şekilde takviye edilmiş ve enjeksiyon kalıplamayla numuneler oluşturulmuştur. Uygulanan su emme testi sonrasında pomza içeren kompozitlerin saf polimere göre yaklaşık 3 kat daha fazla su absorbe ettiği bulgusuna ulaşılmıştır. Fakat silanlama işlemi sonrasında kompozitlerin su emilim değerinde azalma elde edilmiştir. Yapılan çekme testi sonrasında silanlanmamış pomza takviye kompozitlerin çekme dayanımında saf polimere kıyasla bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak silanlama işlemi sonrasında yapıya asidik ya da bazik pomza takviyesiyle çekme dayanımında artış elde edilmiştir. DMA sonuçları incelendiğine yapıya pomza eklenmesiyle depo modülünde iyileşmeler meydana gelmiş, silanlama işlemi sonrasında en iyi depo modülüne silanlanmış asidik pomza içeren kompozitte ulaşılmıştır. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde silanlama işleminin pomza partikülü

takviyeli polipropilen matrisli kompozitin özelliklerini geliştirdiği bulgusu eklenmiştir (Tayfun ve Kanbur, 2018).

Ağırlıkça %10, 20, 30 ve 40 oranlarında pomzanın Poli(propilen) (PP) matris içerisine eklenmesi sonucunda elde edilen kompozit malzemelere çeşitli karakterizasyon yöntemleri uygulanmıştır. Termogravimetrik analiz sonucunda yapıya eklenen pomza miktarının artmasıyla malzemenin bozunma sıcaklığında da artış olduğu bulgusuna varılmıştır. Diferansiyel taramalı kalorimetri analizi sonuçları incelendiğinde, matris içerisine pomza ilavesiyle erime sıcaklığının bir miktar düştüğü fakat pomzanın çekirdeklenme ajanı gibi davranarak kristaliniteyi arttırdığı sonucuna varılmıştır. Dinamik mekanik analiz sonuçlarından kompozitlerin depolama modülünün artan pomza oranında rijitliğin sağlanması sebebiyle arttığı bilgisine ulaşılmıştır. Malzemelerin termal genleşme özellikleri incelendiğinde, artan pomza oranıyla termal genleşme katsayısının düştüğü sonucu elde edilmiştir. Bununla birlikte ısı iletkenlik özelliğinin artan pomza oranıyla arttığı bilgisi de eklenmiştir. Çekme ve eğilme dayanım değerleri incelendiğinde en yüksek değer %10 pomza katkısıyla olduğu ve artan pomza oranıyla dayanım değerlerinin düştüğü bulgusuna varılmış, bunun sebebi olarak da matris içerisinde en homojen dağılım özelliğini %10 pomza içeren kompozitin verdiği bilgisi eklenmiştir. Modül değerleri incelendiğinde artan pomza oranıyla hem çekme hem de eğme modül değerinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır (Sever ve diğ., 2018).

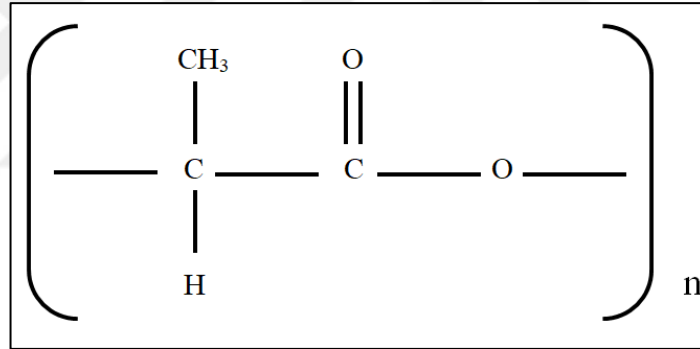
Poli (fenilen sülfid) (PPS) matrisine ağırlıkça %2,5, 5, 10, 15, 20 volkanik kül laboratuvar tipi çift vidalı ekstrüder ve enjeksiyon kalıplama ile takviye edilerek kompozit malzemeler oluşturulmuştur. Dinamik mekanik analiz sonucunda artan volkanik kül oranıyla malzemenin depo modülünde artış olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Yapılan termogravimetrik analiz sonucundan düşük ağırlık oranlarından malzemenin bozunma sıcaklığında belirgin bir değişiklik meydana gelmediği fakat volkanik kül miktarı arttıkça polimer zincirlerinin hareketlerinin kısıtlandığı ve dolayısıyla bozunma sıcaklık değerinin arttığı bulgusu rapor edilmiştir. İki farklı açıda yapılan erozif aşınma testi sonucunda artan oranda volkanik kül takviyesiyle birlikte erozif aşınma oranının da arttığı bilgisi elde edilmiştir. Çalışmanın sonucundan volkanik kül takviyesinin malzemenin mekanik ve termal özelliklerinin iyileştirdiği fakat aşınma dayanımını kötüleştirdiği bilgisi eklenmiştir (Avcu ve diğ., 2014).

3. MALZEMELER VE YÖNTEM

3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Poli(laktik asit)

Poli(laktik asit) (PLA), petrol türevi polimerlerin aksine, doğal yollarla elde edilen, alifatik poliesterler grubuna ait, çevre dostu özellikleriyle de bilinen ve günümüzde paketlenme endüstrisinden otomotiv sanayiine kadar kendine geniş bir kullanım alanı bulan biyo-bozunur bir termoplastik polimer çeşididir. PLA'nın elde edilebildiği başlıca kaynaklar arasında mısır nişastası, bitkisel yağlar ve atık tarımsal hammaddeler sayılmaktadır (Kodal, 2014).



Şekil 3.1. PLA'nın moleküler yapısı

Poli(laktik asit) renksiz, parlak görünümüyle birlikte yaklaşık 55°C camsı geçiş sıcaklığına ve 175°C erime sıcaklığına sahiptir. Ayrıca özellikle tek kullanımlık ambalaj ürünlerinde gerekli raf ömrünü sağladığı için ve imha edildiğinde hem doğal hem de zararsız bir biçimde ayrıldığından atık problemi olarak da büyük bir sorunun çözümü olduğu bilinmektedir (Kodal, 2014). Ayrıca PLA'nın bozunması sırasında açığa çıkan su ve karbondioksit her hangi bir toksik ya da zararlı bir etki bulundurmamaktadır (Boyacıoğlu, 2017).

Tüm bu çevre dostu özelliklerin yanı sıra PLA bazı dezavantajlara da sahip malzemedir. Örneğin bazı durumlarda PLA'nın ana zincirindeki ester gruplarının hidrolize uğrayıp bozulması uzun yıllar sürebilmektedir. Bu durumda ambalaj

sektörü ve medikal alanlarda bazı kısıtlamalara neden olmaktadır. PLA'nın oldukça kırılğan bir yapıya sahip olması üstün özellik beklenen alanlarda kullanıma kısıtlamalar getirmektedir. Bu sebeple modifikasyon ya da takviye işlemleriyle özelliklerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Boyacıoğlu, 2017).

3.1.2. Pomza

Pomza, ülkemizde geniş rezervlere sahip volkanik, gözenekli hafif bir kaya türüdür. Kimyasal olarak silika ve alümina içeren, yoğunluğu $1,0 \text{ g/cm}^3$ 'den az bir yapı olup Mohs skalasına göre 6 sertliğe sahip ve sünger benzeri bir görünümündedir (Bideci ve diğ., 2014).

Pomza, termal özellikleri ve kimyasal direnciyle birlikte sahip olduğu polar gruplar ve geniş yüzey alanıyla da araştırma konuları arasında kendisine yer bulmuştur. Yapısındaki polar gruplar polimerlerle birlikte kullanıldığında çok sayıda etkileşim bölgesi ortaya çıkmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu sayede oluşturulan kompozit yapıdan daha iyi mekanik ve termal özellikler elde edilebilmektedir (Ramesan ve diğ., 2016).

3.1.3. Borik asit

Borlu bileşikler, eski zamanlardan beri, çevre dostu olmaları, toksik olmamaları ve iyi termal özellikleri sebebiyle tercih sebebi olmuşlardır (Cavdar ve diğ., 2014). Borik asit bor türevi olan ve birbiri üzerinde kayma yeteneğine sahip katmanlar bulduran bir yapıdır (Burroughs ve diğ., 1999). Dolayısıyla bu yapı, birlikte kullanıldığı polimere, iyi yük taşıma kapasitesi ve düşük sürtünme katsayısı gibi özellikleri beraberinde getirdiği bilinmektedir (Lovell ve diğ., 2010; Deshmukh ve diğ., 2006). Ayrıca borik asidin alev geciktirici özelliği de kendisine sıklıkla kullanım alanı bulmuştur (Cavdar ve diğ., 2014; Burroughs ve diğ., 1999; Lovell ve diğ., 2010; Deshmukh ve diğ., 2006; Demirel ve diğ., 2010).

3.1.4. Bazalt elyaf

Volkanik bir oluşumdan ortaya çıkan bazalt kayalarının yüksek sıcaklıklarda eriyik haline getirilerek çok sayıda delik içeren bir elekten geçirilmesi ve sarılarak elyaf formunda elde edilmesi sonucunda oluşan bazalt elyaf son yıllarda çevre dostu

olmasıyla ve endüstriyel alanda cam elyaf muadili özellik sergilemesinden dolayı geniş bir kullanım alanına ulaşmıştır. Bununla birlikte bazalt elyafın elde edilmesinde bir öncül malzeme ve herhangi bir katkı maddesi kullanılmamasının ekonomik açıdan büyük önem taşıdığı bilinmektedir (Lopresto ve diğ., 2011; Colombo ve diğ., 2012; Eslami-Fersani ve diğ., 2014). Bazalt elyafın özellikleri değerlendirildiğinde, yüksek ısı dayanımı, ses izolasyonu, kimyasallara karşı dirençli olması, düşük su absorpsiyonu ve gösterdiği yüksek mekanik özelliklerle karşılaşılmaktadır. Böylece otomotiv sektöründen havacılığa kadar cam elyafa alternatif bir malzeme olarak kullanımına rastlanmaktadır (Lopresto ve diğ., 2011; Colombo ve diğ., 2012; Eslami-Fersani ve diğ., 2014).

3.1.5. Tez kapsamında kullanılan malzemeler ve özellikleri

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan malzemelerin isimleri, temin edildiği yerler ve temel özellikleri ayrıntılı bir biçimde Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Tez çalışması kapsamında temin edilen hammaddeler ve özellikleri

Malzeme	Ticari Adı ve Firma Adı	Özellikleri
PLA	Ingeo™ Biopolymer 3260HP/ NatureWorks	Form: Pelet Yoğunluk: 1,24 g/cm ³ Erime sıcaklığı: 200 °C Kalıp sıcaklığı: 25 °C Camsı geçiş sıcaklığı: 55-58 °C Enjeksiyon kalıplama için uygundur.
Bazalt Elyaf	Bazalt Elyaf/Tila Kompozit	Çekme dayanımı: 3000-3840 MPa Çekme modülü: 93-110 GPa Uzama: %3,1-6,0 Yoğunluk: 2,65-2,80 g/cm ³ Fiber uzunluğu: 3 mm
Borik Asit	Borik Asit (H ₃ BO ₃ Orthoboric Acid) / ETİ Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü	Form: Toz Partikül boyutu: 0,125–1,000 mm Yoğunluk: 1,435 g/cm ³
Pomza	Pomza/Kula Belediyesi Gökçeören Tesisleri Kula-Manisa	Form: Toz Partikül boyutu: <100 µm Yoğunluk: 0,55-0,76 g/cm ³ Erime sıcaklığı: 1200 °C Sertlik: 5,5 Mohs
Silan	(3-Aminopropyl)triethoxysilane, 98% H ₂ N(CH ₂) ₃ Si(OCH ₂ CH ₃) ₃ /Alfa Aesar	Form: Sıvı Yoğunluk: 0,948 g/cm ³ Kaynama sıcaklığı: 217 °C Molekül ağırlığı: 221,37 Parlama (flash) sıcaklığı: 104 °C Görünüş (renk): Şeffaf renksiz Çözünürlük (solubility): Toluen, aseton, kloroform ve etanol ile karıştırılabilir.

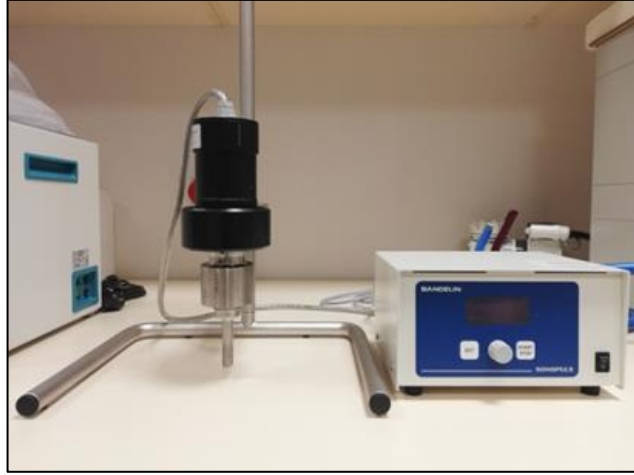
3.2. Takviye Malzemelerinin Yüzey Modifikasyonu

Tez çalışması kapsamında kullanılan pomza, borik asit ve bazalt elyaf malzemelerinin yüzey fonksiyonelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla “sıvı ile dağıtma”, “alkali ile yüzey modifikasyonu” ve “silanlama ile yüzey modifikasyonu” işlemleri uygulanmıştır. Son işlem olan silanlama işlemi sonucunda yüzey fonksiyonelliğini arttıran en iyi silan miktarını belirlemek amacıyla silanlama prosesini oluşturan parametreler değiştirilmiş ve en uygun parametreler tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla her bir takviye malzemesine uygulanan silanlama prosesinin ayrıntıları ayrı ayrı verilmiştir.

3.2.1. Pomzanın yüzey modifikasyonu

Kompozit üretiminde kullanılan bazı partikül türleri yapılarında nispeten daha az fonksiyonel grup içerirler. Bu partikül türlerinin kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılması durumunda daha güçlü polar etkileşimler elde edebilmek için bu partiküllere fazladan yüzey işlemi yapılması gerektiği bilinmektedir (Ryu ve diğ., 2018). “Sıvı ile dağıtma”, “alkali ile yüzey modifikasyonu” ve “silanlama ile yüzey modifikasyonu” bu amaçla kullanılan yöntemlerdir.

Sıvı ile dağıtma yönteminde amaç partikül formdaki takviye malzemelerine uygulanacak yüzey modifikasyonu işlemi öncesinde topaklanmış (aglomera) haldeki partiküllerin ayrılması ve tabakalı yapıdaki takviye malzemelerinin tabakaları arasındaki boşluğun artması, böylece yüzey alanında artış sağlanmasıdır. Tez çalışması kapsamında sıvı ile dağıtma yöntemi için Şekil 3.2’de bulunan ultrasonik karıştırıcı kullanıldı.



Şekil 3.2. Ultrasonik karıştırıcı

Alkali ile yüzey modifikasyonu işlemi ise partiküllere uygulanacak silanlama işlemi öncesinde başvurulabilen bir yöntemdir (Ryu ve diğ., 2018). Bu işlem malzemenin sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi içerisinde bekletilmesi ve ardından süzülerek nötralizasyon işlemine tabi tutulmasını takiben belirli bir sıcaklıkta vakum altında nem alma aşamalarından oluşmaktadır (Ryu ve diğ., 2018; Gwon ve diğ., 2010; Sang ve diğ. 2017).

Alkali muamelesi ile takviye malzemesi yüzeylerinde reaktif karboksil ve hidroksil gruplar oluşması ve böylece alkali muamelesi sonrası uygulanacak silanlama işlemi sırasında takviye malzemesi yüzeyi ve silan molekülü arasındaki etkileşimin artması sağlanır (Ryu ve diğ., 2018; Gwon ve diğ., 2010; Sang ve diğ. 2017).

Silanlama işlemi ise takviye malzemesinin yüzey modifikasyonu için kullanılan en yaygın ve etkin yöntemdir. Bu yöntemde, molekülün bir ucu takviye malzemesi yüzeyi ile reaksiyona girerken diğer ucu ise matris malzemesi ile reaksiyona girer. Bu işlem, belirli oranlarda su ve alkol içerisinde yine belirli bir oranda silan bileşiğinin eklenip oluşan bu çözeltinin karıştırıcı (Şekil 3.2) yoluyla homojen hale getirilmesi ve içerisine takviye malzemesinin eklenmesiyle karıştırma ya da bekleme sonrasında süzülerek yüzeye yapışmayan silan moleküllerinin uzaklaştırılması akabinde vakum altında belirli bir derecede kurutulması aşamalarını içermektedir (Ryu ve diğ., 2018; Gwon ve diğ., 2010; Sang ve diğ. 2017; Dharmalingam ve diğ., 2015; Kutluk ve diğ., 2016).

Bu tez çalışmasında partikül takviyesi olarak kullanılan pomza yüzeyinin modifikasyonu amacıyla kullanılan proseslerin (sıvı ile dağıtma ve alkali ile yüzey modifikasyonu işlemleri “ön işlem” olarak adlandırılmıştır) detayları ve bu proseslerde değiştirilen parametreler ile bu parametrelerin sayısal değerleri Tablo 3.2’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Ayrıca pomza partiküllerinin silanlanması prosesindeki kurutma işleminden bir adım Şekil 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Pomzanın silanlanması prosesine ait proses parametreleri

Numune Kodu	Ön işlem	Çözelti	Silan miktarı	Proses sic. (°C)	Karışma / Bekleme	Takviye malz. Miktarı (g)	Son işlem
P	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
si-P_1	-10 gr pomza 100 ml etanol ile ultrasonik homojenizatörde 1 saat karıştırıldı. -Çözelti süzgeç kağıdından süzülüp %5’lik NaOH çözeltilisinde 2 saat 80°C’de bekletildi. -Çözelti süzgeç kağıdından süzülüp %2’lik 100 ml asetik asit çözeltilisinden ve 100 ml saf sudan geçirildi. -24 saat oda sıcaklığında 6 saat ise 80°C’ de kurutuldu.	50 ml saf su + 50 ml etanol	1 ml silan eklenen su/etanol çözeltisi ultrasonik homojenizatör kullanılarak 15 dakika karıştırıldı.	25	Pomza eklenen silan/etanol/su çözeltisi ultrasonik homojenizatör kullanılarak 45 dakika karıştırıldı.	10	-Çözelti 50 ml etanol ile yıkayıp süzüldü. -24 saat oda sıcaklığında, 6 saat 80 °C’de vakum altında kurutuldu.
si-P_2	- 10 gr pomza 100 ml etanol ile ultrasonik homojenizatörde 1 saat karıştırıldı. - Çözelti süzgeç kağıdından süzülüp %5’lik NaOH çözeltilisinde 2 saat 80 °C’de bekletildi. - Çözelti süzgeç kağıdından süzülüp %2’lik 100 ml asetik asit çözeltilisinden ve 100 ml saf sudan geçirildi. - 24 saat oda sıcaklığında 6 saat ise 80°C’	50 ml saf su + 50 ml etanol	3 ml silan eklenen su/etanol çözeltisi ultrasonik homojenizatör kullanılarak 15 dakika karıştırıldı.	25	Pomza eklenen silan/etanol/su çözeltisi ultrasonik homojenizatör kullanılarak 45 dakika karıştırıldı.	10	-Çözelti 50 ml etanol ile yıkayıp süzüldü. -24 saat oda sıcaklığında, 6 saat 80 °C’de vakum altında kurutuldu.

Tablo 3.2. (Devam) Pomzanın silanlanması prosesine ait proses parametreleri

Numune Kodu	Ön işlem	Çözelti	Silan miktarı	Proses sic. (°C)	Karışma / Bekleme	Takviye malz. Miktarı (g)	Son işlem
si-P_3	<ul style="list-style-type: none"> - 10 gr pomza 100 ml etanol ile ultrasonik homojenizatörde 1 saat karıştırıldı. - Çözelti süzgeç kağıdından süzülüp %5'lik NaOH çözeltisinde 2 saat 80°C'de bekletildi. - Çözelti süzgeç kağıdından süzülüp %2'lik 100 ml asetik asit çözeltisinden ve 100 ml saf sudan geçirildi. - 24 saat oda sıcaklığında 6 saat ise 80°C'de kurutuldu. 	50 ml saf su + 50 ml etanol	5 ml silan eklenen su/etanol çözeltisi ultrasonik homojenizatör kullanılarak 15 dakika karıştırıldı.	25	Pomza eklenen silan/etanol/su çözeltisi ultrasonik homojenizatör kullanılarak 45 dakika karıştırıldı	10	<ul style="list-style-type: none"> -Çözelti 50 ml etanol ile yıkanıp süzüldü. -24 saat oda sıcaklığında, 6 saat 80 °C'de vakum altında kurutuldu.



Şekil 3.3. Silanlanmış pomza partiküllerinin kurutulması

3.2.2. Borik asidin yüzey modifikasyonu

Borik asit, alkol ve suda çözünen bir moleküler yapıya sahiptir (URL-1, 2019). Bu sebeple borik asidin yüzey modifikasyonu için “sıvı ile dağıtma” ve “alkali ile yüzey modifikasyonu” yöntemleri uygulanamadı ve ayrıca partiküllerin çözünmeden dolayı

karıştırılması mümkün olmadığından silanlama işlemi aşağıda belirtilen şekilde gerçekleştirildi.

- 50 ml saf su ve 50 ml etanolden oluşan toplamda 100 ml'lik bir çözelti hazırlandı (Tablo 3.3'de 3. sütun).
- Farklı silan oranları kullanılarak (Tablo 3.3'de 4. sütun) silan/etanol/su çözeltisi hazırlandı.
- Hazırlanan çözelti ultrasonik homojenizatör kullanılarak 25°C'de 15 dakika karıştırıldı.
- Karıştırmanın sonunda çözeltiden 10 ml alınarak 10 g borik asite eklendi.
- Son olarak borik asit içeren çözelti süzme işlemi uygulanmadan petri kabına dökülerek önce oda sıcaklığında kurumaya bırakıldı ardından 6 saat boyunca 80 °C'de vakum altında kurutuldu.

Bu tez çalışması kapsamında partikül takviyesi olarak kullanılan borik asidin yüzey modifikasyonu için kullanılan proseslerin (sıvı ile dağıtma ve alkali ile yüzey modifikasyonu işlemleri "ön işlem" olarak adlandırılmıştır) detayları ve bu proseslerde değiştirilen parametreler ile bu parametrelerin sayısal değerleri Tablo 3.3'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 3.3. Borik asidin silanlanması prosesine ait proses parametreleri

Numune Kodu	Ön işlem	Çözelti bileşenleri	Silan miktarı	Proses sic. (°C)	Karışma / Bekleme	Takviye malzemesi miktarı (g)	Son işlem
BA	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
si-BA_1	Yok	50 ml saf su + 50 ml etanol	1 ml silan eklenen su/etanol çözeltisi ultrasonik homojenizatör kullanılarak 15 dakika karıştırıldı.	25	Silan/etanol/su çözeltisi içerisinde 10 ml alınıp borik asit üzerine damlatıldı.	10	-Çözeltinin oda sıcaklığında buharlaşması beklendi. -6 saat 80 °C'de vakum altında kurutuldu.
si-BA_2	Yok	50 ml saf su + 50 ml etanol	3 ml silan eklenen su/etanol çözeltisi ultrasonik homojenizatör kullanılarak 15 dakika karıştırıldı.	25	Silan/etanol/su çözeltisi içerisinde 10 ml alınıp borik asit üzerine damlatıldı.	10	Çözeltinin oda sıcaklığında buharlaşması beklendi. -6 saat 80 °C'de vakum altında kurutuldu.

Tablo 3.3. (Devam) Borik asidin silanlanması prosesine ait proses parametreleri

Numune Kodu	Ön işlem	Çözelti bileşenleri	Silan miktarı	Proses sıc. (°C)	Karışma / Bekleme	Takviye malzemesi miktarı (g)	Son işlem
si-BA_3	Yok	50 ml saf su + 50 ml etanol	5 ml silan eklenen su/etanol çözeltisi ultrasonik homojenizatör kullanılarak 15 dakika karıştırıldı.	25	Silan/etanol/su çözeltisi içerisinde 10 ml alınıp borik asit üzerine damlatıldı.	10	Çözeltinin oda sıcaklığında buharlaşması beklendi. -6 saat 80 °C'de vakum altında kurutuldu.

3.2.3. Bazalt elyafın yüzey modifikasyonu

Yapılan literatür araştırması sonucunda bazalt elyafın yüzey modifikasyonu prosesinin temel bazı aşamalardan meydana geldiği belirlenmiştir. Bu aşamalar: temin edilen elyafın kimyasal ya da ısıl işleme tabii tutularak yüzeyinin temizlenmesi; belirli oranlarda etil alkol ve saf su ile hazırlanan çözeltilere düşük miktarda silan bileşiği katılması ve karıştırıcı vasıtasıyla çözeltinin homojen hale getirilmesi daha sonra bu çözeltilere elyafın eklenerek belirli bir süre bekletilmesi ve süzülerek önce oda sıcaklığında sonrasında belirli bir sıcaklıkta vakum altında kurutulması şeklinde sıralanabilir (Deák ve diğ., 2010; Samper ve diğ., 2015; Kuzmin ve diğ., 2017; Espana ve diğ., 2013; Sang ve diğ., 2017; Chen ve diğ., 2012; Lee ve diğ., 2017). Literatürden elde edilen bu bilgilerden yola çıkarak, bazalt elyaf yüzeyinin silanlanması prosesinin aşamaları tez çalışması için aşağıdaki şekilde belirlendi:

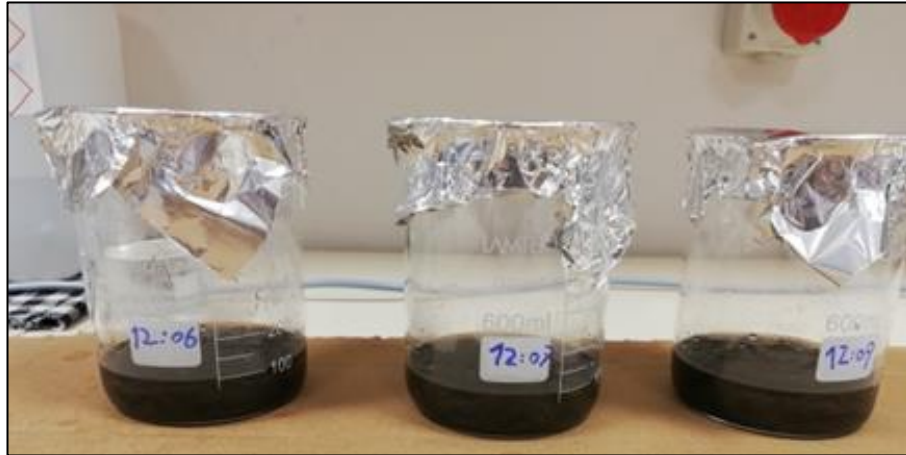
- Firmadan temin edilen bazalt elyaf, 2 saat boyunca 350°C sıcaklıkta yüksek sıcaklık fırınında bekletilmek suretiyle ön işleme tabi tutuldu (Tablo 3.4'de 2. sütun).
- 50 ml saf su ve 50 ml etanolden oluşan toplamda 100 ml'lik bir çözelti hazırlandı.
- Değişen miktarlarda silan kullanılarak silan/etanol/su çözeltisi hazırlandı.
- Hazırlanan çözelti manyetik karıştırıcıda (Şekil 3.4) 15 dakika karıştırıldı.
- Karıştırmanın sonunda çözeltilere bazalt elyaf eklendi ve karışım oda sıcaklığında 1 saat bekletildi.
- Son olarak bazalt elyaf içeren çözelti süzgeç kağıdına aktarıldı ve 3 defa 50 ml etanol ile yıkanarak süzölmeye bırakıldı.

- Süzülen bazalt elyaf önce 24 saat boyunca oda sıcaklığında kurumaya bırakıldı ardından 6 saat boyunca 80 °C’de vakum altında kurutuldu.

Bu tez çalışmasında elyaf takviyesi olarak kullanılan bazalt elyafın yüzey modifikasyonu amacıyla kullanılan proseslerin detayları ve bu proseslerde değiştirilen parametreler ile bu parametrelerin sayısal değerleri Tablo 3.4’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Ayrıca bazalt elyaf yüzeyinin silanlanması prosesinin adımları Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.4. Manyetik karıştırıcılar



Şekil 3.5. Bazalt elyafın silan çözeltisinde bekletilmesi

Tablo 3.4. Bazalt elyafın silanlanması prosesine ait proses parametreleri

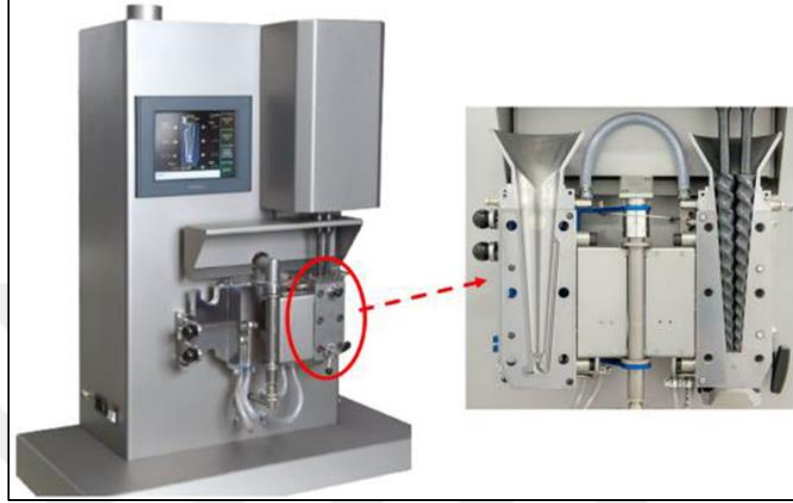
Numune Kodu	Ön işlem	Çözelti bileşenleri	Silan miktarı	Proses sıcaklıkları (°C)	Karışma / Bekleme	Takviye malzemesi miktarı (g)	Son işlem
BF	Firmadan temin edilen bazalt elyaf 2 saat boyunca 350°C de bekletildi.	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
si-BF_1	Firmadan temin edilen bazalt elyaf 2 saat boyunca 350°C de bekletildi.	50 ml saf su + 50 ml etanol	1 ml silan eklenen etanol/su çözeltisi manyetik karıştırıcı kullanılarak 15 dakika karıştırıldı.	25	Bazalt elyaf eklenen silan/etanol/su çözeltisi oda sıcaklığında 1 saat bekletildi.	10	-Çözelti 3 defa 50 ml etanol ile süzüldü. -24 saat oda sıcaklığında 6 saat 80 °C'de vakum altında kurutuldu.
si-BF_2	Firmadan temin edilen bazalt elyaf 2 saat boyunca 350°C de bekletildi.	50 ml saf su + 50 ml etanol	5 ml silan eklenen etanol/su çözeltisi manyetik karıştırıcı kullanılarak 15 dakika karıştırıldı.	25	Bazalt elyaf eklenen silan/etanol/su çözeltisi oda sıcaklığında 1 saat bekletildi.	10	-Çözelti 3 defa 50ml etanol ile yıkanarak süzüldü. -24 saat oda sıcaklığında 6 saat 80 °C'de vakum altında kurutuldu.



Şekil 3.6. Bazalt elyafın silanlama sonrası süzülmesi

3.3. Kompozit Numunelerin Üretilmesi

Değişen ağırlık oranlarında bazalt elyaf, pomza ve borik asit içeren PLA matrisli kompozitlerinin üretimleri ekstrüzyon ile eriyikten karıştırma ve enjeksiyon ile kalıplama yöntemleri kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8).



Şekil 3.7. Laboratuvar tipi mikro karıştırıcı



Şekil 3.8. Laboratuvar tipi enjeksiyonla kalıplama cihazı

Kompozit üretim sürecinin detayları aşağıda verilmiştir:

- Kompozit üretimi öncesinde, PLA malzemesi 50 °C'de vakum altında 6 saat bekletildi ve böylece yapıdaki nemin uzaklaştırılması sağlandı.

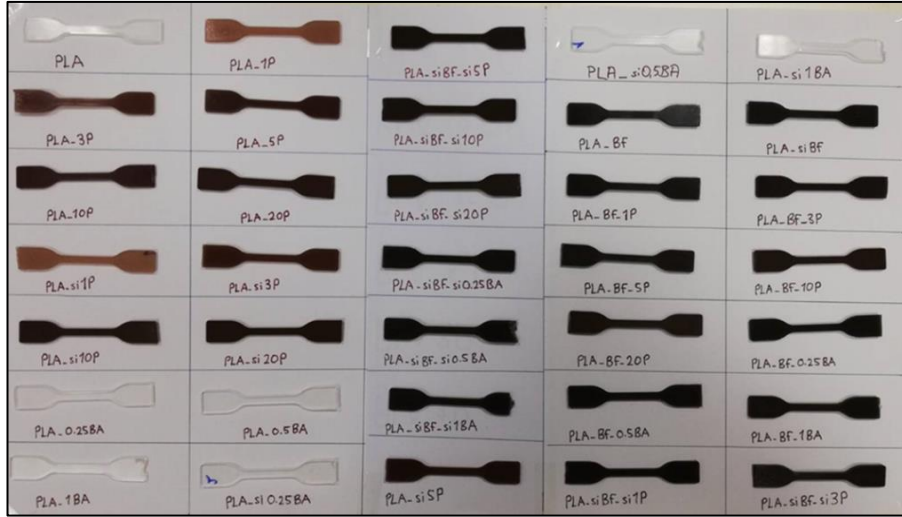
- Eriyikten karıştırma sırasında laboratuvar tipi mikro karıştırıcıda karıştırma sıcaklığı 200 °C, karıştırma süresi 3 dk. ve vida hızı 100 rpm olarak belirlendi.
- Enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle numune üretimi sırasında eriyik sıcaklığı mikro harmanlayıcıdaki ile aynı olurken (200 °C) kalıp sıcaklığı ise 25 °C’de sabit tutuldu. Kalıplama basıncı ise 10 bar olacak şekilde ayarlandı.

3.3.1. Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin karışım oranları

Tez çalışması kapsamında üretilen kompozit türlerinin kodları ve bu kompozit türlerinin ağırlıkça bileşim oranları Tablo 3.5’de verilmiştir. Ayrıca kompozit üretimi faaliyeti sonucunda üretilen kompozitlere ait görsel Şekil 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.5. Numunelerin bileşim oranları ve kodları

Örnek No	Numune Kodu	PLA Ağırlıkça %	Bazalt Elyaf Ağırlıkça %	Pomza Ağırlıkça %	Borik Asit Ağırlıkça %	Yüzey Modifikasyonu (Var/Yok)
1	PLA	100	0	0	0	-
2	PLA_BF	90	10	0	0	Yok
3	PLA_siBF	90	10	0	0	Var
4	PLA_1P	99	0	1	0	Yok
5	PLA_3P	97	0	3	0	Yok
6	PLA_5P	95	0	5	0	Yok
7	PLA_10P	90	0	10	0	Yok
8	PLA_20P	80	0	20	0	Yok
9	PLA_si1P	99	0	1	0	Var
10	PLA_si3P	97	0	3	0	Var
11	PLA_si5P	95	0	5	0	Var
12	PLA_si10P	90	0	10	0	Var
13	PLA_si20P	80	0	20	0	Var
14	PLA_0.25BA	99,75	0	0	0,25	Yok
15	PLA_0.5BA	99,5	0	0	0,5	Yok
16	PLA_1BA	99	0	0	1	Yok
17	PLA_si0.25BA	99,75	0	0	0,25	Var
18	PLA_si0.5BA	99,5	0	0	0,5	Var
19	PLA_si1BA	99	0	0	1	Var
20	PLA_BF_1P	89	10	1	0	Yok
21	PLA_BF_3P	87	10	3	0	Yok
22	PLA_BF_5P	85	10	5	0	Yok
23	PLA_BF_10P	80	10	10	0	Yok
24	PLA_BF_20P	70	10	20	0	Yok
25	PLA_siBF_si1P	89	10	1	0	Var
26	PLA_siBF_si3P	87	10	3	0	Var
27	PLA_siBF_si5P	85	10	5	0	Var
28	PLA_siBF_si10P	80	10	10	0	Var
29	PLA_siBF_si20P	70	10	20	0	Var
30	PLA_BF_0.25BA	89,75	10	0	0,25	Yok
31	PLA_BF_0.5BA	89,5	10	0	0,5	Yok
32	PLA_BF_1BA	89	10	0	1	Yok
33	PLA_siBF_si0.25BA	89,75	10	0	0,25	Var
34	PLA_siBF_si0.5BA	89,5	10	0	0,5	Var
35	PLA_siBF_si1BA	89	10	0	1	Var



Şekil 3.9. Tez çalışması kapsamında üretilen kompozitler

3.4. Kompozitlerin Karakterizasyonu

Tez kapsamındaki kompozitlerin tamamının matris malzemesi PLA'dır. Matris malzemesi ortak olduğundan kompozitlerin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler ve deney koşulları tüm numuneler için aynıdır. Bu bölümde numunelere uygulanan testler ve test parametreleri anlatılmıştır.

3.4.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

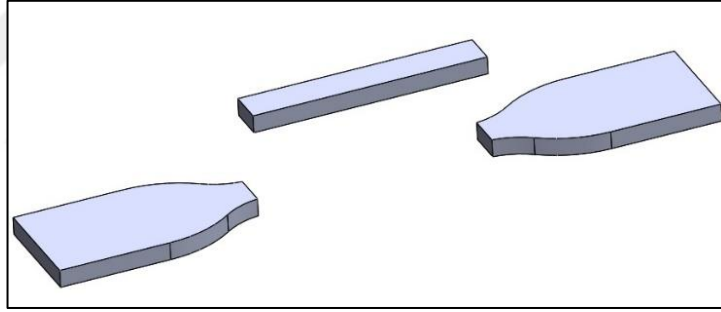
Takviye malzemelerine uygulanan Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy-FTIR) analizi aracılığıyla silanlama prosesinin izlenebilirliği/başarımı değerlendirilmeye çalışılmıştır. Tüm analizler, Thermo Fisher marka FTIR cihazı kullanılarak $400-4000\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında gerçekleştirildi.

3.4.2. Dinamik mekanik analiz

Kompozitlere uygulanan dinamik mekanik analiz, TA Instruments marka ve Q800 model DMA cihazı kullanılarak üç nokta eğme modunda gerçekleştirildi (Şekil 3.10). $35\text{ }\mu\text{m}$ genlik ve 1 Hz frekans uygulanarak, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında, $2\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$. ısıtma hızında test edilen kompozitlerin analiz sonucunda depo modülü (E') değerlerinin zamanla değişimi belirlenmiştir. DMA'da kullanılan test numunelerine ait temsili görsel Şekil 3.11'de verilmiştir.



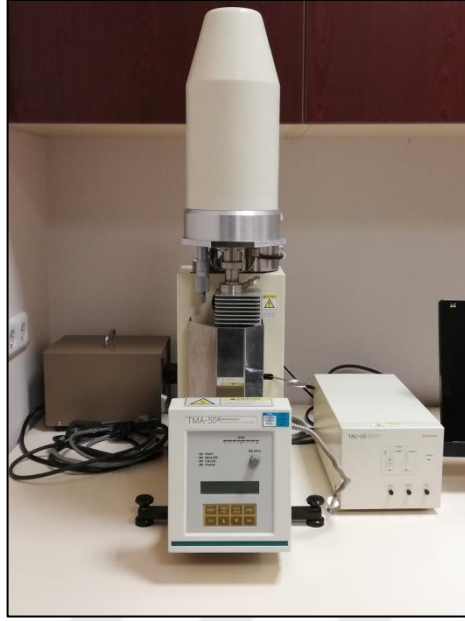
Şekil 3.10. TA Instruments marka ve Q800 model DMA cihazı



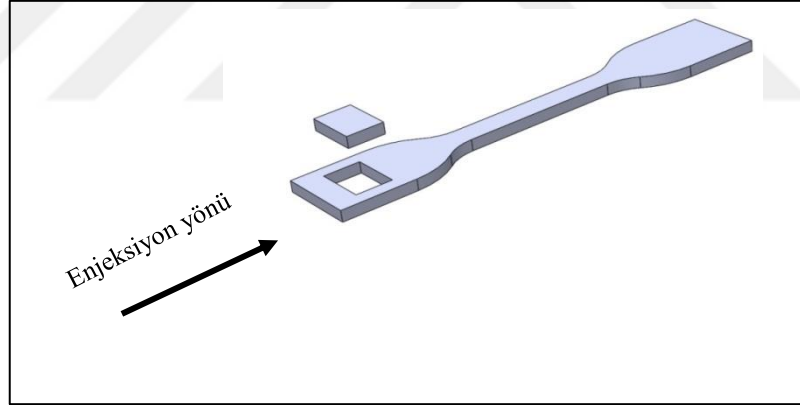
Şekil 3.11. DMA’da kullanılan numune örneği

3.4.3. Termomekanik analiz

Bu tez çalışması kapsamında, takviye malzemesi olarak kullanılan bazalt elyaf, pomza ve borik asidin ve bu takviye malzemelerine uygulanan yüzey modifikasyon işlemlerinin PLA'nın boyutsal kararlılık özelliği üzerindeki etkisi TMA ile incelendi. Ölçümler 25-150 °C sıcaklık aralığında 5 °C/dk ısıtma hızında 0,01 N sabit yük altında 2x5x7mm boyutlarındaki numuneler kullanılarak gerçekleştirildi. Bu amaçla Shimadzu marka TMA-50 model cihaz (Şekil 3.12) kullanıldı. TMA’da kullanılan test numunelerine ait görsel Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Shimadzu marka TMA-50 model termomekanik analiz cihazı



Şekil 3.13. Termomekanik analiz numunesinin hazırlanması

3.4.4. Çekme testi

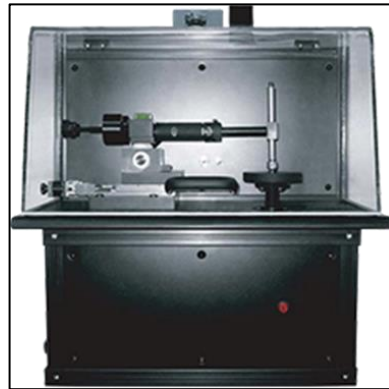
ISO 527-2/5A standardındaki kompozitlere uygulanan çekme testleri, Instron marka 4411 model çekme cihazı (Şekil 3.14) kullanılarak gerçekleştirildi. Örneklerin çekme dayanımı ve yük-uzama eğrileri 5 mm/dakika çekme hızında belirlenmiştir. Ortalama çekme dayanımı değerlerini elde edebilmek için her örnek türüne en az 10 ölçüm yapıldı. Elde edilen veriler Instron Bluehill programında değerlendirildi ve tez kapsamında kullanılmak üzere her kompozit bileşiminin çekme dayanımı değerleri hesaplandı.



Şekil 3.14. “Instron marka 4411 model” çekme test cihazı

3.4.5. Aşınma testi

Çalışma kapsamında üretilecek bazalt elyaf, pomza ve borik asit takviyeli PLA matrisli kompozitlerin aşınma testleri Şekil 3.15’de verilen pin-on-disc modunda Nanovea marka tribometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Test için 3 mm yarıçapında seramik bilye yük koluna sabitlenirken örnek ise sürtünme yarıçapı 4 mm olan ve dönen bir disk üzerine yerleştirilmiştir. Tüm testlerde temas yükü ve kayma mesafesi sırasıyla 20 N ve 100 m, devir sayısı dakikada 150 olarak kullanılmıştır. Seramik bilye ve dönen disk arasındaki sürtünme katsayısı test boyunca ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Ayrıca her kompozit birleşimi için en az 5 test yapılmış ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.15. Pin-on-disk test cihazı (Nanovea Tribometer)

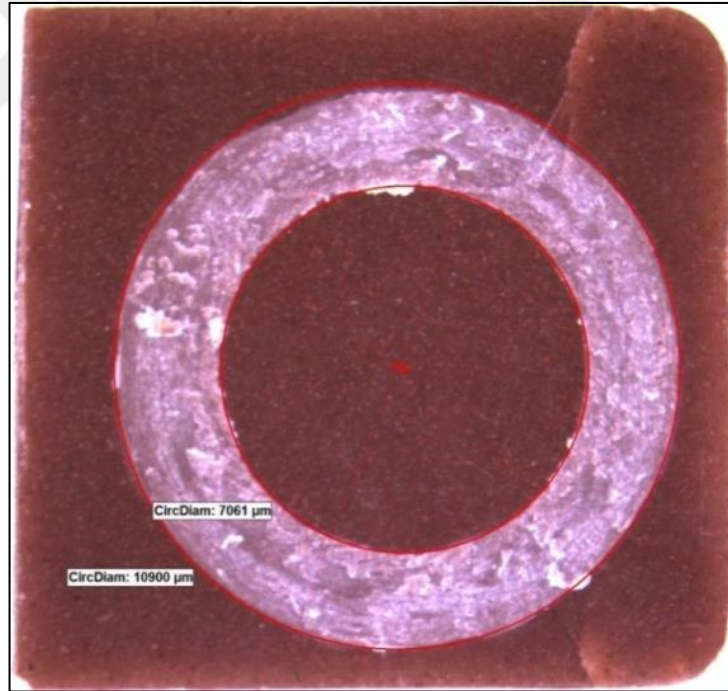
Oluşan aşınma izlerinin (Şekil 3.16) ölçümü için Nikon SMZ 745T (Şekil 3.17) marka ışık mikroskobu kullanılarak ve kompozitlerin aşınma hacimleri ASTM G99-05 standardına uygun olarak ve pin aşınması olmadığı kabulü yapılarak Denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır:

$$V = (\pi \cdot R \cdot D^3) / (6 \cdot r) \quad (3.1)$$

Bu denklikte V aşınma hacmini (mm^3), R sürtünme yarıçapını (mm), D aşınma izinin genişliğini (mm) ve r seramik bilyenin yarıçapını (mm) ifade etmektedir. Böylece aşınma oranı k Denklem 3.2'ye göre:

$$k = V / (L \cdot X) \quad (3.2)$$

Bu denklikte (Denklem 3.2) ise V aşınma hacmini (mm^3), L yükü (N), X kayma mesafesini (m) ve k ise aşınma oranını ($\text{mm}^3/\text{N.m}$) ifade etmektedir.



Şekil 3.16. Aşınma izi ölçülen numune örneği



Şekil 3.17. “Nikon SMZ 745T” optik mikroskobu

3.4.6. Diferansiyel taramalı kalorimetre

Bazalt elyaf, pomza ve borik asit takviyesinin PLA'nın camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı ve % kristalizasyon derecesi gibi termal özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla üretilen kompozitlere DSC analizi uygulandı. Bu analiz için TA Instruments marka Q200 model DSC cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.18). Ölçüm 25°C ile 200°C aralığında, 5°C/dakika ısıtma hızı ile yapıldı.

PLA'nın % kristalinite değeri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla % kristalinite değerleri Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır ve böylece PLA'nın kristalinitesinde meydana gelen değişim ile performansı arasındaki ilişki belirlenmiştir. % kristalinite hesabı %100 kristalin PLA'nın teorik erime entalpisinin Denklem 3.3'de kullanılmasıyla yapılmış ayrıca kompozit içerisindeki takviye malzemesi miktarı da göz önünde bulundurulmuştur:

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m - \Delta H_c}{(1 - \omega_{f/p}) \cdot \Delta H_m^0} \times 100 \quad (3.3)$$

Bu denklikte X (%) kristaliniteyi, ΔH_m (J/g) ve ΔH_c (J/g) analiz edilen örneğin erime entalpisini ve soğuk kristallenme entalpisini, ω PLA'nın kompozit içerisindeki

ağırlıkça oranını, ΔH_m^0 ise %100 kristalin PLA'nın teorik erime entalpisi değerini ifade etmektedir.



Şekil 3.18. “TA Instruments-Q200” model DSC analiz cihazı

3.4.7. Boyutsal kararlılık analizi

PLA'nın bazalt elyaf, pomza ve borik asit ilavesiyle, ısıl muamele sonrasında boyutsal kararlılığında meydana gelen değişim analiz etmek amacıyla üretilen 2 mm kalınlığındaki düz (flat) numuneler fırına yerleştirildi ve artan sıcaklıkla örnekte uzunlamasına (longitudinal) meydana gelen boyutsal değişim ölçüldü.

Bu amaçla, 40, 50, 60, 80, 100 ve 120 °C sıcaklıklara ısıtılan fırında 30 dakika bekletilen örnekler bu süre sonunda oda sıcaklığına getirilerek yine 30 dakika bekletildi ve son boyutları ölçüldü. PLA matrisli kompozitlerin boyutsal kararlılıkları Denklem 3.4 kullanılarak karşılaştırılmıştır.

$$D = \frac{L_b - L_a}{L_b} \times 100 \quad (3.4)$$

Bu denklikte D (%) boyutsal değişikliği, L_b (mm) 30 dakikalık ısıtmadan önceki örnek boyunu, L_a (mm) 30 dakikalık ısıtmadan sonraki örnek boyunu ifade etmektedir.

3.4.8. Termogravimetrik analiz

Tez çalışması kapsamında bazalt elyaf, pomza ve borik asit ilavesinin ve ayrıca bu takviye malzemelere uygulanacak yüzey modifikasyon işleminin PLA matrisli kompozitlerin ısıl kararlılığı üzerine etkisi TGA ile incelendi. Bu amaçla uygulanacak TGA ölçümleri TA Instruments marka Q500 model TGA cihazı kullanılarak, 25°C ile 500°C arasında 10 °C/dakika ısıtma hızında gerçekleştirildi (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. “TA Instruments-Q500” model TGA test cihazı

3.4.9. Taramalı elektron mikroskobu

Tez çalışması kapsamında üretilen kompozitlerin çekme testi sonucunda oluşan kopma yüzeyleri ve aşınma yüzeyleri, Jeol marka JCM-6000 model masaüstü taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelendi (Şekil 3.20). Bu analiz yardımıyla kompozitlerin kırılma ve aşınma yüzeyleri incelenerek, kompozit içerisindeki takviye malzemesi yüzeylerinin polimerik matris ile kaplanıp kaplanmadıkları, matristen kopma ya da ayrılma şekilleri gibi davranışları belirlenmiş, böylece takviye malzemesi ile matris arasındaki yapışmanın niteliği değerlendirilmiştir. Ayrıca analiz yapılacak numune yüzeyleri, inceleme yapılmadan önce ince altın bir tabaka ile kaplandı.



Şekil 3.20. “JEOL JCM-6000” model SEM cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde tez çalışması boyunca yapılan tüm testlerin ve analizlerin sonuçları ve elde edilen sonuçların bilimsel olarak yorumları yer almaktadır.

Sonuçların daha rahat incelenebilmesi adına bulgular, yapılan analizlere göre başlıklar altında ayrı ayrı verilerek incelenmiştir. Bu amaçla sırasıyla partikül takviyeli kompozitlerin karakterizasyon sonuçları ve değerlendirilmeleri, fiber takviyeli kompozitlerin karakterizasyon sonuçları ve değerlendirilmeleri ve hibrit kompozitlerin karakterizasyon sonuçları ve değerlendirilmeleri olmak üzere alt başlıklar halinde tüm analiz sonuçları ve yorumları paylaşılmıştır.

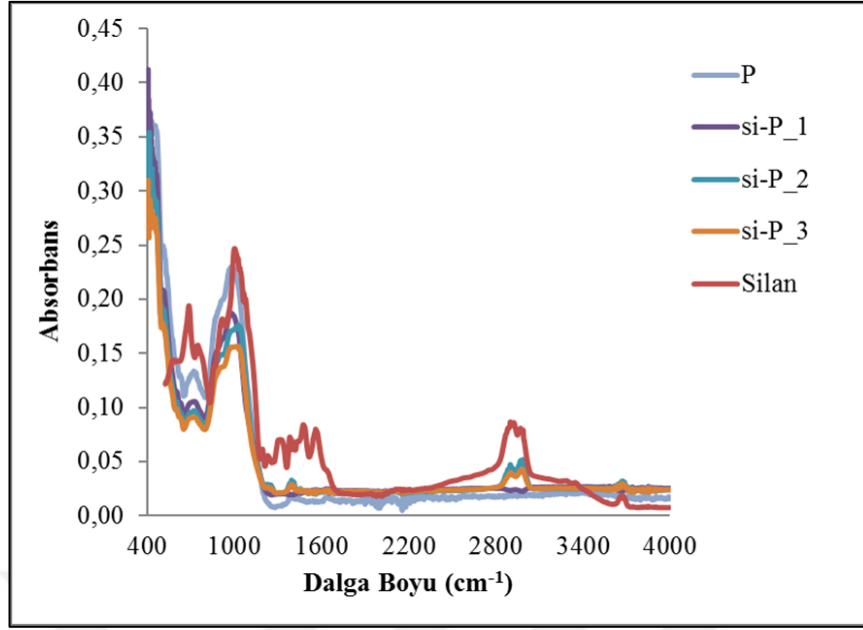
İlk olarak takviye elemanlarının yüzey modifikasyon prosesleri değerlendirilmiş, sonrasında üretilen kompozitler mekanik, termal, termomekanik, tribolojik ve morfolojik olarak incelenmiştir.

4.1. Takviye Malzemelerinin FTIR Analizi Sonuçları

Tez çalışması kapsamında çeşitli yüzey modifikasyon prosesleri uygulanmış pomza, borik asit ve bazalt elyaf malzemelerine Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi analizi aracılığıyla silanlama prosesinin izlenebilirliği/başarımı değerlendirilmeye çalışılmıştır. Sonrasında her takviye malzemesi için en uygun sonucu veren proses seçilmiş ve tez çalışması için üretilen tüm silanlı malzemelerde kullanılmıştır.

4.1.1. Pomza partikül yüzeyinin FTIR analizi sonuçları

Silanlama prosesi sonucunda partikül yüzeyinde meydana gelen değişimin incelenebilmesi amacıyla saf silan bileşimine ve yüzeyi silanlanmış/silanlanmamış pomza partiküllerine FTIR analizi uygulanmıştır. FTIR analizi sonucunda elde edilen spektrumlar Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Pomza yüzeylerine ait FTIR spektrumları

Şekil 4.1 incelendiğinde saf silan bileşiğine ait spektrumda yaklaşık $3200-3591\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında NH_2 gruplarına ait gerilme titreşimi (stretching vibration) pikleri, yaklaşık 2972 cm^{-1} dalga boyunda C- NH_2 bağlarına ait gerilme titreşimi pikleri, yaklaşık 1605 cm^{-1} dalga boyunda NH bağlarına ait eğilme titreşimi (bending vibration) pikleri, yaklaşık 1200 cm^{-1} dalga boyunda Si-O-C bağlarına ait pik, $949-1050\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında Si-O-Si bağlarına ait pikler ve yaklaşık 765 cm^{-1} dalga boyunda da Si-C bağlarına ait asimetric gerilme pikleri görülmektedir (Gwon ve diğ., 2010).

Bununla birlikte Şekil 4.1’de verilen yüzeyi sadece alkali ile modifiye edilmiş pomzaya ait spektrum incelendiğinde ise saf silan bileşiğine ait yaklaşık $3200-3591\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığındaki NH_2 gruplarına ait karakteristik pikin ve 2972 cm^{-1} dalga boyunda C- NH_2 bağlarına ait karakteristik pikin olmadığı görülmektedir. Bununla birlikte 1200 cm^{-1} civarında ortaya çıkan pikin ise alkali ile yüzey modifikasyonu sonucunda meydana gelen C-OH bağlarına ait karakteristik bir pik olduğu düşünülmektedir. $3100-3800\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında görülen pik OH bağlarına ait gerilme titreşimi piki olmakla birlikte $600-700\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu civarında görülen pikler ise moleküller arası hidrojen bağlarıyla bağlanan OH gruplarına ait düzlem dışı eğilme titreşimlerine ait piklerdir denilebilir (Mahuya ve Debabrata, 2006).

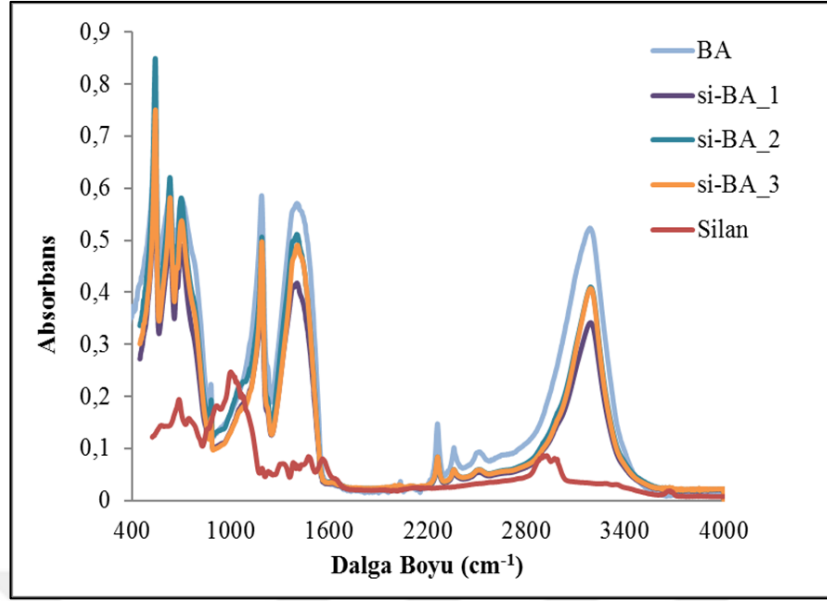
Şekil 4.1’de verilen silanlanmış pomza partiküllerine ait pikler incelendiğinde ise saf silan bileşiğine ait 3200-3591 cm^{-1} dalga boyu aralığındaki NH_2 gruplarına ait karakteristik pikin, yaklaşık 2972 cm^{-1} dalga boyunda C- NH_2 bağlarına ait karakteristik pikin ve yaklaşık 1605 cm^{-1} dalga boyunda NH bağlarına ait karakteristik eğilme titreşimi (bending vibration) pikinin tekrar ortaya çıktığı açıkça görülmektedir.

FTIR analizinde pik yüksekliği göreceli olarak fonksiyonel grupların miktarı ile ilişkilendirilebilir. Yani fonksiyonel grup miktarı ne kadar fazlaysa bu gruba ait karakteristik pikin şiddeti de o kadar fazladır denebilir. Şekil 4.1 bu bakış açısıyla değerlendirildiğinde, silanlama prosesinin başarı ile gerçekleştirildiği sonucuna varılabilmektedir. Ayrıca, silanlama prosesleri birbirleri ile karşılaştırıldığında ise si-P_2 kodlu silanlama prosesine ilişkin piklerin pik şiddetlerinin nispeten daha fazla olması sebebiyle bu kodlu silanlama prosesinin en uygun sonucu veren proses olarak seçilmesine karar verilmiş ve tez çalışmasının devamında pomza partiküllerinin silanlanması için bu proses kullanılmıştır.

4.1.2. Borik asit partikül yüzeyinin FTIR analizi sonuçları

Silanlama prosesi sonucunda partikül yüzeyinde meydana gelen değişimin incelenebilmesi amacıyla saf silan bileşiğine ve yüzeyi silanlanmış/silanlanmamış borik asit partiküllerine FTIR analizi uygulanmıştır. FTIR analizi sonucunda elde edilen spektrumlar Şekil 4.2’de verilmiştir.

Şekil 4.2 incelendiğinde silanlama ile yüzey modifikasyonu işlemi uygulanmış borik asit partiküllerine ait spektrumlarda saf silan bileşiğine ait karakteristik pikler gözlemlenmemiştir. İlk bakışta bu sonuca sebep olabilecek iki durum düşünülmektedir. Bunlardan ilki silanlama prosesinin başarısız olması olarak söylenebilirken diğeri ise silanlama prosesinde beklenen seviyeye ulaşamadığından karakteristik piklerin spektrumdan gözlemlenemeyecek kadar düşük şiddette olmaları söylenebilir.



Şekil 4.2. Borik asit yüzeylerine ait FTIR spektrumları

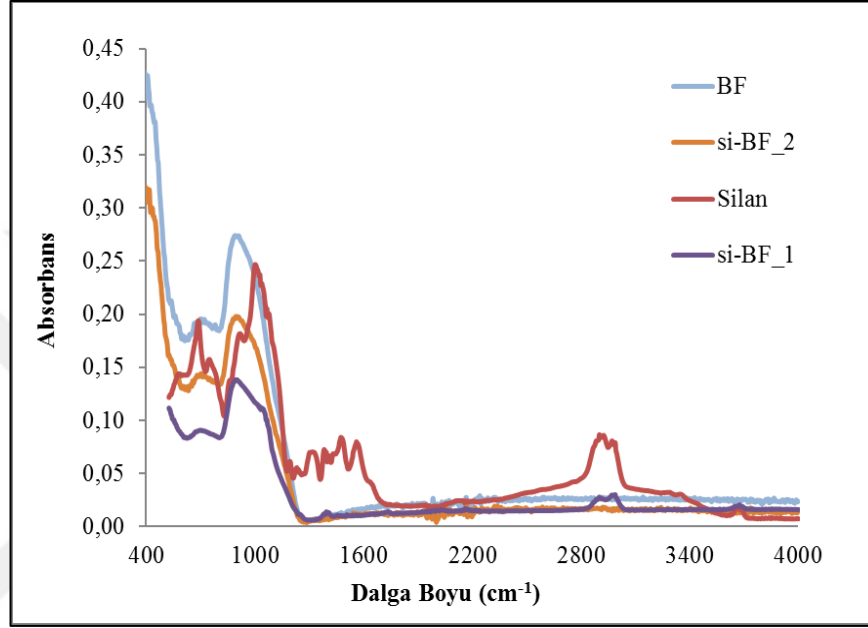
Diğer taraftan Şekil 4.2 göstermektedir ki silanlanmamış borik aside ait spektrum ile karşılaştırıldığında silanlama yapılan borik asit partiküllerinin spektrumlarındaki pik şiddetleri azalmaktadır. Pik şiddetlerinde meydana gelen bu azalma, borik asidin yüzey karakteristiğinin değiştiği ve yüzeyinin silan bileşiği ile kaplandığı şeklinde yorumlanabilir.

Buradan silanlama prosesinin başarılı olduğu ancak prostedeki kısıtlar sebebiyle istenilen seviyeye ulaşamadığı ve silanlama sonucunda oluşan karakteristik piklerin spektrumdan gözlemlenemeyecek kadar düşük pik şiddetinde kaldıkları sonucuna varılabilir. Zira daha önce de belirtildiği gibi borik asit, alkol ve suda çözünen bir moleküler yapıya sahiptir (URL-1, 2019). Borik asidin bu dezavantajı sebebiyle yüzey modifikasyonu için “sıvı ile dağıtma” ve “alkali ile yüzey modifikasyonu” yöntemleri uygulanamamış ve ayrıca partiküllerin silan çözeltisi ile birlikte karıştırılmaları işlemi gerçekleştirilememiştir. Dolayısıyla buradan silanlama işleminin proses kısıtlarına rağmen nispeten başarılı olduğu yorumu yapılabilir.

Buna ek olarak, silanlama prosesleri birbirleri ile karşılaştırıldığında ise en düşük pik şiddetine si-BA_1 kodlu silanlama prosesi sonucunda ulaşılmış bu sebeple bu kodlu silanlama prosesinin en uygun sonucu veren proses olarak seçilmesine karar verilmiş ve tez çalışmasının devamında borik asit partiküllerinin silanlanması için bu kodlu proses kullanılmıştır.

4.1.3. Bazalt elyaf yüzeyinin FTIR analizi sonuçları

Silanlama prosesi sonucunda bazalt elyaf yüzeyinde meydana gelen değişimin incelenebilmesi amacıyla saf silan bileşiğine ve yüzeyi silanlanmış/silanlanmamış bazalt elyafa FTIR analizi uygulanmıştır. FTIR analizi sonucunda elde edilen spektrumlar Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Bazalt elyaf yüzeylerine ait FTIR spektrumları

Şekil 4.3 incelendiğinde, silan bileşiğine ait karakteristik pikler olan, yaklaşık 3200-3591 cm^{-1} dalga boyu aralığında NH_2 gruplarına ait gerilme titreşimi (stretching vibration) piklerinin ve yaklaşık 2972 cm^{-1} dalga boyunda C-NH_2 bağlarına ait gerilme titreşimi piklerinin, si-BF_1 kodlu örneğe ait spektrumda da gözlemlendiği açıkça ortadadır. Buna ek olarak, silana ait spektrumda görülen karakteristik pikler olan, yaklaşık 1200 cm^{-1} dalga boyunda Si-O-C bağlarına ait pik ve 3100-3800 cm^{-1} dalga boyu aralığında OH bağlarına ait gerilme titreşimi piki, si-BF_1 kodlu numune türüne ait spektrumda da gözlemlenebilmektedir (Gwon ve diğ., 2010; Mahuya ve Debabrata, 2006). Buradan si-BF_1 kodlu numunenin silanlama prosesinin başarı ile gerçekleştirildiği sonucuna varılabilmektedir.

Diğer taraftan Şekil 4.3 göstermektedir ki silanlanmamış bazalt elyafa ait spektrum ile karşılaştırıldığında, si-BF_1 kodlu silanlama prosesi uygulanan bazalt elyafın spektrumunda sergilediği piklerin şiddetleri (yaklaşık 600-800 cm^{-1} ve 800-1200 cm^{-1}

dalga boyu aralığında) azalmaktadır. Pik yüksekliğinde meydana gelen bu azalma, bazalt elyafın yüzey karakteristiğinin değiştiği ve yüzeyinin silan bileşiği ile kaplandığı şeklinde yorumlanabilirken bu bölgelerde silan bileşiğine ait karakteristik piklerin gözlemlenmiyor olmasının sebebi ise silanlama sonucunda oluşan bu karakteristik piklerin spektrumda düşük şiddette olmaları şeklinde yorumlanabilir.

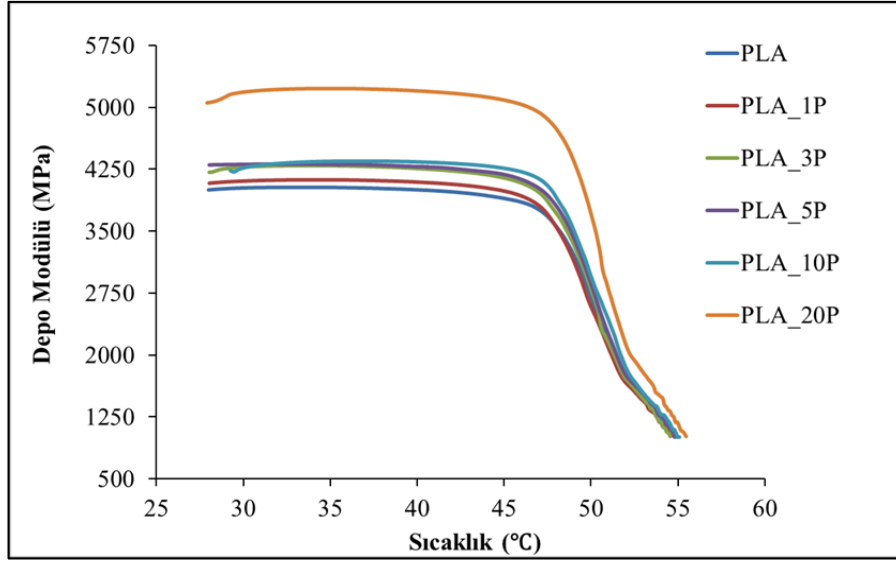
Tüm bu sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde, si-BF_1 kodlu silanlama prosesi sonucunda beklenen hedefe ulaşıldığı belirlenmiş, bu sebeple bu kodlu silanlama prosesinin en uygun sonucu veren proses olarak seçilmesine karar verilmiş ve tez çalışmasının devamında bazalt elyafın silanlanması için bu kodlu proses kullanılmıştır.

4.2. Dinamik Mekanik Analiz Sonuçları

4.2.1. Pomza takviyeli kompozitlerin dinamik mekanik analiz sonuçları

PLA'ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmamış pomza ilavesinin dinamik mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örneklere DMA uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerin depo modülü değerlerindeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.4'de verilmiştir.

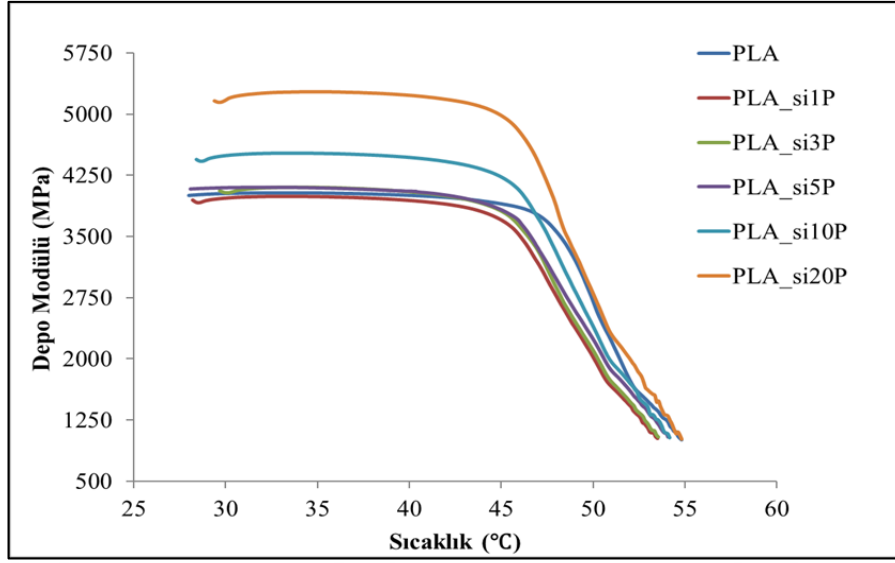
Depo modülü genel olarak malzemenin Young modülü ile ilişkilidir ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak malzemenin bükülmezliği (stiffness) hakkında bilgi verir. Malzemenin camsı geçiş sıcaklığının altında depo modülü değeri yüksektir çünkü polimer camsı (glassy) haldedir. Ancak camsı geçiş sıcaklığı aşıldıktan sonra depo modülünde ani bir düşüş meydana gelir, çünkü polimer zincirleri hareketlenir ve polimer kauçuğumsu (rubbery) bir hal alır. Dolayısıyla polimer zincirlerinin hareketlerinin sınırlanması malzemeye bükülmezlik sağlayacağı için depo modülünde de artış olarak kendini gösterir (Abdullah ve diğ., 2008).



Şekil 4.4. Silanlanmamış pomza takviyeli kompozitlerin depo modülü eğrileri

Şekil 4.4 bu bakış açısıyla incelendiğinde, saf PLA matrise ağırlıkça % 1 oranında pomza ilavesiyle malzemenin depo modülü değerinde az miktarda bir artış meydana geldiği gözlemlenmektedir. Bununla birlikte pomza oranı % 3, 5 ve 10'a çıkarıldığında depo modülü değerlerinin anlamlı şekilde arttığı, en yüksek depo modülü değerine ise ağırlıkça % 20 oranında pomza ilavesiyle ulaşıldığı Şekil 4.4'den açıkça görülmektedir. PLA matrise ağırlıkça % 1, 3, 5, 10 ve 20 oranlarında silanlanmamış pomza ilavesiyle depo modülünde meydana gelen bu artışın sebebi, yapı içerisinde artan pomza oranı sebebiyle PLA zincirlerinin hareketliliklerinin azalması ve böylece PLA matrisin bükülmezliğinin artması olarak açıklanabilir. Camsı geçiş sıcaklığı aşıldıktan sonra depo modülünde gözlemlenen düşüş ise sıcaklığın etkisiyle polimer zincirlerinin daha kolay hareket edebilmeleriyle açıklanmaktadır (Saba ve diğ., 2016; Sever ve diğ., 2018).

PLA'ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmış pomza ilavesinin dinamik mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örneklere DMA uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerin depo modülü değerlerindeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.5'de verilmiştir.



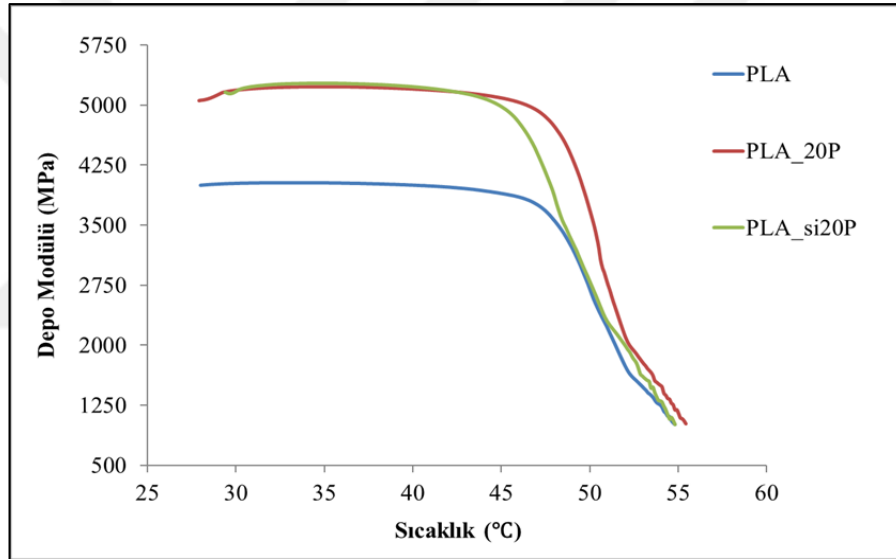
Şekil 4.5. Silanlanmış pomza takviyeli kompozitlerin depo modülü eğrileri

Şekil 4.5 incelendiğinde ağırlıkça %1 oranında silanlanmış pomza ilavesinin saf PLA'nın depo modülü değerini bir miktar düşürdüğü, ağırlıkça % 3 ve 5 oranlarında silanlanmış pomza ilavesinin ise saf PLA'nın depo modülü değerini anlamlı ölçüde etkilemediği görülmektedir.

Aynı ağırlıkta yükleme oranlarında silanlanmamış pomza ilavesiyle depo modülünde artış meydana gelirken silanlanmış pomza ilavesiyle PLA'nın depo modülünde azalma/değişme meydana gelmesi silanlama işlemi ile ilişkilendirilebilir. Öyle ki bilindiği gibi takviye malzemesi yüzeyinde tutunan silan moleküllerinin görevleri adeta bir köprü gibi davranmak ve kompozit üretimi sürecinde takviye malzemesi ile matris malzemesi arasındaki ara yüzey etkileşimini iyileştirmek ve böylece matristen takviye malzemesine etkin şekilde yük aktarılmasını sağlamaktır. Ancak yapı içerisinde bu reaksiyona paralel birtakım yan reaksiyonlar da oluşabilir ve bu reaksiyonlar polimerik matris üzerinde plastikleştirici etkiye sebep olabilirler ve bu plastikleştirici etki polimer zincirlerinin hareketliliklerini artırır. Dolayısıyla takviye malzemesinin düşük yükleme miktarlarında ilave edilmesi durumunda plastikleştirici etki takviye malzemesinin polimerik zincirler üzerindeki kısıtlayıcı etkisine baskın gelerek modülün düşmesine ya da değişmemesine sebep olabilir. Ancak takviye malzemesinin artan miktarıyla bu etki tersine döner ve malzemenin modülü artar (Karsli, 2017).

Bu bilgiden yola çıkarak Şekil 4.5 tekrar değerlendirildiğinde silanlanmış pomzanın ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında PLA matrise ilave edilmesi durumunda söz konusu plastikleştirici etkinin baskın geldiği ancak pomza miktarının ağırlıkça % 10 ve 20'ye çıkarıldığında takviye malzemesinin kısıtlayıcı etkisinin baskın geldiği yorumu yapılabilir.

Pomza yüzeylerinin silanlanması işleminin pomza takviyeli PLA matrisli kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisini inceleyebilmek amacıyla her iki takviye malzemesi türünün (silanlanmış ve silanlanmamış pomza) kullanıldığı durumda en iyi sonuç veren örneklere ait depo modülü eğrileri karşılaştırılmış ve sonuç Şekil 4.6'da verilmiştir.

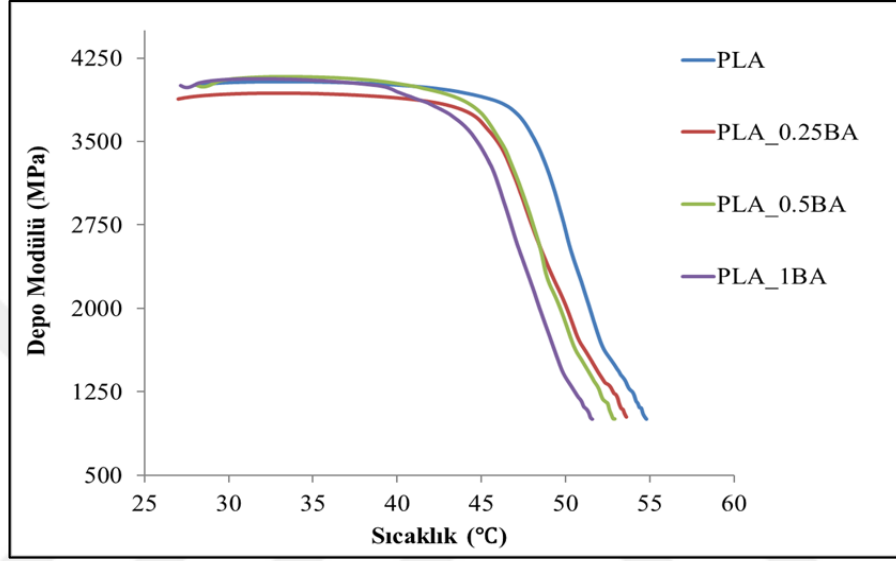


Şekil 4.6. Silanlama işleminin pomza takviyeli kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisi

Şekil 4.6 incelendiğinde silanlanmış pomza ilavesiyle üretilen kompozitlerin depo modülü değerlerinin silanlanmamış pomza ilavesiyle üretilen kompozitlerin depo modülü değerleriyle yaklaşık 42°C'ye kadar aynı olduğu görülmektedir. Ancak şekil göstermektedir ki silanlanmış pomza kullanılarak üretilen kompozitlerde yapı, camı (glassy) formdan kauçuğumsu (rubbery) forma daha düşük bir sıcaklıkta geçmekte yani zincirler daha düşük sıcaklıkta hareketlenebilmektedirler. Bu sonuç yukarıdaki yorumu desteklemekte ve partikül yüzeyindeki silanın polimerik matris üzerinde plastikleştirici etki yarattığını ve zincirlerin daha düşük sıcaklıkta hareketlenmesini sağladığını göstermektedir.

4.2.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin dinamik mekanik analiz sonuçları

PLA'ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmamış borik asit ilavesinin dinamik mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örneklere dinamik mekanik analiz uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerin depo modülü değerlerindeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.7'de verilmiştir.

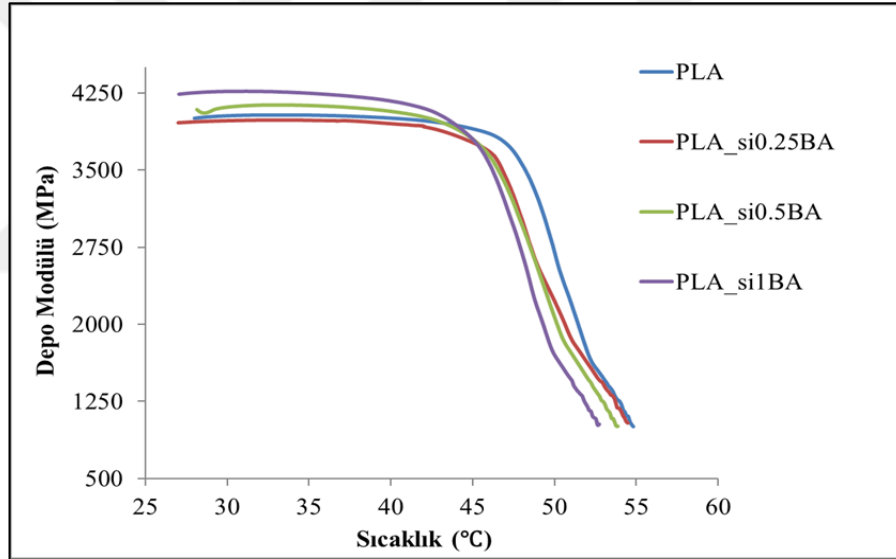


Şekil 4.7. Silanlanmamış borik asit takviyeli kompozitlerin depo modülü eğrileri

Şekil 4.7 incelendiğinde ağırlıkça %0,25 oranında silanlanmamış borik asit ilavesinin saf PLA'nın depo modülü değerini düşürdüğü, ağırlıkça % 0,5 ve 1 oranlarında silanlanmamış borik asit ilavesinin ise saf PLA'nın depo modülü değerini değiştirmedeği görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.7'den gözlemlenen bir diğer sonuç ise saf PLA'ya borik asit ilavesiyle malzemenin camsı formdan kauçuğumsu forma geçtiği sıcaklığın düştüğü ve en belirgin düşüşün ise en yüksek yükleme oranı olan % 1 borik asitte meydana geldiğidir. Daha önce de bahsedildiği gibi kompozit üretimi sürecinde PLA matrisine eklenen borik asit miktarı arttıkça polimerin eriyik viskozitesinde düşme meydana gelmiş ve kompozit üretimi gerçekleştirilememiş bu sebeple de eklenen borik asit miktarında ağırlıkça %1'in üzerine çıkılamamıştır. Ayrıca literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde de borik asidin polimerik malzemelere ilavesiyle ısıl bozunma sıcaklığında düşüşe sebep olduğu gibi bir sonuca ulaşılmıştır (Polat ve Kaynak, 2016). Dolayısıyla buradan yola çıkarak borik asit takviyeli PLA matrisli kompozit üretimi sürecinde borik asit yapısındaki

hidrofilik grupların PLA ile reaksiyona girdiği ve PLA'yı plastikleştirerek zincirlerinin hareketliliğini arttırdığı ve viskozitesini düşürdüğü söylenebilir. Buna göre ağırlıkça % 0,25 borik asit takviyesinde bu plastikleştirici etki borik asidin polimer zincirlerinin hareketliliğini kısıtlayıcı etkisine baskın gelirken ağırlıkça % 0,5 ve 1 borik asit takviyesinde borik asidin polimer zincirlerinin hareketliliğini kısıtlayıcı etkisi baskın gelmekte ve modülünün değişmemesine neden olmaktadır denilebilir.

PLA'ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmış borik asit ilavesinin termomekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örneklere dinamik mekanik analiz uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerin depo modülü değerlerindeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.8'de verilmiştir.



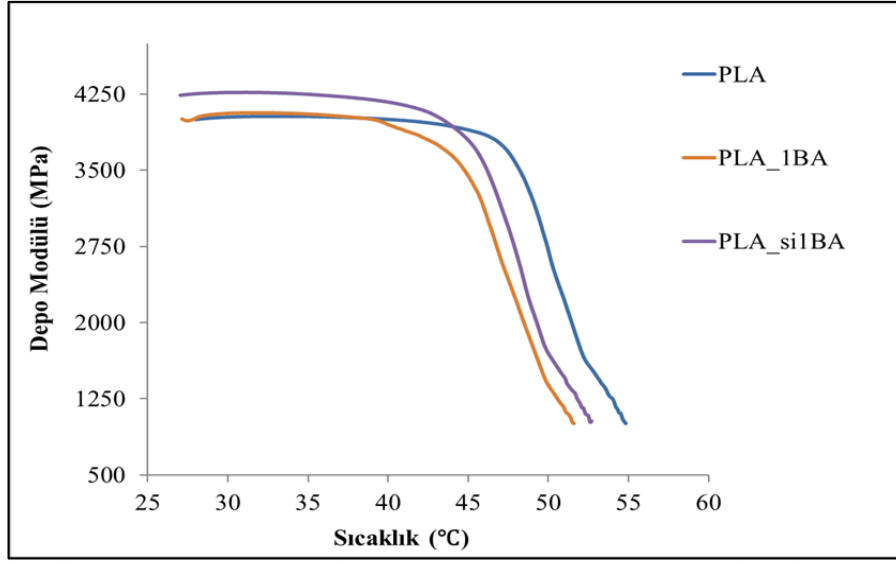
Şekil 4.8. Silanlanmış borik asit takviyeli kompozitlerin depo modülü eğrileri

Şekil 4.8 incelendiğinde saf PLA'ya ağırlıkça % 0,25 oranında silanlanmış borik asit ilavesiyle depo modülü değerinde bir değişiklik meydana gelmediği bununla birlikte ağırlıkça % 0,5 ve 1 oranlarında borik asit ilavesiyle depo modülü değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi yüzeyi silanlanmamış borik asidin, kompozit üretim sürecinde, yapısında bulundurduğu hidrofilik gruplar aracılığıyla PLA ile reaksiyona girdiği ve PLA üzerinde plastikleştirici bir etki yaratarak PLA zincirlerinin hareketlenmeye başladığı sıcaklığı ve viskozitesini düşürdüğü ve sonuç olarak (özellikle düşük yüklemelerde)

baskın olan) bu etkiler sebebiyle modül üzerinde olumlu bir etki yaratmadığı düşünülmektedir. Bununla birlikte borik asit yüzeyinin silanlanması sonucunda, saf PLA'ya ağırlıkça % 0,25 oranında silanlanmış borik asit ilavesiyle saf PLA'nın depo modülünde bir değişme meydana gelmediği ancak ağırlıkça % 0,5 ve 1 oranlarında silanlanmış borik asit ilavesiyle depo modülü değerlerinin arttığı görülmektedir. Buradan, silanlanmış ve silanlanmamış borik asidin yarattığı bu farkın sebebinin, silanlama işlemi olduğu çıkarımı yapılabilir. Bu çıkarıma göre borik asit yüzeyine uygulanan silanlama prosesi, kompozit üretimi sürecinde borik asidin PLA ile reaksiyona girmesini önlemekte ve böylece silanlanmamış borik asidin PLA matris üzerindeki plastikleştirici etkisini sınırlamaktadır. Diğer taraftan borik asit yüzeyine uygulanan silanlama prosesinin PLA üzerindeki plastikleştirici etkisinin devam ettiği de yine Şekil 4.8'den görülmektedir. Öyle ki PLA'ya silanlanmış borik asit ilavesiyle saf PLA'nın camsı formdan kauçuğumsa forma geçtiği sıcaklık düşmektedir. Ancak bu durum kompozitlerin modül değerlerini etkilememektedir ve sonuç olarak yüzeyi silanlanmış borik asidin PLA zincirlerinin hareketini kısıtlama etkisinin plastikleştirici etkisine baskın geldiği ve bu durumun silanlama prosesi sonucu takviye malzemesi ile PLA matris arasındaki ara yüzey etkileşiminin iyileşmesinden kaynaklandığı yorumu yapılabilir. Çünkü daha önce de açıklandığı gibi takviye malzemesi ilavesinin polimer zincirlerinin hareketlenmesini kısıtlayarak polimerin bükülmezliğini arttırıcı bir etki yapmasına ek olarak polimerik matrisle takviye malzemesinin ara yüzey etkileşimindeki artış da bu kısıtlamaya katkı sağlar. Başka bir deyişle polimerik matrisle takviye malzemesinin ara yüzey yapışması iyileştikçe takviye malzemesi polimerik matrisin hareketlenmesini daha fazla kısıtlar.

Sonuç olarak Şekil 4.8'den de görüleceği gibi borik asit yüzeyinin silanlanması sonucunda borik asit ve PLA matris etkileşimi de iyileşmiş, bu iyileşme silanlama prosesinin plastikleştirici etkisine üstün gelmiş ve sonuç olarak depo modülü değerleri artmıştır denebilir.

Borik asit yüzeyinin silanlanması işleminin borik asit takviyeli PLA matrisli kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisini inceleyebilmek amacıyla her iki takviye malzemesi türünün (silanlanmış ve silanlanmamış borik asit) kullanıldığı durumda en iyi sonuç veren örneklere ait depo modülü eğrileri karşılaştırılmış ve sonuç Şekil 4.9'da verilmiştir.



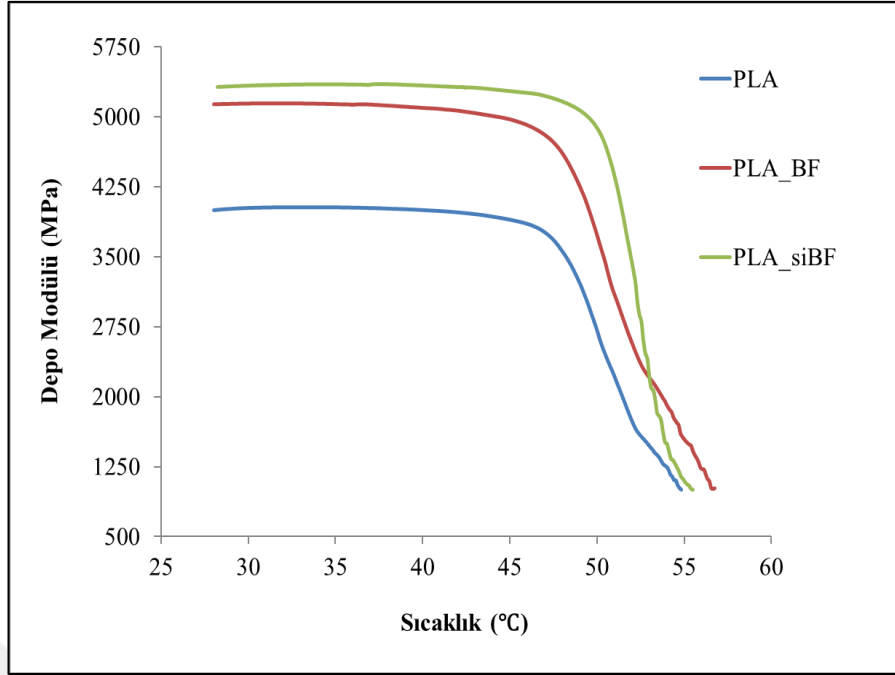
Şekil 4.9. Silanlama işleminin borik asit takviyeli kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisi

Şekil 4.9 incelendiğinde, ağırlıkça % 1 oranında silanlanmamış borik asit ilavesiyle saf PLA'nın depo modülünde bir değişiklik meydana gelmezken aynı ağırlık oranında silanlanmış borik asit ilavesiyle depo modülünün arttığı görülmektedir. Buradan borik asidin yüzeyinin silanlama prosesinin, borik asidin PLA ile reaksiyona girerek PLA üzerinde plastikleştirici etki yaratmasını engellediği ve ayrıca borik asit ve PLA arasındaki ara yüzey etkileşimini arttırarak PLA zincirlerinin hareketlenmesini kısıtladığı ve böylece saf PLA'nın modülünde artış sağladığı sonucuna varılabilir.

Şekil 4.9'dan elde edilebilecek bir diğer sonuç ise her iki tür borik asit (silanlanmamış ve silanlanmış) ilavesiyle de saf PLA'nın camsı formdan kauçuğumsa forma geçtiği sıcaklığın düştüğü ancak bu düşüş miktarının silanlanmış borik asitte daha az olduğudur. Bu durum da borik asit yüzeyine uygulanan silanlama prosesinin, borik asidin PLA üzerindeki plastikleştirici etkisini baskıladığı sonucunu bir kez daha doğrulamaktadır.

4.2.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin dinamik mekanik analiz sonuçları

PLA'ya silanlanmış ve silanlanmamış bazalt elyaf ilavesinin dinamik mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örnek türlerine DMA uygulanmış ve bu analiz sonucunda örnek türlerinin depo modülü değerlerindeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Silanlama işleminin bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisi

Şekil 4.10 açıkça göstermektedir ki incelenen sıcaklık aralığında, saf PLA matrisine bazalt elyaf eklenmesi saf PLA'nın bükülmezliğini arttırmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü polimerik matrisine elyaf takviyesi bükülmezliği artırır ve bunun sonucunda da malzemenin depo modülü artar. Buna ek olarak Şekil 4.10'dan yüzeyi silanlanmış bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin depo modülü değerinin yüzeyi silanlanmamış bazalt elyaf takviyeli kompozitle karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi takviye malzemesi ve matris malzemesi arasındaki ara yüzey etkileşiminin iyi olması ara yüzey yapışmasını iyileştirir ve dolayısıyla polimer zincirlerinin hareketleri, elyaf ve polimer zincirleri arasındaki etkileşim sebebiyle sınırlanır. Böylece elyaf ve matris arasında yüksek etkileşim olduğu durumda yüksek depo modülü elde edileceği sonucuna varılabilir (Abdullah ve diğ., 2008; Jacob ve diğ., 2006). Dolayısıyla Şekil 4.10'dan bazalt elyaf yüzeyinin silanlanması sonucunda elyaf yüzeyinde fonksiyonel grup miktarının arttığı, bu fonksiyonel gruplar aracılığıyla elyaf-matris ara yüzey etkileşiminin iyileştiği ve bu durumun PLA zincirlerinin hareketliliğini daha da kısıtlaması sebebiyle PLA matrisin bükülmezliğini ve dolayısıyla da depo modülünü arttırdığı yorumu yapılabilir.

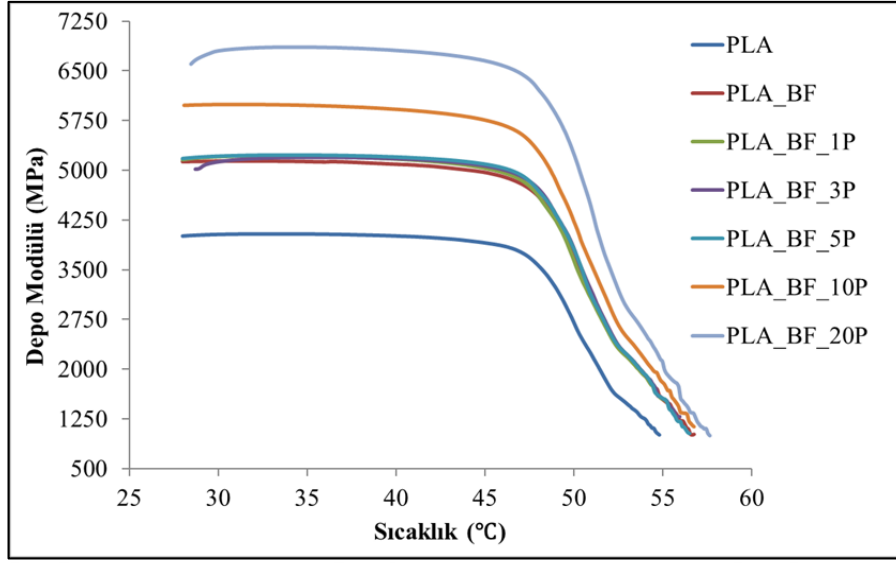
Buna ek olarak Şekil 4.10'dan çıkarılabilecek bir diğer sonuç saf PLA'ya bazalt elyaf ilavesiyle PLA'nın camsı formdan kauçuğumsu forma geçtiği sıcaklığın arttığı ve ayrıca yüzeyi silanlanmış bazalt elyaf takviyeli kompozitlerde bu artışın daha da fazla olduğudur. Bu sonuç da elyaf-matris arayüzey etkileşiminde iyileşme elde edildiğini gösteren diğer sonuçları destekler niteliktedir.

Diğer taraftan, partikül takviyeli kompozitlerden elde edilen depo modülü değerlerini gösteren sonuçlarda, partikül yüzeyinde bulunan silanın polimerik matrisin zincir hareketliliğini arttırdığı ve viskozitesini düşürdüğü ve bu sebeple modülde azalmaya sebep olduğu görülmüş olsa da bu etki bazalt elyaf için geçerli olmamıştır. Bu durumun sebebi iki şekilde açıklanabilir.

İlk açıklama bazalt elyafın polimerik matrisle karşılaştırıldığında sergilediği yüksek bükülmezlik özelliği, yüzeyindeki silan moleküllerinin sebep olduğu plastikleştirici etkiyi baskılamış ve dolayısıyla modülde artış sağlamıştır şeklinde yapılabilirken, ikinci açıklama ise takviye malzemesi ve matris malzemesi arasında köprü görevi görmesi beklenen silan moleküllerinin bazalt elyaf yüzeyine pomza yüzeyine olduğundan daha kuvvetli yapışmış olmaları ve kompozit üretimi süresince yan reaksiyona sebep olabilecek fazla silan moleküllerinin ortamda bulunmaması şeklinde yapılabilir.

4.2.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin dinamik mekanik analiz sonuçları

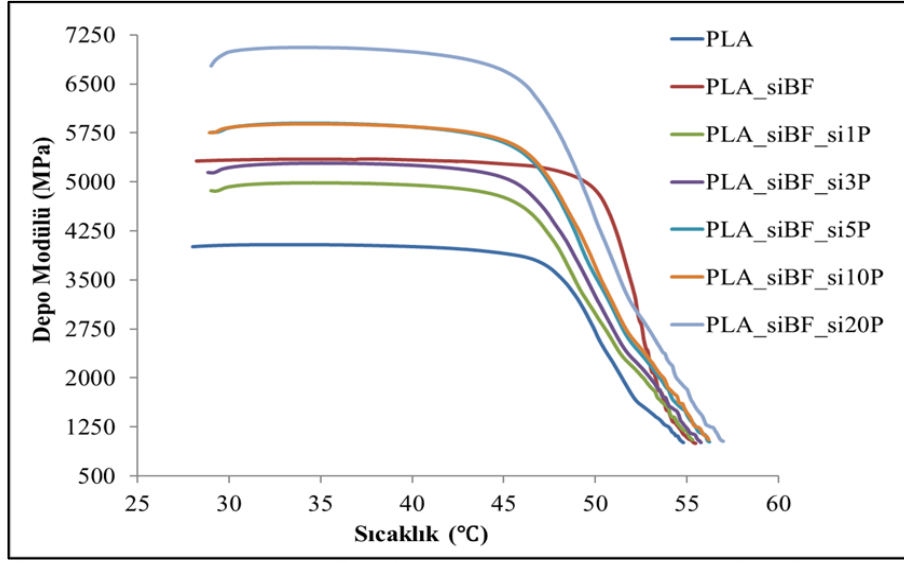
PLA'ya silanlanmamış pomza ve silanlanmamış bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin dinamik mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla örnek türlerine DMA uygulanmış ve bu analiz sonucunda örnek türlerinin depo modülü değerlerindeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Silanlanmamış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin depo modülü eğrileri

Şekil 4.11 incelendiğinde ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında pomza içeren hibrit kompozitlerin depo modülü değerlerinin sadece bazalt elyaf içeren kompozitin depo modülü değeriyle neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Diğer taraftan ağırlıkça %10 ve 20 pomza ilavesiyle depo modülü değerlerinde önemli ölçüde artış gözlenmekte ve en yüksek depo modülü değeri ağırlıkça %20 oranında pomza içeren kompozitlerde elde edilmiştir. Ayrıca bu kompozit türlerinde malzemenin camı formdan kauçuğumsa forma geçtiği sıcaklığın da arttığı görülmektedir. Bu artışın sebebi, yapı içerisinde artan pomza oranı sebebiyle PLA zincirlerinin hareketliliklerinin azalması ve böylece PLA matrisin bükülmezliğinin artması olarak açıklanabilir.

PLA'ya silanlanmış pomza ve silanlanmış bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin dinamik mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla örnek türlerine DMA uygulanmış ve bu analiz sonucunda örnek türlerinin depo modülü değerlerindeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.12'de verilmiştir.



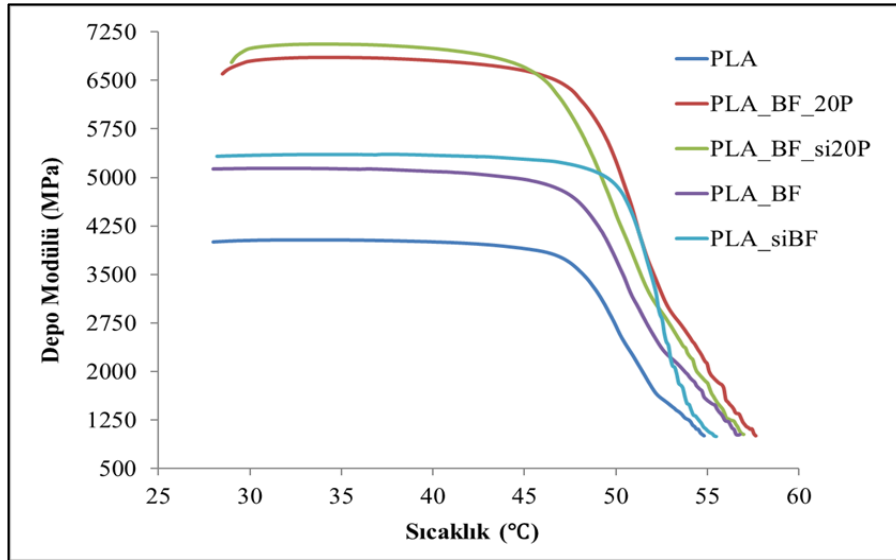
Şekil 4.12. Silanlanmış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin depo modülü eğrileri

Şekil 4.12 incelendiğinde, ağırlıkça %1 ve 3 oranlarında silanlanmış pomza içeren kompozitlerin depo modülü değerlerinde, sadece silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitle karşılaştırıldığında, azalma meydana geldiği görülmektedir. Diğer taraftan kompozitteki silanlanmış pomza miktarının ağırlıkça %5 ve 10 oranlarına çıkması ile depo modülü değerinde artış meydana gelmekte ve sonuç olarak ağırlıkça %20 oranında silanlanmış pomza içeren kompozitin en yüksek depo modülü değerini sergilediği görülmektedir. Bu sonuç, pomza yüzeyinin silanlanması işlemi ile ilişkilendirilebilir. Öyle ki bilindiği gibi takviye malzemesi yüzeyinde tutunan silan moleküllerinin görevleri adeta bir köprü gibi davranmak ve kompozit üretimi sürecinde takviye malzemesi ile matris malzemesi arasındaki ara yüzey etkileşimini iyileştirmek ve böylece matristen takviye malzemesine etkin şekilde yük aktarılmasını sağlamaktır. Ancak yapı içerisinde bu reaksiyona paralel birtakım yan reaksiyonlar da oluşabilirler ve bu reaksiyonlar polimerik matris üzerinde plastikleştirici etkiye sebep olabilirler ve bu plastikleştirici etki polimer zincirlerinin hareketliliklerini artırır. Dolayısıyla takviye malzemesinin düşük yükleme miktarlarında ilave edilmesi durumunda plastikleştirici etki takviye malzemesinin polimerik zincirler üzerindeki kısıtlayıcı etkisine baskın gelerek modülün düşmesine ya da değişmemesine sebep olabilir. Ancak takviye malzemesinin artan miktarıyla bu etki baskılanır ve malzemenin modülü artar (Karsli, 2017). Dolayısıyla ağırlıkça %1 ve 3 oranlarında silanlanmış pomza içeren kompozitlerin depo modülü değerlerinde,

sadece bazalt elyaf içeren kompozitle karşılaştırıldığında, azalma meydana gelmesi plastikleştirici etkinin baskın gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte yapıda artan pomza miktarıyla (%5, 10 ve 20) depo modülünde meydana gelen artış ise silanlanmış pomzanın silanlanmış bazalt elyaf ile kullanılması sebebiyle oluşan hibrit etki sonucu yapı içerisinde daha homojen dağılması ve ayrıca pomza yüzeyinin silanlanması sonucu takviye-matris ara yüzeyinin iyileşmesi gibi etkilerin plastikleştirici etkiye üstün gelmesinden kaynaklanmaktadır denebilir.

Şekil 4.12 ayrıca göstermektedir ki silanlanmış pomza ve bazalt elyafı eş zamanlı içeren tüm kompozitlerde camsı formdan kauçuğumsu forma geçiş sıcaklığı sadece bazalt elyaf içeren kompozite göre daha düşüktür. Bu durumun sebebi pomza yüzeyindeki silan moleküllerinin PLA matris üzerinde yaptıkları plastikleştirici etkidir.

PLA'ya silanlanmış ve silanlanmamış pomza ve bazalt elyaf ilavesinin dinamik mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örnek türlerine dinamik mekanik analiz uygulanmış ve bu analiz sonucunda örnek türlerinin depo modülü değerlerindeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Pomza ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisi

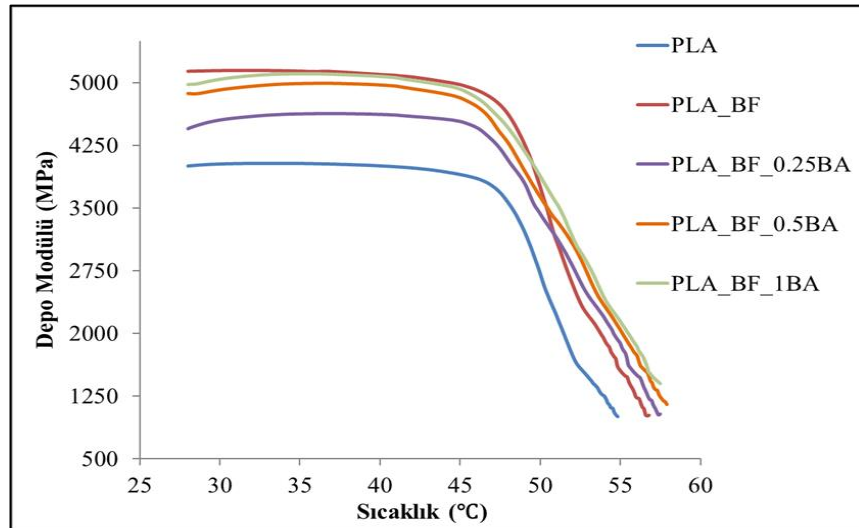
Şekil 4.13 incelendiğinde silanlanmış pomza ve silanlanmış bazalt elyaf takviye malzemelerinin eş zamanlı kullanılmaları durumunda kompozitlerde daha yüksek depo modülü değerlerine ulaşılabildiği görülmektedir.

Bu durumun sebebi, silanlama sonucunda takviye malzemesi ve matris malzemesi arasındaki ara yüzey etkileşiminin iyileşmesi, iyileşen ara yüzey etkileşimi sayesinde takviye malzemelerinin polimerik matris içerisinde daha homojen dağılımları ve polimer zincirleri arasına daha çok takviye malzemesi girmesi, sonuç olarak da takviye malzemelerinin matris malzemesinin zincirlerinin hareketliliğini daha etkin şekilde kısıtlaması gösterilebilir.

Diğer taraftan silanlanmış pomza içeren kompozitlerde ise camsı formdan kauçuğumsu forma geçiş sıcaklığı daha düşüktür. Bu sonuç, pomza yüzeyine uygulanan silanlama işleminin PLA matris üzerindeki plastikleştirici etkisini bir kez daha göstermektedir.

4.2.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin dinamik mekanik analiz sonuçları

PLA'ya silanlanmamış borik asit ve silanlanmamış bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin dinamik mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla örnek türlerine DMA uygulanmış ve bu analiz sonucunda örnek türlerinin depo modülü değerlerindeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.14. Silanlanmamış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin depo modülü eğrileri

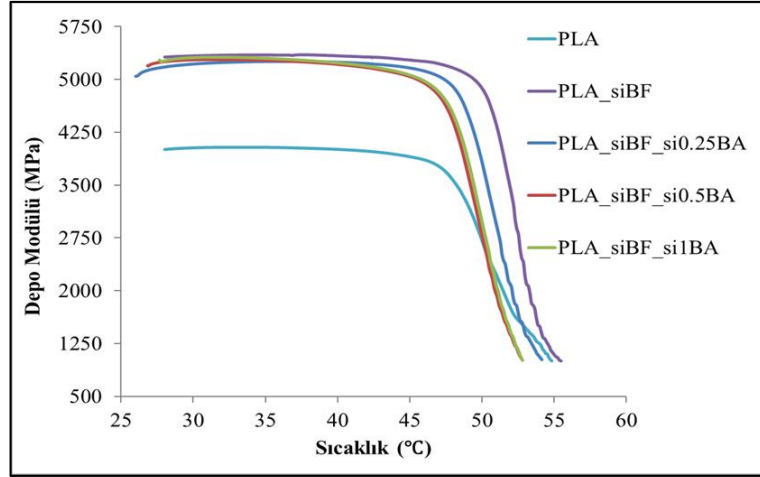
Şekil 4.14 göstermektedir ki ağırlıkça %0,25 oranında borik asit içeren hibrit kompozite ait depo modülü değeri sadece bazalt elyaf içeren kompozitin depo

modülü değerinden oldukça düşüktür. Bununla birlikte kompozit içerisinde borik asidin artan ağırlık oranıyla birlikte hibrit kompozitlerin depo modülü değerleri de artmakta ancak yine de ağırlıkça %1 oranında borik asit ilavesiyle sadece bazalt elyaf içeren kompozitin depo modülü değerine ulaşılabilir.

Daha önce de bahsedildiği gibi polimerik matrise partiküllerin elyaf ile birlikte takviye edilmeleri yapıda daha homojen bir partikül dağılımı sağlamak ve yapıdaki partikül kümelenmesini engellemektedir (Karsli ve diğ., 2014). Ancak Şekil 4.14 bu durumun her koşulda gerçekleşmediğinin bir göstergesidir. Öyle ki yapı içerisinde partiküllerin elyaf yardımıyla daha homojen şekilde dağılabilmeleri için elyaf-matris ve partikül-matris arayüzey etkileşimlerinin iyi olması önemli bir gereklilikken partikül-elyaf etkileşiminin de iyi olması ve aralarındaki iyi etkileşim sayesinde bir sinerjik etki ortaya çıkması gerekmektedir.

Şekil 4.14 bu bakış açısıyla değerlendirildiğinde yüzeyi silanlanmamış bazalt elyaf ve borik asit takviye malzemelerinin eş zamanlı olarak PLA matrise ilave edilmeleri durumunda borik asidin ve hatta bazalt elyafın yapı içerisinde yeterince dağılmadığı, bu sebeple borik asidin PLA üzerindeki plastikleştirici etkisinin ön plana çıktığı ve sonuç olarak hibrit kompozitlerin depo modülü değerlerinde düşüş meydana geldiği söylenebilir.

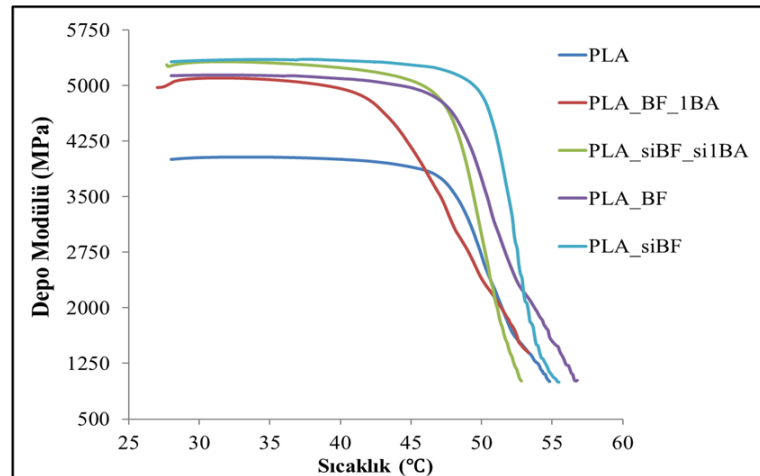
PLA'ya silanlanmış borik asit ve silanlanmış bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin dinamik mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla örnek türlerine DMA uygulanmış ve bu analiz sonucunda örnek türlerinin depo modülü değerlerindeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.15'de verilmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde ağırlıkça %0,25 oranında silanlanmış borik asit içeren hibrit kompozitin depo modülü değerinin sadece silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitin depo modülü değerinden düşük olduğu ancak artan borik asit miktarıyla aradaki farkın neredeyse kapandığı (ağırlıkça %1 oranında silanlanmış borik asit kullanıldığı durumda) görülmektedir.



Şekil 4.15. Silanlanmış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin depo modülü eğrileri

Buradan takviye malzemelerinin silanlanmaları ile birlikte elyaf-matris ve partikül-matris arayüzey etkileşiminde meydana gelen artışla birlikte elyaf-partikül etkileşiminde de bir miktar artış meydana geldiği ve bu sayede depo modülü değerlerinin özellikle artan borik asit miktarıyla değişmediği sonucuna varılabilir.

PLA'ya silanlanmış ve silanlanmamış borik asit ve bazalt elyaf ilavesinin dinamik mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örnek türlerine DMA uygulanmış ve bu analiz sonucunda örnek türlerinin depo modülü değerlerindeki değişim sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. Borik asit ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin depo modülü değerleri üzerine etkisi

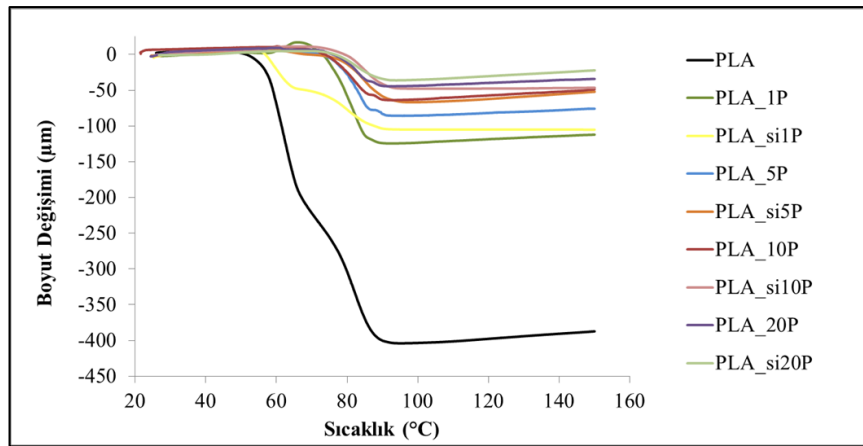
Şekil 4.16 incelendiğinde silanlanmış borik asit ve silanlanmış bazalt elyaf takviye malzemelerinin eş zamanlı kullanılmaları durumunda (silanlanmamış örneklerle karşılaştırıldıklarında) kompozitlerde daha yüksek depo modülü değerlerine ulaşılabildiği görülmektedir. Bu durumun sebebi, silanlama sonucunda takviye malzemesi ve matris malzemesi arasındaki ara yüzey etkileşiminin iyileşmesi, iyileşen ara yüzey etkileşimi sayesinde takviye malzemelerinin polimerik matris içerisinde daha homojen dağılımları ve polimer zincirleri arasına daha çok takviye malzemesi girmesi, sonuç olarak da takviye malzemelerinin matris malzemesinin zincirlerinin hareketliliğini daha etkin şekilde azaltması olarak gösterilebilir.

Diğer taraftan silanlanmış borik asit içeren hibrit kompozitlerde ise camsı formdan kauçuğumsu forma geçiş sıcaklığı daha yüksektir. Bu sonuç, borik asit yüzeyine uygulanan silanlama işleminin, borik asidin PLA matris üzerindeki plastikleştirici etkisini baskıladığı sonucunu doğrulamaktadır.

4.3 Termomekanik Analiz Sonuçları

4.3.1. Pomza takviyeli kompozitlerin termomekanik analiz sonuçları

PLA'ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmamış/silanlanmış pomza ilavesinin termomekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örnekler termomekanik analiz uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerde meydana gelen boyut değişimi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Pomza takviyeli kompozitlerin boyut değişimi eğrileri

Polimerlerde görülebilen düşük boyutsal kararlılık özelliği, kullanım ömrü boyunca malzemenin yapısında eğilme, büzülme gibi şekilsel değişiklikler meydana gelmesine sebep olur. PLA da düşük boyutsal kararlılık gösteren polimerlerden birisidir ve bu özelliği PLA'nın kullanım alanlarının çeşitliliğini sınırlandırmaktadır. PLA'nın bu dezavantajını ortadan kaldırabilmek için çeşitli takviyeler eklenerek kompozit yapılar oluşturulabilir (Cheng ve diğ., 2009). Şekil 4.17'de verilen grafik, değişen ağırlık oranlarında yüzeyi silanlanmamış ve silanlanmış pomza ilavesinin saf PLA'nın boyut değişimi özelliği üzerine etkisini göstermektedir. Şekilden açıkça görülmektedir ki 50-150 °C aralığında artan sıcaklıkla saf PLA'da büyük bir boyut değişimi meydana gelmektedir. Diğer taraftan yüzeyi silanlanmamış/silanlanmış pomza içeren tüm kompozit türlerinin saf PLA'dan daha düşük bir boyut değişimi sergiledikleri açıktır. Boyut değişiminde meydana gelen bu düşüş, pomza partiküllerinin PLA zincirlerinin aralarına girerek hareketliliklerini kısıtlamalarından ve böylece PLA'nın termal genişmesini engellemelerinden kaynaklanmaktadır.

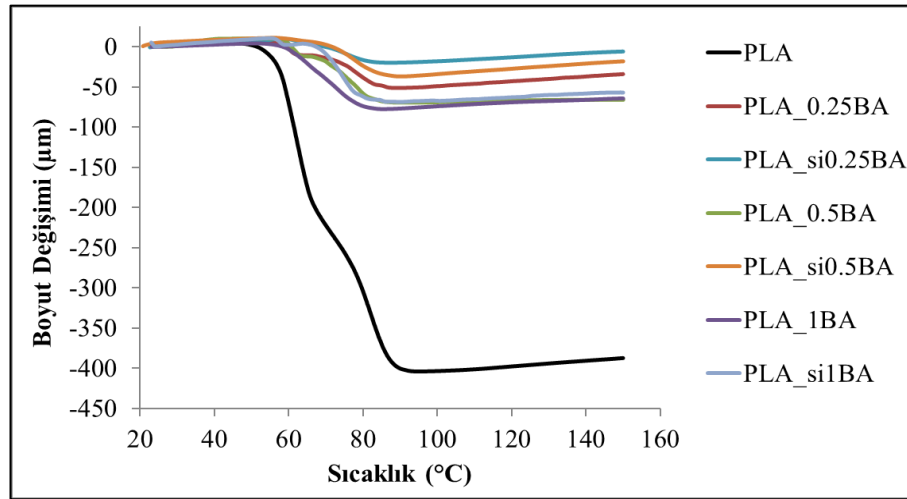
Kompozit malzemelerde boyutsal kararlılığı iyileştirerek malzemedeki meydana gelen boyut değişimini düşürmek ise matris malzemesi ve takviye malzemesi ara yüzey etkileşimi ile ilişkili bir durumdur. Eğer takviye malzemesi ve polimerik matris arasındaki ara yüzey etkileşimi iyiye yani takviye malzemesi polimerik matris tarafından iyi ıslatılabiliriyorsa polimer zincirlerinin hareketliliği aynı oranda kısıtlanacağı için termal genişlemenin azalması ve dolayısıyla boyut değişiminin düşmesi sağlanmış olur (Sim ve diğ., 2010). Diğer bir deyişle takviye malzemesi ve matris malzemesi arasındaki arayüzey etkileşimi iyi olduğu durumda takviye malzemesi yapı içerisinde daha homojen dağılılabılır yani aglomerasyon azdır. Böylece polimer zincirleri arasına girerek zincirlerin hareketliliğini kısıtlayan takviye malzemesi miktarı artar. Diğer taraftan arayüzey yapışması kötü ise takviye malzemesi ve matris malzemesi arasındaki etkileşim düşük olduğundan takviye malzemesi kompozit üretimi sürecinde yapı içerisinde homojen olarak dağılamaz ve aglomera olur. Oluşan aglomeratlar ise polimer zincirlerinin hareketlenmeleri için serbest alanlar oluştururlar. Dolayısıyla iyi ara yüzey etkileşimi düşük boyut değişimi özelliğini de beraberinde getirmektedir denebilir (Choi ve Lee, 2012; Siakeng ve diğ., 2019).

Şekil 4.17 bu bakış açısıyla tekrar incelendiğinde yüzeyi silanlanmış pomza içeren tüm kompozit türlerinin kendileri ile aynı ağırlıkça yükleme oranında silanlanmamış pomza içeren kompozitlerden daha düşük bir boyut değişimi sergiledikleri açıkça görülmektedir. Buradan silanlama işlemi sonucunda pomza takviye malzemesi ve PLA matris malzemesi arasındaki ara yüzey etkileşiminin iyileştiği ve bununla birlikte yüzeyi silanlanmış pomza içeren kompozitlerde pomzanın yapı içerisinde homojen olarak dağılarak PLA zincirlerinin termal genişmesini daha fazla kısıtladığı sonucuna varılabilir.

Diğer taraftan Şekil 4.17’den görülmektedir ki en düşük boyut değişimi değerine ağırlıkça %20 oranında yüzeyi silanlanmış pomza içeren kompozitlerde ulaşılmaktadır ve kompozit içerisinde azalan pomza miktarıyla boyut değişimi artmaktadır.

4.3.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin termomekanik analiz sonuçları

PLA’ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmamış/silanlanmış borik asit ilavesinin termomekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örnekler termomekanik analiz uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerde meydana gelen boyut değişimi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Borik asit takviyeli kompozitlerin boyut değişimi eğrileri

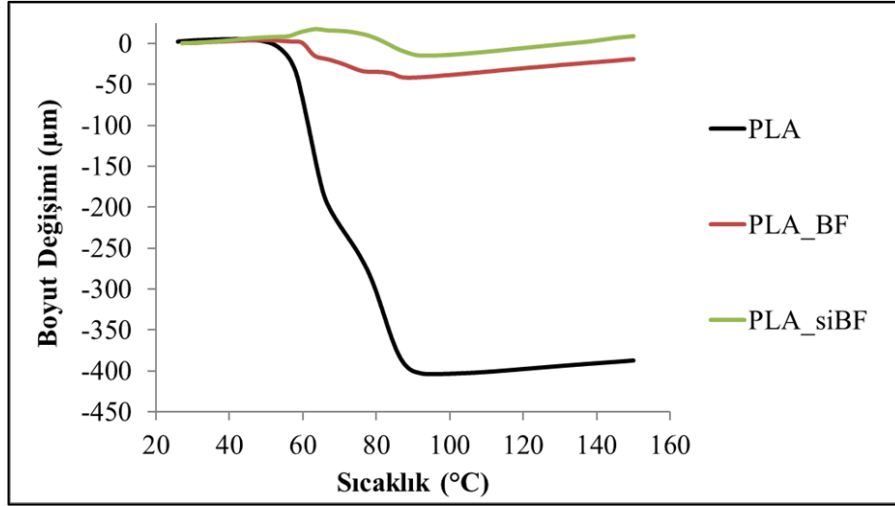
Şekil 4.18’de verilen grafik, değişen ağırlık oranlarında yüzeyi silanlanmamış/silanlanmış borik asit ilavesinin saf PLA’nın boyut değişimi özelliği üzerine etkisini göstermektedir. Şekilden açıkça görülmektedir ki yüzeyi

silanlanmamış/silanlanmış borik asit içeren tüm kompozit türleri saf PLA'dan daha düşük bir boyut değişimi sergilemektedirler. Boyut değişiminde meydana gelen bu düşüş, borik asit partiküllerinin PLA zincirlerinin aralarına girerek hareketliliklerini kısıtlamalarından ve böylece PLA'nın termal genişmesini engellemelerinden kaynaklanmaktadır.

Borik asit yüzeyine uygulanan silanlama işlemi aracılığıyla borik asit takviye malzemesi ve PLA matris arasındaki ara yüzey etkileşiminde meydana gelen değişimin kompozitlerin boyut değişimi özelliği üzerine etkisini incelemek amacıyla Şekil 4.18 tekrar incelendiğinde ise görülmektedir ki yüzeyi silanlanmış borik asit içeren tüm kompozit türleri, kendileri ile aynı ağırlıkça yükleme oranında silanlanmamış borik asit içeren kompozitlerden daha düşük bir boyut değişimi sergilemektedirler. Buradan silanlama işlemi sonucunda borik asit takviye malzemesi ve PLA matris malzemesi arasındaki ara yüzey etkileşiminin iyileştiği ve bununla birlikte yüzeyi silanlanmış borik asit içeren kompozitlerde borik asidin yapı içerisinde homojen olarak dağılarak PLA zincirlerinin termal genişmesini daha fazla kısıtladığı sonucuna varılabilir.

4.3.3 Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin termomekanik analiz sonuçları

PLA'ya silanlanmış ve silanlanmamış bazalt elyaf ilavesinin termomekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örneklere termomekanik analiz uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerde meydana gelen boyut değişimi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.19'da verilmiştir. Şekil 4.19'da verilen grafik, saf PLA matrise yüzeyi silanlanmış/silanlanmamış bazalt elyaf ilavesinin, saf PLA'nın boyut değişimi özelliği üzerine etkisini göstermektedir. Şekilden açıkça görülmektedir ki saf PLA'ya her iki tür bazalt elyaf ilavesiyle de saf PLA'dan daha düşük boyut değişimi değerleri elde edilmektedir. Boyut değişiminde meydana gelen bu düşüş, bazalt liflerinin PLA zincirlerinin aralarına girerek hareketliliklerini kısıtlamalarından ve böylece PLA'nın termal genişmesini engellemelerinden kaynaklanmaktadır.

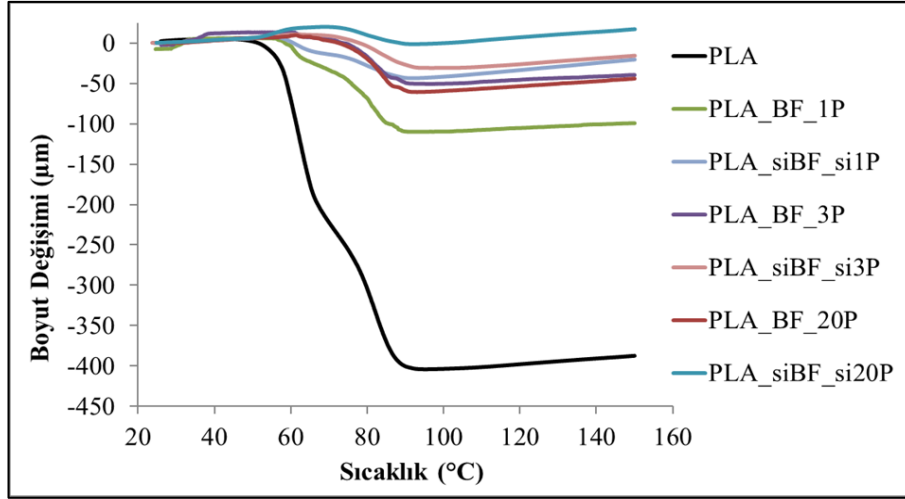


Şekil 4.19. Silanlama işleminin bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin boyut değişimi özelliği üzerine etkisi

Bununla birlikte şekilden de görüldüğü gibi en düşük boyut değişimi ise yüzeyi silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitlerde elde edilmektedir. Buradan silanlama işlemi sonucunda bazalt elyaf takviye malzemesi ve PLA matris malzemesi arasındaki ara yüzey etkileşiminin iyileştiği ve bununla birlikte yüzeyi silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitlerde bazalt liflerinin yapı içerisinde daha homojen olarak dağılarak PLA zincirlerinin termal genişmesini daha fazla kısıtladığı sonucuna varılabilir.

4.3.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin termomekanik analiz sonuçları

Silanlanmamış/silanlanmış pomza ve silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin termomekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla örnek türlerine termomekanik analiz uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerde meydana gelen boyut değişimi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.20'de verilmiştir. Şekil 4.20'de verilen grafik incelendiğinde, değişen ağırlık oranlarında yüzeyi silanlanmamış/silanlanmış pomza ve yüzeyi silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf içeren tüm hibrit kompozit türlerinin saf PLA'dan daha düşük bir boyut değişimi sergiledikleri görülmektedir. Boyut değişiminde meydana gelen bu düşüş, takviye malzemelerinin PLA zincirlerinin aralarına girerek hareketliliklerini kısıtlamalarından ve böylece PLA'nın termal genişmesini engellemelerinden kaynaklanmaktadır.

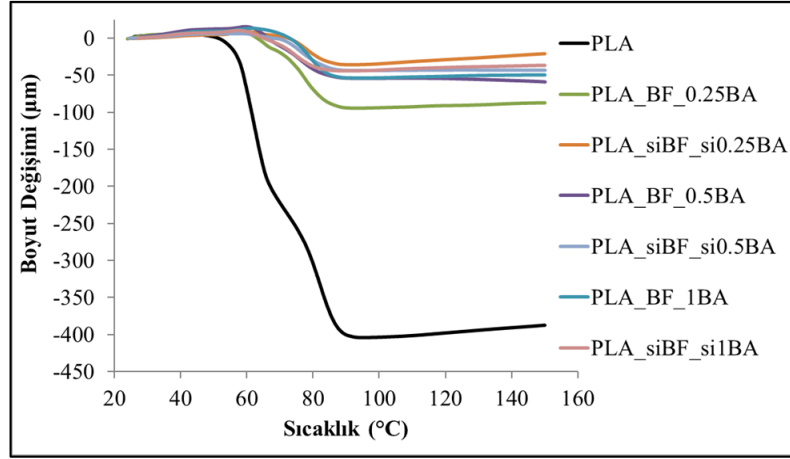


Şekil 4.20. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin boyut değişimi eğrileri

Pomza ve bazalt elyaf yüzeylerine uygulanan silanlama işlemi aracılığıyla takviye malzemeleri ve PLA matris arasındaki arayüzey etkileşiminde meydana gelen değişimin hibrit kompozitlerin boyut değişimi özelliği üzerine etkisini incelemek amacıyla Şekil 4.20 tekrar incelendiğinde ise görülmektedir ki yüzeyi silanlanmış takviye malzemesi içeren tüm hibrit kompozit türleri, kendileri ile aynı ağırlıkça yükleme oranında silanlanmamış takviye malzemesi içeren hibrit kompozitlerden daha düşük bir boyut değişimi sergilemektedirler. Buradan silanlama işlemi sonucunda takviye malzemeleri ve PLA matris malzemesi arasındaki arayüzey etkileşiminin iyileştiği ve bununla birlikte yüzeyi silanlanmış takviye malzemesi içeren hibrit kompozitlerde takviye malzemelerinin yapı içerisinde homojen olarak dağılarak PLA zincirlerinin termal genişmesini daha fazla kısıtladığı sonucuna varılabilir.

4.3.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin termomekanik analiz sonuçları

Silanlanmamış/silanlanmış borik asit ve silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin termomekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla örnek türlerine termomekanik analiz uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerde meydana gelen boyut değişimi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin boyut değişimi eğrileri

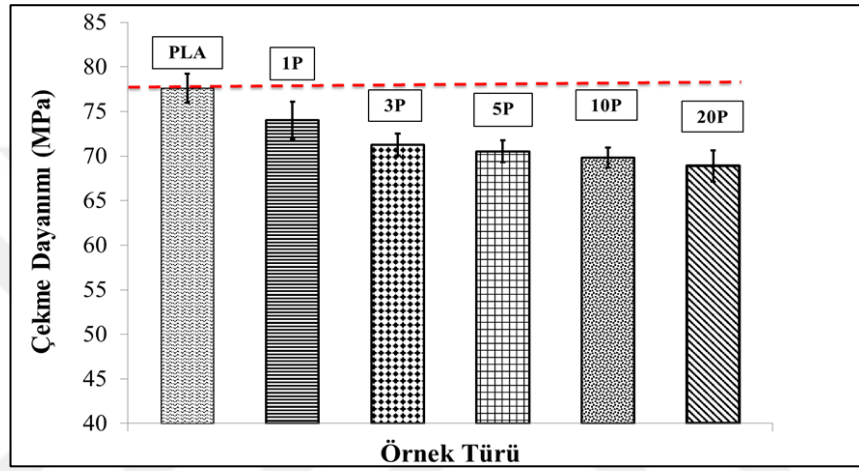
Şekil 4.21'de verilen grafik incelendiğinde, değişen ağırlık oranlarında yüzeyi silanlanmamış/silanlanmış borik asit ve yüzeyi silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf içeren tüm hibrit kompozit türlerinin saf PLA'dan daha düşük bir boyut değişimi sergiledikleri görülmektedir. Boyut değişiminde meydana gelen bu düşüş, takviye malzemelerinin PLA zincirlerinin aralarına girerek hareketliliklerini kısıtlamalarından ve böylece PLA'nın termal genişmesini engellemelerinden kaynaklanmaktadır.

Borik asit ve bazalt elyaf yüzeylerine uygulanan silanlama işlemi aracılığıyla takviye malzemeleri ve PLA matris arasındaki arayüzey etkileşiminde meydana gelen değişimin hibrit kompozitlerin boyut değişimi özelliği üzerine etkisini incelemek amacıyla Şekil 4.21 tekrar incelendiğinde ise görülmektedir ki yüzeyi silanlanmış takviye malzemesi içeren tüm hibrit kompozit türleri, kendileri ile aynı ağırlıkça yükleme oranında silanlanmamış takviye malzemesi içeren hibrit kompozitlerden daha düşük bir boyut değişimi sergilemektedirler. Buradan silanlama işlemi sonucunda takviye malzemeleri ve PLA matris malzemesi arasındaki ara yüzey etkileşiminin iyileştiği ve bununla birlikte yüzeyi silanlanmış takviye malzemesi içeren hibrit kompozitlerde takviye malzemelerinin yapı içerisinde homojen olarak dağılarak PLA zincirlerinin termal genişmesini daha fazla kısıtladığı sonucuna varılabilir.

4.4. Çekme Testi Sonuçları

4.4.1. Pomza takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçları

PLA'ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmamış pomza ilavesinin, saf PLA'nın çekme dayanımı üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örneklere çekme testi uygulanmış ve bu test sonucunda örneklerin çekme dayanımı değerlerindeki değişim Şekil 4.22'de verilmiştir.



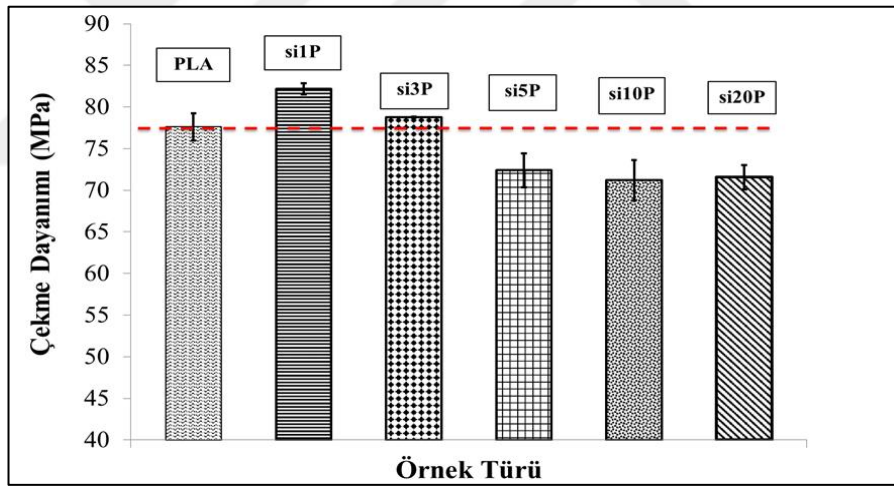
Şekil 4.22. Silanlanmamış pomza takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.22 incelendiğinde saf PLA'ya silanlanmamış pomza ilavesiyle (pomzanın beş ağırlık oranı için de) çekme dayanımı değerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Takviye malzemesinin kompozit içerisindeki etkinliğini etkileyen en önemli unsurlardan birinin takviye malzemesinin matris içerisindeki homojen dağılımı olduğu göz önünde bulundurulduğunda PLA matrise yüzeyi silanlanmamış pomza ilave edilmesiyle pomzanın PLA matris içerisinde homojen dağılmadığı ve dolayısıyla kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinde saf PLA ile karşılaştırıldığında bir azalma meydana geldiği sonucuna varılabilir. Bunun sebebi, matris içerisinde homojen olarak dağılamayan pomza partiküllerinin aglomera olmaları (topaklanmaları) ve çekme testinde bu aglomeratların kusurlu noktalar gibi davranarak ilk kırılmanın gerçekleştiği yerler olmalarıdır (Ramesan ve diğ., 2016; Jin ve diğ., 2008; Bikiaris, 2010; Yesil ve Bayram, 2011).

Takviye malzemesinin matris içerisinde dağılımını etkileyen önemli unsurlardan biri ise takviye malzemesi ile matris malzemesi arasındaki arayüzey yapışmasının

kalitesidir. Arayüzey yapışması iyi olduğu durumda aglomerasyon azdır ve takviye malzemesinin etkinliği yüksektir. Ancak arayüzey yapışması kötü ise takviye malzemesi ve matris malzemesi arasındaki etkileşim düşük olduğundan takviye malzemesi kompozit üretimi sürecinde yapı içerisinde dağılamaz ve aglomera olur. Dolayısıyla aglomerasyonu önlemenin en etkin yolu takviye malzemesi ile matris malzemesi arasındaki arayüzey etkileşimini iyileştirmektir.

Bu tez çalışması kapsamında da pomza ve PLA arasındaki arayüzey etkileşimini iyileştirmek ve PLA matrisinden pomza takviye malzemesine olan yük transferini arttırmak amacıyla pomza partiküllerinin yüzeylerine silanlama işlemi uygulanmıştır. Saf PLA'ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmış pomza ilavesinin saf PLA'nın çekme dayanımı değeri üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örneklere çekme testi uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerin çekme dayanımı değerlerindeki değişim Şekil 4.23'de verilmiştir.

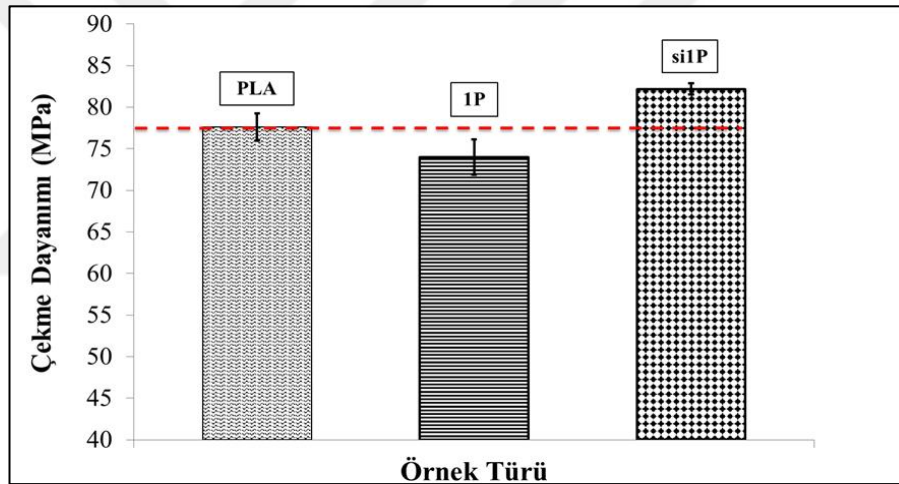


Şekil 4.23. Silanlanmış pomza takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.23 incelendiğinde saf PLA'ya ağırlıkça %1 ve 3 oranlarında yüzeyi silanlanmış pomza ilavesiyle çekme dayanımında artış meydana geldiği görülmektedir. Çekme dayanımındaki bu artış, ağırlıkça %1 oranında yüzeyi silanlanmış pomza içeren kompozitlerde yaklaşık % 6 oranındadır. Diğer taraftan saf PLA'ya ağırlıkça %5, 10 ve 20 oranlarında yüzeyi silanlanmış pomza ilavesiyle çekme dayanımı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Buradan PLA matrisine ağırlıkça %1 ve 3 oranlarında yüzeyi silanlanmış pomza ilavesiyle partikül ve matris arasındaki arayüzey etkileşiminde meydana gelen iyileşme sebebiyle partiküllerin

matris içerisinde daha homojen dağılımlarının sağlandığı ve böylece takviye malzemesinin etkinliğinin arttığı yorumu yapılabilir. Ancak PLA matrise ilave edilen silanlanmış pomza miktarı arttıkça partikül-matris arayüzeyi etkileşiminin iyileşmesine rağmen partiküllerin aglomera olma eğilimlerinin baskın geldiği ve aglomerasyon sebebiyle etkinliklerinin azaldığı böylece çekme dayanımı değerlerinin düştüğü görülmektedir.

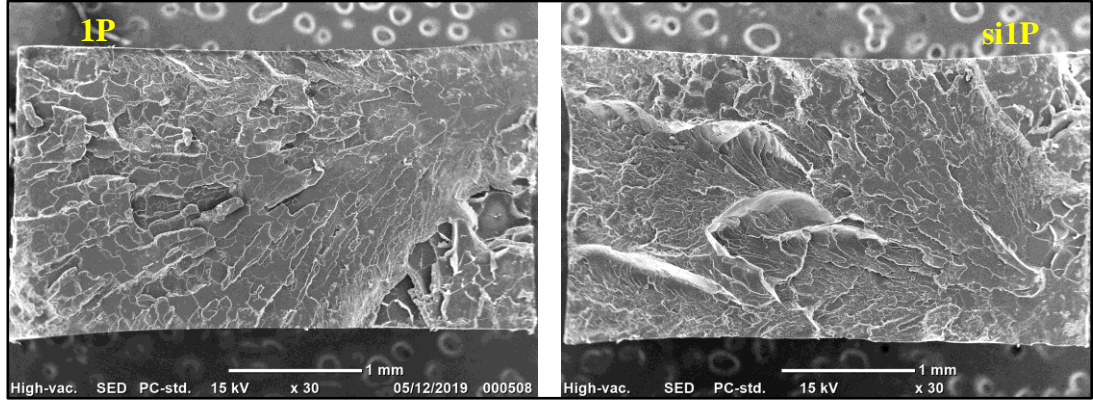
Pomza yüzeyinin silanlanması işleminin pomza takviyeli PLA matrisli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisini inceleyebilmek amacıyla her iki takviye malzemesi türünün (silanlanmış ve silanlanmamış pomza) kullanıldığı durumda en iyi sonuç veren örneklere ait çekme dayanımı değerleri karşılaştırılmış ve sonuç Şekil 4.24’de verilmiştir.



Şekil 4.24. Silanlama işleminin pomza takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisi

Şekil 4.24 incelendiğinde pomza yüzeyine uygulanan silanlama işlemi sonucunda yüzeyde oluşan fonksiyonel gruplar sayesinde pomza ve PLA arasındaki arayüzey etkileşiminin iyileştiği, böylece yüzeyi silanlanmış pomza partiküllerinin yapı içerisinde daha homojen dağılımları sayesinde takviye etkinliklerinin arttığı görülmektedir.

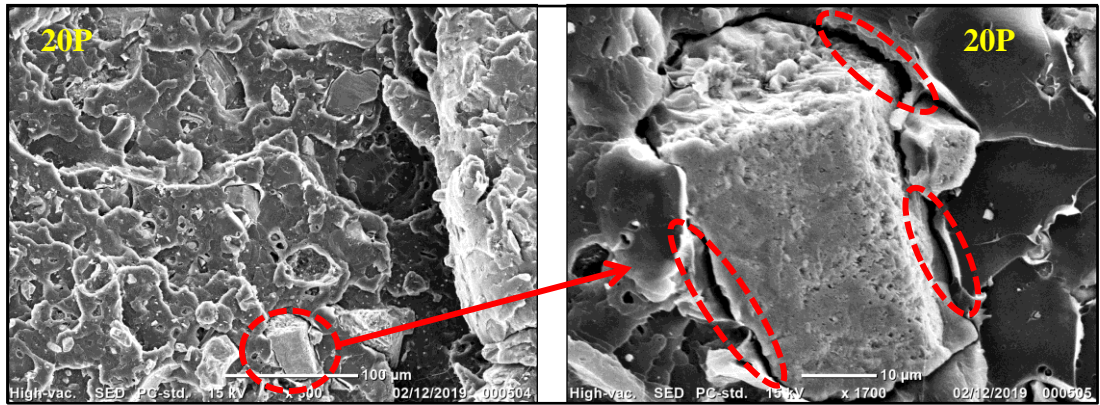
PLA’ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmış/silanlanmamış pomza ilavesiyle elde edilen kompozitlerin kopma yüzeylerinin morfolojik yapısına ait görüntüler Şekil 4.25 ve 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4.25. Silanlanmamış/silanlanmış ağırlıkça %1 pomza içeren kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri

Şekil 4.25’de PLA matrisine silanlanmamış/silanlanmış ağırlıkça %1 pomza takviyesiyle elde edilen kompozitlere ait kopma yüzeylerinin 30 kat büyütme altındaki görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.25 incelendiğinde hem silanlı hem de silansız pomza partiküllerinin PLA matris içerisinde homojen olarak dağıldıkları ve pomzanın bu ağırlık oranı için PLA matris içerisinde büyük aglomeratlar (topaklar) oluşmadığı açıkça görülmektedir.

Şekil 4.26’da ağırlıkça %20 silanlanmamış pomza takviyeli kompozite ait kırılma yüzeyinin 300 ve 1700 kat büyütmedeki görüntüleri verilmiştir.



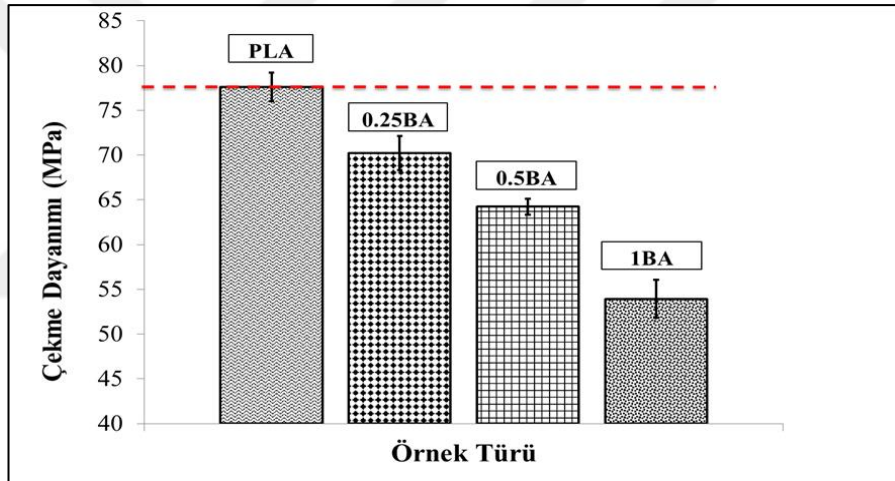
Şekil 4.26. Silanlanmamış ağırlıkça %20 pomza içeren kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri

Şekil 4.26 incelendiğinde kırılma yüzeyinde görünen pomza partikülü yüzeyinin PLA matrisi tarafından iyi ıslatılmadığı partikül etrafında oluşan boşluklardan açıkça anlaşılmaktadır. Böyle bir durumda arayüzey yapışması kötü olduğundan takviye malzemesi ve matris arasındaki etkileşim de düşük olacağı için çekme testi

esnasında bu boşlukların kusurlu noktalar gibi davranarak ilk kırılmanın gerçekleştiği yerler olmaları yorumu yapılabilir. Öyle ki ağırlıkça yüksek oranda pomza takviyesiyle birlikte oluşacak bu kusurlu bölgelerin miktarı da artacağından pomza takviyeli kompozit malzemeler için mekanik özelliklerin kötü etkileneceği söylenebilir.

4.4.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçları

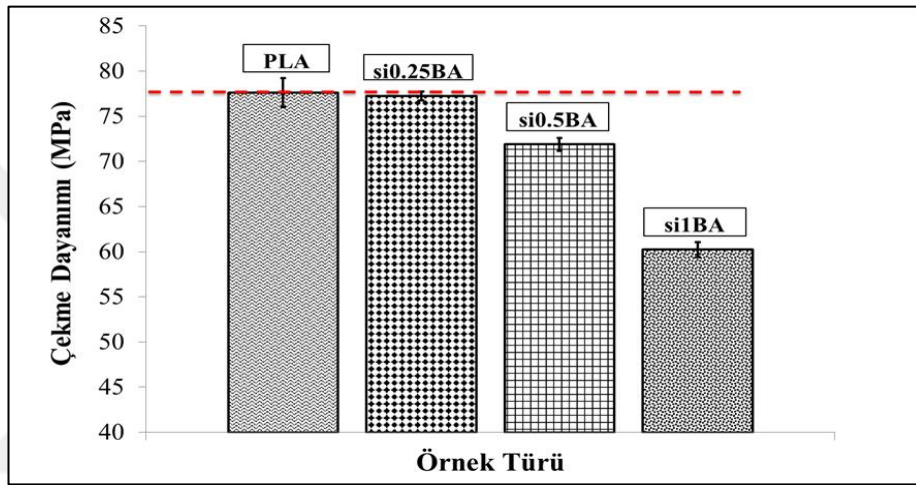
PLA'ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmamış borik asit ilavesinin, saf PLA'nın çekme dayanımı üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örneklere çekme testi uygulanmış ve bu test sonucunda örneklerin çekme dayanım değerlerindeki değişim Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.27. Silanlanmamış borik asit takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.27 incelendiğinde saf PLA'ya silanlanmamış artan borik asit ilavesiyle çekme dayanımı değerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Buradan yüzeysel silanlanmamış borik asit takviye malzemesinin PLA matris içerisinde homojen olarak dağılmayarak topaklandığı, çekme testinde bu topakların kusurlu noktalar gibi davranarak ilk kırılmanın gerçekleştiği yerler oldukları ve dolayısıyla kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinde saf PLA ile karşılaştırıldığında bir azalma meydana geldiği sonucuna varılabilir (Demirel ve diğ., 2010; Ramesan ve diğ., 2016, Jin ve diğ., 2008; Bikiaris, 2010; Yesil ve Bayram, 2011).

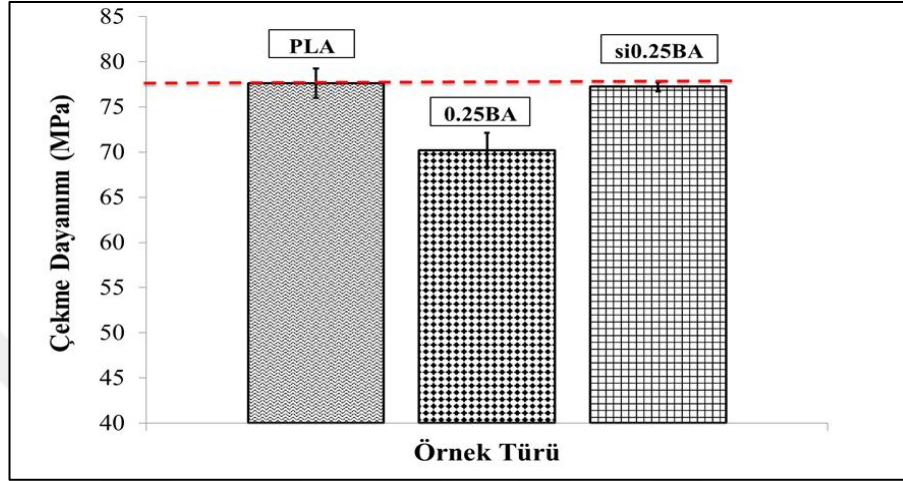
Borik asit yüzeyindeki fonksiyonel grup sayısını arttırarak borik asit ve PLA arasındaki arayüzey etkileşimini iyileştirmek ve PLA matristen borik asit takviye malzemesine olan yük transferini arttırmak amacıyla borik asit partiküllerinin yüzeylerine silanlama işlemi uygulanmıştır. Saf PLA'ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmış borik asit ilavesinin saf PLA'nın çekme dayanımı değeri üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örneklere çekme testi uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerin çekme dayanımı değerlerindeki değişim Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.28. Silanlanmış borik asit takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.28 incelendiğinde saf PLA'ya ağırlıkça ağırlıkça %0,25 oranında yüzeyi silanlanmış borik asit ilavesiyle çekme dayanımında bir değişiklik meydana gelmediği ancak ilave edilen yüzeyi silanlanmış borik asit miktarı arttıkça çekme dayanımı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Buradan PLA matrise ağırlıkça %0,25 oranında yüzeyi silanlanmış borik asit ilavesiyle partikül ve matris arasındaki arayüzey etkileşiminde meydana gelen iyileşme sebebiyle partiküllerin matris içerisinde daha homojen dağılımlarının sağlandığı ve böylece takviye malzemesinin etkinliğinin bir miktar arttığı yorumu yapılabilir. Ancak PLA matrise ilave edilen silanlanmış borik asit miktarı arttıkça partikül-matris ara yüzeyi etkileşimi iyileşmesine rağmen partiküllerin aglomera olma eğilimlerinin baskın geldiği ve aglomerasyon sebebiyle etkinliklerinin azaldığı ve çekme dayanımı değerlerinin düştüğü görülmektedir.

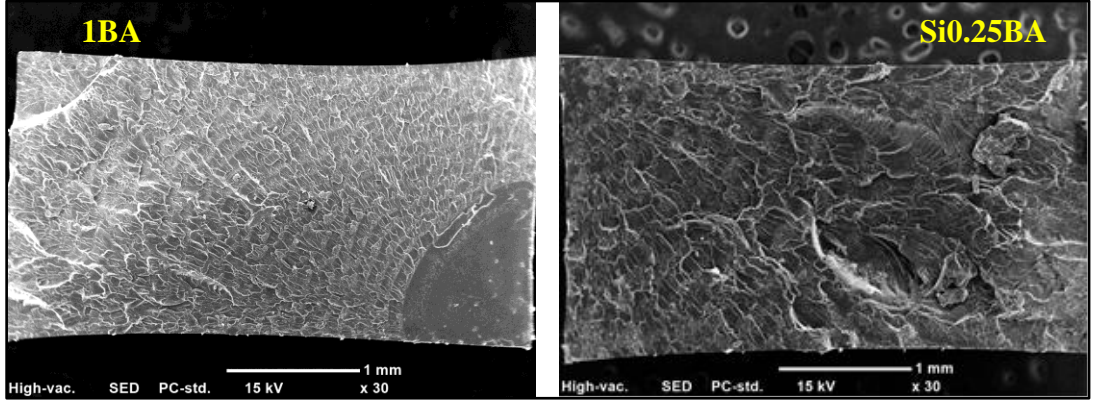
Borik asit yüzeyinin silanlanması işleminin borik asit takviyeli PLA matrisli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisini inceleyebilmek amacıyla her iki takviye malzemesi türünün (silanlanmış ve silanlanmamış borik asit) kullanıldığı durumda en iyi sonuç veren örneklerle ait çekme dayanımı değerleri karşılaştırılmış ve sonuç Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29. Silanlama işleminin borik asit takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisi

Şekil 4.29 incelendiğinde borik asit yüzeyine uygulanan silanlama işlemi sonucunda yüzeyde oluşan fonksiyonel gruplar sayesinde borik asit ve PLA arasındaki arayüzey etkileşiminin iyileştiği, böylece yüzeyi silanlanmış borik asit partiküllerinin yapı içerisinde daha homojen dağılmaları sayesinde takviye etkinliklerinin arttığı, sonuç olarak da yüzeyi silanlanmamış borik asit takviyeli kompozitlerle karşılaştırıldığında çekme dayanımı değerinde yaklaşık %10'luk bir artış elde edildiği görülmektedir.

Ağırlıkça %0,25 silanlanmış borik asit partikülünün PLA matrisine takviyesiyle elde edilen kompozitin kırılma yüzeyine ait 30 kat büyütmedeki görüntüsü Şekil 4.30’da verilmiştir.

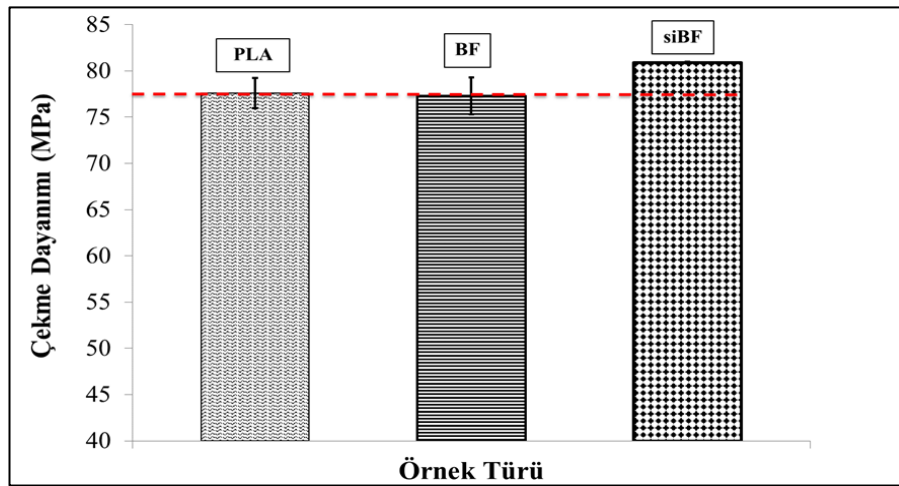


Şekil 4.30. Silanlanmamış ağırlıkça %1 ve silanlanmış ağırlıkça % 0.25 borik asit içeren kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri

Şekil 4.30 incelendiğinde borik asit yükleme miktarının az olması sebebiyle borik asit partiküllerinin kompozit yapı içerisinde gözlemlenemediği ancak borik asidin PLA matris üzerinde yarattığı plastikleştirici etki sebebiyle PLA matrisin sünek bir kırılma davranışı sergilediği görülmektedir.

4.4.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin çekme testi sonuçları

PLA'ya silanlanmış/silanlanmamış bazalt elyaf ilavesinin çekme dayanım üzerine etkisinin incelenmesi için örneklere çekme testi uygulanmış ve bu analiz sonucunda örnek türlerinin çekme dayanımı değerlerindeki değişim Şekil 4.31'de verilmiştir.

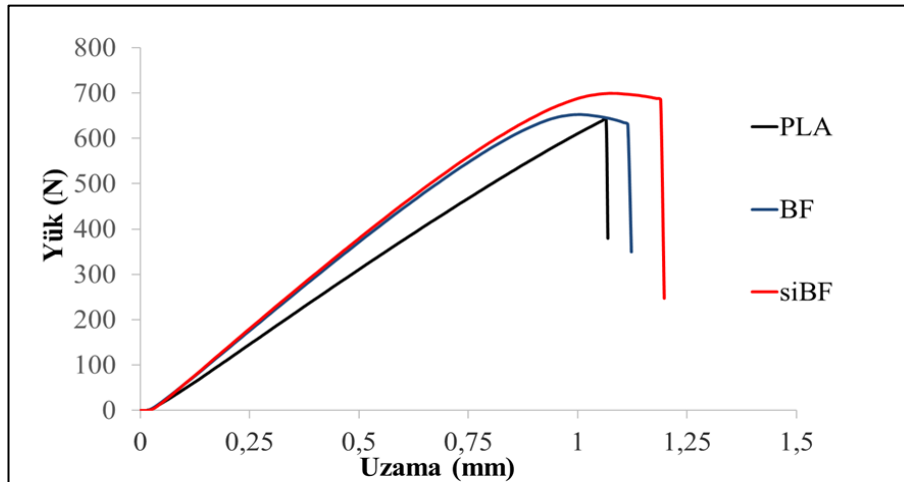


Şekil 4.31. Silanlama işleminin bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisi

Şekil 4.31 göstermektedir ki saf PLA matrise yüzeyi işlem görmemiş bazalt elyaf ilavesiyle çekme dayanımı değerinde herhangi bir değişiklik meydana gelmemektedir. Bu durumun sebebi yüzeyi işlem görmemiş bazalt elyaf ve PLA matris arasındaki zayıf arayüzey etkileşimi olarak gösterilebilir.

Zayıf arayüzey etkileşimi olduğu durumda PLA matrise uygulanan yük etkin bir şekilde bazalt elyafa aktarılamamakta ve bazalt elyaf kendisinden beklenen takviye etme performansını sergileyememektedir. Bununla birlikte saf PLA matrise yüzeyi silanlanmış bazalt elyaf ilavesiyle çekme dayanımı değerinde artış meydana geldiği yine Şekil 4.31'den görülebilmektedir. Bu sonuç silanlama işlemi sonrasında bazalt elyaf yüzeyinde oluşan fonksiyonel gruplar aracılığıyla elyaf-matris arayüzey etkileşiminin iyileşmesinden, böylece matristen elyafa iyileşen arayüzey yapışması sayesinde daha fazla yük aktarılabilmesinden ve sonuç olarak elyafın daha fazla yük taşıyarak takviye etme performansını daha fazla sergileyebilmesinden kaynaklanmaktadır denebilir (Deák ve diğ., 2010; Kuzmin ve diğ., 2017; Espana ve diğ., 2013; Sang ve diğ., 2017).

Silanlanmış ve silanlanmamış bazalt elyaf takviyeli PLA matrisli kompozitlere ait yük-uzama eğrileri Şekil 4.32'de verilmiştir.

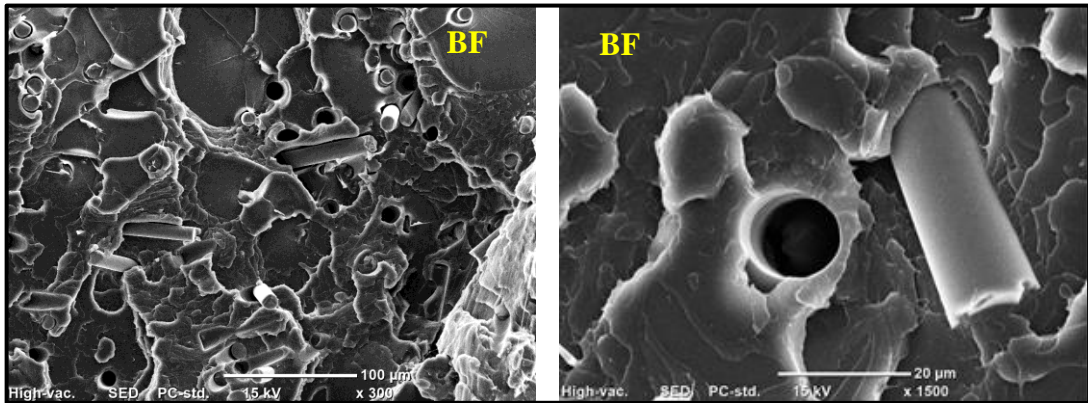


Şekil 4.32. Silanlama işleminin bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin yük-uzama eğrileri üzerine etkisi

Şekil 4.32 incelendiğinde görülmektedir ki saf PLA matris gevrek bir kırılma davranışı sergilerken elyaf takviyesiyle bu davranış gevrekten sünek yapıya dönüşmektedir ve ayrıca kopma uzaması değeri artmaktadır. Bununla birlikte yüzeyi

silanlanmış bazalt elyaf takviyeli kompozite ait yük-uzama eğrisi incelendiğinde ise bu kompozit türünün daha fazla yük taşıma kapasitesinde olduğu ve ayrıca daha fazla kopma uzaması değeri sergilediği gözlemlenen bir diğer sonuçtur. Kopma uzaması değeri, kompozitlerde elyaf-matris arayüzey etkileşiminin bir göstergesidir. Çünkü kompozit bir malzemeye yük uygulandığında ve bu yükün miktarı takviye malzemesi ile matris malzemesinin arayüzey yapışma kuvvetini aştığında aralarında bir ayrılma meydana gelir ve bu bölgede mikro çatlaklar oluşmaya başlar. Böyle bir durumda takviye malzemesinin etrafını saran matris malzemesi deformasyona uğrar ve bu deformasyon sırasında bu bölgede enerji absorblanır. Böylece çatlak ilerlemesi yavaşlar ve örnek daha uzun sürede ve sünek yapıda kırılır. Dolayısıyla takviye malzemesi ile matris malzemesi arasında ne kadar iyi bir arayüzey etkileşimi varsa aralarındaki yapışma kuvvetini aşmak için kompozite o kadar fazla yük uygulanmalıdır ve bu süreçte sistem tarafından o kadar fazla enerji absorblanmalıdır denebilir (Liang ve diğ., 2000). Dolayısıyla Şekil 4.32 göstermektedir ki bazalt elyaf yüzeyine uygulanan silanlama işlemi sonucunda elyaf-matris arayüzey etkileşimi artmakta ve kompozitin yük taşıma performansı iyileşmektedir.

PLA'ya %10 ağırlık oranında silanlanmış/silanlanmamış bazalt elyaf ilavesiyle elde edilen kompozitlerin kopma yüzeylerinin morfolojik yapısına ait görüntüler Şekil 4.33 ve 4.34'de verilmiştir.

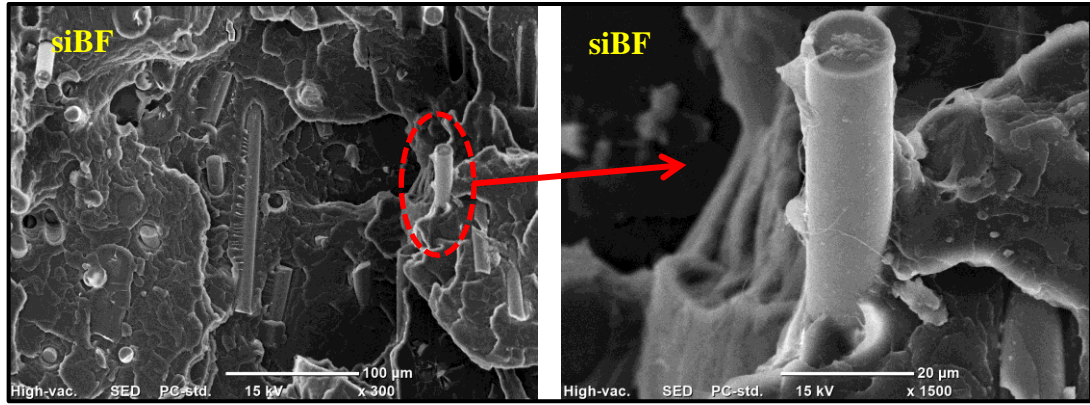


Şekil 4.33. Silanlanmamış ağırlıkça %10 bazalt elyaf içeren kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri

PLA matrisine silanlanmamış bazalt elyaf takviyesi sonucunda elde edilen kompozitin kırılma yüzeyinin 300 ve 1500 kat büyütmedeki görüntüleri Şekil 4.33'de verilmiştir. Şekil 4.33 incelendiğinde silanlanmamış bazalt elyafın yapıya

katılmasıyla birlikte oluşturulan kompozitin kırılma yüzeyi incelendiğinde zayıf elyaf matris arayüzey yapışmasından dolayı kompozit yapıda bulunan boşluklardan (void) elyafların kolayca çıktığı (fiber pull-out) dolayısıyla bazalt elyafların kompozit yapı içerisinde beklenen performansı sergileyemedikleri söylenebilir (Senturk ve diğ., 2018).

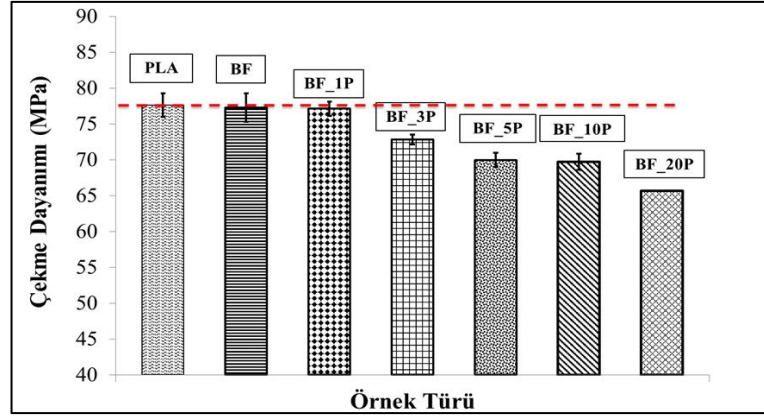
Bununla birlikte bazalt elyafa yüzey modifikasyonu uygulanmasından sonra elde edilen kompozitin kırılma yüzeyi aynı büyütme oranlarında Şekil 4.34'den incelendiğinde, bariz bir biçimde bazalt elyafların silanlama işlemi sonrasında PLA matrisi tarafından daha iyi ıslatıldığı ve arayüzey etkileşiminin iyileştiği görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.33 ve 4.34 birlikte değerlendirildiğinde silanlanmamış bazalt elyaf yüzeyinin daha pürüzsüz bir görüntüye sahip olduğu görülmektedir. Fakat silanlama işlemi sonrasında bazalt elyaf yüzeyinde matris malzemesine daha kolay bağlanmayı sağlayabilecek bazı küçük çıkıntılar ve pürüzler olduğu ve bunun da silanlama işleminin etkisi olduğu şeklinde yorumlanmaktadır (Chen ve diğ., 2012). Buradan silanlama işleminin elyafların matris tarafından daha iyi sarılmasını sağlayarak kompozit malzemeye gelen çekme yükünün fiberler tarafından daha iyi taşınmasına sebep olduğu yorumu yapılabilir.



Şekil 4.34. Silanlanmış ağırlıkça %10 bazalt elyaf içeren kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri

4.4.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları

Saf PLA'ya silanlanmamış pomza ve silanlanmamış bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla örnek türlerine çekme testi uygulanmış ve bu analiz sonucunda örnek türlerinin çekme dayanımı değerlerindeki değişim Şekil 4.35'de verilmiştir.

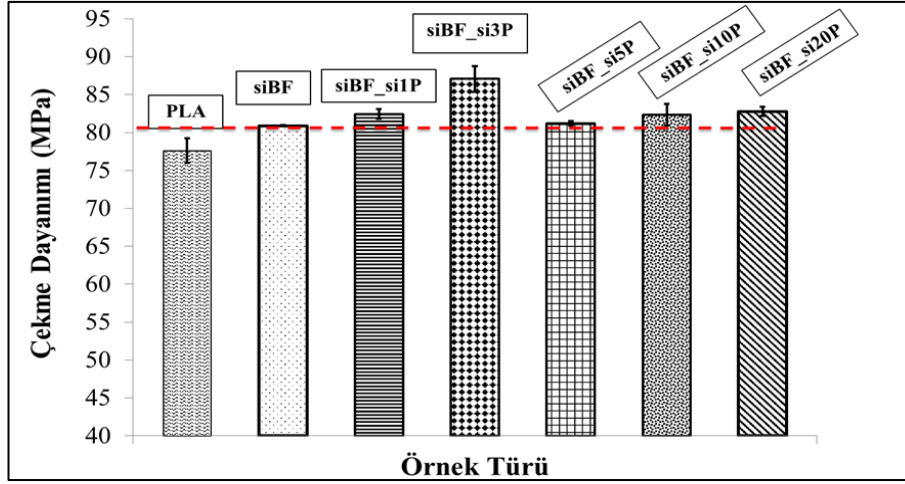


Şekil 4.35. Silanlanmamış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.35 göstermektedir ki ağırlıkça %1 oranında silanlanmamış pomza içeren hibrit kompozite ait çekme dayanımı değeri sadece bazalt elyaf içeren kompozitin çekme dayanımı değeri ile neredeyse aynıdır.

Bununla birlikte kompozit içerisinde pomzanın artan ağırlık oranıyla birlikte hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri daha da düşmekte ve ağırlıkça %20 oranında silanlanmamış pomza ve silanlanmamış bazalt elyaf içeren kompozitte en düşük değerine ulaşmaktadır. Buradan bazalt elyaf ve pomza arasında oluşması beklenen hibrit etkinin sadece ağırlıkça %1 oranında silanlanmamış pomza içeren hibrit kompozitte meydana geldiği, diğer kompozit türlerinde kompozit bileşenleri arasındaki zayıf arayüzey etkileşimleri sebebiyle beklenen hibrit etkinin ortaya çıkmadığı sonucuna ulaşılmaktadır. Zira kompozit bileşenleri arasındaki arayüzey etkileşiminin zayıf olması sebebiyle matristen takviye malzemelerine yeterince yük aktarılamamış ayrıca pomza partiküllerinin kompozit içerisinde homojen dağılımları mümkün olmamıştır.

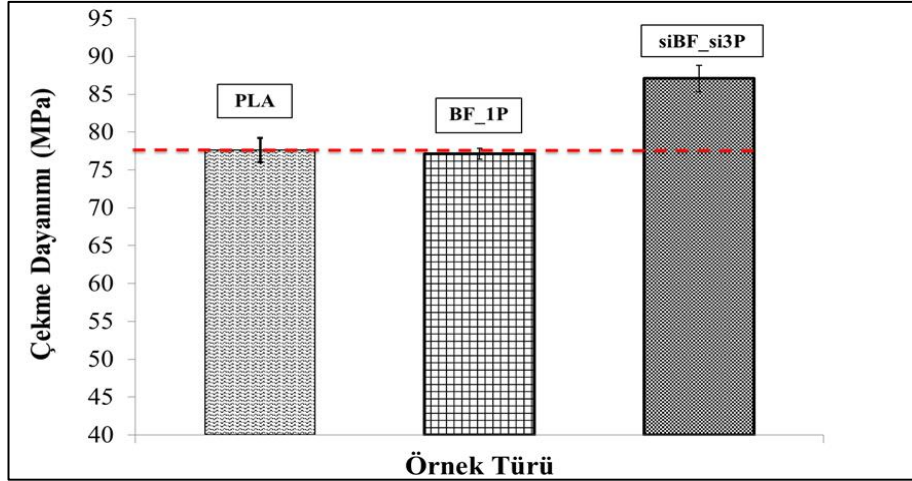
Pomza ve bazalt elyaf yüzeylerindeki fonksiyonel grup sayısını arttırarak pomza, bazalt elyaf ve PLA arasındaki arayüzey etkileşimini iyileştirmek ve PLA matrinden takviye malzemelerine olan yük transferini arttırmak amacıyla takviye malzemelerinin yüzeylerine silanlama işlemi uygulanmıştır. Saf PLA'ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmış pomza ve silanlanmış bazalt elyaf ilavesinin saf PLA'nın çekme dayanımı değeri üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örnekler çekme testi uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerin çekme dayanımı değerlerindeki değişim Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.36. Silanlanmış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.36 incelendiğinde silanlanmış pomza ve silanlanmış bazalt elyaf içeren tüm hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinin sadece silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitin çekme dayanımı değerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri ağırlıkça %3 oranında silanlanmış pomza ve silanlanmış bazalt elyaf içeren hibrit kompozitte en yüksek değerine ulaşmaktadır. Buradan bazalt elyaf ve pomza takviye malzemelerinin silanlanmaları ile birlikte kompozit bileşenleri arasındaki etkileşimlerde artış meydana geldiği, bu sayede partiküllerin matris içerisinde daha homojen dağılımlarının sağlandığı ve böylece etkinliklerinin arttığı yorumu yapılabilir. Bununla birlikte hibrit kompozitlerde optimum özellikleri sağlayan pomza miktarının ağırlıkça %3 olduğu, pomzanın bu yükleme oranının altında veya üstünde kullanılması halinde yeterli performansı sağlayamadığı Şekil 4.36'dan gözlemlenen bir başka sonuçtur.

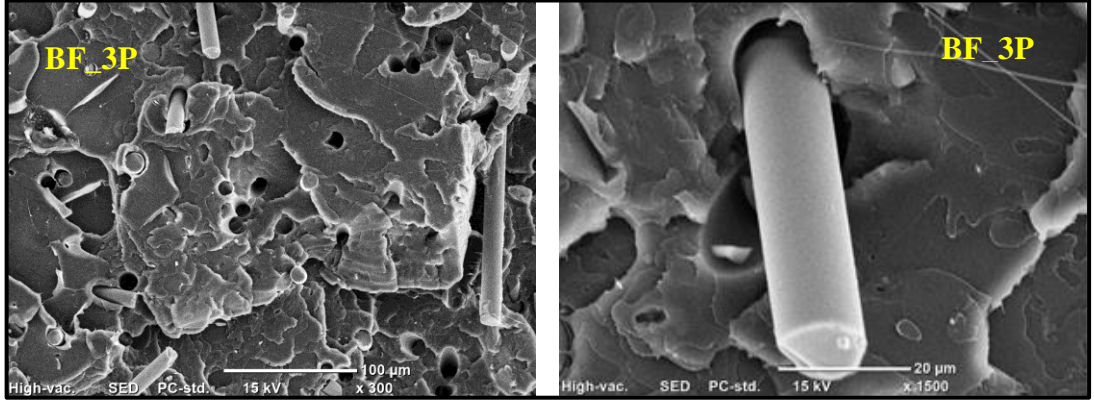
Pomza ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisini daha detaylı inceleyebilmek amacıyla her iki takviye malzemesi türünün (silanlanmış ve silanlanmamış pomza ve bazalt elyaf) kullanıldığı durumda en iyi sonuç veren örneklere ait çekme dayanımı değerleri karşılaştırılmış ve sonuç Şekil 4.37'de verilmiştir.



Şekil 4.37. Pomza ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisi

Şekil 4.37 göstermektedir ki saf PLA matrise ağırlıkça %1 oranında silanlanmamış pomza ve bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle çekme dayanımı değeri değişmemektedir. Bu durumun sebebi kompozit bileşenleri arasındaki zayıf arayüzey etkileşimi olarak gösterilebilir. Bununla birlikte saf PLA matrise ağırlıkça %3 oranında silanlanmış pomza ve silanlanmış bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle çekme dayanımı değerinde artış meydana geldiği yine Şekil 4.37'den görülebilmektedir. Bu sonuç, silanlama işlemi sonrasında bazalt elyaf ve pomza yüzeylerinde oluşan fonksiyonel gruplar aracılığıyla kompozit bileşenleri arasındaki arayüzey etkileşimlerinin iyileşmesinden, takviye malzemelerinin yapı içerisinde daha homojen dağılımlarından, böylece matristen takviye malzemelerine daha fazla yük aktarılabilmesinden ve sonuç olarak takviye malzemelerinin daha fazla yük taşıyarak performanslarını daha fazla sergileyebilmelerinden kaynaklanmaktadır denebilir.

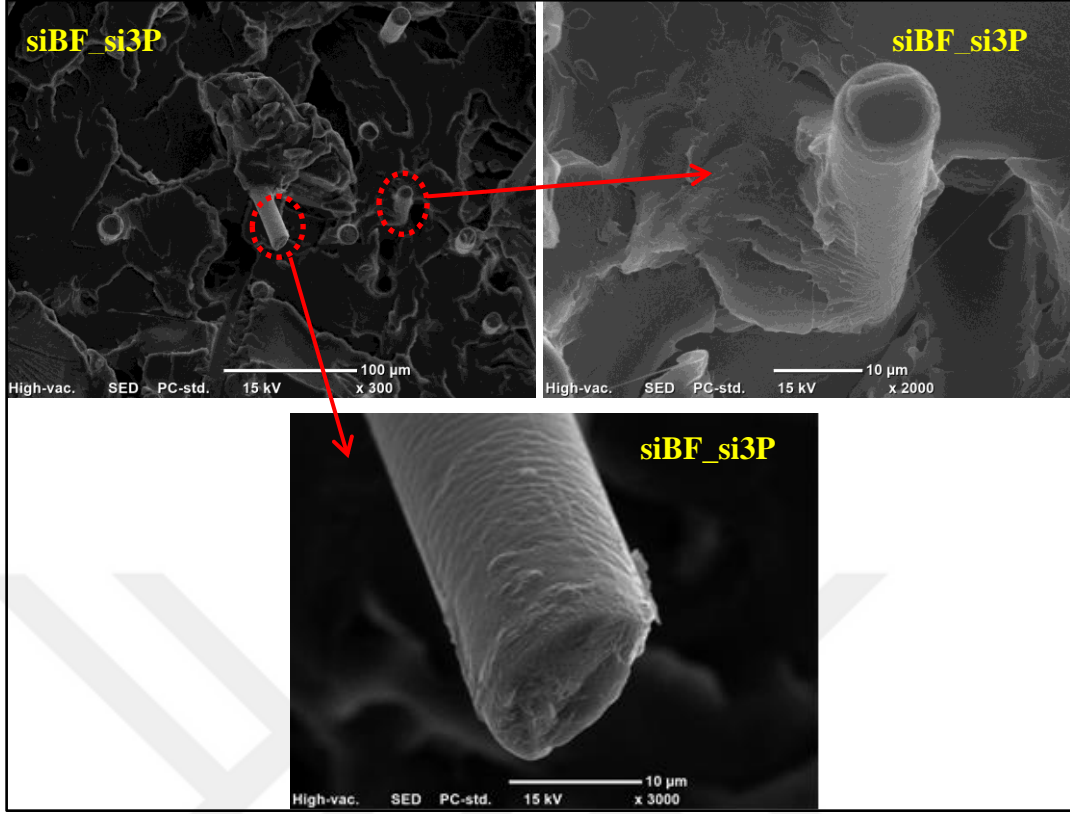
Saf PLA matrisine pomza ve bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin kopma yüzeylerinin morfolojik yapısına ait görüntüler Şekil 4.38 – 4.40 aralığında verilmiştir.



Şekil 4.38. Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %3 pomza içeren hibrit kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri

PLA matrisine silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmamış/silanlanmış ağırlıkça %3 pomza takviyesiyle oluşturulan kompozitin kırılma yüzeyine ait 300 ve 1500 kat büyütülmüş görüntüler sırasıyla Şekil 4.38’de verilmiştir. Şekil 4.38 incelendiğinde silanlanmamış bazalt elyafların PLA matrisi tarafında doğru bir şekilde ıslatılmayarak yerlerinden çıktıkları (fiber pull-out) geride bıraktıkları boşluklardan açık bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte yerinden çıkmayıp kompozit yapı içerisinde kalan elyafların ise iyi bir şekilde matris tarafından sarılamadığı elyaf ve matris arasındaki boşluklardan kolaylıkla anlaşılabilir. Buna ek olarak silanlanmamış bazalt elyaf yüzeyi Şekil 4.38’den tekrar incelendiğinde pürüzsüz bir yapıda olduğu görülmektedir.

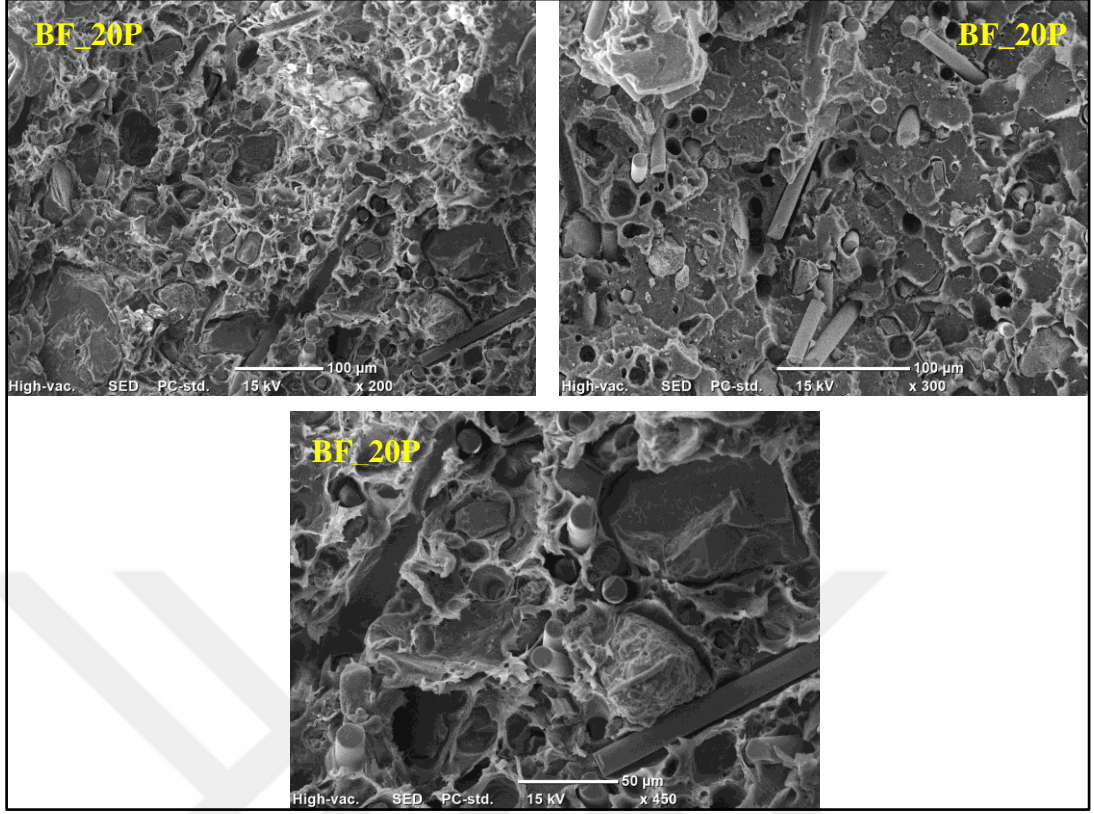
Bazalt elyaf ve ağırlıkça %3 pomza partikülünün silanlama işlemi sonrasında PLA matrisine eklenmesi sonucunda oluşturulan kompozitin kırılma yüzeyine ait görüntüler Şekil 4.39’dan incelendiğinde, kompozit içerisinde bulunan elyafların PLA matrisi tarafında iyi bir şekilde ıslatıldığı ve sarıldığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.39’daki silanlanmış bazalt elyafa ait 3000 kat büyütülmüş görüntü dikkatli bir şekilde incelendiğinde bazalt elyaf yüzeyinde yüzey modifikasyonu sonrasında PLA matrisine kolay tutunmayı sağlayabilecek bazı pürüzlerin oluştuğu ve bunların da silanlama işleminin etkisi olduğu söylenebilir (Chen ve diğ., 2012).



Şekil 4.39. Silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış ağırlıkça %3 pomza içeren hibrit kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri

PLA matrisine silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %20 pomza takviyesiyle oluşturulan kompozite ait kırılma yüzeyine ait 200, 300 ve 450 kat büyütmelelerdeki görüntüler Şekil 4.40'da verilmiştir.

Şekil 4.40 incelendiğinde bazalt elyafların kompozit yapı içerisinde iyi tutunmadığı, yapıdaki fiber çıkmalarından ve kompozit yapı içerisinde kalmasına rağmen elyaf ve matris arasındaki boşluklardan anlaşılmaktadır. Bununla birlikte kırılma yüzeyi daha dikkatli incelendiğinde pomza partiküllerinin de benzer bir şekilde matris tarafından sarılamadığı partiküllerin etrafındaki boşluklardan anlaşılmaktadır. Ayrıca kırılma yüzeyinde büyük boşluklar da görülmektedir ve bunun sebebi olarak kırılma yüzeyindeki pomza partiküllerinin test esnasından yapıda tutunamayıp yerlerinden ayrılması söylenebilir.

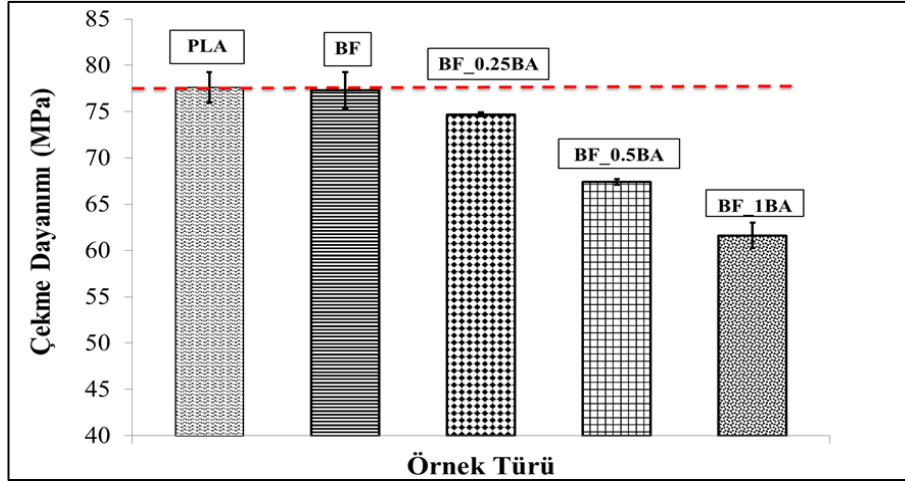


Şekil 4.40. Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %20 pomza içeren hibrit kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri

4.4.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları

Saf PLA'ya silanlanmamış borik asit ve silanlanmamış bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla örnek türlerine çekme testi uygulanmış ve bu analiz sonucunda örnek türlerinin çekme dayanımı değerlerindeki değişim Şekil 4.41'de verilmiştir. Şekil 4.41 göstermektedir ki ağırlıkça %0,25 oranında silanlanmamış borik asit içeren hibrit kompozite ait çekme dayanımı değeri sadece bazalt elyaf içeren kompozitin çekme dayanımı değerinden düşüktür.

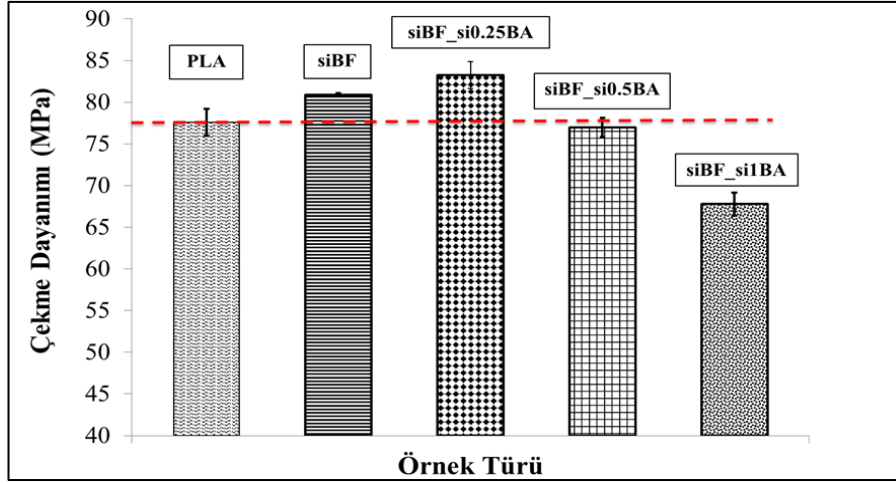
Bununla birlikte kompozit içerisinde borik asidin artan ağırlık oranıyla birlikte hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri daha da düşmekte ve ağırlıkça %1 oranında silanlanmamış borik asit ve silanlanmamış bazalt elyaf içeren kompozitte en düşük değerine ulaşmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi polimerik matris partiküllerin elyafıyla birlikte takviye edilmeleri yapıda daha homojen bir partikül dağılımı sağlamakta ve yapıdaki partikül kümelenmesini engellemektedir (Karsli ve diğ., 2014).



Şekil 4.41. Silanlanmamış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.41 bu durumun her koşulda gerçekleşmediğinin bir göstergesidir. Öyle ki yapı içerisinde partiküllerin elyaf yardımıyla daha homojen şekilde dağılabilmeleri için elyaf-matris ve partikül-matris arayüzey etkileşimlerinin iyi olması önemli bir gereklilikken partikül-elyaf etkileşiminin de iyi olması ve aralarındaki iyi etkileşim sayesinde bir sinerjik etki ortaya çıkması gerekmektedir. Şekil 4.41 bu bakış açısıyla değerlendirildiğinde yüzeyi silanlanmamış bazalt elyaf ve borik asit takviye malzemelerinin eş zamanlı olarak PLA matrise ilave edilmeleri durumunda borik asidin ve bazalt elyafın yapı içerisinde yeterince dağılamadığı, bu sebeple takviye malzemeleri ile matris malzemesi arasında etkin bir yük transferi gerçekleşmediği ve böylece takviye malzemelerinin yük taşıma görevlerini yerine getiremedikleri sonucuna varılabilir (Demirel ve diğ., 2010).

Borik asit ve bazalt elyaf yüzeylerindeki fonksiyonel grup sayısını artırarak borik asit, bazalt elyaf ve PLA arasındaki arayüzey etkileşimini iyileştirmek ve PLA matristen takviye malzemelerine olan yük transferini arttırmak amacıyla takviye malzemelerinin yüzeylerine silanlama işlemi uygulanmıştır. Saf PLA'ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmış borik asit ve silanlanmış bazalt elyaf ilavesinin saf PLA'nın çekme dayanımı değeri üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla örneklere çekme testi uygulanmış ve bu analiz sonucunda örneklerin çekme dayanımı değerlerindeki değişim Şekil 4.42'de verilmiştir.

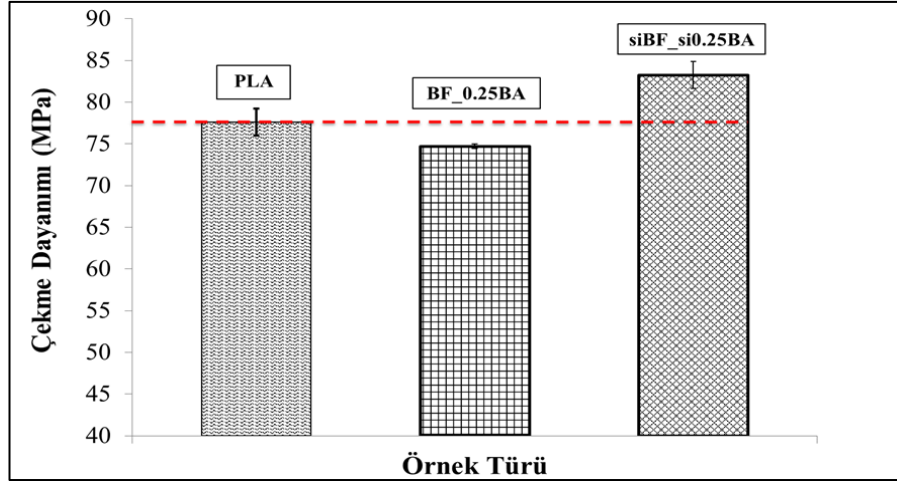


Şekil 4.42. Silanlanmış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.42 incelendiğinde ağırlıkça %0,25 oranında silanlanmış borik asit içeren hibrit kompozitin çekme dayanımı değerinin sadece silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitin çekme dayanımı değerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte kompozit içerisinde borik asidin artan ağırlık oranıyla birlikte hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri düşmekte ve ağırlıkça %1 oranında silanlanmış borik asit ve silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitte en düşük değerine ulaşmaktadır. Buradan bazalt elyaf ve borik asit takviye malzemelerinin silanlanmaları ile birlikte elyaf-matris ve partikül-matris arayüzey etkileşiminde meydana gelen artışla birlikte elyaf-partikül etkileşiminde de artış meydana geldiği, bu sayede partiküllerin matris içerisinde daha homojen dağılmalarının sağlandığı ve böylece takviye malzemesinin etkinliğinin arttığı yorumu yapılabilir.

Ancak PLA matrise ilave edilen silanlanmış borik asit miktarı arttıkça arayüzey etkileşimleri iyileşmesine rağmen partiküllerin aglomera olma eğilimlerinin baskın geldiği ve aglomerasyon sebebiyle etkinliklerinin azaldığı ve çekme dayanımı değerlerinin düştüğü görülmektedir.

Borik asit ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin çekme dayanımı üzerine etkisini daha detaylı inceleyebilmek amacıyla her iki takviye malzemesi türünün (silanlanmış ve silanlanmamış borik asit ve bazalt elyaf) kullanıldığı durumda en iyi sonuç veren örneklere ait çekme dayanımı değerleri karşılaştırılmış ve sonuç Şekil 4.43'de verilmiştir.



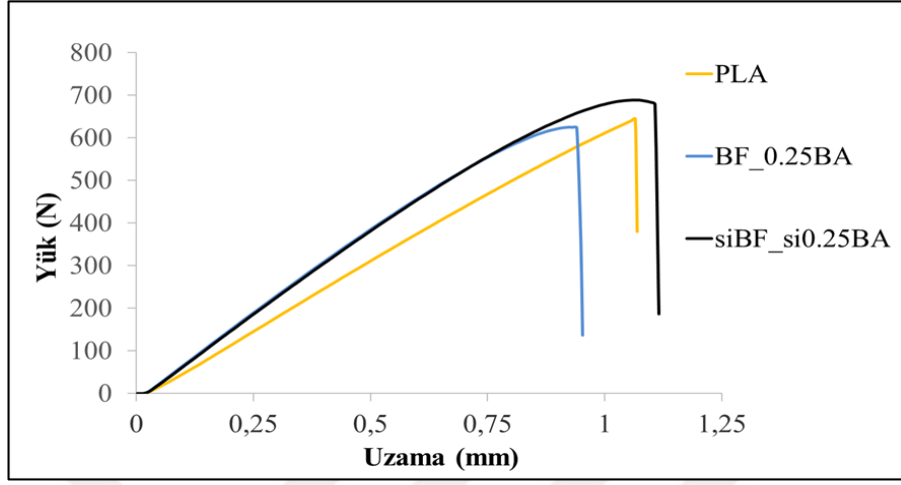
Şekil 4.43. Borik asit ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri üzerine etkisi

Şekil 4.43 göstermektedir ki saf PLA matrise yüzeyi işlem görmemiş bazalt elyaf ve borik asidin eş zamanlı ilavesiyle çekme dayanımı değeri düşmektedir. Bu durumun sebebi kompozit bileşenleri arasındaki zayıf arayüzey etkileşimi olarak gösterilebilir. Bununla birlikte saf PLA matrise yüzeyi silanlanmış bazalt elyaf ve yüzeyi silanlanmış borik asidin eş zamanlı ilavesiyle çekme dayanımı değerinde artış meydana geldiği yine Şekil 4.43'den görülebilmektedir.

Bu sonuç, silanlama işlemi sonrasında bazalt elyaf ve borik asit yüzeylerinde oluşan fonksiyonel gruplar aracılığıyla kompozit bileşenleri arasındaki arayüzey etkileşimlerinin iyileşmesinden ve takviye malzemelerinin yapı içerisinde daha homojen dağılmalarından, böylece matristen takviye malzemelerine daha fazla yük aktarılabilmesinden ve sonuç olarak takviye malzemelerinin daha fazla yük taşıyarak performanslarını daha fazla sergileyebilmelerinden kaynaklanmaktadır denebilir.

Silanlanmış ve silanlanmamış borik asit ve bazalt elyaf takviyeli hibrit kompozitlere ait yük-uzama eğrileri Şekil 4.44'de verilmiştir. Şekil 4.44 incelendiğinde görülmektedir ki silanlanmamış bazalt elyafın ve ağırlıkça %0,25 oranında silanlanmamış borik asidin eş zamanlı ilave edilmesiyle elde edilen hibrit kompozitlerde kopma uzaması değeri saf PLA ile karşılaştırıldığında düşmüştür. Diğer taraftan silanlanmış borik asit ve silanlanmış bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerde ise kırılma davranışı saf PLA ile karşılaştırıldığında gevrekten sünek

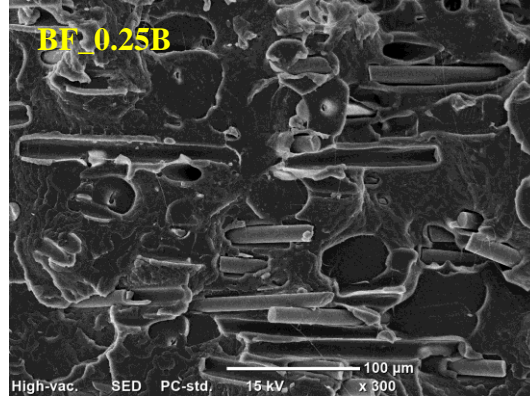
yapıya dönüşmüştür ve ayrıca yük taşıma kapasitesi ve kopma uzaması değeri artmıştır.



Şekil 4.44. Borik asit ve bazalt elyaf yüzeylerinin silanlanması işleminin hibrit kompozitlerin yük-uzama eğrileri üzerine etkisi

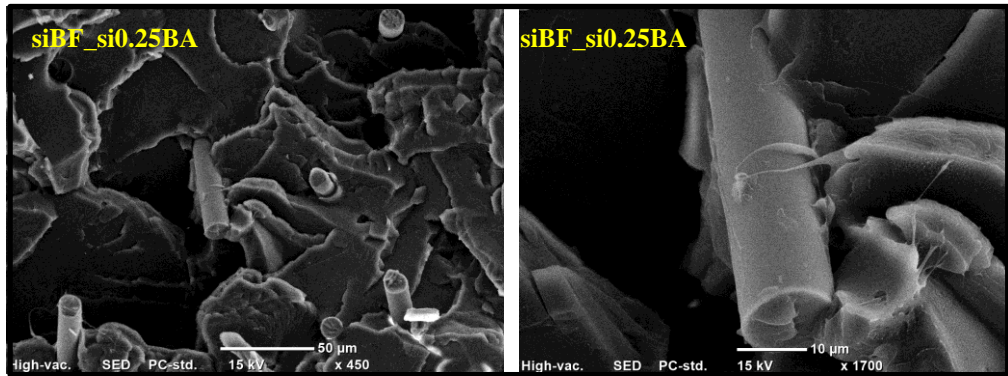
Kopma uzaması değeri, kompozitlerde elyaf-matris arayüzey etkileşiminin bir göstergesidir. Çünkü kompozit bir malzemeye yük uygulandığında ve bu yükün miktarı takviye malzemesi ile matris malzemesinin arayüzey yapışma kuvvetini aştığında aralarında bir ayrılma meydana gelir ve bu bölgede mikro çatlaklar oluşmaya başlar. Böyle bir durumda takviye malzemesinin etrafını saran matris malzemesi deformasyona uğrar ve bu deformasyon sırasında bu bölgede enerji absorblanır. Böylece çatlak ilerlemesi yavaşlar ve örnek daha uzun sürede ve sünek yapıda kırılır. Dolayısıyla takviye malzemesi ile matris malzemesi arasında ne kadar iyi bir arayüzey etkileşimi varsa aralarındaki yapışma kuvvetini aşmak için kompozite o kadar fazla yük uygulanmalıdır ve bu süreçte sistem tarafından o kadar fazla enerji absorblanmalıdır denebilir (Liang ve diğ., 2000). Dolayısıyla Şekil 4.44 bize göstermektedir ki bazalt elyaf ve borik asit yüzeyine uygulanan silanlama işlemi sonucunda kompozit bileşenleri arasındaki arayüzey etkileşimi artmakta ve kompozitin yük taşıma performansı iyileşmektedir.

Saf PLA'ya borik asit ve bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin kırılma yüzeylerinin morfolojik yapısına ait görüntüler Şekil 4.45 ve 4.46'da verilmiştir.



Şekil 4.45. Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %0,25 borik asit içeren hibrit kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri

Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %0,25 borik asit takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozitlerin kırılma yüzeyine ait 300 kat büyütülmüş görüntü Şekil 4.45’de verilmiştir. Şekil 4.45'den incelendiğinde, bazalt elyafların büyük çoğunluğunun yapı içerisinde ayrıldığı kalan elyafların ise PLA matrisi tarafından doğru bir şekilde ıslatılıp sarılamadığı görülmektedir. Fakat bazalt elyaf ve borik asit partikülüne yapılan yüzey modifikasyonu sonrasında oluşturulan kompozite ait 450 ve 1700 kat büyütmedeki kırılma yüzeyi görüntüsü Şekil 4.46’dan incelendiğinde kompozit içerisinde bulunan bazalt elyafların doğru bir şekilde matris malzemesi tarafından sarıldığı ve böylelikle elyaf matris ara yüzey etkileşiminin iyi olduğu yorumu yapılabilmektedir.

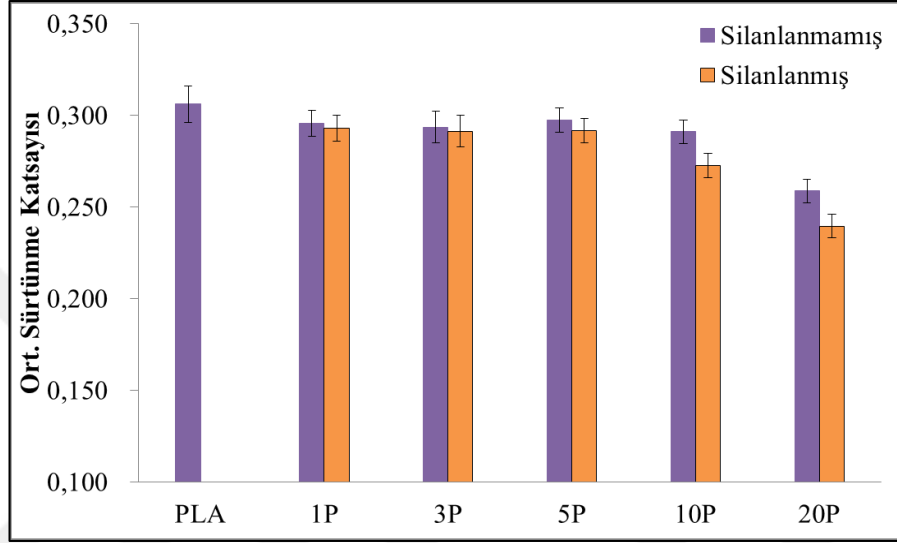


Şekil 4.46. Silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış ağırlıkça %0,25 borik asit içeren hibrit kompozitin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri

4.5. Aşınma Testi Sonuçları

4.5.1. Pomza takviyeli kompozitlerin aşınma testi sonuçları

PLA matrise silanlanmamış/silanlanmış ağırlıkça artan oranlarda pomza ilavesiyle üretilen kompozitlere uygulanan aşınma testi sonucunda elde edilen ortalama sürtünme katsayıları Şekil 4.47’de verilmiştir.



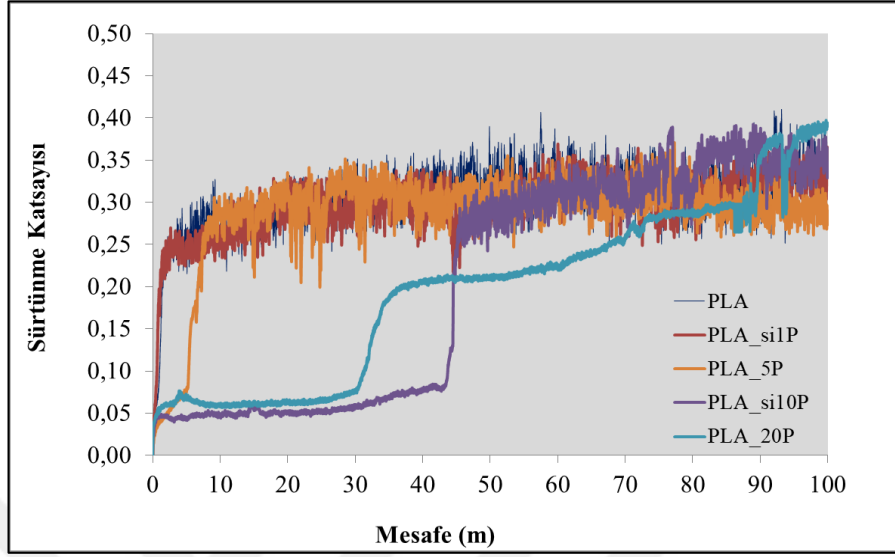
Şekil 4.47. Pomza takviyeli kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları

Şekil 4.47 incelendiğinde görülmektedir ki PLA matrise silanlanmamış/silanlanmış pomza ilavesiyle (tüm pomza oranları için) ortalama sürtünme katsayısında bir miktar düşüş meydana gelmektedir. Literatürden bilindiği gibi adhezif aşınma testi sırasında kompozit numuneleri aşındırıcı yüzey tarafından mikro kesme (micro-cutting) ve mikro kazıma (micro-ploughing) mekanizmalarına maruz kalırlar ve bu durum, aşınma sürecinde malzeme yüzeyinden parçaların koparak ayrılmasına neden olur. Kompozit içerisindeki sert partikül fazın varlığı ise nispeten daha yumuşak olan polimer matrisin aşındırıcı yüzey tarafından yapıdan ayrılmasını önleyerek aşındırıcı cisim tarafından uygulanan gerilmeyi azaltır ve böylece partikül takviyesiyle yapının aşınma direnci artırılmış olur (Chang ve diğ., 2013). Bununla birlikte, partikül içeren kompozitlerde aşınma hacminin azalması ise partikülün kompozit yapının aşınma esnasında yük taşıma kapasitesini iyileştirdiğini ve böylece aşındırıcının kompozit yüzeyinden malzeme koparmasını engellediğini gösterir (Chang ve diğ., 2013).

Ayrıca Şekil 4.47 göstermektedir ki PLA matrise ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında silanlanmış/silanlanmamış pomza ilavesiyle üretilen kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı değerlerindeki düşüş miktarı azken ağırlıkça %10 ve 20 oranında silanlanmış/silanlanmamış pomza ilavesiyle üretilen kompozitlerin ortalama sürtünme katsayı değerlerinde dikkat çeken bir düşüş meydana gelmiştir. Aynı ağırlık oranına sahip silanlanmamış/silanlanmış pomza içeren kompozitler karşılaştırıldığında ise pomza partikülüne yüzey modifikasyonu işlemi uygulandıktan sonra üretilen kompozitlerin ortalama sürtünme katsayı değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Özellikle ağırlıkça %10 ve 20 oranlarında pomza içeren kompozitler incelendiğinde yüzey modifikasyonunun etkisi daha net bir biçimde görülmektedir. Polimerik malzemelerde adhezif aşınma, temas eden katı yüzeyler arasında lokal bağlanmalar nedeniyle polimerin bir yüzeyden diğer yüzeye transfer olması temeline dayanmaktadır. Transfer olan polimer miktarının artması sürtünme katsayısının ve dolayısıyla aşınma hacminin artması demektir. Böylece, aktarılan polimer miktarını azaltmak için malzemelerin ara yüzeylerinde yapılacak herhangi bir iyileştirme, sürtünme katsayısını düşürerek polimerin adhezif aşınma direncini arttırmaktadır (Zhou ve diğ., 2013; Myshkin ve diğ., 2005; Karsli ve diğ., 2016). Dolayısıyla pomza yüzeyine uygulanan silanlama işleminin pomzanın yüzey fonksiyonelliğini arttırdığı, böylece pomza partiküllerinin PLA matris ile daha iyi etkileşime girerek transfer olan polimer miktarının azalmasını sağladığı sonuç olarak da sürtünme katsayısını düşürdüğü söylenebilir.

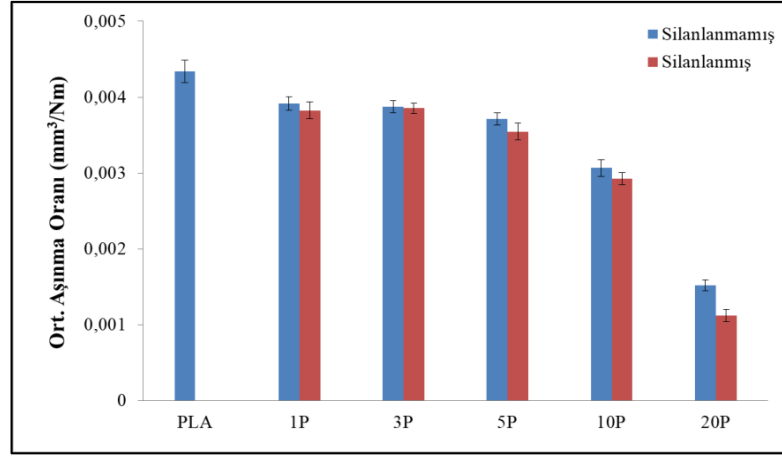
Aşınma testi sonucunda elde edilen ve kompozit malzemelerin aşınma karakteristiklerini gösteren aşınma eğrileri Şekil 4.48'den incelendiğinde, test başladıktan belirli bir mesafe sonrasında düşük oranda pomza içeren kompozit malzemelere ait aşınma eğrilerinde keskin geçişler meydana geldiği görülmektedir. Bu keskin geçişlerin sebebi olarak numune yüzeyinden aşındırıcı bilyenin parça kopartması ve böylece numune yüzeyinden ayrılan polimer parçalarının ve/veya pomza partiküllerinin abrazif aşınma etkisi yaratması söylenebilir. Sonrasında eğrilerin lineer hal alması ise aşındırıcı ve numune arasında oluşturulan transfer filminden ortaya çıkmaktadır (Zhou ve diğ., 2013). Şekil 4.48'de bu durum kolaylıkla görülebilirken yapıya artan ağırlık oranında pomza takviyesiyle uzun bir

mesafe boyunca her hangi bir parça ayrılması meydana gelmediği ve pomzanın rijit yapısının kompozit yapının bütünlüğünün korunmasına katkısı olduğu söylenebilir.



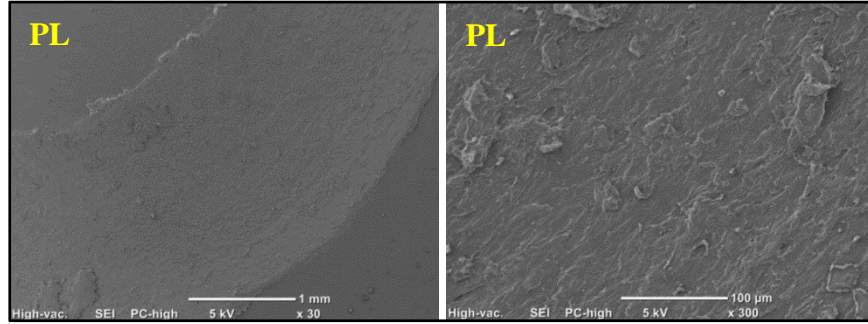
Şekil 4.48. Pomza takviyeli kompozitlerin aşınma eğrileri

Silanlanmamış/silanlanmış pomza içeren kompozitlerin aşınma testi yapıldıktan sonra aşınma oranlarını hesaplamak amacıyla optik mikroskop altında izleri ölçülmüş ve Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak hesaplanan aşınma oranları Şekil 4.49'da verilmiştir. Şekil 4.49 incelendiğinde, ortalama sürtünme katsayısı değerlerine benzer bir sonuç ortaya çıktığı görülmektedir. Tüm silanlanmamış/silanlanmış pomza ağırlık oranları için ortalama aşınma oranının saf PLA matrisinden daha az olduğu bulgusuna varılmıştır. Bununla birlikte nispeten daha düşük ağırlık oranlarında pomza takviyesi içeren kompozitlerin ortalama aşınma oranı değerlerinde büyük bir değişim gözlenmemiştir. Fakat ağırlıkça %10 pomza takviyesiyle birlikte oluşturulan kompozit malzemenin aşınma oranında dikkat çeken bir iyileşme meydana gelmeye başlamış ve takviye edilen pomza miktarı ağırlıkça %20'ye çıkarıldığında en düşük ortalama aşınma oranı değerine ulaşılmıştır. Ayrıca aynı ağırlık oranına sahip silanlanmamış/silanlanmış pomza takviyeli kompozitlerin ortalama aşınma oranları karşılaştırıldığında yüzey modifikasyonu sonrasında pomza partikülü içeren kompozitlerin ağırlıkça düşük oranlarda dikkat çeken bir değişim göstermediği fakat yapıya yüksek ağırlık oranında takviye edilmesiyle silanlanmış pomza partikülü içeren kompozitlerin daha düşük aşınma oranına sahip olduğu görülmektedir.



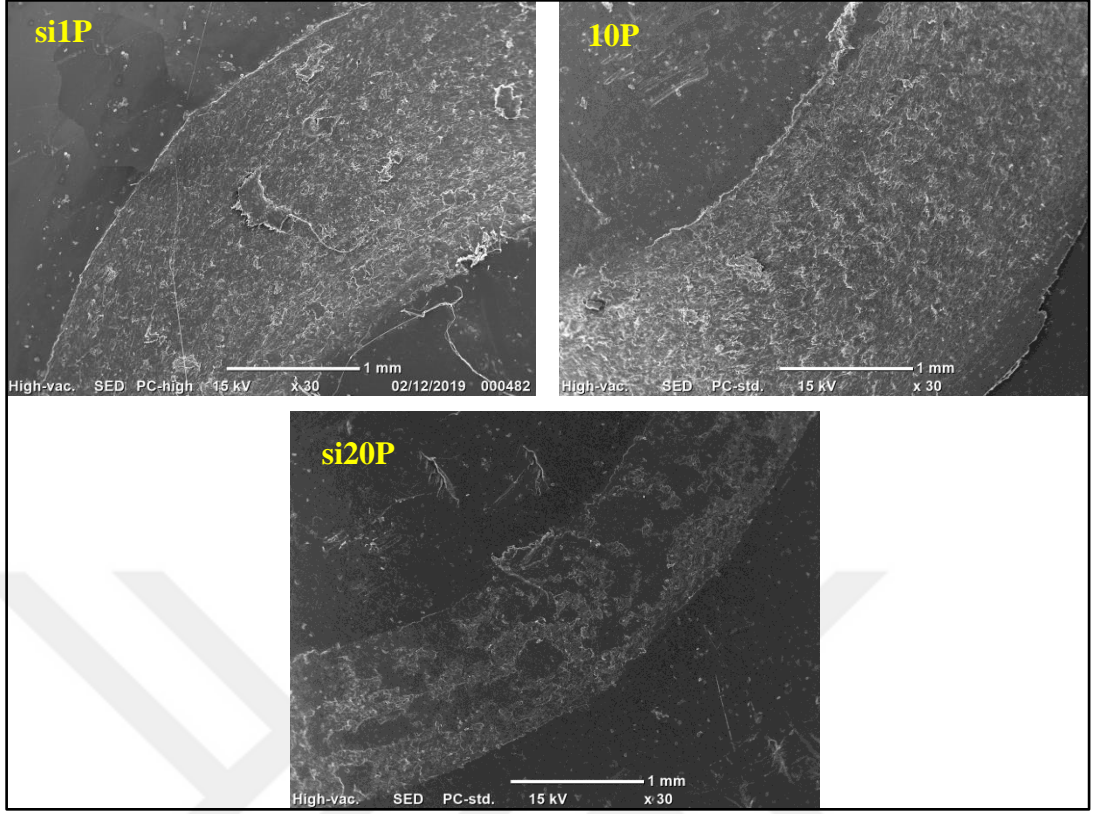
Şekil 4.49. Pomza takviyeli kompozitlerin ortalama aşınma oranları

Saf PLA matrisine ait aşınma yüzeyinin 30 ve 300 kat oranda büyütülmüş görüntüsü Şekil 4.50’de verilmiştir. Şekil 4.50 incelendiğinde aşınma testi sonrasında oluşan aşınma izinin derin ve geniş olduğu görülmektedir. Aşınma testi sonuçlarında da zaten PLA polimerinin yüksek ortalama sürtünme katsayısına ve aşınma oranına sahip olduğu bulgusu verilmiştir.



Şekil 4.50. Saf PLA matrisinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri

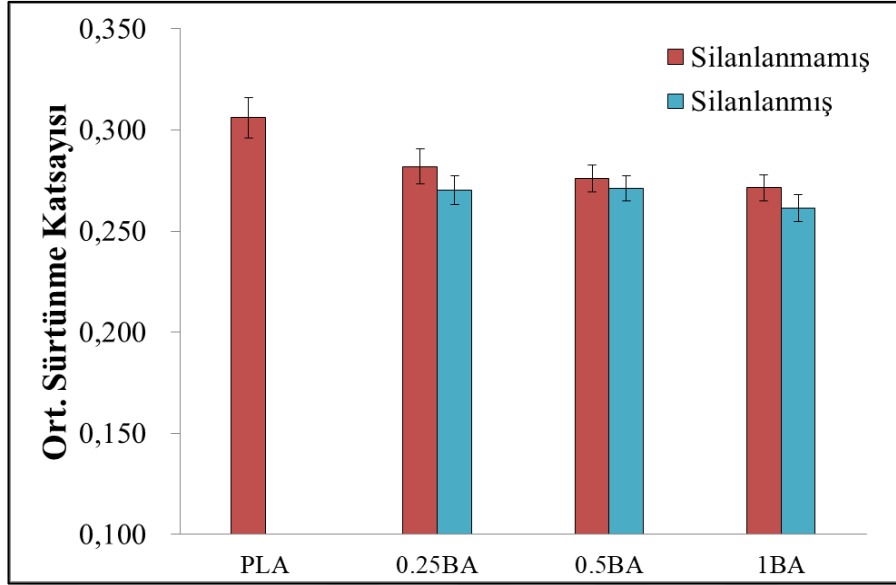
PLA’ya değişen ağırlık oranlarında silanlanmış/silanlanmamış pomza ilavesiyle elde edilen kompozitlerin aşınma yüzeylerinin morfolojik yapısına ait görüntüler Şekil 4.51’de verilmiştir. Tez çalışması kapsamında oluşturulan farklı ağırlık oranlarında pomza partikülü takviyeli kompozitlere ait aşınma yüzeylerinin 30 kat büyütülmüş görüntüleri Şekil 4.51’den birlikte değerlendirildiğinde, artan pomza oranıyla birlikte aşınma izi kalınlığı ve derinliğinin azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte silanlanmış ağırlıkça %20 pomza içeren kompozite ait aşınma numunesinin en dar aşınma izi ve derinliğine sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.51. Silanlanmamış/silanlanmış ağırlıkça farklı oranlarda pomza içeren kompozitlerin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri

4.5.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin aşınma testi sonuçları

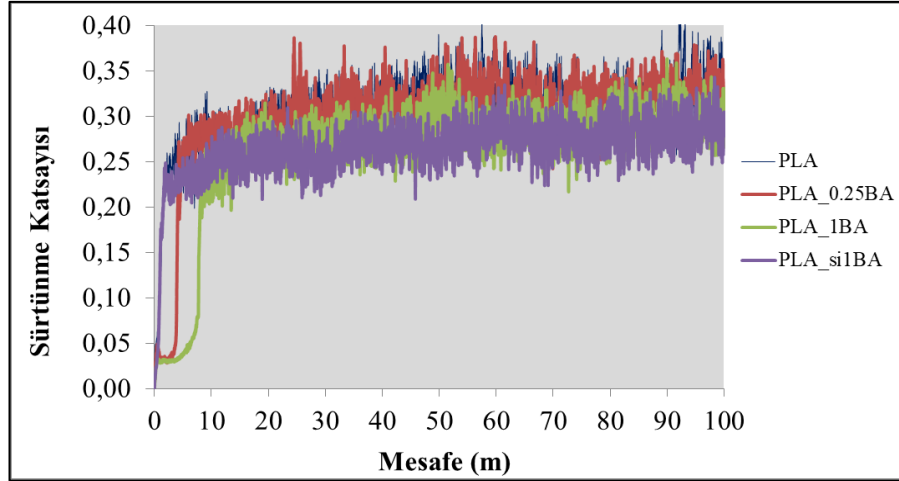
Silanlanmış/silanlanmamış borik asit içeren kompozitlerin aşınma testleri sonucundan elde edilen ortalama sürtünme katsayıları Şekil 4.52’de verilmiştir. PLA matrisine artan oranda silanlanmamış/silanlanmış borik asit takviyesiyle ortalama sürtünme katsayısı değerinin düştüğü görülmektedir. Borik asit, tabakları arasında zayıf hidrojen bağları bulunan bir moleküler yapıya sahiptir. Bu bağlar tabakaların birbirleri üzerinde kayma hareketine izin vererek yağlayıcı özelliğe sahip olmasını sağlar (Deshmukh ve diğ., 2006). Böylece üzerine teğetsel bir yük geldiğinde iyi sürtünme özellikleri göstererek aşınma davranışını iyileştirir. Yapılan deneysel çalışmalarla borik asit molekülünün kayma dayanımı 23 MPa ve sürtünme katsayısının ise 0.02’den daha küçük değere sahip olduğu ortaya çıkartılmıştır (Deshmukh ve diğ., 2006). Ayrıca borik asit molekülleri polimer malzemelere takviye edildiğinde aşınma sırasında aşındırıcı yüzeye yapışarak da aşınma davranışını iyileştirebildiği yönünde bulgulara da rastlanmaktadır (Burroughs ve diğ., 1999).



Şekil 4.52. Borik asit takviyeli kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları

Bu özellikler dikkate alındığında borik asit partikülü katı yağlayıcı olarak tercih edilmektedir. Bu sebeple artan borik asit oranıyla ortalama sürtünme katsayısı değerinin düşmesi beklenen bir sonuçtur. Bununla birlikte borik asit partiküllerine yüzey modifikasyonu uygulanmasıyla ortalama sürtünme katsayı değerlerinin silanlanmamış borik asit içeren kompozitlere göre bir miktar azalma elde edilmiştir. Takviye ve matris malzemesi ara yüzeyi etkileşiminin güçlü olduğu bir durumda takviye fazı aşınma esnasında yapıdan kolaylıkla ayrılmayacak ve böylece oluşturulan kompozit yapı ara yüzey iyileşmesinin etkisiyle aşınmaya daha dayanıklı olacaktır.

PLA matrisine silanlanmamış/silanlanmış borik asit takviyesi sonucu oluşturulan kompozitlere ait aşınma eğrileri Şekil 4.53'den incelendiğinde matrisine artan ağırlık oranlarında borik asit ilavesiyle birlikte aşınma eğrilerinde saf PLA matrisine kıyasla daha az salınım yapan eğriler elde edilmiştir. Bu da borik asit takviyesinin kompozit malzeme yüzeyinde yağlayıcı özellik göstererek aşınma özelliklerinde gelişme sağlandığını göstermektedir.



Şekil 4.53. Borik asit takviyeli kompozitlerin aşınma eğrileri

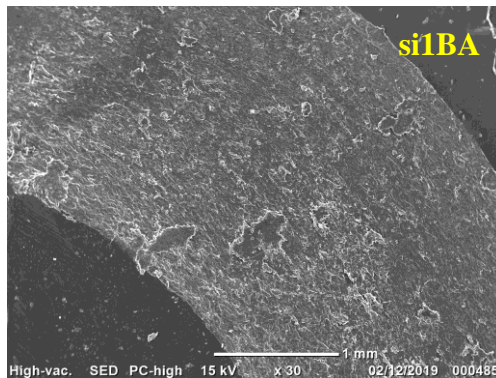
Aşınma testi sonucundan en iyi ortalama sürtünme katsayı değerini veren ağırlıkça %1 borik asit içeren kompozitlerin aşınma eğrileri değerlendirildiğinde silanlama işlemi sonrasında ortaya çıkan ortalama sürtünme katsayı değerindeki iyileşme aşınma eğrisinde de görülmektedir. Aynı ağırlık oranına sahip silanlanmış ve silanlanmamış borik asit içeren kompozitler için aşınma karakteristiği ve ortalama sürtünme katsayıları arasında aşınma özelliklerinin iyileştiğine dair bir miktar da olsa fark görülmektedir. Bu farkın çok büyük olmamasının sebebinin ise yapıdaki borik asit miktarının düşük olması nedeniyle silanlama işleminin etkisini oluşturulan kompozitlerde belirgin bir şekilde gösteremediği olarak söylenebilir.

Silanlanmamış/silanlanmış borik asit içeren kompozitlerin aşınma testi yapıldıktan sonra aşınma oranlarını hesaplamak amacıyla optik mikroskop altında izleri ölçülmüş ve Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak hesaplanan aşınma oranları Şekil 4.54'de verilmiştir. Şekil 4.54 incelendiğinde, PLA matrisine borik asit ilavesiyle aşınma oranlarında bir miktar azalma elde edilmiştir. Bununla birlikte aynı ağırlık oranına sahip silanlanmamış/silanlanmış borik asit takviyeli kompozitler incelendiğinde yüzey modifikasyonu uygulanmış borik asit partiküllerinin aşınma üzerinde silanlanmamış partiküllere kıyasla büyük bir fark ortaya koymadığı görülmektedir. PLA matrisine takviye edilen borik asit miktarının ağırlıkça düşük oranda olması sebebiyle hesaplanan aşınma oranları arasında ki farkın büyük miktarda olmadığı yorumu yapılabilir.



Şekil 4.54. Borik asit takviyeli kompozitlerin ortalama aşınma oranları

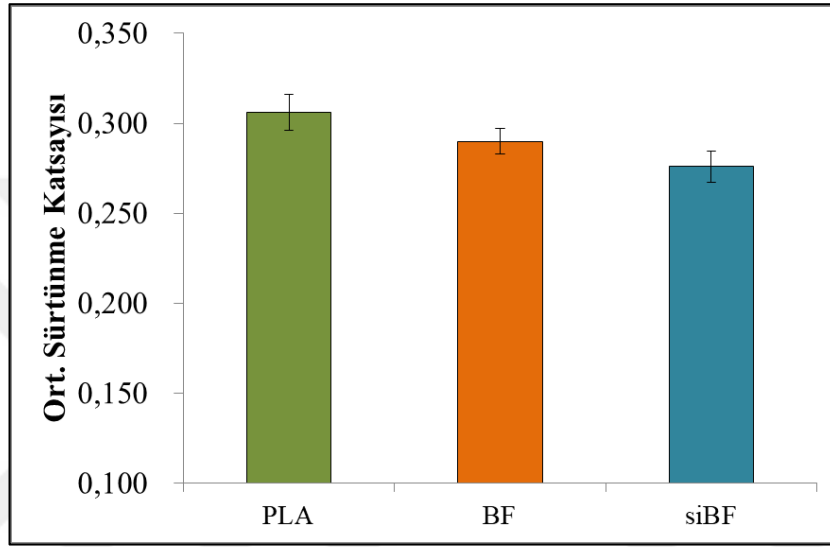
PLA matrisine %1 ağırlık oranında silanlanmış borik asit ilavesiyle elde edilen kompozite ait aşınma yüzeyinin 30 kat büyütülmüş görüntüsü Şekil 4.55’de verilmiştir. Şekil 4.55’de bulunan aşınma izinin görüntüsü ile saf PLA matrisine ait aşınma izi görüntüsü karşılaştırıldığında yapıya ağırlıkça %1 silanlanmış borik asit takviyesiyle birlikte aşınma izinin derinliğinde ve genişliğinde bir miktar azalma olduğu görülmektedir. Buradan borik asit partikülünün çok katmanlı yapısı sayesinde aşındırıcı bileye borik asit tabakalarının aşınma testi süresince birbirleri üzerinde kaymasını sağlayarak oluşturulan kompozitin tribolojik özelliklerini iyileştirmiş olduğu ve böylece oluşturulan kompozit yapıda aşınma izinin ve derinliğinin azaldığı yorumu yapılabilir.



Şekil 4.55. Ağırlıkça %1 silanlanmış oranında borik asit içeren kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

4.5.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin aşınma testi sonuçları

Yapılan aşınma testleri sonrasında PLA matrisine silanlanmamış/silanlanmış ağırlıkça %10 bazalt elyaf takviyesiyle oluşturulan kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri Şekil 4.56'dan incelendiğinde, PLA matrisine silanlanmamış bazalt elyaf eklenmesiyle ortalama sürtünme katsayısının bir miktar azaldığı görülmektedir.



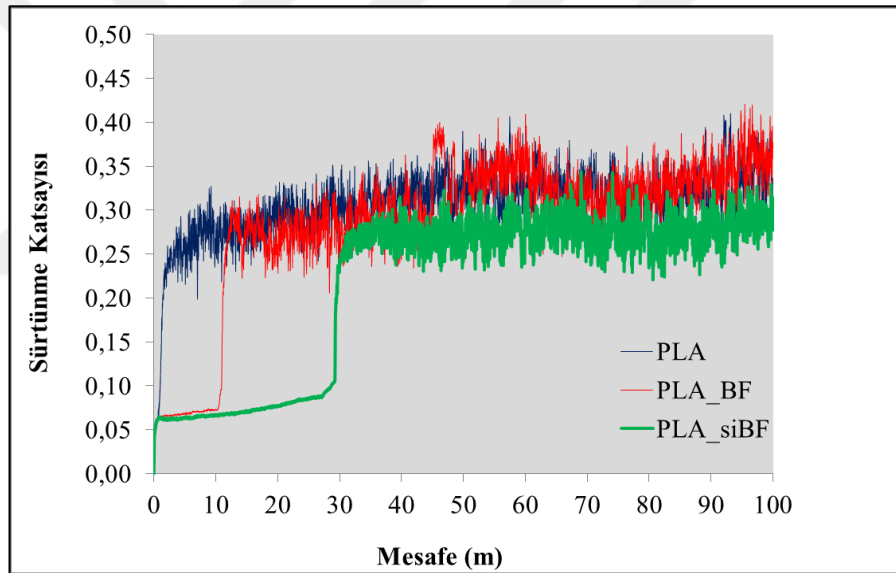
Şekil 4.56. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerinin ortalama sürtünme katsayıları

Kısa elyaf takviyesi içeren polimer matrisli kompozitlerin adhezif aşınma davranışlarıyla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, elyafın yerinden çıkıp (fiber peeling-off) aşınma üzerine olumsuz etkisinin üç aşamada geldiği bilinmektedir. Bunlar elyafın incilmesi (fiber thinning), elyafın kırılması (fiber cracking) ve elyafın yerinden çıkmasıdır (fiber removal). Eğer elyaflar ve matris arasında zayıf bir arayüzey yapışması varsa, adhezif aşınma testi sırasında elyafların kolayca bu mekanizmaya maruz kalabileceği ve matris tarafından doğru bir şekilde korunamayacağı böylece uygulanan yükü desteklemediği ve aşınma etkisi ile matristen kolayca ayrıldığı bilgisine ulaşılmaktadır (Zhou ve diğ., 2013).

Kompozit yapılarda matris ve elyaf arasında iyi bir arayüzey etkileşimi sağlanmazsa verimli bir yük transferi oluşamayacağı ve elyaf takviyesinin yapı içerisinde kusurlara neden olması söz konusudur. Bu durumda oluşturulan elyafli kompozitlerin mükemmel aşınma özellikleri göstermeleri beklenen bir durum olmaz. Fakat güçlü

bir arayüzey etkileşiminde gelen yükleri matristen ziyade elyaflar taşıyacağından bu durumda matris o kadar az aşınacak demektir. Ayrıca elyaf takviyesi test esnasında polimer ile aşındırıcı bilye arasındaki temas yüzeyini azaltabilir ve böylece sürtünme katsayısının düşmesi sağlanır (Karatas ve diğ., 2019). Dolayısıyla saf PLA matrise silanlanmamış bazalt elyaf ilavesiyle sürtünme katsayısında meydana gelen düşüş bu mekanizmaların sonucudur.

Bununla birlikte yüzeyi silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitin sürtünme katsayısının daha da düşmesi elyaf ile matris arasında artan etkileşimin ve yapıdan çıkan lif sayısının azalmasının ve yapının daha fazla bazalt elyaf tarafından daha etkin şekilde korunmasının bir sonucudur. Test yapılan numunelere ait aşınma eğrileri Şekil 4.57’de verilmiştir.



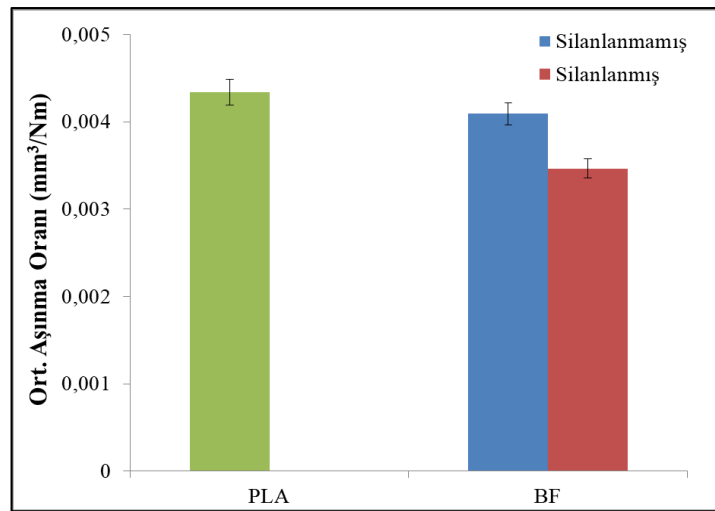
Şekil 4.57. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerinin aşınma eğrileri

Şekil 4.57 incelendiğinde test başladıktan belirli bir mesafe sonrasında aşınma eğrilerinde keskin geçişler meydana geldiği görülmektedir. Bu keskin geçişlerin sebebi olarak numune yüzeyinden aşındırıcı bilyenin parça kopartması ve böylece numune yüzeyinden ayrılan polimer ya da elyaf parçalarının abrazyon etkisi yaratması söylenebilir. Sonrasında eğrilerin lineer hal alması ise aşındırıcı ve numune arasında oluşturulan transfer filminden ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.57 ayrıca göstermektedir ki aşınma testinin daha ilk metrelerinde saf PLA matrisinden parça koparak bu durum kolaylıkla görülebilirken yapıya silanlanmış bazalt elyaf takviyesiyle yaklaşık 10 metre civarına kadar herhangi bir parça ayrılması meydana

gelmediği ve elyafın rijit yapısının kompozit yapının bütünlüğünün korunmasına katkısı olduğu söylenebilir. Bununla birlikte bazalt elyafa yüzey modifikasyonu uygulanmasıyla oluşturulan kompozit malzemeye ait aşınma eğrisi incelendiğinde benzer bir durumunun 30 metreden daha ileri bir mesafede gerçekleştiği görülmektedir. Silanlama işlemi sonrasında PLA matrisi ve bazalt elyaf arayüzeyi iyileştikten aşınma testi sırasında gelen yükün elyaflar tarafından daha çok karşılandığı böylece kompozit yapıdan parça ayrılma süresinin de geciktiği yorumu yapılabilir.

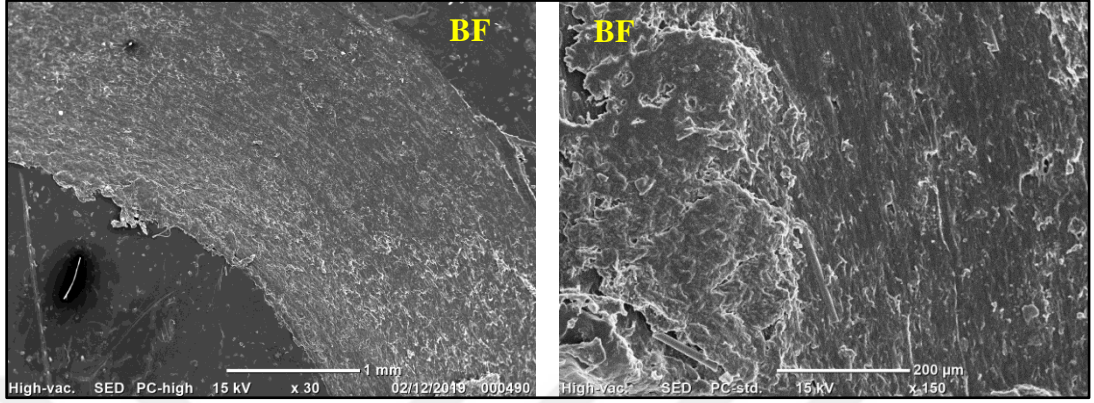
Silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitlerin aşınma testi yapıldıktan sonra aşınma oranlarını hesaplamak amacıyla optik mikroskop altında izleri ölçülmüş ve Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak hesaplanan aşınma oranları Şekil 4.58'de verilmiştir. Şekil 4.58 incelendiğinde, yapıya bazalt elyaf katılmasıyla aşınma miktarının azaldığı görülmektedir. Aşınma esnasında oluşan transfer filmi aşındırıcı bilye ve aşındırılan numune arasındaki direkt teması engeller. Bu hem sürtünme katsayısının düşmesini hem de aşınma oranının azalmasını beraberinde getirir (Chang ve diğ., 2013).

Bu bakış açısıyla Şekil 4.58 yeniden incelendiğinde yapıya yüzey modifikasyonu uygulanmış bazalt elyaf takviyesiyle transfer filminin daha iyi oluşturulduğu ve kompozit malzemenin aşınma oranının iyileştirildiği sonucuna varılmaktadır.



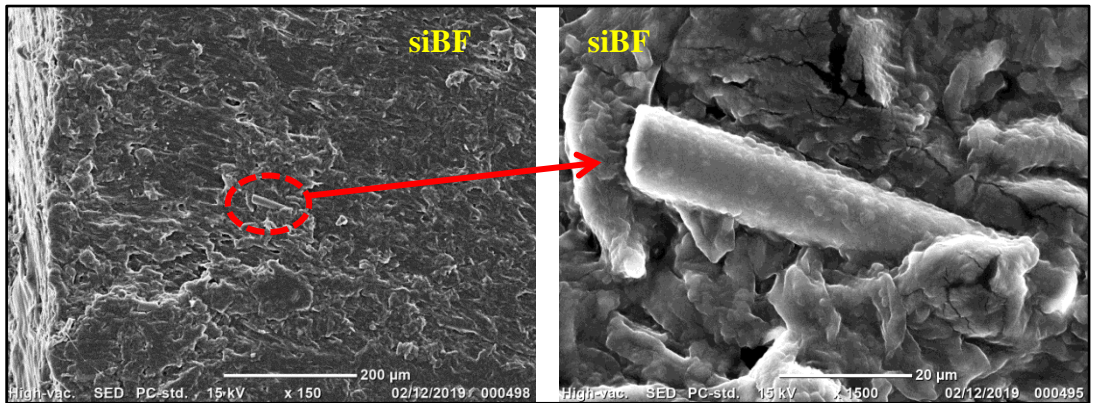
Şekil 4.58. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerinin ortalama aşınma oranları

PLA'ya %10 ağırlık oranında silanlanmış/silanlanmamış bazalt elyaf ilavesiyle elde edilen kompozitlerin aşınma yüzeylerinin morfolojik yapısına ait görüntüler Şekil 4.59 ve 4.60'da verilmiştir.



Şekil 4.59. Silanlanmamış ağırlıkça %10 bazalt elyaf içeren kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri

Silanlanmamış bazalt elyaf takviye edilerek oluşturulan kompozit malzemenin aşınma yüzeyine ait 30 ve 150 kat büyütmede elde edilen görüntüler Şekil 4.59'da verilmiştir. Şekil 4.59 incelendiğinde aşınma testi sonrasında silanlanmamış bazalt elyafların polimer içerisinde tutunamayarak yüzeye çıktığı kolaylıkla görülebilmektedir. Elyaf ve matris arasındaki arayüzey yapışmasının zayıf olduğu bir durumda, adhezif aşınma testi esnasında elyafların polimer içerisinde korunamayacağı, uygulanan yükü desteklemeyeceği ve aşınma ile matristen kolayca ayrılacağı bilinmektedir (Zhou ve diğ., 2013).

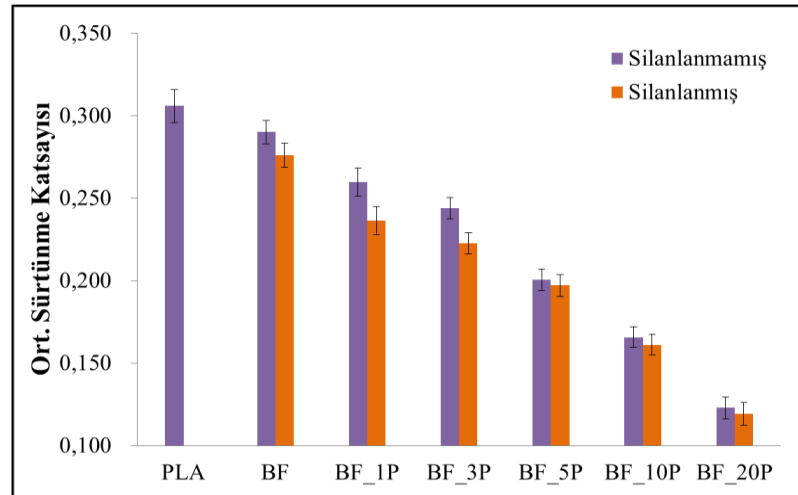


Şekil 4.60. Silanlanmış ağırlıkça %10 bazalt elyaf içeren kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri

Yüzey modifikasyonu uygulandıktan sonra PLA matrisine bazalt elyaf takviye edilerek elde edilen kompozitlerin aşınma yüzeyine ait 150 ve 1500 kat büyütülmüş görüntüler Şekil 4.60'da verilmiştir. Elde edilen görüntüler incelendiğinde yapıya bazalt elyaf eklenmesiyle birlikte aşınma izi derinliğinin azaldığı ve daha pürüzsüz bir aşınma yüzeyi ortaya çıktığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.60'dan bazalt elyaf yüzeyi daha dikkatli incelendiğinde, silanlama işleminden sonra bazalt elyafın PLA matrisi tarafından daha iyi ıslatıldığı, böylece iyi arayüzey etkileşimiyle birlikte matris ve elyaf arasında bağlanmanın arttığı, bunun da aşınma esnasında elyafların kolay bir şekilde yapıdan ayrılmayarak aşındırıcı bilyenin matris yerine elyaf ile temas edip aşınma özelliğini geliştirdiği yorumu yapılabilir (Karsli ve diğ., 2018). Böylece aşınma testi esnasında matris malzemesi bazalt elyaflar tarafından desteklenip korunarak oluşturulan kompozitin aşınma dayanımının iyileşmesi sağlanmıştır.

4.5.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin aşınma testi sonuçları

PLA matrisine silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf ve ağırlıkça artan oranda silanlanmamış/silanlanmış pomza takviyesiyle üretilen hibrit kompozitlere uygulanan aşınma testi sonucunda elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri Şekil 4.61'de verilmiştir.

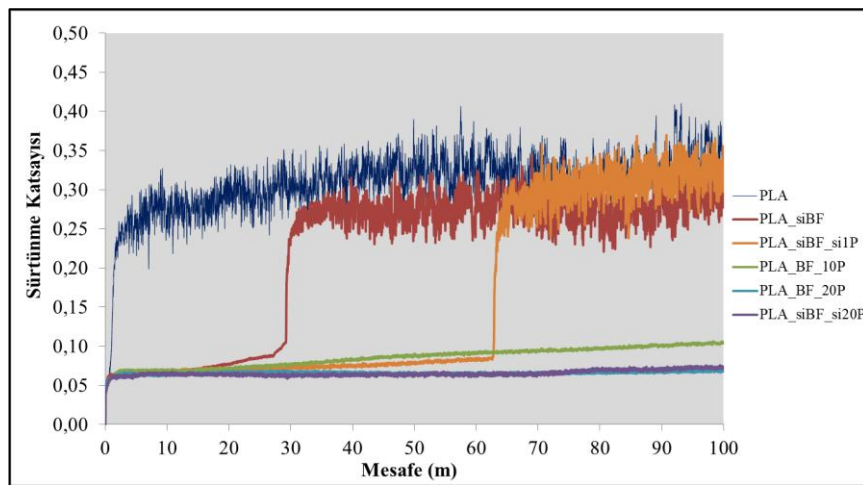


Şekil 4.61. Bazalt elyaf ve pomza içeren hibrit kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları

Şekil 4.61 incelendiğinde hibrit kompozit içindeki pomza miktarının artmasıyla sürtünme katsayısı değerlerinde önemli ölçüde azalma meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte en düşük sürtünme katsayısına ağırlıkça %20

oranında pomza içeren hibrit kompozitlerde ulaşılmıştır. Bu durumun bazalt elyaf ve pomza partikülünün eş zamanlı kullanılmasıyla meydana gelen hibrit etki aracılığıyla ortaya çıktığı söylenebilir. Öyle ki, hibrit etki sayesinde pomza partikülleri PLA matris içerisinde daha homojen dağılarak adhezif aşınmayı azaltıcı yöndeki performansı daha etkin şekilde sergilemektedirler (Karatas ve diğ., 2019). Bununla birlikte aynı ağırlık oranına sahip silanlanmamış/silanlanmış takviye malzemesi içeren hibrit kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri karşılaştırıldığında, yüzey modifikasyonu uygulanmış bazalt elyaf ve pomza kullanılarak oluşturulan kompozitlerin silanlama işlemi uygulanmamış elyaf ve partiküllerle oluşturulan kompozitlere kıyasla daha düşük ortalama sürtünme katsayısı değerine sahip olduğu bulgusuna varılmıştır. Her iki takviye malzemesinin de yüzeyi silanlı olduğu bu durumda kompozitin ortalama sürtünme katsayısında görülen bu önemli düşüş hem bazalt elyaf ve hem de pomza partikülünün eş zamanlı kullanılmasıyla meydana gelen hibrit etkinin ve silanlama prosesi sonucunda bazalt elyaf ve pomza partiküllerinin yüzey fonksiyonelliklerinde meydana gelen artışın bir sonucu olarak yorumlanabilir.

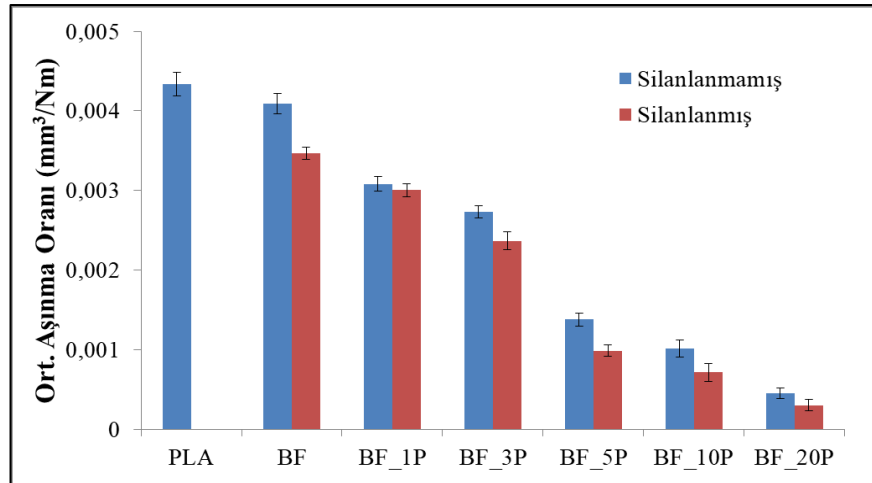
PLA matrisine silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf ve pomza takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozitlere ait aşınma eğrileri Şekil 4.62'den incelendiğinde artan ağırlık oranında pomza eklenmesiyle birlikte kompozit malzemelerin aşınma karakteristiklerinde büyük bir iyileşme meydana geldiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4.62. Bazalt elyaf ve pomza içeren hibrit kompozitlerin aşınma eğrileri

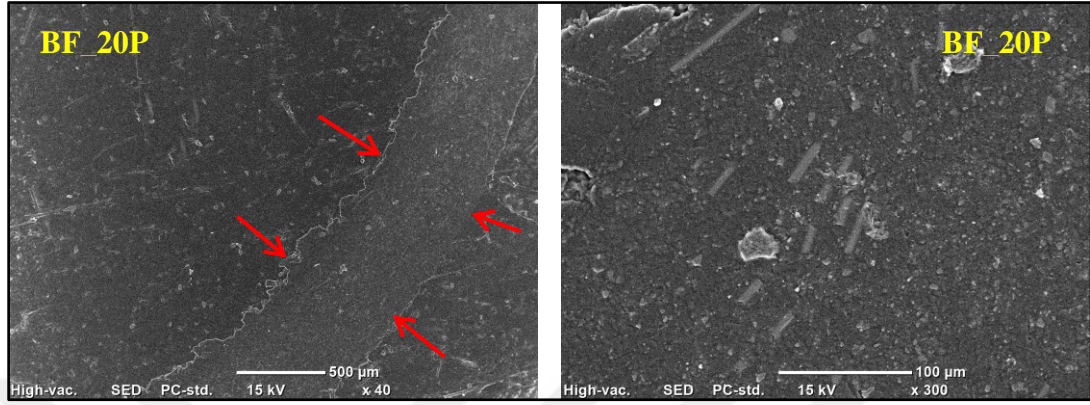
İlk olarak ağırlıkça en düşük orana sahip %1 pomza takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozit incelendiğinde 60 metre civarında ani bir geçiş olduğu görülmektedir. Oluşan keskin geçişlerin sebebi numune yüzeyinden aşındırıcı bilyenin parça kopartması ve bununla birlikte numune yüzeyinden ayrılan polimer elyaf ve/veya pomza partikülünün abrazif aşınma etkisi yaratması olarak söylenebilir. Sonrasında eğrilerin lineer hal alması durumu ise aşındırıcı ve numune arasında oluşan transfer filminden ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte kompozit yapı içerisindeki pomza miktarının artmasıyla aşınma eğrisinde herhangi bir ani geçiş görülmemektedir. Bu durum ortalama sürtünme katsayısı değerlerinden de anlaşılacağı gibi oluşturulan hibrit kompozit yapının aşınma özelliklerinin iyileştirildiğini göstermektedir.

Silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitlerin aşınma testi yapıldıktan sonra aşınma oranlarını hesaplamak amacıyla optik mikroskop altında izleri ölçülmüş sonrasında Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak hesaplanan aşınma oranları Şekil 4.63’de verilmiştir. Şekil 4.63 incelendiğinde, açıkça görülmektedir ki artan pomza oranıyla birlikte oluşturulan hibrit kompozitlerin aşınma oranlarında dikkat çeken bir miktarda azalma görülmektedir. Ayrıca aynı ağırlık oranına sahip silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf ve pomza partikülü içeren kompozitler karşılaştırıldığında yüzey modifikasyonu uygulanmış bazalt elyaf ve pomza içeren kompozitlerin daha düşük aşınma oranına sahip olduğu bulgusuna varılmaktadır.



Şekil 4.63. Bazalt elyaf ve pomza içeren hibrit kompozitlerin ortalama aşınma oranları

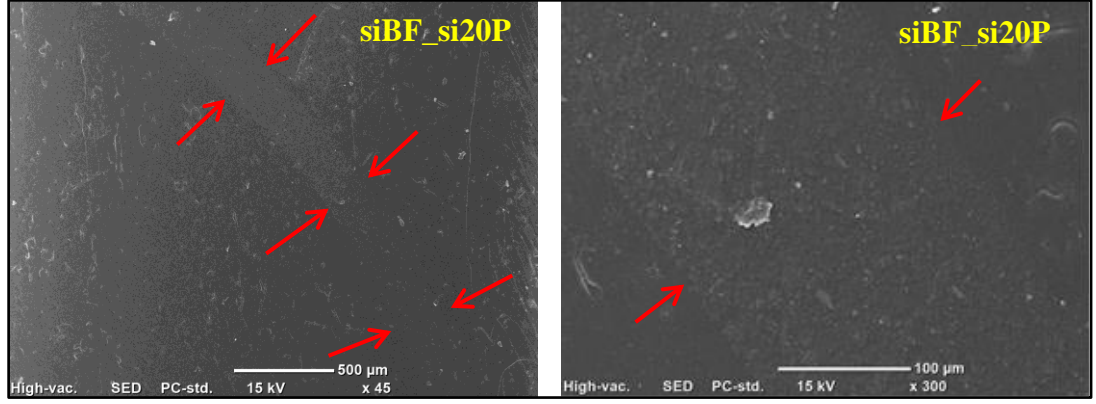
Saf PLA matrisine pomza ve bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin aşınma yüzeylerinin morfolojik yapısına ait görüntüler Şekil 4.64 ve 4.65'de verilmiştir.



Şekil 4.64. Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %20 pomza içeren hibrit kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri

Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %20 oranda pomza takviyesiyle oluşturulan kompozitin aşınma yüzeyine ait 40 ve 300 kat büyütülmüş görüntüler Şekil 4.64'de verilmiştir. Şekil 4.64 incelendiğinde oluşturulan hibrit kompozitin aşınma izinde belirgin bir azalma meydana geldiği açıkça görülmektedir. Fakat aynı kompozite ait 300 kat büyütülmüş görüntü daha dikkatli incelendiğinde kompozit yapı içerisinde bulunan bazalt elyafların yüzeye çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak bazalt elyaf ve PLA matrisi arasındaki arayüzey etkileşiminin yeteri kadar sağlanamaması söylenebilir. Bununla birlikte hem bazalt elyafın hem de pomza partikülünün silanlanması sonucunda oluşturulan aynı ağırlık oranına sahip kompozitin aşınma yüzeyine ait benzer büyütme oranındaki görüntüler Şekil 4.65'den incelendiğinde oluşan aşınma yüzeyinin neredeyse belirginliğini kaybettiği buradan da yapının hemen hemen hiç aşınmadığı yorumu yapılabilir. Ayrıca 300 kat büyütme oranına ait iki şekil birlikte incelendiğinde silanlama işlemi sonrasında kompozitin aşınma yüzeyinde elyaflar görülmemektedir. Buradan da silanlama işleminin matris elyaf arayüzey etkileşimini iyileştirdiği söylenebilir. Bu bilgiye ek olarak oluşturulan hibrit etkiyle birlikte pomza partiküllerinin bazalt elyaf tarafından matris içerisine daha homojen dağılım sağladığı böylece daha iyi arayüzey yapışmasıyla birlikte aşınma testi sırasında aşındırıcı bilyenin polimer matris yerine daha rijit faz olan elyaf ve partiküle temasıyla birlikte aşınma özelliklerinde iyileşme sağlandığı yorumu yapılabilir. Ayrıca oluşturulan silanlanmış elyaf ve pomza

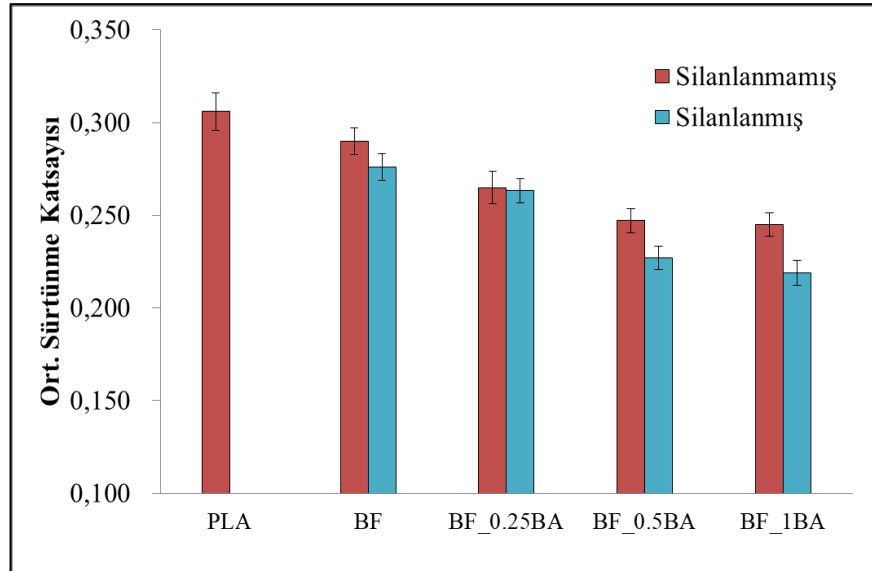
partikülü içeren hibrit kompozitle birlikte aşınma izinin dokusunun değiştiği ve daha az pürüzlü olduğu söylenebilir.



Şekil 4.65. Silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış ağırlıkça %20 pomza içeren hibrit kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri

4.5.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin aşınma testi sonuçları

PLA matrisine silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf ve borik asidin birlikte takviyesiyle üretilen hibrit kompozit malzemelerin aşınma testi sonrasında elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri Şekil 4.66’da verilmiştir.

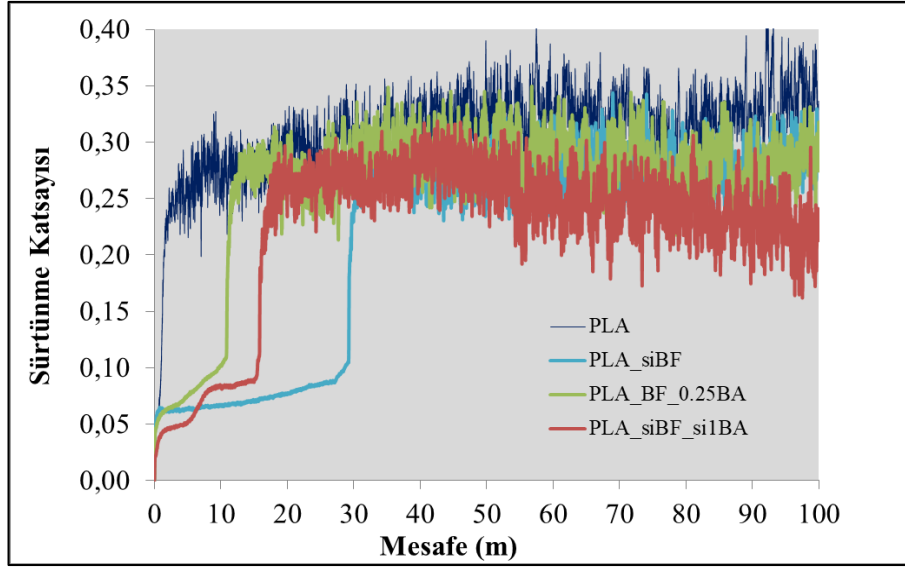


Şekil 4.66. Bazalt elyaf ve borik asit içeren hibrit kompozitlerin ortalama sürtünme katsayıları

Şekil 4.66 incelendiğinde bazalt elyaf içeren kompozitlere artan ağırlık oranında hem silanlanmamış hem de silanlanmış borik asit takviyesinin ortalama sürtünme

katsayısı değerlerini düşürdüğü böylece malzemenin aşınma dayanımını arttırdığı açıkça görülmektedir. Sadece borik asit ve sadece bazalt elyaf içeren kompozitlerin saf PLA matrisine kıyasla ortalama sürtünme katsayısı değerinin düştüğü ve aşınma özelliklerinde iyileşme sağlandığı önceki sonuçlarda verilmişti. Bazalt elyaf ve borik asidin eş zamanlı takviyesiyle birlikte kompozit yapı içerisinde ortaya çıkan hibrit etki aracılığıyla, ağırlıkça artan borik asit oranına bağlı olarak kompozit yapıların ortalama sürtünme katsayısı değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu sonuçtan yola çıkarak, elyaf ile partikülün birlikte takviyesinin borik asidin polimerik matris içerisindeki homojen dağılımını iyileştirerek, borik asit tabakalarının yapı içerisinde daha iyi yönlenmesini ve birbirleri üzerinden daha kolay kaymasını sağladığı söylenebilir. Böylece borik asidin polimerik matris içerisindeki katı yağlayıcılık görevini daha iyi yerine getirdiği yorumu yapılabilir (Karatas ve diğ., 2019). Bununla birlikte aynı ağırlık oranına sahip silanlanmamış/silanlanmış takviye malzemesi içeren hibrit kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri karşılaştırıldığında yüzey modifikasyonu uygulanmış bazalt elyaf ve borik asit kullanılarak üretilen kompozitlerin silanlama işlemi uygulanmamış elyaf ve partiküllerle üretilen kompozitlere kıyasla daha düşük ortalama sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu görülmektedir (fark görülemeyecek kadar az ağırlık oranında olması sebebiyle ağırlıkça %0,25 borik asit içeren hibrit kompozitler hariç). Her iki takviye malzemesinin de yüzeyinin silanlı olduğu bu durumda kompozitin ortalama sürtünme katsayısı değerlerinde görülen bu düşüş silanlama işlemi sonucunda takviye malzemelerinin yüzey fonksiyonelliklerinin artması sayesinde PLA matris ile etkileşimlerinin artmasının ve PLA matris içerisinde daha homojen dağılımlarının bir sonucudur.

Aşınma testi sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı değerinin mesafeye bağlı değişimini gösteren grafik Şekil 4.67’de verilmiştir. Şekil 4.67 incelendiğinde ortalama sürtünme katsayısı değerlerine paralel bir şekilde bazalt elyaf ve borik asidin PLA matrisine hibrit etki yaratacak şekilde takviye edilmesi sonrasında aşınma eğrileri saf PLA matrisinin altında kalmaktadır. Aşınma eğrileri arasında çok büyük farklar olmamasının sebebi yapıya katılan borik asit ağırlık oranlarının birbirine çok yakın ve düşük miktarda olması şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 4.67. Bazalt elyaf ve borik asit içeren hibrit kompozitlerin aşınma eğrileri

Silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitlerin aşınma testi yapıldıktan sonra aşınma oranlarını hesaplamak amacıyla optik mikroskop altında izleri ölçülmüş ve Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak hesaplanan aşınma oranları Şekil 4.68'de verilmiştir.

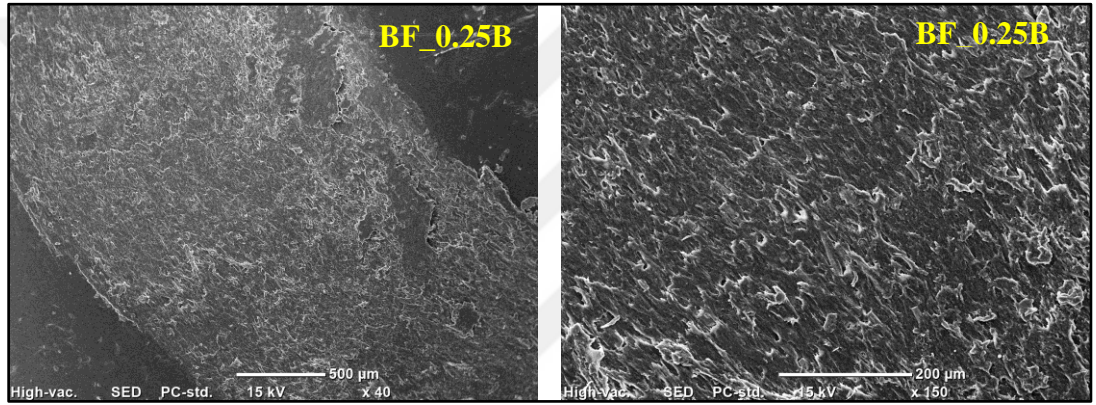


Şekil 4.68. Bazalt elyaf ve borik asit içeren hibrit kompozitlerin ortalama aşınma oranları

Şekil 4.68 incelendiğinde, açıkça görülmektedir ki hibrit kompozitlerin ortalama aşınma oranı değerleri sadece bazalt elyaf takviyeli kompozitin ortalama aşınma oranı değerinden düşüktür. Bu düşüşün miktarı yüzeyi silanlanmış bazalt elyaf ve borik asit içeren kompozitlerde daha fazladır. Bu sonuç sürtünme katsayısı sonuçları

ile de uyuşan ve beklenen bir sonuçtur. Sebebi de daha önce de bahsedildiği gibi bazalt elyaf ve borik asit partikülünün eş zamanlı kullanılmasıyla meydana gelen hibrit etkidir. Her iki takviye malzemesinin yüzeyinin silanlanması durumunda ise bazalt elyaf ve borik asit partiküllerinin PLA matris ile etkileşimleri arttığından PLA matris içerisinde daha homojen dağılımları mümkün olmuş ve böylece hibrit etkinin şiddeti de daha belirgin olmuştur denebilir.

Saf PLA'ya borik asit ve bazalt elyafın eş zamanlı ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin aşınma yüzeylerinin morfolojik yapısına ait görüntüler Şekil 4.69 ve 4.70'de verilmiştir.

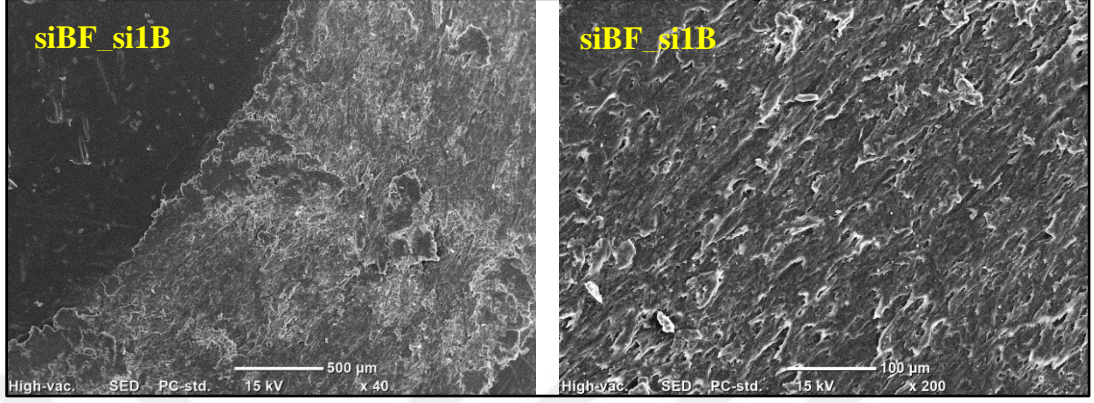


Şekil 4.69. Silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %0.25 borik asit içeren hibrit kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri

PLA matrisi içerisine silanlanmamış bazalt elyaf ve silanlanmamış ağırlıkça %0,25 borik asit takviyesiyle oluşturulan kompozitin aşınma yüzeylerinin 40 ve 150 kat büyütme altındaki görüntüsü Şekil 4.69'da verilmiştir. Şekil 4.69'da bulunan 150 kat büyütülmüş görüntü dikkatli incelendiğinde kayma doğrultusunda yüzeyde elyafların yerinden ayrılması sonucu ortaya çıkmış olan boşluklar dikkat çekmektedir. Ayrıca aşınma yüzeyinde bazalt elyafların da bulunduğu görülmektedir. Buradan elyafların polimer matrisle olan arayüzey etkileşiminin zayıf olduğu ve elyafların iyi bir şekilde PLA matrisine tutunamayarak kompozit yapıda beklenen aşınma performansını gösteremediği söylenebilir.

Bununla birlikte yüzey modifikasyonu uygulandıktan sonra polimer matris içerisine takviye edilen bazalt elyaf ve ağırlıkça %1 oranında borik asit içeren kompozite ait aşınma yüzeyinin 40 ve 200 kat büyütülmüş görüntüleri Şekil 4.70'den incelendiğinde, silanlama işlemi sonrasında bazalt elyafların aşınma testi esnasında

yerlerinden çıkıp oluşturduğu boşlukların neredeyse görülmediği söylenebilir. Bu durumda elyaflar yapı içerisinde kalarak malzemenin aşınma özelliklerinin iyileşmesine katkı sağlamıştır yorumu yapılabilir.



Şekil 4.70. Silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış ağırlıkça %1 borik asit içeren hibrit kompozitin aşınma yüzeyinin SEM görüntüleri

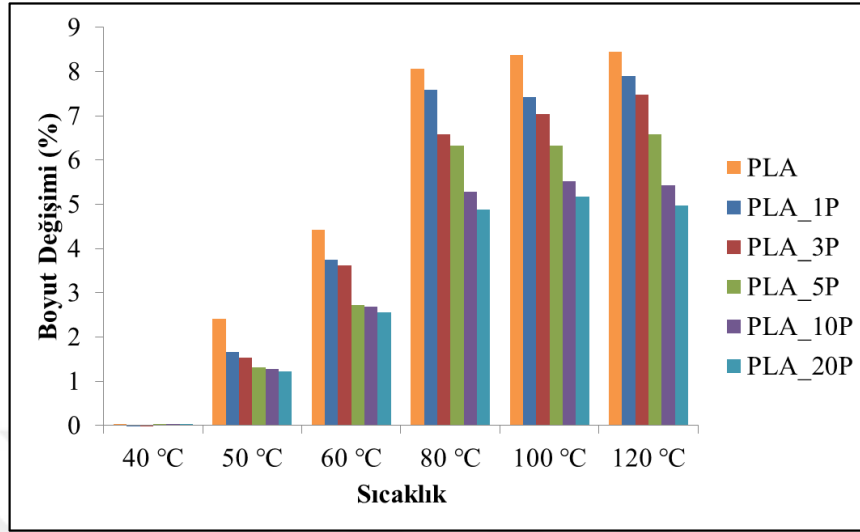
4.6. Boyutsal Kararlılık Analizi (BKA) Sonuçları

Tez çalışması kapsamında, 35 malzeme türünün boyutsal kararlılık analizi 6 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiş ve sonuçta elde edilen yüzde boyut değişim değerleri paylaşılmıştır. Saf PLA'nın ve üretilen PLA matrisli kompozitlerin BKA sonuçları incelendiğinde 40°C'de boyut değişimi meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Saf PLA'nın camı geçiş sıcaklığının yaklaşık 53 °C olduğu düşünülürse 40 °C camı geçiş sıcaklığının altında bir değer olduğu için bu beklenen bir sonuçtur. Bununla birlikte artan sıcaklıkla polimer zincirleri daha kolay hareketlenmeye başladıklarından boyut değişim oranının da arttığı ulaşılan bir diğer sonuçtur. Sonuçların daha kolay incelenebilmesi adına alt başlıklar detaylarıyla aşağıda sunulmuştur.

4.6.1. Pomza takviyeli kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonuçları

PLA matrisine silanlanmış/silanlanmamış pomza takviyesiyle oluşturulan kompozitlerin BKA sonuçları Şekil 4.71 ve 4.72'de verilmiştir. Poli(laktik asit) boyutsal kararlılık açısından yetersiz özellik gösteren bir polimer türü olarak bilinmektedir. Bu sebeple kullanım alanı sınırlı bir malzeme özelliği taşır. Fakat çeşitli takviye malzemeleri eklenmesiyle birlikte kompozit yapılar oluşturularak

PLA'nın daha kararlı bir boyutsal yapı sergilemesi sağlanmaktadır (Cheng ve diğ., 2009).

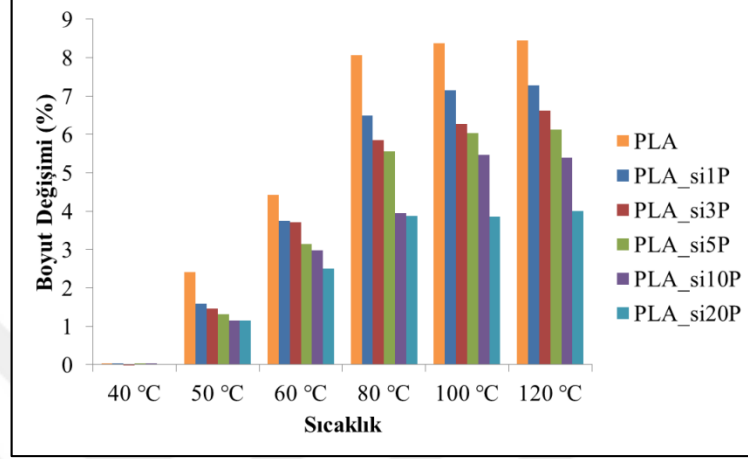


Şekil 4.71. Silanlanmamış pomza takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları

Şekil 4.71 incelendiğinde, PLA matrisine artan oranda pomza takviyesiyle kompozitin kararlılığının arttığı bunun sebebi ise testin yapıldığı sıcaklık değerlerinde rijit pomza partiküllerinin PLA matrisinin zincir hareketliliğini kısıtlayarak boyut değişimini önlemiş olmasıdır. Beklenildiği gibi artan sıcaklık değeriyle birlikte pomza takviyeli kompozitlerde yüzde boyut değişim oranı da artmıştır. Fakat bu artış malzeme içerisindeki yüksek oranda pomza bulunan kompozitlerde daha kararlı bir yapı elde edilmesinden dolayı büyük boyutsal farklılıklara sebep olmamıştır.

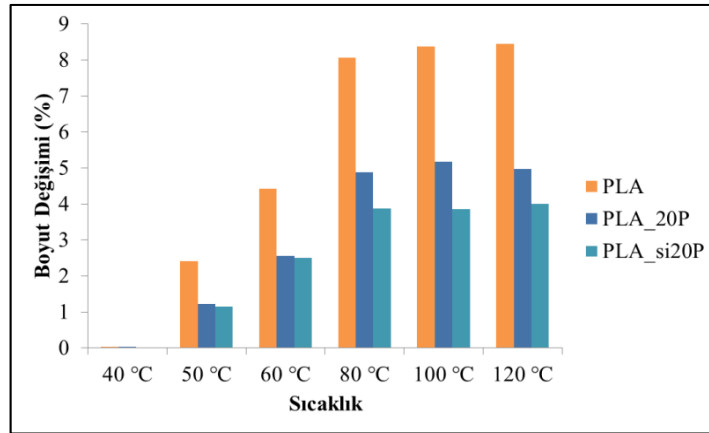
PLA matrisine artan ağırlık oranında yüzey modifikasyonu uygulanmış (silanlanmış) pomza eklendiğinde oluşturulan kompozitlerin yüzde boyut değişim değerleri Şekil 4.72'den incelendiğinde, tıpkı silanlanmamış pomza içeren kompozitlerde olduğu gibi bir davranış sergilediği bununla birlikte partikülünün silanlanmasıyla düşük pomza oranlı kompozitler için silanlanmamış kompozitlere göre neredeyse bir değişim olmadığı görülmüştür. Fakat yüksek oranlara çıkıldığında matristeki silanlı partikül miktarı arttığından arayüzey iyileşmesinin de arttığı ve yüzde boyut değişiminin silanlı pomza içeren kompozitlerde daha kararlı bir durum sergilediğini göstermektedir.

Kompozit malzemelerde arayüzey etkileşiminin iyileşmesiyle birlikte takviye elemanlarının matris içerisinde daha iyi dağıldığı ve böylelikle polimer zincirlerinin hareketlerini daha fazla kısıtlayarak kararlı bir yapı oluşturduğu bilinmektedir (Siakeng ve diğ., 2019).



Şekil 4.72. Silanlanmış pomza takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları

Yüzey modifikasyonu işleminin boyutsal kararlılık üzerine etkisini daha iyi inceleyebilmek adına Şekil 4.73 oluşturulmuştur. Şekil 4.73 incelendiğinde silanlama işleminin etkisiyle birlikte pomza partikülleri ve PLA matrisi arasında daha iyi bir arayüzey bağlanması sağlanmış ve böylece polimer zincirlerinin hareketleri yapıda bulunan yüksek miktarda silanlı pomza partikülleri tarafından kısıtlanarak oluşturulan kompozitlerin boyutsal kararlılığını geliştirmiştir.

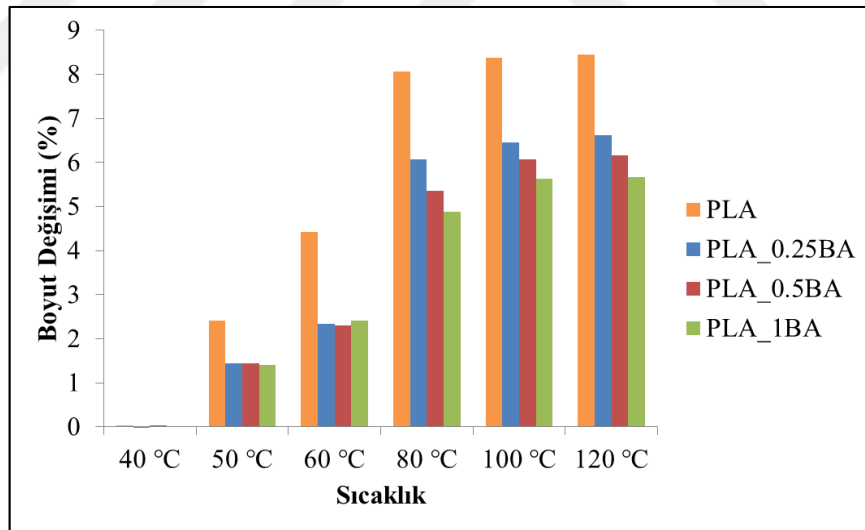


Şekil 4.73. Ağırlıkça %20 pomza takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları

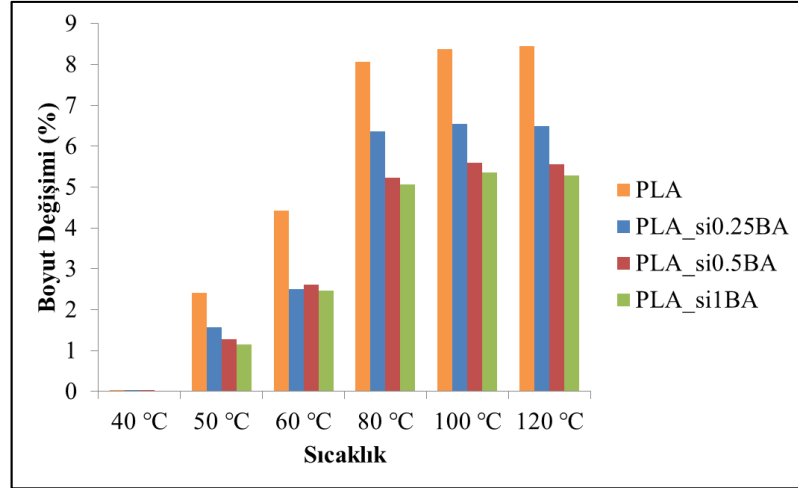
4.6.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonuçları

Şekil 4.74 ve 4.75, PLA matrisine sırasıyla silanlanmamış ve silanlanmış borik asit takviyesi sonucunda oluşturulan kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonucunda elde edilen yüzde boyut değişimi değerlerini göstermektedir.

Şekil 4.74 incelendiğinde PLA matrisine borik asit eklenmesiyle boyut değişiminin yüzde olarak düşük olmasından boyutsal kararlılığın iyileşme gösterdiği açıkça görülmektedir. Bununla birlikte borik asit miktarının ağırlıkça birbirine çok yakın olmasından belirlenen analiz sıcaklıkları için farklı ağırlık oranlarında oluşturulan kompozitler arasında boyutsal kararlılık olarak büyük farklar gözlemlenmemiştir. Ayrıca borik asidin silanlanmasıyla birlikte elde edilen kompozitlerde de benzer bir durum görülmektedir. Bu sebeple boyutsal kararlılık açısından borik asidin silanlı ya da silansız olarak değerlendirilmesi pomza partiküllerinde olduğu gibi ağırlıkça yüksek oranlarda takviye edilmediğinden büyük bir fark meydana getirmediği şeklinde yorumlanabilir.

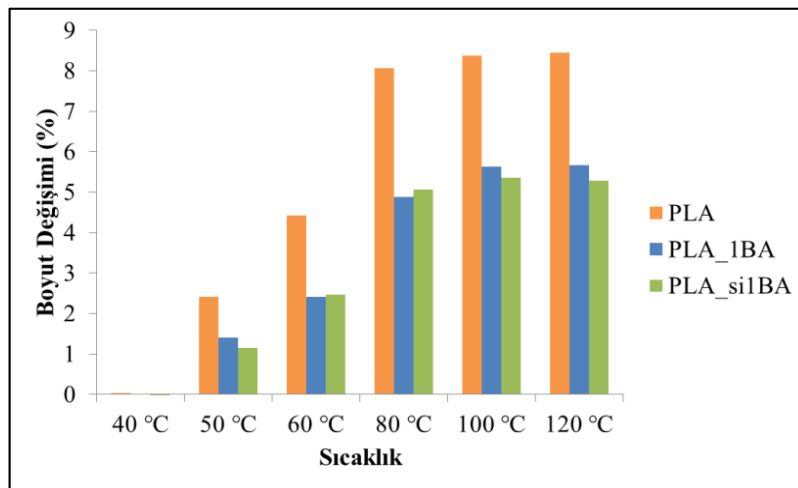


Şekil 4.74. Silanlanmamış borik asit takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları



Şekil 4.75. Silanlanmış borik asit takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları

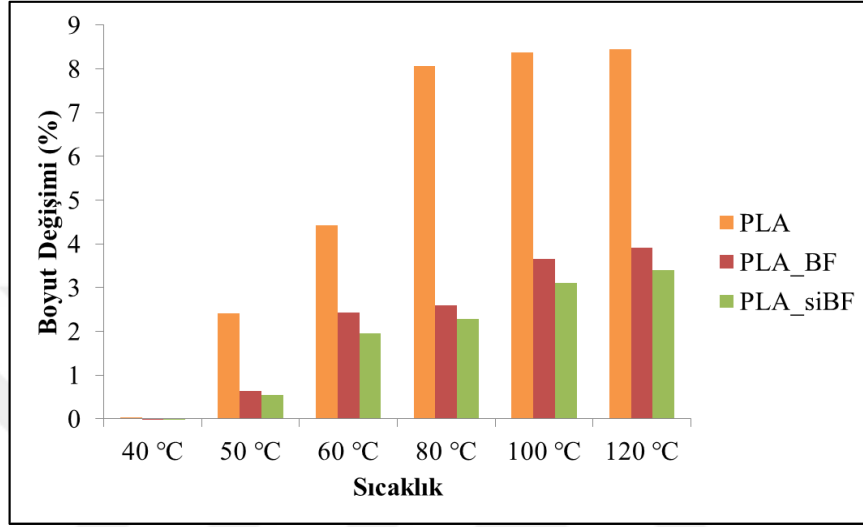
Silanlı ve silansız borik asit takviyesi sonucunda boyutsal kararlılık açısından en iyi sonucu veren kompozitlerin yüzey modifikasyonunun malzemenin boyutsal kararlılığına etkisini daha iyi inceleyebilmek adına Şekil 4.76 oluşturulmuştur. Şekil 4.76 incelendiğinde borik asit silanlı ya da silansız olarak takviye edildiğinde boyutsal kararlılık için en fazla iyileşme görülen ağırlıkça %1 oranında borik asit içeren kompozitler arasında az olmasına rağmen yine de bir miktar gelişme sağlandığı bulgusuna varılmıştır. Bu iyileşmenin az olmasının sebebi olarak pomza partiküllerinde olduğu gibi ağırlıkça yüksek oranlarda borik asit takviye edilmediği şeklinde söylenebilir.



Şekil 4.76. %1 borik asit takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları

4.6.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonuçları

PLA matrisine silanlanmamış/silanlanmış ağırlıkça %10 bazalt elyaf takviyesiyle üretilen kompozit malzemelerin boyutsal kararlılık analizi sonucunda elde edilen yüzde boyut değişim değerleri Şekil 4.77’de verilmiştir.



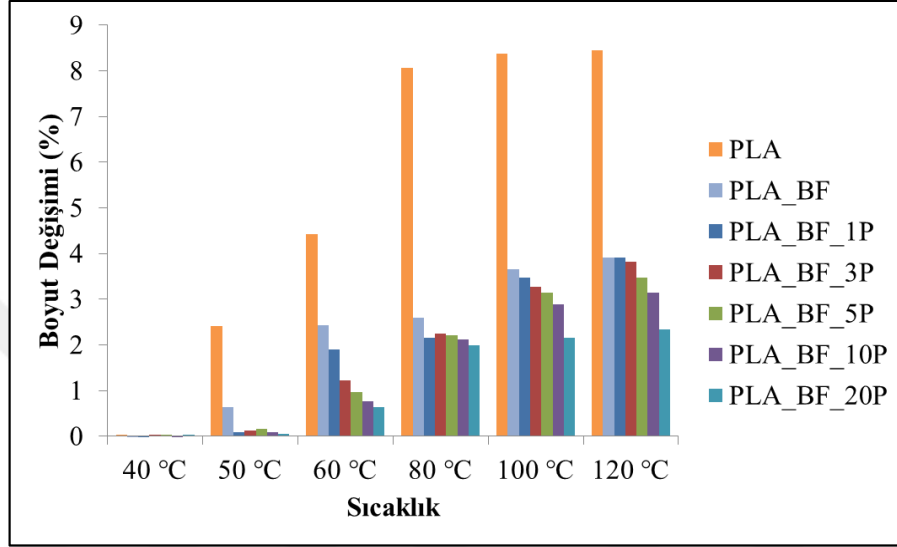
Şekil 4.77. Silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin BKA sonuçları

Şekil 4.77 incelendiğinde matris bazalt elyaf eklenmesiyle malzemenin boyutsal kararlılığının iyileştiği belirgin olarak görülmektedir. Matris içerisine polimerden daha rijit bir yapıda olan elyaf takviyesi, bilindiği üzere polimer malzemenin zincir hareketliliğini kısıtlayarak oluşturulan kompozitin daha kararlı bir yapıda kalmasını sağlamaktadır.

Yapılan bir çalışmada benzer şekilde PLA matrisine bazalt elyaf takviyesiyle oluşturulan kompozit yapıların boyutsal kararlılık davranışının tez kapsamında elde edilen sonuçlarla örtüştüğü görülmektedir (Tábi ve diğ., 2013). Bununla birlikte bazalt elyafın silanlanmasıyla matris ve elyaf arayüzeyi daha da geliştirilmiş ve bunun sonucunda polimer zincir hareketliliği daha da kısıtlanarak kompozitlerin boyutsal kararlılığında gelişme sağlanmıştır. Benzer bir şekilde yapılan bir çalışmada bazalt elyaf içeren kompozitlerin silanlama işlemi sonrasında boyutsal kararlılığında iyileşme sağlandığı bildirilmiştir (Tábi ve diğ., 2013).

4.6.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonuçları

Şekil 4.78 ve 4.79 PLA matrisine bazalt elyaf ve pomza takviyesi sonucunda oluşturulan hibrit kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonucunda elde edilen yüzde boyut değişimi değerlerini göstermektedir.

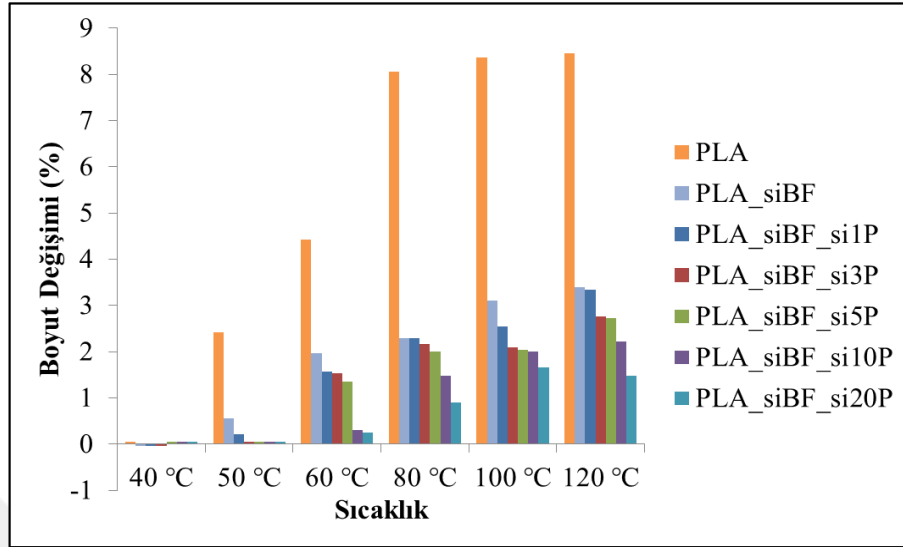


Şekil 4.78. Silanlanmamış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları

Şekil 4.78 incelendiğinde oluşturulan tüm hibrit kompozitlerin boyutsal kararlılık özelliğinin saf PLA matrisinden oldukça iyi olduğu açıkça görülmektedir. Değişen sıcaklıklarda matris içerisindeki rijit faz olan partikül ve elyafın birlikte takviyesinin etkisiyle polimer zincirlerinin hareketliliği kısıtlanmış olup, artan pomza takviyesiyle de zincirlerin hareket özellikleri en az seviyeye indirilmiş ve daha kararlı bir yapı elde edilmesi sağlanmıştır. Düşük sıcaklık değerlerinde, kompozitlerde neredeyse boyutsal olarak bir değişim görülmemekle birlikte artan sıcaklıklarda yapılan analizler sonrasında beklendiği üzere boyutsal kararlılıkta bir miktar değişim gözlemlenmiştir. Fakat yine de hibrit etki sayesinde kompozit malzemelerin boyutsal kararlılığı her sıcaklık için saf PLA matrisinden üstün özellikler göstermiştir.

Bazalt elyaf ve pomza partikülünün silanlanması sonrasında oluşturulan hibrit kompozitlerin boyutsal kararlılık analiziyle belirlenen yüzde boyut değişimi sonuçları Şekil 4.79'den incelendiğinde, Şekil 4.78'e benzer şekilde her sıcaklık

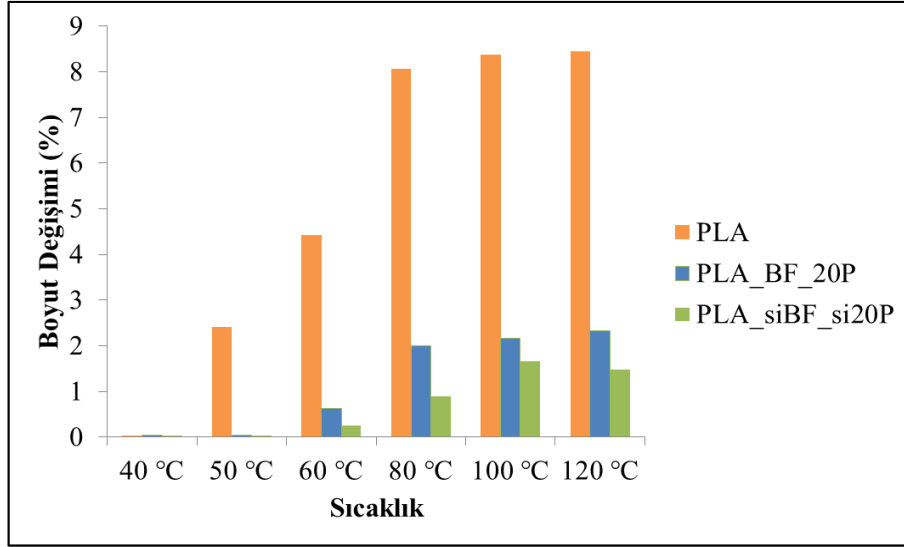
değeri için artan takviye oranında malzemenin boyutsal kararlılığında gelişme sağlandığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.79. Silanlanmış pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları

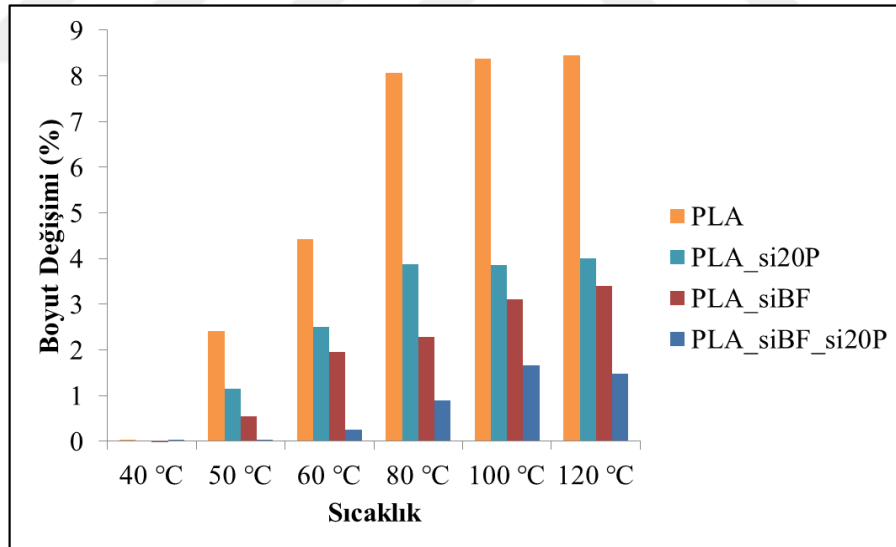
Silanlanmış/silanlanmamış elyaf ve partikül takviyeli hibrit kompozitler karşılaştırıldığında elyaf ve partikülün silanlanmasıyla düşük pomza oranlı kompozitler için silanlanmamış kompozitlere göre neredeyse bir değişim olmadığı, fakat yüksek oranlara çıkıldığında matristeki silanlı partikül miktarı arttığından arayüzey iyileşmesinin daha çok sağlandığı ve boyutsal kararlılığın yüksek oranda silanlı pomza içeren kompozitlerde daha kararlı bir durum sergilediği gözlemlenmiştir.

PLA matrisine silanlanmış/silanlanmamış pomza ve bazalt elyaf takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozitlerin arasında en iyi boyutsal kararlılığa sahip %20 pomza içeren hibrit kompozitler Şekil 4.80'den karşılaştırıldığında, yüzey modifikasyonu sonrasında oluşturulan kompozitlerin hem daha iyi arayüzey etkileşimine sahip olduğu hem de elyaf ve partikülün birlikte takviyesinin partiküllerin matris içerisine homojen dağılımını sağladığından, silanlanmış elyaf ve partiküle sahip hibrit kompozitlerin boyutsal kararlılık için daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 4.80. Ağırlıkça %20 pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları

Pomza ve bazalt elyaf takviyesinin ayrı ayrı ve hibrit etki oluşturacak şekilde takviye edilmesi sonucunda en iyi boyutsal kararlılık özelliğini gösteren kompozitlerin daha iyi incelemesi adına Şekil 4.81 oluşturulmuştur



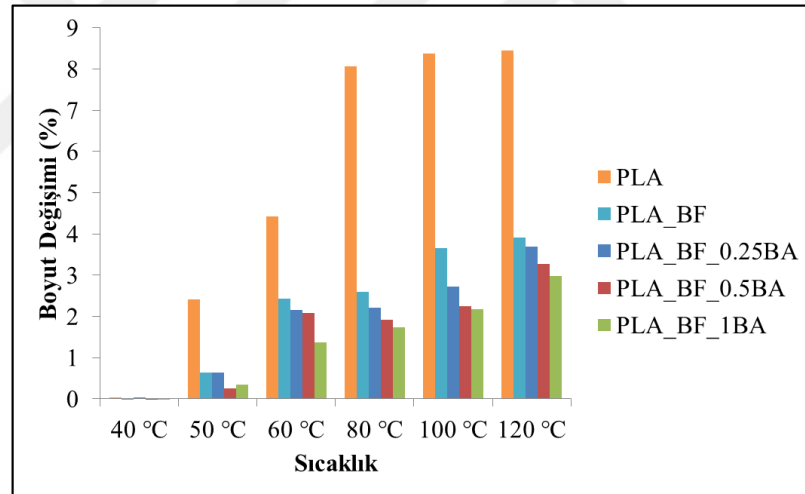
Şekil 4.81. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.81 incelendiğinde silanlanmış bazalt elyaf takviyesinin ağırlıkça %20 oranında silanlanmış pomza takviyesinden daha iyi boyutsal kararlılık gösterdiği bulgusuna varılmıştır. Bunun sebebi olarak bazalt elyafın volkanik bir kaya türünden elde edilmiş olması ve ısı tutma kapasitesinin yüksek olması şekilde yorumlanabilir

(Lee ve diğ., 2017). Silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış ağırlıkça %20 pomzanın birlikte takviyesiyle boyutsal kararlılık açısından pomza içeren kompozitler için en iyi sonuç elde edilmiştir.

4.6.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonuçları

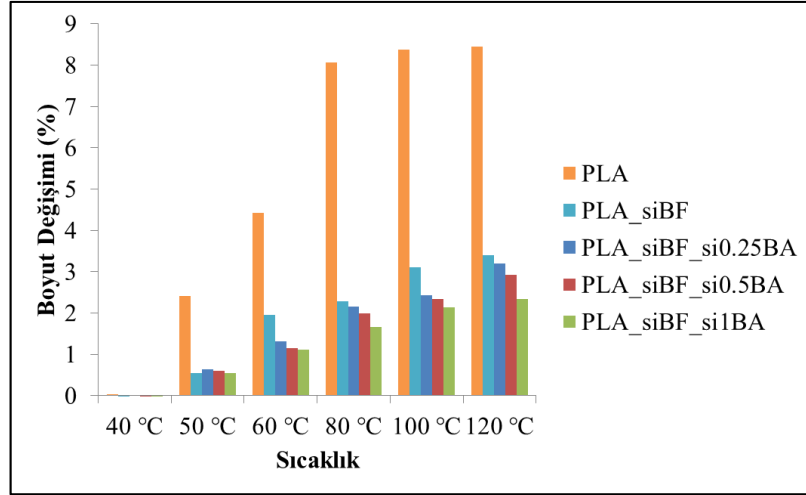
PLA matrisine bazalt elyaf ve borik asit takviyesiyle üretilen kompozit malzemelerin boyutsal kararlılık analizi sonucunda elde edilen yüzde boyut değişim değerleri Şekil 4.82’de verilmiştir. Şekil 4.82 incelendiğinde borik asit içeren hibrit kompozitlerin PLA matrisinin tüm sıcaklıklar için boyutsal kararlılığını arttırdığı görülmektedir. İncelenen kompozitlerde borik asit oranı düşük olduğundan kompozitlerin boyutsal kararlılık karakteristiğinin ağırlıkça daha fazla miktarda bulunan bazalt elyaf tarafından belirlendiği şekilde düşünülebilir.



Şekil 4.82. Silanlanmamış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları

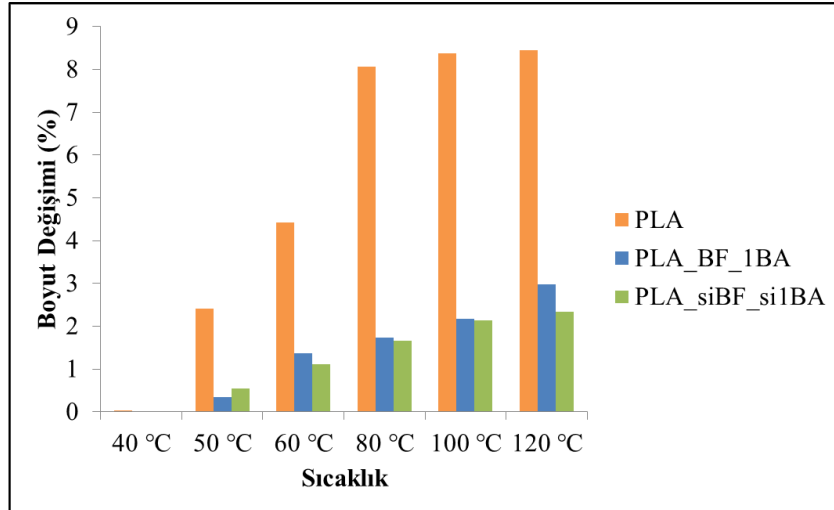
Bu durum Şekil 4.82 incelendiğinde hibrit kompozitlerin ölçülen değerlerinin sadece bazalt elyaf takviyesiyle oluşturulan kompozitin değerine oldukça yakın olmasından kolaylıkla anlaşılabilir.

Bazalt elyaf ve borik asidin silanlanmasıyla elde edilen hibrit kompozitlerin boyutsal kararlılık analizi sonucunda elde edilen boyut değişimleri Şekil 4.83’den incelendiğinde Şekil 4.82’ye benzer bir şekilde her sıcaklık değeri için artan takviye oranında boyutsal kararlılığında gelişme sağlandığı bulgusuna varılmıştır.



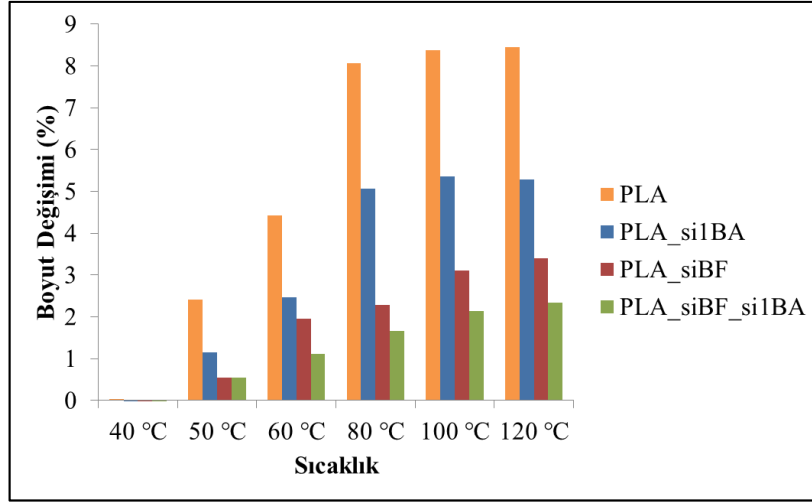
Şekil 4.83. Silanlanmış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları

Bazalt elyaf ve borik asidin birlikte takviye edilmesiyle oluşturulan hibrit kompozitlerde en iyi boyutsal kararlılığı gösteren %1 ağırlık oranı için yüzey modifikasyonunun etkisini daha kolay inceleyebilmek amacıyla Şekil 4.84 oluşturulmuştur. Şekil 4.84 incelendiğinde, yüzey modifikasyonu sonrasında çok dikkat çeken bir değişiklik meydana gelmemekle birlikte oluşturulan hibrit kompozitlerde silanlama işleminin etkisi bir miktar görülmüştür.



Şekil 4.84. Ağırlıkça %1 borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçları

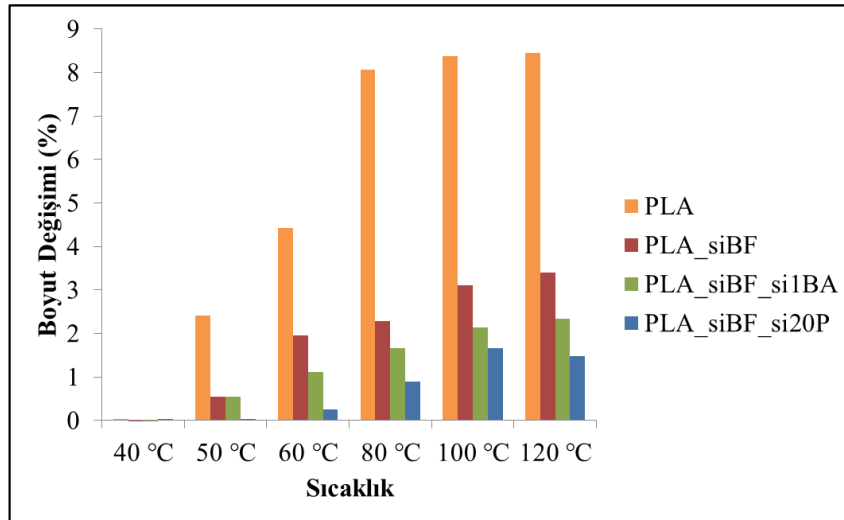
Borik asit ve bazalt elyaf takviyesinin ayrı ayrı ve hibrit etki oluşturacak şekilde takviye edilmesi sonucunda en iyi boyutsal kararlılık özelliğini gösteren kompozitlerin daha iyi incelemesi adına Şekil 4.85 oluşturulmuştur.



Şekil 4.85. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.85 incelendiğinde silanlanmış bazalt elyaf takviyesinin ağırlıkça %1 oranında silanlanmış borik takviyesinden daha iyi boyutsal kararlılık gösterdiği bulgusuna varılmıştır. Ayrıca silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış ağırlıkça %1 borik asidin birlikte takviyesiyle borik asit içeren kompozitler için boyutsal kararlılık açısından en iyi sonuç elde edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında üretilen partikül ve elyaf takviyeli kompozitlerin en iyi sonuç veren bileşimleri seçilmiş ve Şekil 4.86’da verilmiştir.



Şekil 4.86. Pomza, borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin BKA sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.86 incelendiğinde yüzey modifikasyonu uygulanmış elyaf ve partikül takviyesi ile oluşturulan hibrit kompozitlerin en iyi sonuçları verdiği görülmektedir. Ayrıca borik asit ve pomza içeren en iyi boyutsal kararlılığa sahip hibrit kompozitler karşılaştırıldığında ağırlıkça %20 silanlanmış pomza içeren hibrit kompozitin daha yüksek boyutsal kararlılığa sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ağırlıkça daha düşük oranda borik asit takviyesiyle ağırlıkça yüksek oranda pomzanın boyutsal kararlılık açısından birbirine yakın olmasıdır.

4.7. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Analizi Sonuçları

4.7.1. Pomza takviyeli kompozitlerin DSC analizi sonuçları

PLA matrisine silanlanmamış/silanlanmış pomza takviyesiyle üretilen kompozit malzemelerin diferansiyel taramalı kalorimetri analizi sonucunda elde edilen camsı geçiş sıcaklıkları (T_g), erime sıcaklıkları (T_m) ve yüzde kristalinite (X_c) değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Pomza takviyeli kompozitlerin DSC sonuçları

Numune Kodu	T_g (°C)	T_m (°C)	X_c (%) _{rel}
PLA	53,39	176,17	100
PLA_1P	53,6	176,61	102,65
PLA_3P	53,91	178,06	105,16
PLA_5P	53,77	176,11	104,41
PLA_10P	54,22	177,11	100,14
PLA_20P	54,04	175,64	100,17
PLA_si1P	52,07	176,49	99,074
PLA_si3P	52,74	176,39	101,3
PLA_si5P	52,29	176,6	101,38
PLA_si10P	52,42	176,38	99,719
PLA_si20P	51,42	175,65	95,556

Tablo 4.1 incelendiğinde PLA matrisine artan oranda silanlanmamış pomza eklendiğinde camsı geçiş sıcaklığında dikkate değer bir değişim görülmemiştir. Bununla birlikte tüm ağırlık oranlarında silanlanmamış pomza takviyeli kompozitler için erime sıcaklığı değerinde de saf PLA malzemesine göre değişim görülmemektedir. Matris malzemesine takviye fazı eklenmesiyle birlikte kristalinite değişimi için iki farklı durum gözlemlenmektedir. İlk olarak takviye elemanlarının

matris yapısı içerisinde iyi dağılım göstererek çekirdeklenme ajanı gibi davranıp, zincirlerin hareket etmesine de izin vererek takviye malzemesi etrafında kristal oluşumunu arttırdığı ve oluşturulan kompozit yapının kristallik derecesinin arttığı durum, diğer durum ise takviye elemanı miktarının yapı içerisinde kritik orandan fazla olup polimer zincirlerinin kolaylıkla hareket edemediği ve polimer zincirlerinin takviye elemanı etrafında kristal oluşumunu sağlayamadığı durumdur (Karsli ve diğ., 2018). Silanlanmamış pomza takviyeli kompozitlerin yüzde kristalinite değerleri incelendiğinde %1 ağırlık oranında önce artış eğilimine geçip ağırlıkça %3 pomza içeren kompozitin %5 artışla en yüksek kristalinite değerine sahip olduğu ve daha sonra artan pomza oranıyla azalarak tekrar saf PLA malzemesine göre herhangi bir değişiklik meydana gelmediği görülmektedir.

PLA matrisine artan ağırlık oranında yüzey modifikasyonu uygulanmış (silanlanmış) pomza eklendiğinde oluşturulan kompozitlerin camsı geçiş sıcaklıkları (T_g), erime sıcaklıkları (T_m) ve yüzde kristalinite (X_c) değerleri yine Tablo 4.1'den incelendiğinde pomza partikülünün silanlanmasıyla camsı geçiş sıcaklığında bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Yüzeyi silanlanmış pomza içeren kompozitlerin camsı geçiş sıcaklığı değerlerinde gözlemlenen bu düşüşün sebebi takviye malzemesi yüzeyinde bulunan silan moleküllerinin polimerik yapı üzerinde meydana getirdiği plastikleştirici etki olarak gösterilebilir. Bununla birlikte yüzeyi silanlanmış pomza içeren kompozitlerin erime sıcaklıkları incelendiğinde silanlanmış pomza ilavesinin erime sıcaklığında herhangi bir değişim meydana getirmediği görülmektedir. Silanlanmış pomza içeren kompozitlerin yüzde kristalinite değerleri incelendiğinde ise ağırlıkça %3 ve 5 oranlarında pomza ilavesiyle kristalinite az da olsa bir artış meydana geldiği fakat artan pomza miktarıyla % kristalinite değerinin düştüğü görülmektedir. % kristalinite meydana gelen bu düşüş yine yapıdaki silan moleküllerinin PLA matris üzerinde yarattıkları plastikleştirici etki sebebiyle matrisin kristallenmesini olumsuz etkilemeleri şeklinde yorumlanabilir.

4.7.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin DSC analizi sonuçları

Tablo 4.2 PLA matrisine silanlanmış/silanlanmamış borik asit takviyesi sonucunda oluşturulan kompozitlerin diferansiyel taramalı kalorimetri analizi sonucunda elde

edilen camsı geçiş sıcaklıkları (T_g), erime sıcaklıkları (T_m) ve yüzde kristalinite (X_c) değerlerini göstermektedir.

Tablo 4.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin DSC sonuçları

Numune Kodu	T_g (°C)	T_m (°C)	X_c (%) _{rel}
PLA	53,39	176,17	100
PLA_0.25BA	52,38	177,21	93,85
PLA_0.5BA	50,97	177,1	87,34
PLA_1BA	50,05	174,4	79,15
PLA_si0.25BA	53,0	177,21	86,6
PLA_si0.5BA	52,22	177,16	83,86
PLA_si1BA	51,55	176,08	78,63

PLA matrisine artan oranda silanlanmamış borik asit takviyesinde camsı geçiş sıcaklığı değerinin 1-2 °C düştüğü görülmektedir. Bu durum beklenen bir sonuçtur. Çünkü daha önceki analizlerde paylaşılan karakterizasyon test sonuçlarında da belirtildiği gibi, borik asit takviyeli PLA matrisli kompozit üretimi sürecinde, borik asit yapısındaki hidrofilik gruplar PLA ile reaksiyona girerek PLA'yı plastikleştirirler yani PLA zincirlerinin hareketliliğini artırarak viskozitesini düşürürler dolayısıyla camsı geçiş sıcaklığı da düşer. Bununla birlikte yüzeyi silanlanmamış borik asit içeren kompozitlerin erime sıcaklıkları incelendiğinde ise silanlanmamış borik asit ilavesinin erime sıcaklığında anlamlı bir değişim meydana getirmediği görülmektedir. Silanlanmamış borik asit takviyeli kompozitlerin yüzde kristalinite değerleri incelendiğinde artan borik asit miktarıyla % kristalinitenin büyük oranda düştüğü görülmektedir. % kristalinitede meydana gelen bu büyük düşüş yukarıda bahsedildiği gibi borik asit yapısındaki hidrofilik grupların PLA ile reaksiyona girerek PLA'yı plastikleştirmesinden ve kristalinitesini azaltmasından kaynaklanmaktadır.

PLA matrise artan ağırlık oranlarında silanlanmış borik asit ilavesiyle üretilen kompozitlerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), erime sıcaklığı (T_m) ve yüzde kristalinite (X_c) değerleri yine Tablo 4.2'den incelendiğinde görülmektedir ki camsı geçiş sıcaklığı silanlanmış borik asit içeren kompozitlerde azalmıştır. Bununla birlikte erime sıcaklığında herhangi bir değişiklik meydana gelmemiştir. Silanlanmış borik asit takviyeli kompozitlerin yüzde kristalinite değerleri incelendiğinde artan borik asit miktarıyla % kristalinitenin büyük oranda düştüğü görülmektedir. %

kristalinite de meydana gelen bu büyük düşüş yukarıda bahsedildiği gibi borik asit yapısındaki hidrofilik grupların PLA ile reaksiyona girerek PLA'yı plastikleştirmesinden ve kristalinitesini azaltmasından kaynaklanmaktadır.

4.7.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin DSC analizi sonuçları

PLA matrisine silanlanmamış/silanlanmış ağırlıkça %10 bazalt elyaf takviyesiyle üretilen kompozit malzemelerin diferansiyel taramalı kalorimetri analizi sonucunda elde edilen camsı geçiş sıcaklıkları (T_g), erime sıcaklıkları (T_m) ve yüzde kristalinite (X_c) değerleri Tablo 4.3'de verilmiştir

Tablo 4.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin DSC sonuçları

Numune Kodu	T_g (°C)	T_m (°C)	X_c (%) _{rel}
PLA	53,39	176,17	100
PLA_BF	53,49	175,95	103,11
PLA_siBF	56,4	176,05	101,43

Tablo 4.3 incelendiğinde PLA matrise silanlanmamış bazalt elyaf eklenmesiyle camsı geçiş sıcaklığında değişiklik olmadığı fakat silanlanmış bazalt elyaf ilavesiyle camsı geçiş sıcaklığının yaklaşık 3°C yükseldiği görülmektedir. Bilindiği gibi polimerik malzemelerin camsı geçiş sıcaklığı polimer zincirlerinin hareketlilikleriyle ilişkilidir ve zincirlerin sıkışması, gevşemesi ya da birbirleri arasında bağlar oluşturması camsı geçiş sıcaklığını etkiler (Das ve diğ., 2010). Tablo 4.3 bu bakış açısıyla incelendiğinde bazalt elyafın yüzeyinin silanlanması işlemi sonrasında bazalt elyaf ve PLA matris arasındaki ara yüzey etkileşiminin iyileştiği ve PLA zincirlerinin hareketliliklerinin bazalt lifleri tarafından kısıtlandığı böylece camsı geçiş sıcaklığının yükseldiği söylenebilir. Bununla birlikte PLA matrise silanlanmamış/silanlanmış ağırlıkça %10 oranında bazalt elyaf ilavesiyle üretilen kompozitlerin erime sıcaklığında herhangi bir değişiklik meydana gelmemiştir. Kompozitlerin % kristalinite değerleri incelendiğinde ise görülmektedir ki PLA matrise silanlanmamış bazalt elyaf ilavesiyle %3'lük kristal oluşumu artışı meydana gelmekte fakat bazalt elyafın silanlanmasıyla bu artış %1'e düşmektedir. Bilindiği gibi rijit elyaf takviyesi, polimerik matris içerisinde optimum miktarda bulunması halinde iki farklı şekilde davranabilir. Bu davranışların ilkinde, lifler yapı içerisinde homojen olarak dağılarak çekirdeklenme ajanı gibi davranırlar ve matrisin

kristallenmesini kolaylaştırırlar. Böylece % kristalinite değerinde artış meydana gelir (Karsli ve diğ., 2018). İkinci bir davranış şeklinde ise elyaf ve matris arayüzeyi iyi olduğu durumda lifler ile polimer matris arasındaki etkileşim yüksek olduğundan polimer zincirleri lifler tarafından engellenerek yeterince kristallenemezler. Dolayısıyla saf PLA'ya silanlanmamış bazalt elyaf ilavesiyle % kristalinitede meydana gelen artış silanlanmamış bazalt liflerinin PLA matrisin kristallenmesini kolaylaştırmasından kaynaklanmaktadır. Ancak silanlanmış bazalt elyaf kullanıldığı durumda aynı etkiye ulaşılamamasının sebebi ise silanlama ile artan lif-polimer etkileşimi sebebiyle PLA matrisin kristallenmesinin engellenmesidir. Zira bu sonuç camsı geçiş sıcaklığındaki artışın sebebi ile de örtüşmektedir.

4.7.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin DSC analizi sonuçları

Tablo 4.4, PLA matrisine bazalt elyaf ve pomza takviyesi sonucunda oluşturulan hibrit kompozitlerin diferansiyel taramalı kalorimetri analizi sonucunda elde edilen camsı geçiş sıcaklıkları (T_g), erime sıcaklıkları (T_m) ve yüzde kristalinite (X_c) değerlerini göstermektedir.

Tablo 4.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin DSC sonuçları

Numune Kodu	T_g (°C)	T_m (°C)	X_c (%) _{rel}
PLA	53,39	176,17	100
PLA_BF	53,49	175,95	103,11
PLA_siBF	56,4	176,05	101,43
PLA_BF_1P	53,91	176,82	107,43
PLA_BF_3P	54,6	177,85	100,29
PLA_BF_5P	54,07	177,68	99,913
PLA_BF_10P	53,83	175,98	99,731
PLA_BF_20P	53,71	175,55	95,805
PLA_siBF_si1P	52,1	177,53	99,5
PLA_siBF_si3P	51,31	175,97	101,36
PLA_siBF_si5P	51,64	175,78	99,5
PLA_siBF_si10P	51,9	175,48	97,81
PLA_siBF_si20P	51,98	176,76	94,81

Tablo 4.4 incelendiğinde silanlanmamış olarak yapıya eklenen bazalt elyaf ve pomza takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozitlerin camsı geçiş sıcaklıklarında saf PLA ve PLA_BF kompozitine kıyasla dikkat çeken bir değişim meydana gelmediği yine aynı şekilde erime sıcaklıklarında da değişimin önemli bir derecede olmadığı bulgusuna

varılmıştır. Aynı kompozitlere ait yüzde kristalinite değerleri incelendiğinde en yüksek değer %1 ağırlık oranında pomza partikülü içeren hibrit kompozitte olup bu artış oranı yaklaşık %7 olarak elde edilmiştir. Buradan matrise eklenen rijit partikül ve elyaf takviyesinin birlikte sinerjik etki yaratarak homojen dağılım sağlaması ve böylece kristaliniteyi arttırdığı yorumu kolaylıkla yapılabilmektedir (Karatas ve diğ., 2019). Yapı içerisinde artan pomza miktarıyla kristalinite meydana gelen düşüş ise miktarı artan partiküllerin topaklanma eğilimine girmesinden ve elyaf ve partikül arasındaki sinerjik etkinin bu eğilimi önlemede yetersiz kalmasından, böylece oluşan bu topakların kristallenmeyi olumsuz etkilemesinden kaynaklandığı söylenebilir. Yine Tablo 4.4'den silanlı bazalt elyaf ve silanlı pomza takviyesi sonucunda oluşturulan hibrit kompozitlerin camsı geçiş sıcaklıkları değerleri incelendiğinde yaklaşık 2 °C düşüş meydana gelmiştir. Bu durumun sebebi hem bazalt elyaf hem de pomza yüzeyindeki silan moleküllerinin PLA üzerinde plastikleştirici etki yaratması olarak açıklanabilir. Bu kompozitlere ait % kristalinite değerleri incelendiğinde ise ağırlıkça %3 oranında pomza içeren hibrit kompozitin en yüksek % kristalinite değerini sergilediği bununla birlikte yapı içinde artan pomza miktarıyla kristalinitenin düştüğü görülmektedir. Bu düşüşün sebebi de hem yapıda artan silan miktarı hem de pomzanın artan miktarıyla topaklanma eğilimidir.

4.7.5 Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin DSC analizi sonuçları

PLA matrisine bazalt elyaf ve borik asit takviyesiyle üretilen hibrit kompozit malzemelerin diferansiyel taramalı kalorimetri analizi sonucunda elde edilen camsı geçiş sıcaklıkları (T_g), erime sıcaklıkları (T_m) ve yüzde kristalinite (X_c) değerleri Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin DSC sonuçları

Numune Kodu	T_g (°C)	T_m (°C)	X_c (%) _{rel}
PLA	53,39	176,17	100
PLA_BF	53,49	175,95	103,11
PLA_siBF	56,4	176,05	101,43
PLA_BF_0.25BA	57,45	177,72	95,05
PLA_BF_0.5BA	56,65	176,25	91,45
PLA_BF_1BA	56,0	176,06	84,46
PLA_siBF_si0.25BA	57,94	177,69	92,62
PLA_siBF_si0.5BA	56,73	175,22	88,30
PLA_siBF_si1BA	55,7	174,71	81,10

Tablo 4.5 incelendiğinde silanlanmamış borik asit takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozitlerde camsı geçiş sıcaklığının tüm ağırlık oranlı için arttığı en yüksek değer yaklaşık 4°C artışla ağırlıkça %0,25 silanlanmamış borik asit içeren kompozitte elde edildiği görülmektedir. Saf PLA'ya sadece borik asit ilavesinin camsı geçiş sıcaklığında düşüşe sebep olduğu hatırlanırsa (Tablo 4.2) hibrit kompozitlerde elde edilen bu artış borik asit ve bazalt elyafın eş zamanlı kullanıldıkları durumda ortaya çıkan sinerjik etkinin bir sonucudur denebilir. Öyle ki bazalt elyaf ve borik asidin hibrit kullanımında, borik asitte bulunan hidrofilik gruplar sadece PLA ile değil bazalt elyaf ile de reaksiyona girerler. Böylece aralarında reaksiyon gerçekleşen bu takviye malzemeleri yapı içerisinde bir bütün gibi davranarak PLA zincirlerinin hareketliliğini engellerler diyebiliriz. Bununla birlikte erime sıcaklıkları incelendiğinde ise yine tüm ağırlık oranları için dikkat çeken bir değişim gözlemlenmemiştir. Yüzde kristalinite oranları bakıldığında silanlanmamış borik asit içeren kompozitlerin saf PLA matrisine göre artan ağırlık oranında azalma eğiliminde olduğu bulgusuna varılmıştır. Bunun sebebi olarak tıpkı Tablo 4.2'de olduğu gibi borik asidin bozunma sıcaklığının düşük olup yapıda homojen dağılım sağlasa bile matris malzemesinin yapısını bozarak kristal oluşumunu azaltması şeklinde söylenebilir.

Yine Tablo 4.5'den silanlanmış bazalt elyaf ve borik asit ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin erime sıcaklıklarının değişmediği, camsı geçiş sıcaklıklarının ise arttığı görülmektedir. Öyle ki en yüksek camsı geçiş sıcaklığı saf PLA ile karşılaştırıldığında yaklaşık 4°C artışla ağırlıkça %0,25 oranında silanlanmış borik asit içeren kompozitte gözlemlenmiştir. Hibrit kompozitlerin camsı geçiş sıcaklıklarında gözlemlenen bu artışın sebebi yukarıda da değinildiği gibi bazalt elyaf ve borik asit arasındaki sinerjik etkinin PLA matrisin zincir hareketliliğini kısıtlamasıdır. Aynı kompozitlere ait % kristalinite değerleri incelendiğinde ise tüm hibrit kompozitlerde % kristalinitenin düştüğü görülmektedir. Bu durumun sebebi daha önce de açıklandığı gibi borik asidin hidrofilik gruplarının PLA ile reaksiyona girmesi ve PLA'nın kristallenmesini engellemesidir.

4.8. Termogravimetrik Analiz (TGA) Sonuçları

4.8.1. Pomza takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları

PLA matrisine yüzey modifikasyonu uygulanmış/uygulanmamış pomza takviyesiyle oluşturulan kompozit malzemelerin %5 ve %10 ağırlık kaybına uğradığı sıcaklıklar Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Pomza takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları

Numune Kodu	T _{%5} (°C)	T _{%10} (°C)
PLA	312,71	324,93
PLA_1P	317,34	329,76
PLA_3P	319,99	331,83
PLA_5P	317,69	329,27
PLA_10P	315,67	327,72
PLA_20P	313,65	324,01
PLA_si1P	306,27	320,66
PLA_si3P	301,88	316,55
PLA_si5P	297,09	311,66
PLA_si10P	295,04	307,69
PLA_si20P	293,65	305,68

Tablo 4.6 incelendiğinde PLA’ya silanlanmamış pomza ilavesiyle birlikte bozunma sıcaklıklarının (T_{%5} ve T_{%10}) önce arttığı ancak yapı içerisinde artan pomza miktarıyla birlikte azalmaya başladığı görülmektedir. Düşük miktarlarda pomza ilavesiyle ısıl bozunma sıcaklığında meydana gelen artış pomzanın volkanik esaslı bir dolgu malzemesi olmasına, gözenekli yapısı sebebiyle yüzey alanının yüksek olmasına ve kimyasal bileşimi sebebiyle ısı tutma kapasitesinin iyi olmasına bağlıdır. Dolayısıyla PLA’ya düşük yükleme miktarlarında pomza ilavesiyle pomza partikülleri yapı içerisinde daha homojen olarak dağılırlar ve polimer matris üzerine uygulanan ısı enerjisinin bir kısmını absorblayarak PLA’nın ısıl bozunma sıcaklığının artmasına olanak sağlarlar. Ancak yapı içerisine eklenen pomza miktarı arttıkça pomza partikülleri homojen olarak dağılamayarak aglomera olmaya (topaklanmaya) başlarlar. Dolayısıyla PLA matrisine uygulanan ısı enerjisinin bir kısmı yapı içerisinde pomza partikülleri tarafından homojen olarak absorblanamayacağından PLA’nın ısıl bozunma sıcaklığında bir artış elde edilemez.

PLA'ya silanlanmış pomza ilavesiyle ve silanlanmış pomzanın yapı içerisinde artan miktarıyla birlikte bozunma sıcaklıklarının ($T_{\%5}$ ve $T_{\%10}$) düştüğü görülmektedir. Bu durumun sebebi pomza yüzeyine uygulanan silanın düşük bozunma sıcaklığına sahip bir kimyasal olması ve bu sebeple içinde bulunduğu kompozitlerin ısı bozunma sıcaklıklarının düşmesine sebep olmasıdır.

4.8.2. Borik asit takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları

Tablo 4.7 incelendiğinde PLA matrisine yüzey modifikasyonu uygulanmış ve uygulanmamış borik asit takviyesiyle oluşturulan kompozit malzemenin ağırlığının %5'ini ve %10'unu kaybettiği sıcaklıklar verilmiştir.

Tablo 4.7. Borik asit takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları

Numune Kodu	$T_{\%5}$ (°C)	$T_{\%10}$ (°C)
PLA	312,71	324,93
PLA_0.25BA	307,59	323,87
PLA_0.5BA	294,88	312,78
PLA_1BA	279,23	298,92
PLA_si0.25BA	307,44	323,51
PLA_si0.5BA	292,72	307,31
PLA_si1BA	283,23	298,92

Sonuçlar değerlendirildiğinde hem silanlanmamış hem de silanlanmış kompozitlerde artan borik asit oranıyla ağırlık kaybının yaşandığı sıcaklığın düştüğü gözlemlenmiştir. Borik asidin düşük bozunma sıcaklığına sahip bir malzeme olduğu bilinmektedir ve polimer esaslı malzemelere eklendiğinde bozunma sıcaklığını düşürdüğü yapılan çalışmalarda da ortaya çıkartılmıştır (Polat ve Kaynak, 2016; Cavdar ve diğ., 2015). Aynı ağırlık oranına sahip silanlanmış ve silanlanmamış borik asit takviyeli kompozitler karşılaştırıldığında silanlı kompozitlerin bozunma sıcaklığının daha düşük olduğu bulgusuna varılmıştır. Bunun sebebi partikül yüzeylerindeki silanın bozunma sıcaklığının hem polimerden hem de borik asitten düşük olması ve böylece termogravimetrik analiz sırasında partikül yüzeyinden ayrılıp yapıda plastikleştirici etki yaratarak kompozitin bozunma sıcaklığını daha fazla düşürmesi olarak söylenebilir.

4.8.3. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları

PLA matrisine silanlanmış ve silanlanmamış bazalt elyaf takviye edildiğinde %5 ve %10 ağırlık kaybının gerçekleştiği sıcaklık değerleri Tablo 4.8’ de verilmiştir.

Tablo 4.8. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin TGA sonuçları

Numune Kodu	T _{%5} (°C)	T _{%10} (°C)
PLA	312,71	324,93
PLA_BF	316,69	329,54
PLA_siBF	310,82	324,24

Ağırlıkça %10 silanlanmamış bazalt elyaf takviye edildiğinde oluşturulan kompozitin, %5 ağırlık kaybına uğradığı sıcaklık değerini yaklaşık 4 °C arttığı bulgusu elde edilmiştir.

Bazalt elyaf yapısında %45 ila %52 arasında SiO₂ içeren, volkanik oluşumlardan elde edilen yapıya sahip bir malzemedir. Bu özellikleri sayesinde yapılan çalışmalar polimer malzemelerden daha rijit bir yapıya ve ısı emme kapasitesine sahip olan volkanik esaslı bazalt elyafın takviyesiyle, yapının yüksek sıcaklıklarda daha kararlı bir halde kalmasını sağladığı yönünde sonuçlar içermektedir (Lee ve diğ., 2017). Bu da yapıya takviye edilen bazalt elyafı ile birlikte kompozite yüksek ısıl kararlılık özelliği getirmiştir.

Bazalt elyafa silanlama işlemi uygulandığında oluşturulan kompozit malzemenin %5 ağırlık kaybına uğradığı sıcaklığın silanlanmamış bazalt elyafa kıyasla bir miktar düştüğü görülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, benzer şekilde, bazalt elyafa 3-aminopropiltriethoxysilane (APS) ile silanlama işlemi uygulandığında termogravimetrik analiz sonucunda malzemenin bozulmaya uğradığı sıcaklık değerinin silan bileşiği sebebiyle daha da düştüğü bilgisine ulaşılmıştır (Lee ve diğ., 2017).

4.8.4. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin TGA sonuçları

Pomza ve bazalt elyaf ile oluşturulan hibrit kompozit malzemeler Tablo 4.9’ dan incelendiğinde, düşük ağırlık oranlarında pomza içeren hibrit kompozitlerin ısıl

bozunma sıcaklıklarının ($T_{\%5}$ ve $T_{\%10}$) önce arttığı ancak yapı içerisinde artan pomza miktarıyla birlikte azalmaya başladığı görülmektedir.

Tablo 4.9. Pomza ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin TGA sonuçları

Numune Kodu	$T_{\%5}$ (°C)	$T_{\%10}$ (°C)
PLA	312,71	324,93
PLA_BF	316,69	329,54
PLA_siBF	310,82	324,24
PLA_BF_1P	317,48	329,96
PLA_BF_3P	314,25	327,17
PLA_BF_5P	310,68	322,15
PLA_BF_10P	299,39	310,85
PLA_BF_20P	298,29	309,05
PLA_siBF_si1P	307,16	320,71
PLA_siBF_si3P	308,76	323,23
PLA_siBF_si5P	298,58	312,15
PLA_siBF_si10P	289,6	301,04
PLA_siBF_si20P	285,34	296,91

Düşük miktarlarda pomza ilavesiyle ısıl bozunma sıcaklığında meydana gelen artış daha önce de bahsedildiği gibi pomzanın volkanik esaslı bir dolgu malzemesi olmasına, gözenekli yapısı sebebiyle yüzey alanının yüksek olmasına ve kimyasal bileşimi sebebiyle ısı tutma kapasitesinin iyi olmasına bağlıdır. Dolayısıyla düşük yükleme miktarlarında pomza ilavesiyle hibrit etkinin de yardımıyla pomza partikülleri yapı içerisinde daha homojen olarak dağılırlar ve polimer matris üzerine uygulanan ısı enerjisinin bir kısmını absorblayarak PLA'nın ısıl bozunma sıcaklığının artmasına olanak sağlarlar. Ancak yapı içerisine eklenen pomza miktarı arttıkça pomza partikülleri homojen olarak dağılamayarak aglomera olmaya (topaklanmaya) başlarlar. Dolayısıyla PLA matrise uygulanan ısı enerjisinin bir kısmı yapı içerisinde pomza partikülleri tarafından homojen olarak absorblanamayacağından PLA'nın ısıl bozunma sıcaklığında bir artış elde edilemez hatta ısının yapı içerisinde düzensiz birikmesine sebep olacağından ısıl bozunma sıcaklığı düşer.

PLA'ya silanlanmış pomza ve bazalt elyaf ilavesiyle ve silanlanmış pomzanın yapı içerisinde artan miktarıyla birlikte bozunma sıcaklıklarının ($T_{\%5}$ ve $T_{\%10}$) düştüğü görülmektedir. Bu durumun sebebi daha önce de bahsedildiği gibi pomza ve bazalt

elyaf yüzeyine uygulanan silanın düşük bozunma sıcaklığına sahip bir kimyasal olması ve bu sebeple içinde bulunduğu kompozitlerin ısıl bozunma sıcaklıklarının düşmesine sebep olmasındır.

4.8.5. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin TGA sonuçları

Tablo 4.10 incelendiğinde silanlı/silansız borik asit ve bazalt elyaf ile oluşturulan hibrit kompozitlerin %5 ve %10 ağırlık kaybına uğradığı sıcaklıklar görülmektedir.

Tablo 4.10. Borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozitlerin TGA sonuçları

Numune Kodu	T _{%5} (°C)	T _{%10} (°C)
PLA	312,71	324,93
PLA_BF	316,69	329,54
PLA_siBF	310,82	324,24
PLA_BF_0.25BA	299,94	314,2
PLA_BF_0.5BA	297,17	312,04
PLA_BF_1BA	282,11	302,48
PLA_siBF_si0.25BA	299,02	311,95
PLA_siBF_si0.5BA	293,4	307,42
PLA_siBF_si1BA	281,95	299,9

Tıpkı sadece borik asit takviyesi içeren kompozitlerde olduğu gibi, benzer mekanizma sebebiyle, bazalt elyafın etkisi net bir şekilde görülememiş ve oluşturulan hibrit kompozitlerde de artan borik asit oranıyla malzemenin ağırlık kaybına uğradığı sıcaklık değerinde azalma olduğu sonucu elde edilmiştir. Tüm bileşimler için aynı ağırlık oranına sahip silanlı ve silansız kompozit malzemeler karşılaştırıldığında elyaf ve partikülün silanlanması malzemenin bozulma sıcaklığını daha da düşürdüğü bulgusuna varılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışması kapsamında PLA matrisinin mekanik, termal, termomekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek adına bazalt elyaf, pomza ve borik asit katkılarına yüzey modifikasyonu işlemi uygulanarak ya da uygulanmadan polimer içerisine takviye edilmiş ve yapılan deneysel çalışmalar sonrasında sonuçlar değerlendirilmiştir. İlk olarak partikül ve elyaf yüzeylerine silanlanlama işlemi için ayrı ayrı çeşitli prosesler uygulanmış ve optimum sonucu veren proses tez çalışması boyunca kullanılmıştır. Daha sonra pomza ve borik asit farklı ağırlık oranlarında, bazalt elyaf ise ağırlıkça %10 olacak şekilde önce ayrı ayrı, daha sonrasında ise pomza-bazalt elyaf ve borik asit-bazalt elyaf olacak şekilde hibrit kompozitler elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır.

Pomza partikülüne uygulanan silanlama prosesleri sonrasında yapılan FTIR analizi sonuçları değerlendirildiğinde, değişen miktarlarda silan bileşiği içeren çözeltiler arasından en uygun sonucu 3 ml silan bileşiği olan çözeltide yüzey modifikasyonu işlemi uygulanmış pomza partikülü göstermiştir. Borik asidin suda çözünmesinden dolayı farklı silanlama yöntemi çözelti karıştırılmadan uygulanmış ve FTIR analizi sonucunda optimum değerlerin elde edildiği 1 ml silan bileşiği içeren çözeltide yüzey modifikasyonu uygulanmış prosese karar verilmiştir. Bazalt elyafa uygulanan silanlama prosesleri incelendiğinde FTIR analizi sonuçları değerlendirilmiş ve 1 ml silan bileşiği bulunan prosesin optimum sonuçları verdiği bulgusu elde edilmiştir. Böylece silanlama parametreleri belirlenmiş ve tez çalışması kapsamında uygulanmıştır.

Dinamik mekanik analiz sonuçları değerlendirildiğinde PLA matrisine silanlanmamış pomza takviyesiyle birlikte ağırlıkça %1, 3, 5 ve 10 oranlarındaki kompozitlerin birbirine yakın depo modül değerlerine sahip olduğu bulgusu elde edilmiştir. Fakat pomza oranının %20'a çıkmasıyla birlikte depo modül değeri büyük bir artışla en yüksek depo modülü değerine ulaşmıştır. Bununla birlikte silanlama işlemi sonrasında yapıya pomza eklenmesiyle benzer bir şekilde %1, 3, 5

oranlarındaki kompozitlerin birbirine yakın depo modül değerlerinde olduğu, pomza oranının %10'a çıkmasıyla birlikte depo modül değerinin artmaya başladığı ve en yüksek depo modülünün ise %20 silanlanmış pomza içeren kompozite ait olduğu görülmüştür. Aynı ağırlık oranına sahip silanlanmamış/silanlanmış pomza takviyeli kompozitler değerlendirildiğinde, depo modülü değişmemekle birlikte silanlanmış pomza takviyesinin camsı geçiş sıcaklığını bir miktar düşürdüğü tespit edilmiştir. Silanlanmamış borik asit takviyesiyle depo modül değerinin değişmediği, borik asidin silanlanmasıyla yine neredeyse yakın depo modülü sonuçları elde edilmiş en iyi depolama modülü değerine ise ağırlıkça %1 silanlanmış borik asit içeren kompozitte ulaşılmıştır. Silanlanmamış/silanlanmış bazalt elyafa uygulanan DMA sonucunda her iki durumda da depo modül değeri artmış fakat silanlama sonucunda daha yüksek depo modülü elde edilmiştir. Bununla birlikte bazalt elyaf ve pomza içeren hibrit kompozitlerin sonuçları ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında silanlanmamış pomza içeren kompozitlerin depo modül değerlerinde, sadece silanlanmamış bazalt elyaf içeren kompozitle aynı olduğu, silanlanmamış pomza miktarının %10 ve 20 oranlarına çıkması ile depo modülü değerinde artış meydana gelmekte ve sonuç olarak ağırlıkça %20 oranında silanlanmamış pomza içeren hibrit kompozitin en yüksek depo modülü değerini verdiğini göstermiştir. Silanlama işleminde sonra ağırlıkça %1 ve 3 oranlarında silanlanmış pomza içeren kompozitlerin depo modül değerlerinde, sadece silanlanmış bazalt elyaf içeren kompozitle karşılaştırıldığında azalma meydana geldiği, silanlanmış pomza miktarının ağırlıkça %5 ve 10 oranlarına çıkması ile depo modülü değeri artarak %20 oranında silanlanmış pomza içeren hibrit kompozitin en yüksek depo modülü değerini verdiğini göstermiştir. Bazalt elyaf ve borik asit içeren hibrit kompozitlerin sonuçları, %0,25 oranında borik asit içeren hibrit kompozitin ait depo modülü değerinin sadece bazalt elyaf içeren kompozitin depo modülü değerinden düşük olduğunu ve borik asidin artan ağırlık oranıyla birlikte hibrit kompozitlerin depo modülü değerleri de artmakta olduğunu ancak yine de %1 oranında borik asit ilavesiyle sadece bazalt elyaf içeren kompozitin depo modülü değerine ulaşılabilirdiğini göstermiştir. Silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış borik asit takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozitlerde ise depo modül değerleri birbirine çok yakın olmakla birlikte silanlanmış borik asidin yapıya katılması modül değerinin en iyi sonucu küçük bir farkla %1 silanlanmış borik asit içeren hibrit kompozitin verdiği sonucu elde edilmiştir.

Kompozitlere uygulanan termomekanik analiz sonuçlarına göre PLA matrisine artan ağırlık oranında pomza eklenmesiyle birlikte boyut değişiminin azaldığı bulgusu elde edilmiştir. Silanlanmamış/silanlanmış kompozitler karşılaştırıldığında silanlama işlemi sonrasında boyut değişim miktarının azaldığı gözlemlenmiştir ve en düşük boyut değişim değerine ağırlıkça %20 silanlı pomza içeren kompozitte ulaşılmıştır. Borik asit takviyesiyle elde edilen kompozitler incelendiğinde tüm ağırlık oranları için boyut değişim miktarları arasında büyük bir fark olmadığı fakat artan borik asit oranıyla boyut değişim miktarının arttığı sonucu elde edilmiş ve en düşük boyut değişim oranı ağırlıkça %0,25 silanlanmış borik asit içeren kompozitte elde edilmiştir. PLA matrisine bazalt elyaf eklenmesiyle benzer şekilde boyut değişimi azalmış ve silanlama işlemi sonrasında boyut değişimi neredeyse görülmemiştir. Bazalt elyaf ve pomza takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozitlerin artan pomza oranıyla boyut değişimlerinin azaldığı ve en düşük boyut değişim miktarının ağırlıkça %20 silanlanmış pomza içeren hibrit kompozitte olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte bazalt elyaf ve borik asit içeren kompozitlerin analiz sonuçları birbirine yakın olmakla beraber en düşük boyut değişimini ağırlıkça %0,25 silanlanmış borik asit takviye edilmiş hibrit kompozit göstermiştir.

Kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek üzere çekme testi uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre PLA matrisine pomza takviyesiyle birlikte çekme dayanımında tüm ağırlık oranları için düşüş meydana gelmiştir. Bununla birlikte silanlama işlemi sonrasında %1 takviyesiyle çekme dayanımında artış elde edilmiş, pomza oranı %3'e çıkarıldığında saf PLA matrisine göre yine artış meydana gelmiş fakat bu artış oranı %1'de olduğu kadar dikkat çeken miktarda olmamıştır. Ayrıca silanlanmış pomza oranının artmasıyla birlikte oluşturulan kompozitlerin çekme dayanımında ciddi miktarda bir düşüş elde edilmiştir. Yapıya borik asidin takviyesiyle oluşturulan kompozitlerin çekme dayanımı dikkat çeken miktarda düşmüştür ve silanlanmış borik asit takviyesiyle birlikte sadece ağırlıkça %0,25 oranında PLA matrisine yakın bir çekme dayanımı elde edilmiş olup ağırlıkça artan silanlı borik asit miktarıyla çekme dayanımı büyük orada azalmıştır. Bazalt elyaf eklenmesiyle PLA'nın çekme dayanımının etkilememiş fakat bazalt elyafın silanlanmasıyla birlikte çekme dayanımı artış göstermiştir. Pomza ve bazalt elyaf takviyesiyle birlikte artan pomza oranıyla çekme dayanım değerinin düştüğü bulgusuna varılmıştır. Fakat silanlanmış pomza ve

silanlanmış bazalt elyaf takviyesiyle elde edilen hibrit kompozitlerin sonuçları incelendiğinde ağırlıkça %1 pomza takviyesiyle çekme dayanımı artış eğilimine geçip %3 içeren hibrit kompozitin en yüksek çekme dayanımı değerini göstererek tekrar azalmaya başladığı tespit edilmiştir. Borik asit ve bazalt elyaf takviyesiyle hazırlanan kompozitlerde artan borik asit oranıyla çekme dayanımı büyük oranda düşmüştür. Bazalt elyaf ve borik asit yüzey modifikasyonundan sonra yapıya katıldığında artan borik asit miktarıyla silanlanarak elde edilen hibrit kompozitlerde ise en iyi sonucu ağırlıkça %0,25 borik asit içeren hibrit kompozit vermiş olup artan silanlanmış borik asit oranıyla çekme dayanım değeri saf PLA'nın gerisinde kalmıştır.

Aşınma testi sonuçları incelendiğinde PLA matrisine silanlanmamış/silanlanmış pomza takviyesiyle birlikte ağırlıkça %1, 3, 5 oranları için saf PLA matrisine kıyasla ortalama sürtünme katsayısı ve ortalama aşınma oranlarında bir miktar iyileşme görülmekle birlikte takviye oranı %10'a çıkarıldığında iyileşme miktarı artmış olup ağırlıkça %20 silanlanmış pomza içeren kompozit malzeme en düşük ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı elde edilmiştir. Ayrıca yüzey modifikasyonu işleminin tüm ağırlık oranları için aşınma özelliklerini geliştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Silanlanmamış/silanlanmış borik asit takviyesiyle birlikte ortalama sürtünme katsayısı ve ortalama aşınma oranı değerlerinde büyük farklar olmamakla birlikte tüm ağırlık oranları için saf PLA matrisine göre iyileşme sağlanmış ve en iyi sonuçlar ağırlıkça %1 silanlanmış borik asit içeren kompozitte elde edilmiştir. Fakat takviye oranının düşük olmasından dolayı silanlama işleminin etkisi net bir biçimde görülemedi. PLA matrisine bazalt elyaf eklenmesiyle ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarında iyileşme sağlanmış olup bazalt elyafa yüzey modifikasyonu yapılmasıyla birlikte bu iyileşme daha da artmıştır. Silanlanmış bazalt elyaf ve silanlanmış pomza takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozitler değerlendirildiğinde artan pomza miktarıyla birlikte ortalama sürtünme katsayısı ve ortalama aşınma oranı değerleri dikkat çeken miktarda düşürülmüş ve en iyi sonucu ağırlıkça %20 silanlanmış pomza içeren hibrit kompozit vermiştir. Bununla birlikte borik asit ve bazalt elyafın birlikte takviyesiyle elde edilen hibrit kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı ve ortalama aşınma oranları, artan borik asit miktarıyla

azaldığı ve en iyi değerlerin ağırlıkça %1 silanlanmış borik asit ve bazalt elyaf içeren hibrit kompozite elde edildiği bulgusuna varılmıştır.

Tez çalışması kapsamında oluşturulan kompozitlere 6 farklı sıcaklıkta yapılan boyutsal kararlılık analizi sonuçları incelendiğinde PLA matrisine artan ağırlık oranında silanlanmamış/silanlanmış pomza eklenmesiyle birlikte kompozit malzemenin boyutsal kararlılığının dikkat çeken bir miktarda arttığı en iyi boyutsal kararlılığın ise tüm sıcaklık değerleri için ağırlıkça %20 silanlanmış pomza içeren kompozitte elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca tüm sıcaklık değerlerindeki test sonuçları silanlanmış partikül takviyeli kompozitlerin daha kararlı bir yapı oluşturduğunu göstermiştir. Silanlanmamış/silanlanmış borik asit takviyesiyle birlikte artan borik asit oranıyla benzer bir şekilde boyutsal kararlılık özelliğinin iyileştiği ve en iyi boyutsal kararlılık değerinin ağırlıkça %1 silanlanmış borik asit içeren kompozitte olduğu bulgusuna varılmıştır. Yapıya bazalt elyaf takviyesiyle boyutsal kararlılıkta iyileşme sağlanmış, silanlama işlemi sonrasında bu iyileşme bir miktar daha artmıştır. Pomza ve bazalt elyafın birlikte takviyesiyle elde edilen hibrit kompozitler incelendiğinde artan pomza oranıyla birlikte malzemenin boyutsal kararlılığının iyileştiği ve en iyi boyutsal kararlılığın ağırlıkça %20 silanlanmış pomza içeren hibrit kompozitte elde edildiği görülmüştür. Bununla birlikte bazalt elyaf ve borik asit içeren kompozitler incelendiğinde aynı şekilde artan borik asit oranıyla birlikte kompozitlerin boyut değişim oranının azaldığı ve en iyi kararlılığın ağırlıkça %1 silanlanmış borik asit içeren hibrit kompozitte olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Diferansiyel taramalı kalorimetri analizi sonuçlarına göre PLA matrisi içerisine pomza takviyesiyle birlikte oluşturulan kompozitlerin tüm ağırlık oranları için camsı geçiş sıcaklıklarında ve erime sıcaklıklarında dikkat çeken bir değişim görülmemiştir. Bu kompozitlere ait yüzde kristalinite değişimleri incelendiğinde sadece ağırlıkça %1 ve 3 pomza içeren kompozitlerin kristalinite değişimlerinde artış gözlemlendiği diğer ağırlık oranlarında ise saf PLA matrisine kıyasla fark olmadığı bulgusu elde edilmiştir. Silanlama işlemi sonrasında benzer şekilde %3 ve 5 oranlı kompozitlerde artış görüldüğü fakat diğer oranlarında saf PLA matrisinin altında kaldığı bulgusu elde edilmiştir. Silanlanmamış/silanlanmış borik asit takviyeli kompozitler incelendiğinde camsı geçiş sıcaklığı değerinin artan ağırlık oranında

azaldığı, erime sıcaklığı değerinin değişmediği ve artan borik asit miktarıyla yüzde kristalinite değerinin dikkat çeken miktarda düştüğü gözlemlenmiştir. Bazalt elyaf takviyesiyle birlikte camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığının değişmediği kristalinitenin ise bir miktar arttığı, bazalt elyafın silanlanmasıyla camsı geçiş sıcaklığının bir miktar arttığı fakat kristalinitenin saf PLA'ya kıyasla artmasına rağmen yine de silanlanmamış bazalt elyaftan düşük olduğu bulgusu elde edilmiştir. Pomza ve bazalt elyaf takviyesiyle elde edilen kompozitlerin tüm ağırlık oranları için camsı geçiş sıcaklıklarında sadece silanlanmış olanların çok önemli olmamakla birlikte bir miktar düşüş olduğu, erime sıcaklık değerlerinin dikkat çeken bir değişim göstermediği, silanlanmamış kompozitlerde sadece %1 pomza içeren ve sadece ağırlıkça %3 silanlanmış pomza içeren hibrit kompozitin saf PLA matrisine kıyasla yüzde kristalinite değerinde artış sağlandığı bulgusuna varılmıştır. Borik asit ve bazalt elyaf takviyesiyle elde edilen hibrit kompozitlerde tüm ağırlık oranları için cam geçiş sıcaklığının arttırıldığı ve en yüksek camsı geçiş sıcaklığı değerinin ağırlıkça %0,25 borik asit içeren kompozitte elde edildiği sonucuna varılmıştır. Erime sıcaklığı değerlerine bakıldığından dikkat çeken bir değişiklik gözlemlenmemiş olup ağırlıkça artan silanlanmamış/silanlanmış borik asit miktarıyla tüm ağırlık oranları için yüzde kristalinite değerinde dikkat çeken bir düşüş yaşanmıştır.

Termogravimetrik analiz sonuçları değerlendirildiğinde yapıya silanlanmamış pomza takviyesiyle tüm ağırlık oranları için bozunma sıcaklığı değeri arttırılmış en çok artış %3 pomza takviyeli kompozitte gözlemlenmiştir. Fakat pomza partikülünün silanlanmasıyla ve artan silanlanmış pomza miktarıyla birlikte malzemenin %5 ağırlık kaybına uğradığı sıcaklık değerinde ciddi miktarda düşüş gözlemlenmiştir. En az düşüşün yaşandığı oran ise ağırlıkça %1 silanlanmış pomza içeren kompozit olmuştur. Silanlanmamış/silanlanmış borik asit takviyeli kompozitler incelendiğinde artan borik asit miktarıyla benzer bir karakteristikle malzemenin %5 ağırlık kaybına uğradığı sıcaklık değeri bariz bir şekilde düşmüş en az düşüş ise ağırlıkça %0,25 borik asit içeren kompozitlerde gerçekleşmiştir. Bazalt elyaf takviyesiyle bozunma sıcaklığı değeri arttırılmış fakat bazalt elyafın silanlanmasıyla kompozitin %5 ağırlık kaybına uğradığı sıcaklık değeri bir miktar düşmüştür. Bazalt elyaf ve pomza takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozitler incelendiğinde %1 ve 3 pomza içeren

kompozitlerde artmaya başlamış, artan ağırlık oranında tekrar düşüşe geçmiştir. Ancak silanlama işlemi sonrasında artan pomza oranıyla malzemenin ağırlık kaybına uğradığı sıcaklık değeri büyük ölçüde düşmüştür fakat en az düşüş ağırlıkça %1 ve ona çok yakın %3 silanlanmış pomza içeren hibrit kompozitte elde edilmiştir. Borik asit ve bazalt elyaf takviyesiyle elde edilen hibrit kompozitler değerlendirildiğinde artan borik asit miktarıyla bozunma sıcaklığının büyük oranda düştüğü en az düşüşün ise ağırlıkça %0,25 silanlanmamış/silanlanmış borik asit içeren hibrit kompozitte olduğu bulgusuna varılmıştır.

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, PLA matrisine pomza, borik asit ve bazalt elyaf katkısının genel olarak daha üstün özelliklere sahip bir kompozit malzemeler oluşturduğu, silanlama işleminin hem pomza hem borik asit hem de bazalt elyafa uygulanması halinde oluşturulan kompozit malzemelerde mekanik, boyutsal kararlılık ve tribolojik özelliklerinde dikkat çeken gelişmeler elde edildiği ve bununla birlikte yüzey modifikasyonun termal özelliklerin gelişmesine beklendiği kadar katkı sağlamadığı söylenebilir.

Tez çalışması kapsamında elde edilen tecrübelerden ve bilgi birikimlerinden yararlanarak gelecekte olası bir çalışmada şu öneriler göz önünde bulundurulabilir:

- 1- Borlu bileşik olarak yağlayıcılığı daha yüksek olan ve daha yüksek ağırlık oranlarında ekstrüzyonla karıştırma ve enjeksiyonla kalıplama işlemiyle üretilebilen hegzagonal bor nitrür partikülü kullanılabilir.
- 2- Takviye malzemelerine yapılan yüzey modifikasyonuna ek olarak oluşturulan kompozitlere matris modifikasyonu işlemi uygulanabilir.
- 3- Tez çalışması kapsamında malzemelere kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmıştı, yeni yapılacak çalışmada takviye elemanlarına fiziksel yüzey modifikasyonu uygulanarak etkileri araştırılabilir.
- 4- Kompozitlere yapılan karakterizasyon işlemleri farklı parametrelerde uygulanabilir.

KAYNAKLAR

Abdullah S. A., Iqbal A., Frommann L., Melt Mixing of Carbon Fibers and Carbon Nanotubes Incorporated Polyurethanes, *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, **110**(1), 196–202.

Arslan C., Dogan M., The Effects of Silane Coupling Agents on The Mechanical Properties of Basalt fiber Reinforced Poly(Butylene Terephthalate) Composites, *Composites Part B*, 2018, **146**, 145-154.

ASTM G99-05, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

Avcu E., Coban O., Bora M. Ö., Fidan S., Sinmazcelik T., Ersoy O., Possible Use of Volcanic Ash as a Filler in Polyphenylene Sulfide Composites: Thermal, Mechanical, and Erosive Wear Properties, *Polymer Composites*, 2014, **35**, 1826-1833.

Barbero E. J., *Introduction to Composite Materials*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, 2018.

Bideci Ö. S., Bideci A., Gültekin A. H., Oymael S., Yıldırım H., Polymer Coated Pumice Aggregates and Their Properties, *Composites Part B*, 2014, **67**, 239-243.

Bikiaris D., Microstructure and Properties of Polypropylene/Carbon Nanotube Nanocomposites, *Materials*, 2010, **3**(4), 2884-2946.

Biron M., *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*, 1st ed, William Andrew, Waltham, 2013.

Botta L., Fiore V., Scalici T., Valenza A., Scaffaro R., New Polylactic Acid Composites Reinforced with Artichoke Fibers, *Materials*, **8**(11), 2015, 7770-7779.

Boyacıoğlu S., Plastikleştirilmiş Poli(Laktik Asit)/Termoplastik Poliüretan Karışımlarının Mekanik, Termal Özellikleri ve Şekil Hafıza Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2017, 474089.

Burroughs B. R., Kim J., Blanchet T. A., Boric Acid Self-Lubrication of B2O3-Filled Polymer Composites, *Tribology Transactions*, 1999, **42**(3), 592-600.

Cavdar A. D., Mengeloğlu F., Karakus K., Effect of Boric Acid and Borax on Mechanical, Fire and Thermal Properties of Wood Flour Filled High Density Polyethylene Composites, *Measurement*, 2015, **60**, 6-12.

Chang B. P., Akil H. M., Nasir R. M., Mechanical and Tribological Properties of Zeolite-Reinforced UHMWPE Composite for Implant Application, *Procedia Engineering*, 2013, 68, 88-94.

Chen Y., Li F., Xiao Y., Zhang X., Sun J., Study on Surface Modification of Basalt Fiber and Properties of BF/EP-PU Composites, *2012 IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, Bangalor, Hindistan, 24-28 Temmuz 2012.

Cheng S., Lau K., Liu T., Zhao Y., Lam P., Yin Y., Mechanical and Thermal Properties of Chicken Feather Fiber/PLA Green Composites, *Composites Part B*, 2009, **40**(7), 650-654.

Choi H. Y., Lee J. S., Effects of Surface Treatment of Ramie Fibers in a Ramie/Poly(lactic acid) Composite, *Fibers and Polymers*, 2012, **13**(2), 217-223.

Colombo C., Vergani L., Burman M., Static and Fatigue Characterisation of New Basalt Fibre Reinforced Composites, *Composite Structures*, 2012, **94**(3), 1165-1174.

Das K., Ray, D., Banerjee I., Bandyopadhyay N. R., Sengupta S., Mohanty A. K., Misra M., Crystalline Morphology of PLA/Clay Nanocomposite Films and Its Correlation with Other Properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, **118**, 143-151.

Deák T., Czigány T., Tamás P., Németh C., Enhancement of Interfacial Properties of Basalt Fiber Reinforced Nylon 6 Matrix Composites with Silane Coupling Agents, *eXPRESS Polymer Letters*, 2010, **4**(10), 590–598.

Demirel M., Pamuk V., Dilsiz N., Investigation of Flame Retardancy and Physical-Mechanical Properties of Zinc Borate/Boric Acid Polyester Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, **115**(5), 2550-2555.

Deshmukh P., Lovell M., Sawyer W. G., Mobley A., On The Friction and Wear Performance of Boric Acid Lubricant Combinations in Extended Duration Operations, *Wear*, 2006, **260**(11-12), 1295-1304.

Dharmalingam U., Dhanasekaran M., Balasubramanian K., Kandasamy R., Surface Treated Fly Ash Filled Modified Epoxy Composites, *Polímeros*, 2015, **25**(6), 540-546.

Ertürk A. T., Polietilen Malzemelerde CaCO₃ Katkısının Termal ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2007, 232708.

Eslami-Fersani R., Khalili S. M. R., Hedayatnasab Z., Soleimani N., Influence of Thermal Conditions on The Tensile Properties of Basalt Fiber Reinforced Polypropylene-Clay Nanocomposites, *Materials and Design*, 2014, **53**, 540-549.

Espana J. M., Samper M. D., Fages E., Sánchez-Nácher L., Balart R., Investigation of the Effect of Different Silane Coupling Agents on Mechanical Performance of Basalt Fiber Composite Laminates with Biobased Epoxy Matrices, *Polymer Composites*, 2013, **34**(3), 376-381.

Etcheverry M., Barbosa S. E., Glass Fiber Reinforced Polypropylene Mechanical Properties Enhancement by Adhesion Improvement, *Materials*, 2012, **5**(6), 1084-1113.

Gwon J. G., Lee S. Y., Doh G. H., Kim J. H., Characterization of Chemically Modified Wood Fibers Using FTIR Spectroscopy for Biocomposites, *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, **116**(6), 3212–3219.

Jacob M., Francis B., Thomas S., Dynamical Mechanical Analysis of Sisal/Oil Palm Hybrid Fiber-Reinforced Natural Rubber Composites, *Polymer Composites*, 2006, **27**(6), 671-680.

Jin S. H., Yoon K. H., Park Y. B., Bang D. S., Properties of Surface-Modified Multiwalled Carbon Nanotube Filled Poly(ethylene terephthalate) Composite Films, *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, **107**(2), 1163-1168.

Jonoobi M., Harun J., Mathew A. P., Oksman K., Mechanical Properties of Cellulose Nanofiber (CNF) Reinforced Polylactic Acid (PLA) Prepared by Twin Screw Extrusion, *Composites Science and Technology*, 2010, **70**, 1742-1747.

Karatas E., Gul O., Karsli N. G., Yilmaz T., Synergetic Effect of Graphene Nanoplatelet, Carbon Fiber and Coupling Agent Addition on The Tribological, Mechanical and Thermal Properties of Polyamide 6,6 Composites, *Composites Part B*, 2019, **163**, 730-739.

Karsli N. G., Aytac A., Properties of Alkali Treated Short Flax Fiber Reinforced Poly(Lactic Acid)/Polycarbonate Composites, *Fibers and Polymers*, 2014, **15**(12), 2607-2612.

Karsli N. G., Demirkol S., Yilmaz T., Thermal Aging and Reinforcement Type Effects on The Tribological, Thermal, Thermomechanical, Physical and Morphological Properties of Poly(Ether Ether Ketone) Composites, *Composites Part B*, 2016, **88**, 253-263.

Karsli N. G., Enhancing the Fracture Toughness of Glass Fiber Reinforced Polyamide 6,6 Composites with the Addition of Chain Extender, *Polymer Composites*, 2017, **38**(10), 2228-2236.

Karsli N. G., Yilmaz T., Gul O., Effects of Coupling Agent Addition on the Adhesive Wear, Frictional and Thermal Properties of Glass Fiber Reinforced Polyamide 6,6 Composites, *Polymer Bulletin*, 2018, **75**(10), 4429-4444.

Karlı Yılmaz N. G., Farklı Kaplama Malzemeleri ile Kaplanmış Karbon Elyaf Takviyeli Poliamit 6,6 ve Poli(Bütlen Tereftalat) Karmalarının Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2014, 360885.

Karslı Yılmaz N. G., Karbon Elyaf Takviyeli Termoplastik Karmaların Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 283046.

Kassegn E., Desplentere F., Berhanu T., Mechanical Properties of Short Sisal Fiber Reinforced Polylactic Acid (PLA) Biocomposite Processed by Injection Molding, *Branna Journal of Engineering and Technology (BJET)*, 2019, **1**(1), 20-36.

Kaw A. K., *Mechanics of Composite Materials*, 2ed ed., CRC Press, Boca Raton, 2006.

Kemaloğlu Ş., Termal Ara Yüzey Malzemesi Olarak Kullanılabilecek Polimer/Bor Nitrür Mikro ve Nano Kompozitlerin Üretim Teknolojilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 259402.

Kızıl A., Doğal Mineral ve Elyaf Katkılı Poli(Fenilen Sülfid) Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2019, 576692.

Kodal M., Plastikleştirilmiş Poli(Laktik Asit) Temelli Nanokompozitlerinin Fiziksel Özellikleri ve Kristalizasyon Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2014, 379726.

Kutluk T., Coban O., Bora M. O., Fidan S., Sımmazcelik T., Silane Coupling Efficiency on Thermal Properties of Volcanic Ash Filled PPS Composites, *Acta Physica Polonica A*, 2016, **129**(4), 498-500.

Kuzmin K. L., Timoshkin I. A., Gutnikov S. I., Zhukovskaya E. S., Lipatov Y. V., Lazoryak B. I., Effect of Silane/Nano-Silica on The Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Epoxy Composites, *Composite Interfaces*, 2017, **24**(1), 23-34.

Lee J. J., Nam I., Kim H., Thermal Stability and Physical Properties of Epoxy Composite Reinforced with Silane Treated Basalt Fiber, *Fibers and Polymers*, 2017, **18**(1), 140-147.

Liang J. Z., Li R. K. Y., Tjong S. C., Impact Fracture Behavior of PP/EPDM/Glass Bead Ternary Composites, *Polymer Engineering and Science*, 2000, **40**(9), 2105-2111.

Liu S., Wu G., Yu J., Chen X., Guo J., Zhang X., Wang P., Yin X., Surface Modification of Basalt Fiber (BF) for Improving Compatibilities Between BF and Poly Lactic Acid (PLA) Matrix, *Composite Interfaces*, 2019, **26**(4), 275-290.

İlah S. A., Iqbal A., Frommann L., Melt Mixing of Carbon Fibers and Carbon Nanotubes Incorporated Polyurethanes, *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, **110**(1), 196-202.

Lopresto V., Leone C., De Iorio I., Mechanical Characterisation of Basalt Fibre Reinforced Plastic, *Composites Part B*, 2011, **42**(4), 717-723.

Lovell M. R., Kabir M. A., Menezes P. L., Higgs C. F., Influence of Boric Acid Additive Size on Green Lubricant Performance, *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 2010, **368**(1929), 4851-4868.

Mahuya D., Debabrata C., Influence of Alkali Treatment on The Fine Structure and Morphology of Bamboo Fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, **102**(5), 5050–5056.

Moustafa H., Youssef A. M., Darwish N. A., Abou-Kandil A. I., Eco-Friendly Polymer Composites for Green Packaging: Future Vision and Challenges, *Composites Part B*, 2019, **172**, 16-25.

Myshkin N. K., Petrokovets M. I., Kovalev A. V., Tribology of Polymers: Adhesion, Friction, Wear and Mass Transfer, *Tribology International*, 2005, **38**, 910-921.

Najafi N., Heuzey M. C., Carreau P. J., Polylactide (PLA) – Clay Nanocomposites Prepared by Melt Compounding in The Presence of Chain Extender, *Composite Science and Technology*, 2012, **72**, 608-615.

Polat O., Kaynak C., Use of Boron Oxide and Boric Acid to Improve Flame Retardancy of an Organophosphorus Compound in Neat and Fiber Reinforced Polyamide-6, *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 2016, **22**(3), 300-310.

Ramesan M. T., George A., Jayakrishnan P., Kalaprasad G., Role of Pumice Particles in The Thermal, Electrical and Mechanical Properties of Poly(Vinyl Alcohol)/Poly(Vinyl Pyrrolidone) Composites, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2016, **126**(2), 511-519.

Rothon R. N., *Particulate-Filled Polymer Composites*, 2nd ed., Rapra, Shrewsbury, 2003.

Ryu S., Kim K., Kim J., Silane Surface Treatment of Boron Nitride to Improve The Thermal Conductivity of Polyethylene Naphthalate Requiring High Temperature Molding, *Polymer Composites*, 2018, **39**, 1692-1700.

Saba N., Jawaid M., Alothman O. Y., Paridah M. T., A Review on Dynamic Mechanical Properties of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites, *Construction and Building Materials*, 2016, **106**, 149-159.

Sahin A., Karsli N. G., Sinmazcelik T., Comparison of the Mechanical, Thermomechanical, Thermal, and Morphological Properties of Pumice and Calcium Carbonate-Filled Poly(phenylene sulfide) Composites, *Polymer Composites*, 2016, **37**, 3160-3166.

Samper M. D., Petrucci R., Sánchez-Nacher L., Balart R., Kenny J. M., Effect of Silane Coupling Agents on Basalt Fiber–Epoxidized Vegetable Oil Matrix Composite Materials Analyzed by the Single Fiber Fragmentation Technique, *Polymer Composites*, 2015, **36**(7), 1205-1212.

Sang L., Zhao M., Liang Q., Wei Z., Silane-Treated Basalt Fiber-Reinforced Poly(Butylene Succinate) Biocomposites: Interfacial Crystallization and Tensile Properties, *Polymers*, 2017, **9**(8), 351.

Senturk O., Senturk A. E., Palabiyik M., Evaluation of Hybrid Effect on The Thermomechanical and Mechanical Properties of Calcite/SGF/PP Hybrid Composites, *Composite Part B*, 2018, **140**, 68-77.

Sever K., Atagur M., Tuncalp M., Altay L., Seki Y., Sarikanat M., The Effect of Pumice Powder on Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2018, DOI: 10.1177/0892705718785692.

Shih Y. F., Huang C. C., Polylactic Acid (PLA)/Banana Fiber (BF) Biodegradable Green Composites, *Journal of Polymer Research*, 2011, **18**(6), 2335-2340.

Siakeng R., Jawaid M., Ariffin H., Sapuan S.M., Mechanical, Dynamic, and Thermomechanical Properties of Coir/Pineapple Leaf Fiber Reinforced Polylactic Acid Hybrid Biocomposites, *Polymer Composites*, 2019, **40**(5), 2000–2011.

Sim K. J., Han S O., Seo Y. B., Dynamic Mechanical and Thermal Properties of Red Algae Fiber Reinforced Poly(lactic acid) Biocomposites, *Macromolecular Research*, 2010, **18**(5), 489-495.

Tabi T., Tamas P., Kovacs J. G., Chopped Basalt Fibres: A New Perspective In Reinforcing Poly(Lactic Acid) to Produce Injection Moulded Engineering Composites From Renewable and Natural Resources, *eXPRESS Polymer Letters*, 2013, **7**(2), 107-119.

Tayfun Ü., Kanbur Y., Asidik ve Bazik Pomza İçeren Polipropilen Kompozitlerinin Mekanik, Fiziksel ve Morfolojik Özellikleri, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2018, **22** (2), 333-339.

URL-1: https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigmaaldrich/docs/Sigma/Product_Information_Sheet/b7901pis.pdf, (Ziyaret Tarihi: 14 Haziran 2019).

Yesil S., Bayram G., Effect of Carbon Nanotube Purification on the Electrical and Mechanical Properties of Poly(ethylene terephthalate) Composites with Carbon Nanotubes in Low Concentration, *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, **119**(6), 3360-3371.

Yılmaz S., Poliamit Kompozitlerin Kırılma Tokluğu ve Kırılma Davranışının Esas Kırılma İşi ve J-İntegral Metotları ile Analizi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2015, 390434.

Yusoff R. B., Takagi H., Nakagaito A. N., Tensile and Flexural Properties of Polylactic Acid-Based Hybrid Green Composites Reinforced by Kenaf, Bamboo and Coir Fibers, *Industrial Crops and Products*, 2016, **94**, 562-573.

Zhang X., Pei X., Wang Q., Friction and Wear Properties of Basalt Fiber Reinforced/Solid Lubricants Filled Polyimide Composites Under Different Sliding Conditions, *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, **114**, 1746–1752.

Zhou S., Zhang Q., Wu C., Huang, J., Effect of Carbon Fiber Reinforcement on The Mechanical and Tribological Properties of Polyamide6/Polyphenylene Sulfide Composites, *Materials and Design*, 2013, **44**, 493-499.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Dincer U., Kizil A., Gul O., Karsli N. G., Yilmaz T., Zeolite and Carbon Fiber Reinforced PPS Matrix Hybrid Composites: Tribological and Thermomechanical Properties, *2nd International Conference On Tribology (TURKEYTRIB'18)*, İstanbul, Türkiye, 18-20 Nisan 2018.

Kizil A., **Dincer U.**, Gul O., Karsli N. G., Yilmaz T., Investigation The Tribological and Thermomechanical Properties of Bentonite and Basalt Fiber Reinforced PPS Matrix Composites, *2nd International Conference On Tribology (TURKEYTRIB'18)*, İstanbul, Türkiye, 18-20 Nisan 2018.

Dincer U., Kizil A., Gul O., Karsli N. G., Yilmaz T., Zeolite Addition to Basalt Fiber Reinforced PPS Matrix Composites: Investigation The Tribological and Thermomechanical Properties, *V. International Multidisciplinary Congress of Eurasia (IMCOFE 2018)*, Barselona, İspanya, 24-26 Temmuz 2018.

Kizil A., **Dincer U.**, Gul O., Karsli N. G., Yilmaz T., Effect of Bentonite Addition on The Mechanical and Thermal Properties of Carbon Fiber Reinforced PPS Matrix Composites, *V. International Multidisciplinary Congress of Eurasia (IMCOFE 2018)*, Barselona, İspanya, 24-26 Temmuz 2018.

Dincer U., Kizil A., Gul O., Karsli N. G., Yilmaz T., Effect of Zeolite Addition on The Mechanical and Thermal Properties of Basalt Fiber Reinforced PPS Matrix Composites, *4th International Symposium on Composite Materials (KOMPEGE 2018)*, İzmir, Türkiye, 6-8 Eylül 2018.

Kizil A., **Dincer U.**, Gul O., Karsli N. G., Yilmaz T., Tribological and Thermomechanical Properties of Bentonite and Carbon Fiber Reinforced PPS Matrix Composites, *4th International Symposium on Composite Materials (KOMPEGE 2018)*, İzmir, Türkiye, 6-8 Eylül 2018.

Gul O., Kizil A., **Dincer U.**, Karsli N. G., Yilmaz T., Investigation The Tribological and Thermomechanical Properties of Wood-Flour and Basalt Fiber Reinforced Poly(Lactic Acid) Matrix Hybrid Composites, *4th International Symposium on Composite Materials (KOMPEGE 2018)*, İzmir, Türkiye, 6-8 Eylül 2018.

ÖZGEÇMİŞ

Uğur DİNÇER, 1994 yılında Balıkesir’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Hatice Fahriye EĞİNLİOĞLU İlköğretim Okulu’nda, lise öğrenimini ise Gülser Mehmet BOLLUK Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2012 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2017 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. Lisans eğitimini tamamladıktan sonra 2018 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladığı yüksek lisans öğrenimine halen devam etmektedir.

