

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER (CTP) ATIKLARININ  
GERİ KAZANIMI VE YENİ HAZIRLANAN  
KOMPOZİTLERDE DEĞERLENDİRİLMESİ**

**SİBEL YILDIZ**

**KOCAELİ 2021**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER (CTP) ATIKLARININ**  
**GERİ KAZANIMI VE YENİ HAZIRLANAN**  
**KOMPOZİTLERDE DEĞERLENDİRİLMESİ**

**SİBEL YILDIZ**

**Doç.Dr. Bağdagül KARAAĞAÇ**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Doç.Dr. Nevin Gamze KARSLI YILMAZ**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Prof.Dr. Murat ŞEN**  
**Jüri Üyesi, Hacettepe Üniversitesi** .....

**Doç.Dr. Mehmet KODAL**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Doç.Dr. Emine Hilal MERT**  
**Jüri Üyesi, Yalova Üniversitesi** .....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 15.06.2021**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Kompozit sektörünün büyük bir hızla gelişim sağladığı günümüzde, termoset temelli kompozit atıkların geri kazanımı adına pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında cam elyaf takviyeli polyester atıkların olumsuz çevresel etkilerinin azaltılıp katma değerinin artırılması için yeni üretilen kompozitler içinde tekrar kullanımının kompozit üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bilgi-birikim ve tecrübelerini sevgi ve ilgi ile paylaşan, öğrencisi olduğum için her zaman büyük bir onur ve mutluluk duyduğum değerli danışman hocam Doç. Dr. Bağdagül Karaağaç'a bana duyduğu güven ve üzerimdeki büyük emekleri için çok teşekkür ederim. İyi ki bu yola sizinle başlamışım, iyi ki varsınız.

Tüm lisansüstü eğitimim boyunca değerli fikirleri ile beni yönlendiren ve aydınlatan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Murat Şen'e ve Doç. Dr. Nevin Gamze Karlı Yılmaz'a şükranlarımı sunuyorum.

Bu tez çalışmasını 3161133 No'lu araştırma projesi kapsamında destekleyen Tübitak'a teşekkürlerimi sunarım.

Kompozit sektörü için böylesine önemli bir konuda beni çalışmaya teşvik eden, üniversite-sanayi işbirliği çerçevesinde tüm laboratuvar imkânları ile çalışmalarına büyük destek sağlayan Polin Waterparks A.Ş. yöneticilerine ve ayrıca değerli direktörüm Sn. Ali Cansun'a teşekkür ederim.

Birlikte çalıştığım ilk günden bu yana desteğini hep hissettiğim Selen Gül Güzeliş'e, çalışmaya yaptığı emek yoğun katkıları için teşekkürü bir borç bilirim. Doktora çalışmalarım ve tez yazım aşamasında desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Tuba Ünügül ve Şehriban Öncel'e çok teşekkür ederim.

Her zaman en güçlü destekçilerim olan, beni cesaretlendiren sevgili anneme ve can yoldaşım biricik kardeşime, bana duydukları sonsuz güven ve takdirleri için en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Olmasaydınız olmazdı...

Ve beni ben yapan, sevgiyle doyuran canım babama, yaşattığı sonsuz güzellikler ve bana kattığı değerler için minnettarım. Biliyorum, sen hep benim yanımdasın.

Haziran – 2021

Sibel YILDIZ

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
GİRİŞ .....	1
1. TEORİK BİLGİ.....	3
1.1. Kompozit Malzemeler .....	3
1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
1.2.1. Polimerik matrisli elyaf takviyeli kompozit malzemeler .....	5
1.2.1.1. Cam elyaf takviyeli polyster (CTP) .....	5
1.3. CTP Eldesinde Kullanılan Temel Bileşenler .....	6
1.3.1. Doymamış polyster reçine (UPE).....	6
1.3.1.1. Doymamış polyster reçinede silan bağlayıcı modifikasyonu .....	10
1.3.2. Başlatıcı .....	14
1.3.3. Cam elyafı .....	15
1.3.4. Jelkot .....	18
1.4. CTP İşleme Yöntemleri.....	18
1.4.1. Açık kalıp prosesleri.....	18
1.4.1.1. El yatırması yöntemi.....	18
1.4.1.2. Püskürtme ile kalıplama yöntemi .....	19
1.4.2. Kapalı kalıp prosesleri.....	20
1.4.2.1. Vakum infüzyon yöntemi .....	20
1.4.2.2. Vakum torbalama yöntemi.....	21
1.4.2.3. Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM).....	22
1.4.2.4. Reaksiyonlu enjeksiyonlu kalıplama yöntemi (RIM) .....	23
1.4.3. Basınçlı kalıplama prosesleri .....	24
1.4.3.1. Sıcak pres pestili (Sheet moulding compound, SMC).....	24
1.4.3.2. Sıcak pres karışımı (Bulk molding compound, BMC) .....	25
1.4.3.3. Sıcak pres hamuru (Dough moulding compound, DMC) .....	26
1.4.4. Sürekli prosesler .....	27
1.4.4.1. Pultrüzyon .....	27
1.4.4.2. Elyaf sarma (Filament winding) .....	27
1.4.4.3. Santrifüj ile kalıplama.....	28
1.5. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları .....	29
1.6. CTP Kökenli Atıklar ve Geri Kazanım .....	30

1.6.1. Mekanik geri dönüşüm.....	32
1.6.2. Isıl geri dönüşüm.....	33
1.6.2.1. Yakma prosesi.....	34
1.6.2.2. Akışkan yatak prosesi.....	35
1.6.2.3. Piroliz.....	36
1.6.3. Kimyasal geri dönüşüm.....	38
1.6.3.1. Süperkritik sıvılarla solvoliz.....	39
1.6.3.2. Düşük sıcaklıkta solvoliz.....	40
1.7. Kullanılan Deneysel Teknikler ve Cihazların Çalışma Prensipleri.....	40
1.7.1. Çekme testi.....	40
1.7.2. Üç nokta eğme testi.....	42
1.7.3. Darbe testi.....	43
1.7.4. Kısa kiriş testi.....	44
1.7.5. Basma testi.....	45
1.7.6. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC).....	46
1.7.7. Dinamik mekanik analiz (DMA) yöntemi.....	48
1.7.8. Yük altında eğilme sıcaklığı (HDT) testi.....	49
1.7.9. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR).....	51
1.7.10. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	52
1.7.11. Sürünme testi.....	53
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	56
2.1. Atığın İçerdiği Elyafı Geri Kazanmak Üzere Yapılan Çalışmalar.....	56
2.2. Atığın Öğütülerek Doğrudan Kullanımına Yönelik Çalışmalar.....	61
2.3. Atığın Kompozit İçerisinde Kullanıldığı Çalışmalar.....	63
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	65
3.1. Malzemeler.....	65
3.2. Yöntem.....	66
3.2.1. Test örneklerinin hazırlanması.....	66
3.2.1.1. Elyaf takviyeli örneklerin hazırlanması.....	66
3.2.1.2. Elyaf takviyesiz örneklerin hazırlanması.....	68
3.2.2. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi.....	69
3.2.2.1. Elyaf boyu dağılımı.....	69
3.2.2.2. Elek analizi.....	69
3.2.2.3. Kür profili incelemesi.....	69
3.2.2.4. Viskozite ve tiksotropi ölçümü.....	69
3.2.2.5. Lineer büzülme (çekme, shrinkage) ölçümü.....	70
3.2.2.6. Sertlik ölçümü.....	70
3.2.3. Mekanik özelliklerin belirlenmesi.....	70
3.2.3.1. Çekme testi.....	70
3.2.3.2. Üç nokta eğme testi.....	71
3.2.3.3. Kısa kiriş testi.....	71
3.2.3.4. Darbe testi.....	72
3.2.3.5. Basma testi.....	72
3.2.4. Elyaf içeriği (%).....	72
3.2.5. Isıl özelliklerin belirlenmesi.....	72
3.2.6. Dinamik mekanik analiz (DMA).....	73
3.2.7. Yük altında eğilme sıcaklığı (HDT).....	73
3.2.8. Morfolojik analiz.....	73
3.2.9. Yapısal analiz.....	73

3.2.10. Sürünme testi.....	74
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	75
4.1. Atığın Doğrudan Öğütülerek Yeni Kompozitlerde Kullanıldığı Durumda Elde Edilen Sonuçlar .....	75
4.1.1. Fiziksel özellikler .....	76
4.1.1.1. Reçinenin fiziksel özellikleri .....	76
4.1.1.2. Atığın fiziksel özellikleri .....	78
4.1.2. Kompozitlerin mekanik özellikleri.....	80
4.1.2.1. Çekme testi .....	80
4.1.2.2. Üç nokta eğme testi.....	85
4.1.2.3. Darbe testi .....	90
4.1.2.4. Kısa kiriş testi .....	92
4.1.2.5. Basma testi .....	95
4.1.3. Elyaf içeriği .....	96
4.1.4. Normalize mekanik özellikler .....	97
4.1.5. Dinamik-mekanik özellikler.....	100
4.1.6. Yük altında eğilme sıcaklığı (HDT).....	108
4.1.7. Morfolojik analiz.....	110
4.1.8. Sürüne testi.....	112
4.2. Atık-Matris Arayüzey Etkileşimini İyileştirmek İçin Kimyasal Modifikasyon Yapıldığı Durumda Kompozitlerin Karakterizasyonu.....	118
4.2.1. Silan tipinin seçimi .....	118
4.2.1.1. Çekme testi .....	119
4.2.1.2. Eğme testi .....	121
4.2.1.3. Darbe testi .....	125
4.2.2. Silan katkılı kompozitlerin mekanik özellikleri .....	128
4.2.2.1. Silan katkılı kompozitlerin çekme özellikleri.....	128
4.2.2.2. Silan katkılı kompozitlerin eğme özellikleri.....	130
4.2.2.3. Silan katkılı kompozitlerin darbe özellikleri .....	131
4.2.2.4. Silan katkılı kompozitlerin kısa kiriş özellikleri.....	132
4.2.2.5. Silan katkılı kompozitlerin basma özellikleri .....	133
4.2.3. Silan katkılı kompozitlerin dinamik mekanik özellikleri .....	135
4.2.4. Silan katkılı kompozitlerin yük altında eğilme sıcaklığı (HDT).....	144
4.2.5. Silan katkılı kompozitlerin morfolojik özellikleri.....	146
4.2.6. Silan katkılı kompozitlerin yapısal özellikleri .....	148
4.2.7. Silan katkılı kompozitlerin sürünme özellikleri .....	150
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	156
KAYNAKLAR .....	160
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	170
ÖZGEÇMİŞ .....	172

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Doymamış polyeşterin kimyasal yapısı .....	7
Şekil 1.2.	Doymamış polyeşter eldesinde en sık kullanılan monomerlerin kimyasal yapıları.....	8
Şekil 1.3.	UPE sentezi için reaksiyon şeması .....	10
Şekil 1.4.	Silan kullanımında (a) Yapışma, (b) Yüzey modifikasyonu ve (c) Çaprazbağlanma reaksiyonlarının şematik gösterimi .....	11
Şekil 1.5.	Silan bağlayıcıların temel kimyasal yapısı .....	11
Şekil 1.6.	Uç gruptan tutunma mekanizması .....	12
Şekil 1.7.	Radikal aşılama mekanizması.....	12
Şekil 1.8.	Kopolimerizasyon mekanizması.....	12
Şekil 1.9.	Doymamış polyeşterin bağlanma reaksiyonu .....	14
Şekil 1.10.	Doymamış polyeşterin çaprazbağlanma reaksiyonu.....	15
Şekil 1.11.	Cam elyaf üretimi .....	16
Şekil 1.12.	Cam elyafı için bazı takviye seçenekleri .....	17
Şekil 1.13.	El yatırması yöntemi (1) Jelkot uygulaması, (2) Jelkotun kürlenmesi, (3) Reçine ile elyafın ıslatılması, (4) Kürleme, (5) Ürün eldesi .....	19
Şekil 1. 14.	Püskürtme ile kalıplama yöntemi.....	20
Şekil 1.15.	Vakum infüzyon yöntemi .....	21
Şekil 1.16.	Vakum torbalama yöntemi.....	22
Şekil 1.17.	RTM yöntemi.....	23
Şekil 1.18.	RIM yöntemi.....	24
Şekil 1.19.	SMC hazır kalıplama bileşimi üretimi .....	25
Şekil 1.20.	BMC hazır kalıplama bileşimi üretimi .....	26
Şekil 1.21.	Pultrüzyon yöntemi .....	27
Şekil 1.22.	Elyaf sarma yöntemi .....	28
Şekil 1.23.	Santrifüj kalıplama yöntemi.....	29
Şekil 1.24.	Termoset kompozitler için geri dönüşüm prosesleri.....	32
Şekil 1.25.	Akışkan yatak geri dönüşüm prosesi .....	35
Şekil 1.26.	Piroliz reaktörü.....	37
Şekil 1.27.	Piroliz geri dönüşüm prosesi şematik gösterimi .....	37
Şekil 1.28.	Çekme cihazının temel bileşenleri .....	40
Şekil 1.29.	Polimerik malzemeler için tipik bir gerilim-gerinim eğrisi .....	41
Şekil 1.30.	Üç nokta eğme testinin şematik gösterimi .....	42
Şekil 1.31.	Sarkaç tipi darbe testleri (a) Izod darbe testi, (b) Charpy darbe testi.....	43
Şekil 1.32.	Sarkaç tipi darbe testlerinde örneklerin yerleştirilme şekilleri (a) Charpy darbe testi, (b) Izod darbe testi .....	44
Şekil 1.33.	Kısa kiriş testi şematik gösterimi.....	44
Şekil 1.34.	Kısa kiriş testinde görülen hatalar.....	45

Şekil 1.35.	IITRI basma test fikstürü .....	46
Şekil 1.36.	DSC'nin şematik gösterimi .....	47
Şekil 1.37.	Örnek bir DSC termogramı .....	47
Şekil 1.38.	DMA analizinde kuvvetin sinüsoidal salınımı .....	48
Şekil 1.39.	DMA analizinden elde edilecek tipik bir sıcaklık tarama eğrisi (a) Amorf malzemeler için (b) Yarı kristalin malzemeler için .....	49
Şekil 1.40.	HDT testi şematik gösterimi .....	50
Şekil 1.41.	FTIR cihazının çalışma şeması .....	51
Şekil 1.42.	Örnek bir FTIR spektrumu .....	52
Şekil 1.43.	SEM cihazının çalışma prensibi .....	52
Şekil 1.44.	Tipik bir sürünme grafiği .....	53
Şekil 1.45.	Sürünme test düzeneği .....	54
Şekil 3.1.	Kompozit kalıplarda örneklerin üretimi .....	66
Şekil 3.2.	Silikon kalıp .....	68
Şekil 3.3.	Çalışma kapsamında kullanılan Instron 3367 marka çekme cihazının genel görünümü .....	70
Şekil 3.4.	Çalışma kapsamında kullanılan Instron 3367 marka eğme fikstürünün genel görünümü .....	71
Şekil 3.5.	Mettler Toledo DSC 1 cihazı .....	72
Şekil 3.6.	Perkin Elmer Spectrum 100 marka FTIR cihazı .....	73
Şekil 3.7.	Sürünme testi düzeneği .....	74
Şekil 4.1.	Atık CTP'nin elyaf boyu dağılımı .....	78
Şekil 4.2.	B1 boyutlu atık için elek analizi .....	79
Şekil 4.3.	B2 boyutlu atık için elek analizi .....	79
Şekil 4.4.	B3 boyutlu atık için elek analizi .....	80
Şekil 4.5.	5 katlı kompozitlerin çekme dayanımı .....	81
Şekil 4.6.	5 katlı kompozitlerin çekme modülü .....	81
Şekil 4.7.	6 katlı kompozitlerin çekme dayanımı .....	82
Şekil 4.8.	6 katlı kompozitlerin çekme modülü .....	82
Şekil 4.9.	7 katlı kompozitlerin çekme dayanımı .....	83
Şekil 4.10.	7 katlı kompozitlerin çekme modülü .....	83
Şekil 4.11.	8 katlı kompozitlerin çekme dayanımı .....	84
Şekil 4.12.	8 katlı kompozitlerin çekme modülü .....	84
Şekil 4.13.	5 katlı kompozitlerin eğme dayanımı .....	86
Şekil 4.14.	5 katlı kompozitlerin eğme modülü .....	86
Şekil 4.15.	6 katlı kompozitlerin eğme dayanımı .....	87
Şekil 4.16.	6 katlı kompozitlerin eğme modülü .....	87
Şekil 4.17.	7 katlı kompozitlerin eğme dayanımı .....	88
Şekil 4.18.	7 katlı kompozitlerin eğme modülü .....	88
Şekil 4.19.	8 katlı kompozitlerin eğme dayanımı .....	89
Şekil 4.20.	8 katlı kompozitlerin eğme modülü .....	89
Şekil 4.21.	5 katlı kompozitlerin darbe dayanımı .....	90
Şekil 4.22.	6 katlı kompozitlerin darbe dayanımı .....	91
Şekil 4.23.	7 katlı kompozitlerin darbe dayanımı .....	91
Şekil 4.24.	8 katlı kompozitlerin darbe dayanımı .....	92
Şekil 4.25.	5 katlı kompozitlerin kısa kiriş dayanımı .....	93



Şekil 4.26.	6 katlı kompozitlerin kısa kiriş dayanımı.....	93
Şekil 4.27.	7 katlı kompozitlerin kısa kiriş dayanımı.....	94
Şekil 4.28.	8 katlı kompozitlerin kısa kiriş dayanımı.....	94
Şekil 4.29.	6 katlı kompozitlerin basma dayanımı .....	95
Şekil 4.30.	Kompozitlerin normalize çekme dayanımı .....	98
Şekil 4.31.	Kompozitlerin normalize eğme dayanımı.....	98
Şekil 4.32.	Kompozitlerin normalize eğme dayanımı.....	99
Şekil 4.33.	Kompozitlerin normalize kısa kiriş dayanımı.....	99
Şekil 4.34.	Kompozitlerin normalize basma dayanımı .....	100
Şekil 4.35.	%5 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi.....	100
Şekil 4.36.	%10 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi.....	101
Şekil 4.37.	%15 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi.....	101
Şekil 4.38.	%20 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi.....	102
Şekil 4.39.	B1 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi.....	103
Şekil 4.40.	B2 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi.....	103
Şekil 4.41.	B3 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi.....	104
Şekil 4.42.	%5 oranında atık ilavesinin kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	105
Şekil 4.43.	%10 oranında atık ilavesinin kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi.....	105
Şekil 4.44.	%15 oranında atık ilavesinin kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	106
Şekil 4.45.	%20 oranında atık ilavesinin kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	106
Şekil 4.46.	B1 boyutlu atığın kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	107
Şekil 4.47.	B2 boyutlu atığın kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi.....	107
Şekil 4.48.	B3 boyutlu atığın kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	108
Şekil 4.49.	B1 boyutunda atık kullanılan kompozitlerin HDT eğrileri.....	109
Şekil 4.50.	B2 boyutunda atık kullanılan kompozitlerin HDT eğrileri.....	109
Şekil 4.51.	B3 boyutunda atık kullanılan kompozitlerin HDT eğrileri.....	110
Şekil 4.52.	B1, B2 ve B3 boyutlu atığın x100 ve x1000 büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri .....	111
Şekil 4.53.	Atık oranının matris-elyaf etkileşimine etkisi .....	112
Şekil 4.54.	Atık tane boyutunun matris-elyaf etkileşimine etkisi .....	112
Şekil 4.55.	Kompozitlerin sürünme modülü .....	113
Şekil 4.56.	B1 boyutunda atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı .....	113
Şekil 4.57.	B2 boyutunda atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı .....	114
Şekil 4.58.	B3 boyutunda atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı .....	114
Şekil 4.59.	%5 oranında atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı .....	115
Şekil 4.60.	%10 oranında atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı .....	115

Şekil 4.61.	%15 oranında atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı .....	116
Şekil 4.62.	%20 oranında atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı .....	116
Şekil 4.63.	B1 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen çekme dayanımları .....	120
Şekil 4.64.	B2 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen çekme dayanımları .....	120
Şekil 4.65.	B3 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen çekme dayanımları .....	121
Şekil 4.66.	B1 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme dayanımları .....	122
Şekil 4.67.	B2 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme dayanımları .....	122
Şekil 4.68.	B3 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme dayanımları .....	123
Şekil 4.69.	B1 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme modülü .....	123
Şekil 4.70.	B2 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme modülü .....	124
Şekil 4.71.	B3 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme modülü .....	124
Şekil 4.72.	B1 boyutlu atık kullanıldığı durumda elde edilen darbe dayanımı.....	126
Şekil 4.73.	B2 boyutlu atık kullanıldığı durumda elde edilen darbe dayanımı.....	126
Şekil 4.74.	B3 boyutlu atık kullanıldığı durumda elde edilen darbe dayanımı.....	127
Şekil 4.75.	MEMO katkılı kompozitlerin çekme dayanımı .....	129
Şekil 4.76.	MEMO katkılı kompozitlerin çekme modülü.....	129
Şekil 4.77.	MEMO katkılı kompozitlerin eğme dayanımı .....	130
Şekil 4.78.	MEMO katkılı kompozitlerin eğme modülü .....	131
Şekil 4.79.	MEMO katkılı kompozitlerin darbe dayanımı.....	132
Şekil 4.80.	MEMO katkılı kompozitlerin kısa kiriş dayanımı .....	133
Şekil 4.81.	MEMO katkılı kompozitlerin basma dayanımı .....	134
Şekil 4.82.	MEMO kullanıldığı durumda %5 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi.....	136
Şekil 4.83.	MEMO kullanıldığı durumda %10 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi.....	137
Şekil 4.84.	MEMO kullanıldığı durumda %15 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi.....	137
Şekil 4.85.	MEMO kullanıldığı durumda %20 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi.....	138
Şekil 4.86.	MEMO kullanıldığı durumda B1 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi .....	138

Şekil 4.87.	MEMO kullanıldığı durumda B2 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi .....	139
Şekil 4.88.	MEMO kullanıldığı durumda B3 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi .....	139
Şekil 4.89.	MEMO kullanıldığı durumda %5 oranında atık ilavesinin kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	140
Şekil 4.90.	MEMO kullanıldığı durumda %10 oranında atık ilavesinin kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	140
Şekil 4.91.	MEMO kullanıldığı durumda %15 oranında atık ilavesinin kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	141
Şekil 4.92.	MEMO kullanıldığı durumda %20 oranında atık ilavesinin kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	141
Şekil 4.93.	MEMO kullanıldığı durumda B1 boyutlu atığın kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	142
Şekil 4.94.	MEMO kullanıldığı durumda B2 boyutlu atığın kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	142
Şekil 4.95.	MEMO kullanıldığı durumda B3 boyutlu atığın kompozitlerin $\tan \delta$ değerine etkisi .....	143
Şekil 4.96.	MEMO kullanıldığı durumda B1 boyutlu atığın kompozitlerin HDT değerine etkisi .....	144
Şekil 4.97.	MEMO kullanıldığı durumda B2 boyutlu atığın kompozitlerin HDT değerine etkisi .....	145
Şekil 4.98.	MEMO kullanıldığı durumda B3 boyutlu atığın kompozitlerin HDT değerine etkisi .....	146
Şekil 4.99.	MEMO kullanıldığı durumda atık oranının matris-elyaf etkileşimine etkisi .....	147
Şekil 4.100.	MEMO kullanıldığı durumda tane boyutunun matris-elyaf etkileşimine etkisi .....	147
Şekil 4.101.	B1 boyutunda atık kullanıldığı durumda kimyasal modifikasyonun yapısal analizi için FTIR spektrumları.....	148
Şekil 4.102.	B2 boyutunda atık kullanıldığı durumda kimyasal modifikasyonun yapısal analizi için FTIR spektrumları.....	149
Şekil 4.103.	B3 boyutunda atık kullanıldığı durumda kimyasal modifikasyonun yapısal analizi için FTIR spektrumları.....	149
Şekil 4.104.	MEMO kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı.....	150
Şekil 4.105.	MEMO kullanıldığı durumda B1 boyutunda atığın kompozitlerin sürünme davranışına etkisi .....	151
Şekil 4.106.	MEMO kullanıldığı durumda B2 boyutunda atığın kompozitlerin sürünme davranışına etkisi .....	151
Şekil 4.107.	MEMO kullanıldığı durumda B3 boyutunda atığın kompozitlerin sürünme davranışına etkisi .....	152
Şekil 4.108.	MEMO kullanıldığı durumda %5 oranında atık ilavesinin kompozitlerin sürünme davranışı.....	152
Şekil 4.109.	MEMO kullanıldığı durumda %10 oranında atık ilavesinin kompozitlerin sürünme davranışı.....	153

Şekil 4.110. MEMO kullanıldığı durumda %15 oranında atık ilavesinin kompozitlerin sürünme davranışı.....	153
Şekil 4.111. MEMO kullanıldığı durumda %20 oranında atık ilavesinin kompozitlerin sürünme davranışı.....	154



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları.....	3
Tablo 1.2. Sentezinde kullanılan aside göre elde edilen polyeşterlerin belirleyici özellikleri .....	9
Tablo 1.3. Sentezinde kullanılan alkole göre elde edilen polyeşterlerin belirleyici özellikleri .....	9
Tablo 1.4. CTP Kullanım alanları .....	29
Tablo 1.5. Mekanik geri dönüşüm prosesinin avantajları ve dezavantajları.....	33
Tablo 1.6. Yakma prosesinin avantajları ve dezavantajları .....	34
Tablo 1.7. Akışkan yatak prosesinin avantajları ve dezavantajları.....	36
Tablo 1.8. Piroliz yönteminin avantajları ve dezavantajları .....	38
Tablo 1.9. Superkritik sıvılarla geri dönüşümün avantajları ve dezavantajları .....	39
Tablo 3.1. Tez kapsamında kullanılan malzemelerin genel özellikleri, kimyasal yapıları ve tedarik edildikleri firmalar .....	65
Tablo 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan değişkenler ve seviyeleri.....	67
Tablo 4.1. Atık ilavesinin reçinenin reolojik ve ısı özelliklerine etkisi .....	76
Tablo 4.2. Başlatıcı miktarının reçine kür profiline etkisi .....	77
Tablo 4.3. Kompozitlerin elyaf içeriği.....	97
Tablo 4.4. Kompozit örneklerin 120 gün sonundaki sürünme miktarları.....	117
Tablo 4.5. Kompozit örneklerin 120 gün sonundaki sürünme miktarları.....	155

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E'	: Depo modülü (GPa)
E''	: Kayıp modül (GPa)
E <sub>c</sub>	: Sürünme modülü (MPa)
F <sub>s</sub>	: Kısa kiriş dayanımı (MPa)
Tan δ	: Sönümlenme faktörü
T <sub>g</sub>	: Camı geçiş sıcaklığı (°C)
T <sub>m</sub>	: Erime sıcaklığı (°C)

### Kısaltmalar

AAP	: Acetyl Acetone Peroxide (Asetil Aseton Peroksit)
AMMO	: 3-Aminopropiltrimetoksisilan
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
BMC	: Bulk Molding Compound (Sıcak Pres Karışımı)
BPO	: Benzoyl Peroxide (Benzoil Peroksit)
BZA	: Benzyl Alcohol (Benzil Alkol)
CTP	: Cam Elyaf Takviyeli Polyester
DGMM	: Diethyleneglycol Monomethylether (Dietilenglikol Monometileter)
DMAP	: 4-(dimetilamino)pirindin
DMA	: Dynamic Mechanical Analysis (Dinamik Mekanik Analiz)
DMC	: Dough Molding Compound (Sıcak Pres Hamuru)
DSC	: Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri)
EGMA	: Ethylene Glycol Monoallyl Ether (Etilen Glikol Monoalil Eter)
EN	: European Norm (Avrupa Normu)
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)
HDT	: Heat Deflection Temperature (Yük Altında Eğilme Sıcaklığı)
IITRI	: Illinois Institute of Technology Research Institute
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)
KTP	: Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
MEK-P	: Methyl Ethyl Ketone Peroxide (Metil Etil Keton Peroksit)
MEMO	: 3-Metakriloksipropiltrimetoksisilan
PA	: Polyamide (Poliamid)
PAH	: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar)
PAI	: Polyamide Imide (Poliamid İmid)
PE	: Polyethylene (Polietilen)
PEEK	: Polyether Ether Ketone (Polieter Eter Keton)

PEI	: Polyetherimide (Polieterimid)
PP	: Polypropylene (Polipropilen)
PPS	: Polyphenylene Sulfide (Polifenilen Sülfid)
RIM	: Reaction Injection Molding (Reaksiyonlu Enjeksiyon Kalıplama)
RTM	: Resin Transfer Molding (Reçine Transfer Kalıplama)
SEM	: Scanning Electron Misroscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SMC	: Sheet Molding Compound (Sıcak Pres Pestili)
TS	: Türk Standardı
UPE	: Unsaturated Polyester Resin (Doymamış Polyester Reçine)
VTMO	: Viniltrimetoksisilan
WPC	: Wood Plastic Composite (Ahşap Plastik Kompozit)



# CAM ELYAF TAKVİYELİ POLYESTER (CTP) ATIKLARININ GERİ KAZANIMI VE YENİ HAZIRLANAN KOMPOZİTLERDE DEĞERLENDİRİLMESİ

## ÖZET

CTP esaslı malzeme üretimi sırasında, kenar kesimi ve şekillendirme gibi aşamalarda önemli miktarda atık ortaya çıkmaktadır. Günümüzde kompozit pazarının büyümesi, yakılmayı veya değerlendirilmeyi bekleyen ömrünü tamamlamış kompozit miktarını da giderek arttırmaktadır. Literatürde atık CTP'nin yeniden kullanımına yönelik çalışmalar, elyafın geri kazanılması ve atığın öğütülerek başka kompozit matrislerde doğrudan kullanılması üzerine yoğunlaşmaktadır; CTP atıklarının aynı yapıda kompozitlerde kullanımına yönelik çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada, atık CTP'nin yeni üretilen CTP esaslı ürün içinde, uygun tane büyüklüğü ve atık oranı seçilerek ve silan varlığında uyumluluğunun geliştirilmesi sonrasında kullanılarak katma değer artırılması amaçlanmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde el yatırması ile üretilen kompozitlerde, 3 farklı atık tane boyutu, 4 farklı atık oranı (%5, %10, %15 ve %20) ve 4 farklı elyaf katman sayısı (5, 6, 7, 8) değerlendirilmiştir. İkinci bölümde ise, matris-atık ve matris-elyaf arayüzey etkileşimini iyileştirmek için kullanılan silan tipinin ve oranının etkileri araştırılmıştır. Üretilen kompozitlerin fiziksel, mekanik, ısıl, dinamik-mekanik, sürünme, yapısal ve morfolojik özellikleri incelenerek, atığın her iki durumda da yeni kompozit üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Atık içeren reçinenin kür profili, eşdeğer başlatıcı konsantrasyonu için sek reçineye benzerdir; atık ilavesinin reçinenin tiksotropisini arttırması ve lineer büzülme azaltması ise atık ilavesinin katkıları arasındadır. Atık oranı ve tane büyüklüğünün artışı ile mekanik özelliklerde kayıp meydana gelirken, elyaf miktarına göre normalizasyon sonrası özellikle büyük atık tane boyutu durumunda, atık içermeyen kompozitlere yakın mekanik özellikler elde edilmiştir.  $T_g$  değerlerindeki artış, atık kullanımı ile kompozitteki zincir hareketliliğinin kısıtlandığını ve servis sıcaklıklarının arttığını göstermektedir. Silan bağlayıcı varlığında, hem mekanik hem de ısıl özelliklerde iyileşme gözlenmiş, bulgular yapısal ve morfolojik analizlerle desteklenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Arayüzey Modifikasyonu, Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP), Doymamış Polyester (UPE), Geri Dönüşüm, Geri Kazanım.



## **RECYCLING AND REUSING GLASS FIBER REINFORCED POLYESTER (GFRP) WASTES IN ITS OWN COMPOSITES**

### **ABSTRACT**

By the production process of glass fiber reinforced polymers (GFRP), final product waste arises at different stages such as edge trimming and shaping. Besides, growth of the composite market induces an increase in the amount of end-of-life composite wastes to be incinerated or recycled. In literature, although there are many studies where only the fiber is recycled or the waste is grinded and used directly in similar composite matrices, only limited number of studies met where GFRP wastes are used in its own production steps. In this study, it was aimed to increase the added value of the waste GFRP by using in new GFRP based products after selecting the appropriate grain size and waste ratio and/or using it after enhanced the matrix-waste interaction. In the first stage of the study, 3 different waste particle sizes, 4 different waste rates (5%, 10%, 15% and 20%) and 4 different fiber layers (5, 6, 7, 8) were evaluated in composite samples produced by hand lay-up technique. In the second stage, effects of silane type and ratio were investigated for the best matrix-waste interface. Physical, mechanical, thermal, dynamic-mechanical, creep, structural and morphological properties of the composites were tested to clarify the effects of waste in new composites in the absence and presence of silane coupling agent. Rheological behavior of waste containing resin can be maintained almost as the same as fresh resin for equivalent initiator concentration. Besides, increase in thixotropy and significant decrease in linear shrinkage were considered as benefits of the waste in new composite samples. While the loss of mechanical properties occurred with the increase in waste ratio and grain size, similar results have been obtained by calculating the retention after normalization to constant fiber amount. Increase in glass transition temperature indicated that the chain mobility in the composite was restricted and service temperature of the composites increased with the use of waste. Both mechanical and thermal properties improved with silane incorporation coinciding with structural and morphological properties.

**Keywords:** Interfacial Modification, Glass Fiber Reinforced Polyester (GFRP), Unsaturated Polyester (UPE), Recycling, Recovery.

## GİRİŞ

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla sayıdaki malzemenin, en iyi özelliklerini bir araya toplamak ya da ortaya yeni bir özellik çıkarmak amacıyla, bu malzemelerin makro seviyede birleştirilmesiyle oluşan malzemelerdir (Miracle ve Donaldson, 2001).

Elyaf takviyeli polimer kompozitler güçlü, hafif ve dayanıklı malzemelerdir ve son yıllarda bu malzemelerin dünya çapındaki üretim hacmi ve tüketimi, başta otomotiv olmak üzere inşaat, savunma ve rüzgâr enerjisi sektörlerinde artış göstermiştir. Bununla birlikte yapılan market tahminlerine göre üretim ve tüketim miktarları atmaya devam edecektir (URL-1; Iwaya ve diğ., 2008).

Kullanım aşamasındaki sürdürülebilirlik, geleneksel malzemeler yerine kompozitlerin seçiminde itici bir güç yaratmaktadır. Kompozit yapılar, düşük bakım gereksinimleri, korozyon direnci ve dayanıklılığı ile birlikte uzun bir hizmet ömrü sunarlar. Hafif kompozitler, özellikle otomotiv sektöründe kullanıldığında ömrü boyunca daha düşük enerji tüketimi sağlarlar. Yenilenebilir enerji üretimi için rüzgâr türbinlerinde kompozit malzemeler kullanılır. Tüm bunlara rağmen geri dönüşüm/kazanım faaliyetlerinin sınırlı olması kompozit malzemeler için döngüsel bir ekonomi yaratmayı zorlaştırır (URL-2).

CTP üretimi sırasında, kenar kesimi, şekillendirme ve delme gibi aşamalarda son ürün atıkları ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, kompozit pazarının büyümesi, kompozit üretim oranlarının ve kompozit yapılara olan talepteki artış, yakılmayı veya geri dönüşümü bekleyen ömrünü tamamlamış kompozit miktarının giderek artması ile sonuçlanmaktadır (Krauklis ve diğ., 2021). Şimdiye kadar üretim sırasında ortaya çıkan, hurdaya ayrılan veya ömrünü tamamlamış termoset kompozitlerin bertarafında en yaygın kullanılan yöntemler genellikle boyutları küçültüldükten sonra atık sahalarına gömme ve yakma işlemleri olmuştur. Yakılarak bertaraf esnasında mikronize karbon partikülleri, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), CO gibi kanserojen olabilen atıklar ve küresel ısınmaya yol açan CO<sub>2</sub> gazı açığa çıkmaktadır.

Gömme işlemleri ise toprağın kirlenmesine sebep olmaktadır (Gharde ve Kandasubramanian, 2019). Bununla birlikte, atık yönetimi ile ilgili mevcut ve gelecek mevzuatlar kapsamında artan maliyetler sebebiyle bu uygulamalar gelecekte kullanılmayacak hale gelecektir (Conroy ve diğ., 2006).

Bu çalışmada, öğütölmüş atık CTP'nin yeni üretilen CTP esaslı ürün özellikleri üzerine etkileri incelenmiş ve bu amaçla kullanılan atık, Polin Su Parkları A. Ş. firmasından temin edilmiştir.

Çalışmanın 1. bölümünde, kompozit malzemeler ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Çalışmada kullanılan malzemeler, silan bağlayıcı ile arayüzey modifikasyonu, kompozit bileşenlerinin ve kompozitlerin karakterizasyonu için kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Çalışmanın 2. bölümünde, yapılan literatür araştırması sonucunda elde edilen bilgiler paylaşılmış ve yapılan çalışmanın özgün yanı bildirilmiştir. Çalışmanın 3. bölümünde, çalışmada kullanılan malzemeler tanıtılmış, örnek hazırlama ve karakterizasyon yöntemleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Bölüm 4'te, atığın doğrudan öğütölerek yeni kompozitlerde kullanıldığı durumda ve atık-matris arayüzey etkileşimini iyileştirmek için kimyasal modifikasyon yapıldığı durumda elde edilen bulgular ve sonuçlar tartışılmıştır. Bölüm 5'te ise çalışmada elde edilen tüm sonuçlar özetlenmiştir.

Bu çalışmada CTP atıklarının, yeni üretilen CTP esaslı ürün içinde, uygun atık oranı, tane büyüklüğü seçilerek ve/veya uyumluluğunun geliştirilmesi yoluyla matris-atık etkileşimi artırıldıktan sonra kullanımı ile, atıklara yüklenen katma değerin artırılması ve olumsuz çevresel etkilerinin azaltılması amaçlanmaktadır. Hazırlanan kompozitlerin yük taşımayacak animasyon/eğlence ürünlerinde kullanımı hedeflenmiştir. Deneysel çalışmanın ilk aşamasında atık tane boyutu, atık miktarı, elyaf katman sayısı değişkenler kullanılarak üretilen atığın kompozitlerin fiziksel, mekanik, ısıl, dinamik mekanik, sürünme özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Matris-atık ve matris-elyaf arayüzey etkileşimini iyileştirmek için kullanılan silan tipinin ve oranının etkileri ise çalışmanın ikinci aşamasında incelenmiştir.

## 1. TEORİK BİLGİ

### 1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, bir ara yüze sahip iki veya daha fazla farklı malzemenin makroskopik ölçekli bir kombinasyonudur. Kompozitler sadece iyi yapısal ve mekanik özellikleri için değil, aynı zamanda hedef elektriksel, ısıl, tribolojik ve çevresel özellikleri karşılamak üzere de birçok uygulamada kullanılmaktadırlar.

Tablo 1.1. Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları (Peters, 1998)

Avantajları	Dezavantajları
Hafiflik (Yüksek mukavemet/ağırlık oranı)	Yüksek hammadde maliyeti
Ayarlanabilir özellikler (Mukavemeti veya sertliği yük yönünde olacak şekilde ayarlanabilir)	Bazı yönlenmelerde zayıf mekanik dayanım
Yük paylaşım mekanizması (Ör. elyaftan elyafa)	Düşük toklukta zayıf matris
Uzun ömürlülük	İmha ve yeniden kullanımın kısıtlı olması
Daha düşük üretim maliyetleri	Başka bir malzeme ile birleştirilmede zorluk
Doğal sönümlenme kabiliyeti	Mekanik karakterizasyonun diğer birçok malzemeye göre daha zor olması
İyi ısıl ve elektriksel iletkenlik	Çevresel kararlılık

Modern kompozit malzemeler, genellikle bir uygulama alanına yönelik belirli bir özellik dengesi elde etmek için optimize edilirler. Kompozit olarak tanımlanabilecek geniş malzeme yelpazesi ve geniş kullanım alanı göz önüne alındığında, tek, basit ve kullanışlı bir tanım yapmak oldukça zordur. Bununla birlikte, yaygın ve pratik bir tanım olarak, kompozit malzemeler, iki veya daha fazla sayıdaki malzemenin, en iyi özelliklerini bir araya toplamak ya da ortaya yeni bir özellik çıkarmak amacıyla, bu malzemelerin makro seviyede birleştirilmesiyle oluşan malzemelerdir. Elde edilen kompozit malzeme, bileşiminde yer alan malzemelerden tek başına üstün özelliklere sahiptir. Kompozit yapısında kullanılan malzemelerin birbiri içerisinde çözünmemesi

gereklidir. Geliştirilmiş yapısal özellikler, genellikle bir yük paylaşım mekanizması ile sağlanır. Yüksek yapısal verimliliğin yanı sıra, diğer fonksiyonel özellikler için optimize edilebilirler (Miracle ve Donaldson, 2001). Kompozit malzemelerin bazı avantaj ve dezavantajları Tablo 1.1’de özetlenmiştir.

## **1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması**

Kompozit malzemeler genellikle iki farklı şekilde sınıflandırılabilir. Bunlardan birincisi matris malzemesine göre yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmaya göre kompozit malzemeler; polimerik matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üç gruba ayrılırlar (Miracle ve Donaldson, 2001; Peters, 1998). Polimerik matrisli kompozitlerde termoset ya da termoplastik yapıda matris malzemesi kullanılabilir ve takviye edilerek polimere rijitlik (sıkılık) ve dayanım kazandırılır. Metal matrisli kompozitler mekanik dayanımı yüksek malzemelerdir. Toklukları ve kullanım sıcaklıkları genel olarak birçok malzemeden daha yüksektir. Fakat erime sıcaklıkları ( $T_m$ ) da çok yüksek olduğu için üretimleri güçtür. Seramik matrisli kompozitler ise genellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılırlar. Dayanımları yüksektir fakat gevrek malzemelerdir; bu sebeple genellikle elyaflar ile takviye edilerek toklukları artırılır (URL-3).

Kompozit malzemelerin ikinci sınıflandırma yöntemi ise takviye türüne göre değerlendirilmesidir. Takviye türüne göre kompozit malzemeler; elyaf takviyeli, parçacık takviyeli ve tabakalı kompozitler olmak üzere üç grupta incelenir. Elyaf takviyeli kompozitlerde matristen dayanım beklentisi çok yüksek değildir. Matris, elyafları bir arada tutar, çevresel etkilerden korur ve yükleri elyaflara iletir. Bu tip kompozitlerde kuvvetin tamamı elyaf tarafından taşınır. İhtiyaca göre sürekli ve süreksiz elyaf kullanılabilir. Elyaf takviyeli kompozitlerde mukavemet ve sertlik, elyaf oryantasyonu ile kontrol edilebilir. Parçacık takviyeli kompozitlerde ise yükü matris ve takviye birlikte taşır. Parçacık takviyeler, yönlendirilemediği ve mekanik özelliklerde önemli bir artış sağlamadıkları için kullanım alanları kısıtlıdır. Tabakalı kompozitlerde farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir (Miracle ve Donaldson, 2001; Peters, 1998).

### **1.2.1. Polimerik matrisli elyaf takviyeli kompozit malzemeler**

En yaygın kullanılan ileri kompozitler, elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerdir. Polimerik matrisli kompozitler; termoset veya termoplastik yapıda, tek ya da çok yönde takviye özelliği sağlayacak şekilde, çeşitli takviye malzemelerinden yeterli miktarda (uzunluk ve ağırlıkça) katılmış polimerik matrislerdir. Polimerik kompozit malzeme eldesinde en sık kullanılan termoset reçineler doymamış polyester (UPE), epoksi, vinilester, fenolik bileşiklerdir ve termoplastik matrisler ise polietilen (PE), polipropilen (PP), polieter eter keton (PEEK) ve polifenilen sülfid (PPS)'dür. Matrisin elyafları bir arada tutmak, onları çevresel etkilerden ve kullanıma bağlı hasarlardan korumak ve yükü elyaflara dağıtmak gibi fonksiyonları vardır. Matrisler elyaflara göre daha düşük mekanik özellikler göstermelerine rağmen eğme modülü ve dayanımı, kayma (shear) modülü ve dayanımı, basma dayanımı, ısıl genleşme katsayısı, ısıl direnç ve yorulma dayanımı gibi birçok mekanik özelliği etkilerler. Elyaf takviyesi ise kuvveti taşımak için kullanılır. En yaygın kullanılan elyaf türleri; cam, karbon, bor ve aramid elyaf olarak sıralanabilir. Elyafların takviye performansını, miktarı, uzunluğu, yönlenmesi, malzemesi ve elyaf üzerindeki bağlayıcının reçine ile uyumu etkiler. Yükün matristen elyaflara ne kadar iyi transfer edileceğini elyaf/matris arayüzeyi belirler. (Miracle ve Donaldson, 2001; Peters, 1998).

Başlıca takviye tipleri fitil, öğütülmüş lifler, kırılmış lifler, sürekli keçe, kırılmış demetten keçe veya ısı ile şekil verilebilen keçeleri kapsamaktadır. Çok yönlü takviye malzemeleri, sürekli elyafın dokunarak, örülerek veya dikilerek kumaş veya levha şekline getirilmiş diğer türlerinden oluşmaktadır. Tek yönlü takviyeler ise; şeritleri, demetleri, tek yönlü kumaşları, tek veya çok uçlu fitilleri kapsamaktadır (URL-3).

#### **1.2.1.1. Cam elyaf takviyeli polyester (CTP)**

Cam elyafın en önemli avantajı, yüksek mekanik mukavemeti ve kırılmaya karşı gösterdiği dirençtir; ancak ısı ve yangına dayanıklılık, kimyasal direnç, nem direnci, ısıl ve elektriksel özellikler de kullanım nedenleri olarak gösterilmektedir. Öncelikle düşük maliyeti nedeniyle, açık ara en yaygın kullanılan elyaf türüdür.

Doymamış polyester reçine 1940'larda keşfedilen ikinci sentetik termoset reçinedir ve kompozit üretiminde yaygın bir kullanımı vardır. Polyesterler, oda sıcaklığında

başlatılabilen bir ekzotermik reaksiyonla sonuçlanan bir başlatıcı (genellikle bir peroksit) aracılığıyla kürlenir (Peters, 1998).

Uygulamalar incelendiğinde epoksi reçineyi takviye etmek için genellikle karbon elyaf kullanılırken, doymamış polyester reçinede ise cam elyaf kullanıldığı görülmüştür. Polyester/cam elyaf birleşimi ile elde edilen kompozitlerin diğer termoset/elyaf kompozitlere kıyasla daha ekonomik olduğu görülmüştür. Bu durum cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzemelerin gelişimini hızlandırmıştır. CTP; cam elyafı ile takviye edilerek fiziksel ve mekanik dayanımı artırılmış farklı çevresel ortamlara dirençli olan polimerik matristen oluşan kompozit malzemelerin genel adıdır (İlhan ve Feyzullahoğlu, 2019). Cam elyaf takviyeli plastik terimi son dönemde cam elyaf takviyeli polyester ifadesi ile eş anlamlı hale gelmiştir (URL-3).

CTP malzemeler, hafiflik, yüksek korozyon dayanımı, iyi dielektriklik vb. özellikleri nedeniyle inşaat, otomotiv, elektrik-elektronik, havacılık, denizcilik gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (İlhan ve Feyzullahoğlu, 2019).

### **1.3. CTP Eldesinde Kullanılan Temel Bileşenler**

CTP üretiminde temel girdiler doymamış polyester reçine ve farklı tiplerde cam elyafıdır. Bu iki bileşenden hazırlanan harman, uygun başlatıcı eklenerek yapılan çaprazbağlama işlemi ile hedeflenen kompozit malzeme haline dönüştürülür. Tercihen ve ihtiyaca göre kompozit malzemeye estetik açıdan güzel bir görünüm sağlamak ve çevresel dayanımı arttırmak için jelkot uygulaması da yapılabilir. Bu bölümde, doymamış polyester reçine, doymamış polyester reçinede silan bağlayıcı modifikasyonu, başlatıcılar, cam elyafı ve jelkot hakkında temel bilgiler verilmiştir.

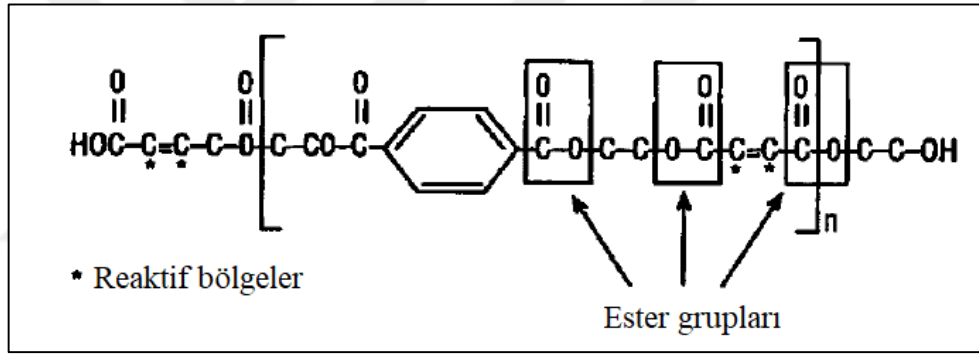
#### **1.3.1. Doymamış polyester reçine (UPE)**

Kompozit üretiminde kullanılan reçineler, termoplastik reçineler ve termoset reçineler olmak üzere iki başlık altında değerlendirilebilir. Termoplastik reçineler genellikle kimyasal ve darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılır. Geri dönüştürülebilme avantajları vardır. En iyi bilinenleri poliamid (PA), PPS, PEEK, PP, PE, polieterimid (PEI) ve poliamid imid (PAI)'dir. Termoset reçineler ise dayanıklı, sert ve parlak olmaları gibi avantajları dolayısıyla tercih edilir. En yaygın kullanılan

termoset reçineler, doymamış polyesterler, epoksiler, vinilesterler, poliüretanlar ve fenolik reçinelerdir (Miracle ve Donaldson, 2001). Tez çalışmasında kullanılan malzemeler arasında yer alan doymamış polyester reçine hakkında temel bilgiler aşağıda verilmiştir.

Doymamış polyester reçineler, doymuş asit, doymamış asit ve dialkollerin tepkimesiyle oluşan makromoleküllerdir. Doymamış polyesterlerin kimyasal yapısında ester grupları ve doymamış reaktif gruplar (C=C) bulunur (Şekil 1.1).

Üretim sonrası reçineyi proses edilebilir hale getirebilmek için stiren gibi monomerler içerisinde çözelti halinde üretilirler. UPE, düşük viskozitesi, kolay işlenebilirliği, düşük maliyeti ve hızlı kürlenme özelliği sayesinde endüstriyel uygulamalarda yaygın şekilde kullanılır (Ratna, 2009).



Şekil 1.1. Doymamış polyesterin kimyasal yapısı (Campbell, 2004)

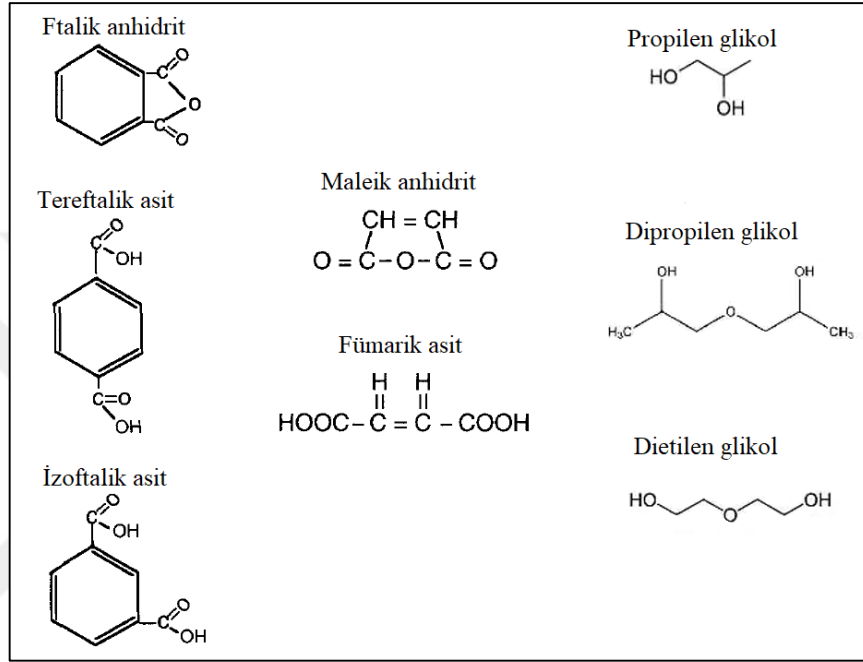
Dibazik asit veya anhidritler, yapılarında peroksit başlatıcılar ile reaksiyona girecek çift bağ bulunmaması sebebi ile doymuş asit ismini alırlar. Ancak, molekül içinde aromatik halka bulunabilir. Doymamış polyester üretiminde en sık kullanılan doymuş asitler, ortoftalik anhidrit (ftalik anhidrit), izoftalik asit, teraftalik asit ve adipik asittir (Ratna, 2009; URL-3).

Doymamış asitler ise polyesterin çaprazbağ yapmasını sağlar. Kullanım oranı ne kadar yüksek ise çaprazbağlanma derecesi o denli yüksek olur. Ayrıca bu oranın artması yük altında deformasyon sıcaklığını (HDT) yükseltir fakat bununla birlikte elastikiyeti (uzamayı) azaltır. Doymamış asit oranı reçinenin reaktivitesi ile de ilişkilidir; ne kadar yüksek olursa o kadar reaktif bir reçine elde edilir. En çok kullanılan doymamış asitler, maleik asit ve fümariik asittir (Ratna, 2009; URL-3).



Dialkoller ise, asitlerle tepkimeye girerek esterleşme reaksiyonunun gerçekleştirilmesi için kullanılırlar. En sık kullanılan diglikoller, neopentil glikol, propilen glikol ve etilen glikoldür (Ratna, 2009; URL-3).

Doymamış polyester üretiminde kullanılan bileşenlerin bazılarının kimyasal yapıları Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. Doymamış polyester eldesinde en sık kullanılan monomerlerin kimyasal yapıları (Peters, 1998)

Doymamış polyester reçine üretiminde monomerler iki amaçla kullanılır: (1) Reçinenin viskozitesini düşürecek şekilde bir çözücü fonksiyonu göstermesi, (2) Polyester zincirlerinin çaprazbağ ile üç boyutlu bir ağ şeklinde birbirine bağlanmasını sağlaması. Bu sebeple düşük viskozitesi, düşük fiyatı ve kolay bulunabilirliği nedeniyle en çok kullanılan monomer stirendir. Daha berrak ve UV dayanımı istenen reçinelerde monomer olarak metil metakrilat ve n-bütül metakrilat, alev geciktiricilik istendiğinde ise vinil tolüen ya da klorostiren kullanılabilir (Campbell, 2004).

Asit ve alkoller doymamış polyester reçinenin fiziksel ve mekanik özelliklerine etki ederler. Uzun bir dialkol zinciri reçineye elastikiyet sağlar. Doymamış asit miktarı arttıkça, ısıl dayanım ve sertlik artar, elastikiyet azalır. Doymuş asidin artması ise yine elastikiyeti artırır (Wang ve diğ., 2011). Tablo 1.2’de ve Tablo 1.3’te, UPE sentezinde

kullanılan asitlerin ve alkollerin çeşitlerine göre elde edilen polyesterlerin belirleyici özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.2. Sentezinde kullanılan aside göre elde edilen polyesterlerin belirleyici özellikleri (URL-3)

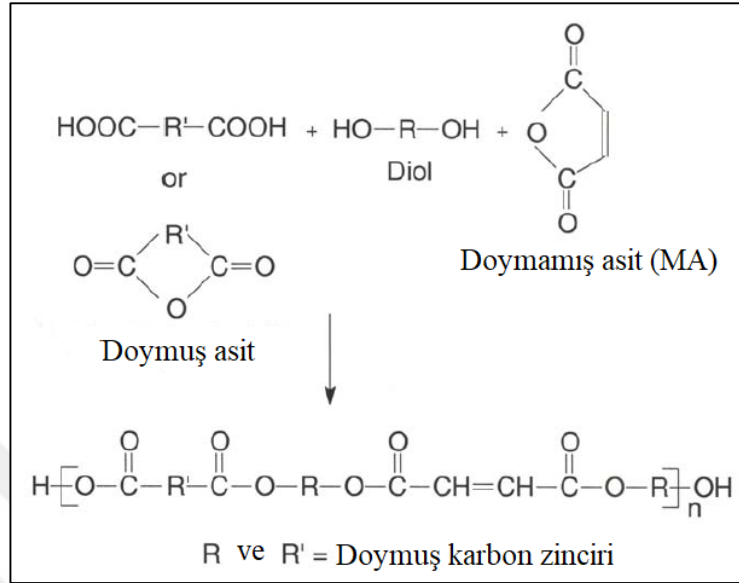
<b>Diasitler/Anhidritler</b>	<b>Belirleyici Özellikleri</b>
Maleik/Fumarik	Doymamış (çağrazbağ yeri)
Ortoftalik	Düşük maliyet, stiren uyumluluğu
İzoftalik	Tokluk, su/kimyasal dayanımı
Teraftalik	Yüksek HDT
Adipik	Esneklik, tokluk
Bromlanmış	Yanma dayanımı

Tablo 1.3. Sentezinde kullanılan alkole göre elde edilen polyesterlerin belirleyici özellikleri (URL-3)

<b>Glikoller</b>	<b>Belirleyici Özellikleri</b>
Etilen	Düşük maliyet, rijitlik
Propilen	Yüksek stiren uyumluluğu
Dipropilen	Esneklik, tokluk
Dietilen	Esneklik
Neopentil	UV dayanımı, su/kimyasal dayanımı
Bisfenol-A	Su/kimyasal dayanımı, mukavemet

Polyesterler, kondenzasyon polimerizasyonu ile elde edilirler. Diasitler her iki ucunda aktif –OH grubu, glikoller ise her iki ucunda –H grupları bulundurulur. Diasitlerin ve glikollerin uçlarındaki –OH ve –H grupları bir araya gelerek su (H<sub>2</sub>O) açığa çıkarılırlar. Reaksiyon süresince açığa çıkan su polimerden ayrılır ve yoğunlaştırılır. Sentezdeki en büyük maliyet vakum ve sıcaklık ile suyun uzaklaştırılmasıdır. Polimerin istenilen molekül ağırlığına ulaşması için uzun kürlenme süreleri gereklidir. Reaksiyon boyunca asit sayısı ve viskozite değerleri takip edilir. Asit sayısı azaldıkça viskozite

artar ve istenen değerlere ulaşıldığında reaksiyon sonlanır (Ratna, 2009). Şekil 1.3'te doymamış polyester reçine sentezi için reaksiyon şeması verilmiştir.



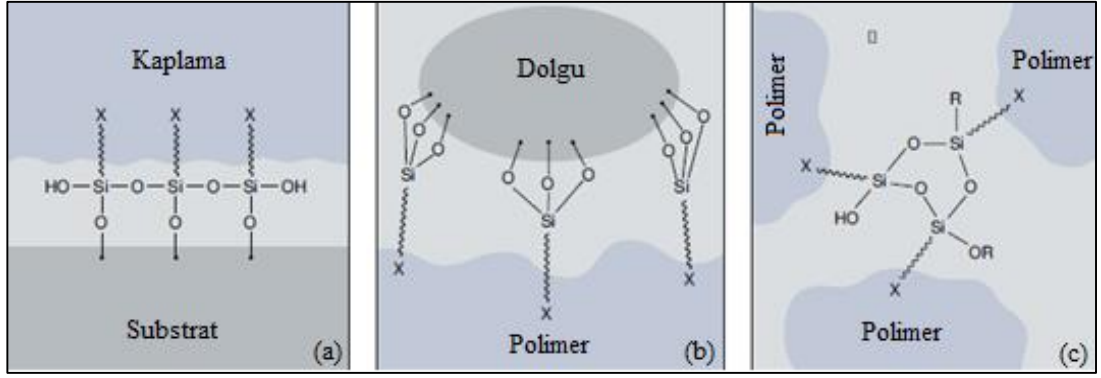
Şekil 1.3. UPE sentezi için reaksiyon şeması (Ratna, 2009)

UPE üretiminde kullanılan diğer katkı malzemeleri arasında inhibitörler, hızlandırıcılar, promotörler, solvent buharlaşma engelleyicileri, iç kalıp ayırıcılar, tiksotropi düzenleyiciler, dolgu maddeleri, stabilizatörler, alev geciktiriciler ve pigmentler sayılabilir (URL-3).

### 1.3.1.1. Doymamış polyester reçinede silan bağlayıcı modifikasyonu

Silan bağlama ajanları, hem organik hem de inorganik malzemelerle bağlanabilen fonksiyonel gruplar içeren bileşiklerdir. Bir silan bağlayıcı, organik malzemeleri inorganik malzemelere bağlayan bir tür aracı görevi görür. Silan bağlayıcılar, bu işlevleri sayesinde kompozit malzemelerin mekanik mukavemetinin iyileştirilmesi, yapışmanın iyileştirilmesi ve reçine, yüzey modifikasyonu gibi uygulamalarda kullanılabilirler (URL-4).

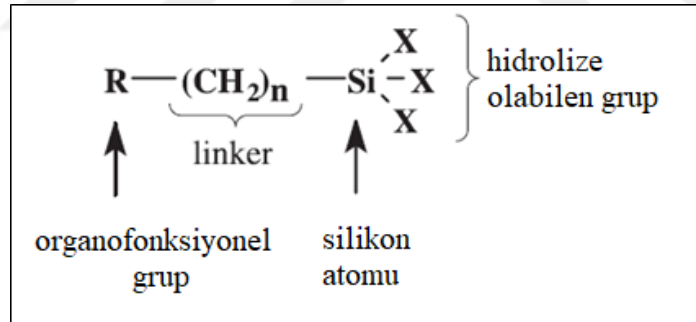
Silanların kullanıldığı ana uygulama alanları; (1) Yapışmanın iyileştirilmesi, (2) Yüzey modifikasyonu ve (3) Polimerlerde çaprazbağlamadır. Şekil 1.4'te silan kullanıldığı durumda (a) Yapışma, (b) Yüzey modifikasyonu ve (c) Çaprazbağlanma reaksiyonlarının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.4. Silan kullanımında (a) Yapışma, (b) Yüzey modifikasyonu ve (c) Çaprazbağlanma reaksiyonlarının şematik gösterimi

Silan bağlayıcıların sağladığı diğer faydalar; inorganik bileşende daha iyi ıslanma sağlamaları, karışım viskozitesini düşürmeleri, daha pürüzsüz bir yüzey eldesi sağlamaları, termoset kompozitlerde daha az katalizör kullanımına imkân sağlamaları, fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirmeleri ve kimyasal dayanımı iyileştirmeleri şeklinde sayılabilir (URL-5).

Şekil 1.5'te bir silan bağlayıcının temel kimyasal yapısı gösterilmektedir.

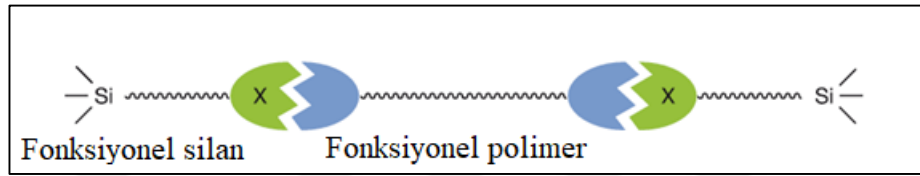


Şekil 1.5. Silan bağlayıcıların temel kimyasal yapısı

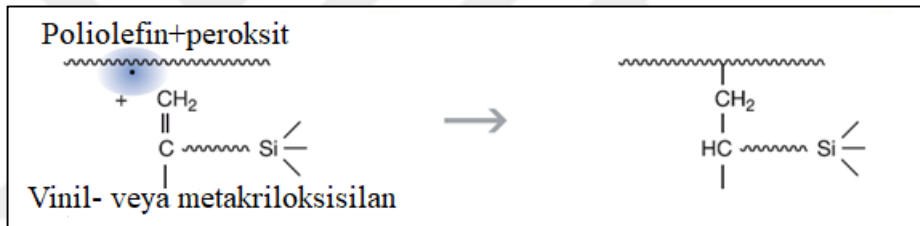
Bir silan bağlama ajanı için verilen genel formül tipik olarak iki işlevsellik (fonksiyonellik) sınıfını içerir. X, etoksi, epoksi, metoksi, alkoksi, asiloksi, halojen veya amin gibi hidrolize edilebilir bir gruptur. Hidrolizin ardından, siloksan bağları oluşturmak için diğer silanol gruplarıyla bağlanabilen reaktif bir silanol grubu oluşur. X grubu, silanol grupları ile reaksiyona girerek dolgu ile kimyasal olarak tutunur. R, istenen özellikleri veren bir işlevsellikte ve hidrolize olmayan amino, metakriloksi, merkapt ve vinil gibi bir organofonksiyonel grubu temsil etmektedir. Bu gruplar, polimer matrisi ile etkileşime girerek silan bağlayıcının polimere tutunmasından sorumludurlar (URL-6; Ünügül, 2020).

Silan seçiminde 4 ana unsur önemlidir; hidroksil gruplarının konsantrasyonu, hidroksil grubun tipi, oluşan bağın hidrolitik kararlılığı ve substratın fiziksel boyutları (URL-5).

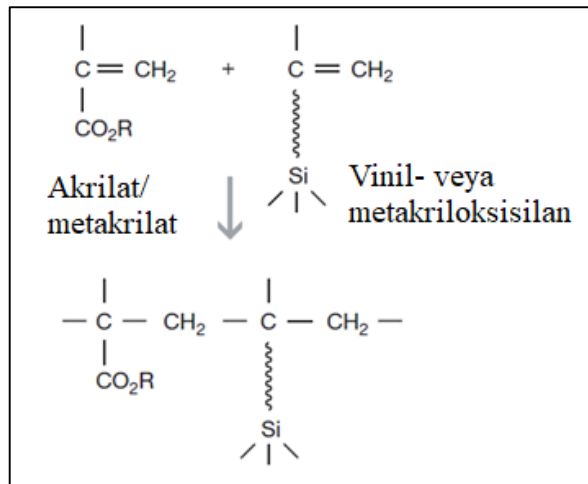
Organofonksiyonel silanların organik polimerlere bağlanma mekanizmaları, polimerlerin kendileri kadar çeşitlidir. En önemli mekanizmalar şunlardır; (1) Uç gruptan tutunma (Endcapping), (2) Radikal aşılama, (3) Kopolimerizasyon. Şekil 1.6'da uç gruptan tutunma, Şekil 1.7'de radikal aşılama ve Şekil 1.8'de kopolimerizasyon mekanizmalarının şematik gösterimleri verilmiştir.



Şekil 1.6. Uç gruptan tutunma mekanizması (URL-5)



Şekil 1.7. Radikal aşılama mekanizması (URL-5)



Şekil 1.8. Kopolimerizasyon mekanizması (URL-5)

Her üç yöntemle de silanla modifiye edilmiş polimerler elde edilir. Bu polimerler daha sonra kalan Si-alkoksi gruplarının çaprazbağlanması yoluyla kararlı siloksan bağları

oluşturabilir. Aynı şekilde dolgu maddelerine veya diğer inorganik yüzeylere de bağlanabilirler.

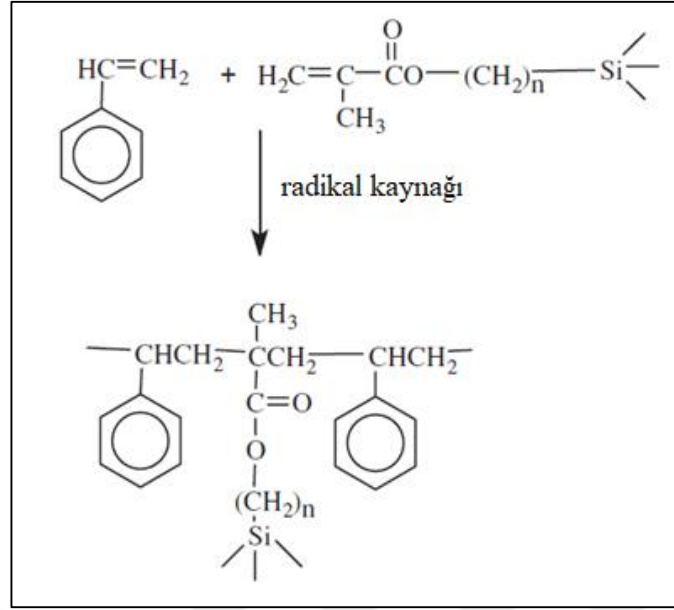
Uç gruptan tutunma durumunda, silanın organofonksiyonel grubu, bir kovalent bağ oluşturarak başlatıcının (precursor) bir terminal fonksiyonel grubu ile reaksiyona girer. Seçilecek silan tipi polimerin çeşidine göre değişiklik gösterir. NCO- uç gruplu poliüretanlar, akrilik/metakrilik polimerler ve fenol reçineler ile aminosilanların; polieterler, polyesterler ve poliüretanlarla izosiyanatosilanların; epoksi reçinelerle amino- ve epoksi/glisidoksisilanların kombinasyonları yaygındır.

Radikal aşılama, vinil veya metakriloksisilan gibi doymamış silanlar, bir radikal aşılama reaksiyonu yoluyla polimer zincirlerine bağlanmak üzere kullanılabilirler. Radikal aşılama genellikle poliolefinler ile vinil- veya metakriloksisilanlar kullanılır.

Kopolimerizasyon sırasında bir silanın polimerize edilebilir organofonksiyonel grupları (ör. metakriloksi veya vinilsilan), polimerin üretimi sırasında zincire dahil edilir. Monomerik akrilatlar/metakrilatlar ya da stiren ile metakriloksisilanların ve vinilsilanların kombinasyonu yaygındır (URL-5).

Bağlayıcı ya da birleştirici ajanlar, polimer teknolojisinde çok geniş uygulama alanı bulur. Silanlara, polimerin yapışmasını arttırdığı için kovalent bir bağın oluşup oluşmadığına bakılmaksızın genellikle bağlama ajanı adı verilir. Kovalent bağ, bitmiş polimer ile reaksiyon yoluyla oluşturulabilir veya monomerin kopolimerizasyonu ile elde edilebilir. Termoplastiklerin bağlanması esas olarak her iki yoldan da sağlanabilir. Termosetler ise neredeyse tamamen ikinci yöntem ile bağlanırlar (URL-6).

Akrilatlar, metakrilatlar ve doymamış polyesterler, serbest radikal polimerizasyonuna girme imkânlarından dolayı, doymamış organik süstitüsyona sahip silanlar ile kopolimerizasyon yoluyla modifiye edilebilir. Termoset polyesterler için kullanılan bağlama ajanları, bu tür sistemlerde radikalik kopolimerizasyona uğrar. Bu tip reçinelerin viskozitesini düşürmek için üretimlerinde genellikle stiren kullanılır. Genel olarak, silan monomeri polyesterin maleat kısmı yerine stirenin reaktivitesine uyduğunda daha iyi bir güçlendirme elde edilir (URL-6). Şekil 1.9'da doymamış polyesterin bağlanma reaksiyonu verilmiştir.



Şekil 1.9. Doymamış polyesterin bağlanma reaksiyonu (URL-6)

### 1.3.2. Başlatıcı

UPE kurlenmesi, doymamış reçine ve monomerin serbest radikal polimerizasyonu yoluyla gerçekleşir. Serbest radikaller oluşturmak için organik peroksitler, azin bileşikleri ve azo bileşikleri kullanılır.

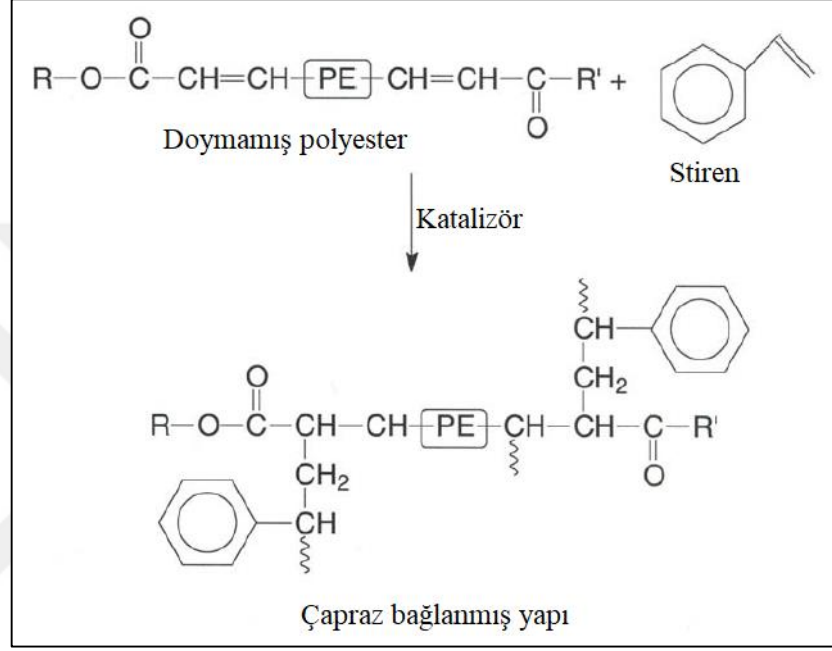
Kompozit sektöründe kullanılan en yaygın başlatıcılar peroksitlerdir. Peroksitler, serbest radikallere ayrıldığı ve çift bağlarla kolayca etkileşime girebildiği için etkili başlatıcılardır. Serbest radikallerin paylaşılmayan elektronları vardır. Doymamış polyester reçinenin çaprazbağlanmasında kullanılan peroksitler metil etil keton peroksit (MEK-P), asetil aseton peroksit (AAP) ve benzoil peroksit (BPO)'dur (Ratna, 2009). Çaprazbağlanma reaksiyonunu oda sıcaklığında gerçekleştirebilmek için peroksitlerin bozunmasını aktive eden metal oksit türevi hızlandırıcılar kullanılır. En yaygın kullanılan hızlandırıcılar, kobalt naftanat ve kobalt oktoattır. Bu tür hızlandırılmış bozunma iki yerine bir radikal üretir;



Kobalt bileşiği fazla miktarda bulunduğu serbest radikallerle reaksiyona girer ve onları iyonlara dönüştürür. Bunun sonucunda da radikaller yok edilir ve reaksiyon devam edemez;



Serbest radikaller, polyester ve monomerin doymamış bölgelerinde yayılan zincir reaksiyonunu başlatır. Bu, çözünmez ve erimeyen üç boyutlu bir ağ yapısının oluşmasına yol açar (Ratna, 2009). Doymamış polyesterin çaprazbağlanma reaksiyonu Şekil 1.10'da verilmiştir.



Şekil 1.10. Doymamış polyesterin çaprazbağlanma reaksiyonu (Ratna, 2009)

### 1.3.3. Cam elyafı

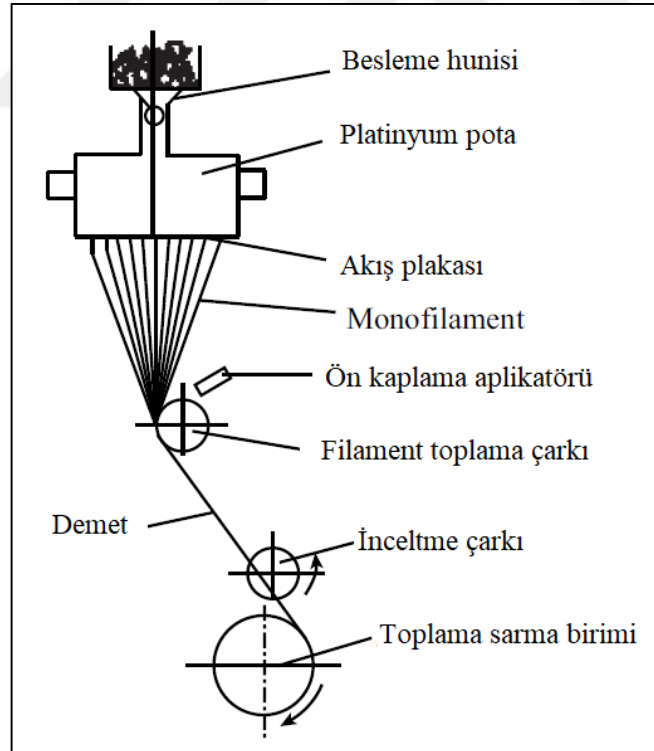
Plastikler yüksek mukavemet ve yorulma dayanımı istendiği takdirde takviye malzemeleri ile desteklenebilir. Polimerik matrisli kompozit üretiminde en çok kullanılan takviye malzemeleri elyaflardır. Elyaflar kompozit sektörünün öncü takviye malzemeleridir. Başlıca kullanılan elyaflar, cam elyaf, karbon elyaf, grafit elyaf, kevlar elyaf, doğal elyaflar, bazalt elyaf, bor elyaf, seramik elyaflar ve termoplastik elyaflar (PP, poli(etilen teraftalat (PET) vs.)'dır. Tez çalışmasında kullanılan malzemeler arasında yer alan cam elyaf hakkında temel bilgiler aşağıda verilmiştir.

Cam, yüksek mukavemeti sayesinde plastikler için ideal bir takviye malzemesidir. 3-20 µm çapındaki yeni çekilmiş bir cam elyafın çekme dayanımı yaklaşık 3,5 GPa'dır. Cam elyafı, erimiş camın çekilerek hızla soğutulması ile elde edilir; pek çok tipi ve



uygulama alanı vardır. Cam elyaf tipleri; (1) Düşük elektriksel iletkenlik gösteren E tipi, (2) Yüksek dayanım sağlayan S tipi, (3) Kimyasal dayanım sağlayan C tipi, (4) Yüksek peklik sağlayan M tipi, (5) Yüksek alkali değeri veren A tipi, (6) Düşük dielektrik sabiti veren D tipi cam elyaftır (Miracle ve Donaldson, 2001).

Cam elyaf üretimi, silika kumu, kireçtaşı, borik asit, kil, kömür ve florspat gibi bir dizi malzemenin kuru karıştırılmasıyla başlar. Bu karışım yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir fırında eritilir, sıcaklık cam kompozisyonuna bağlı olarak yaklaşık 1260 °C'dir. Daha sonra eriyik cam, 15-18 mm çapında cam küreler haline getirilir. Sıcak su ile yıkayıp temizlenir ve tekrar eritmek üzere fırına alınır. 1300 °C'de eritildikten sonra üzerinde 1-2 mm'lik delikler bulunan bir akış plakası (spinneret) kullanılarak çekilir ve iplikler haline getirilir. Hızlıca soğutma esnasında tekrar hızlıca çekilerek (1000-3000 m/dk) sarılır ve çapı 3-20 µm'ye indirilir. Monofilamentler ön kaplama (sizing) tankından geçtikten sonra demet haline getirilir ve ardından makaraya sarılır (Wang ve diğ., 2011). Cam elyafın üretimi şematik olarak Şekil 1.11'de verilmiştir.

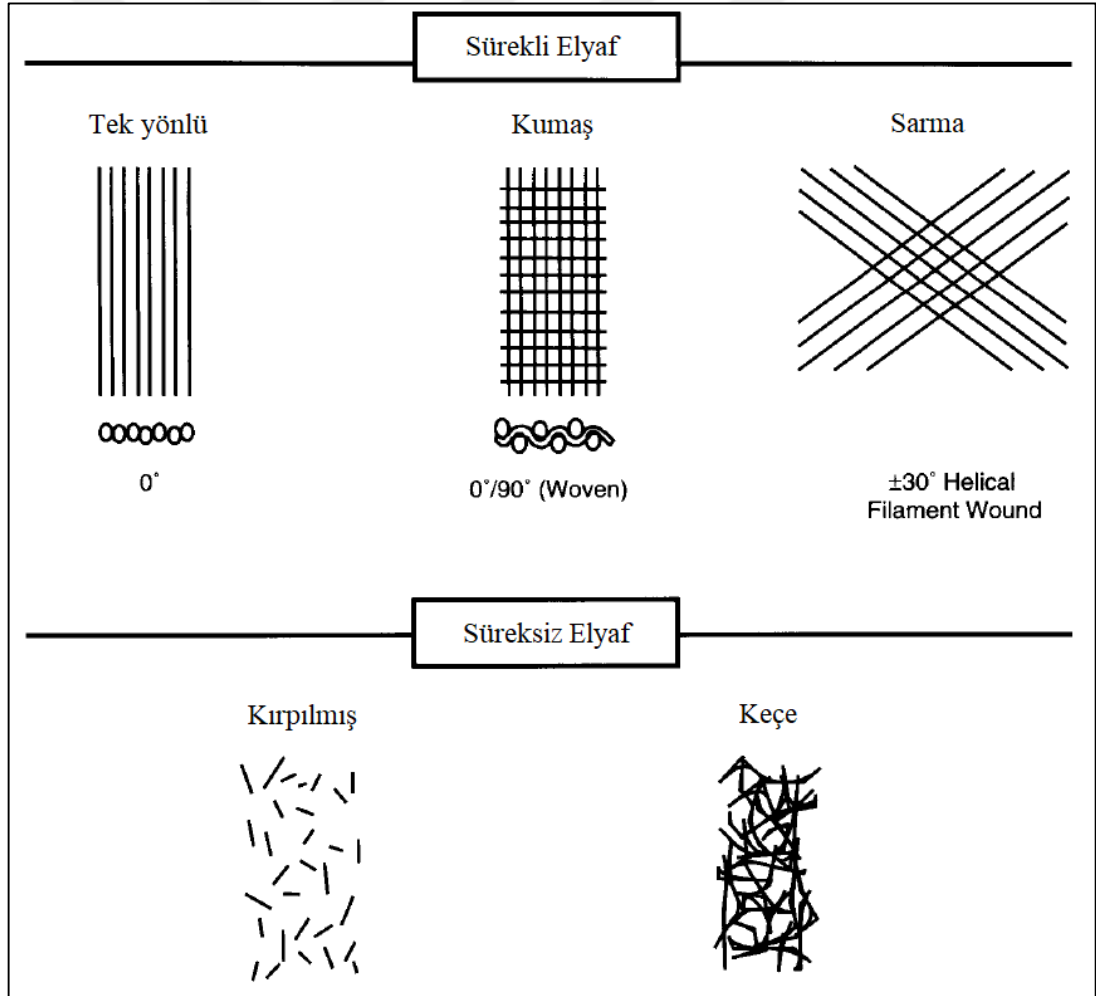


Şekil 1.11. Cam elyaf üretimi (Wang ve diğ., 2011)

Cam elyafı çekme işleminde elyaf, ön kaplama adı verilen, film oluşturucular, yağlayıcılar, antistatik ajanlar ve yüzey aktif maddelerden oluşan bir emülsiyon ile

kaplanır. Ön kaplama, elyafın reçine ile daha iyi bir arayüzey oluşturabilmesini sağlamak, ruloya sarıldığında liflerin birbirine yapışmasını ve lif yüzeyinin yıpranmasını önlemek ve rahat dokunabilmesi için daha yumuşak bir hale getirebilmek amacı ile uygulanır (Miracle ve Donaldson, 2001; Wang ve diğ., 2011).

Kullanılacak üretim yöntemine göre sürekli ya da süreksiz cam elyaf tercih edilebilir. Cam elyafın takviye edici özelliğini etkileyen en önemli faktörlerden birisi de yönlenmedir. En yüksek mukavemet, uygulanacak kuvvetin paraleline yönlenmiş takviye malzemesi kullanımı ile elde edilir. Yönlenme tipine göre en yaygın kullanılan E camı tipleri; (1) Tek yönlü, (2) Çift ve çok yönlü (elyaflar  $\pm 90^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $\pm 55^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  veya farklı açılar ile örülür), (3) Rastgele yönlenmiş elyaflardır (Wang ve diğ., 2011). Bazı takviye seçenekleri Şekil 1.12’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Cam elyafı için bazı takviye seçenekleri (Campbell, 2004)

#### **1.3.4. Jelkot**

Jelkotlar bir kompozit parçaya estetik açıdan güzel bir görünüm sağlamak ve dış etkenlerden korumak amacı ile genellikle üretim öncesi kalıp içine uygulanarak kullanılırlar. Çeşitli ürün ihtiyaçlarına cevap vermek üzere tasarlanmışlardır. Çizilmeye ve hava koşullarına dayanım sağlamak, ozmos etkisini azaltmak gibi dış etkenlere karşı direnç sağlanması öngörülerek geliştirilmiştir. Denizcilik sektöründen, hijyenik amaçlı uygulamalara kadar uzanan pek çok alanda jelkotlu kompozit parçalar kendilerine kullanım alanı bulabilmektedir. Kalıp yüzeyinde bir film oluşturacak şekilde uygulanan jelkotun, dokunma kurummasına geldiği anda (tam sertleşme tamamlanmadan önce) cam elyafı ve polyester reçineden oluşan bir katman, jelkot tabakası üzerine uygulanarak kompozit parçalar üretilir. Jelkotların hava koşullarına dayanımları ve sağlıklıkları, onları denizcilik uygulamaları için de ideal kılmaktadır. Jelkotlar termoset reçine sistemlerinin çeşitliliği içinde, şeffaf ve pigmentli formülasyonlar halinde üretilebilirler. Seçilen reçineye ek olarak jelkotlar aynı zamanda UV stabilizatörleri, pigmentler, hızlandırıcılar, tiksotropi artırıcı ve plastifiyan maddeler, dolgu maddeleri, inhibitörler, monomerler ve muhtelif katkı malzemeleri içerirler (URL-3; URL-7).

#### **1.4. CTP İşleme Yöntemleri**

CTP üretim teknikleri, temel olarak açık kalıp prosesleri, kapalı kalıp prosesleri, sürekli prosesler ve basınçlı kalıplama prosesleri olmak üzere dörde ayrılır.

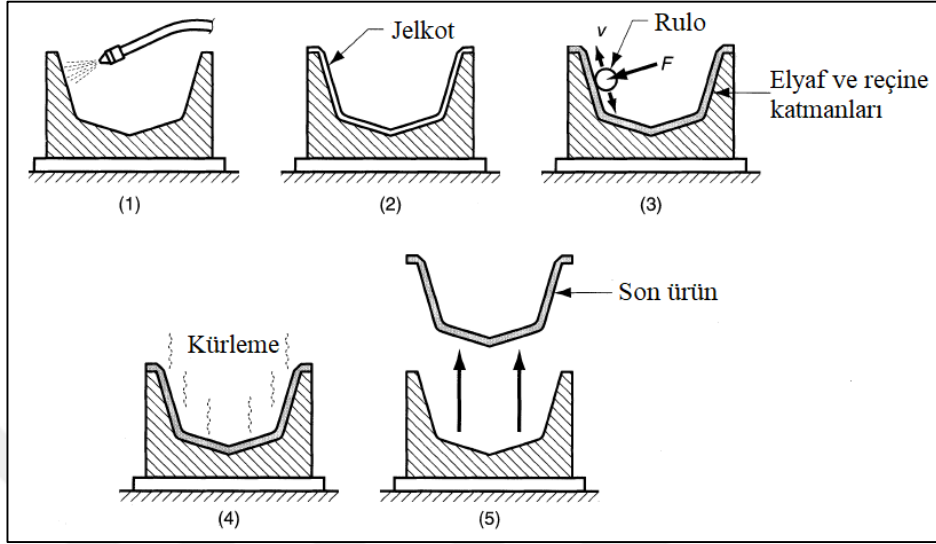
##### **1.4.1. Açık kalıp prosesleri**

Kalıplama amacı ile üst (erkek) kalıbın kullanılmadığı, sadece alt (dişi) kalıp yardımı ile üretim yapılan yöntemlere açık kalıp prosesleri adı verilmektedir. En yaygın kullanılan açık kalıp prosesleri el yatırması ve püskürtme ile kalıplama yöntemidir.

##### **1.4.1.1. El yatırması yöntemi**

El yatırması yöntemi en eski açık kalıp proseslerinden birisidir. Üretimin başlangıç aşamasında, pigment katkılı jelkotlar kalıp yüzeyine sprey tabancası veya fırça ile uygulanır. Jelkot jelleşip dokunma kurummasına ulaştıktan sonra takviye malzemesi jelkotun üzerine yerleştirilir ve bir boya rulosu ya da fırça kullanılarak ısıtılır.

Takviye malzemesi üzerine tatbik edilen reçine sertleşmeden önce, reçine ile ıslatılmış elyaf metal bir rulo yardımı ile hava kabarcıklarını atabilmesi için ezilir (Şekil 1.13). Bu işlem, istenilen kalınlığa ulaşılan kadar tekrarlanır (Akovali, 2001).

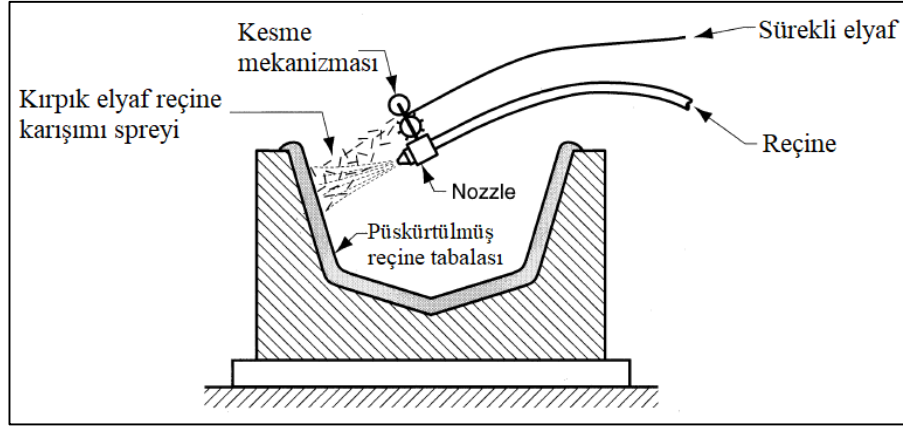


Şekil 1.13. El yatırması yöntemi (1) Jelkot uygulaması, (2) Jelkotun kurlenmesi, (3) Reçine ile elyafın ıslatılması, (4) Kürleme, (5) Ürün eldesi (Akovali, 2001)

Bu yöntemin, düşük üretim ve yatırım maliyeti, tasarım esnekliği, boyut sınırlandırması olmaması gibi avantajları olsa da ancak tek yüzü düzgün ürün eldesi, emek yoğun üretim olması, operatöre bağımlılık ve yüksek emisyon gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Peters, 1998).

#### 1.4.1.2. Püskürtme ile kalıplama yöntemi

Püskürtme ile kalıplama yöntemi diğer bir açık kalıp prosesidir. Bu yöntemde cam elyafı ve reçine, özel bir püskürtme tabancasıyla kalıp yüzeyine uygulanır. Bu tabanca, aynı zamanda uygun uzunluklarda sürekli elyaf takviye malzemelerini kırpmakta ve püskürtmeyle uygulanan reçine ile başlatıcının ağız kısmındayken karıştırılmasını da sağlamaktadır. Malzeme kalıp yüzeyine püskürtüldükten sonra, laminatın tamamen ıslanabilmesi ve reçinede kalan hava kabarcıklarının çıkartılabilmesi için rulolama işlemi yapılmalıdır. Kırılmış cam elyaf tabakalarının yanı sıra, gerektiğinde dokuma veya kumaş gibi takviye malzemeleri de el yatırması tekniği kullanılarak kompozit yapısına eklenebilir. Bu tekniğin şematik gösterimi Şekil 1.14'te verilmiştir (Peters, 1998).



Şekil 1. 14. Püskürtme ile kalıplama yöntemi (Akovali, 2001)

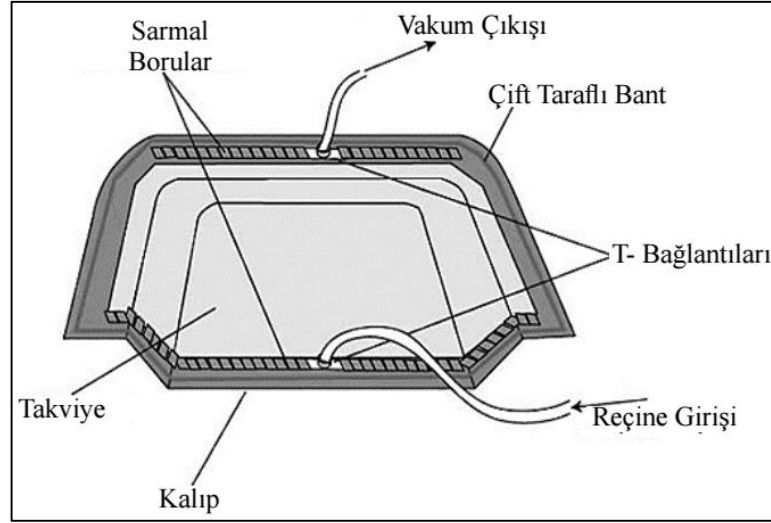
Avantajları ve dezavantajları açısından el yatırması yöntemine benzemekle birlikte makine ağırlıklı bir üretim yöntemi olması operatöre bağıllığı azaltmaktadır fakat bu teknikte püskürtme yapıldığı için stiren emisyonu el yatırması yöntemine göre daha fazladır (URL-3).

#### 1.4.2. Kapalı kalıp prosesleri

Kalıplama amacı ile dişi kalıbın yanı sıra bir de erkek kalıp ya da hava ile teması kesen bir membran kullanılan yöntemler kapalı kalıp prosesleri olarak adlandırılmaktadır. En yaygın kullanılan kapalı kalıp prosesleri vakum infüzyon, vakum torbalama, reçine transfer kalıplama, reaksiyonlu enjeksiyonlu kalıplama yöntemleridir.

##### 1.4.2.1. Vakum infüzyon yöntemi

Vakumlanmış ortam içerisinde reçinenin ilerlemesi prensibiyle çalışan bu yöntemde, imalat hazırlıkları tamamlanmış ürünün el değmeden üretimi amaçlanmaktadır. Vakum infüzyon prosesinde, takviye malzemesi reçine ile ıslatılmadan kuru halde, kalıp ve vakum poşeti arasına yerleştirilir ve ardından sızdırmazlık sağlanır. Daha sonra vakum yardımı ile takviye malzemesi sıkıştırılır. Reçine, başlatıcı ilavesinin ardından vakum yardımı ile kalıp içerisine çekilerek elyaflın ıslanması sağlanır. Reçine elyaflı tamamen ıslattıktan sonra vakum altında kürlenmesi beklenir ve ürün kalıptan çıkarılır. Vakum infüzyon kapalı bir üretim yöntemi olduğu için emisyon seviyeleri düşüktür fakat sadece tek tarafı düzgün ürün eldesi mümkündür. Bu tekniğin şematik gösterimi Şekil 1.15'te verilmiştir (Durgun ve diğ., 2014).

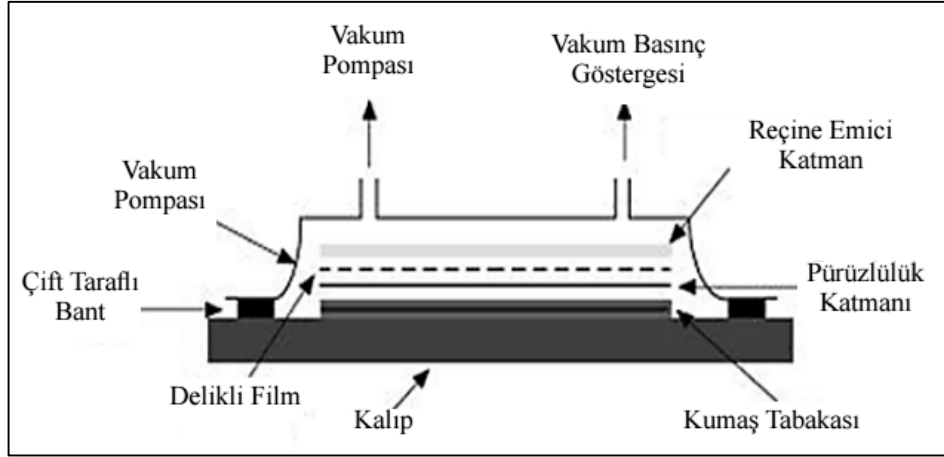


Şekil 1.15. Vakum infüzyon yöntemi (Durgun ve diğ., 2014)

Bu yöntemde kürleme esnasında bir vakum torbası kullanıldığı için stiren emisyonu açık kalıp proseslerine göre daha düşük seviyededir. Fakat üst kalıp olarak rijit bir malzeme kullanılmadığı için işlem sonunda yine sadece tek tarafı pürüzsüz bir parça elde edilir (Akovali, 2001).

#### 1.4.2.2. Vakum torbalama yöntemi

Vakum torbalama yöntemi (Şekil 1.16) esas itibari ile takviye malzemesi bir kalıp yüzeyine elle yatırıldıktan ve reçine ile ıslatıldıktan sonra kalıbın şeklini alması için uygulanır. Vakum torbalama tekniğini elle kalıplama yönteminden ayıran asıl fark işlemin vakum altında yapılmasıdır. Burada üst kalıp yerine esnek, polimerik bir membran (film) kullanılır. Vakum torbası olarak en yaygın kullanılan malzemeler polivinil alkol ve naylondur. Sızdırmazlık sağlandıktan sonra vakum çıkışı noktalarından kalıp içerisine negatif basınç uygulanır. Vakum torbalamadaki negatif basınç uygulamasının bir diğer amacı da takviye malzemesi ve reçine arasındaki havanın dışarı çekilmesini sağlamak ve bu sayede hava kabarcıklarından arınmış bir kompozit ürün üretmektir. Bu sayede çatlak oluşma kaynakları yok edilerek, yapının mukavemeti önemli ölçüde artmaktadır. Ayrıca vakum uygulaması sayesinde reçinenin bütün katmanlar içine tam olarak nüfuz etmesi ve bu sayede tüm bölgelerin reçine ile ıslanması sağlanır. Bununla birlikte, vakum uygulaması sonucunda katmanlı yapı içinde kalan fazla reçine emilerek, yapının lif-reçine oranının artması sağlanmaktadır (Akovali, 2001; Durgun ve diğ., 2014).

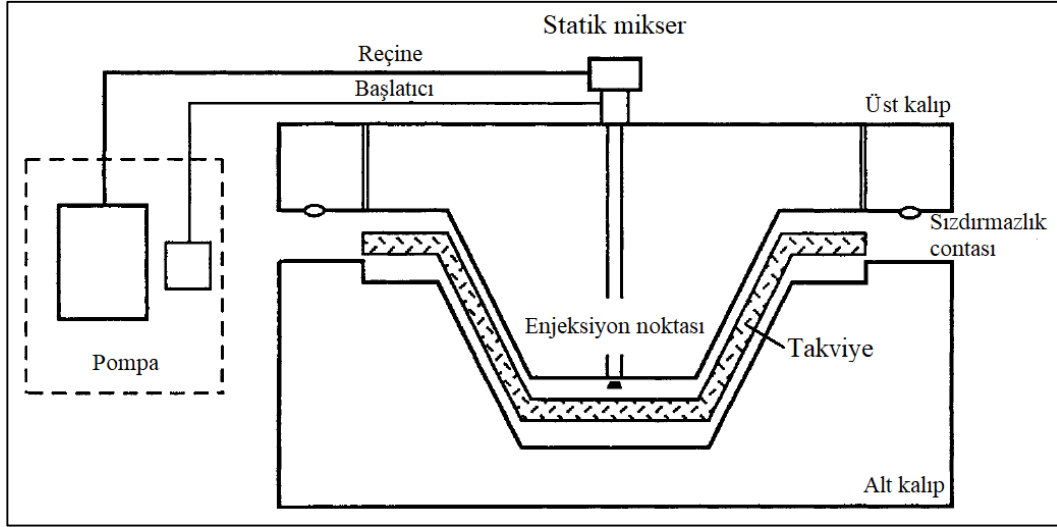


Şekil 1.16. Vakum torbalama yöntemi (Durgun ve diğ., 2014)

Vakum torbalama yöntemi, el yatırması ve püskürtme ile kalıplama proseslerinden sonra yardımcı proses olarak uygulanabilmektedir. Ayrıca proses süresini kısaltmak için parça vakum altındayken ısıtma da uygulanabilir. Bu yöntemde kürlenme esnasında bir vakum torbası kullanıldığı için stiren emisyonu açık kalıp proseslerine göre daha düşük seviyededir (Akovali, 2001).

#### 1.4.2.3. Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM)

Reçine transfer kalıplama, orta hacimli ve görece hızlı üretime uygun, yüksek kalitede malzeme üretimine olanak sağlayan düşük maliyetli bir teknolojidir. Önceden kesilmiş veya şekillendirilmiş takviye malzemelerinin, erkek ve dişi kalıp arasına yerleştirilerek kapatıldığı bir kapalı kalıplama yöntemidir (Şekil 1.17). Alt ve üst kalıp yüzeyi temizlenip ayırıcı uygulandıktan sonra, tercihe bağlı olarak jelkot uygulaması yapılır. Jelkot kürlendikten sonra alt kalıba takviye malzemesi yerleştirilir. Üst kalıp, alt kalıp üzerine kapatılıp sızdırmazlık sağlanır. Ardından reçine, enjeksiyon kanallarından, basınç altında kalıp içerisine pompalanır. Genellikle enjeksiyon basıncı 2,75–3,5 bar'dır. Kalıp çevresine yerleştirilen bir conta sistemi ile sızdırmazlık sağlanmakta ayrıca, contaya yakın bir yerden hava çıkışını sağlayacak ve reçine firesini azaltacak hava vanaları yerleştirilmektedir. Kalıp yapımında kalıbın karşılaşıcağı basınç dikkate alınmalıdır. RTM orta düzeyde üretim hacmine sahip bir kalıplama yöntemidir. Başlıca RTM uygulamaları; kamyon ve otomobil gövde parçaları, otobüs panelleri, gösterge panelleri, tıbbi cihazlar, depolama tankları, araç koltukları, kimyasal pompalar, küçük tekneler gibi denizcilik parçaları, rüzgar enerjisi tribün kanatları, uçak parçaları, mermi gövdeleri, bisiklet gövdeleri ve kapılardır (Wang ve diğ., 2011).



Şekil 1.17. RTM yöntemi (Peters, 1998)

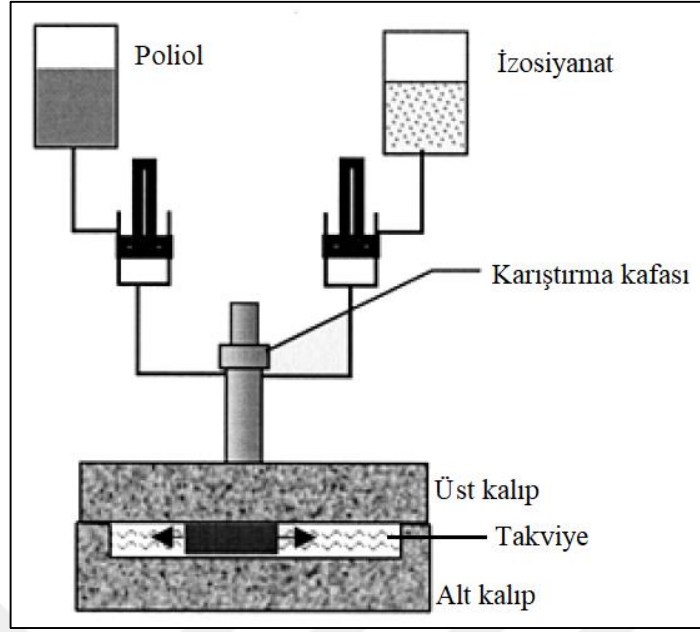
Kapalı bir kalıplama teknolojisi olduğu için RTM’de stiren emisyonu çok düşüktür. Yüksek kalitede, homojen ve iki yüzü pürüzsüz parçalar üretilebilir. İşçilik maliyetleri düşüktür. Bunların yanı sıra, ekipman yatırımı gerektirir ve kalıp maliyetleri açık kalıp proseslerine göre daha yüksektir (Miracle ve Donaldson, 2001).

#### 1.4.2.4. Reaksiyonlu enjeksiyonlu kalıplama yöntemi (RIM)

Reaksiyonlu enjeksiyonlu kalıplama yöntemi (Şekil 1.18), iki maddenin kimyasal reaksiyonunun gerçekleştirilmesi temeline dayanır. Kimyasal reaksiyon gösterecek bir karışım (genellikle izosiyanat ve poliöl), reaksiyonun gerçekleşeceği bir kalıba ayrı ayrı malzeme tanklarından yüksek basınç altında enjekte edilir. Ekzotermik bir reaksiyon gerçekleşir ve reaksiyon tamamlandıktan sonra parça kalıptan alınır. RIM yönteminde reçinenin özelliklerini geliştirmek üzere takviye malzemeleri kullanılır. Takviye malzemesi kullanımıyla polimerizasyon reaksiyonundan kaynaklanan büzülme ve ısıl genleşme miktarı azaltılır.

RIM prosesi, ana hatlarıyla RTM prosesine benzemektedir. Bu prosesin RTM prosesinden ayıran özellik, reçinelerin enjeksiyon işlemi öncesinde karıştırma yönteminin farklı olmasıdır. RIM ürünleri çoğunlukla otomotiv (otomotiv tamponları, çamurluklar ve kaportalar) ve inşaat sektörlerinde kullanılmaktadır (Miracle ve Donaldson, 2001).





Şekil 1.18. RIM yöntemi (Miracle ve Donaldson, 2001)

### 1.4.3. Basınçlı kalıplama prosesleri

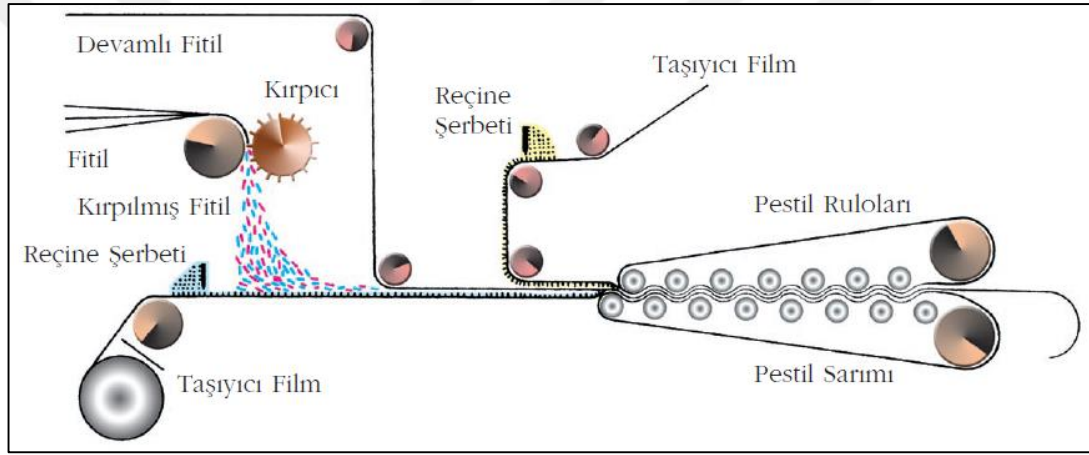
Basınçlı kalıplama prosesleri, reçine, başlatıcı, dolgu maddesi ve takviyenin dâhil olduğu hazır kompozit hamurlarının bir basınçlı kalıplama presine yerleştirilmesini içerir. Uygulanan sıcaklık ve basınçla birlikte karışım kalıp içerisine yayılır ve kalıbın şeklini alır. Basınçlı kalıplama, rijitliği ve mekanik dayanımı yüksek ve parlaklık, pürüzsüzlük, boyanabilirlik gibi iyi yüzey özellikleri sağlar (Akovali, 2001).

Her iki yüzü düzgün ürün elde edilebilme, boyutsal kararlılık ve kalıp yüzey görünümünü aynen aktarabilme gibi basınçlı kalıplama yöntemlerinin pek çok avantajı bulunmaktadır. Takviye oranının yükseltilebilme olanağı ve elyaf boyunun daha uzun tutulabilmesi sayesinde mekanik dayanım ihtiyaca göre arttırılabilir. Bununla birlikte, ters açılı parça üretimi mümkün değildir (URL-3).

#### 1.4.3.1. Sıcak pres pestili (Sheet moulding compound, SMC)

Cam elyafı takviyesi ile birlikte sıvı ve toz halindeki tüm SMC girdileri, devamlı veya kesikli olarak, mikserlerde karıştırılır. Elde edilen bileşim genellikle yüksek viskozitede, macun kıvamındadır. Bu macun formundaki malzeme, üzerine kırılan cam elyafı ile birlikte, üstten ve alttan gelen, genellikle naylon ve PE malzemenen yapılmış taşıyıcı filmler tarafından kaplanarak, sandviç yapıda bir bileşim haline

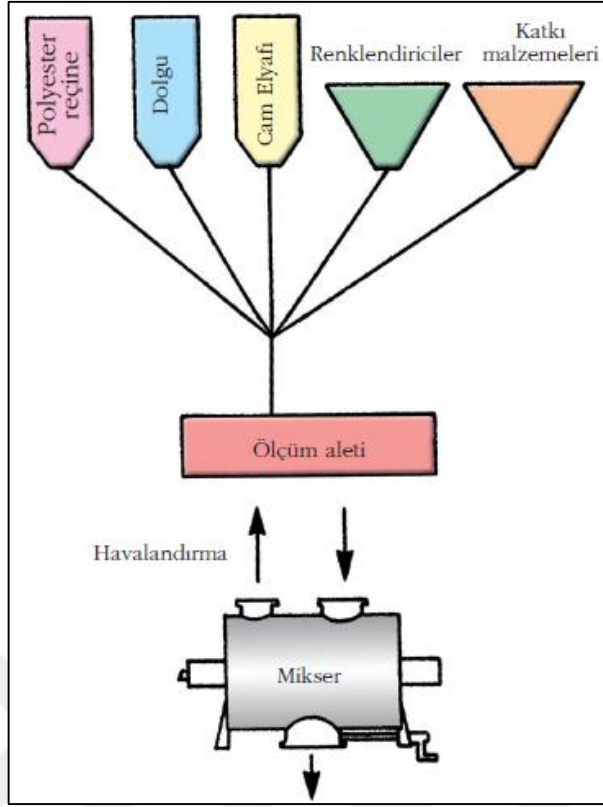
getirilir. Sandviç yapıdaki bu görünüm, konveyör bant üzerinde ilerleyerek, sıkıştırma ruloları arasından geçirilip pestil haline getirilmektedir. Daha sonra pestil halindeki hazır kalıplama bileşimi, uygun uzunluklarda rulo haline getirilip, reçinenin uçuculuğunu önlemek üzere naylon ambalajda paketlenerek, sıcaklık kontrollü bir ortamda depolanır. SMC hazır kalıplama bileşimi, basınçlı preslere monte edilen ısıtılmış metal kalıplar içinde kalıplanır. Genellikle, kalıp 120-170 °C, kalıp basıncı ise 140-170 bar arasında değişmektedir. Kalıplama süresi, parçanın kalınlığı, kalıp sıcaklığı ve kullanılan katalizör miktarına bağlı olarak 1-4 dakika arasındadır. Sertleşmeden sonra kalıplanmış parçalar kalıptan çıkartılır. Bu tekniğin şematik gösterimi Şekil 1.19’da verilmiştir (Miracle ve Donaldson, 2001; URL-3).



Şekil 1. 19. SMC hazır kalıplama bileşimi üretimi (URL-3)

#### 1.4.3.2. Sıcak pres karışımı (Bulk molding compound, BMC)

BMC, basınçlı kalıplama ile kürlenmeye hazır bir kompozit hamurudur. Kalıplama bileşimi; reçine, katalizör, toz halindeki dolgu malzemeleri, kırılmış elyaf, pigment, kaydırıcı ve diğer performans artırıcı malzemelerin harmanlanması ile oluşur (Şekil 1.20). Malzeme yüksek ısı dayanımı, boyutsal kararlılık, elektriksel özellikler, mukavemet ve rijitlik özellikleri ile tanımlanabilir. BMC, ihtiyaca göre yüksek sıcaklıklarda renk değişimi meydana gelmeyecek, korozyona, yanmaya ve UV etkisine dayanıklılık gösterecek şekilde formüle edilebilir. Malzemeler; enjeksiyon, basınç veya transfer kalıplama ile uygulanabilir. BMC’lerdeki en önemli nokta, CTP uygulamasındaki taleplere uyacak en uygun maliyetle en iyi performansı sağlayabilecek özelliklerin ayarlanabilmesidir (URL-3; URL-7).



Şekil 1.20. BMC hazır kalıplama bileşimi üretimi (URL-3)

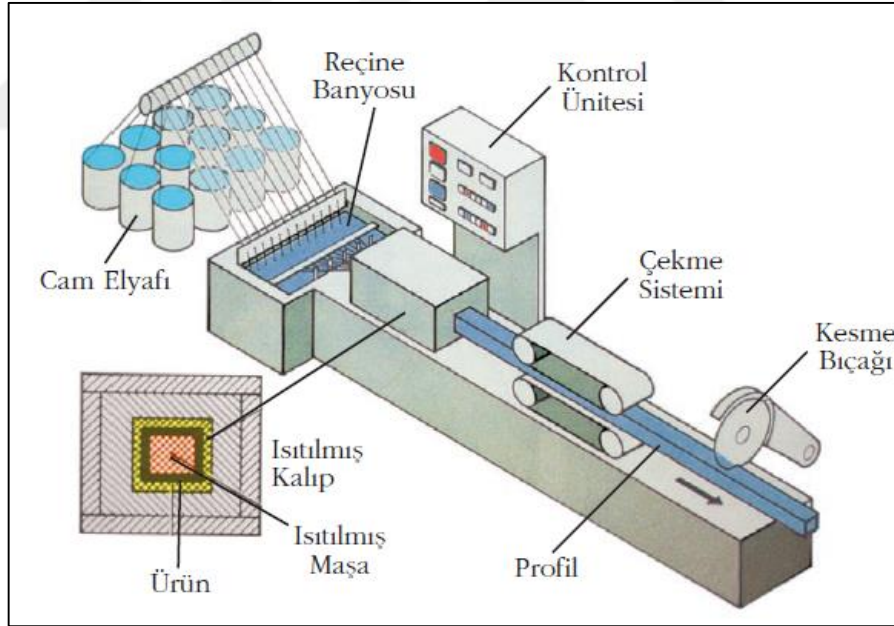
#### 1.4.3.3. Sıcak pres hamuru (Dough moulding compound, DMC)

Sıcak pres hamuru, temelde polyester reçine ve cam elyafı temelli bir hamur karışımıdır. Bunların yanı sıra hamur içerisinde başlatıcı, kalıp ayırıcı, dolgu gibi malzemeler de bulunur. Basınçlı kalıplama yöntemi kullanılarak hamurun kürlenmesi ile kompozit ürünler elde edilir. Bu proseste, belirli miktarda hamur ısıtılmış kalıp üzerine yerleştirilir ve ardından basınç yardımı ile kalıp boşluğuna doldurulur. Genel amaçlı DMC'lerde dolgu olarak kalsiyum karbonat kullanılır, kalıplamada bazı özel özellikler katmak için diğer dolgu malzemeleri de kullanılabilir. Kullanılan elyaf uzunluğu genellikle 3-12 mm arasında ve elyaf yoğunluğu %15-20 oranı arasındadır. Takviye malzemesi, reçine, katalizör, dolgu ve katkı malzemeleri karıştırılarak bir hamur elde edilir ve ardından sıcak kalıp ile kalıplanarak DMC kompozit elde edilir. BMC'ler ile görünüşleri çok benzerdir. Aralarındaki en önemli fark, BMC daha kaliteli ürünler elde etmek için kullanılır. BMC'lerde genellikle sıcak dayanımını ve kararlılığı arttırmak üzere izoftalik tipte bir reçine ve yüzey kalitesini arttırmak için profil iyileştiriciler kullanılır (URL-7).

#### 1.4.4. Sürekli prosesler

##### 1.4.4.1. Pultrüzyon

Pultrüzyon, sürekli ve sabit kesitli kompozit parçalar üretebilmek için kullanılan, uygun maliyetli ve otomatikleştirilmiş bir süreçtir. Pultrüzyon yöntemi (Şekil 1.21), malzemenin kalıp boyunca çekilerek üretilmesi dışında, ekstrüzyon prosesine benzemektedir. Pultrüzyon cihazı; takviye işleme sistemi, elyaf ıslatma alanı ve malzeme şekillendirme alanı olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bu yöntemde cam elyafı takviyesi önce termoset reçine banyosundan, sonra da bir dizi şekillendirme kılavuzundan geçirilir. Isıtılmış metal kalıp içinden geçirilerek, belirlenen kesitte sertleşmesi sağlanır. Şekillendirme kılavuzları, cam takviye malzemesinin reçine ile en yüksek düzeyde ıslanmasını sağlamak ve şekillendirmek amacı ile kullanılır. Kalıptan çıkan ürün kesme aparatları aracılığıyla istenilen uzunluklarda kesilir. Pultrüzyon yönteminde, işgücü gereksinimi düşüktür (Miracle ve Donaldson, 2001).

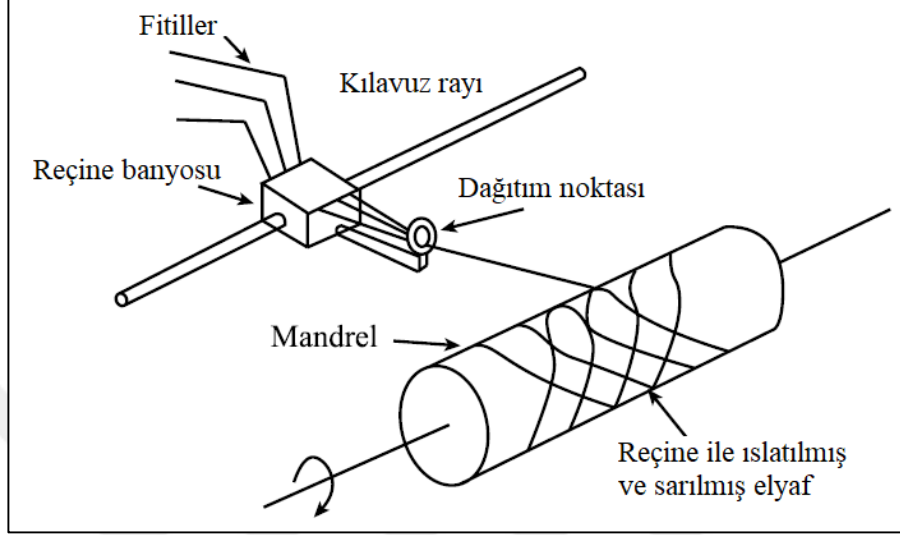


Şekil 1.21. Pultrüzyon yöntemi (URL-3)

##### 1.4.4.2. Elyaf sarma (Filament winding)

Elyaf sarma yöntemi ile üstün kalitede yüzeye ve mekanik özelliklere sahip boru tipi kompozit ürünlerin üretimi mümkündür. Bu yöntemde, önceden bir reçine banyosuna daldırılmış sürekli elyaflar (filament, iplik, bant vb.) dönen bir mandrel üzerine belirli

açılarda sarılarak kompozit bir yapı elde edilir. Elyaf sarım açısı parçanın maruz kalacağı yüklere dayanım sağlayacak şekilde tasarlanır. İstenilen et kalınlığına ulaşıldığında parça kürlenmeye bırakılır ardından mandrel üzerinden çıkarılır ya da mandrelle birlikte kullanılabilir (Şekil 1.22) (Miracle ve Donaldson, 2001).



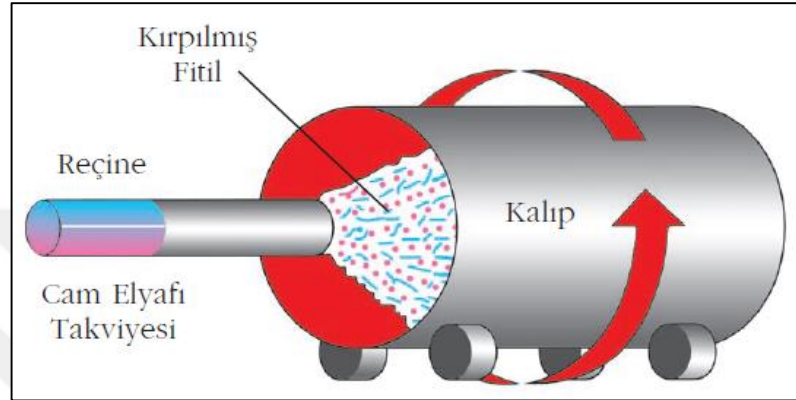
Şekil 1.22. Elyaf sarma yöntemi (Wang ve diğ., 2011)

Elyaf sarma yöntemi; kuru, ıslak ve yarı ıslak sarım olmak üzere üç farklı şekilde uygulanabilir. Kuru sarımda genellikle bant şeklinde preformlar kullanılır. Prefromlar yumuşama sıcaklığına getirildikten sonra mandrel üzerine sarılarak ürün elde edilir. Islak sarımda sıvı bir reçine banyosu kullanılır. Bu banyoda ıslatılan elyaflar istenen gerilimlerde mandrel üzerine sarılarak kürlenir. Islak sarımda elyaf üzerindeki reçine miktarını kontrol etmek zordur. Yarı ıslak sarımda ise elyafın banyoda ıslatılması ve sarım arasında bir kurutma prosesi yer alır ve sarım işlemi kurutmadan sonra gerçekleştirilir. Bu da parçada daha az hava ve boşluk oluşmasını sağlar (Wang ve diğ., 2011).

#### 1.4.4.3. Santrifüj ile kalıplama

Santrifüj kalıplamada takviye malzemeleri ve reçineler yüksek bir çevresel hızla dönmekte olan kalıp iç yüzeyine uygulanır. Üretim, genellikle bir fırın içerisinde yerleştirilmiş boru tipi kalıbın 82-93 °C sıcaklığa ısıtılıp yüksek hızlarda döndürülmesi ile gerçekleştirilir. Bu kalıplama yöntemi sayesinde her iki yüzü düzgün, rijit, borsal parçaların üretimi mümkündür. Santrifüj (merkezkaç) kuvveti, reçine ile temas eden takviye elyafların ıslanmasını sağlamaktadır. Bu yöntemle üretilen parçanın kalıbın iç

yüzeyine temas eden dış kısmı, ürünün düzgün yüzünü temsil eder. Büyük çaplı kompozit borular ve tanklar ticari olarak santrifüj kalıplama yöntemiyle üretilmektedir. Santrifüj kalıplamanın avantajları, düzgün dış yüzeylerin elde edilmesi ve uçucu organik gazların proses sırasında kontrol edilebilmesidir. Başlıca dezavantajı ise, büyük boyuttaki kalıpların döndürülebilme sorunu ve iç yüzeye tül uygulamasının zorluğudur. Yöntem, şematik olarak Şekil 1.23'te verilmiştir (Akovali, 2001; URL-3).



Şekil 1.23. Santrifüj kalıplama yöntemi (URL-3)

### 1.5. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

CTP'ler pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları, havacılık, otomotiv, yapı sektörü, spor ve eğlence, elektrik elektronik, korozyon dayanımı beklenen alanlar, denizcilik ve askeri uygulamalardır. Havacılık/uzay ve spor/eğlence alanlarındaki uygulamalar, en yüksek katma değeri sağlayan uygulamalar olarak gösterilebilir. Tablo 1.4'te CTP kullanım alanları detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 1.4. CTP kullanım alanları (URL-3; Sathishkumar ve diğ., 2014)

Uygulama alanı	Uygulama örnekleri
Havacılık ve Uzay	Kanatlar Pervaneler Uçak ve helikopter gövdeleri Roket motoru koruyucu ekipmanları
Otomotiv	Çamurluk, tampon Kamyonet, treyler gövde panelleri Araç kapıları Balata Motosiklet, traktör parçaları

Tablo 1.4. (Devam) CTP kullanım alanları (URL-3; Sathishkumar ve diğ., 2014)

Uygulama alanı	Uygulama örnekleri
Yapı Sektörü	Yüzme havuzları Saniter ürünler (banyo küveti, lavabo, tezgah) Otoyol korkulukları Çatı ve çevre kaplama levhaları Sera panelleri
Tüketim Malları ve Spor/Eğlence	Su kaydırakları Tenis raketi, golf sopası Lunapark oyuncakları Bisiklet, kask
Korozyon Dayanımlı Ürünler	Su borusu ve bağlantı elemanları Endüstriyel tanklar, silolar Arıtma tesisleri Yer ızgaraları
Elektrik Elektronik	Baskılı devre panelleri Sigorta-panel kutuları Doğal gaz kutuları Rüzgar jeneratörleri Elektrik ve aydınlatma direkleri
Askeri Uygulamalar	Miğferler, balistik koruyucu ekipmanlar Sahil koruma botları Çıkartma gemileri Helikopter kaportaları Silah ve roket parçaları
Denizcilik	Yelkenli ve motorlu tekneler Sallar, kanolar Sörf tahtaları

## 1.6. CTP Kökenli Atıklar ve Geri Kazanım

Elyaf takviyeli polimer kompozitler güçlü, hafif ve dayanıklı malzemelerdir ve son yıllarda bu malzemelerin dünya çapındaki üretim hacmi ve tüketimi, başta otomotiv olmak üzere inşaat, savunma ve rüzgâr enerjisi sektörlerinde artış göstermiştir. Bununla birlikte yapılan market tahminlere göre üretim ve tüketim miktarları atmaya devam edecektir (URL-1; Iwaya ve diğ., 2008).



Kullanım aşamasındaki sürdürülebilirlik, geleneksel malzemeler yerine kompozitlerin seçiminde itici bir güç yaratmaktadır. Kompozit yapılar, düşük bakım gereksinimleri, korozyon direnci ve dayanıklılığı ile birlikte uzun bir hizmet ömrü sunarlar. Hafif kompozitler, özellikle otomotiv sektöründe kullanıldığında ömrü boyunca daha düşük enerji tüketimi sağlarlar. Yenilenebilir enerji üretimi için rüzgâr türbinlerinde kompozit malzemeler kullanılır. Tüm bunlara rağmen geri dönüşüm/kazanım faaliyetlerinin sınırlı olması kompozit malzemeler için döngüsel bir ekonomi yaratmayı zorlaştırır (URL-2).

Artan üretim ve tüketim miktarları, ömrünü tamamlamış ve hatalı üretim sonucu hurdaya ayrılmış kompozit malzeme atık miktarlarında da artışa yol açmıştır. Kompozit malzemeler için geri dönüşüm girişimlerini tetikleyen ana hususlar; (1) Kompozit malzeme atık miktarındaki önemli artış, (2) Yasal mevzuatlar ve (3) Depolama alanlarına gömme ve yakma gibi uygulamaların ortadan kaldırılması ihtiyacına ilişkin sosyal farkındalığın artışıdır (URL-2).

Şimdiye kadar ömrünü tamamlamış ve hurdaya ayrılan termoset kompozitlerin bertarafında en yaygın kullanılan yöntemler genellikle boyutları küçültüldükten sonra atık sahalarına gömme ve yakma işlemleri olmuştur. Ancak atık yönetimi ile ilgili mevcut ve gelecek mevzuatlar kapsamında artan maliyetler sebebi ile bu uygulamalar gelecekte kullanılmayacak hale gelecektir (Conroy ve diğ., 2006).

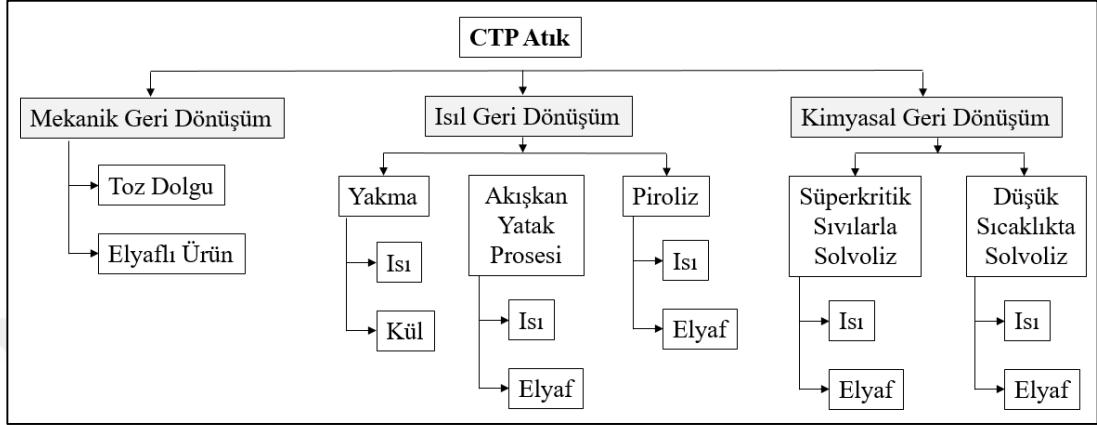
Atıkların gömülmesi, maliyet açısından en uygun işlem olarak görülse de çevre kirliliğine yol açması ve sera gazlarına neden olması gibi çevresel dezavantajları vardır (Gharde ve Kandasubramanian, 2019).

Her ne kadar geri dönüşüm işlemleri bir yatırım gerektirse ve elde edilen ürünler işlenmemiş ürünlere göre daha düşük dayanım gösterebilirler de hammadde ve enerji tüketiminin, çevre kirliliğinin, sera gazı salınımının ve küresel ısınmanın azaltılması konusunda pek çok fayda sağlayacaktır (Gharde ve Kandasubramanian, 2019).

Son 20 yılda kompozit malzemeler için geri kazanım teknikleri ve son kullanım uygulamaları üzerine çalışmalar hız kazanmıştır. Ancak, geri dönüştürülmüş ürünler için hem ekonomik hem de çevresel ihtiyaçları karşılayan uygulamalara ihtiyaç devam etmektedir (Ribeiro ve diğ., 2016).



Literatürde polimer matrisli elyaf takviyeli kompozitler için uygulanan geri kazanım yöntemleri 3 ana başlık altında incelenmektedir ve bunlar (1) Mekanik geri dönüşüm (boyut küçültme), (2) Isıl geri dönüşüm, (3) Kimyasal geri dönüşüm yöntemleridir. Termoset kompozitler için geri dönüşüm prosesleri Şekil 1.24'te verilmiştir.



Şekil 1.24. Termoset kompozitler için geri dönüşüm prosesleri (Anane-Fenin ve Akinlabi, 2017; Iwaya ve diğ., 2008)

### 1.6.1. Mekanik geri dönüşüm

Mekanik geri dönüşüm, kompozit atıkların parçalama, öğütme, ezme ya da milleden prosesleri ile boyutlarının küçültülmesi ve/veya toz haline getirilmesi işlemidir. Bu işlem genellikle üç aşamalı olarak uygulanır. Birinci aşamada, CTP malzemeden metal vb. malzemeler ayrıştırıldıktan sonra elle ya da değirmenler (crushing mills) yardımı ile 50-100 mm boyutlarına ön parçalama işlemi gerçekleştirilir. İkinci aşamada, öğütücüler, yüksek hızlı değirmenler ya da çekiçli değirmenler kullanılarak 10 mm'den küçük ve bazı durumlarda 50 µm'nin altına inebilen boyutlarda ürünlerin elde edilebildiği öğütme işlemi gerçekleştirilir. Üçüncü aşamada ise siklonlar ya da elekler yardımı atıklar farklı boyut fraksiyonlarına göre sıralanır ve sınıflandırılır (Ribeiro ve diğ., 2016; Garcia ve diğ., 2014; Palmer ve diğ., 2009).

Mekanik geri dönüşümden elde edilen ürün; ince toz, kaba toz veya lifli malzeme olacak şekilde bir elyaf, reçine ve dolgu karışımıdır. Bu malzemeler yeni ürünlerin formülasyonlarında katkı maddesi, dolgu maddesi veya takviye olarak kullanılabilir. Öğütülmüş atıklar; SMC, BMC hamurlarında, geleneksel beton, polimerik beton ve çimento harçlarında, ısı yalıtım panellerinde, boru ve yer karolarında dolgu maddesi olarak kullanılarak değerlendirilebilir (Garcia ve diğ., 2014; Palmer ve diğ., 2009).

Ayrıca literatürde öğütölmüş kompozit atıkların mobilya, rögar kapağı ve alet çantası gibi ürünlerin üretiminde kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır (Job, 2013; Ribeiro ve diğ., 2016). Bununla birlikte, daha iri boyutlu atıkların, asfalt takviyesi olarak ya da ses yalıtımında ağaç lifine alternatif olarak kullanılabileceği bildirilmiştir (Pickering, 2006; Conroy ve diğ., 2006).

Kimyasal ve zehirli gaz emisyonuna sebep olmadığı için mekanik geri dönüşüm prosesi diğer yöntemlere göre daha çevreci bir çözüm sunar. Bununla birlikte atıkların ticari olarak işlenmesi için endüstriyel ölçekte kullanılan tek işlemdir (Gharde ve Kandasubramanian, 2019; Palmer ve diğ., 2009). Tablo 1.5'te mekanik geri dönüşüm uygulamalarının avantajları ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 1.5. Mekanik geri dönüşüm prosesinin avantajları ve dezavantajları (Pimenta ve Pinho, 2011; Ribeiro ve diğ., 2016)

Avantajlar	Dezavantajlar
Elyaf ve reçine birlikte geri kazanılır	Öğütme işlemi sırasında tutuşma riskinden kaynaklanan güvenlik sorunları oluşabilir
Gaz emisyonu olmadığı için atmosferik kirliliğe ve kimyasal solvent kullanımı olmadığı için su kirliliğine yol açmaz	Elyaf boyunun kısalması ve tutarsız dağılımı
Pahalı ekipman gerektirmez	Mekanik özelliklerde kayıp
Daha yüksek verimle daha büyük miktarlarda atığın işlenmesine izin verir	Sınırlı kullanım alanı

Geri kazanılmış atık CTP'ler için ekonomik olarak uygun kullanım alanları bulunması ve endüstriyel mekanik geri dönüşümün diğer yöntemlere göre nispeten daha ekonomik olması sebebi ile gömme ve yakma işlemlerine alternatif en uygun geri kazanım yöntemi olarak kabul edilmektedir (Anane-Fenin ve Akinlabi, 2017; Gharde ve Kandasubramanian, 2019; Ribeiro ve diğ., 2016).

### 1.6.2. Isıl geri dönüşüm

Isıl geri dönüşüm prosesleri kompozit malzemeden elyaf ve kısmi enerji geri kazanımı için uygulanır ve çoğunlukla karbon elyafın daha yüksek maliyetli olması sebebi ile

karbon elyaf takviyeli kompozit atıkları için kullanılır. Temel olarak, (1) Yakma prosesi, (2) Akışkan yatak prosesi, (3) Piroliz prosesi olmak üzere üç ısıl geri dönüşüm uygulaması bulunmaktadır (Pickering, 2006).

### 1.6.2.1. Yakma prosesi

Tüm organik malzemeler gibi termoset malzemeler de kalorifik değere sahiptir ve dolayısı ile bir enerji kaynağı olarak yakılabilirler. Polyester, vinilester, fenolik, üre formaldehit ve epoksi reçineler için kalorifik değer ölçümleri literatürde bildirilmiştir (Pickering, 2006).

Yakma, oksijen varlığında gerçekleşen oksitlenme reaksiyonu sonucu enerji elde edilmesi işlemidir. CTP malzemelerin kalorifik değeri önemli olmakla birlikte, matris malzemesinin tipine ve oranına bağlıdır (Pickering, 2006). Yanma sonunda artık malzemeler, atık sahalarına gömülebilir ya da çimento, beton gibi malzemelerde dolgu malzemesi olarak kullanılabilirler. Yanma sırasında oluşan zehirli gaz emisyonu atmosferik kirliliğe yol açar (Ribeiro ve diğ., 2016). Bununla birlikte atığın, matris oranına bağlı olarak %30-60'ı yakılmaya müsaittir (Wait, 2006).

Polimerlerin petrol temelli oldukları ve yüksek kalorifik değere sahip oldukları göz önünde bulundurulduğunda, enerji geri kazanımı için yakma uygun bir seçenektir. Fakat hâlihazırda, atıkların gömülmesine ilk alternatif olan yakma ile enerji geri kazanımı yöntemi, yol açtığı hava kirliliği ve düşük verimliliği sebebi ile tercih edilirliliği azalmaktadır. Yakma sırasında oluşan zehirli gazlar küresel ısınmaya katkıda bulunur ve atıkları çevreye zarar verir. Bu sebeple yakma fırınları CTP atıklar için daha fazla ücret talep ederler (Conroy ve diğ., 2006). Yakma prosesinin avantajları ve dezavantajları Tablo 1.6'da verilmiştir.

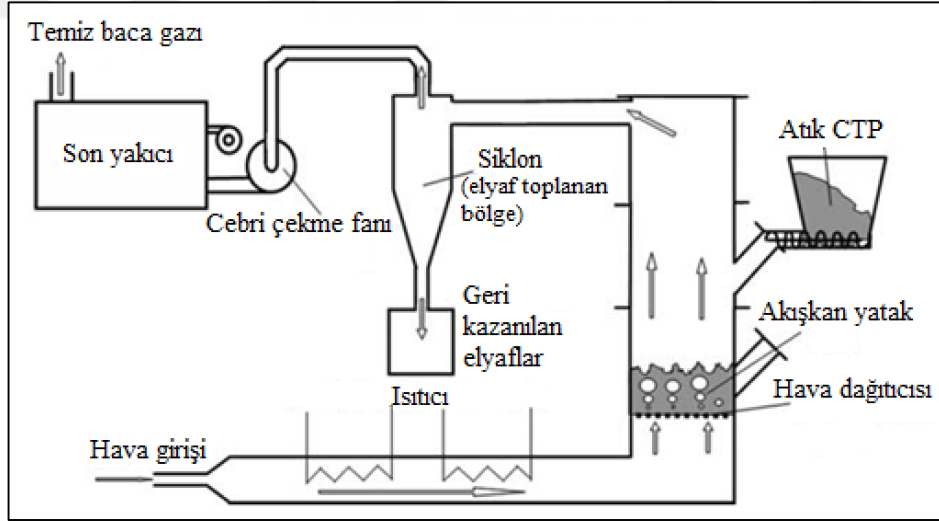
Tablo 1.6. Yakma prosesinin avantajları ve dezavantajları (Gharde ve Kandasubramanian, 2019)

Avantajlar	Dezavantajlar
Katı atığın, enerji, gaz ve küle dönüştürülmesi	Zehirli gaz çıkışı ile hava kirliliğine neden olması
Gömülecek miktarı azaltması	Kalifiye personel gerektirmesi

### 1.6.2.2. Akışkan yatak prosesi

Akışkan yatak prosesi, atık kompozitlerden takviye malzemelerinin geri kazanılması için kullanılır (Pickering ve diğ., 2000; Pickering, 2006).

Öncelikle kompozit atıkların boyutları yaklaşık 25 mm olacak şekilde küçültülür. Ardından atıklar, 450-550 °C sıcaklığında sıcak hava akımı ile akışkanlaştırılmış, 0,4 – 1 m/s hızındaki silis kumu yatağına beslenir. Yüksek sıcaklıkta polimer buharlaşır ve geriye takviye malzemeleri ve dolgu maddeleri kalır. Son aşama, elyafların akışkan yataktan ayrılması ve polimerin tam oksidasyonunu sağlandığı ikincil ısıtma işleminin uygulandığı bir bölmeye aktarılmasını içerir. İşlem sonrasında elde edilen elyaflar kabarık (fluffy) haldedir, reçineden arınmıştır ve çok az yüzey kirliliği içerir. Geri dönüştürülmüş elyafların mekanik özellikleri, cam elyafların ve karbon elyafların gerilme mukavemetinde sırasıyla %50 ve %20 azalma olduğu gösterilmiştir. Mukavemetteki azalma, akışkan yatak işlemiyle ilişkili yüksek sıcaklıklara atfedilmiştir (Pickering, 2006). Akışkan yatak prosesinin şematik gösterimi Şekil 1.25'te verilmiştir.



Şekil 1.25. Akışkan yatak geri dönüşüm prosesi (Pickering, 2006)

Akışkan yataktaki ısıtma işleminin, polimerik matrisin yanı sıra elyafların ön kaplamalarına da zarar verdiği göz önünde bulundurulmalıdır. Bununla birlikte, akışkan yatak prosesinden geri kazanılmış elyafların kalıp üretiminde kullanılan yüzey tülü üretiminde kullanılabilmesi için yeniden ön kaplama çalışması yapılmış fakat mekanik özelliklerde herhangi bir gelişme sağlamadığı görülmüştür (Pickering ve diğ., 2000).

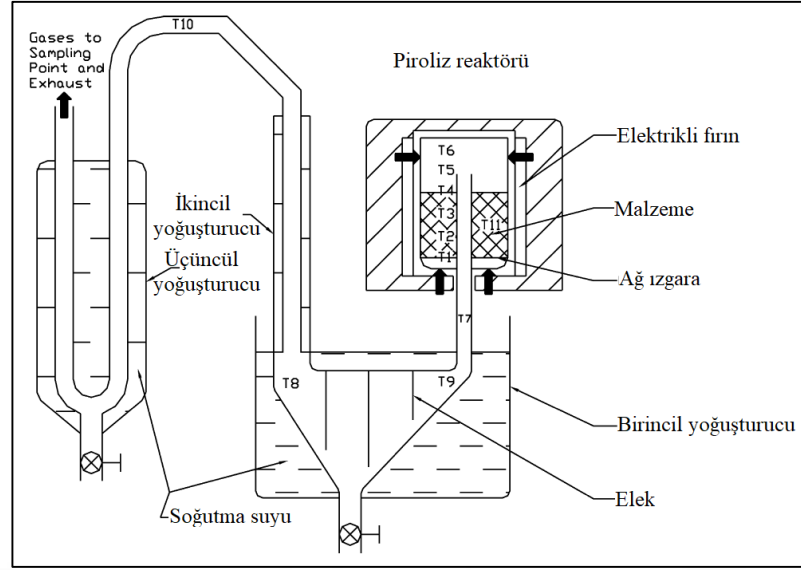
Kennerly ve diğ. (1998) ise yaptıkları çalışmalar sonucunda geri kazanımda 450 °C sıcaklıkta bir akışkan yatak kullanımının cam elyafların bozunmasını minimuma indireceğini bildirmiştir. Akışkan yatak prosesinin avantajları ve dezavantajları Tablo 1.7’de verilmiştir.

Tablo 1.7. Akışkan yatak prosesinin avantajları ve dezavantajları (Pimenta ve Pinho, 2011)

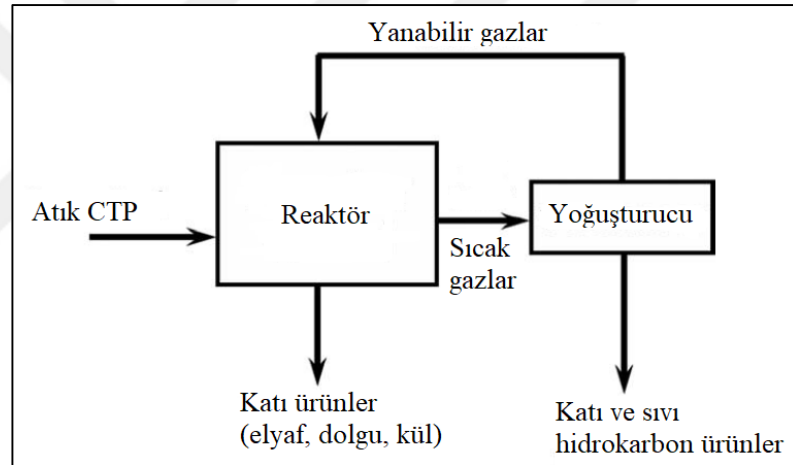
<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Kontaminasyona yüksek tolerasyon	Mekanik dayanımda kayıplar
Elyaf yüzeyinde kömür ya da artık kalmaması	Elyaf uzunluğunda bozulmalar
İyi bilinen bir yöntem olması	Düzensiz, kabarık elyaf eldesi
	Reçinenin geri kazanımının mümkün olmaması

### **1.6.2.3. Piroliz**

Piroliz, çok yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen kimyasal bozunma işlemlerinden biridir. Bu yöntem diğer geri kazanım yöntemlerine göre tesis kurulumu olarak daha pahalı, daha zahmetli ve yüksek enerji maliyetlidir. Ancak sürekli üretim yapılabilir uygun bir tesis kurulabildiği takdirde geri kazanım tekniği ve ekonomisi itibarıyla oldukça verimli bir yöntemdir. Piroliz sırasında, kompozit atık oksijen yokluğunda ısıtılır. Piroliz prosesi sonunda, yağ, gaz, kömür, elyaf ve dolgu maddeleri kazanılır. Yağ ve gaz, soğutma yoluyla ayrılır ve lifler bir ağda tutulur ve kullanım için çıkarılır. Elde edilen yağ, petrole eklenebilir veya doğrudan yakıt olarak kullanılabilir; ayrıca diğer uygulamalarda kullanılabilen önemli bir kimyasal kaynağıdır (Williams ve diğ., 2005). Açığa çıkan gaz ise yanıcı olma özelliği nedeniyle istenirse tesisin kendi enerji ihtiyacını karşılamada istenirse gaz olarak kullanım sağlanarak alternatif enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, piroliz uygulamasında bu gazların yanmasıyla zehirli gaz emisyonu gerçekleşmez (de Marco ve diğ., 2002). Piroliz reaktörünün şematik gösterimi Şekil 1.26’da ve piroliz geri dönüşüm prosesinin şematik gösterimi Şekil 1.27’de verilmiştir.



Şekil 1.26. Piroliz reaktörü (Cunliffe ve Williams, 2003)



Şekil 1.27. Piroliz geri dönüşüm prosesi şematik gösterimi (Pickering, 2006)

Elyaf takviyeli kompozitler için piroliz uygulamaları genellikle 400-550 °C işleme sıcaklıklarında gerçekleştirilir (Cunliffe ve Williams, 2003; Torres ve diğ., 2001). Bu sıcaklıkların altında kalındığında polimer tam olarak bozunmayabilir ve üzerine çıkıldığında ise takviye ve dolgu maddeleri bozunmaya başlayabilir (Torres ve diğ., 2001). Piroliz yönteminin avantajları ve dezavantajları Tablo 1.8’de verilmiştir.

Adherent Technologies, Inc. firması, yüksek sıcaklıkta işlemenin elyafa verdiği hasarı azaltmak amacı ile işleme sıcaklığını yaklaşık 200 °C’ye düşüren ve elyaf mekanik dayanımında %83-99 oranında bir geri kazanımın mümkün olduğu katalitik piroliz tekniğini geliştirmişlerdir (Anane-Fenin ve Akinlabi, 2017; Pickering 2006).

Tablo 1.8. Piroliz yönteminin avantajları ve dezavantajları (Pimenta ve Pinho, 2011)

Avantajlar	Dezavantajlar
Mekanik özelliklerin korunabilmesi	Uygulanan yüksek sıcaklığın geri kazanılan elyafların mukavemetinde bozulmaya neden olması
Reçineden kimyasal hammaddeyi geri kazanma potansiyeli	Elyaf üzerinde kömür birikmesi
Kimyasal solvent kullanılmaması	Geri kazanılan elyaf özelliklerinin proses parametrelerine duyarlılığı
Atmosferik yanmanın gerçekleşmemesi sayesinde hava kirliliğine sebep olmaması	Proses sırasında açığa çıkan zehirli gazlar
Geri kazanılan yağın yakıt olarak kullanılabilmesi	

Literatürde, geri dönüşüm amacı ile mikrodalga enerjisinin kullanıldığı çalışmalara da rastlanmaktadır (Lester ve diğ., 2004; Pingale ve Shukla, 2008; Pingale ve Shukla, 2009; Krzan, 1997; Nikje ve Nazari, 2007). Mikrodalga tekniklerinin temel avantajları, malzemelerin iç kısımlarından dışarı doğru ısıtılması, böylece ısı transferinin daha hızlı gerçekleşmesidir. Bu da çevresel ısı kayıplarını en aza indirmeye yardımcı olur ve böylece enerji tasarrufu sağlanır (Anane-Fenin ve Akinlabi, 2017; Gharde ve Kandasubramanian, 2019).

### 1.6.3. Kimyasal geri dönüşüm

Kimyasal geri dönüşüm, polimerlerin kimyasal olarak monomerlere dönüştürüldüğü veya kimyasal bir reaksiyon yoluyla kısmen oligomerlere depolimerize edildiği süreç olarak tanımlanır (Gharde ve Kandasubramanian, 2019). Kimyasal geri dönüşümde, çaprazbağları kırmak için kimyasal bir çözücü kullanılır. Bazı durumlarda, polimerin çözülmesi sonucu elde edilen organik bileşikler, yeni reçinelerin sentezinde ve çeşitli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılabilir (Asmatulu ve diğ., 2014; Wait, 2006).

İki tür kimyasal geri dönüşüm yöntemi vardır; (1) Süperkritik sıvılarla solvoliz, (2) Düşük sıcaklıkta solvoliz.

### 1.6.3.1. Süperkritik sıvılarla solvoliz

Süper kritik sıvılarla solvoliz, polimerlerin dekompozisyonu için belirli sıcaklık ve basınçtaki seçici bir kimyasal ile tepkiye sokulduğu bir işlemdir. Bu işlemde kompozit malzemeler, elyaflarla birlikte küçük monomerik bileşenlerine ayrışabilirler (Gharde ve Kandasubramanian, 2019; Suyama ve diğ., 2006).

Genel olarak, süperkritik sıvılarla geri dönüşüm işlemlerinde, organik çözücüler (solvoliz) veya su (hidroliz) kullanır. Solvoliz işlemi, çeşitli reaksiyon sürelerinde ve çözücü konsantrasyonlarında bir çözücü içinde meydana gelen geri akış ile ester bağlarının tepkimesi yoluyla kompozit reçinenin polyester-stiren kısmını bozmayı amaçlamaktadır. Solvoliz işlemini hızlandırmak için sıcaklık, çalkalama, basınç ve katalizör gibi diğer işlem parametreleri değiştirilebilir. Hidroliz ise, organik maddelerin süperkritik özelliklerdeki su ile çözüldüğü kimyasal bir ayrıştırma sürecidir (Asmatulu ve diğ., 2014).

Kimyasal işlem genellikle kompozitlerin organik kısmını çözer, bu nedenle kalan kısım takviye malzemeleri ve dolgu maddeleri olur. Kimyasal süreç diğer geri kazanım yöntemlerinden daha hassas bir yöntem olduğu için, geri kazanılan elyaf uzunluğu ve homojenliği daha yüksek olma eğilimindedir; ancak bu işlemde asit, baz, çözücü ve yıkama sıvıları gibi kimyasalların tüketimi yüksektir (Asmatulu ve diğ., 2014; Jiang ve diğ., 2009). Süperkritik sıvılarla geri dönüşüm prosesinin avantajları ve dezavantajları Tablo 1.9’da verilmiştir.

Tablo 1.9. Superkritik sıvılarla geri dönüşümün avantajları ve dezavantajları (Anane-Fenin ve Akinlabi, 2017; Pimenta ve Pinho, 2011)

Avantajlar	Dezavantajlar
Mekanik özelliklerin ve lif uzunluğunun çok yüksek düzeyde korunması	Polimerik reçinelere düşük yapışma
Reçineden malzeme geri kazanımı için yüksek potansiyel	Düşük kontaminasyon toleransı
Elyaf yüzeyinde kalıntı olmaz	Tehlikeli solventler kullanıldığı durumda çevresel etki
	Yüksek maliyetli reaktörlerin kullanımı



Isıl geri dönüşüm tesislerinde olduğu gibi, kimyasal geri dönüşüm tesisleri de kompozit geri dönüşüm için henüz ekonomik olarak uygun değildir (Job, 2013).

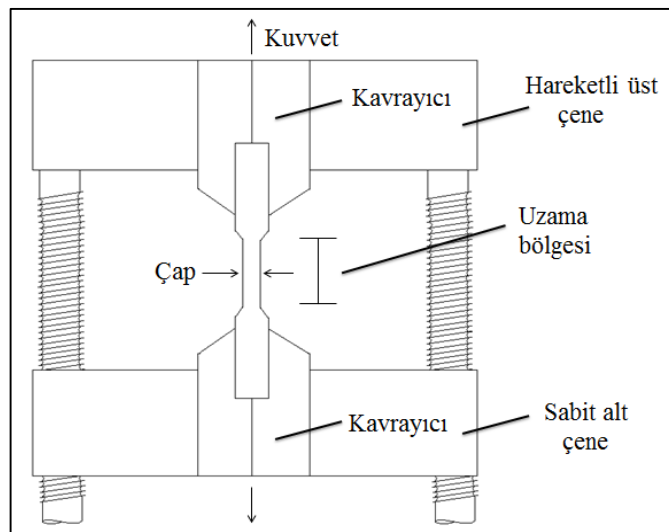
### 1.6.3.2. Düşük sıcaklıkta solvoliz

Düşük sıcaklıkta solvoliz genellikle atmosferik basınçta ve 200 °C'nin altında, asidik ortamda veya su, alkol, amonyak, nitrik asit, sülfürik asit ve asetik asit gibi çözücülerle polimerik matrisi parçalamak için uygulanır. Reaksiyon düşük sıcaklıkta gerçekleşeceği için polimerin tipine bağlı olarak reaksiyonu hızlandırmak için katalizörler, çeşitli katkı maddeleri ve/veya karıştırma gerekebilir. Düşük sıcaklıkta solvolizin avantajları, kimyasal reaksiyon üzerinde daha iyi kontrol sağlanması ve herhangi bir ikincil reaksiyon meydana gelmemesidir. Bununla birlikte reaksiyonun düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi elyafın daha az hasar ile geri kazanılmasını sağlar (Gharde ve Kandasubramanian, 2019).

## 1.7. Kullanılan Deneysel Teknikler ve Cihazların Çalışma Prensipleri

### 1.7.1. Çekme testi

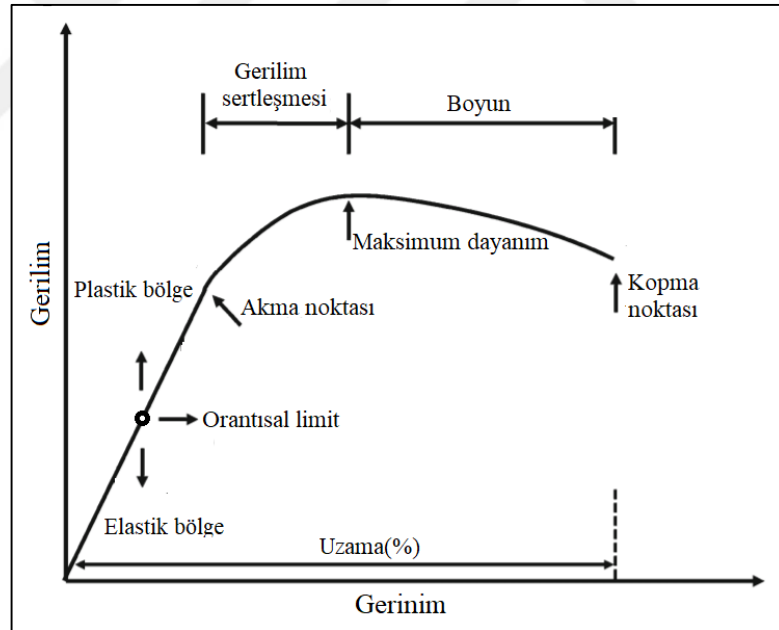
Malzemelerin dış etkenlere gösterdikleri tepkileri incelemek ve malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek üzere malzemelere bazı testler uygulanır. Bu sayede malzemelerin, test yapılan koşullara benzer şartlarda kullanıma uygunluğu değerlendirilir. Çekme testi, en önemli mekanik testlerden birisidir (Saçak, 2005).



Şekil 1.28. Çekme cihazının temel bileşenleri (Kemaloğlu, 2009)

Çekme testinde standartlara göre hazırlanmış örnekler, çekme cihazının çeneleri arasına Şekil 1.28'de gösterildiği gibi yerleştirilir. Test sırasında örneğe sabit bir deformasyon hızında çekme işlemi uygulanır ve bu deformasyona karşı gösterdiği direnç ölçülür (Saçak, 2005). Çekme testi sonucunda malzemelerin kopma dayanımı, elastik modülü, kopma anındaki uzama değeri gibi önemli mekanik özellikleri ve gerilmeye karşı uzama (gerilim-gerinim eğrileri) verisi elde edilir (Dizdar, 2012).

Gerilim-gerinim eğrisi altında kalan alan, malzemenin tokluğunun bir ölçüsüdür ve malzemeyi koparmak için gerekli olan enerjiyle doğru orantılıdır. Malzeme küçük gerilimlere maruz kaldığında elastikiyet özelliğini korur ve bu süreçte oluşan şekil değişimleri kalıcı değildir. Malzemenin elastik özellik sergilediği en üst nokta orantısal limit noktasıdır. Orantısal limit noktasından sonra malzeme plastik deformasyon bölgesine geçiş yapar ve artık oluşan şekil değişimleri kalıcı hale gelir. Şekil 1.29'da bir gerilim-gerinim eğrisi örneği verilmiştir (Mark, 2004).



Şekil 1.29. Polimerik malzemeler için tipik bir gerilim-gerinim eğrisi (Lim ve Hoag, 2013)

Elastik bölgede kalan eğrinin eğiminden elde edilen değer, o malzemenin elastiklik modülüdür. Akma dayanımı ise, polimer zincirleri arasında kayma hareketinin meydana geldiği ve kalıcı şekil değiştirmenin başladığı değerdir. Test sırasında ölçülen en yüksek gerilim değerine çekme dayanımı adı verilmektedir. Malzemenin koptuğu

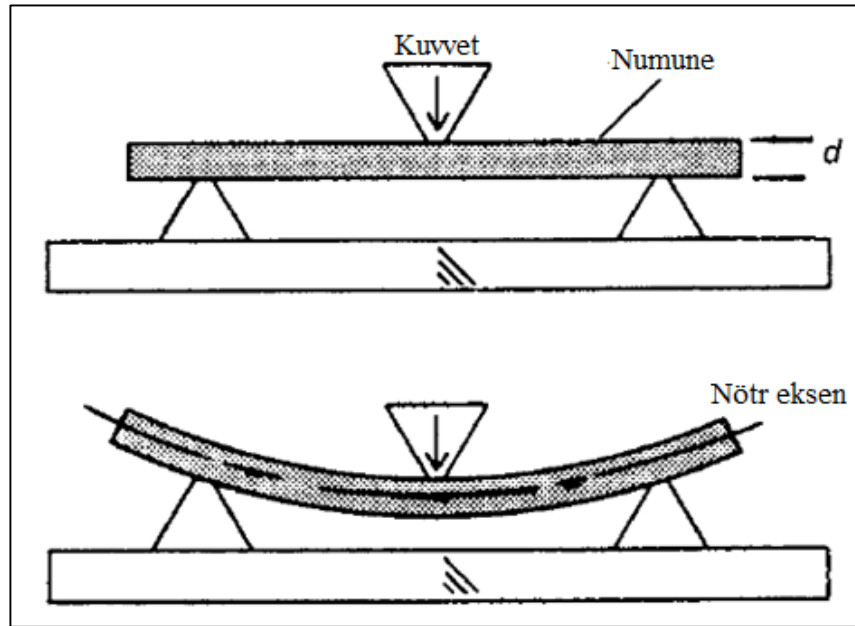
anda ölçülen gerilime kopma dayanımı, gerinim miktarına ise kopma anındaki gerinim ya da kopmada uzama denilmektedir (Carraher, 2008).

### 1.7.2. Üç nokta eğme testi

Eğme testi ile malzemenin yük altında deformasyona karşı gösterdiği dirence yönelik bilgiler elde edilir. Eğme testi, üç nokta eğme ve dört nokta eğme testi olmak üzere iki farklı yöntemle uygulanabilir. En yaygın kullanılan eğme testi, üç nokta eğme testidir. (Saçak, 2005)

Üç nokta eğme testinde standartlara uygun ölçülerde hazırlanmış, genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir örnek iki destek üzerine ortalanarak yerleştirilir. Örneğe üstten dikey olacak şekilde bir kuvvet uygulanır. Uygulanan yüke karşı örneğin merkezden eğilme miktarı kaydedilerek gerilim-gerinim eğrileri elde edilir. Malzemenin kırıldığı andaki kuvvet malzemenin eğme dayanımına karşılık gelir (Adams ve diğ., 2003).

Eğme testi ile malzemenin eğme dayanımı, eğme modülü, eğilme uzaması gibi özellikleri belirlenebilir. Şekil 1.30'da üç nokta eğme testinin şematik gösterimi verilmiştir.

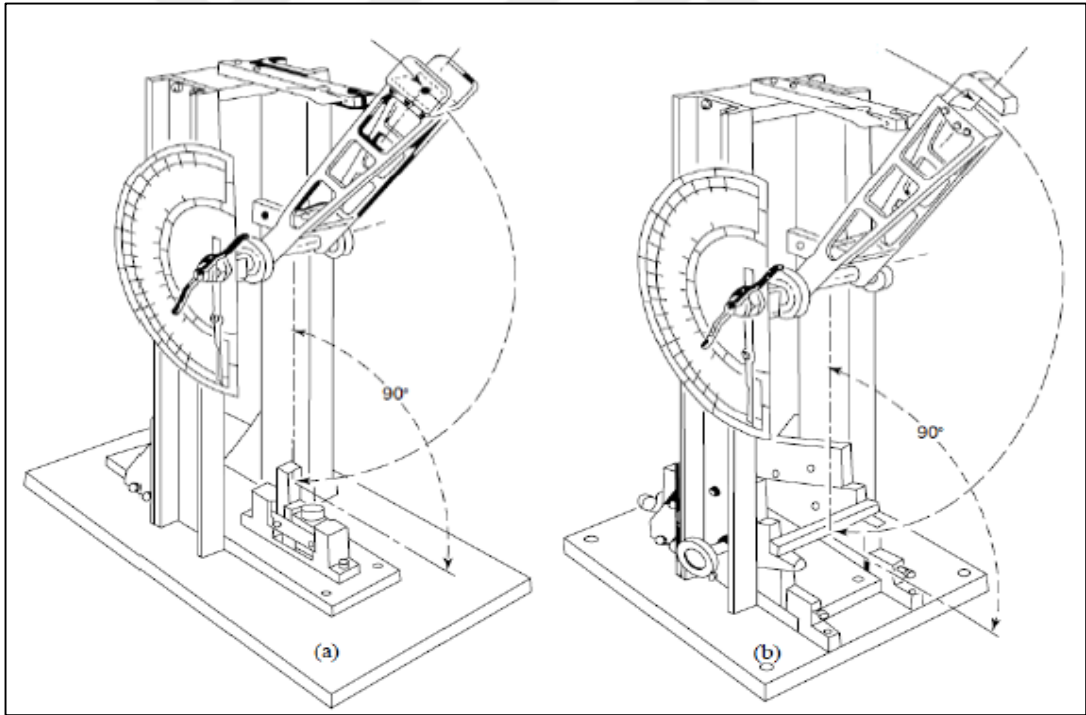


Şekil 1.30. Üç nokta eğme testinin şematik gösterimi (Lampman, 2003)

### 1.7.3. Darbe testi

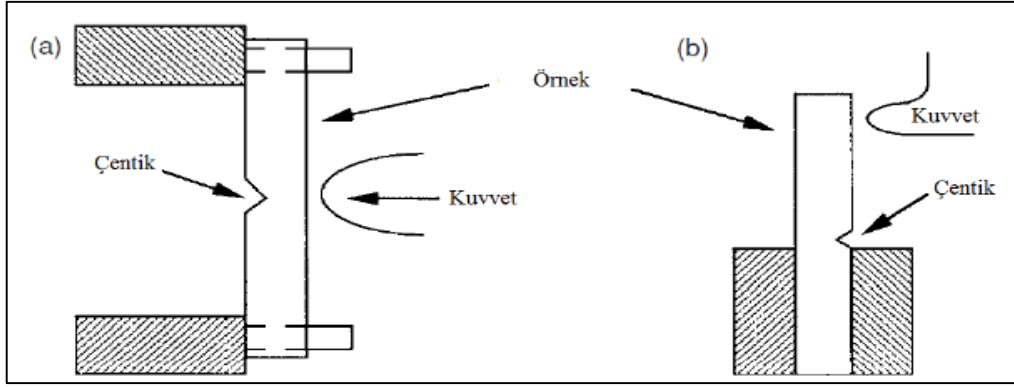
Darbe testi ile malzemelerin ani bir darbe karşısında gösterdikleri dayanım ölçülür. Darbe dayanımı, birim boyuttaki (alan veya kalınlık) malzemenin kırılması için gerekli olan enerji miktarıdır (Bower, 2002).

Polimerik malzemelerde genellikle sarkaç tipi darbe testi yöntemleri kullanılmaktadır. Sarkaçlı darbe testinde, ucunda farklı büyüklüklerde ağırlık bulunabilen bir çekiç, standartlaştırılmış belirli bir yükseklikten ve belirli bir açı ile serbest bırakılarak test edilecek örneğe çarptırılır ve örneğin kırılması sağlanır. Sarkaç tipi darbe testi, Charpy darbe testi ve Izod darbe testi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki teknikte de test cihazının çalışma prensibi aynıdır. Charpy ve Izod darbe testinin farkı yerleştirilme şeklidir. Testler çentikli ya da çentiksiz olacak şekilde uygulanabilmektedir (Bower, 2002). Sarkaç tipi darbe testlerinin şematik gösterimi Şekil 1.31’de verilmiştir.



Şekil 1.31. Sarkaç tipi darbe testleri (a) Izod darbe testi, (b) Charpy darbe testi (Mark, 2004)

Charpy darbe testinde, test edilecek örnek yüzeye paralel bir şekilde yerleştirilmektedir. Izod darbe testinde ise örnek yüzeye dik şekilde yerleştirilir (Hodgkinson, 2000). Charpy ve Izod darbe testlerindeki örneğin konumundaki farklılıklar Şekil 1.32’de gösterilmiştir.

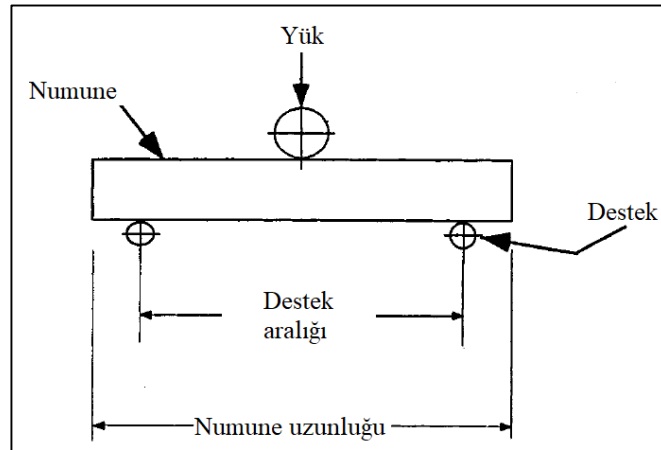


Şekil 1.32. Sarkaç tipi darbe testlerinde örneklerin yerleştirilme şekilleri (a) Charpy darbe testi, (b) Izod darbe testi (Hodgkinson, 2000)

#### 1.7.4. Kısa kiriş testi

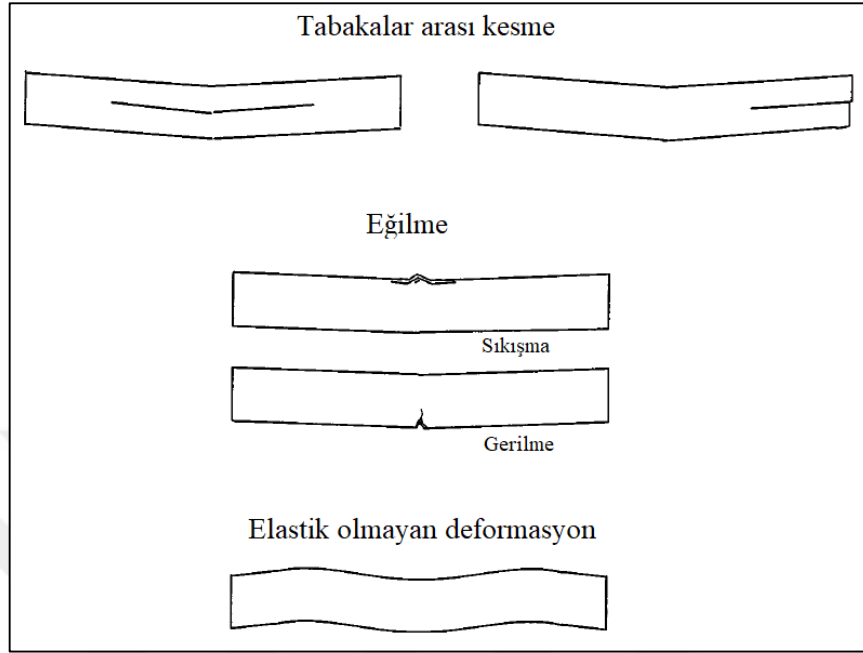
Kısa kiriş testi kompozit malzemelerin tabakalar arası kesme dayanımının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu test yöntemi sürekli veya süreksiz elyaf takviyeli polimerik kompozitlere uygulanır (ASTM D2344, 2016).

Test üç nokta eğme yöntemine benzer şekilde fakat dar bir aralığa sahip destekler üzerine yerleştirilmiş örneğe üç noktadan kuvvet uygulanarak gerçekleştirilir. Test sırasında örneğe hem eğme hem de tabakalar arası kesme gerilmeleri yüklenir. Eksenel eğme gerilmeleri, yükün uygulandığı örneğin üst yüzeyinde sıkıştırma ve alt yüzeyinde çekme etkisi yaratır. Nötr düzlemde, tabakalar arası kayma gerilimi maksimum düzeydedir. Destek aralığı/örnek kalınlığı oranının düşük tutulması eğme gerilmesini azaltarak kesme kırılmalarını artırır (Adams ve diğ., 2003). Kısa kiriş testinin şematik gösterimi Şekil 1.33'te verilmiştir.



Şekil 1.33. Kısa kiriş testi şematik gösterimi (ASTM D2344, 2016)

Test sonrası örneğin son hali de test sonucunu yorumlamak amacı ile değerlendirilir. Kısa kiriş testinde görülen hata tipleri Şekil 1.34’te verilmiştir.



Şekil 1.34. Kısa kiriş testinde görülen hatalar (ASTM D2344, 2016)

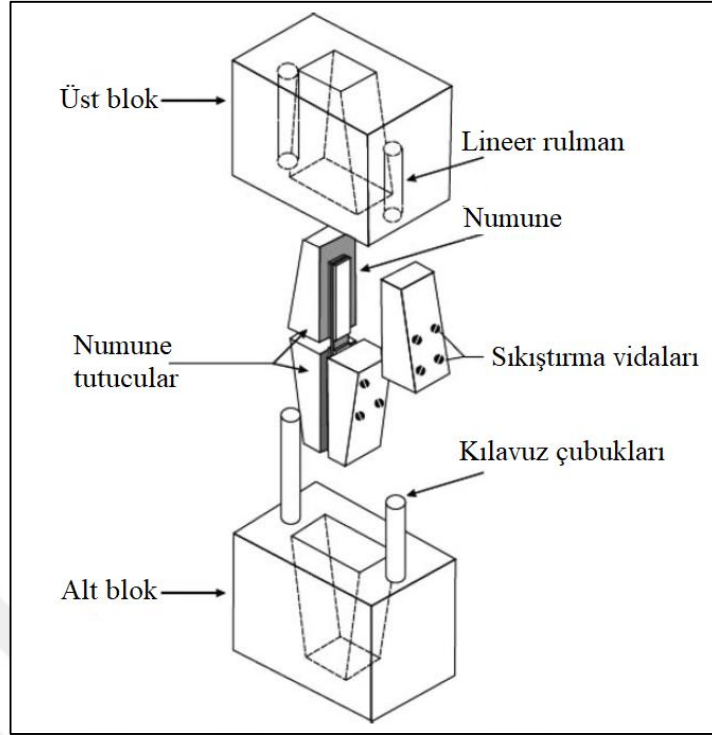
Kısa kiriş testinde, kısa kiriş dayanımı Eşitlik (1.3) kullanılarak hesaplanır (ASTM D2344, 2016). Burada  $F_s$  kısa kiriş dayanımını,  $P_m$  test sırasında elde edilen maksimum yüklemeyi,  $b$  örnek genişliğini ve  $h$  örnek kalınlığını ifade eder.

$$F_s = P_m / (bxh) \quad (1.3)$$

### 1.7.5. Basma testi

Basma (sıkıştırma) dayanımı bir malzemenin birim alanının (kalınlık x genişlik) dayanabildiği maksimum sıkıştırma kuvvetini verir. İki çene arasına tutturulan örneğe test sırasında dik ekseninde üstten bir kuvvet uygulanır. Basma testi ile malzemenin basma dayanımı, basma modülü, basma uzaması ölçülür (Saçak, 2005).

Basma testi, temel prensibi aynı olmak üzere farklı standartlara göre, farklı şekillerde uygulanabilir. Bu yöntemlerden bir tanesi olan Illinois Institute of Technology Research Institute (IITRI) yöntemi, çeşitli kompozit malzemelerin basma testi için yapılandırılmış standart bir test prosedürüdür ve ASTM D 3410 standardı ile tanımlanır. Şematik IITRI basma test fikstürü Şekil 1.35’te verilmiştir.

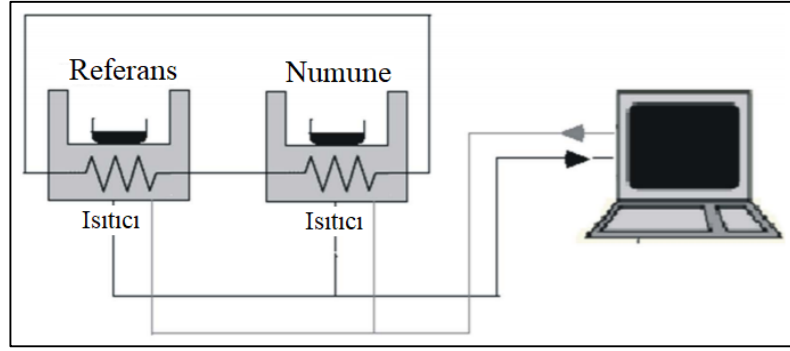


Şekil 1.35. IITRI basma test fikstürü (Carlsson ve diğ., 2013)

Bu testte, yassı kamalı çeneler ve bir çift kılavuz çubuğu kullanılır. Örnek, destekli ya da desteksiz olarak test edilebilir. Örneğe, kılavuz çubukları eşliğinde alt ve üst bloklara yerleştirildikten sonra dik şekilde üstten kuvvet uygulanır. Test sırasındaki yükleme sebebi ile örnekte genellikle matriste ya da matris-elyaf arayüzeyinde hatalar (failure) gözlenir (Carlsson ve diğ., 2013).

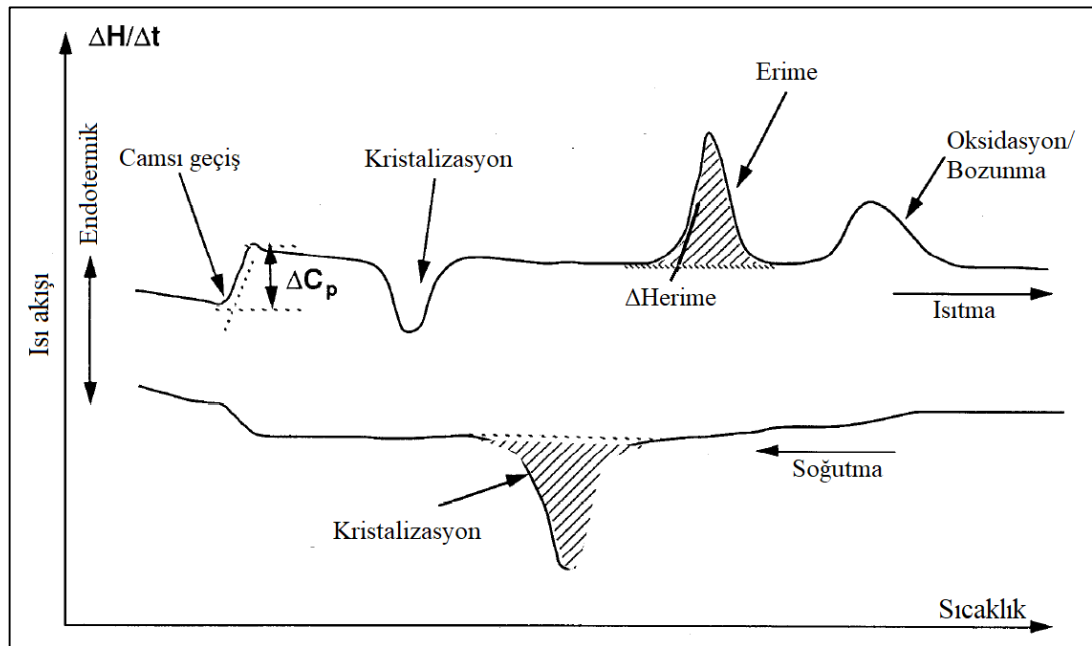
#### 1.7.6. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC)

Diferansiyel taramalı kalorimetri cihazı, numune ısıtılırken, soğutulurken veya sabit bir sıcaklıkta tutulurken soğurulan veya salıverilen enerji miktarını ölçer. Malzemelerin ısıl geçişleri, ısı kapasitesi, reaksiyon ve kristalizasyon kinetiği gibi önemli özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan bir ısıl analiz tekniğidir (Kemaloglu, 2009). Bu cihazın çalışma prensibi, sabit hızla ısıtma veya soğutma koşullarında örnek ve referans malzeme sıcaklıklarının aynı tutulması için gerekli olan ısı akısının sıcaklık ve zamana göre kaydedilmesi temeline dayanmaktadır (Menczel ve Prime, 2009). DSC cihazının şematik gösterimi Şekil 1.36'da verilmiştir.



Şekil 1.36. DSC'nin şematik gösterimi (Ghandi, 2014)

DSC'de referans ve örnek için iki adet hazne bulunmaktadır. İçi boş bir örnek kabı referans bölümüne yerleştirilirken, içinde malzeme bulunan ikinci kap örnek bölümüne yerleştirilir. Analizin başlangıç sıcaklığının belirlenmesinin ardından iki hazne de belirlenen başlangıç sıcaklığına ulaşıncaya kadar ısıtılır/soğutulur. Hazneler başlangıç sıcaklığına ulaştığında, belirlenen test yöntemi kapsamında belirtilmiş son sıcaklık değerine ulaşıncaya kadar belirli hız ile ( $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ) ısıtılmakta, ya da bir dizi ısıtma ve/veya soğutma işlemlerinden geçirilerek hedeflenen son sıcaklık değerine ulaşmaktadırlar. Referans ile örnek arasında sıcaklık farkı meydana geldiğinde, bu farkın dengelenmesi amacı ile örneğe verilen ısı miktarı değiştirilmektedir. Böylece, faz değişimi esnasında örneğe aktarılan ısı miktarı saptanabilmektedir (Menczel ve Prime, 2009). Örnek bir DSC termogramı Şekil 1.37'de verilmiştir.



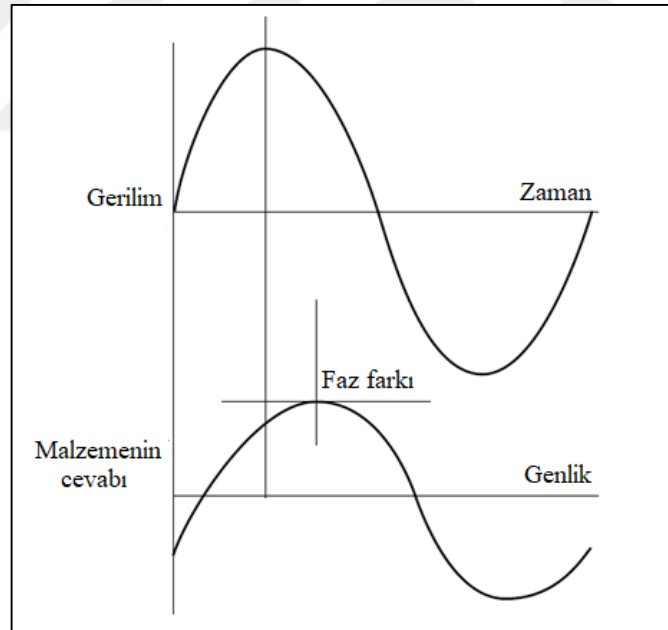
Şekil 1.37. Örnek bir DSC termogramı (Cheremisinoff, 1996)



Test sırasında oluşan ısı farkı eğer pozitif ise (endotermik), malzeme ısıtıcısına enerji verilir ve pozitif sinyal elde edilir. Oluşan ısı farkı eğer negatif ise (ekzotermik), referans ısıtıcısına enerji verilir ve negatif sinyal elde edilir. DSC, sadece entalpi değişiminin olduğu durumlara karşı değil, bununla birlikte referans ile örneğin ısı kapasiteleri arasındaki farka da duyarlıdır. Böylece malzemelerin camsı geçiş, erime, kristallenme, çagrazbağlanma sıcaklığı ve saflık gibi özellikleri belirlenebilir (Kemaloğlu, 2009).

### 1.7.7. Dinamik mekanik analiz (DMA) yöntemi

Dinamik mekanik analiz yönteminde, örnek üzerinde küçük bir gerilim dögüsü uygulanır. DMA yöntemi moleküllerin hareketlerinden kaynaklanan hal değişimlerini saptar ve örneğin sıcaklığa, gerinime ve frekansa karşı gösterdiği tepki ölçülür. DMA ile viskoelastik malzemelerin mekanik özellikleri sıcaklık, frekans ve zamana göre belirlenebilir (Menard, 1999).



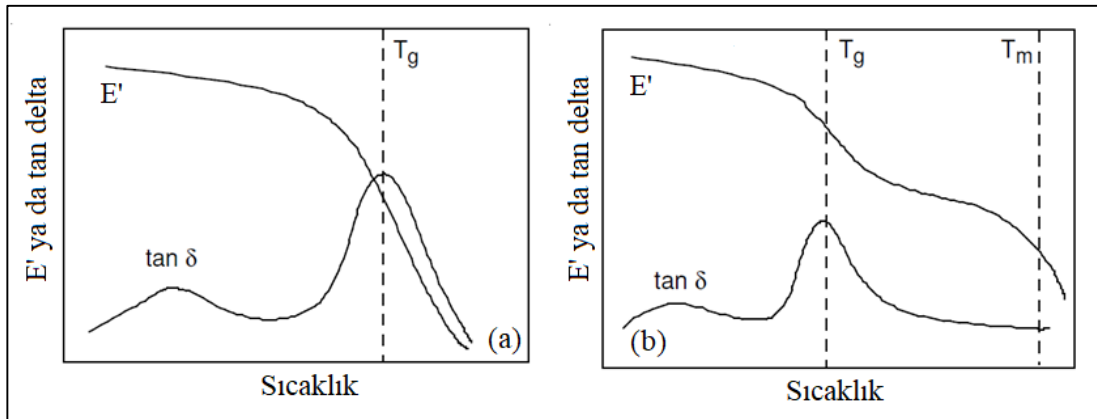
Şekil 1.38. DMA analizinde kuvvetin sinüsoidal salınımı (Mark, 2004)

Bir malzemeye yük uygulandığı durumda malzemede bir deformasyon gerçekleşir. Malzemeye uygulanan yük kaldırıldığında deformasyon tamamen kayboluyorsa buna elastik deformasyon, bu tür malzemelere de ideal elastik malzemeler denir. Elastik deformasyon, malzemeye uygulanan yük ile doğru orantılıdır ve yük uygulandığı anda

deformasyon gözlenir ve yük kaldırıldığında da tamamen kaybolur. Bazı malzemelerde ise, deformasyon doğrusal değildir ve uygulanan yüke göre gecikmeli gerçekleşir. Elastik davranışın karşısı viskoz davranıştır (Menard, 1999).

DMA yönteminde malzemenin viskoelastik davranışını görmek için örneğe sinüsoidal deformasyon uygulanır (Şekil 1.38). Örnek gerilim kontrollü teste, ya da gerinim kontrollü teste tabi tutulabilir. Örnek, bilinen bir gerilim altında belirli bir ölçüde gerinim gösterir. DMA yönteminde bu sinüsoidal bir şekilde uygulanır ve örneğin ne kadar deformasyon göstereceği malzemenin sertliğine (rijitliğine) bağlıdır (Menard, 1999).

DMA malzemenin sertlik ve sönümlenme özelliğini ölçer ve bu özellikleri modül ve sönümlenme faktörü ( $\tan \delta$ ) değerleri ile takip eder. Ölçümler sinüsoidal kuvvet uygulanarak alındığı için, modül iki bileşenden oluşur, sinüsoidal kuvvetin eş fazlı bileşeni depo modülünü, dışarı fazlı bileşeni ise kayıp modülünü verir. Depo modülü ( $E'$ ) malzemenin elastik davranışını gösterir ve kayıp modül ( $E''$ ) ise malzemenin viskoz davranışı ile ilgilidir. Kayıp modülün depo modülüne oranı ise  $\tan \delta$ 'yı verir ( $\tan \delta = E''/E'$ ) (Menard, 1999). Sıcaklık taraması ile elde edilen tipik bir DMA eğrisi Şekil 1.39'da verilmiştir.



Şekil 1.39. DMA analizinden elde edilecek tipik bir sıcaklık tarama eğrisi (a) Amorf malzemeler için (b) Yarı kristalin malzemeler için (Menczel ve Prime, 2009)

### 1.7.8. Yük altında eğilme sıcaklığı (HDT) testi

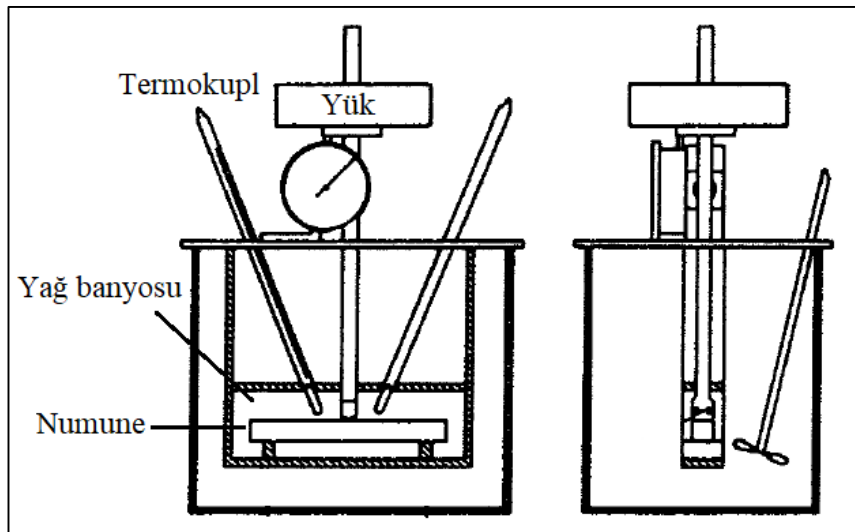
Yük altında eğilme sıcaklığı testi, malzemenin ısı etkisindeki rijitlik özelliği hakkında bilgi veren bir testtir. HDT testinde örnek, üç nokta eğme benzeri bir düzenek üzerinde sabit bir yük ile yüklenir ve deformasyon sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülür.

Yüksek eğilme miktarları, polimerin sertliğinin düşük olduğuna ve sertlik açısından kritik uygulamalarda kullanılamayacağına işaret eder. Genel olarak polimerler HDT değerlerinin çok altındaki sıcaklıklarda kullanılmalıdırlar. Amorf polimerlerde, HDT değeri  $T_g$ 'nin altında fakat  $T_g$ 'ye çok yakındır; yarı kristalin polimerlerde ise  $T_g$ 'nin üzerine çıkabilse de mutlaka  $T_m$ 'nin altında bir değerdir (Menczel ve Prime, 2009).

HDT, malzemenin ısıl kararlılığının bir ölçüsü olarak kullanılmamalıdır. Yük altında bir malzemenin eğilmeye başladığı sıcaklığa ilişkin bilgi verir. HDT malzemenin rijitliğinin bir ölçüsü olduğu için cam elyaf oranından etkilenir. Aynı zamanda yumuşama ve gevşeme, malzemenin kristalinitesinin de bir fonksiyonudur (Lampman, 2003).

HDT, yük taşıyacak polimerlerin servis sıcaklığının belirlenmesinde kullanılabilir. Bazı malzeme yüzeylerinin  $40\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin çok üzerindeki sıcaklıklara maruz kalabileceği yaz aylarında dış mekân uygulamaları için özellikle önemlidir (Chan ve diğ., 2006).

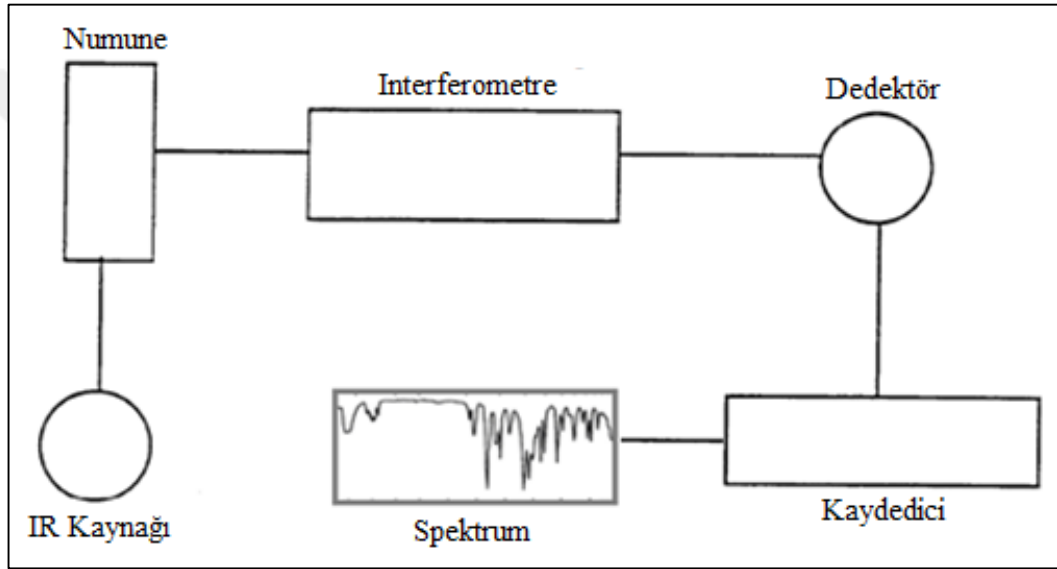
Şekil 1.40'ta HDT testinin şematik gösterimi verilmiştir. Test, standartlara göre hazırlanmış bir örneğin iki destek üzerine yerleştirilip üç nokta eğme testine benzer şekilde üstten yük uygulanarak gerçekleştirilir. Genelde bir yağ banyosu içerisinde uygulanır ve yağın sıcaklığı belirli bir hızla arttırılır. Belirli eğilme miktarı için eğildiği sıcaklık kaydedilir. Parça geometrisi, sıcaklık artış hızı, yüksek sıcaklığa maruz kalma süresi test sonucu üzerinde etkilidir (Lampman, 2003; TS EN ISO 75, 2020).



Şekil 1.40. HDT testi şematik gösterimi (Lampman, 2003)

### 1.7.9. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

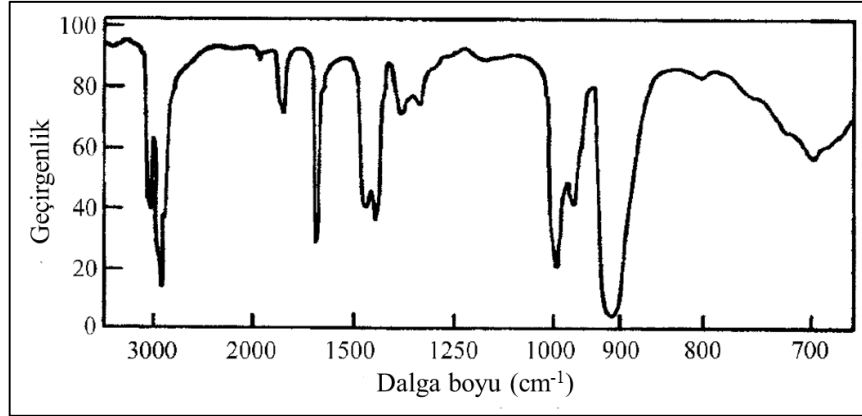
Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi, malzeme içindeki fonksiyonel grupların türlerini saptamak için kullanılan spektroskopik bir analiz tekniğidir (Şekil 1.41). Molekülleri oluşturan atomlar sürekli hareket halinde bulunmaktadır. Bu hareketler sonucunda moleküllerde titreşim hareketleri oluşmaktadır. Bu titreşim hareketleri de bağlarda gerilme ve eğilme hareketlerinin oluşmasına neden olmaktadır (Bower, 2002). Bu yöntemin temeli, molekül içi bağlar üzerine çarpan kızılötesi ışınların, bağların titreşim ve dönme hareketleri ile soğurulmasına dayanır (Mark, 2004).



Şekil 1.41. FTIR cihazının çalışma şeması (Cheremisinoff, 1996)

FTIR analizinde tüm dalga uzunlukları örnek üzerinden aynı anda geçerek dedektöre ulaşır. Dedektör, çift demetli girişimölçerde bulunan aynaların birinin yer değiştirmesinin bir fonksiyonu olarak toplam iletilen yoğunluğu saptar. Daha sonra çeşitli dalga boylarının ayırımı bir bilgisayar kullanılarak matematiksel olarak Fourier dönüşümü ile gerçekleştirilir (Bower, 2002).

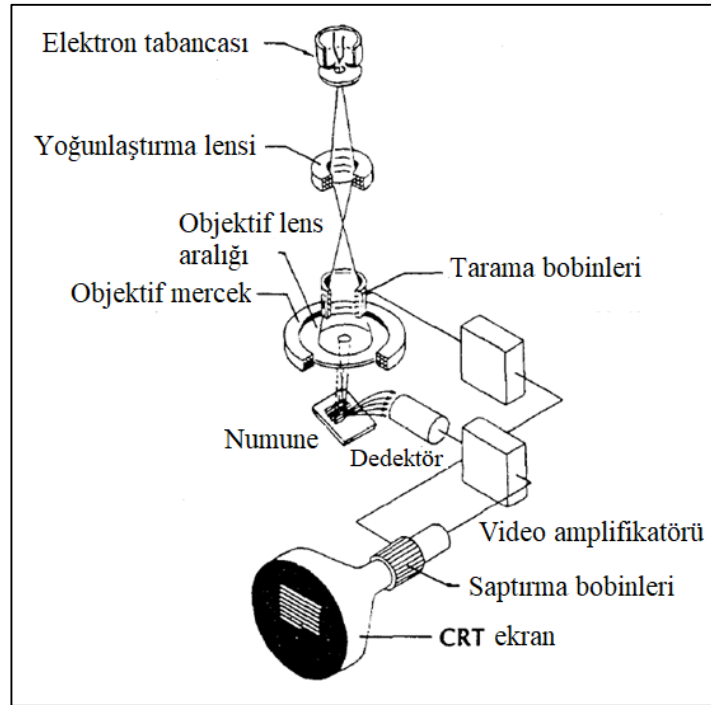
Şekil 1.42'de FTIR analizi ile elde edilen örnek bir spektrum verilmiştir. IR spektrumunda  $3600-1500\text{ cm}^{-1}$  arasını kapsayan bölge fonksiyonel grup bölgesi,  $1500-600\text{ cm}^{-1}$  arasını kapsayan bölge ise küçük yapısal değişiklikleri veren parmak izi bölgesi olarak adlandırılmaktadır (Bower, 2002).



Şekil 1.42. Örnek bir FTIR spektrumu (Bower, 2002)

### 1.7.10. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu, incelenecek örnek yüzeyinin elektronlar ile taranması aracılığıyla yüksek çözünürlükte yüzey görüntülerinin sağlandığı bir tür elektron mikroskobudur. Örnek yüzeyindeki gözeneklerin, çok küçük girinti ve çıkıntıların detaylı bir şekilde görüntülenmesini sağlar. SEM cihazının temel bileşenleri; elektron kaynağı, manyetik odaklanma lensleri, örnek vakum odası ve kontrol paneli, elektronik güç kaynağı ve tarama modülünün bulunduğu bir elektronik konsoldur (Brundle, 1992).



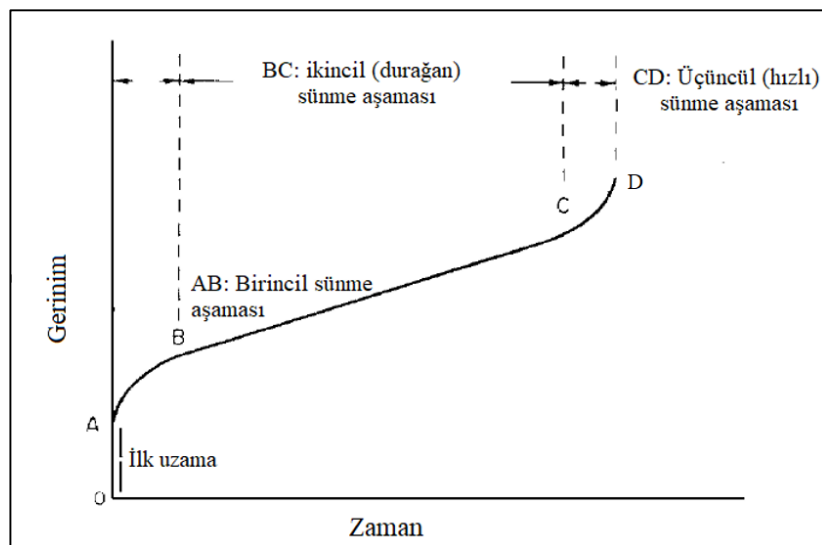
Şekil 1.43. SEM cihazının çalışma prensibi (Cheremisinoff, 1996)

SEM'in çalışma prensibi şematik olarak Şekil 1.43'te verilmiştir. Cihazın en üst kısmında bulunan elektron tabancası ile üretilen elektron demetleri, önce vakum altında tutulan dikey bir yol boyunca ilerlerler, daha sonra elektromanyetik alan ve ışınları örneğe odaklayan lenslerin içinden geçer. Elektron demetleri örneğe çarptığında, örnekten X ışınları ve elektronlar kopar. Açığa çıkan X-ışınları, geri saçılmış elektronlar ve ikincil elektronlar dedektör tarafından toplanır ve sinyale dönüştürülür. Böylece örneğin yüzey topografyası elde edilmiş olur (Reimer, 1998).

Görüntülenecek örneğin yalıtkan bir malzeme olması durumunda, örneğin önce iletken hale getirilmesi, bunun için de altın, altın/paladyum veya alüminyum gibi ince iletken bir tabakayla kaplanmaları gerekmektedir. SEM cihazı 10 ile 50.000 arasında bir büyütme ile görüntüleme yapılabilir. Ayrıca örneğin belli bölgelerindeki element bileşimlerinin nitel ya da yarı nicel analizlerini de yapmak mümkündür (Karslı Yılmaz, 2010).

#### 1.7.11. Sürünme testi

Sürünme, malzemenin sabit sıcaklık ve sabit yük altında, visko-elastik deformasyon nedeni ile kalıcı olarak şekil değiştirmesidir. Düşük yüklerde sürünme, tane sınırları boyunca atomların difüzyonuyla kontrol edilir. Daha yüksek yüklerde ise gevşeme, yer değiştirme hareketi ile ilerler. Sürünme hızı, malzemeye uygulanan yük ve uygulama süresinin bir fonksiyonudur. Sürünme testinden elde edilmiş örnek bir grafik Şekil 1.44'te verilmiştir.

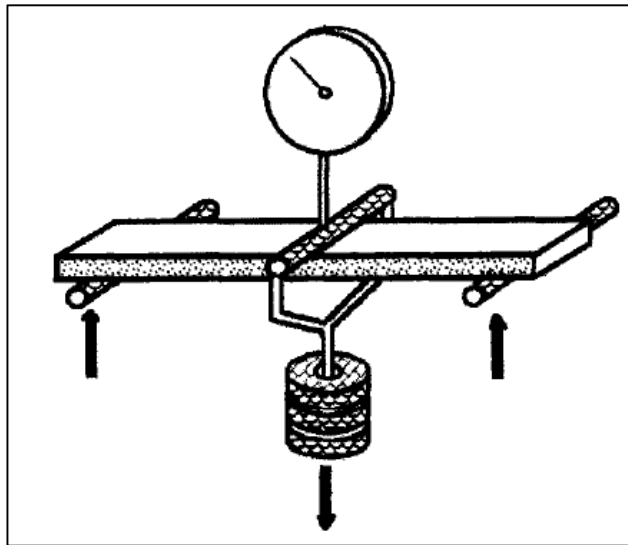


Şekil 1.44. Tipik bir sürünme grafiği (Hearn, 1997)

Sürünme testinde, örnekler sabit bir yüke maruz bırakılır ve örneğin uzaması kaydedilir. Bu verilerden, plastiklerin uzun vadeli davranışının grafiksel bir gösterimini sağlayan gerinim-zaman eğrileri oluşturulabilir (Hearn, 1997).

Birinci sürünme aşamasında, dislokasyonların hareketi çok hızlıdır; deformasyon sertleşmesinin (work hardening) sebep olduğu hareket engelleri, azalan bir hızla da olsa aşılır. Bu nedenle, başlangıçtaki sürünme gerinim hızı yüksektir; ancak hızla sabit bir değere düşer. İkinci aşamada, dislokasyon yığılması ve dolaşmanın deformasyon sertleştirme süreci, dislokasyon tırmanışı ve çapraz kayma süreçleriyle dengelenir ve daha düz bir eğri gözlenir. Genelde birincil ve üçüncül aşamalar hızlı bir şekilde gerçekleştiğinden, tasarım mühendisi için ikincil sürünme hızı daha önemlidir. Üçüncü aşamada ise malzeme içinde boşluklar oluşur ve bu durum boyunlaşmaya yol açarak, stresin artmasına ve hızlı bir şekilde kırılmaya (failure) neden olur (Hearn, 1997).

Temel olarak iki farklı ölçüm yöntemi mevcuttur; (1) Gerilim gecikmesi (stress retardation) testi (2) Gerilim gevşemesi (stress relaxation) testi. İlk yöntemde örnek sabit bir yüke maruz bırakılır, zamanla malzeme süründükçe yükün örnekte sebep olduğu uzama miktarı kaydedilir. İkinci yöntemde ise uzama miktarı sabit tutularak, sürünme gerçekleştikçe kuvvet düşürülür. Sürünme testi üç nokta eğme, basma ve çekme gibi farklı yöntemlerle uygulanabilir. Eğme yöntemi ile uygulanan sürünme testi düzeneği Şekil 1.45'te verilmiştir (Driscoll, 1998).



Şekil 1.45. Sürünme test düzeneği (Driscoll, 1998)

Sıcaklık arttıkça malzemelerin sürünme oranı artar. Eriyebilen malzemelerde, erime sıcaklığının 0,4 katı ortam sıcaklığında sürünme çok belirginleşir. Gaz türbin motorları, fırınlar ve buhar türbinleri gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılacak malzemelerin sürünme özellikleri çok önemlidir ve mutlaka hesaplanmalıdır (Driscoll, 1998).





## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Tez kapsamında yapılan literatür taraması üç ana başlık altında toplanmıştır. İlk grupta matrisi çeşitli yöntemlerle elimine ederek sadece elyafın geri kazanıldığı çalışmalar özetlenmiştir. İkinci grupta atığın öğütülerek doğrudan kullanımına yönelik çalışmalar incelenmiştir. Üçüncü grup çalışmalar ise, CTP atıklarının benzer kompozit malzemelerde kullanımına yöneliktir ve sınırlı sayıdadır.

### 2.1. Atığın İçerdiği Elyafı Geri Kazanmak Üzere Yapılan Çalışmalar

CTP esaslı atıkların geri dönüşümü üzerine yapılan çalışmalar, ağırlıklı olarak termoset matrisin çeşitli yöntemlerle giderilerek cam elyafın geri kazanımı üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Perrin ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada, SMC prosesinden elde edilmiş atık CTP, termoplastik özellikteki bir polimerik matriste takviye olarak değerlendirilmiştir. Atıktan kazanılan cam elyafın termoplastik malzemenin mekanik dayanımını artırması için iki aşamalı bir proses önerilmiştir. SMC plakaları 5x5 cm boyutlarında kesildikten sonra öğütücüde öğütülmüş, ardından asit banyosunda bekletilmiş ve filtrasyon ile atık tozlar uzaklaştırılmıştır. Kazanılan cam elyafın termoplastik malzemenin mekanik dayanımını arttırdığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar uygun bir deneysel tasarım tekniği ile değerlendirilerek geri kazanım proses parametreleri optimize edilmeye çalışılmıştır.

Shi ve diğ. (2012)'nin yaptığı çalışmada, atık CTP ve karbon elyaf takviyeli polimer (KTP) kompozitlerin pirolizinde kızgın buhardan yararlanılmıştır. Piroliz işlemi CTP için 370 °C, 30 dk; KTP için ise 340 °C, 30 dk koşullarında gerçekleştirilmiştir. Piroliz sonucu geri kazanılan elyaflar, vakum eşliğinde RTM tekniği ile elyaf takviyeli polimer üretmek için kullanılmıştır. Elyaf üzerinde kalan reçine artıkları yüzey işlemi ile giderilmiştir. Yüzey işlemi, elyafların oda sıcaklığında 4 saat asetonda ve ardından 24 saat deterjanda bekletilmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Yüzey işlem görmemiş elyaf kullanılarak üretilen kompozitlerin eğme dayanımları, yeni (virgin) cam elyaf ile

üretileen kompozitinkine oranla oldukça düşüktür. Bununla birlikte, yüzey işleme uygulanan elyafarla hazırlanan kompozitlerin eğme dayanımlarının yeni elyaf ile hazırlanan kompozitlerinkine daha yakın olduğu görülmüştür.

Kouparitas ve diğ. (2002) tarafından yapılan çalışmada, atık CTP'den cam elyaf, KTP'den karbon elyaf ve aramid elyaf takviyeli kompozitten aramid elyaf geri kazanılıp PP esaslı kompozit üretiminde kullanılmıştır. Öğütölen CTP'ler 1, 2, 3,5 ve 5,5 mm boyutlarında elenmiştir. Yeni kompozitlerde değerlendirmek amacıyla ortalama bir boyut olan 3,5 mm'lik fraksiyon kullanılmıştır. %40 oranında cam elyaf içeren kompozitler, lif uzunluğu ve matris içindeki oranı dikkate alınarak karakterize edilmiştir ve elde edilen sonuçlar, yeni elyaf ile hazırlanan kompozitlerle kıyaslanmıştır. Çođu durumda geri dönüşümden elde edilen elyafaların kullanımı mekanik dayanımı olumsuz etkilemediği görülmüştür.

Kao ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada hidroliz teknolojisi ile geri kazanılan cam elyafaların mekanik performansına etkisi incelenmiştir. Polyester reçineyi çözmek ve cam elyafı geri kazanmak için yapılan kimyasal reaksiyonda altkritik (subcritical) su kullanılmıştır. Sıcaklık, zaman, katalizör tipi ve su miktarının, kazanılan cam elyafın mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Hidroliz prosesi, 40x40 mm boyutlarında kesilen kompozitlerin bir hidroliz reaktörüne konulması ve hidroliz işleminden sonra kazanılan elyafın saf su, aseton ve etanol ile yıkanıp kurutulması ile gerçekleştirilmiştir. Hidrolizle kazanılan cam elyafın çekme dayanımı ve kopma uzaması, kullanılmamış elyafa göre %40-70 oranında azalmıştır. Young modülü değeri ise neredeyse aynı kalmıştır. Çalışmada hidroliz koşulları ve elyafın mekanik özelliklerinin ilişkisi değerlendirilmiştir.

Iwaya ve diğ. (2008)'nin yaptığı çalışmada, CTP içindeki polyester reçineyi etkin bir şekilde depolimerize edebilecek ve elyafı dolgu ile reçineden ayırabilecek bir çözücü ile çalışılmıştır. Reaksiyonlar tripotasyum fosfat ( $K_3PO_4$ ) katalizörü varlığında ve yokluğunda dietilenglikol monometileter (DGMM) ve benzil alkol (BZA) içerisinde altkritik oldukları koşullarda (463-623 K) 1-8 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada değerlendirilen deneysel parametreler; reaksiyon sıcaklığı, süresi, katalizör ve çözücü miktarıdır. Polyesterin dönüşümü, katalizör varlığında katalizör/çözücü molar oranı arttıkça hızlanmıştır. CTP, altkritik BZA içerisinde işlem gördükten sonra

cam elyaf kazanılmıştır. 573 K'den yüksek sıcaklıklarda elyaf boyu kısalmış ve elyaf yapısında bozulmalar olmuştur. Aynı sonuçlar DGMM kullanımında da gözlenmiştir.

Başka bir çalışmada atık CTP'ye DMAP (4-(dimetilamino)pirindin) katalizörü (ester ve amid oluşturur) varlığında üstkritik (süper critical) metanol ile işlem yapılmıştır (Kamimura ve diğ., 2008). İşlemden sonra depolimerize olan ürün 3 gruba ayrılmıştır. Bunlar; metanolde çözünen yağ, kloroformda çözünen katı ve inorganik atıktır. Katalizör miktarı arttıkça reaksiyon hızı artmıştır. Reaksiyonda kullanılan DMAP bozunduğu için geri kazanılamamıştır.

Cunliffe ve Williams (2003) tarafından yapılan çalışmada CTP'ye 450 °C'de sabit yataklı reaktörde piroliz uygulanmıştır. Toplam gaz bileşiminin %75'inden daha fazla oranda CO ve CO<sub>2</sub> gazı açığa çıkmıştır. Çıkan diğer gazlar H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve C<sub>2</sub>'den C<sub>4</sub>'e kadar olan hidrokarbonlardır. Pirolitik yağın özellikleri, ısıl değer, viskozite ve elementel analize bağlı olarak tahmin edilebilir. Bu çalışma, DMC'lerde yeni cam elyaf yerine geri kazanılmış cam elyaftan %20 oranına kadar kullanılabilceğini göstermiştir.

Kennerley ve diğ. (1998)'nin yaptığı çalışmada cam elyaf, 450 °C'de akışkan yataklı reaktör kullanılarak SMC atığından ayrılmıştır. Ayırma bir siklonda gerçekleştirilmiştir. SMC plaka 3 mm kalınlığında ve 2,5 cm'den daha kısa olacak şekilde parçalanmıştır. Proses sıcaklığı 450-650 °C ve akışkan hava hızı 1,3-1,7 m/s arasındadır. Dolgudan ayrılan cam elyafın yüzeyinde %60 oranında kontaminasyon (kirlenme) gözlenmiştir. Geri kazanılan elyafın, DMC'de tamamen ya da kısmen kullanılabilceği bildirilmiştir. Yapılan testlere göre %50 ve üzeri atık elyaf kullanımı, üretilen kompozitlerin çekme ve eğme dayanımını kısmen düşürmüştür. %50 oranında kullanıma kadar ise fiziksel ve mekanik özelliklerde önemli bir değişim gözlenmemiştir.

Pickering ve diğ. (2000) de termoset kompozit hurdalarından cam elyafı geri kazanmak için bir akışkan yatak prosesi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada 10 mm büyüklüğüne öğütülmüş atık 450 °C'ye ısıtılmıştır. Bir döner elek yardımı ile 5 mm uzunluğunda ve %80 saflıkta cam elyaf ayrıştırılmıştır. Geri kazanılan elyafın çekme dayanımı %50 oranında azalmasına rağmen, yüksek sıcaklıklara maruz kalmanın liflerin modülü üzerinde kayda değer bir olumsuz etkisi olmadığı görülmüştür. Geri

kazanılan elyaf, DMC formülasyonlarında ve yüzey tülü ürünlerinde yeniden kullanılmıştır.

Suyama ve diğ. (2006) çaprazbağlanmış doymamış polyesterin 300 °C'deki altkritik su ile bozunmasında çeşitli alkollerin etkisini araştırmışlardır. Polyester zincirlerinin altkritik suda çaprazbağlanması için hızlandırılmış transesterifikasyon işleminde alkoller ve fenoller kullanılmışlar ve bu prosesle reçinenin çaprazbağları %42,7 oranında parçalanabilmiştir.

Ikenaga ve diğ. (2018), yüksek basınçlı mikrodalga ışıması altında BZA ve etilen glikol monoalil eter (EGMA) kullanılarak katalitik olmayan transesterifikasyon yoluyla CTP bozunmasını araştırmışlardır. 3 saatlik bir reaksiyon süresinden sonra doymamış polyester ayrışma oranı BZA kullanıldığı durumda %70,7 ve EGMA kullanıldığı durumda %69,3 olarak ölçülmüştür. Sonuçlar birbirine çok yakın olmasına rağmen, EGMA ile elde edilen CTP'nin daha reaktif olduğu ve EGMA'dan türetilen alil grupları nedeniyle daha yüksek eğme dayanımı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Lee ve Kim (2019), CTP atıklarında kullanılan cam elyafın geri kazanımı üzerine yaptıkları bir çalışmada cam elyafı alkali sulu çözelti içinde çözüp elyaf çapını azaltmak için alkalın konsantrasyonu, reaksiyon süresi ve sıcaklık gibi parametrelerin etkisini incelemişlerdir. En düşük elyaf çapı, en yüksek çözelti konsantrasyonunda ve reaksiyon sıcaklığı 95 °C'de tutulduğu durumda elde edilmiştir.

US5776989A numaralı patente Kubota ve diğ. (1998), doymamış polyester için bir geri dönüşüm yönteminden söz etmişlerdir. Ayrıştırma ajanı olarak dikarboksilik asit veya diamin kullanmışlardır. Kimyasal olarak aynı hammaddeyi elde etmek için geri dönüştürülmüş malzeme yeniden sentezlenmiştir.

Shima ve diğ. (2011) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, TiO<sub>2</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi yarı iletkenlerin kullanıldığı yeni bir teknoloji ile elyaf takviyeli plastiklerden cam elyaf geri kazanımı üzerine çalışmışlardır. Bu teknolojiye, ısı olarak çok sayıda oksidatif delik oluşturulmuş ve dolgunsuz saf polimerlerin bozundurulması için kullanılmıştır. CTP plakalar yarı iletkenlerle temas ettirilip polimer matrisin kontrollü bozunması için yaklaşık 350-500 °C'ye ısıtılmış ve ardından atık cam elyaf atık geri kazanılmıştır.

Zabihi ve diğ. (2020), kompozit atıklarından cam elyafın geri kazanımı için mikrodalga destekli kimyasal oksidasyon yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Üç dakikalık mikrodalga ışıması ve bir hidrojen peroksit ve tartarik asit karışımı kullanarak, atık CTP'nin epoksi matrisini %90 verimle ayrıştırmayı başarmışlardır. Kullanılmamış elyafla karşılaştırıldığında, bu yöntemle elde edilen cam elyafın çekme dayanımında %7,3 ve Young modülünde %1,0 oranında azalma görülmüştür.

Nagel ve diğ. (2018) ısı geri dönüşüm sıcaklıklarının, PP matrisli kompozitlerde kullanılmak üzere atık cam elyaflarının takviye potansiyeli üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Karıştırma ve kalıplamadan önce, cam elyafları hava ve nitrojen atmosferi altında farklı sıcaklıklarda ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Cam elyaflarının hava ortamında yaklaşık 250 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra takviye potansiyelinin çoğunu kaybettiği görülmüştür. İnert atmosferde ise elyaf ön kaplamasının daha geç bozulması ve arayüzey kesme dayanımının daha yavaş azalmasına rağmen sıcaklık 400 °C'nin üzerine çıktığında hava ortamına benzer sonuçlar gözlenmiştir.

Garcia ve diğ. (2014) öğütme ve eleme sonrası atık CTP'den geri kazanılan cam elyafı beton karışımına takviye olarak kullanıp bu karışımın fiziksel-mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Örneklerde geri kazanılmış cam elyaf kullanıldığı durumda, elyafsız örneklerle göre basma ve eğme dayanımının sırasıyla %16 ve %22 arttığı gözlenmiştir.

Epoksi matrisli karbon elyaf kompozitlerin mikrodalga yöntemi kullanılarak polimer matrisin bozundurulması ve kalan elyafların yeniden kullanılması üzerine gerçekleştirilmiş bir çalışma da mevcuttur (Lester ve diğ., 2004). Bu çalışmada, kompozitlere 8 saat süre ile 3 kW gücünde mikrodalga enerjisi uygulanmıştır. Bu koşullarda geri kazanılan karbon elyaf, saf karbon elyaf ile mekanik özellikler açısından karşılaştırılmıştır. Kopma dayanımı incelendiğinde, yeni elyaf dayanımı 4,09 GPa iken, mikrodalga enerjisi ile geri kazanılan elyaf için bu değer 3,26 GPa'dır. Akışkan yataklı reaktör ve piroliz ile geri kazanılan karbon elyaf kopma dayanımının 3,05 GPa olduğu göz önünde bulundurulduğunda, mikrodalga enerjisinin elyafın geri kazanımında klasik piroliz yöntemlerine göre avantajlı bir teknik olduğu anlaşılmaktadır.

Ayrıca, mikrodalga enerjisinden faydalanarak çeşitli katalizörler ve bazen de basınç eşliğinde PET esaslı atıkların depolimerize edilerek geri kazanıldığı çalışmalara da

rastlanmaktadır (Pingale ve Shukla, 2008; Pingale ve Shukla, 2009; Lixin et.al., 2004; Krzan, 1998; Nikje ve Nazari, 2007).

## **2.2. Atığın Öğütülerek Doğrudan Kullanımına Yönelik Çalışmalar**

Bu alanda yapılan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Öğütülmüş CTP atıklarının doğrudan kullanımı araştırmacılar tarafından nispeten daha az ilgi görmüştür. Ancak katma değeri yüksek uygulamalarda öğütülmüş atıkların kullanımı ile yapılan bazı önemli çalışmalar bulunmaktadır.

Meira Castro ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmada pultürzyon yönteminden elde edilmiş atık CTP'ler öğütülmüş ve iki farklı boyutta elenmiştir. Bu çalışmada atık CTP'nin polyester temelli harçlarda kum ve dolgu yerine kullanımı incelenmiştir. Arayüzey bağlanmasını geliştirmek için tüm formülasyonlarda silan bağlayıcı bulunan polyester kullanılmıştır. Kum agrega yerine, %4, %8, %12 oranlarında atık CTP kullanılmış ve atık kullanımının mekanik özellikleri iyileştirdiği bildirilmiştir. İri elenmiş atık kullanımında %8, ince elenmiş atık durumunda en iyi sonucu %4 kullanım oranı vermiştir.

Asokan ve diğ. (2009)'nin yaptığı bir çalışmada öğütülmüş atık CTP, çimentoya ve betona olmak üzere iki farklı matriste katkı olarak kullanılmıştır. CTP kullanım oranı ağırlıkça %5-50 aralığında tutulmuştur. Matriste kullanılan atık miktarı arttıkça betonun başlangıç mekanik dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, örnekler üretildikten 14, 28 ve 180 gün sonra tekrar incelendiğinde, bekleme süresi arttıkça beton içerisindeki CTP'nin dayanıma olumlu etkisi olduğu görülmüştür.

Asokan ve diğ. (2010) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, toz CTP atıklarının betonda süperplastikleştirici ile birlikte kullanıldığı durumdaki mekanik özellikleri araştırılmıştır. En iyi basma ve çekme dayanımı ve büzülme davranışını %5-15 oranında atık ve %2 oranında süperplastikleştirici içeren karışımlar sergilemiştir. Bununla birlikte, genel beton özelliklerinin, kullanılan toz atığın parçacık boyutu dağılımına, öğütülme şekline, agrega karışım oranına ve son olarak katkı maddesi konsantrasyonuna bağlı olduğunu görülmüştür.

Correia ve diğ. (2011)'nin yaptığı çalışmada ince öğütülmüş (<100 µm) atık CTP tozunun doğrudan hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında beton karışımında kum yerine kullanımı denenmiştir. %5 oranında kullanıldığı durumda betonun elastikiyetini iyileştirdiği, böylece çatlama eğilimini azalttığı görülmüştür. Yüksek atık oranlarında ise beton performansını ve sağlamlığını olumsuz etkilediği görülmüştür. Mekanik dayanımın daha önemsiz olduğu mimari beton ya da kaldırım taşı gibi uygulamalarda ise düşük oranlı atık kullanımının uygun olduğu bildirilmiştir.

Kimm ve diğ. (2020)'nin yaptıkları çalışmada betona takviye olarak atık CTP kullanımı araştırmıştır. Yapışmayı iyileştirmek ve lifleri betonun alkaliliğinden korumak için, öğütülmüş CTP atığının yüzeyini kumlama ve silanizasyon yöntemi ile modifiye etmiş ve kumlamanın betonun kesme mukavemetini artırdığını gözlemlemişlerdir. Ancak silanizasyon yönteminin betonun içerdiği kalsiyum silikat hidratlar ile silanlar arasındaki reaksiyon sırasında açığa çıkan su nedeniyle CTP yüzeyi ile beton arasında daha zayıf bağlara neden olduğunu belirtmişlerdir.

Dehghan ve diğ. (2017), CTP atıklarının Portland çimento betonunun basma, çekme dayanımı ve büzülme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. CTP atık kullanıldığı durumda betonun yarma çekme dayanımının iyileştiği görülmüştür.

Farinha ve diğ. (2019), çimento bazlı harçlarda dolgu maddesi olarak ağırlıkça %10-50 oranlarında CTP atık kullanmışlardır. Atık CTP'nin, yığın yoğunluğunu azaltıp, işlenebilirliği artırması sayesinde harçlar üzerinde olumlu etkileri olduğu bulunmuştur. En iyi performans, doğal agrega yerine %50 oranında atık CTP kullanıldığı durumda elde edilmiştir. Bu durumda harcın su emme oranı %80 oranında azalmış, basma ve eğme dayanımı sırasıyla %166 ve %155 oranında artmıştır.

Feng ve diğ. (2016), 0,5-2 mm boyutlarında öğütülmüş atık CTP'nin alçı ürünlerinde takviye olarak kullanılması üzerine çalışmışlardır. Atık CTP kullanıldığı durumda, alçı ürünlerinin gerilme mukavemeti ve kırılma tokluğunun arttığı ve işleme özelliklerinin iyileştirildiği görülmüştür.

Gharde ve Kandasubramanian (2019) yakın zamanda termoset matrisli elyaf takviyeli plastiklerin geri dönüşümü hakkında bir inceleme yayınlamışlardır. Bu derlemede mekanik, kimyasal ve ısı geri dönüşüm metodolojileri karşılaştırmalı olarak

değerlendirilmiştir. Mekanik işlemlere göre diğer iki geri dönüşüm işleminin de çevre ve ekosistem üzerinde olumsuz etkileri olduğu için mekanik geri dönüşümün kimyasal ve ısı tekniklere göre CTP için daha uygun olduğu bildirilmiştir. Ayrıca kimyasal ve ısı teknikler, işleme sırasında yüksek sıcaklık ihtiyacı nedeniyle daha fazla enerji tüketir. Akışkan yataklı proses, piroliz, düşük sıcaklıkta solvoliz ve altkritik solvoliz karşılaştırıldığında; daha uzun elyaf boyu ve daha iyi mekanik özellikler elde edilebildiği için altkritik solvolizin en iyi teknik olduğu belirtilmiştir.

### **2.3. Atığın Kompozit İçerisinde Kullanıldığı Çalışmalar**

CTP atıklarını değerlendirmek için bir başka metodoloji, yeni kompozit malzemelerde kullanmaktır.

Grammatikos ve diğ. (2020) çimentolu ve polimer kompozit ürünlerde takviye olarak sırasıyla hacimce %3 ve ağırlıkça %25 oranına kadar öğütülmüş atık CTP'nin kullanılması üzerine çalışmışlardır. Kompozit bileşiminde atık CTP kullanıldığı durumda polimer kompozitlerin mekanik mukavemeti önemli ölçüde azalmıştır. Bu sebeple, CTP atığın yapısal olmayan uygulamalarda kullanılmasını önermişlerdir. Çimento esaslı ürünlerde ise, CTP oranındaki artışla mekanik dayanımın önemli ölçüde arttığı, basma dayanımının ise olumsuz etkilenmediği görülmüştür.

Chen ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada atık CTP, mısır samanı lifi ile karıştırılıp ahşap plastik kompozitlerde (WPC) kullanılarak değerlendirilmiş ve mekanik özellikleri iyileştirdiği gözlenmiştir. 30 phr atık CTP kullanıldığında, WPC'nin çekme ve eğme dayanımı, kontrol örneğine göre sırası ile %31 ve %23 oranında artmıştır.

Huang ve diğ. (2018), CTP atığını basınçlı kalıplama tekniği ile hazırlanan sisal elyaf takviyeli SMC'lerde kullanmışlardır. Silanlanmış atık CTP, kalsiyum karbonat yerine kullanılmıştır. SMC örneklerinin mekanik ve ısı özellikleri ve su emme davranışları açısından ağırlıkça %20, %25, %30 ve %35 atık yükleme oranları değerlendirilmiştir. Silanlanmış atık CTP'nin kullanılmasının, silandan gelen metakrilik grupları nedeniyle SMC'lerin ısıl stabilitesini artırabileceği ve su emilimini azaltabileceği sonucuna varılmıştır. En iyi performans, %30 oranında atık CTP kullanıldığı durumda elde edilmiştir.



Tamamen veya kısmen geri kazanılmış CTP üzerine çok sayıda çalışma yayınlanmış olmasına rağmen, literatürde hem cam elyafı hem de reçineyi yeni kompozit formülasyonlarında kullanan sistematik bir çalışma bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında, CTP esaslı kompozit atıklar, çeşitli boyutlarda öğütülerek yeni CTP kompozitlerinin üretiminde dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Kompozitlerin reolojik, ısıl, mekanik, dinamik-mekanik ve morfolojik özelliklerine göre yeni bileşimlerde tane boyutunun ve atık miktarının etkileri araştırılmıştır.

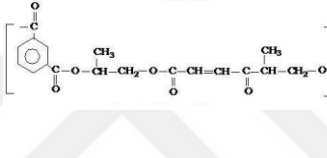
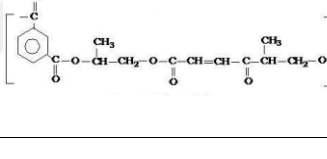
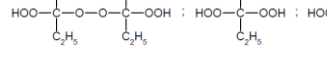
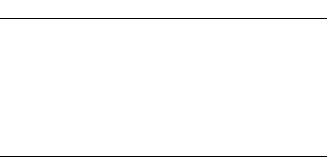
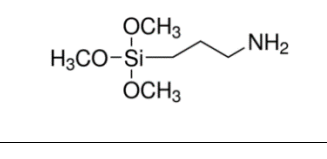
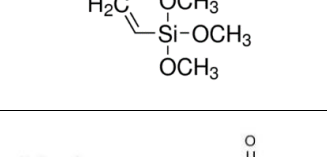


### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. Malzemeler

Tablo 3.1’de deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin genel özellikleri, kimyasal yapıları ve temin edildikleri firmalar belirtilmiştir.

Tablo 3.1. Tez kapsamında kullanılan malzemelerin genel özellikleri, kimyasal yapıları ve tedarik edildikleri firmalar

Malzeme	Temin Edilen Firma (Ülke)	Ürün Kodu	Kimyasal Yapısı	Genel Özellikleri
Doymamış polyester (El yatırması tipi)	İlkalem (Türkiye)	IR100 TP		Viskozite: 500-1000 Cps tjelleşme: 15-17 dk tkür:40-55 dk Tpik kür: 180 °C
Jelkot	İlkalem (Türkiye)	GIN 424		Viskozite: 8000-10000 Cps tjelleşme: 14-20 dk Tpik kür: 195 °C
MEK-P	Akzo Nobel (Hollanda)	M60		Peroksit içeriği : %36 Çözelti: %60 DMP, %4 MEK, su
Cam Elyaf (keçe elyaf)	Cam Elyaf A.Ş. (Türkiye)	MAT8		Tipi: E Ağırlık: 450 g/m <sup>2</sup> Kaplama Ajanı: Silan
3-Aminopropil trimetoksisilan	Evonik (Almanya)	AMMO		Viskozite: 1 mPas Yoğunluk: 0,97 g/cm <sup>3</sup>
Viniltrimetoksisilan	Evonik (Almanya)	VTMO		Viskozite: 1 mPas Yoğunluk: 0,97 g/cm <sup>3</sup>
3-Metakriloksi propiltrimetoksisilan	Evonik (Almanya)	MEMO		Viskozite: 2,8 mPas Yoğunluk: 1,04 g/cm <sup>3</sup>

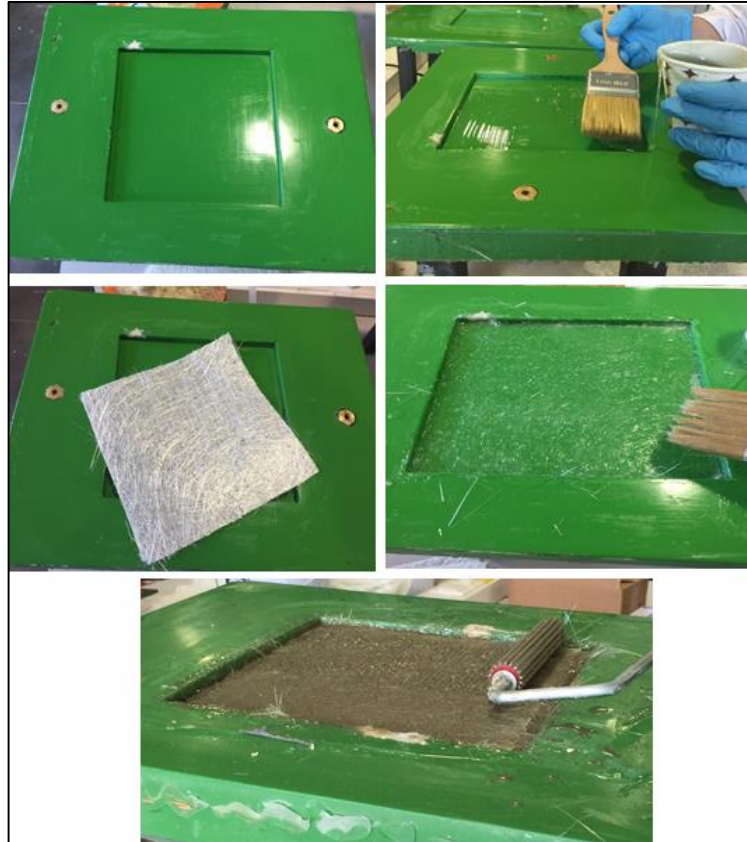
## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Test örneklerinin hazırlanması

#### 3.2.1.1. Elyaf takviyeli örneklerin hazırlanması

Atık CTP parçalarının boyutları kabaca küçüldükten sonra, özel yapım bir öğütme makinesi ile öğütülmüş ve 3 farklı boyuta elenmiştir. En küçük boyutlu atık (B1) yaklaşık 50 µm boyutundadır ve doğrudan toz filtrelerinden toplanmıştır. B2 ve B3 olarak adlandırılan atıkları elde etmek için sırasıyla 1,5 mm ve 3 mm elekler kullanılmıştır.

Kompozit örnekler el yatırması yöntemiyle, polyester esaslı kompozit kalıplar kullanılarak üretilmiştir. Herhangi bir laminasyon prosesindeki gibi, el yatırması yönteminde de kaliteli bir kalıp gerekmektedir. Kalıp yüzeyi rijit ve parlak olmalıdır. Bu nedenle, kompozit plakalarının üretimine başlamadan önce kalıplar uygun şekilde temizlendikten sonra, kalıp ayırıcı uygulanmıştır.



Şekil 3.1. Kompozit kalıplarda örneklerin üretimi

Kalıp ayırıcının reaksiyon ve kuruma süresi tamamlandıktan sonra %1 oranında MEK-P karıştırılmış jelkot kalıba uygulanmış ve dokunma kurumasına gelene kadar kürlenmeye bırakılmıştır. Sonrasında öğütülmüş atık içeren polyester reçine kullanılarak el yatırması yöntemi ile elyaf lar ıslatılarak kompozit plakalar üretilmiştir. Her elyaf katmanının ıslatılmasının ardından kompozit içerisinde hava kabarcığı kalmaması ve alt katmana daha iyi tutunması için rulolama işlemi uygulanmıştır. Örnek hazırlama adımları Şekil 3.1’de görsel olarak verilmiştir.

Çalışma kapsamında el yatırması ile üretilen kompozitlerde, 3 farklı atık tane boyutu, 4 farklı atık oranı ve 4 farklı elyaf katman sayısı değişken olarak belirlenmiş ve bu değişkenlerin farklı kombinasyonları ile üretim yapılmıştır. Referans (kontrol) örneği ile birlikte toplam 49 adet kompozit örnek formülasyonu hazırlanmış ve test edilmiştir. Çalışmada kullanılan değişkenler ve ele alınan seviyeleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan değişkenler ve seviyeleri

Atık Tane Boyutu	Atık Oranı	Elyaf Kat Sayısı
B1: 50 µm	%5	5
B2: 1,5 mm	%10	6
B3: 3 mm	%15	7
	%20	8

Çalışmanın ikinci bölümünde ise, kompozit örneklerin kimyasal modifikasyonu için silan bağlayıcı olarak MEMO kullanılmıştır. Kullanım oranı kompozit örnek içerisindeki atık oranının %1’i kadar belirlenmiş ve polyester içerisine atık ilavesinden sonra belirtilen oranda katılarak karıştırılmıştır. İlk bölümde en iyi performans 6 kat elyaf kullanılan durumda elde edildiği için ikinci bölüm çalışmalarında elyaf kat sayısı değiştirilmemiş ve 6 kat üzerinden ilerlenmiştir. Kompozit örnekler, %5, %10, %15 ve %20 oranında, 300 µm, 1,5 mm ve 3 mm boyutunda CTP atık ve atık oranının %1’i kadar silan bağlayıcı kullanarak hazırlanmıştır.

Kompozit plakaların kürlenme süreleri ortalama 3 saattir. Bu süre sonunda plakalardan CNC yardımı ile test örnekleri elde edilmiştir.

### 3.2.1.2. Elyaf takviyesiz örneklerin hazırlanması

Farklı silan bağlayıcıların, matris-atık arayüzey etkileşimini incelemek amacı ile öğütülmüş atıklar doğrudan reçine içerisine dolgu olarak katılmış ve atık içeren reçine harmanları test edilmiştir. Silan bağlayıcı olarak 3-aminopropiltrimetoksisilan (AMMO), viniltrimetoksisilan (VTMO) ve 3-metakriloksipropiltrimetoksisilan (MEMO) ile çalışılmıştır.

Doymamış polyester reçineye, kullanılan CTP atığın ağırlıkça %1'i oranında silan bağlayıcı ilave edilmiş ve 1 dk boyunca karıştırılmıştır; devamında silan içeren polyester reçinelere %5, %10, %15 ve %20 oranlarında atık ilave edilerek 1 dk daha karıştırılmıştır. Ardından, hazırlanan karışımların kürlenmesi için %1 oranında MEK-P ilave edilerek 2 dk boyunca tekrar karıştırılmıştır. Öğütülmüş atık ve çaprazbağlayıcı ilave edilen karışımlar silikon kalıplara (Şekil 3.2) dökülerek mekanik test örnekleri elde edilmiştir.

Elde edilen test örnekleri bir hafta boyunca oda sıcaklığında bekletilerek dinlendirilmiştir. Hazırlanan örneklere çekme, üç nokta eğme ve darbe testi uygulanmıştır.



Şekil 3.2. Silikon kalıp

### **3.2.2. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi**

#### **3.2.2.1. Elyaf boyu dağılımı**

Atık içerisindeki elyaf boyu dağılımını incelemek için üç farklı tane boyutundaki atık örneği, kül fırınında (Elektromag M1813) 650 °C’de 4 saat boyunca yakıldıktan sonra cam lamellere aktarılmıştır. Lamellerin üzerinde su ile dağıtıldıktan sonra optik mikroskop yardımı ile elyaf boyu dağılımı incelenmiştir. Bu analizde Nikon marka SMZ800 model mikroskop kullanılmıştır.

#### **3.2.2.2. Elek analizi**

Öğütülen ve elenerek sınıflandırılan atıkların elek analizi, 45, 125, 250, 500 µm, 1 ve 2 mm elek boyutlarına sahip Retsch marka ve AS 200 Basic model titreşimli elek sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### **3.2.2.3. Kür profili incelemesi**

Kompozitlerin hazırlanmasında kullanılan reçinenin kür profilinin atık ilavesi ile nasıl değiştiğini incelemek için her atık oranı için reçinenin jelleşme süresi, pik kür sıcaklığı ve pik kür süresi kaydedilmiştir. Bu analiz ISO 2535 standardına göre yapılmıştır. Analizde termometre ve kronometre kullanılmıştır. Testler 25 °C ortam sıcaklığı ve 20 °C reçine sıcaklığında yapılmıştır.

#### **3.2.2.4. Viskozite ve tiksotropi ölçümü**

Reçine viskozitesinin atık ilavesi ile nasıl değiştiğini incelemek için atık kullanılmadan ve atıkla hazırlanan reçinelerin viskoziteleri Brookfield marka LVDV-E model dönel viskozimetre ile ölçülmüştür. Testler, ISO 2555 standardına göre, 20 °C’de, 20 rpm dönme hızı ile ve 2 numaralı standart uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tiksotropi, zamana bağlı olarak akış özelliklerinin değişmesidir. Tiksotropik malzemelerde, kayma gerilimi arttıkça viskozitenin azaldığı, gerilim ortadan kalkınca sistemin tekrar eski haline döndüğü görülür. Düşük kesme viskozitesinin yüksek kesme viskozitesine oranı ile hesaplanabilir. Karışımların tiksotropisi yine aynı dönel viskozimetre ve uç kullanılarak 5 ve 50 rpm’deki viskozite değerlerinin birbirine bölünmesi ile hesaplanmıştır.

### 3.2.2.5. Lineer büzülme (ekme, shrinkage) lm

Kompozitlerin hazırlanmasında kullanılan reçinenin lineer çekme davranışının incelenmesi için atık içermeyen ve atık içeren reçinelere ASTM D 2566 standardına göre lineer büzülme testi uygulanmıştır. Sıvı haldeki karışımlar çubuk şeklindeki kalıplara dökülerek kürlenme sonrası ve 150 °C’de 75 dk fırınlanma sonrası boyutsal değişim ölçülmüştür.

### 3.2.2.6. Sertlik lm

Kompozitlerin hazırlanmasında kullanılan reçinenin atık oranı ile sertliğindeki değişimi incelemek için ASTM 2583 standardına göre GYZJ 934-1 marka sertlik ölçüm aleti kullanılarak kompozitlerin Barcol cinsinden sertlikleri ölçülmüştür.

### 3.2.3. Mekanik zelliklerin belirlenmesi

#### 3.2.3.1. Çekme testi

Çekme testi, Instron marka ve 3367 model çekme cihazının çekme çeneleri ile oda sıcaklığında ve 2 mm/dk çekme hızı ile ISO 527-4 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

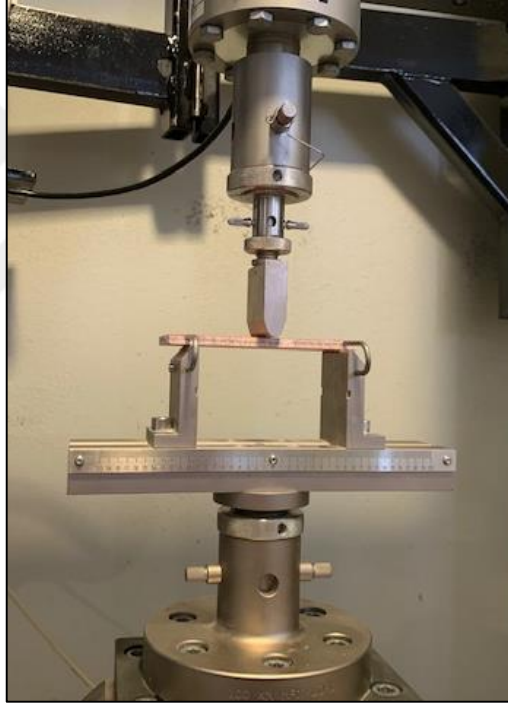


şekil 3.3. Çalışma kapsamında kullanılan Instron 3367 marka çekme cihazının genel görünümü

Paket program yardımıyla harmanların çekme dayanımı, çekme modülü ve kopmada uzama değerleri hesaplanmıştır. Her bir harmandan 5 örnek test edilmiş ve ortalamaları test sonucu olarak kaydedilmiştir.

### 3.2.3.2. Üç nokta eğme testi

Üç nokta eğme testi, Instron marka ve 3367 model çekme cihazının üç nokta eğme fikstürü kullanılarak, oda sıcaklığında ve 1 mm/dk çekme hızı ile, ISO 14125 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Paket program yardımıyla kompozit örneklerin eğme dayanımı, eğme modülü ve eğmede uzama değerleri hesaplanmıştır. Her bir harmandan 5 örnek test edilmiş ve ortalamaları test sonucu olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.4. Çalışma kapsamında kullanılan Instron 3367 marka eğme fikstürünün genel görünümü

### 3.2.3.3. Kısa kiriş testi

Kısa kiriş testi, Instron marka ve 3367 model çekme cihazının üç nokta eğme fikstürü kullanılarak, oda sıcaklığında ve 1 mm/dk eğme hızı ile, ASTM D2344 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Paket program yardımıyla kompozit örneklerin kısa kiriş dayanımı ve kısa kiriş modülü değerleri hesaplanmıştır. Her bir harmandan 5 örnek test edilmiş ve ortalamaları test sonucu olarak kaydedilmiştir.



#### 3.2.3.4. Darbe testi

Örneklerin Charpy darbe dayanımları, Instron marka otomatik motorize sarkaç darbe test cihazı ile, ISO 179'a göre ölçülmüştür. Cihazda, 150° açı ile bırakılan 50 J'lük bir sarkaç bulunmaktadır. Örnekler çentiksiz olarak test edilmiştir. Her bir harman için darbe testi 5 kez tekrarlanıp, ortalamaları raporlanmıştır.

#### 3.2.3.5. Basma testi

Basma testi, Instron marka ve 3367 model çekme cihazının basma fikstürü kullanılarak, oda sıcaklığında ve 1,5 mm/dk basma hızı ile, ASTM D3410 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Paket program yardımıyla örneklerin basma dayanımı değerleri hesaplanmıştır. Her bir harmandan 3 örnek test edilmiş ve ortalamaları test sonucu olarak kaydedilmiştir.

#### 3.2.4. Elyaf içeriği (%)

Kompozitlerin içerdiği elyaf yüzdeleri Elektromag marka M1813 model kül fırın kullanılarak, ASTM D2584 standardına göre ölçülmüştür. Her bir harmandan 3 örnek 565 °C'de 2 saat boyunca yakılmış ve ortalama değerler raporlanmıştır.

#### 3.2.5. Isıl özelliklerin belirlenmesi

Atık CTP içeren reçinenin özgül ısısını belirlemek amacı ile Mettler Toledo marka DSC1 model DSC cihazı (Şekil 3.5) kullanılmıştır. Taramalar 25-100 °C sıcaklık aralığında ve 10 °C/dk hızda yapılmıştır. Analizler esnasında sisteme süpürücü gaz olarak 20 ml/dk hacimsel akış hızında azot gazı beslemesi yapılmıştır. Reçine ve atığın özgül ısısı DSC ile belirlendikten sonra her bileşim için ağırlıklı ortalaması alınarak karışımların özgül ısısı raporlanmıştır.



Şekil 3.5. Mettler Toledo DSC 1 cihazı

### 3.2.6. Dinamik mekanik analiz (DMA)

Kompozit örneklerin dinamik mekanik analizleri, Mertravib marka DMA50 model test cihazı ile, üç nokta eğme modunda gerçekleştirilmiştir. Örnekler 30-180 °C aralığında sıcaklık taraması uygulanmıştır. Test sırasında örnekler 1 Hz frekans ve  $10^{-5}$  m dinamik yer değiştirme uygulanmıştır.

### 3.2.7. Yük altında eğilme sıcaklığı (HDT)

Atık oranının ve tane boyutunun kompozit malzemenin yük altında eğilme sıcaklığına etkisini incelemek amacı ile örnekler TS EN ISO 75 standardına göre HDT analizi yapılmıştır. Testler Instron marka Ceast HV3 model HDT-Vicat test cihazı ile yapılmıştır. Testlerde 8 MPa yük kullanılarak 0,11 mm'ye eğilme sıcaklıkları belirlenmiştir.

### 3.2.8. Morfolojik analiz

Morfolojik analiz için örneklerin çekme testi sonucunda oluşan kırılma yüzeylerinden JSM-6510 markalı taramalı elektron mikroskobu cihazı kullanılarak 3 farklı büyütme oranında SEM mikrografları elde edilmiştir.

### 3.2.9. Yapısal analiz

Harman bileşenleri arasında meydana gelen etkileşimlerin belirlenmesi amacıyla örneklerin FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında ATR ünitesine sahip olan Perkin Elmer Spectrum 100 marka FTIR cihazı kullanılmıştır. Cihazın genel görünümü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Perkin Elmer Spectrum 100 marka FTIR cihazı

### 3.2.10. Sürünme testi

Kompozit örneklerin sabit yük altında ve sabit sıcaklıkta sürünme davranışının belirlenmesi için TS EN ISO 899 standardına göre üç nokta eğme modunda sürünme testi yapılmıştır. Örnekler standartta verilen ölçülere göre kesilmiş ve yük miktarı eğme dayanımının %15'i olacak şekilde hesaplanmıştır. Şekil 3.7'de deney düzeneğinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.7. Sürünme testi düzeneği

#### **4. BULGULAR VE TARTIŞMA**

Tez kapsamında su kaydırakları üretimi sırasında ortaya çıkan atık CTP'nin üç farklı boyuta öğütüldükten sonra yeni hazırlanan kompozit bileşimlerine farklı oranlarda katılmasının sonuçları değerlendirilmiştir. Hazırlanan kompozitlerin yük taşımayacak animasyon/eğlence ürünlerinde kullanımı hedeflenmiştir. Çalışma temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda farklı atık tane boyutu ve atık miktarı kullanılması ile üretilen kompozitlerin fiziksel, mekanik, ısı, dinamik-mekanik, sürünme ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. İkinci kısımda ise matris-atık ve matris-elyaf arayüzey etkileşimini iyileştirmek için kullanılan silan tipinin ve oranının etkileri araştırılmıştır.

“100/0-REF” ibaresi, atık içermeyen referans kompozit örneğin isimlendirilmesinde kullanılmıştır. Örnek kodunda belirtilen “S” ibaresi, o kompozit örnekte silan bağlayıcı varlığını göstermektedir. Kompozit içerisinde kullanılan 3 farklı boyuttaki atık, B1, B2 ve B3 ibareleri ile ifade edilmiştir. Kullanılan atığın fiziksel özellikleri Bölüm 4.1.1.1’de verilmiştir. Örnek olarak, “90/10-B2-S” isimlendirmesi, kompozitte %10 oranında B2 boyutlu atığın kullanıldığını ve arayüzeyin silan ile iyileştirildiğini ifade etmektedir.

##### **4.1. Atığın Doğrudan Öğütülerek Yeni Kompozitlerde Kullanıldığı Durumda Elde Edilen Sonuçlar**

Mekanik geri dönüşüm, atıkların bir öğütücü yardımı ile boyutlarının küçültülmesi ve/veya toz haline getirilmesi işlemidir. Bu grupta, mekanik geri dönüşüm ile elde edilmiş atık CTP'nin doğrudan yeni kompozitlerde kullanımı değerlendirilmiştir ve cam elyaf katman sayısının, atık tane boyutu ve atık oranının; reçinenin ve kompozit malzemenin özellikleri üzerine etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Ön değerlendirme sonucunda en uygun elyaf kat sayısı belirlenmiş, diğer kompozit değişkenleri üzerinde çalışmaya bu kat sayısı uygulanarak devam edilmiştir.

#### 4.1.1. Fiziksel özellikler

Bu bölümde atık eklenmesinin reçinenin reolojik özellikleri ve kür profili üzerindeki etkileri, atığın elyaf boyu dağılımı, tanecik boyutu dağılımı gibi fiziksel özellikleri verilmiştir.

##### 4.1.1.1. Reçinenin fiziksel özellikleri

Atık ilavesinin reçinenin reolojik özellikleri ve kür profilinde meydana getirdiği değişiklikleri incelemek amacı ile polyester reçineye ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında toz atık (B1) karıştırılmıştır. Bu karışımların jel süresi, pik sıcaklığı, pik kür süresi, özgül ısı, viskozite, tiksotropi, lineer büzülme ve sertlik değerleri ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Atık ilavesinin reçinenin reolojik ve ısıl özelliklerine etkisi

	100/0-REF	95/5-B1	90/10-B1	85/15-B1	80/20-B1
<b>Jel süresi (dk)</b>	18,0	13,5	13,0	12,5	12,3
<b>Pik sıcaklık (°C)</b>	176,5	171,1	162,6	162,2	154,2
<b>Isı kapasitesi (Cp, j/g°C)</b>	2,43	2,31	2,15	2,07	1,93
<b>Pik kür süresi (dk)</b>	47,0	37,6	39,6	36,3	36,4
<b>Viskozite (cP)</b>	220	328	550	830	1898
<b>Tiksotropi</b>	2,60	2,75	2,98	3,41	-
<b>Lineer büzülme (%)</b>	1,41	0,93	0,70	0,70	0,70
<b>Post-kür sonrası lineer büzülme (%)</b>	1,41	1,17	0,93	0,70	0,70
<b>Sertlik (Barcol)</b>	40	40	41	42	43

Tablo 4.1’de görüldüğü üzere atık ilavesi ile jel süresi yaklaşık olarak %30, kür süresi de yaklaşık %20 oranında kısalmıştır. Bu durum, reçinede işlenebilirlik açısından istenmeyen bir sonuçtur ve atık içerisinde de bir miktar çaprazbağlayıcı bulunmasına bağlanabilir. Bununla birlikte, atık ilavesi ile reçine içindeki polyester miktarı bağlı

olarak azalmasına rağmen, değerlendirilen değişken sayısını sınırlamak amacıyla başlatıcı oranı karışımın toplam ağırlığına göre kullanılmaya devam edilmiş, dolayısı ile atık ilavesi ile birlikte polyesterin birim miktarı başına düşen başlatıcı miktarı da artmıştır. Pik kür sıcaklığının azalmasının ise, atık oranı artışı ile yığın polyester miktarının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Atık içermeyen kontrol örneğinin kür profili, atık ilavesinde başlatıcının sabit tutulduğu durumdaki ve atık miktarına orantılı olarak başlatıcının azaltıldığı durumdaki kür profilleri karşılaştırmalı olarak Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Başlatıcı miktarının reçine kür profiline etkisi

	<b>100/0</b>	<b>80/20</b>	<b>80/20</b>
	<b>1% MEK-P</b>	<b>1% MEK-P</b>	<b>0,8% MEK-P</b>
<b>Jel süresi (dk)</b>	17,0	12,3	17,0
<b>Pik sıcaklık (°C)</b>	176,5	154,2	137,7
<b>Pik kür süresi (dk)</b>	47,0	36,4	50,0

Elde edilen bulgulara göre, başlatıcı miktarı polyester konsantrasyonuna göre belirlendiği durumda atık ilavesinin jel ve pik kür süresi üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Pik kür sıcaklığı da atık ilavesinden etkilenmiştir; fakat pik kür sıcaklığındaki düşüş jel ve pik kür süresinde olduğu kadar etkili değildir. Bu durumu incelemek için DSC yardımı ile atığın ısı kapasitesi (özellik ısı) belirlenip kullanılan atık oranlarına göre değişimi hesaplanmış ve atık oranının artışı ile özellik ısıda da benzer bir düşüş olduğu görülmüştür. Atık miktarının artışı ile elde edilen daha düşük pik kür sıcaklıkları azalan ısı kapasitesine bağlanmıştır.

Atık kullanımının artışı ile viskozite ve tiksotropi değerleri de artmıştır. Viskozite artışı reçinenin işlenebilirliği açısından olumsuz bir sonuç olarak görülse de, tiksotropi aslen el yatırması prosesinde ihtiyaç duyulan bir davranıştır. Tiksotropi, özellikle dik yüzeylere yapılan uygulamalarda malzemenin akmaya gösterdiği dirençle orantılıdır. Dolayısı ile tiksotropi değerinin artması daha kolay ve güvenli bir uygulama sağlar.

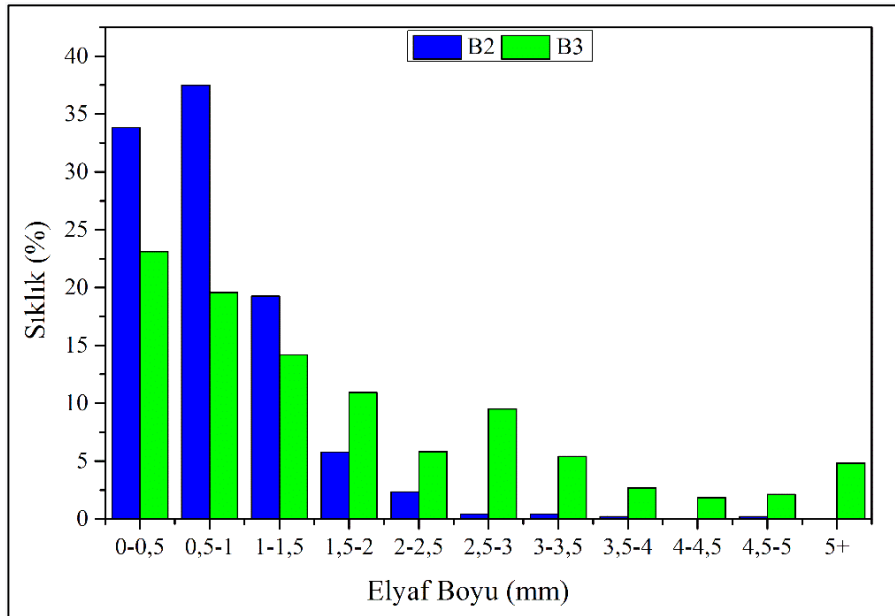
Post-kür uygulanmadan önceki ve sonraki lineer büzülme (çekme) değerleri incelendiğinde, atık ilavesinin harman içerisinde dolgu gibi davranarak lineer çekmeyi

yarısına kadar azalttığı görülmüştür. Lineer büzülme, kompozit üretiminde termoset reçinenin çaprazbağlanma reaksiyonu sırasında meydana gelen kimyasal değişim kaynaklıdır. Bu büzülme, bir kompozit parçadaki artık gerilimi tanımlamak için önemli bir parametredir. Kompozit üretiminde, özellikle kalıplama uygulamalarında çok önemlidir ve her zaman sıfır olması arzu edilir. Bu amaçla özellikle kalıp üretiminde kullanılan reçinelerde çeşitli dolgular ve katkıları kullanılır (Nawab ve diğ., 2013). Dolayısıyla ile atık CTP kullanımının, lineer büzülme davranışını istenen yönde geliştirmesi ile kompozite dolaylı bir fayda sağladığı düşünülebilir.

Atık ilavesinin artışı ile sertlikte de bir iyileşme gözlenmiştir. Tez kapsamında çalışılan atık ilaveli kompozitlerin kullanım amaçları göz önünde bulundurularak sertlikteki artış bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

#### 4.1.1.2. Atığın fiziksel özellikleri

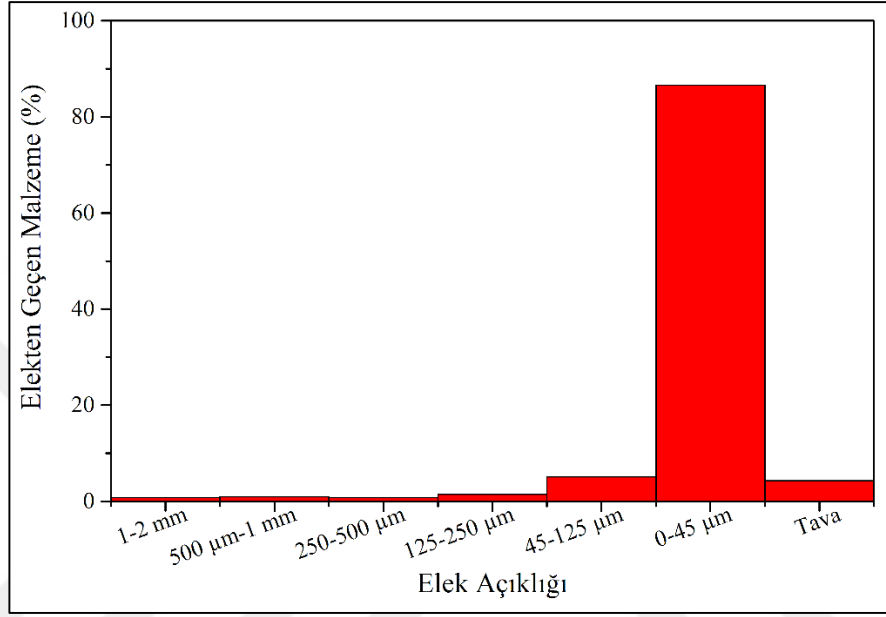
Gerçek elyaf uzunluğu ve elyaf boyu dağılımı, kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Fu ve Lauke, 1996; Lin ve diğ., 2008). CTP atığın içerdiği elyafların uzunluk dağılımı incelenmiş ve sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir.



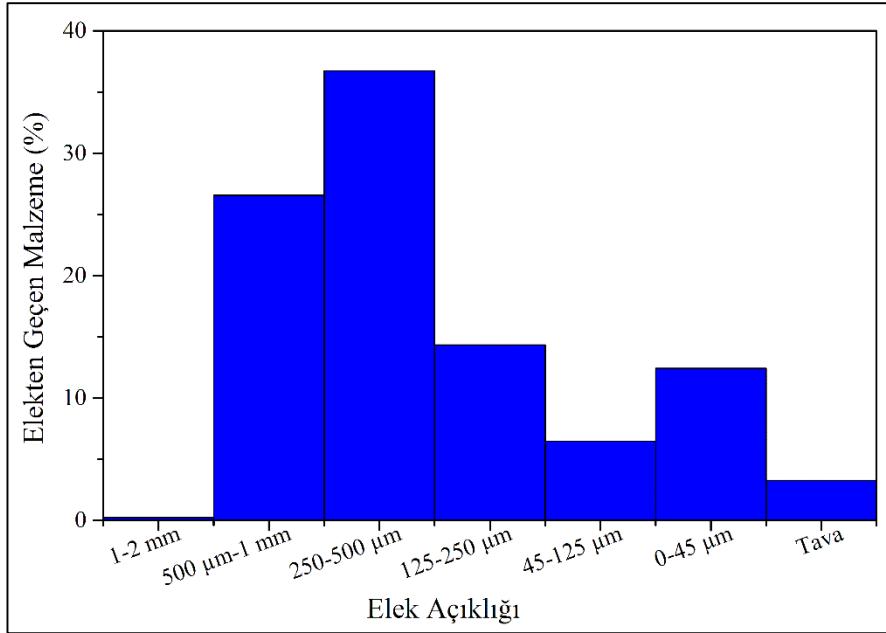
Şekil 4.1. Atık CTP'nin elyaf boyu dağılımı

3 farklı boyuttaki atık CTP'nin içerdiği elyafların uzunluklarının belirlenmesi için atık örnekleri kül fırınında yakıldıktan sonra kalıntı üzerinden mikroskop yardımı ile görüntüleme yapılmıştır. Toz boyutundaki atıktan (B1) elde edilen elyaflar mikroskop

ile ayırt edilemeyecek boyutta olduğundan elyaf boyutları raporlanamamıştır. Şekil 4.1 incelendiğinde, elyaf uzunluklarının B2 boyutunda 0-2,5 mm aralığında, B3 boyutunda ise 0-5 mm aralığında dağılım verdiği görülmektedir. B2 boyutunda en yüksek fraksiyon (%37) 0,5-1 mm aralığındaki elyaflara ait iken B3 boyutundaki en yüksek elyaf fraksiyonununun (%23) 0-0,5 mm aralığında olduğu görülmektedir.

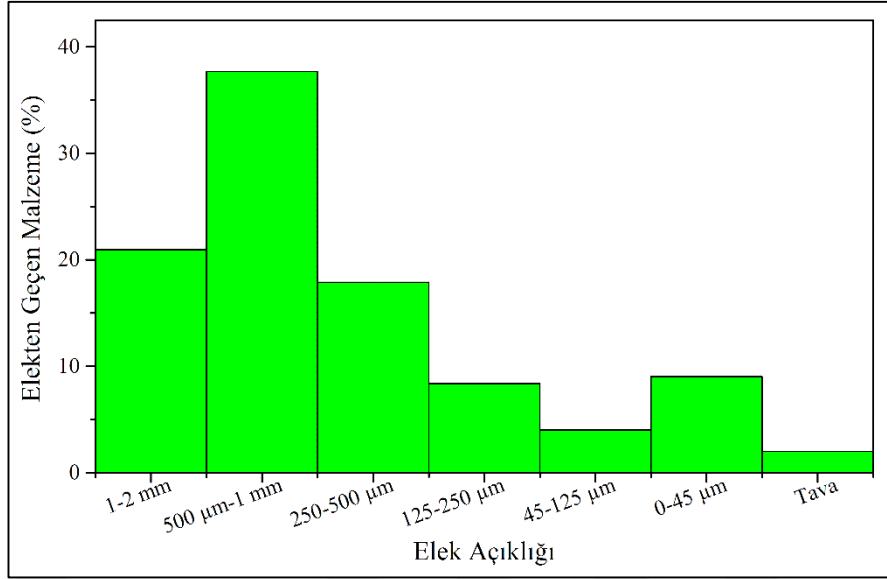


Şekil 4.2. B1 boyutlu atık için elek analizi



Şekil 4.3. B2 boyutlu atık için elek analizi





Şekil 4.4. B3 boyutlu atık için elek analizi

Atık CTP partiküllerini karakterize etmek için üç atık boyutuna da ayrı ayrı elek analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. B1 boyutunda en sık tane boyutu 0-45 µm (%80), B2 boyutunda 250-1000 µm (%35) ve B3 boyutunda 500-2000 µm (%37) aralığında elde edilmiştir.

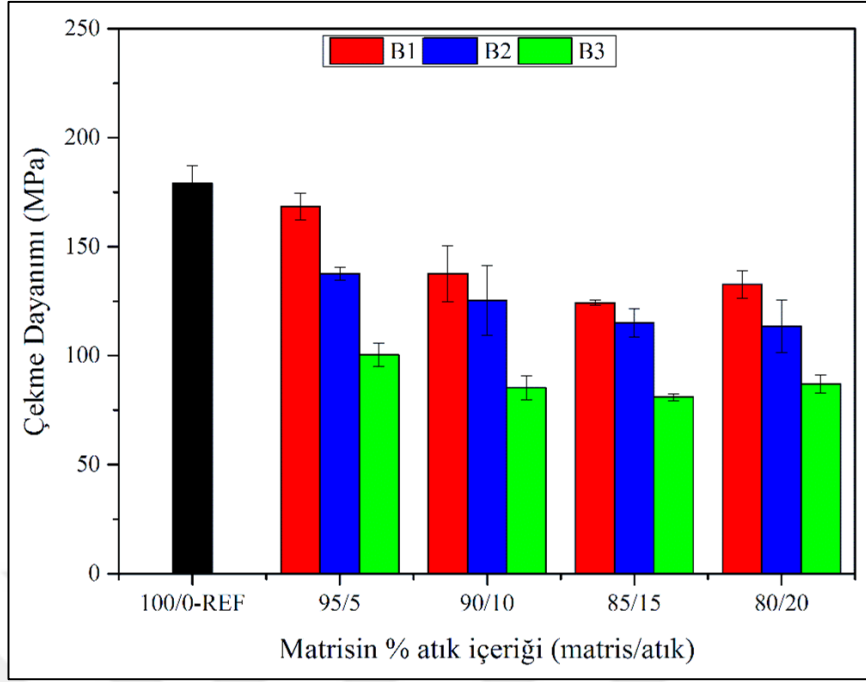
#### 4.1.2. Kompozitlerin mekanik özellikleri

Atık tane boyutunun, yeni kompozitin yapısında kullanılan atık oranının ve elyaf kat sayısının kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacı ile örneklere çekme, üç nokta eğme, darbe, kısa kiriş testleri uygulanmış ve sonuçları bu bölümde raporlanmıştır.

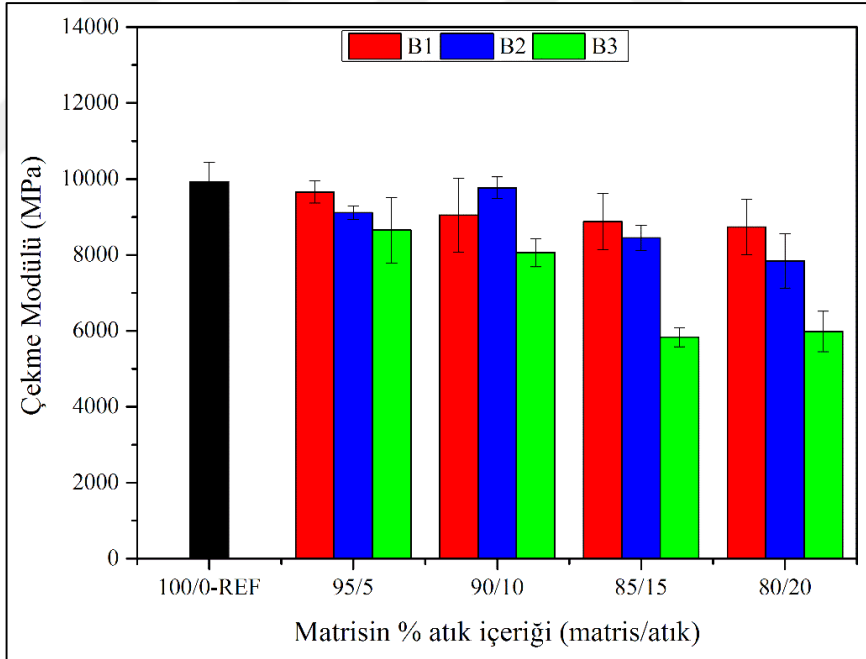
##### 4.1.2.1. Çekme testi

Bir malzemenin kopuncaya veya kırılıncaya kadar dayanabildiği en yüksek çekme gerilmesi, çekme dayanımı olarak adlandırılır. Bu gerilme çekme diyagramındaki en yüksek gerilme değeri olup, uygulanan en yüksek kuvvet ile bulunur. Çekme (elastisite) modülü ise malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür.

Kompozit örneklerin çekme sırasındaki davranışının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen çekme testi sonucunda elde edilen çekme dayanımı ve çekme modülü grafikleri Şekil 4.5 - 4.12'de verilmiştir.

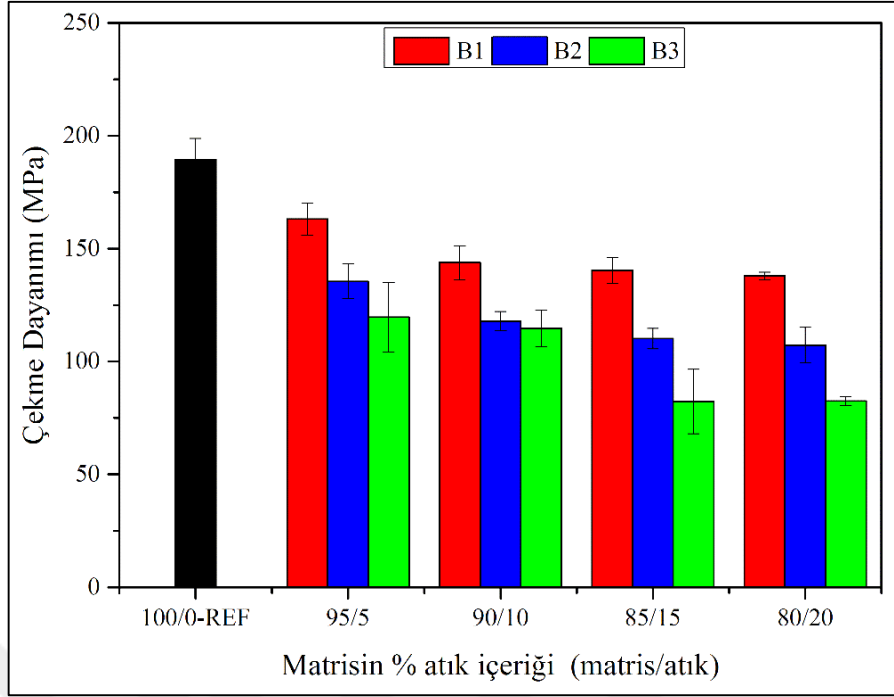


Şekil 4.5. 5 katlı kompozitlerin çekme dayanımı

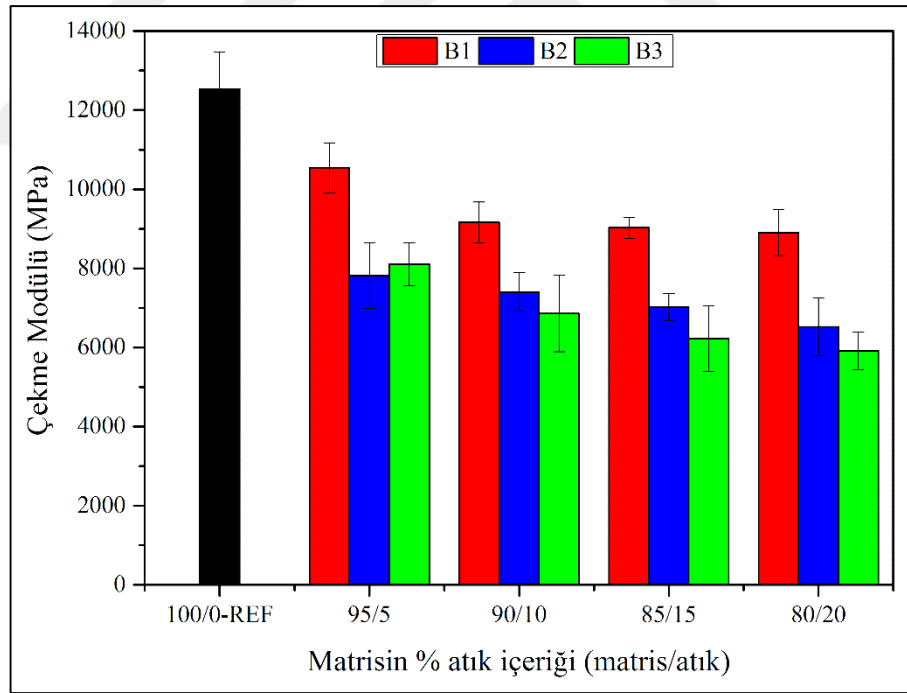


Şekil 4.6. 5 katlı kompozitlerin çekme modülü

Şekil 4.5 ve 4.6'da 5 kat işleme ile hazırlanmış kompozit örneklerin sırasıyla çekme dayanımı ve çekme modülü grafikleri verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere hem atık tane boyutunun, hem de kullanılan atık miktarının artışı ile çekme dayanımında ve modülünde düşüş gözlenmektedir. Kompozitlerin çekme dayanımı özelliklerindeki düşüş modüldeki düşüşe göre daha belirgindir.



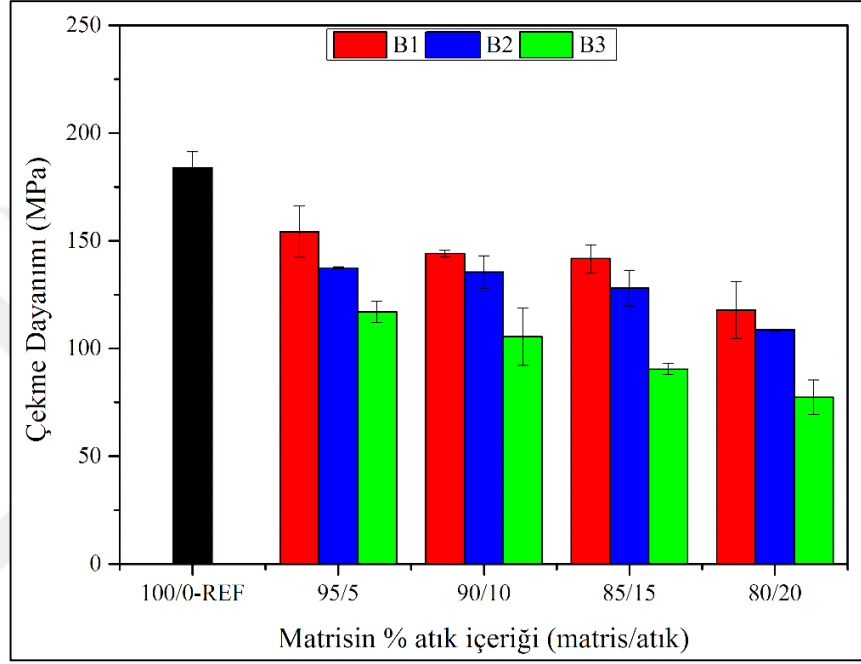
Şekil 4.7. 6 katlı kompozitlerin çekme dayanımı



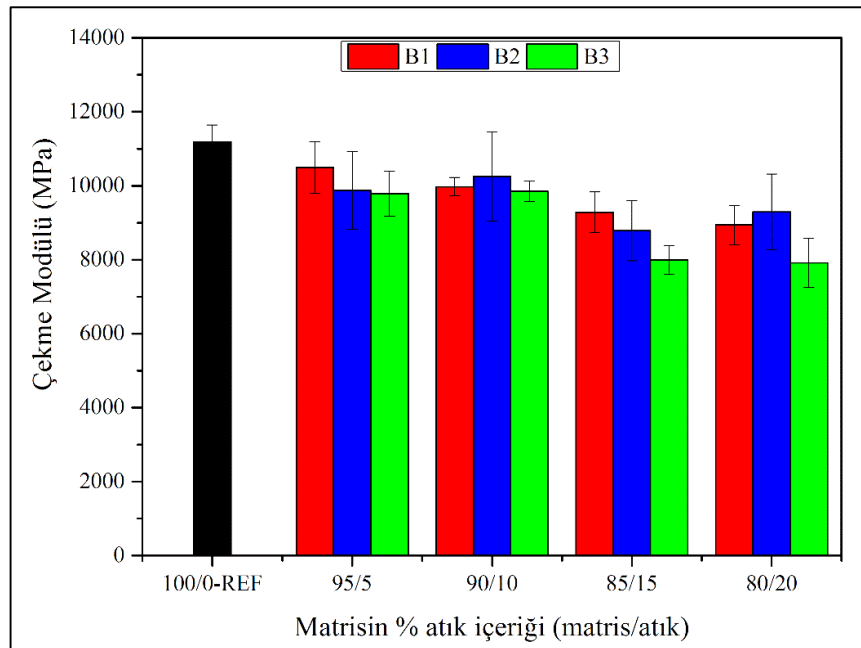
Şekil 4.8. 6 katlı kompozitlerin çekme modülü

6 kat işleme ile hazırlanmış kompozit örneklerin çekme dayanımı ve çekme modülü grafikleri Şekil 4.7 ve 4.8'de verilmiştir. 5 kat işleme ile hazırlanmış örneklere benzer şekilde hem atık tane boyutunun, hem de kullanılan atık miktarının artışı ile çekme dayanımında ve modülünde bir düşüş gözlenmektedir. 5 kat ve 6 kat işleme ile

hazırlanmış kompozitlerin çekme davranışlarını kendi içerisinde değerlendirildiğinde, atık kullanılmadığı durumda (100/0-REF) 6 kat elyaf işleme ile hazırlanan kompozitlerin daha yüksek dayanım ve modül değerleri sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte her iki grupta da çekme dayanımında görülen maksimum düşüşler birbirine oldukça yakındır. 5 kat işlemede çekme dayanımında görülen maksimum düşüş %55 iken 6 kat işlemede görülen maksimum düşüş %56'dır.

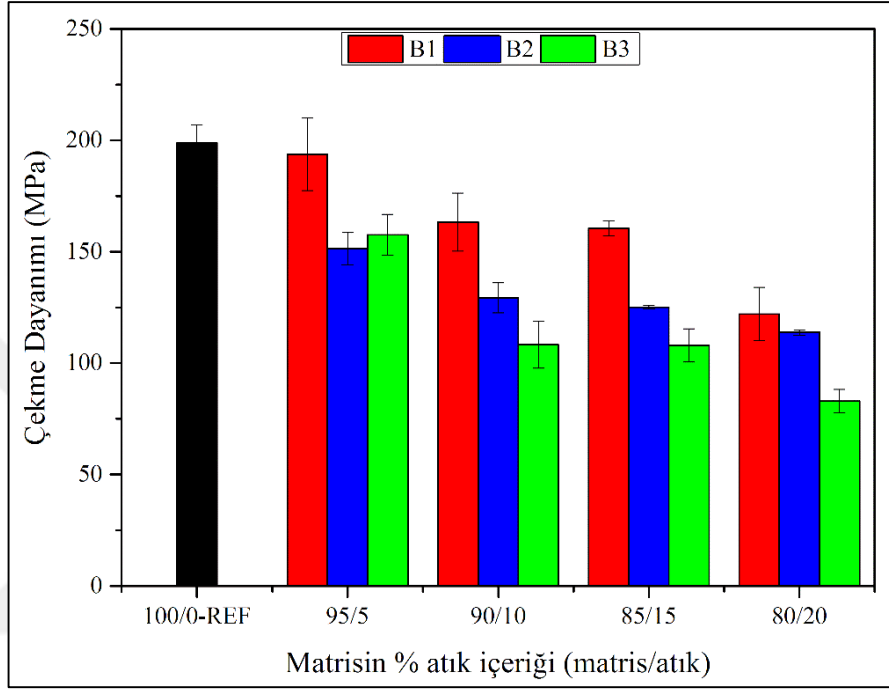


Şekil 4.9. 7 katlı kompozitlerin çekme dayanımı

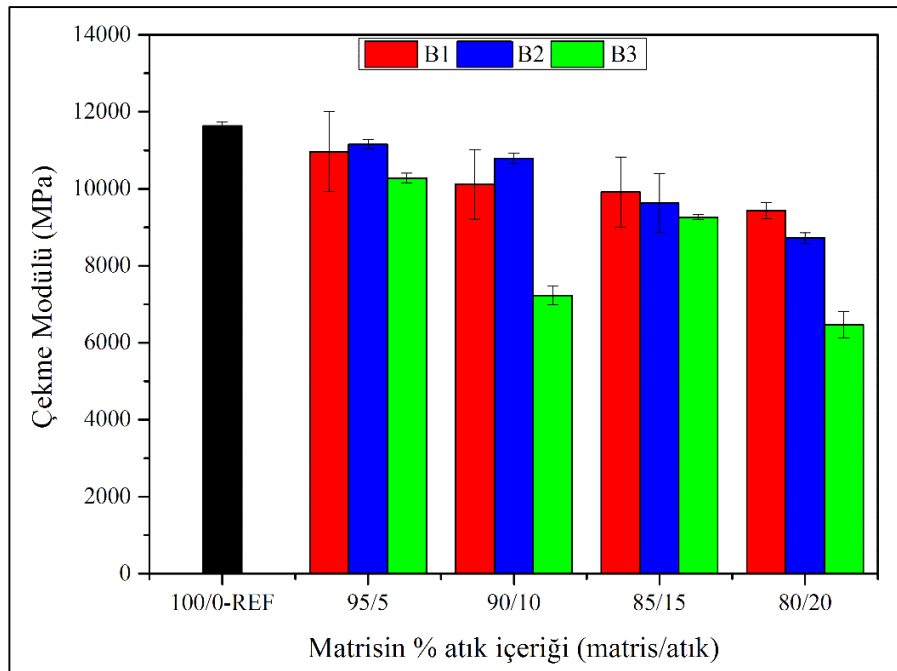


Şekil 4.10. 7 katlı kompozitlerin çekme modülü

Şekil 4.9 ve 4.10’da 7 kat işleme ile hazırlanan kompozit örneklerin çekme dayanımı ve çekme modülü grafikleri verilmiştir. Elyaf kat sayısından bağımsız olarak 5 ve 6 katlı işlemlerde olduğu gibi 7 kat işlemede de atık tane boyutu ve atık miktarı artışı işe çekme dayanımında ve modülünde düşüş gözlenmektedir. 7 kat işleme durumunda çekme dayanımında gözlenen maksimum düşüş, %57 oranı ile 80/20-B3 örneğindedir.



Şekil 4.11. 8 katlı kompozitlerin çekme dayanımı



Şekil 4.12. 8 katlı kompozitlerin çekme modülü

8 kat işleme ile hazırlanan kompozit örneklerin çekme dayanımı ve çekme modülü grafikleri sırasıyla Şekil 4.11 ve 4.12’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde hem çekme dayanımının, hem de çekme modülünün atık tane boyutu ve miktarındaki artış ile azaldığı görülmektedir. Çekme dayanımında görülen maksimum düşüş %58 oranındadır.

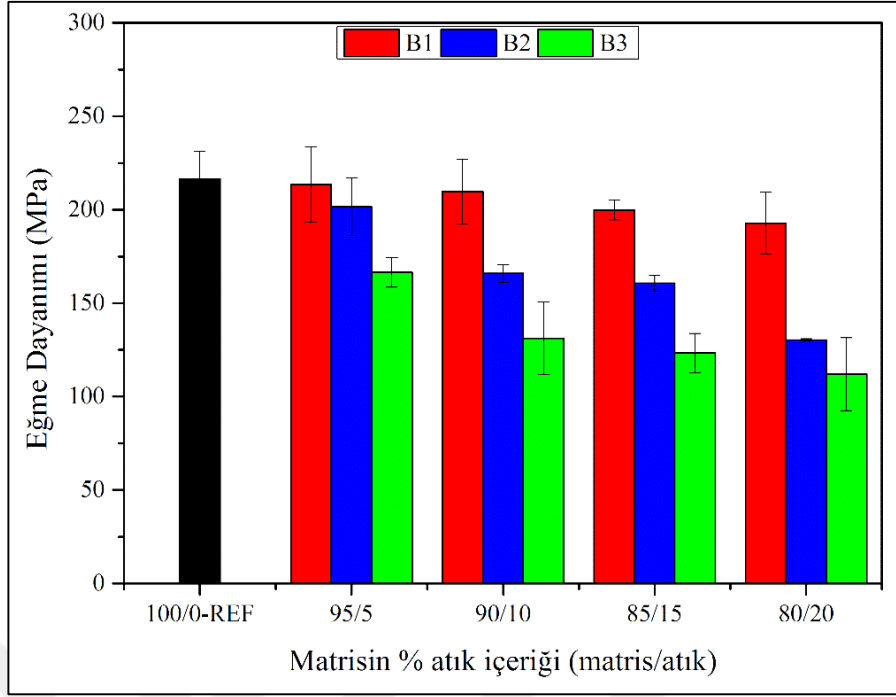
Kompozit örneklerin çekme dayanımı ve modül grafikleri karşılaştırıldığında elyaf kat sayısından bağımsız olarak, atık tane boyutu ve atık yükleme oranlarının değişimine göre her birinde oldukça benzer eğilimler elde edilmiştir. Kat işleme sayıları kendi aralarında kıyaslandığında ise elyaf kat sayısının artışı ile özellikle atık kullanılmadığı durumda çekme dayanımı ve modülünde bir iyileşme görülmekle birlikte, bu durumun atık ilavesi durumunda bir avantaj sağlamadığı görülmektedir.

#### **4.1.2.2. Üç nokta eğme testi**

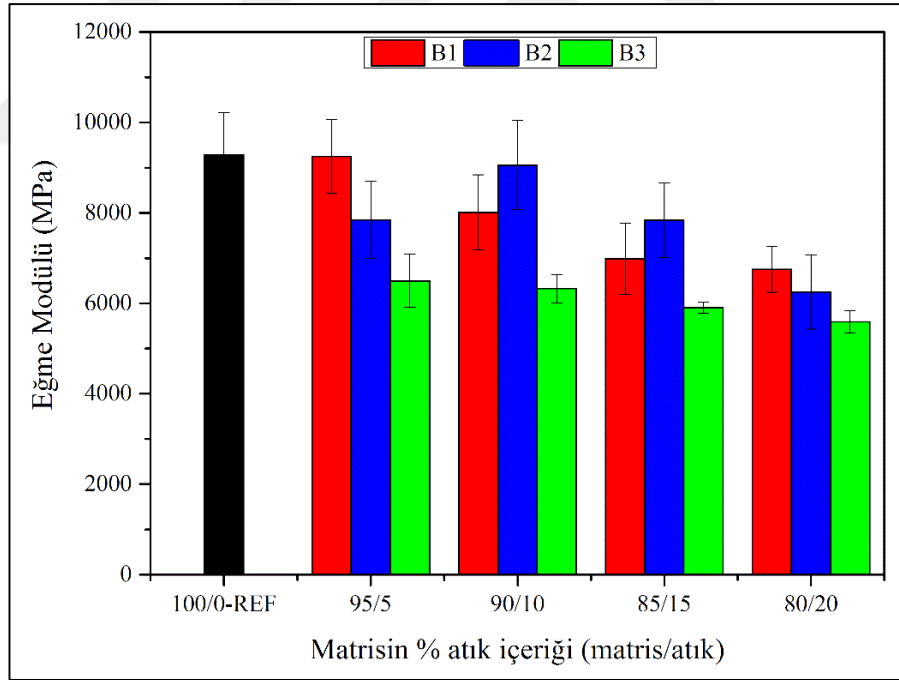
Eğilme deneyi malzemenin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır.

Atık tane boyutunun ve atık miktarındaki artışın kompozitlerin eğme sırasındaki davranışlarına etkileri uygulanan üç nokta eğme testi ile anlaşılmaya çalışılmıştır. Test sonuçları Şekil 4.13 - 4.20’de verilmiştir.

Eğme testinde de çekme testine benzer bir değişim gözlenmiş, kompozitlerin eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri azalmıştır. 5 katlı elyaf işleme ile elde edilen kompozitlerin eğilme sırasındaki davranışları Şekil 4.13 ve 4.14’te verilmiştir. Atık tane boyutu ve atık yükleme oranının artışı ile hem eğme dayanımı hem de eğme modülü değerlerinde düşüş görülmüştür. 5 katlı işleme yapılan örnek grubunda eğme dayanımındaki maksimum düşüş 80/20-B3 örneklerinde görülmüş olup %48 oranındadır. Bu etki, yüksek atık oranlarında tane boyutunun küçük tutulması ile (80/20-B1) %11’e kadar azaltılabilmektedir. Buradan hareketle eğme dayanımındaki düşüşte orandan ziyade tane boyutunun daha etkili olduğu söylenebilir.

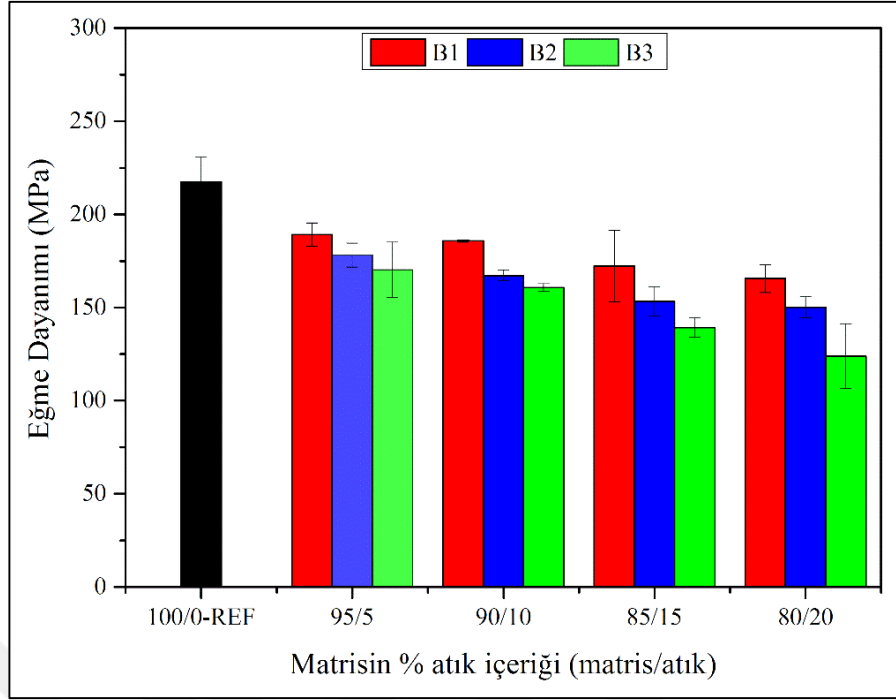


Şekil 4.13. 5 katlı kompozitlerin eğme dayanımı

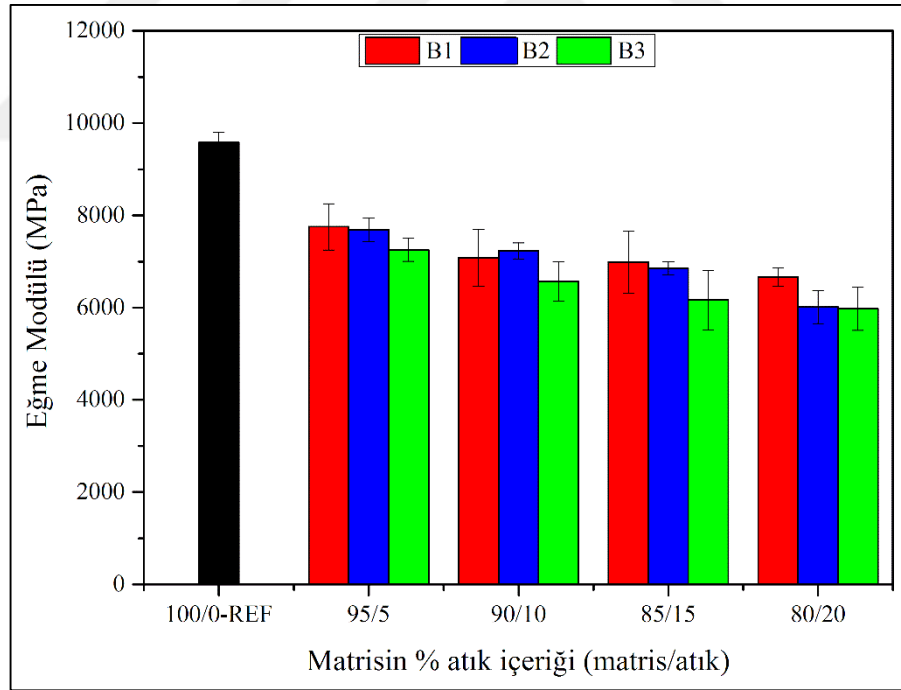


Şekil 4.14. 5 katlı kompozitlerin eğme modülü

6 katlı elyaf işleme ile elde edilen kompozitlerin eğilme sırasındaki davranışları Şekil 4.15 ve 4.16'da verilmiştir. Grafiklerden, 6 katlı işleme grubunda atık ilavesi ile eğme dayanımının ve modülünün azaldığı, eğme dayanımındaki maksimum düşüşün %43 olduğu görülmektedir.



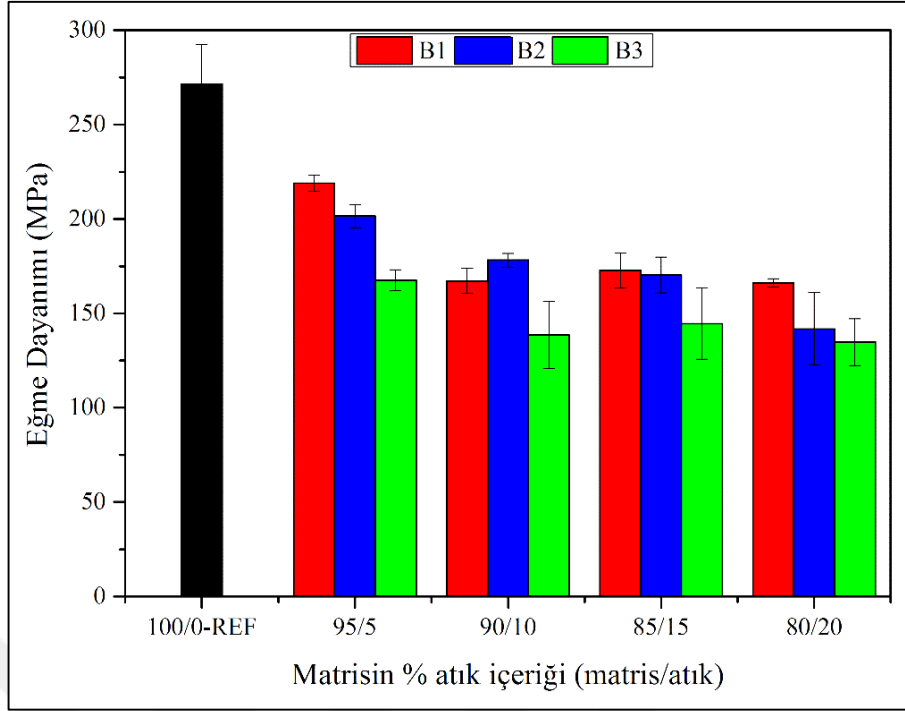
Şekil 4.15. 6 katlı kompozitlerin eğme dayanımı



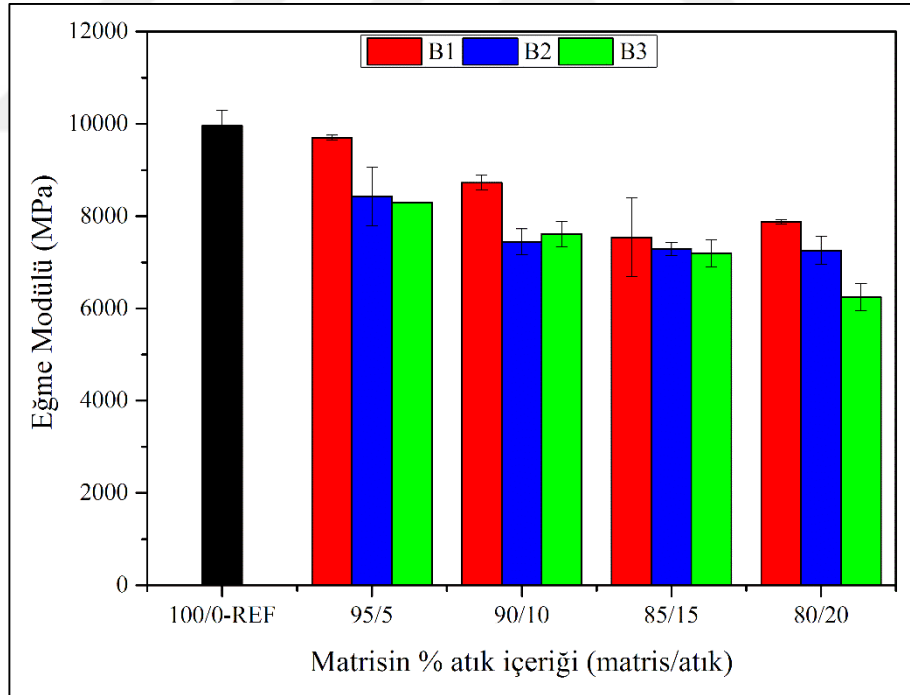
Şekil 4.16. 6 katlı kompozitlerin eğme modülü

7 katlı elyaf işleme ile elde edilen kompozitlerin eğilme sırasındaki davranışları Şekil 4.17 ve 4.18’de verilmiştir. Grafiklerden, 7 katlı işleme grubunda, atık ilavesi ile eğme dayanımındaki maksimum düşüşün %50 olduğu görülmektedir.



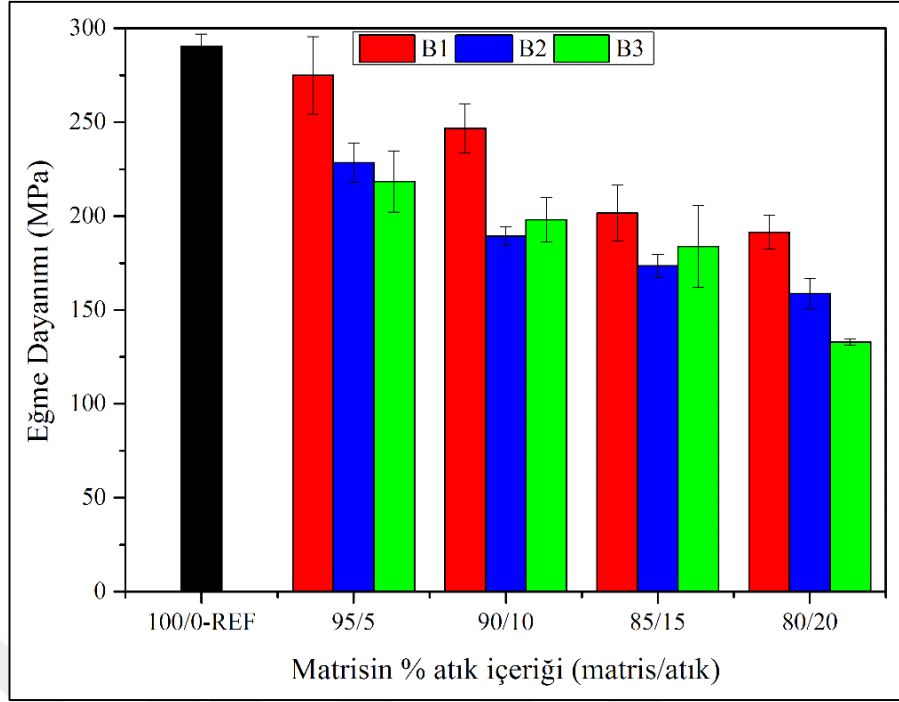


Şekil 4.17. 7 katlı kompozitlerin eğme dayanımı

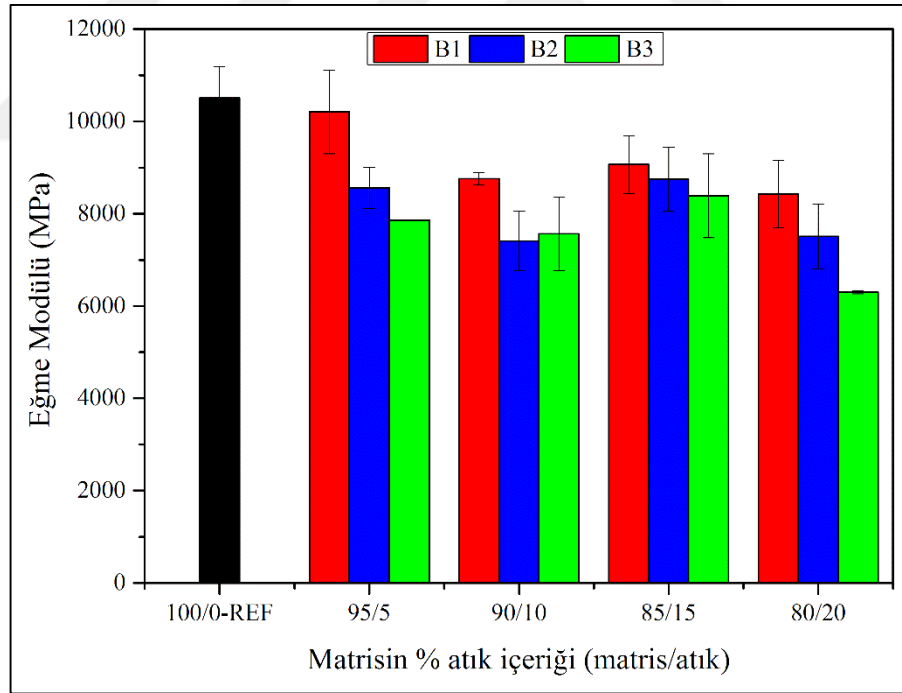


Şekil 4. 18. 7 katlı kompozitlerin eğme modülü

Şekil 4.19 ve 4.20’de, 8 katlı elyaf işleme ile elde edilen kompozitlerin eğilme sırasındaki davranışları verilmiştir. 5, 6 ve 7 katlı işleme gruplarında olduğu gibi 8 katlı işlemede de atık ilavesi ile eğme dayanımı ve modülü düşüş göstermiştir. Eğme dayanımındaki maksimum düşüşün %54 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.19. 8 katlı kompozitlerin eğme dayanımı



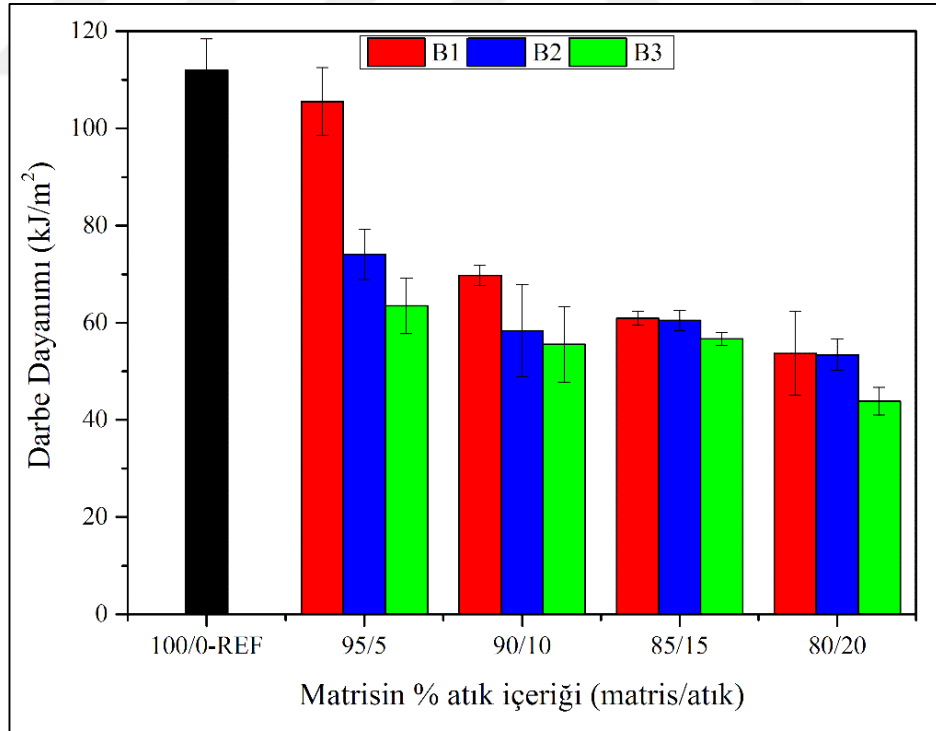
Şekil 4.20. 8 katlı kompozitlerin eğme modülü

Kompozit örneklerin eğilme davranışları incelendiğinde her işleme grubu için (5-8 kat) benzer bir eğilimle eğme dayanımının ve eğme modülünün hem atık miktarının artması ile hem de atık tane boyutu büyüdükçe azaldığı görülmektedir. Eğme dayanımı ve eğme modülü değişimleri kıyaslandığında, modül değerlerindeki düşüşün eğme

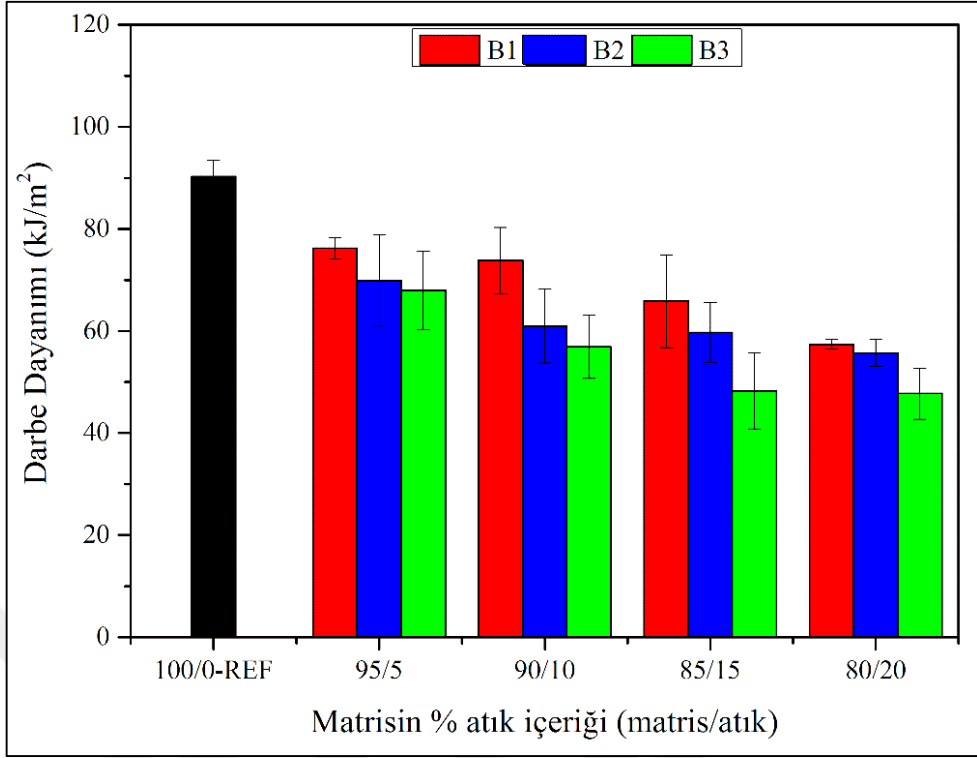
dayanımlarındaki düşüşe göre daha az olduğu, maksimum düşüşün %37 oranında olduğu görülmektedir. Elyaf katı sayılarına göre değerlendirme yapıldığında, kat sayısı artışı ile atık kullanılmadığı durumda, yani referans örneklerde (100-0-REF), eğme dayanımında ve eğme modülünde artış gözlenirse de, atık kullanıldığı durumda tüm işleme gruplarında gözlenen düşüş önlenememiştir. En yüksek oran ve iri tane boyutu durumunda (80/20-B3) en az kayıp, çekme dayanımında %43 ve eğme modülünde %34 ile 6 katlı işleme grubunda elde edilmiştir. Bununla birlikte, kompozitlerin eğilme davranışlarında atık oranından ziyade tane boyutunun daha etkili olduğu ve yüksek atık yükleme oranlarında küçük tane boyutu kullanılarak bu etkinin kısmen azaltılabileceği görülmektedir.

#### 4.1.2.3. Darbe testi

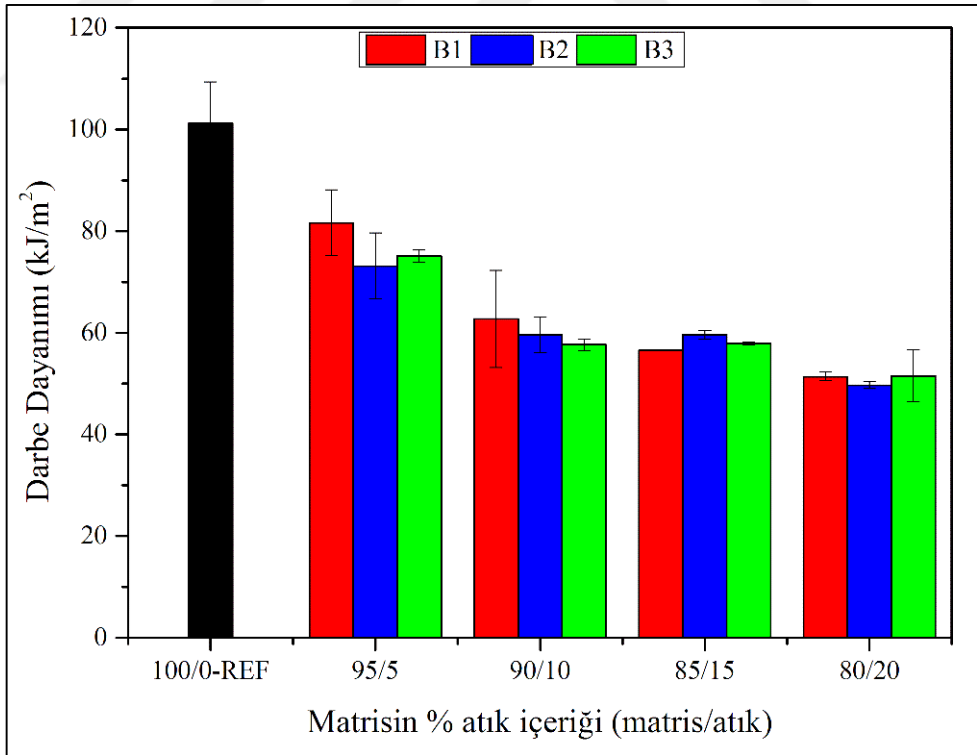
Atık tane boyutu ve yükleme oranının kompozitlerin darbe sırasındaki davranışlarına etkileri, çentiksiz uygulanan ve sonuçları Şekil 4.21 - 4.24'te verilen darbe testi ile değerlendirilmiştir.



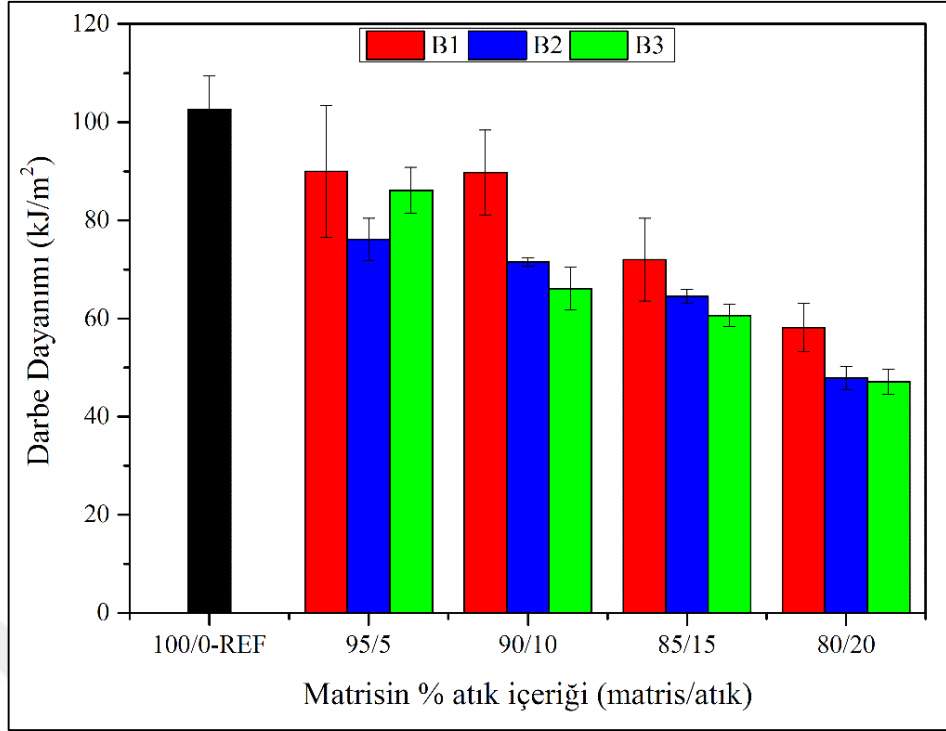
Şekil 4. 21. 5 katlı kompozitlerin darbe dayanımı



Şekil 4.22. 6 katlı kompozitlerin darbe dayanımı



Şekil 4.23. 7 katlı kompozitlerin darbe dayanımı



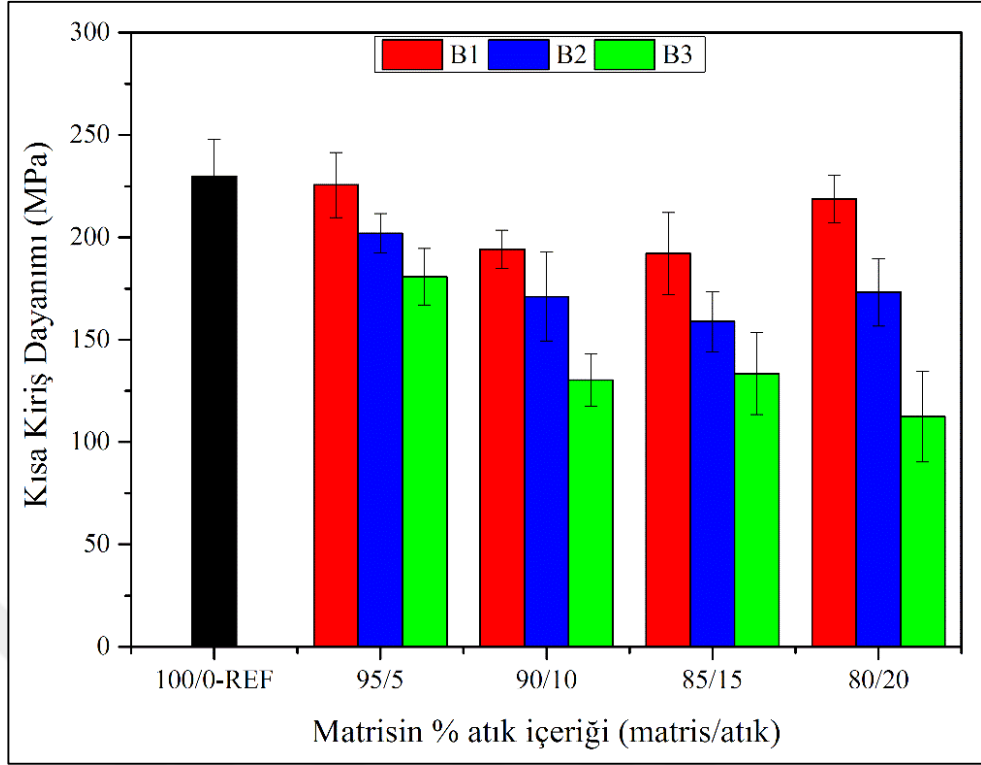
Şekil 4.24. 8 katlı kompozitlerin darbe dayanımı

Şekiller incelendiğinde kompozitlerin darbe dayanımının kat işleme sayısından bağımsız olarak kullanılan atık oranının ve tane boyutunun artışı ile azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte tane boyutu etkisi incelendiğinde, tüm işleme gruplarında B1 boyutundan B2 boyutuna geçişte görülen keskin düşüş, B2 boyutundan B3 boyutuna geçilirken gözlenmemiştir. Bu durum, Şekil 4.1’de de verildiği üzere B3 boyutlu atıkta, diğer tane boyutlarına göre daha uzun elyaflar bulunmasına bağlanabilir. Elyaf uzunluğu, kompozitlerin mekanik dayanımında oldukça etkili bir faktördür (Takagi ve Ichihara, 2004).

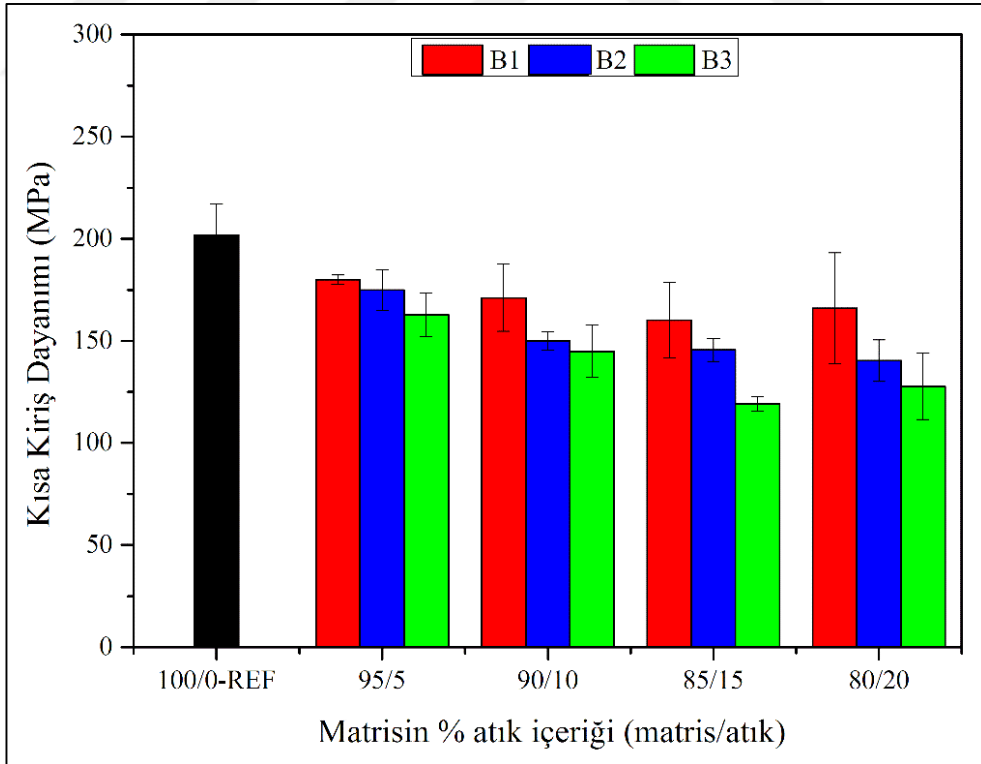
6 katlı işleme grubunda, atık ilavesiyle darbe dayanımında görülen düşüş, diğer gruplara göre daha dengeli ve yumuşaktır; maksimum düşüş %46 oranındadır.

#### 4.1.2.4. Kısa kiriş testi

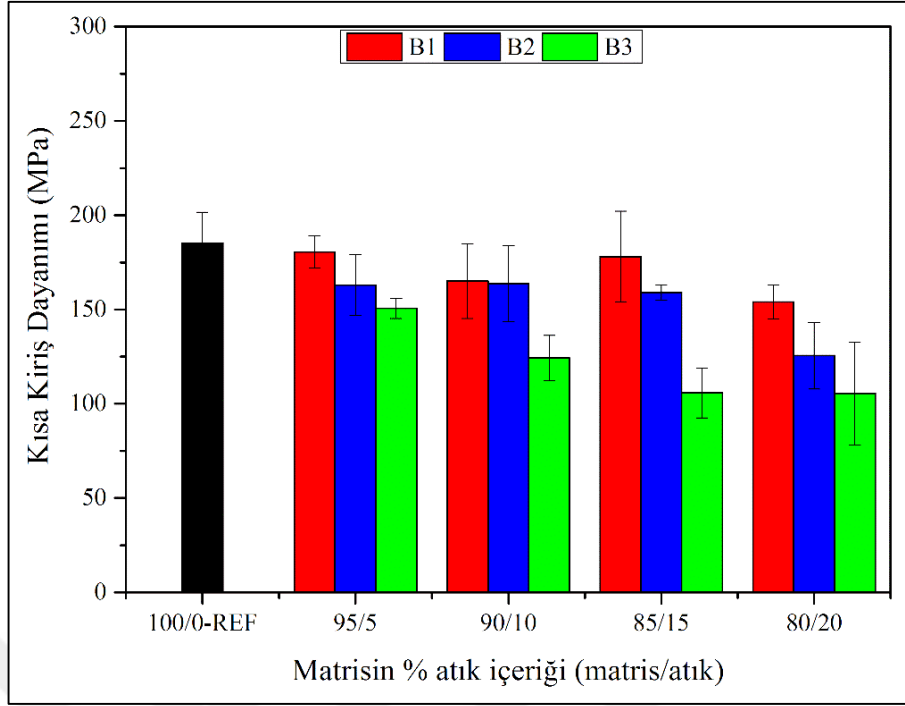
Atık tane boyutunun ve atık yükleme oranının kompozitlerin darbe sırasındaki davranışlarına etkilerini gösteren bir başka test de çentiksiz darbe testi olarak da ifade edilebilen kısa kiriş testidir. Tüm örneklerin kısa kiriş dayanımları Şekil 4.25 - 4.28’de verilmiştir.



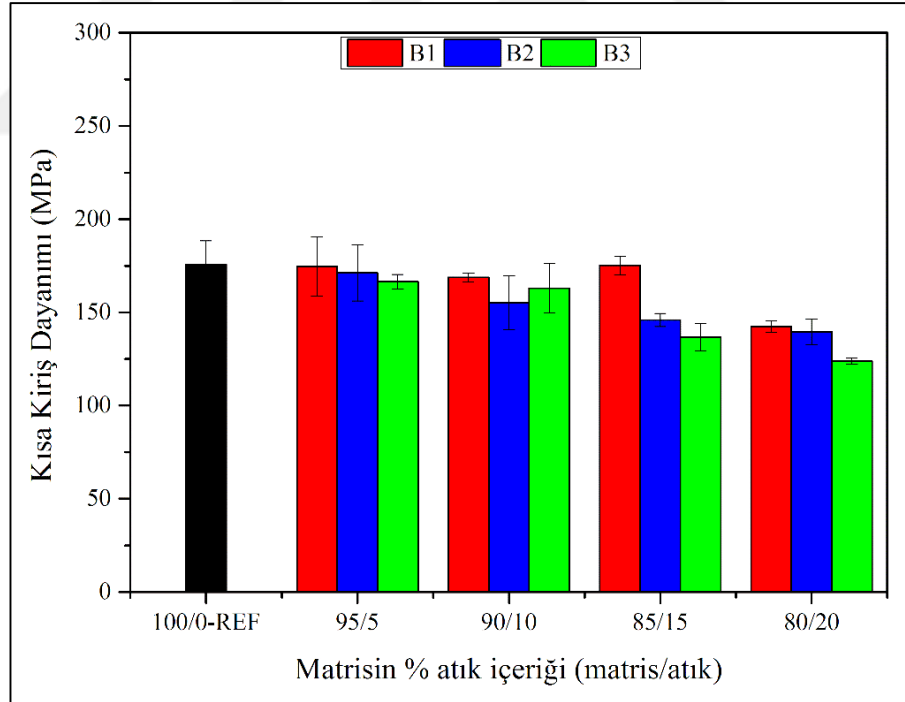
Şekil 4.25. 5 katlı kompozitlerin kısa kiriş dayanımı



Şekil 4.26. 6 katlı kompozitlerin kısa kiriş dayanımı



Şekil 4.27. 7 katlı kompozitlerin kısa kiriş dayanımı



Şekil 4.28. 8 katlı kompozitlerin kısa kiriş dayanımı

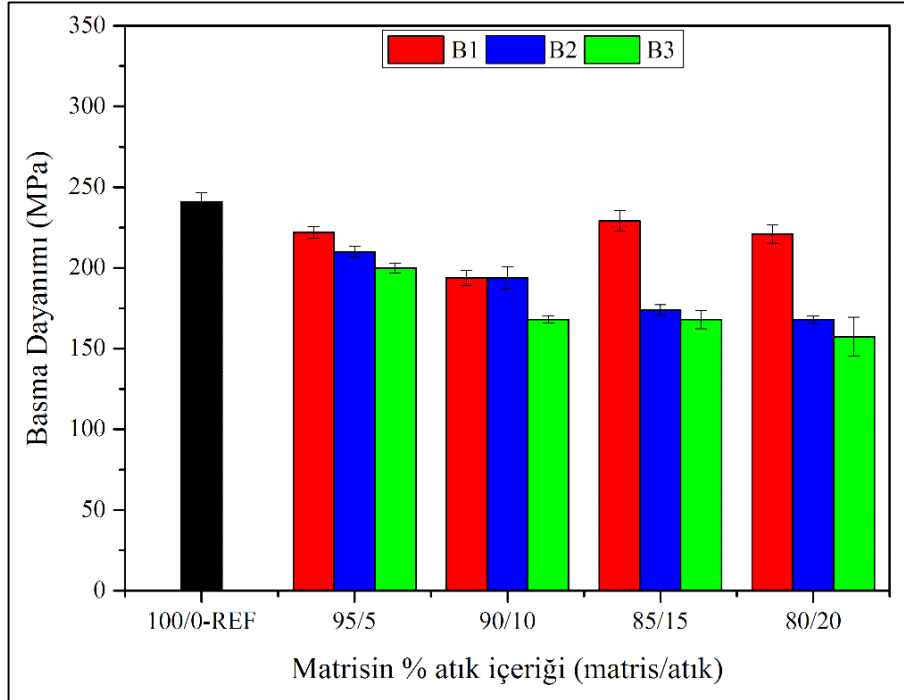
Sonuçlar incelendiğinde, diğer mekanik özelliklerden farklı olarak, elyaf kat sayısı arttıkça, atık kullanılmadığı durumda (100/0-REF) dahi kısa kiriş dayanımında genel bir düşüş görülmektedir. Kısa kiriş dayanımı kompozit örneklerin tabakalar arası kesme dayanımı ile ilişkilidir (Kumar ve diğ., 2020; Wang ve diğ., 2016). Bu düşüş

atık miktarı ve tane boyutunun artışı ile artmaktadır. Bununla birlikte daha az kat işleminde tane boyutunun etkisi özellikle yüksek atık oranlarında çok belirgin iken bu etki kat sayısının artışı ile azalmakta ve kısa kiriş dayanımındaki genel düşüşte de bir yavaşlama görülmektedir.

Kompozit örneklerin çekme, eğme ve darbe özellikleri incelendiğinde, atık kullanılmadığı durumda (100/0-REF) kat sayısı arttıkça mekanik özelliklerin iyileştiği görülmektedir. Bununla birlikte, atık ilavesi durumunda bu avantaj kaybolmaktadır. Çekme sırasındaki davranış kat sayısı ile belirgin bir farklılık göstermezken, eğme ve darbe testlerinde en iyi sonuçlar 6 kat işleme ile üretilen kompozitlerde elde edilmiştir. Ayrıca, kat sayısının artışı ile kısa kiriş dayanımındaki düşüş de göz önünde bulundurularak optimum kat sayısı 6 olarak belirlenip çalışmanın bu grup ile sürdürülmesine karar verilmiştir.

#### 4.1.2.5. Basma testi

Atık tane boyutunun ve atık miktarındaki artışın 6 kat elyaf ile işlenmiş kompozitlerin basma sırasındaki davranışlarına etkilerini araştırmak amacı ile örnekler basma testi uygulanmış ve sonuçlar Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29. 6 katlı kompozitlerin basma dayanımı



Kompozitlerin basma dayanımı, atık ilavesinden en az etkilenen mekanik özelliklerdendir. Yüksek atık oranlarında düşüş belirginleşse de tane boyutunun basma dayanımına etkisi oldukça düşüktür. Kontrol örneğinin basma dayanımı 240 MPa'dır. Özellikle toz atık kullanıldığı durumda, yüksek yükleme oranlarında (80/20-B1) dahi basma dayanımında neredeyse referans ile benzer bir değer (220 MPa) ölçülmüştür.

6 kat elyaf ile işlenerek hazırlanan kompozitlerin mekanik özellikleri incelendiğinde, atık ilavesi ile görülen azalmanın kısa kiriş ve basma dayanımında daha az olduğu görülmektedir. Bu özellikler, tane boyutundan daha az etkilenmişlerdir. Toz atık (B1) kullanıldığı durumda çekme, eğme, darbe, kısa kiriş ve basma dayanımındaki düşüşler sırası ile %13,9, %13,0, %15,5, %10,8 ve %7,8'dir. En büyük tane boyutu (B3) kullanıldığı durumda ise bu değerler sırası ile %56,4, %43,1, %47,1, %36,7 ve %34,8 olarak ölçülmüştür.

Diğer önemli bir konu da her zaman aynı taze elyaf miktarı ile hazırlanan kompozitlerin işlenmesi sırasında, atık oranı arttıkça artan matris viskozitesinin ıslatılabilirliği düşürmesidir. Dolayısı ile bu durum atık yüklemesi arttıkça elyafı ıslatabilmek için daha fazla miktarda reçine ihtiyacına yol açmıştır.

#### **4.1.3. Elyaf içeriği**

Atık içermeyen kontrol örneğinin ve atık içeren kompozit örneklerin elyaf oranlarının belirlenmesi için örnekler kül fırınında 565 °C'de 2 saat süre ile yakılmış ve yakma sonrası kül miktarları Tablo 4.3'te verilmiştir. Kontrol örneğinin (100/0-REF) elyaf oranı %46,3 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, B1 boyutlu atık kullanıldığı durumda elyafı ıslatmak için daha fazla reçine-atık karışımı kullanılması sebebiyle elyaf miktarındaki azalmanın makul seviyede olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, eşdeğer işleme koşullarını sağlamak için gereken reçine miktarı, tane boyutları 250-1000 µm (B2) ve 500-2000 µm (B3) olduğunda önemli ölçüde yükselmiştir. Yani, hem atık miktarının hem de tane boyutunun artışı ile kompozitlerin içerdiği elyaf oranında azalma söz konusudur ve bu etki büyük tane boyutlarında daha hissedilir seviyelerdedir. Azalan elyaf oranının kompozit mekanik özelliklerde belirgin bir kayba yol açması beklenen bir sonuçtur (Takagi ve Ichihara, 2004). Gerçekte, benzer endüstriyel uygulamalarda çeşitli katkı maddeleri veya solventler kullanarak reçine viskozitesini düşürmek ve böylece elyaf miktarının hemen hemen

sabit tutulabilmesi mümkündür. Buradan hareketle, atık varlığının, elyaf oranındaki azalmadan bağımsız olarak kompozit özelliklerine bireysel etkilerinin de araştırılması gerektiği düşünülmüş, kompozitlerin mekanik özellikleri, kompozitin içerdiği elyaf oranına göre normalize edilerek de değerlendirilmiştir. Normalizasyon, atık CTP içerisindeki ortalama elyaf oranı olan %25'e göre gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.3. Kompozitlerin elyaf içeriği

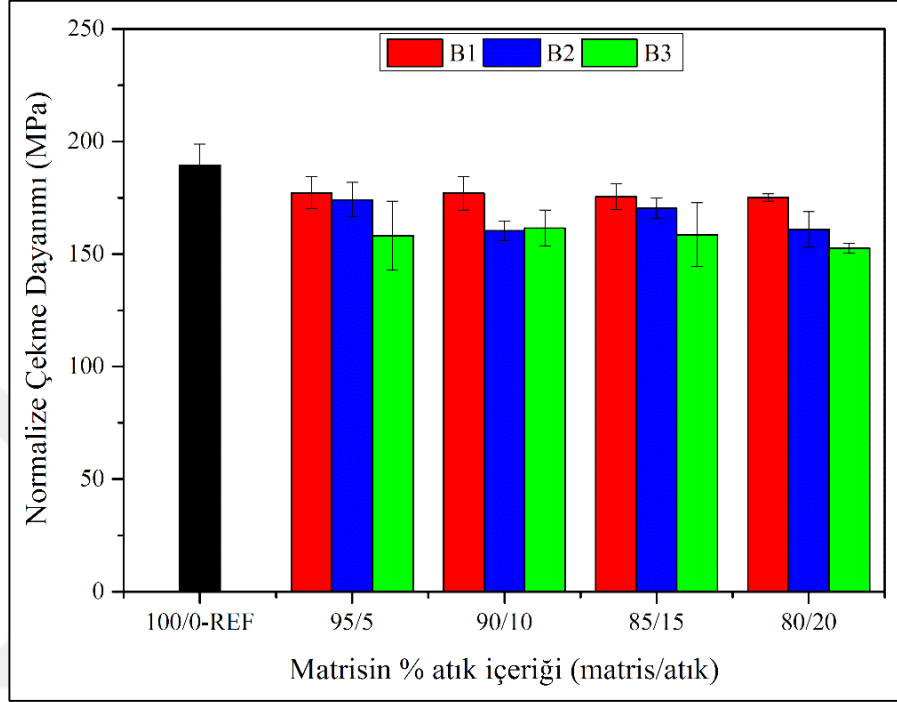
Atık Miktarı (%)	Tane Boyutu		
	B1	B2	B3
5	42,56	34,06	35,01
10	37,59	34,04	28,71
15	37,03	29,93	24,00
20	36,45	32,83	25,00

#### 4.1.4. Normalize mekanik özellikler

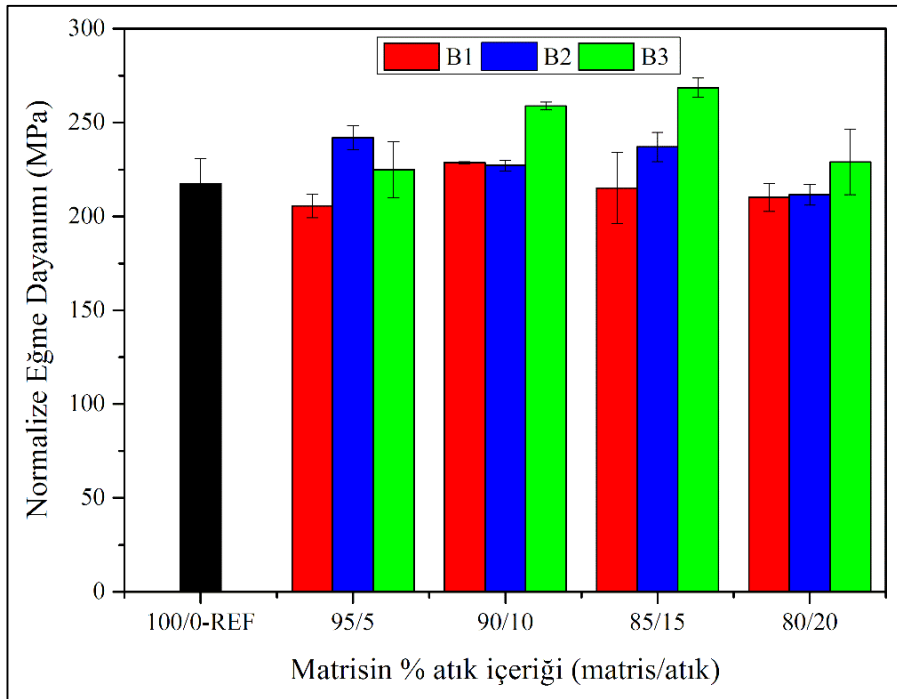
Kompozitlerin, atık CTP'nin içerdiği elyaf oranını %25 olarak normalize edilmiş mekanik özellikleri Şekil 4.30 - 4.34'te verilmiştir. Buna göre, normalizasyon sonrası çekme dayanımındaki özellik kayıpları; minimum oranda B1 boyutlu atık kullanıldığı durumda %6,4 ve maksimum oranda B3 boyutlu atık kullanıldığı durumda %19,4'tür. Bu değerler, darbe dayanımı için sırasıyla %8,2 ve %2,1 olarak ölçülmüştür. Eğme dayanımı ve kısa kiriş dayanımı özelliklerindeki değişim minimum oranda B1 boyutlu atık kullanıldığında sırasıyla %5,4 ve %3'tür. Bu iki özellikte, maksimum oranda B3 boyutlu atık kullanıldığı durumda değişim olmadığı görülmektedir. Basınç dayanımında her iki atık tipi için de değişim olmamıştır. Atık ilavesi durumunda, elyaf miktarının sabit tutulması ile belirlenen normalize özellik kayıpları, orijinal mekanik özellik değişimleri ile kıyaslandığında neredeyse üçte bir düzeyindedir.

Bu bölümde dikkat çeken bir başka bulgu, uzunlamasına doğrultuda gerçekleştirilen çekme dayanımı ölçümleri dışında tüm mekanik özelliklerde, daha yüksek tane boyutlarının kullanımı durumunda gerçekleşen iyileşmedir. Söz konusu ölçümler, örneklerin kalınlığı doğrultusunda ve/veya basma şeklinde gerçekleştirilmektedir.

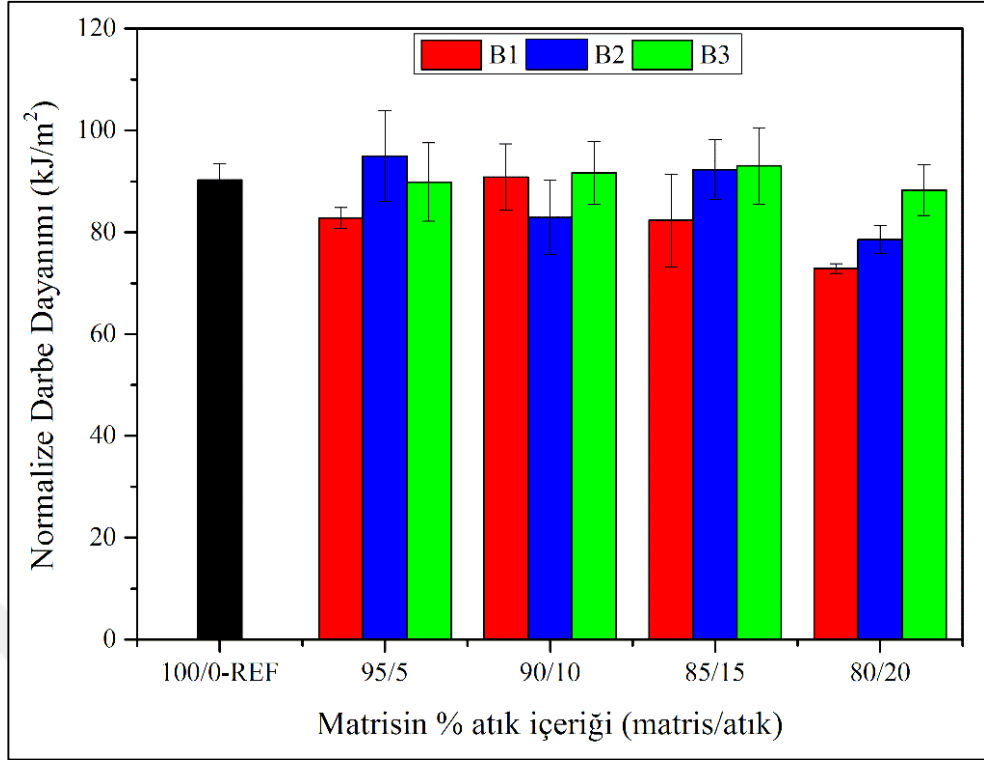
Normalize edilmiş mekanik özellikler bütünüyle değerlendirildiğinde, kompozit özelliklerindeki kayıpların tamamının doğrudan kompozit içindeki atık varlığından kaynaklanmadığı, bir kısmının atık içeren reçinenin modifiye edilmeden uygulanması nedeniyle prosesteki güçlüklerden kaynaklandığı söylenebilir.



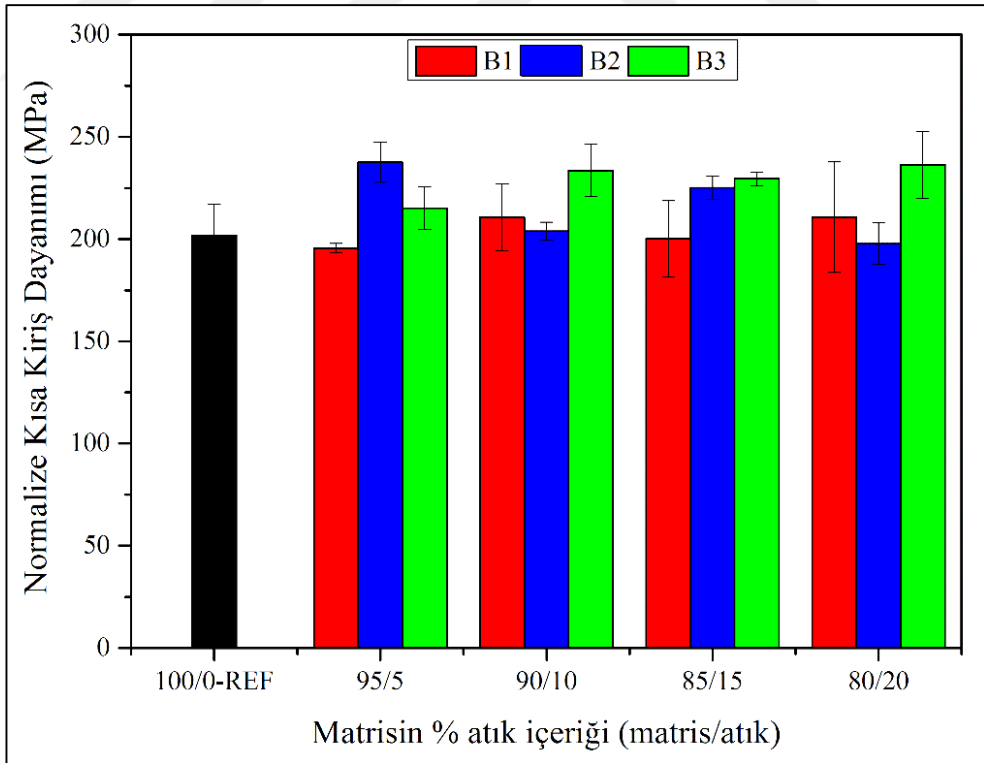
Şekil 4.30. Kompozitlerin normalize çekme dayanımı



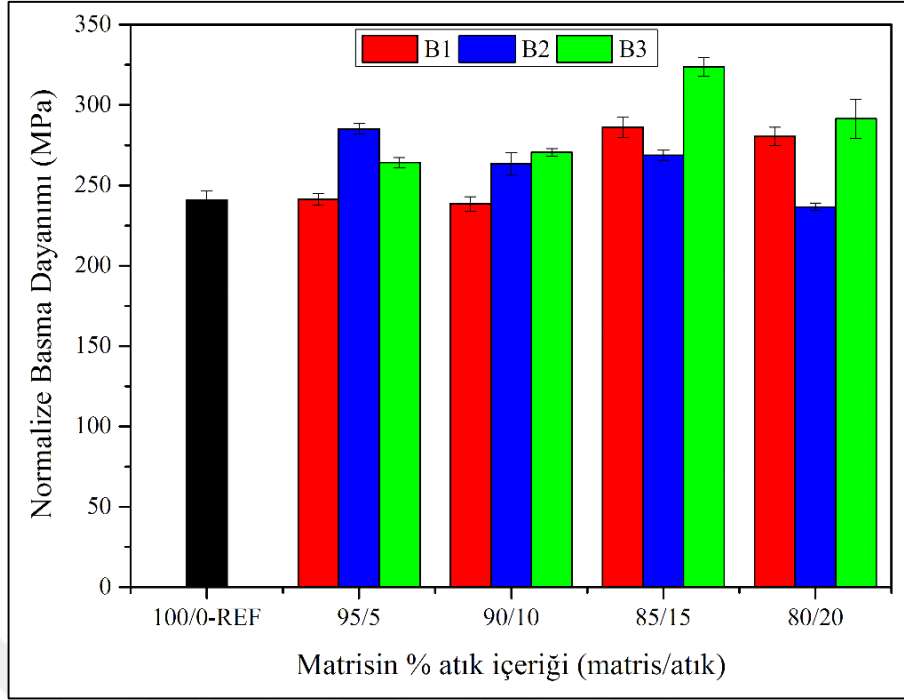
Şekil 4.31. Kompozitlerin normalize eğme dayanımı



Şekil 4. 32. Kompozitlerin normalize eğme dayanımı



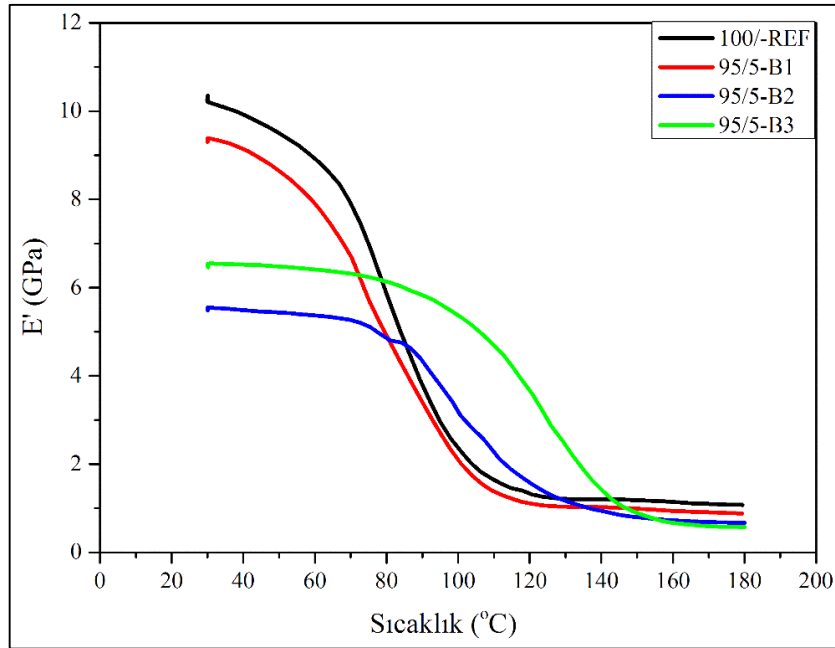
Şekil 4.33. Kompozitlerin normalize kısa kiriş dayanımı



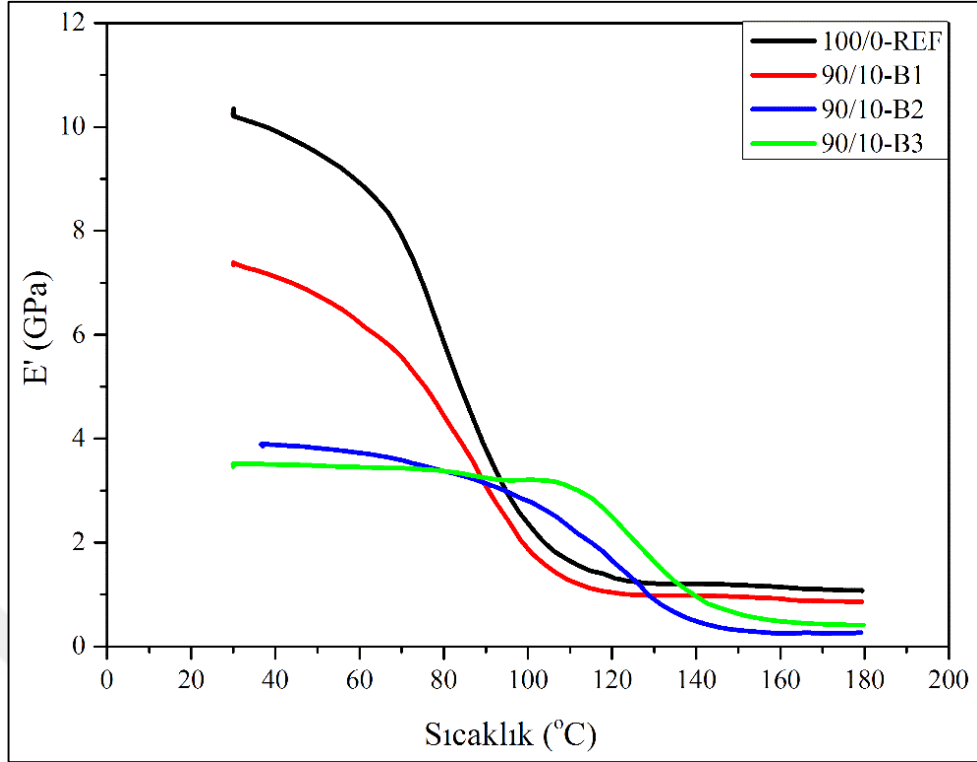
Şekil 4. 34. Kompozitlerin normalize basma dayanımı

#### 4.1.5. Dinamik-mekanik özellikler

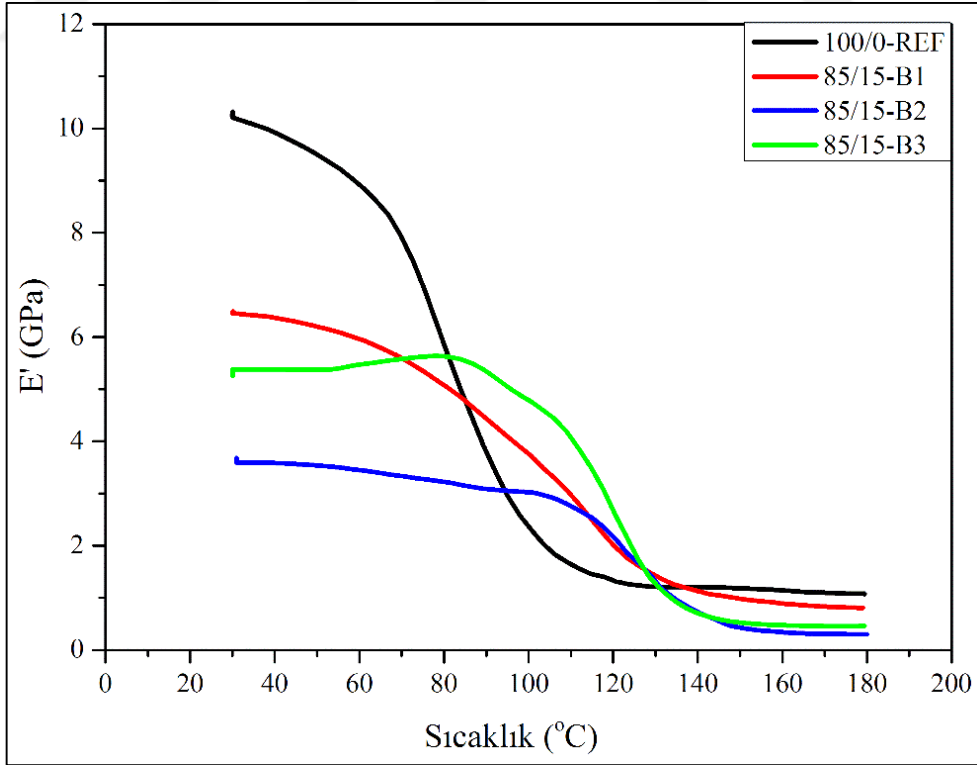
Kompozit örneklerin içeriğindeki atık miktarı ve atık tane boyutunun dinamik-mekanik özelliklere ve kompozitin ısıl geçişlerine etkisini incelemek amacı ile örneklere üç nokta eğme deformasyon modunda sıcaklık taraması yapılmıştır.



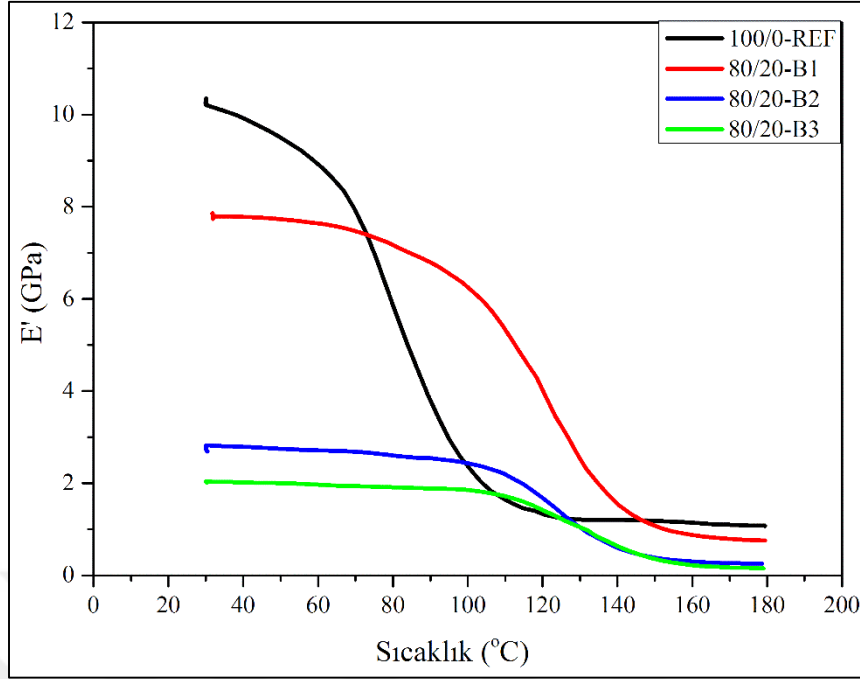
Şekil 4.35. %5 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi



Şekil 4.36. %10 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi



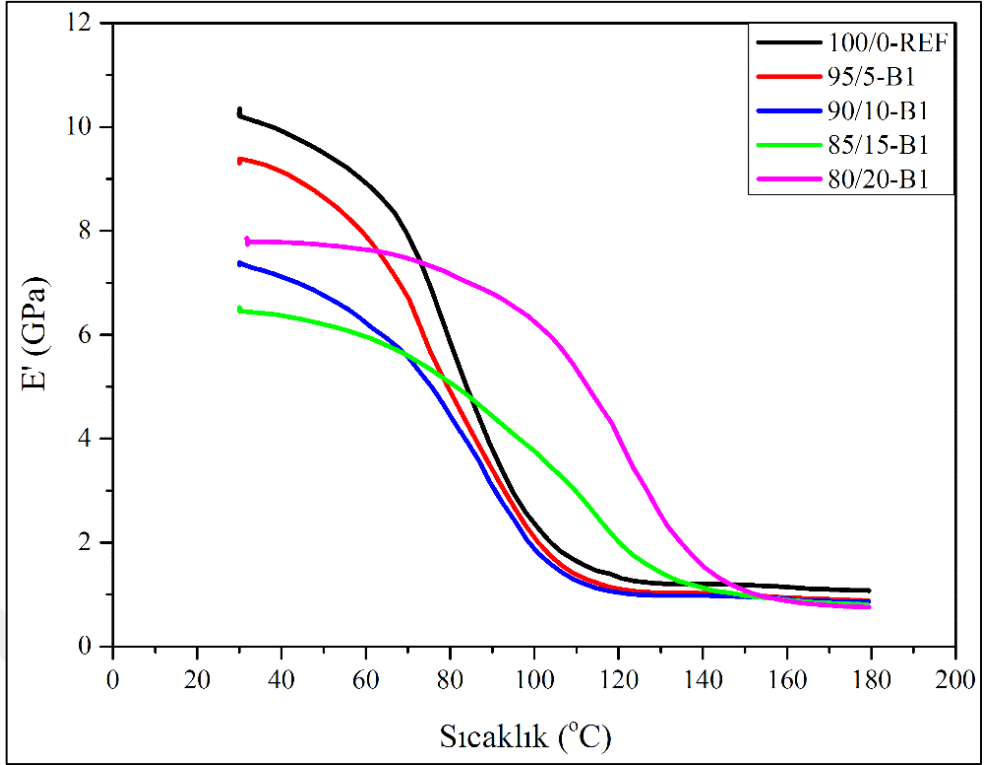
Şekil 4.37. %15 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi



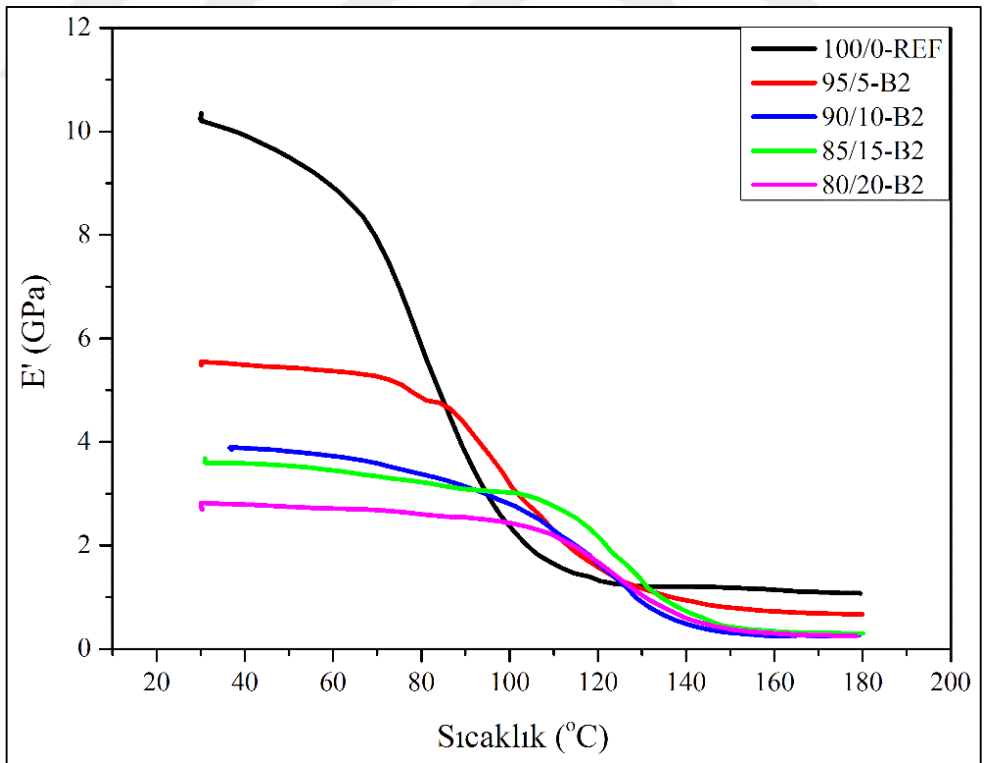
Şekil 4.38. %20 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi

Şekil 4.35 - 4.38'de atık ilavesinin, Şekil 4.39 - 4.41'de ise atık tane boyutunun kompozitlerin dinamik depo modülüne etkisi görülmektedir. Kompozitlerin sıcaklığa bağlı olarak depo modülü değerlerindeki değişimler incelendiğinde, bu değişimin, kompozitlerin içerdiği atık miktarına ve atığın boyutuna bağlı olarak farklı eğilimler sergilediği görülmektedir. Şekil 4.35'te %5 atık içeren kompozitler için depo modülü değerlerinin atık yüklemesiyle düştüğü, fakat B3 boyutundaki iri taneli atık içeren kompozitin modül değerlerinin tüm sıcaklıklar için, aynı oranda fakat B2 boyutunda atık içeren kompozite göre daha yüksek seyrettiği görülmektedir. Bu durum, %10 atık içeren kompozitler için (Şekil 4.36) küçük sapmalar göstermekle birlikte, %15 atık içeren kompozitler için (Şekil 4.37) de benzer seyretmektedir. Daha yüksek oranda (%20) atık içeren 80/20 kompozitlerinde (Şekil 4.38) ise depo modülündeki düşüşün, atık tane boyutundaki artış ile sistematik bir şekilde gerçekleşmekle birlikte, atık tane boyutu ile orantılı olmadığı, atık tane boyutunun büyümesi ile depo modülündeki kaybın azaldığı görülmektedir. Bu durum, atığın tane büyüklüğünün artmasıyla, kompozit içindeki atık miktarının artışı kaynaklı olumsuz değişimlerin bir miktar kompanse edildiğini işaret etmektedir ve ilginç bir bulgu olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 4.39 - 4.41'de depo modülündeki değişim, tane boyutlarına göre gruplandırılarak farklı bir yolla raporlanmıştır.

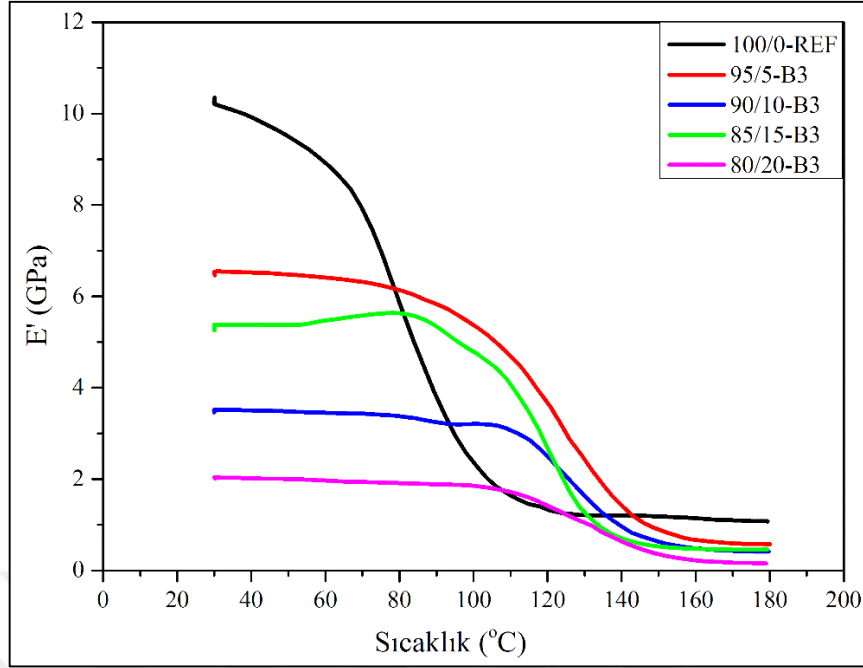


Şekil 4.39. B1 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi



Şekil 4.40. B2 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi

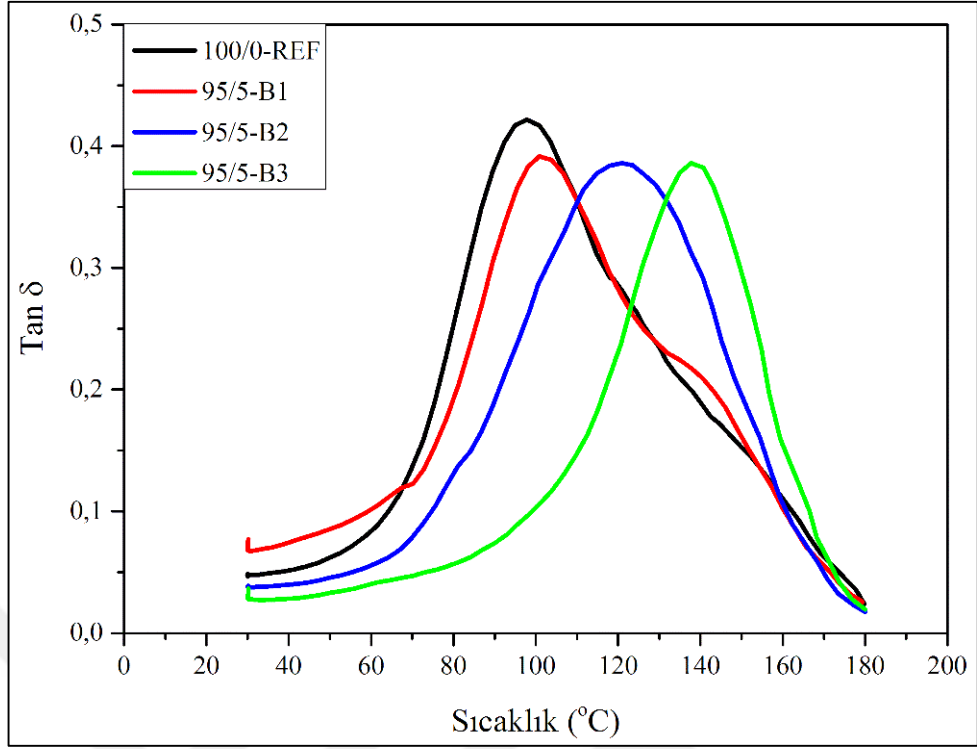




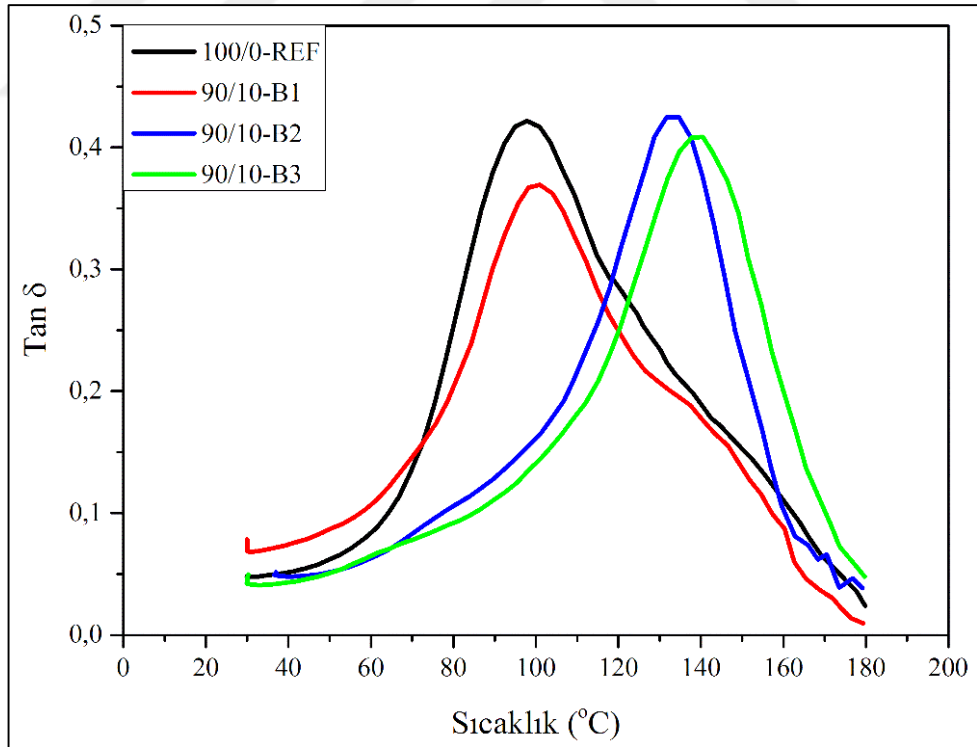
Şekil 4.41. B3 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi

Buradan da, hem tane boyutundaki hem de atık miktarındaki artışın dinamik-mekanik özellikler üzerindeki etkisinin sistematik olmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, yüksek oranda atık kullanımında modüllerdeki düşüşün daha yüksek sıcaklıklara taşındığı görülmüştür. Yüksek oranlarda atık kullanımında bu durum daha da belirgindir. Benzer bir şekilde, tane boyutundaki artış ile de modüldeki düşüşler daha yüksek sıcaklıklara taşınmıştır. Bu bulgunun aydınlatılabilmesi için aynı kompozitler için sıcaklığa bağlı olarak  $\tan \delta$  değerlerinin değişimi çizilmiş, Şekil 4.42 - 4.45'te atık ilavesinin, Şekil 4.46 - 4.48'de ise atık tane boyutunun kompozitlerin  $\tan \delta$  üzerine etkisi verilmiştir.

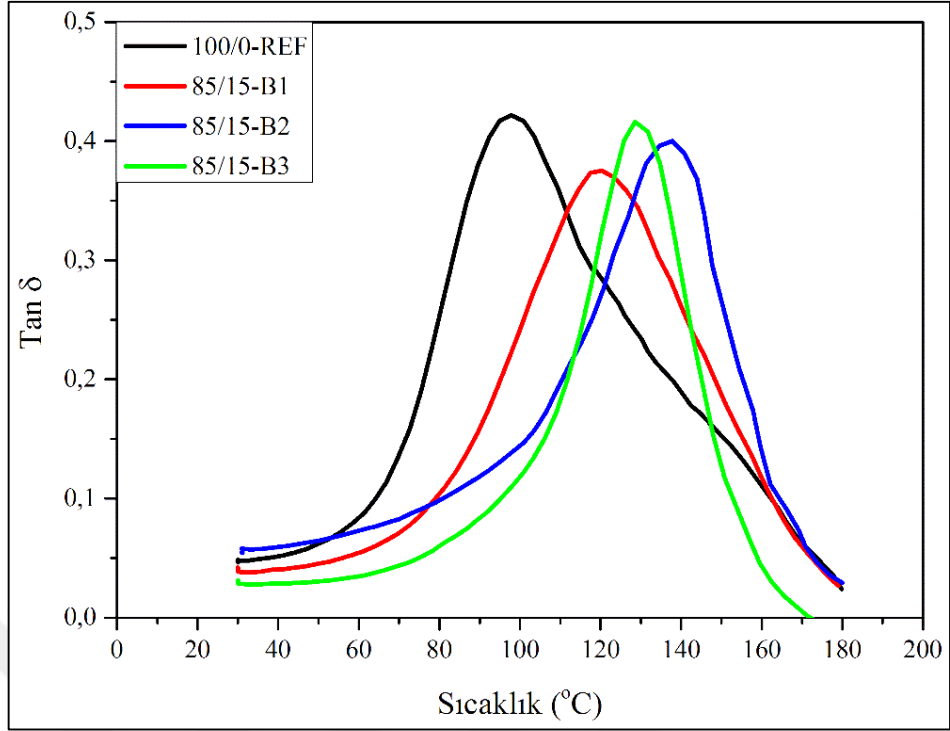
Sıcaklık taraması ile elde edilen  $\tan \delta$  profilleri, camsı geçiş sıcaklığındaki değişimi ve atık-matris arayüzey etkileşimini değerlendirmek için kullanılabilir. Şekiller incelendiğinde, hem kullanılan atık miktarının artışı ile hem de tane boyutunun artışı ile kompozit örneklerin  $T_g$  değerlerinin daha yüksek değerlere kaydığı ve  $\tan \delta$  pik yüksekliklerinde belirgin artış olduğu görülmektedir. Camsı geçiş süreci tamamen polimerik fazla ilgili olduğu için  $\tan \delta$  verileri, kompozitlerin içerdiği elyaftan bağımsız olarak değerlendirilebilir.



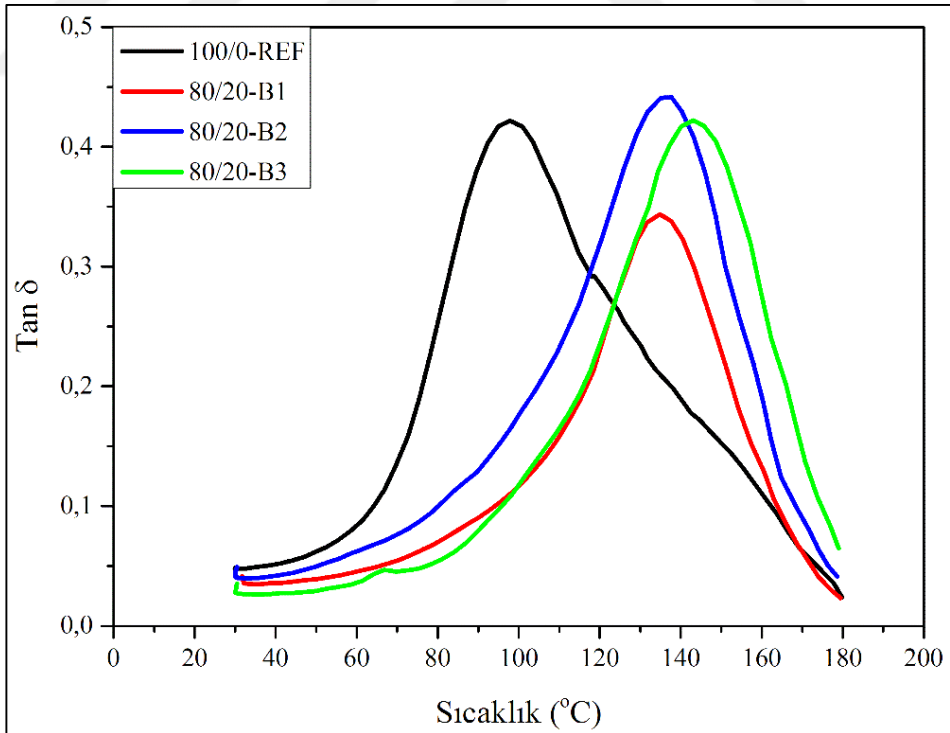
Şekil 4.42. %5 oranında atık ilavesinin kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



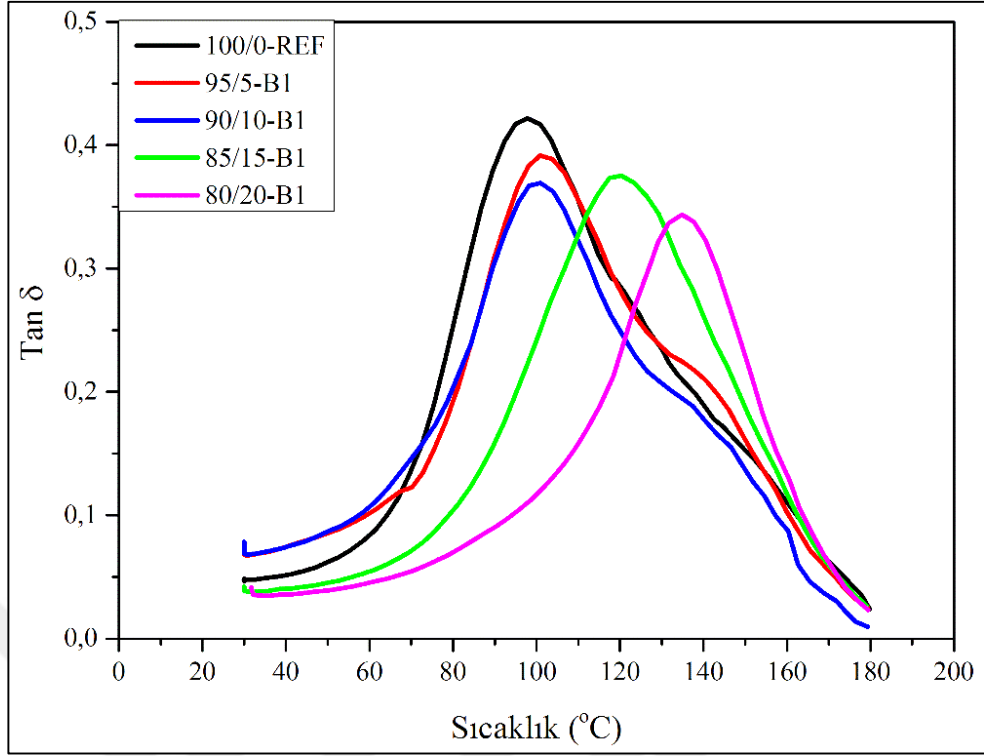
Şekil 4.43. %10 oranında atık ilavesinin kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



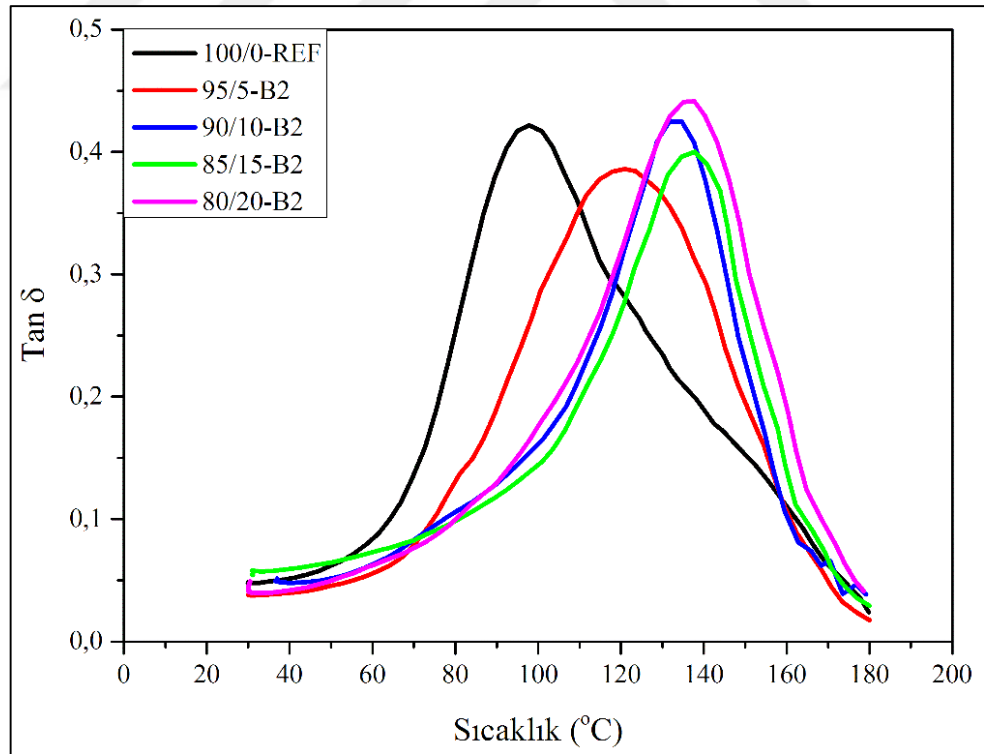
Şekil 4.44. %15 oranında atık ilavesinin kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



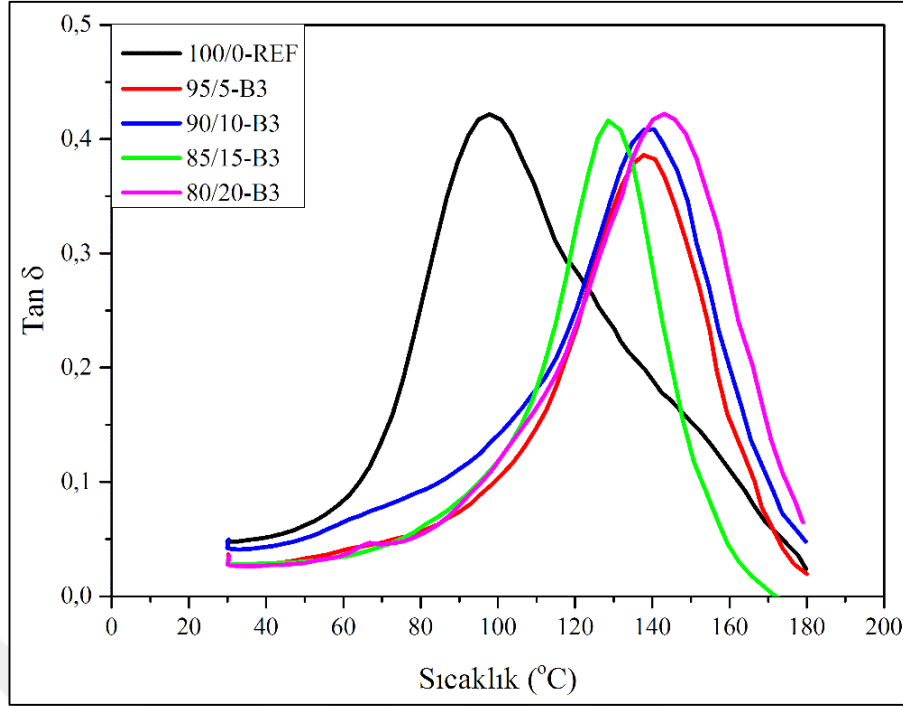
Şekil 4.45. %20 oranında atık ilavesinin kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



Şekil 4.46. B1 boyutlu atığın kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



Şekil 4.47. B2 boyutlu atığın kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



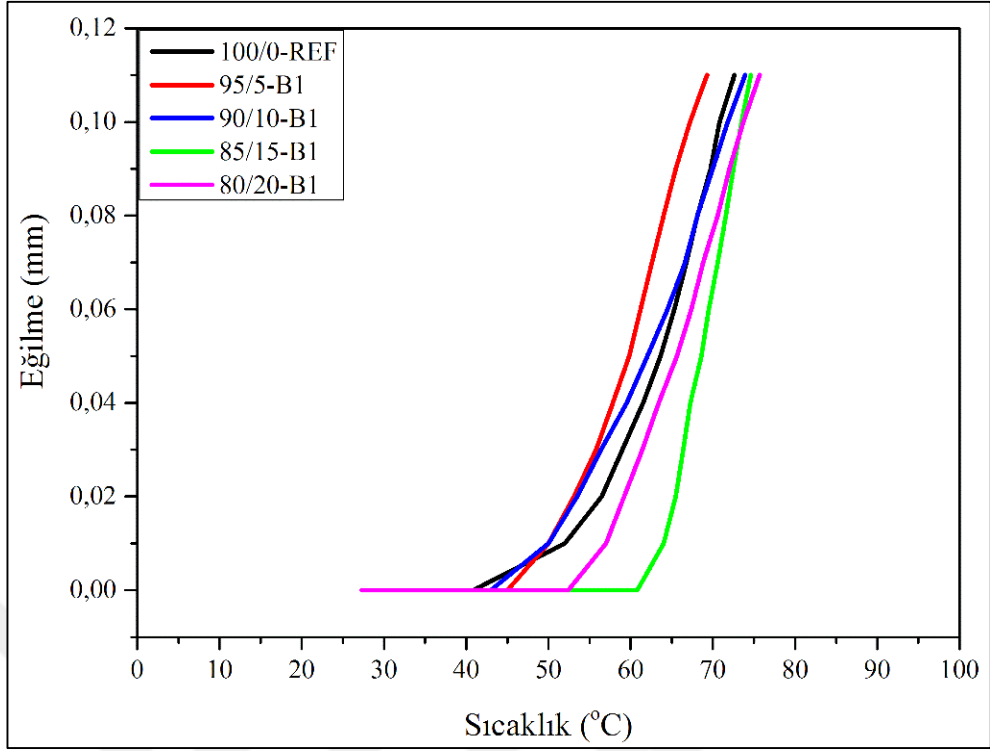
Şekil 4.48. B3 boyutlu atığın kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi

Kompozite ilave edilmeden önce çaprazbağlı olarak bulunan atık tanecikleri, zincir hareketliliğini kısıtlayarak camsı geçiş sıcaklığını 50 °C'ye kadar arttırmıştır. Bununla birlikte bu bulgu, çekme, eğme, kısa kiriş ve basma dayanımı değerlerinin normalize edildiği durumda çok daha az mukavemet kaybı gözlenmesi ya da hiç gözlenmemesi bulgusu ile de örtüşmektedir.  $T_g$  değerlerindeki artış aynı zamanda atık ilavesi ile kompozitlerin daha yüksek sıcaklıklara kadar çıkıldığında da kullanılacak modül değerlerine sahip olabileceklerini ifade etmektedir.

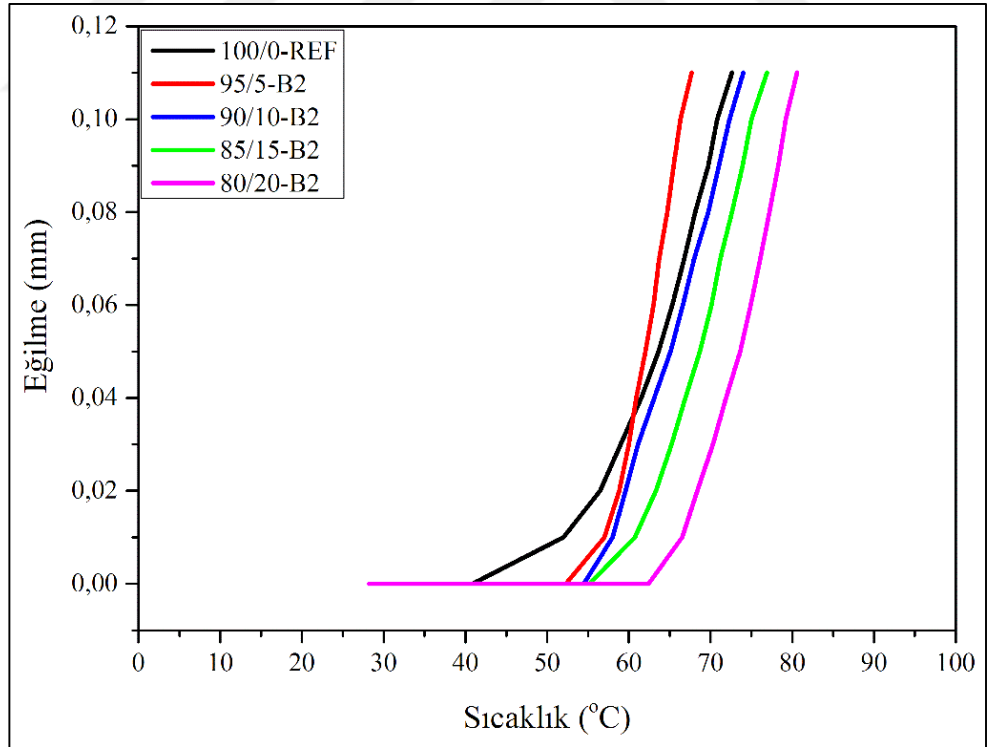
Tane boyutu etkisinin anlaşılması için Şekil 4.46 - 4.48 incelendiğinde, daha büyük tane boyutu kullanımında  $T_g$  değerindeki kaymanın çok daha belirgin olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle, daha büyük tane boyutları polimerin zincir hareketliliğini küçük taneli atığa kıyasla daha fazla kısıtlamaktadır. Bu sonuçlar, üç nokta eğme dayanımının tane boyutu ile artışını destekler niteliktedir.

#### 4.1.6. Yük altında eğilme sıcaklığı (HDT)

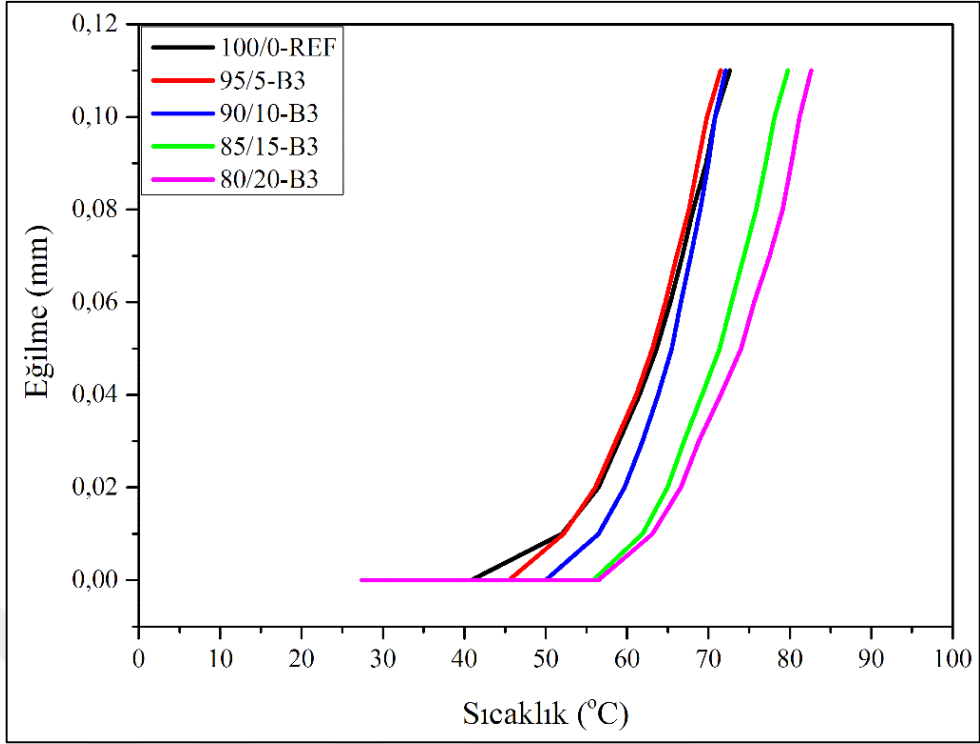
Atık oranının ve tane boyutunun kompozit malzemenin yük altında eğilme sıcaklığına etkisini incelemek amacı ile örneklere HDT testi yapılmış ve sonuçlar tane boyutuna göre gruplandırılarak Şekil 4.49 - 4.51'de verilmiştir.



Şekil 4.49. B1 boyutunda atık kullanılan kompozitlerin HDT eğrileri



Şekil 4.50. B2 boyutunda atık kullanılan kompozitlerin HDT eğrileri

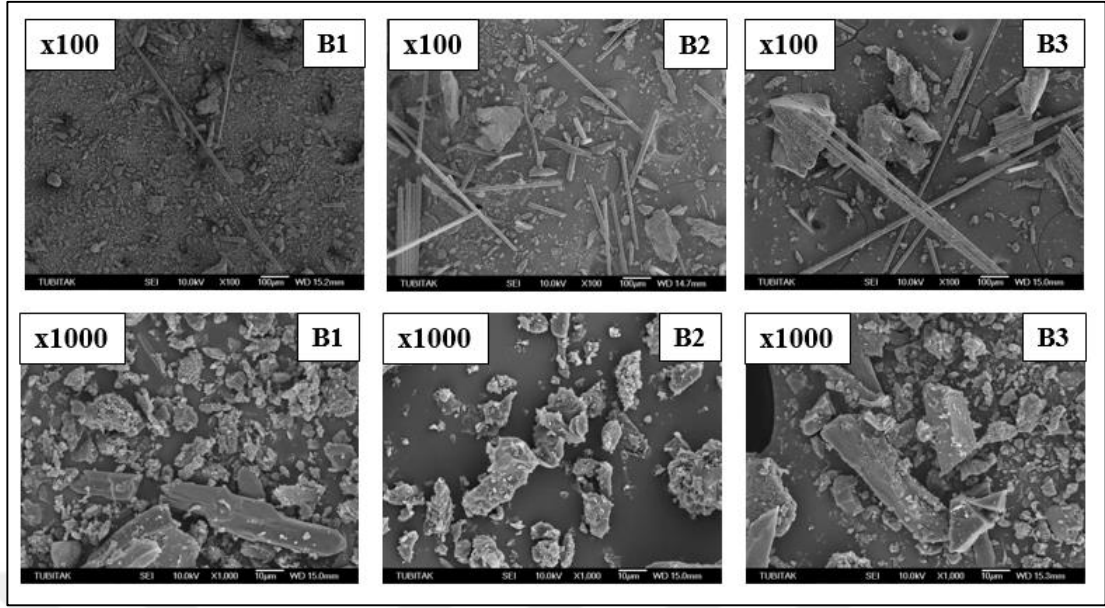


Şekil 4.51. B3 boyutunda atık kullanılan kompozitlerin HDT eğrileri

DMA analizinde elde edilen verileri destekler şekilde HDT testinde de atığın kompozit örneklerinin ısıl dayanımını geliştirdiği görülmektedir. Atık miktarının ve atık tane boyutunun artışı ile kompozitlerin yük altında eğilme sıcaklığının arttığı, atık ilavesi ile ilk yumuşama sıcaklıklarının da daha ileri sıcaklıklara kaydığı görülmektedir. Bu da yine atığın moleküler hareketliliği kısıtlayarak servis sıcaklıklarını geliştirdiğini ifade eden bir bulgudur.

#### 4.1.7. Morfolojik analiz

Deneysel çalışmada kullanılan 3 farklı boyuttaki atığın x100 ve x1000 büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri Şekil 4.52'de verilmiştir. Şekil 4.52, şekil ve boyut itibari ile düzensiz bir yapıda olan atık CTP'nin mikro yapısını göstermektedir. Çubuk formundaki partiküller farklı uzunluklardaki cam elyafları, diğer bölgeler ise polimerik matrisi temsil etmektedir. x100 büyütülmüş görüntülerden matris ve elyafların yer yer birbirinden ayrılmış olduğu görülmektedir.

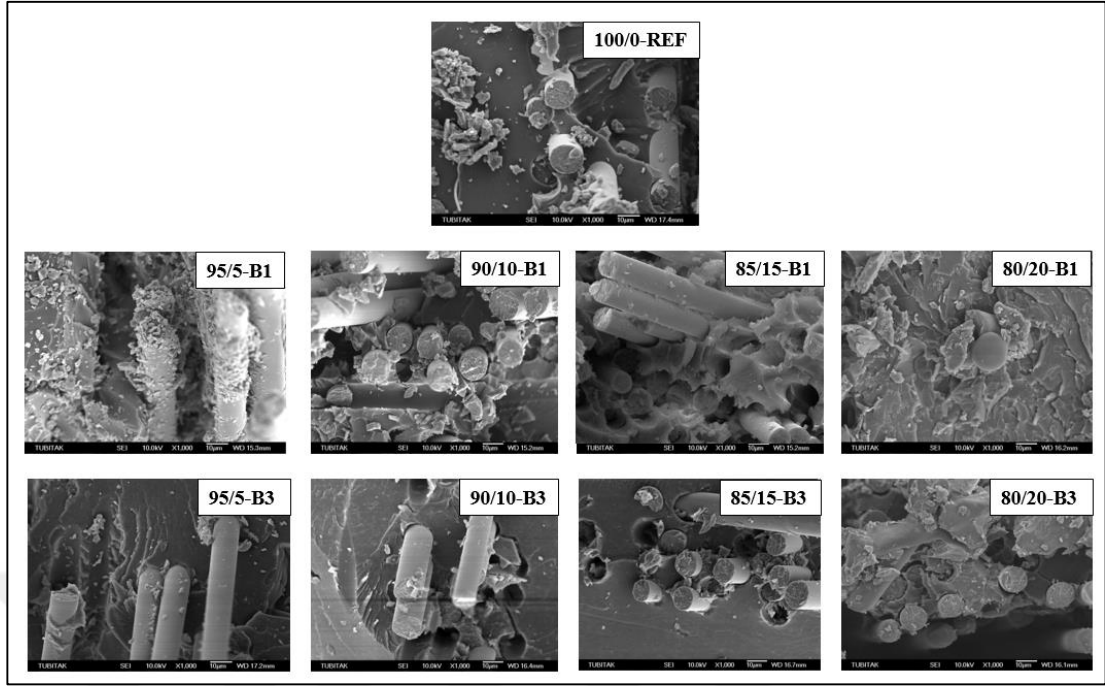


Şekil 4.52. B1, B2 ve B3 boyutlu atığın x100 ve x1000 büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri

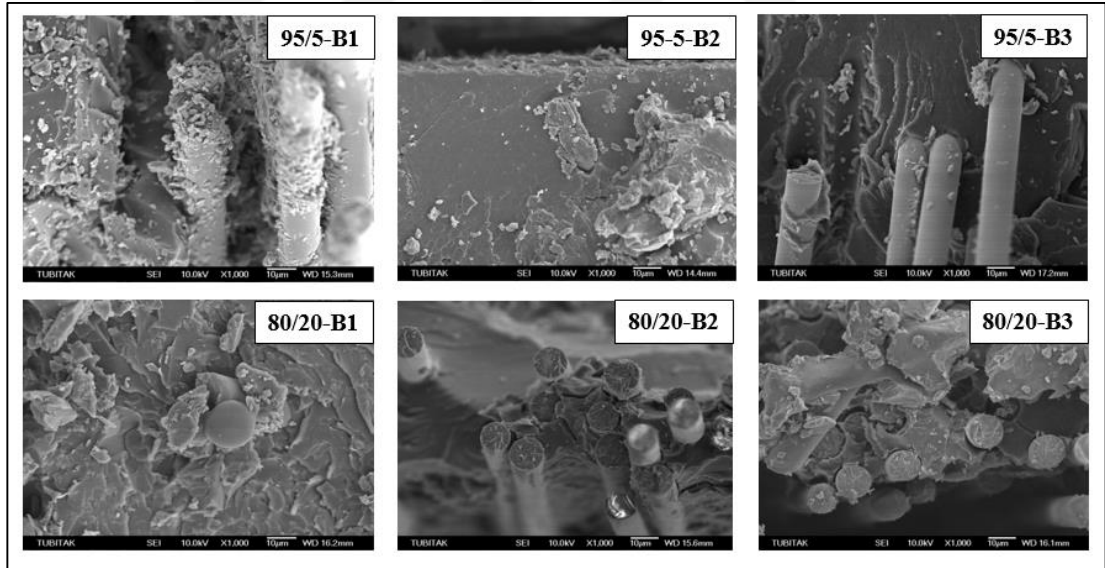
Kompozit örneklerin morfolojik analizi için örneklerin çekme testi sonucunda oluşan kırılma yüzeylerinden faydalanılmış, elektron mikroskobu kullanılarak elde edilen x1000 görüntüleri Şekil 4.53 ve 4.54’te verilmiştir. Şekil 4.53’te kompozit içerisinde bulunan atık oranının matris-elyaf etkileşimi üzerindeki etkisi, en küçük ve en büyük tane boyutu için tüm atık oranlarında elde edilen görüntülerden aydınlatılmaya çalışılmıştır. Şekil 4.54’te ise en düşük ve en yüksek atık oranı için tüm tane boyutlarına ait görüntülerden atık tane boyutunun matris-elyaf etkileşimi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Şekil 4.53 ve 4.54 incelendiğinde, kompozit yapıda kullanılan cam kumaştan gelen ve atıktan gelen elyaflar ayırt edilememekle birlikte atık ilavesinin kompozitlerin matris-elyaf etkileşimini kötü etkilediğine dair bir bulguya rastlanmamıştır. Ayrıca, genel itibari ile elyafların çaprazbağlanmış reçine ile çevrelenmiş olduğu ve cam elyaflar üzerinde polimerik matristen geldiği anlaşılan partiküllerinin olduğu görülmektedir. Bu görüntü, elyaf-matris arayüzeyindeki yapışmanın iyi olduğunun bir göstergesidir (Jin ve Park, 2001; Shokoohi ve Azar, 2009). Bu bulgu da artan  $T_g$  değerleri ile örtüşmekte ve özellikle daha büyük tane boyutları kullanıldığı durumda sınırlı zincir hareketliliğini açıklamaktadır.





Şekil 4.53. Atık oranının matris-elyaf etkileşimine etkisi

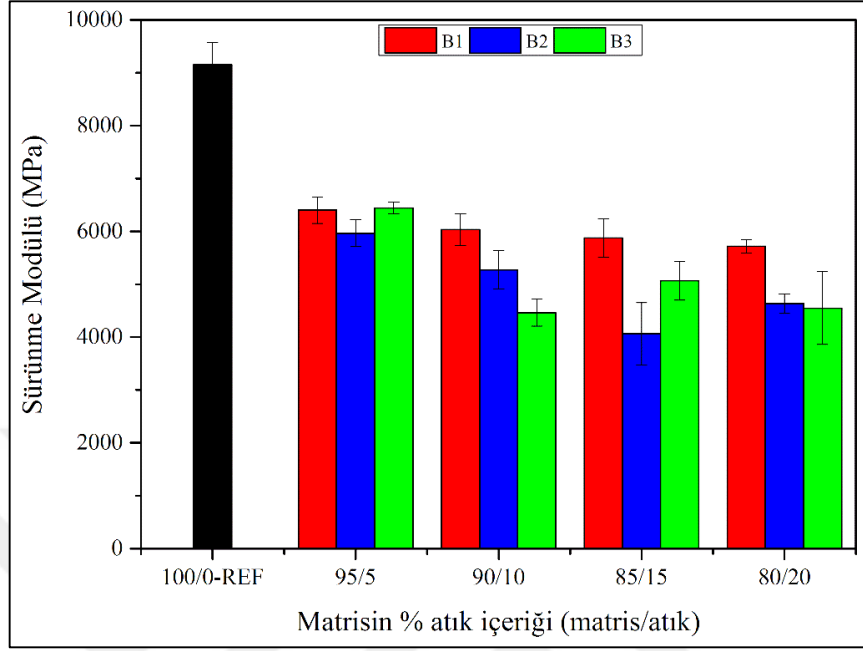


Şekil 4.54. Atık tane boyutunun matris-elyaf etkileşimine etkisi

#### 4.1.8. Sürüme testi

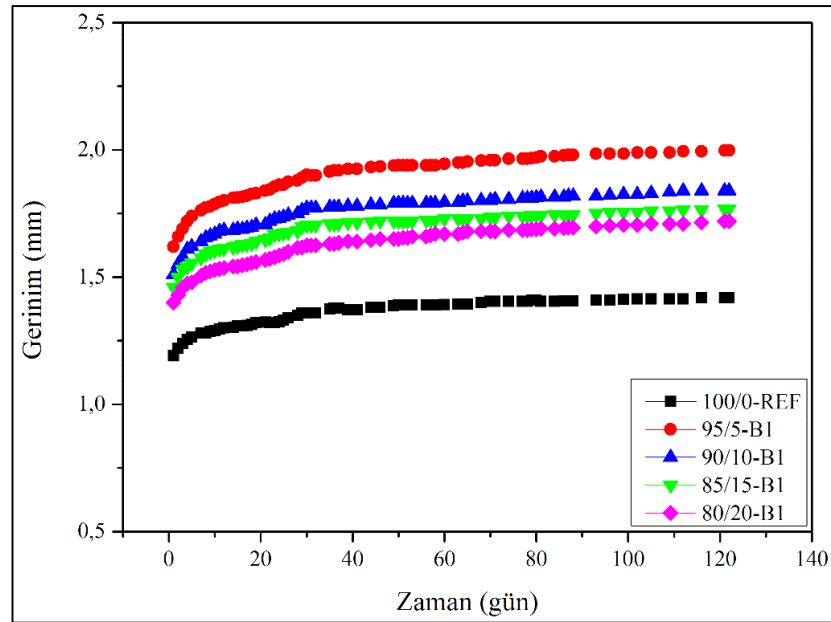
Kompozit örneklerin sürünme modülü ( $E_c$ ) değerleri Şekil 4.55'te verilmiştir. Sürünme modülü, örneklere ağırlık yüklenmesinden 1 saat ve 24 saat sonrasında TS EN ISO 899'a göre ölçülen eğilme miktarları kullanılarak hesaplanmıştır. Sürünme testi sonuçları incelendiğinde, daha önce mekanik testlerde elde edilen sonuçlara

benzer şekilde, tane boyutu ve atık miktarının artışı ile  $E_c$  değerlerinde düşüş gözlenmiştir.

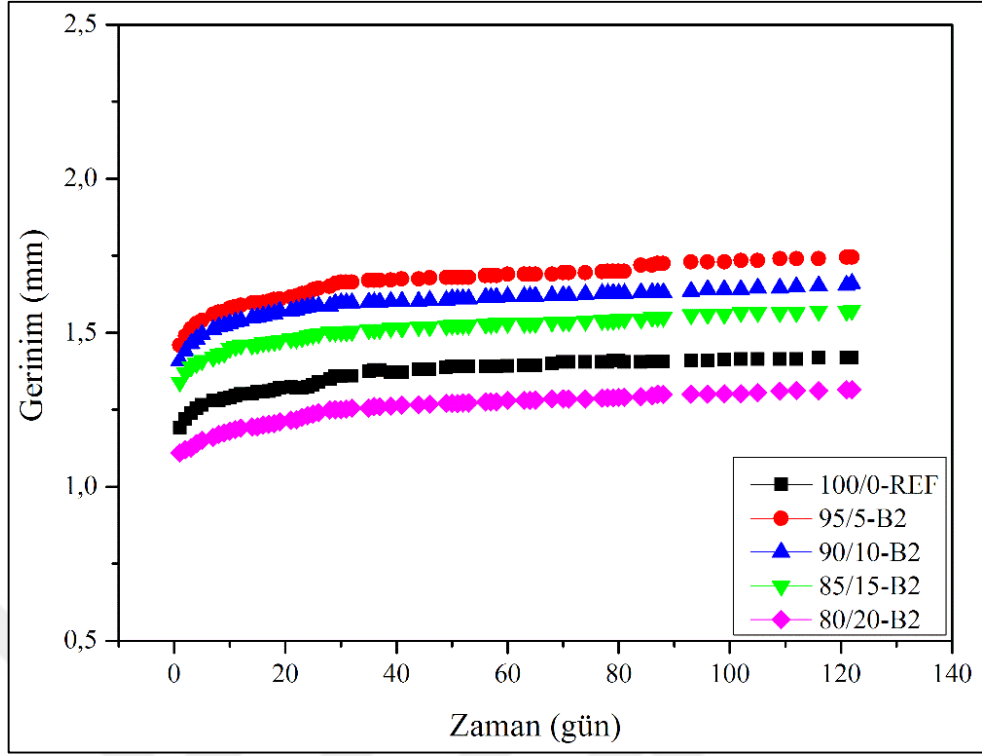


Şekil 4.55. Kompozitlerin sürünme modülü

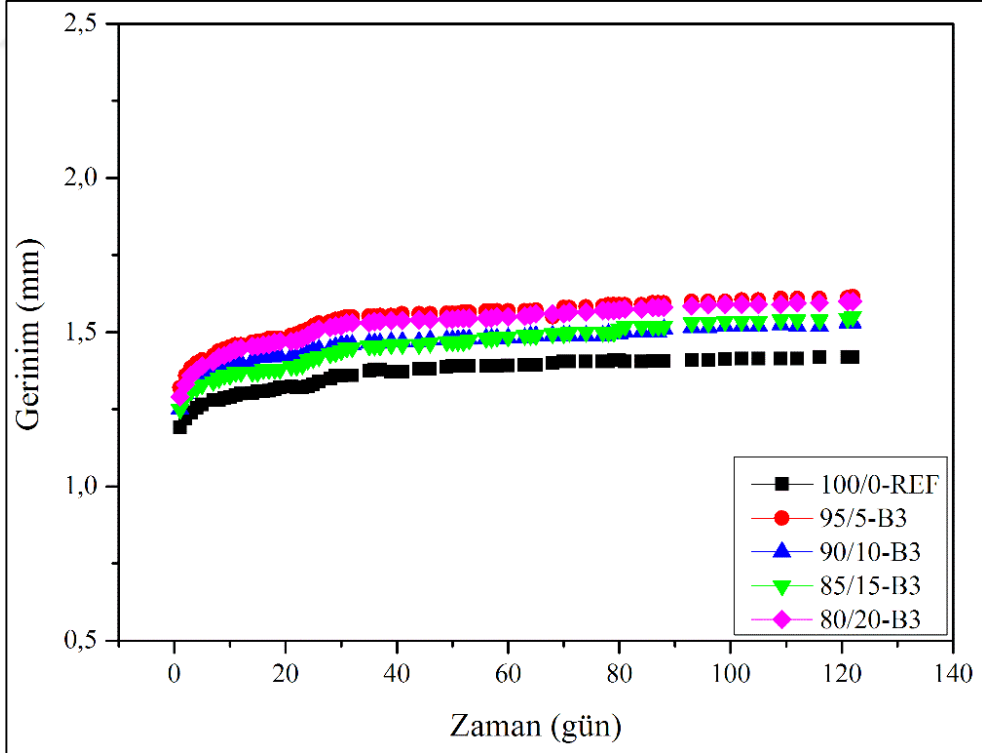
Kompozit örneklerin uzun vadedeki sürünme davranışlarını incelemek amacı ile teste devam edilmiş ve 120 günlük test sonuçları gerinim-zaman grafikleri şeklinde Şekil 4.56 - 4.62'de verilmiştir.



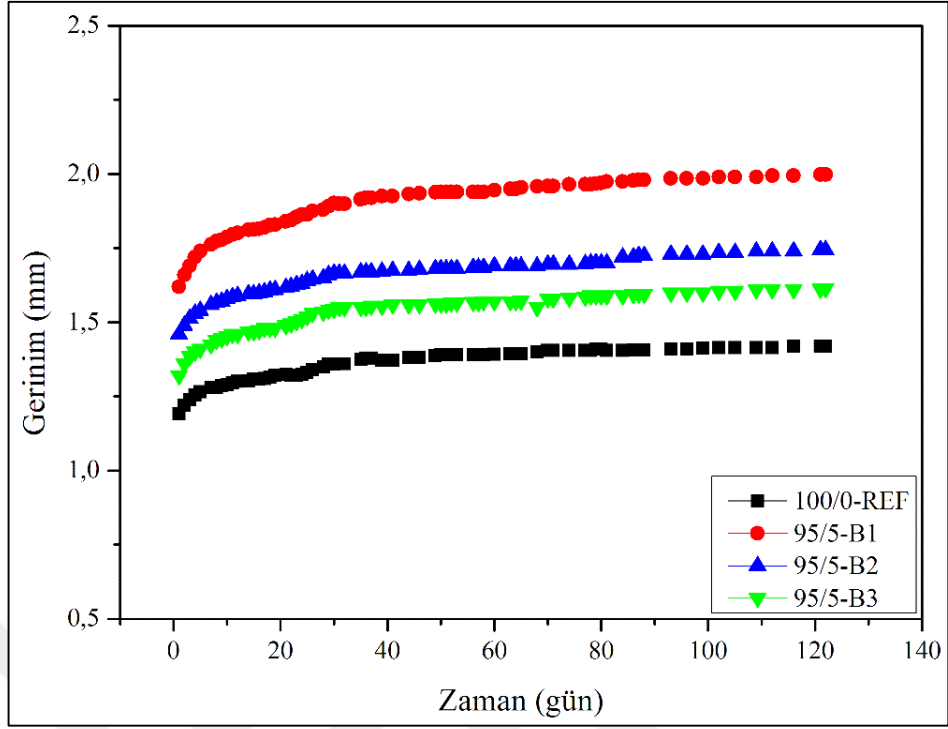
Şekil 4.56. B1 boyutunda atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı



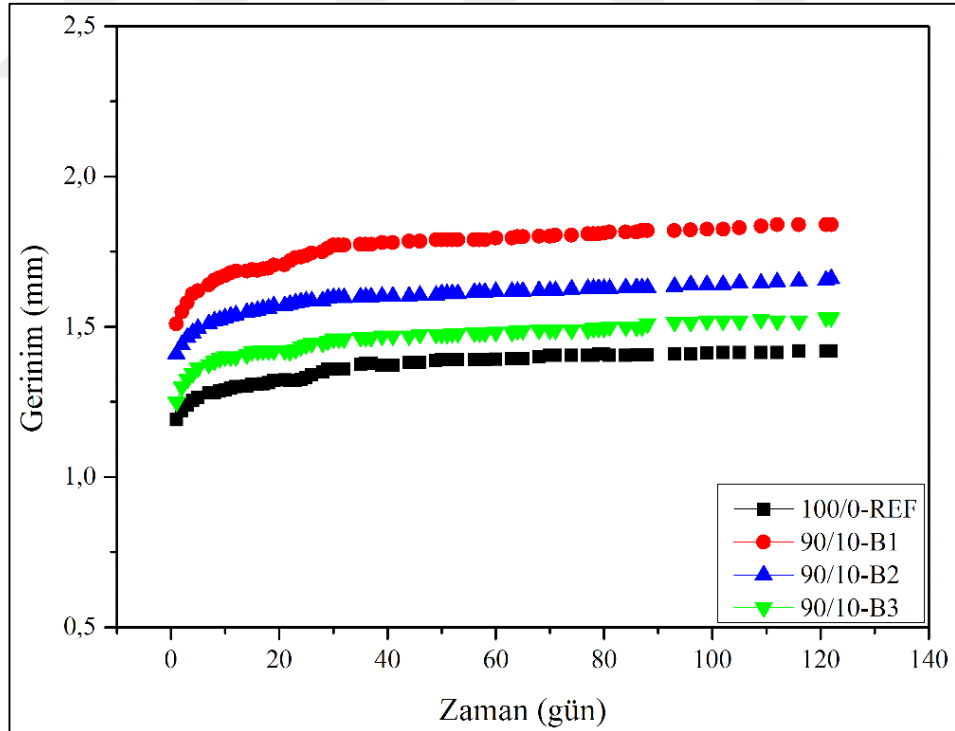
Şekil 4.57. B2 boyutunda atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı



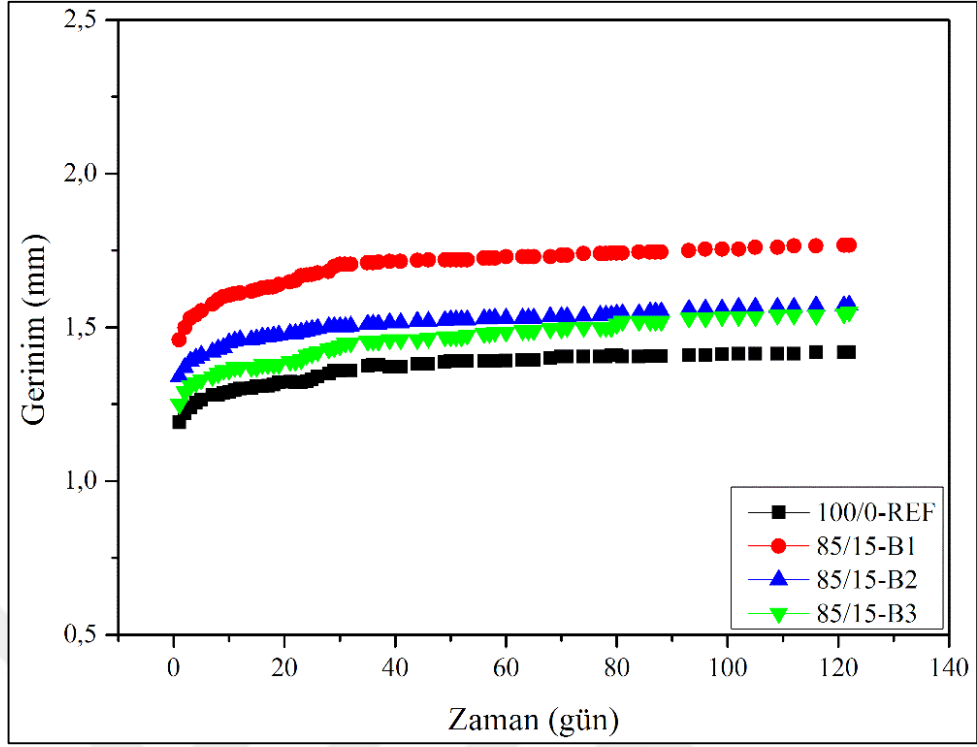
Şekil 4.58. B3 boyutunda atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı



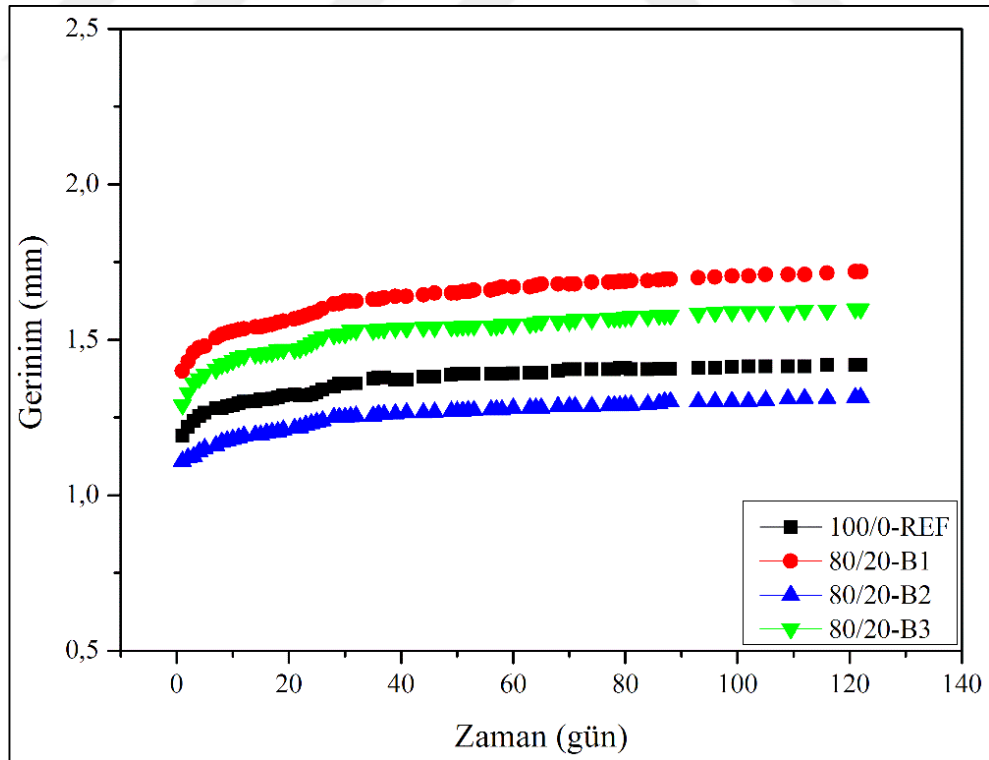
Şekil 4.59. %5 oranında atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı



Şekil 4.60. %10 oranında atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı



Şekil 4.61. %15 oranında atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı



Şekil 4.62. %20 oranında atık kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı

Kompozit örneklerin uzun vadedeki sürünme davranışları incelendiğinde, kullanılan atık miktarının artışı ile birlikte sürüne miktarının azaldığı görülmüştür. Bu durum, atık ilavesi ile eğilme rijitliğinin artması şeklinde açıklanabilir (Aruniit ve diğ., 2011). Atık ilavesi ile elde edilen yüksek eğme modülü değerleri (Şekil 4.66 - 4.68) bu sonucu desteklemektedir. Sonuçlar farklı atık tane boyutları açısından değerlendirildiğinde ise, tane boyutunun artışı ile bir miktar iyileşme olduğu ve en iri tane boyutunda (B3) en ince tane boyutuna benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu durumun iri atık durumunda iri tanelerin çevresinde kalan boşluklar (zayıf noktalar) sebebi ile kompozitin zayıfladığını işaret etmektedir. Kompozit örneklerin 120 gün sonundaki sürünme miktarları Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Kompozit örneklerin 120 gün sonundaki sürünme miktarları

<b>Örnek</b>	<b>Gerinim (mm)</b>
100/0-REF	0,23
95/5-B1	0,378
90/10-B1	0,33
85/15-B1	0,308
80/20-B1	0,32
95/5-B2	0,285
90/10-B2	0,25
85/15-B2	0,232
80/20-B2	0,205
95/5-B3	0,295
90/10-B3	0,28
85/15-B3	0,3
80/20-B3	0,31

## **4.2. Atık-Matris Arayüzey Etkileşimini İyileştirmek İçin Kimyasal Modifikasyon Yapıldığı Durumda Kompozitlerin Karakterizasyonu**

Bu bölümde, atığın yeni üretilen kompozitlerde kullanımı durumunda mekanik özelliklerdeki kaybı minimuma indirmek amacı ile atık-matris arayüzey etkileşiminin silanlama yoluyla geliştirilmesi hedeflenmiştir. Uygun silan tipinin ve oranının belirlenebilmesi için gerçekleştirilen testler ve ardından en olumlu sonuçların elde edildiği silan bağlayıcı kullanılarak üretilmiş kompozit örneklerin analizi bu bölümde değerlendirilmiştir.

### **4.2.1. Silan tipinin seçimi**

Yapılan literatür araştırmasında, doymamış polyesterin takviye veya dolgu maddeleri ile arayüzey etkileşimini arttırmak için ya da atık CTP'nin matris ile yapışmasını iyileştirmek için genellikle metakrilat, amino ve vinil fonksiyonlu reaktif grup bulduran silanlar ile çalışıldığı görülmüştür. (Huang ve diğ., 2018; Park ve Jin, 2001; Romanzini ve diğ., 2015a; Romanzini ve diğ., 2015b; Lee ve diğ., 2002; Gharbi ve diğ., 2014). Bu çalışmada da atık, elyaf ve matris fazlarının kimyasal etkileşimin geliştirilmesi için AMMO, MEMO ve VTMO olmak üzere üç farklı silan bağlayıcı ve bu katkıların çeşitli yükleme oranları değerlendirilmiştir. Kullanılan silan bağlayıcıların özellikleri ve kimyasal yapıları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Uygun silan tipinin ve oranının belirlenebilmesi için elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde denenmesi (taze elyaf kullanılmadan) yerine öncelikle atık içeren polyester reçine örnekleri test edilmiştir. Bu amaçla, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan doymamış polyester reçine ile hazırlanan ve atık içeren örneklere çekme, üç nokta eğme ve darbe testleri uygulanmıştır.

AMMO, VTMO ve MEMO olmak üzere üç farklı silan bağlayıcı oranı, kullanılan atık miktarının %1'i olacak şekilde sabit tutulmuş ve polyester içerisine atık ilavesinden sonra belirtilen oranda katılarak karıştırılmıştır. Testlerde genel itibari ile en olumlu bulguların MEMO varlığında elde edildiğinden, MEMO yüklemesi ayrıca polyesterin %1'i kadar olacak şekilde reçine örnekleri hazırlanmış ve aynı test adımları bu grup için de gerçekleştirilmiştir. Bu bölümdeki örnekler, MEMO'nun atığın %1'i kadar

kullanıldığı durumda “MEMO(a)”, polyesterin %1’i kadar kullanıldığı durumda ise “MEMO(p)” şeklinde adlandırılmıştır.

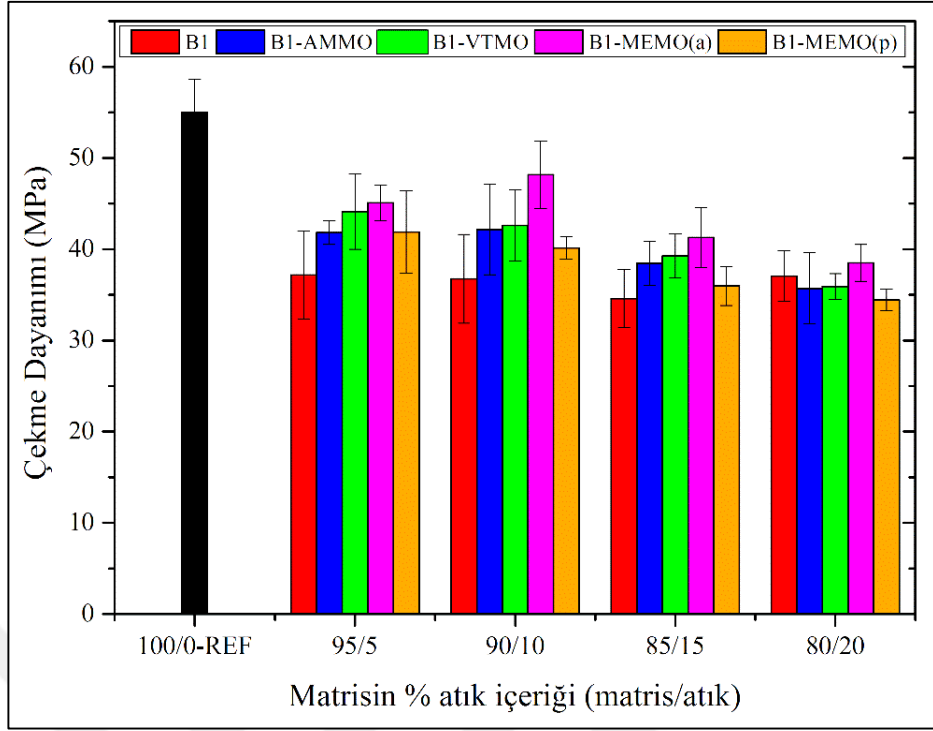
#### **4.2.1.1. Çekme testi**

Farklı silan tipi (AMMO, VTMO, MEMO) ve oranlarının atık içeren polyesterin çekme dayanımına etkilerini incelemek amacı ile yapılan çekme testi sonuçları Şekil 4.63 - 4.65’te verilmiştir.

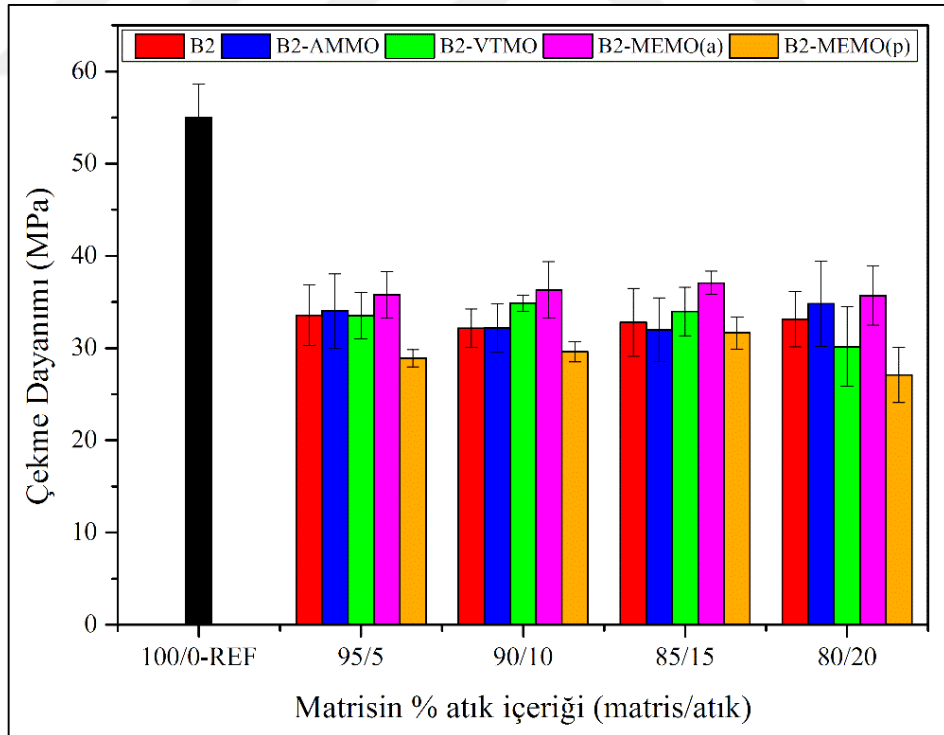
Sek polyestere atık ilave edildiği durumda hem artan tane boyutu hem de artan atık oranına bağlı olarak, sistematik bir değişim yakalanamamakla birlikte, çekme dayanımı değerinin ortalama %36 oranında azaldığı görülmektedir. Silan bağlayıcılar kullanılarak hazırlanan örneklerin çekme testi sonuçları incelendiğinde ise, üç farklı silan bağlayıcı kullanıldığı durumda da kullanılmadığı duruma göre bir iyileşme kaydedilmiştir. Bununla birlikte, her üç tane boyutu için de, atık miktarı göz önüne alındığında en olumlu değişimin MEMO kullanıldığı ve silan bağlayıcı oranının atığa göre %1 olarak seçildiği durumda (MEMO(a)) elde edildiği anlaşılmaktadır. Çekme dayanımı değerlerinde silan bağlayıcının etkisi küçük tane boyutu kullanımında daha belirgindir. Bu koşullarda çekme dayanımındaki kayıp %15’e kadar düşmektedir. Daha büyük tane boyutlarında ise bu oran %25 civarında kalmaktadır. Bu durum, küçük tane boyutlarında silan bağlayıcının etkileşebileceği atık yüzey alanının artmasına ve dolayısı ile silan bağlayıcının etkinliğinin artmasına bağlanmaktadır.

Küçük tane boyutlu atık (B1) ile birlikte, polyester miktarının %1’i oranında MEMO ilavesi durumunda (MEMO(p)), hiç silan kullanılmadığı duruma yakın bir çekme dayanımı değeri elde edilmiş, atık tane boyutunun artmasıyla ise çekme dayanımı değerlerinin daha düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Artan silan bağlayıcı miktarı ile çekme dayanımında gözlenen iyileşmenin bir miktar azaldığı gözlenmiştir. Elde edilen bu bulgu aynı örneklerin eğme testlerinde de elde edilen benzer sonuçlar ile birlikte, bir sonraki bölümde daha detaylı olarak değerlendirilmiştir.

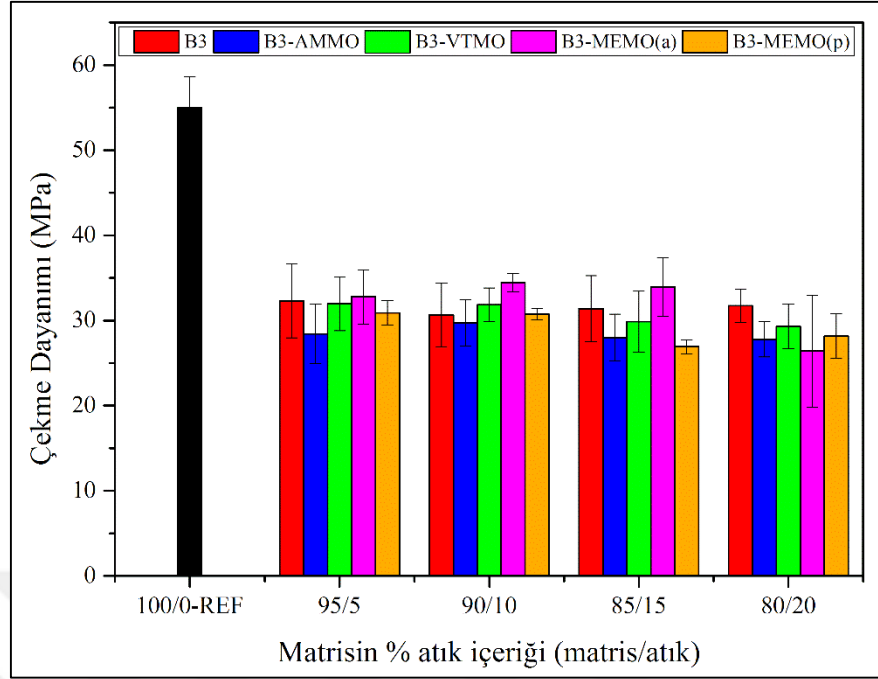




Şekil 4.63. B1 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen çekme dayanımları



Şekil 4.64. B2 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen çekme dayanımları



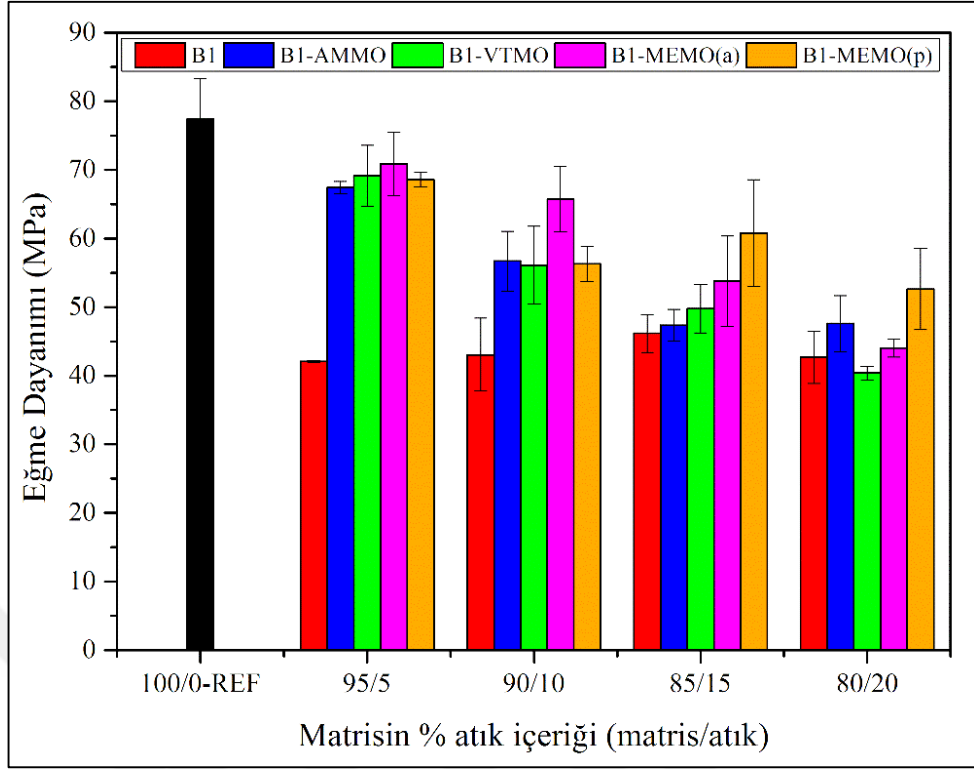
Şekil 4.65. B3 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen çekme dayanımları

#### 4.2.1.2. Eğme testi

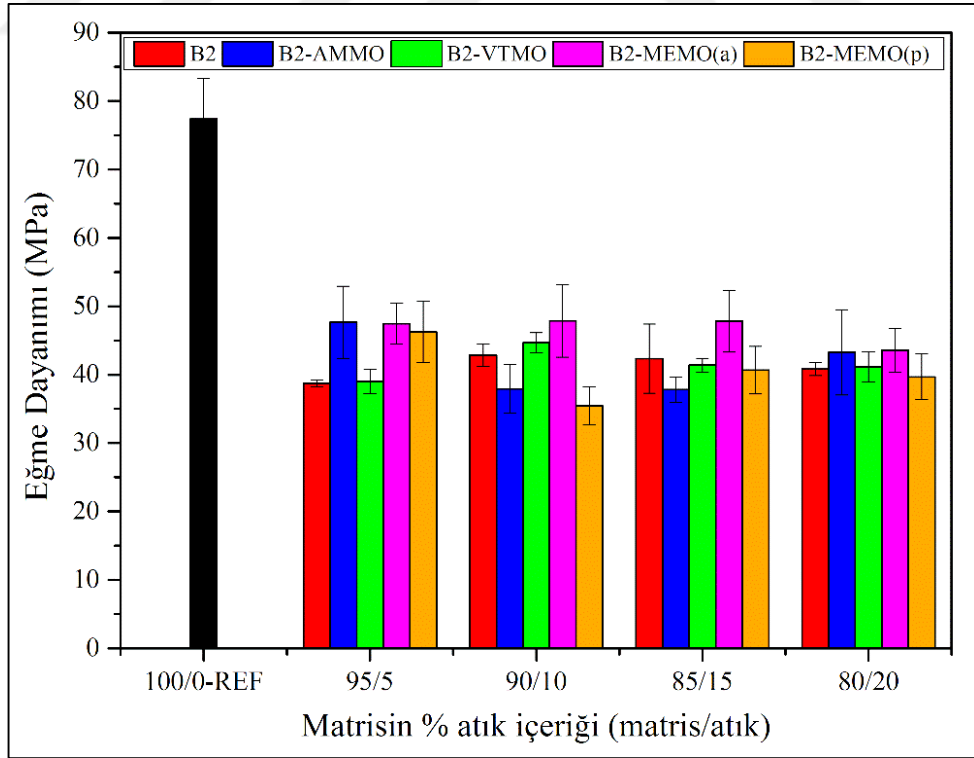
Farklı silan bağlayıcı tipi ve farklı yükleme oranlarının kullanıldığı durumlarda elde edilen eğme dayanımı değerleri Şekil 4.66 - 4.68'de ve eğme modülü değerleri Şekil 4.69 - 4.71'de verilmiştir.

Çekme testindeki sonuçlara benzer şekilde, sek polyestere atık ilave edildiği durumda atık tane boyutu ve atık oranı ile sistematik bir eğilim sergilememekle birlikte eğme dayanımı değeri ortalama %40 oranında düşmektedir. Örneklerin silan bağlayıcı ilave edilerek hazırlandığı durumda ise, özellikle küçük tane boyutu ve düşük miktarda atık kullanımı ile bu düşüşün %10'a kadar azaltılabildiği görülmektedir. Kullanılan atık tane boyutu büyüdükçe, silan ilavesiyle mekanik kayıpta bir miktar düşüş sağlansa da, bu düşüş küçük tane boyutundaki kadar etkin değildir.

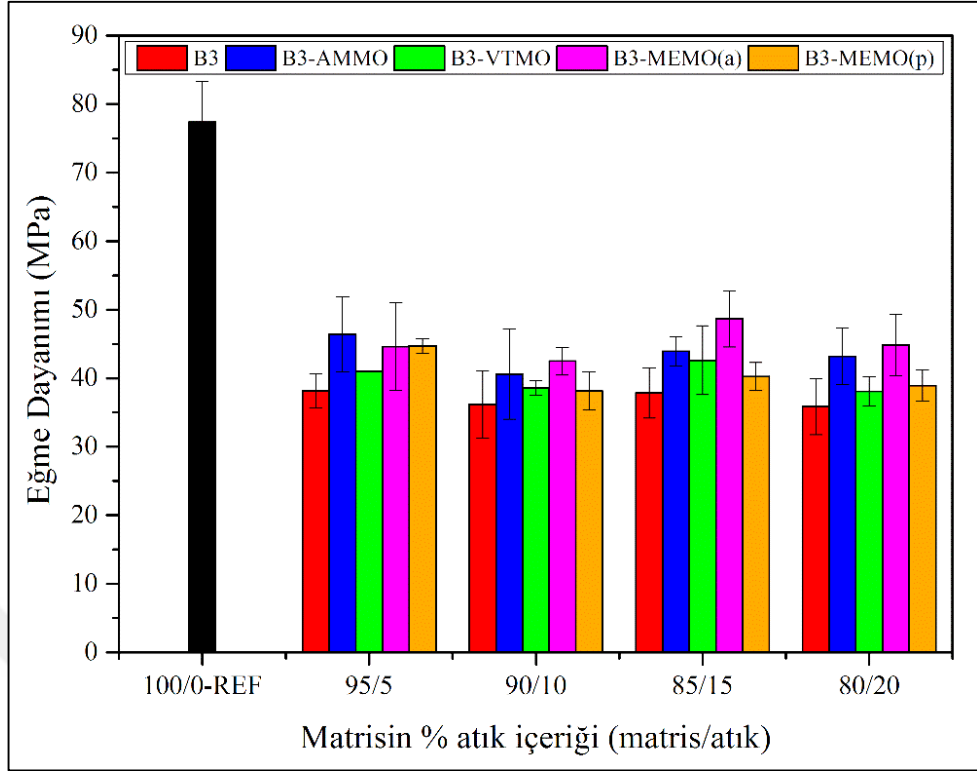
Eğme modülü değerleri incelendiğinde, sek polyestere eklenen atığın, takviye edici dolgu etkisi yaratarak, hem artan kullanım oranlarında, hem de tane büyüklüğündeki artış ile paralel olarak eğilme modülünü geliştirdiği görülmektedir. Bu gelişme ortalama %30 düzeyindedir.



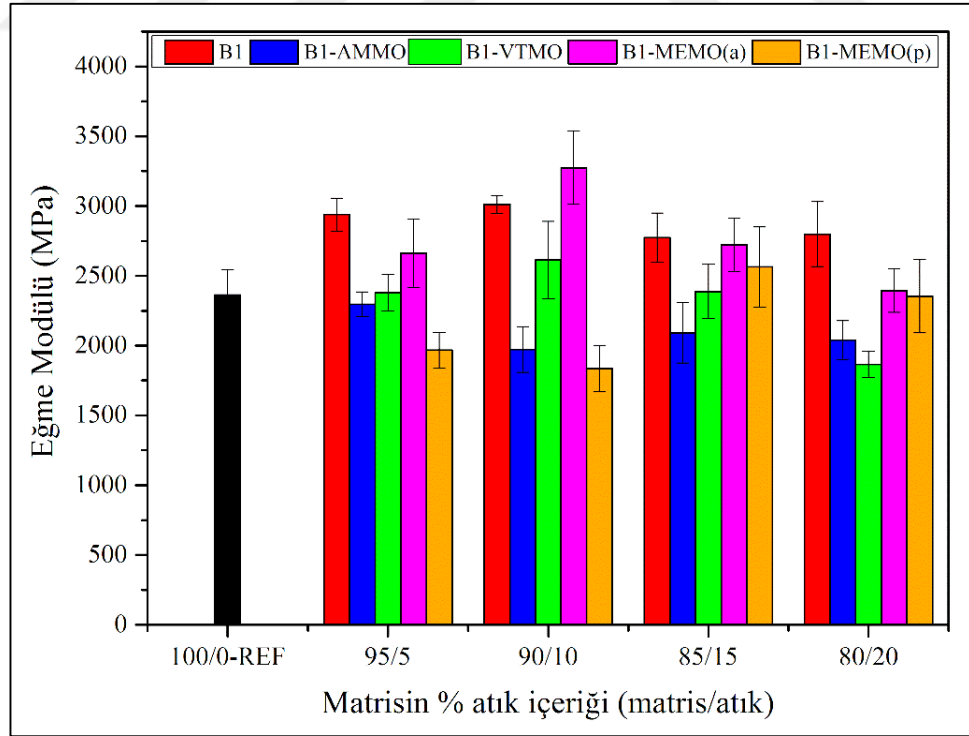
Şekil 4.66. B1 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme dayanımları



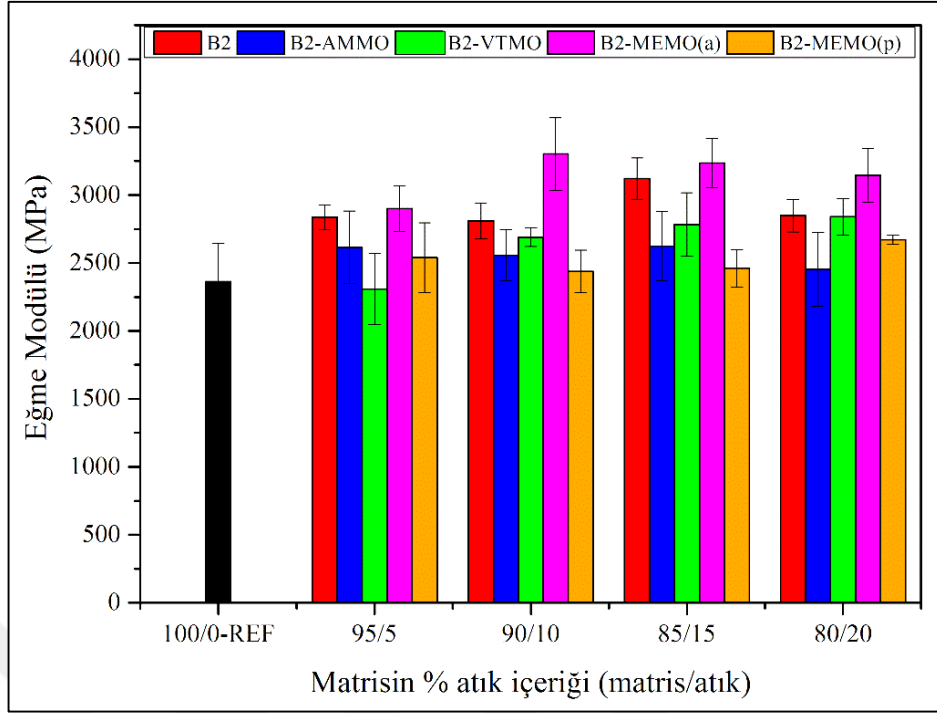
Şekil 4.67. B2 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme dayanımları



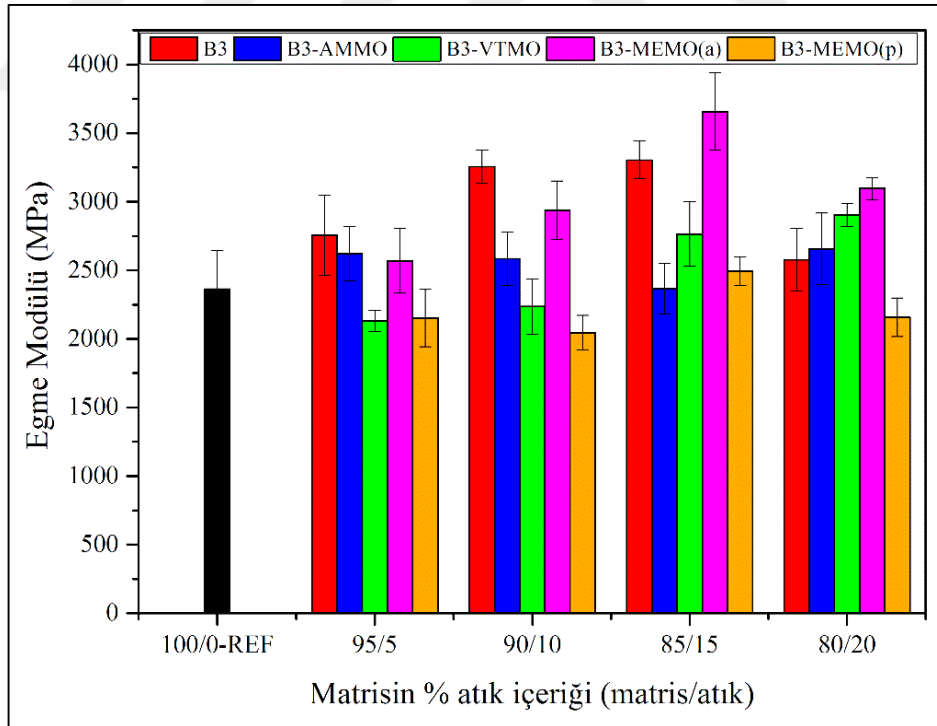
Şekil 4.68. B3 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme dayanımları



Şekil 4.69. B1 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme modülü



Şekil 4.70. B2 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme modülü



Şekil 4.71. B3 boyutlu atık ve farklı silan bağlayıcılar kullanıldığı durumda elde edilen eğme modülü

Malzeme rijitliğindeki artışın eğme modülünü iyileştirdiği bilinmektedir. Arunit ve diğerlerinin yaptığı bir çalışmada, doymamış polyester reçineye dolgu olarak

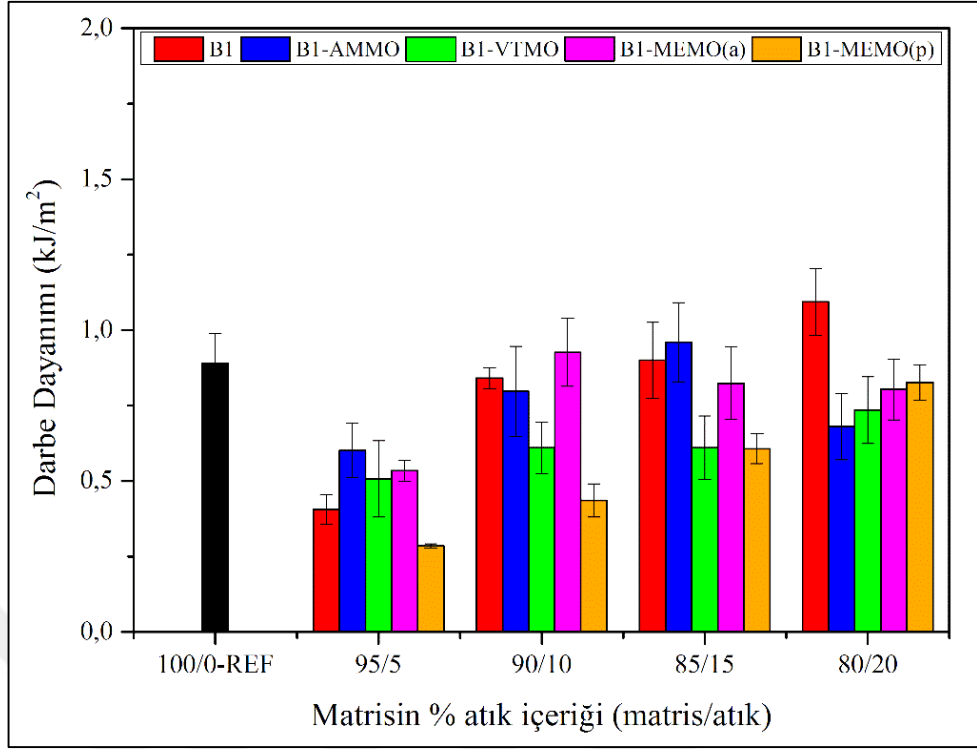
alüminyum trihidrat (ATH) eklenmiş ve artan dolgu oranı ile eğme dayanımının düşmesine rağmen malzemenin eğme modülü ve sertlik değerlerinde kayda değer bir artış elde edilmiştir. Eğme dayanımı seramik ve polimerler gibi kırılğan malzemeler için önemle üzerinde durulan bir özelliktir. Referans alınan çalışmada elde edilen sonuçlar için matris malzemesinin (polimerin) ağırlıkça azaltılarak yerine dolgu yüklenmesi ile elde edilen kompozitin elastik özelliklerinin azaldığı yönünde açıklama yapılmıştır. Artan modül değerleri ise dolgu miktarının artışı ile rijitliğin ve kırılğanlığın artışına bağlanmıştır (Aruniit ve diğ., 2011). Bu çalışmada da, atık CTP'nin doymamış polyester reçine içerisinde dolgu davranışı sergilediği ve aynı mekanizma ile eğme modülünü iyileştirdiği düşünülmektedir. Atık ilavesi ile reçinenin sertlik değerlerinde görülen iyileşme de bu sonucu destekler niteliktedir.

Silan kullanımı ile bu iyileşmede bir miktar azalma gözlenmiştir. Bu durum silan bağlayıcı varlığında kopmada uzama değerlerinin artışı ile açıklanabilir (Eng ve diğ., 2016; Zaharri ve diğ., 2013; Ansari ve İsmail, 2009). Literatürde bu durum, iyileştirilmiş matris/dolgu arayüzey yapışmasının, kompozitin daha fazla deforme olabilmesine izin vermesi ve dolayısı ile daha yüksek kopmada uzama değerlerinin görülmesi ile açıklanmıştır.

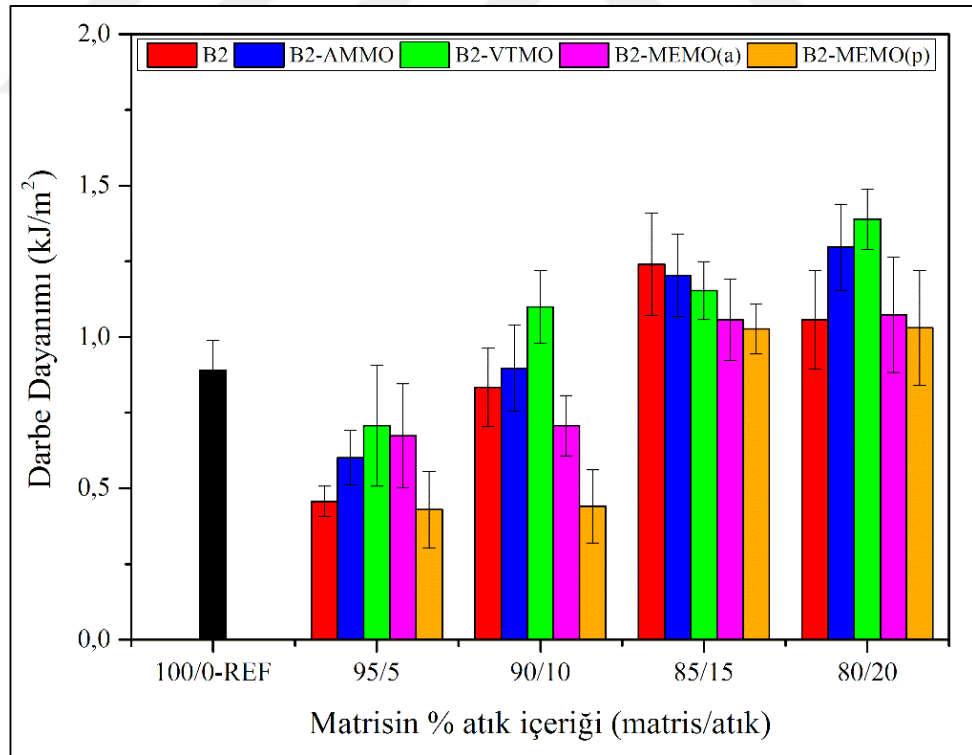
Eğme özelliklerinde de genel itibari ile en başarılı sonuçlar atık miktarı baz alınarak MEMO kullanıldığı durumda (MEMO(a)) elde edilmiştir. Doymamış polyestere atık ilavesi ile eğme modülü değerlerindeki kayda değer artış, MEMO ilavesi ile daha da belirgin seviyelere ulaşmıştır. Fakat polyester miktarı baz alınarak MEMO kullanıldığı durumda (MEMO(p)), yani oran artışına gidildiğinde ise çekme dayanımında olduğu gibi eğme modülü değerlerinin de düştüğü görülmektedir. Literatürde bu durum yapıya bağlanmayan artık silanın cam elyafı/dolgu üzerine absorbe olarak zayıf bir sınır tabakası oluşturmasına atfedilmektedir. Bu tabaka, kompozit bileşenlerinin arayüzeyinde yağlayıcı (lubricant) gibi davranır ve dolayısı ile yüksek silan bağlayıcı konsantrasyonlarında kompozitin mekanik arayüzey özellikleri zayıflayabilir (Jang ve diğ., 1996; Park ve Jin, 2001).

#### **4.2.1.3. Darbe testi**

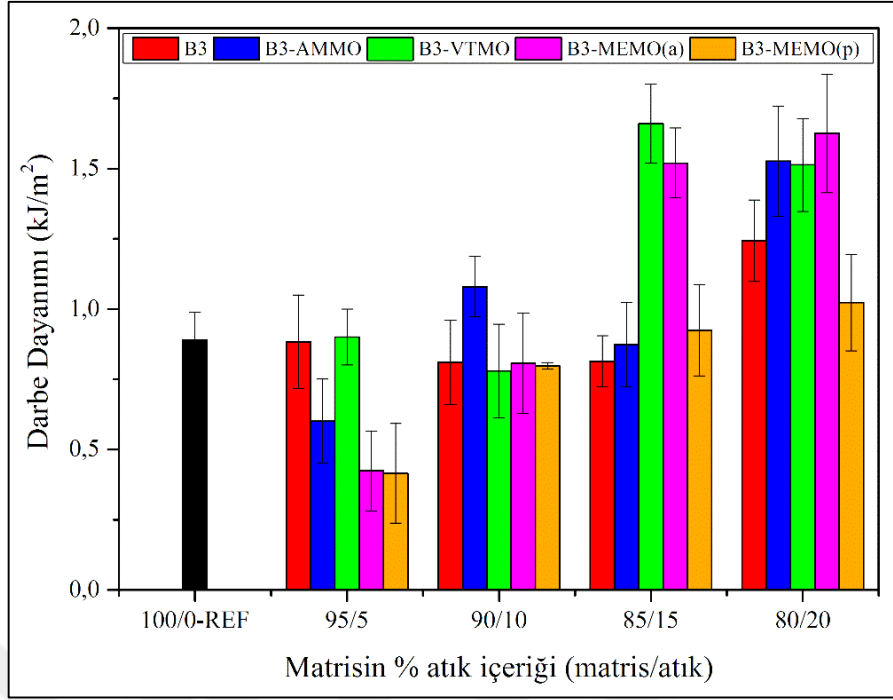
Farklı silan tipi ve oranlarının kullanıldığı durumda elde edilen darbe dayanımı değerleri Şekil 4.72 - 4.74'te verilmiştir.



Şekil 4.72. B1 boyutlu atık kullanıldığı durumda elde edilen darbe dayanımı



Şekil 4.73. B2 boyutlu atık kullanıldığı durumda elde edilen darbe dayanımı



Şekil 4.74. B3 boyutlu atık kullanıldığı durumda elde edilen darbe dayanımı

Sek polyestere %10 ve üzeri oranlarda atık CTP ilave edildiği durumda darbe dayanımında iyileşme gözlenmiştir. Bu durum kullanılan atığın da yaklaşık %25 oranında elyaf içermesi ile açıklanabilir. Doymamış polyester gibi rijit yapıdaki termoset malzemelerin darbe dayanımı düşüktür, fakat elyaf takviyesi darbe sırasındaki yükü taşıyarak toplamda malzemenin absorblayabileceği enerji miktarını arttırmaktadır. Bu etki elyaf oranının artışı ile artar (EL-Wazery ve diğ., 2017; Badawy, 2012; Türkmen ve Köksal, 2014). Tez çalışmasında bu etki özellikle daha yüksek atık yüklemelerinde ve iri taneli atık kullanımında ön plana çıkmaktadır.

Silan varlığında elde edilen sonuçların, düzensizlikler göstermekle birlikte, genel olarak iri taneli atık kullanıldığı ve silan ilave edildiği durumda darbe dayanımı değerlerinin iki katına kadar çıkarabildiği görülmektedir. Bunun nedeninin, iri atık partiküllerin daha uzun lifler barındırması olduğu düşünülmektedir (Meira-Castro ve diğ., 2013; Fu ve Lauke, 1996; Lin ve diğ., 2008). Elyaf içeren kompozit yapılarda elyaf sonları, kompoziti zayıflatan stres birikim noktalarıdır (stress concentrator); dolayısı ile uzun lifler aynı oranda kısa lif kullanıldığı duruma göre daha yüksek darbe dayanımı sağlarlar (Ozkoc ve diğ., 2005).



Tez çalışmasında atık ve ana matris fazlarının kimyasal etkileşimin geliştirilmesi için AMMO, MEMO ve VTMO silan bağlayıcılar ile denemeler yapılmıştır. Yukarıda bahsedilen çekme, eğme ve darbe testlerinin sonuçları değerlendirildiğinde, en olumlu sonuçların atık miktarı baz alınarak %1 MEMO kullanımında elde edildiği göz önünde bulundurularak çalışmanın devamında elyaf takviyeli kompozit örnekleri MEMO kullanılarak üretilmiştir.

Yapılan literatür araştırmasında da, doymamış polyeşterin takviye veya dolgu maddeleri ile arayüzey etkileşimini arttırmak için ya da atık CTP'nin matris ile yapışmasını iyileştirmek için, bu çalışmada olduğu gibi genellikle metakriloksi, amino ve vinil fonksiyonlu reaktif grup bulunduran silanlar ile çalışmalar yapıldığı görülmüştü. Silanların etkinliklerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda ise bu çalışmadaki sonuçları destekler nitelikte, metakriloksi grubu bulunan silanlar ile amino ya da vinil grubu bulunan silanlara göre daha iyi yapışma ve mekanik performans sonuçları elde edildiği bildirilmiştir (Huang ve diğ., 2018; Park ve Jin, 2001; Romanzini ve diğ., 2015a; Romanzini ve diğ., 2015b; Lee ve diğ., 2002; Gharbi ve diğ., 2014).

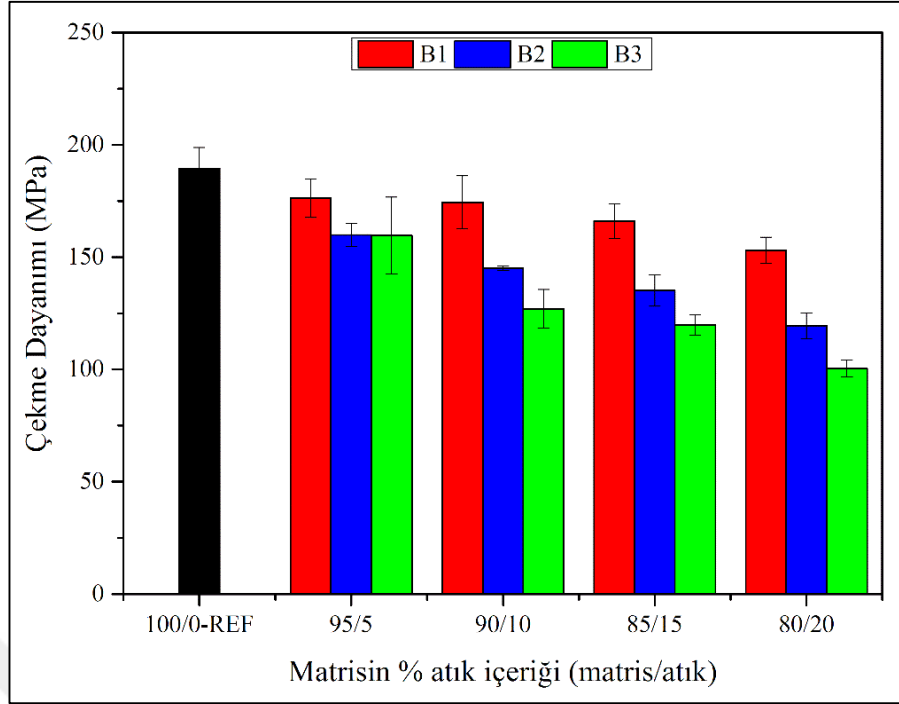
#### **4.2.2. Silan katkıli kompozitlerin mekanik özellikleri**

Bu bölümde, MEMO silan bağlayıcı varlığında üretilen kompozit örneklerde atık miktarı ve atık tane boyutu etkilerini incelemek amacı ile uygulanan çekme, eğme, darbe, kısa kiriş ve basma test sonuçları paylaşılmıştır.

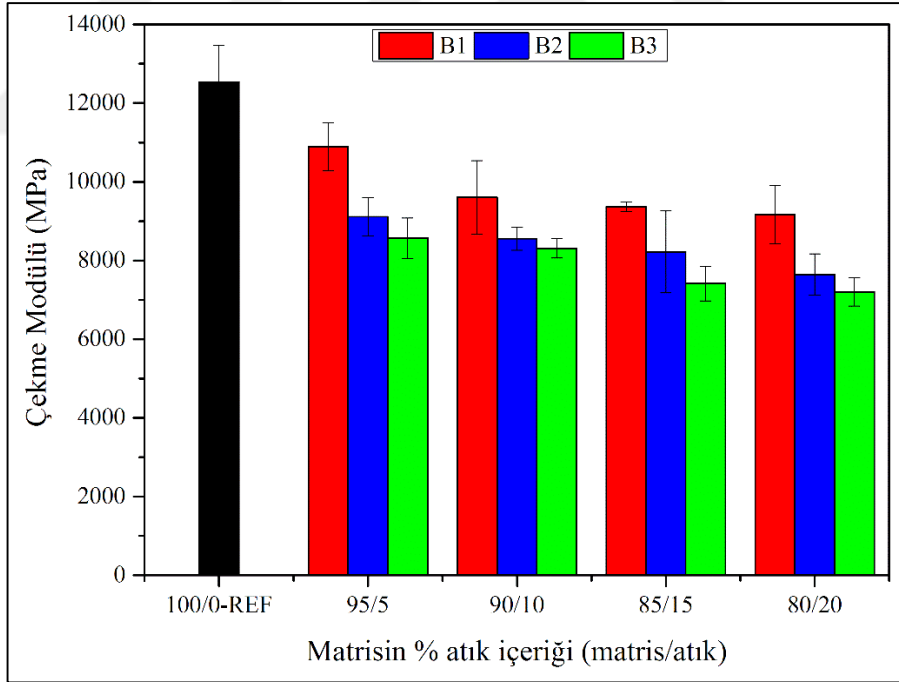
##### **4.2.2.1. Silan katkıli kompozitlerin çekme özellikleri**

MEMO varlığında hazırlanan kompozit örneklerin çekme dayanımı ve çekme modülü değerleri sırasıyla Şekil 4.75 ve 4.76'te verilmiştir.

MEMO silan bağlayıcı varlığında üretilen kompozit örneklerin çekme özellikleri incelendiğinde, çekme dayanımında ortalama %17, çekme modülünde ise ortalama %12 oranında bir iyileşme görülmüştür. Bir başka deyişle, atık ilavesiyle çekme dayanımında meydana gelen %37'lik kayıp silan ilavesi ile ortalama %20 değerine ve çekme modülünde meydana gelen kayıp da %37'den ortalama %25'e düşürülebilmştir.



Şekil 4.75. MEMO katkılı kompozitlerin çekme dayanımı



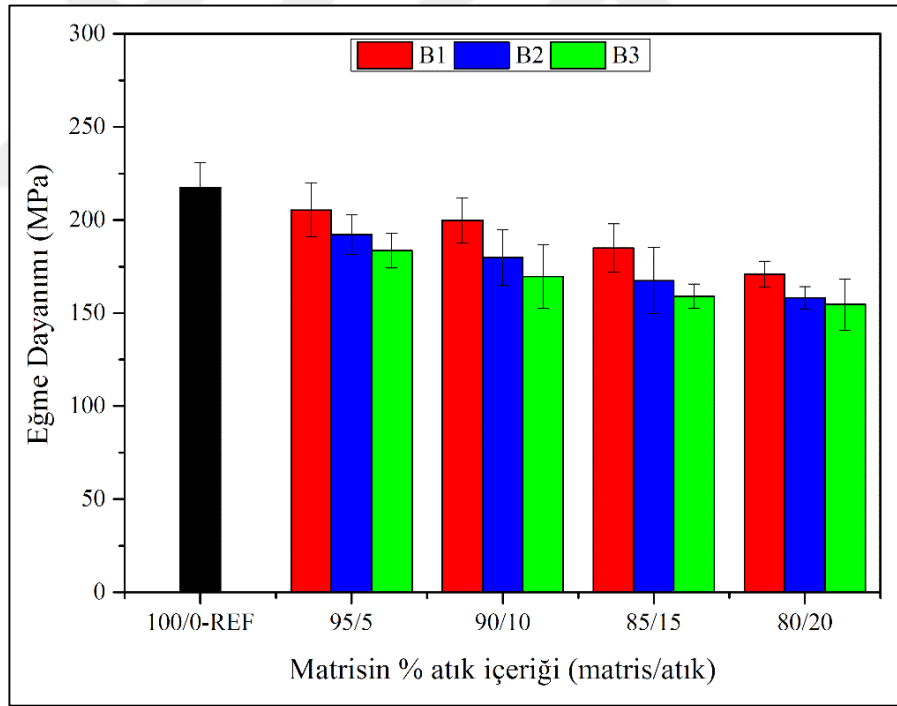
Şekil 4.76. MEMO katkılı kompozitlerin çekme modülü

Huang ve diğ. (2018), çalışmalarında atık CTP'yi farklı boyutlara öğütürerek, SMC yöntemi ile sisal elyaf takviyeli kompozitler içerisinde değerlendirmiştir. Çalışmada yapılan çekme testi sonuçları incelendiğinde, belli bir oran ve tane boyutuna kadar atık CTP ilave edildiği durumda iyileşmeler görülmüştür. Çalışmanın devamında ayrıca

amino ve metakrilat grubu içeren iki farklı silan bağlayıcı tipi ile arayüzey modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Her iki silan ilavesiyle de çekme dayanımında gelişme gözlenirken, bu gelişme metakrilat grubu içeren silanda çok daha belirgindir. Bu tez çalışmasında ise atığın kompozite modifiye edilmeden eklenmesi durumunda çekme özelliklerinde gerçekleşen kayıp, literatürdeki bu çalışmadan farklı olarak kompozit hazırlamada basınçlı kalıplama yerine el yatırması yönteminin kullanılmış olmasına bağlanabilir. El yatırması tekniğinin çok sayıda avantajlı yönü olmakla birlikte, basınçlı kalıplamada olduğu gibi basınç etkisinde atık taneleri sebebi ile oluşabilecek boşluklu yapının giderilebilmesi söz konusu değildir.

#### 4.2.2.2. Silan katkılı kompozitlerin eğme özellikleri

Kompozit örneklerin eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri sırasıyla Şekil 4.77 ve 4.78’de verilmiştir.

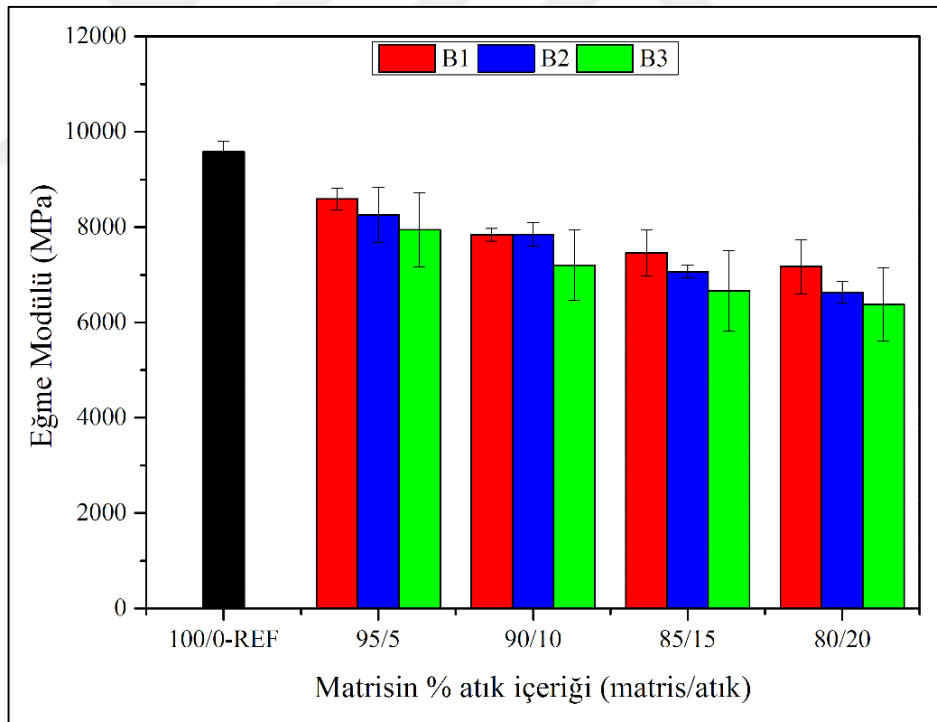


Şekil 4.77. MEMO katkılı kompozitlerin eğme dayanımı

Silan varlığında üretilen kompozit örneklerin hem eğme dayanımı hem de eğme modülü değerlerinde, silan kullanılmayan karşılıklarına göre ortalama %7 oranında bir iyileşme görülmektedir. Atık ilavesi ile eğme dayanımında meydana gelen %25’lik kayıp silan ilavesi ile ortalama %18 seviyesine, eğme modülünde meydana gelen %24’lük kayıp ise %17 seviyesine düşürülebilmektedir. Romanzini ve diğ. (2015b)

yaptığı bir çalışmada da silan modifikasyonu sonrası montmorillonit kil içeren kompozitlerin eğme dayanımı ve eğme modülünde iyileşme gözlenmiştir. Bu iyileşme, polyester reçine ile silan bağlayıcının reaktif grupları arasında gerçekleşen etkileşime ve silan yardımıyla dolgu dağılımının iyileşmesine atfedilmiştir.

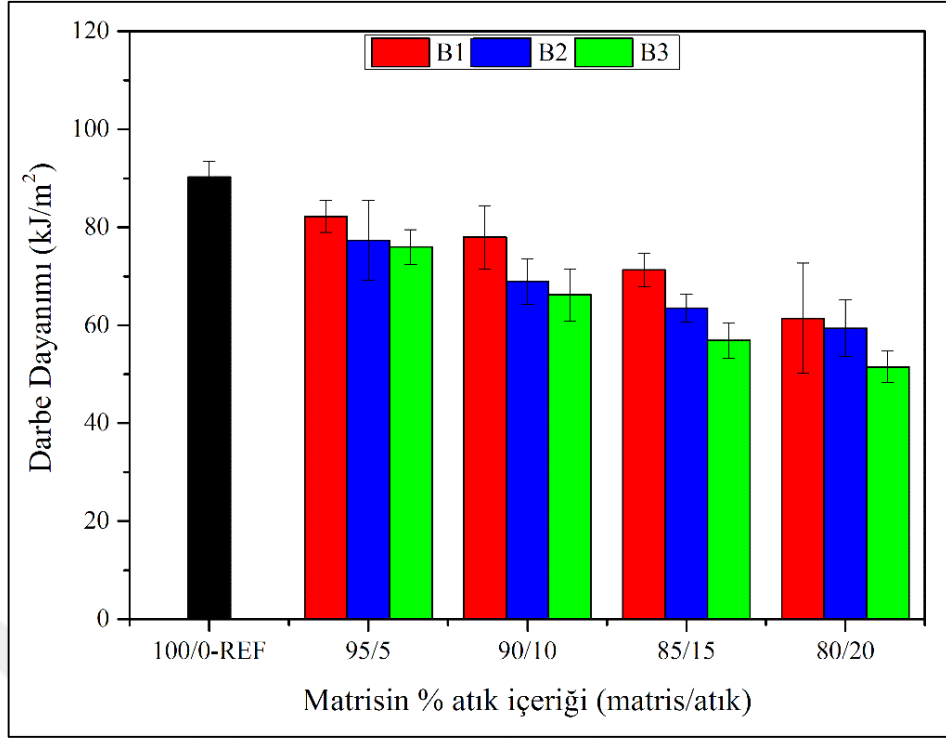
Genel itibari ile atık kullanıldığı durumda eğme özelliklerinde oluşan kayıp, çekme özelliklerinde oluşan kayba kıyasla daha düşüktür. Bu durum, atık CTP'nin, yeni hazırlanan kompozitlerin eğilme rijitliğini (flexural stiffness) geliştirme yeteneğine bağlanabilir. Matris malzemesinden daha yüksek rijitliğe sahip bir dolgu malzemesi kullanıldığı durumda, eğilme modülü artarken kopmada uzamanın azaldığı bilinmektedir. Dolgu yüklemesi artışı ile, dolgu-matris etkileşimi olasılığı artar ve bu da matris fazından dolgu fazına gerilim transferi (stress transfer) etkinliğini artırır. Bununla birlikte, tane boyutu küçüldükçe bu etki artar (Husseinsyah ve Zakaria, 2011; Romanzini ve diğ., 2015b; Aruniit ve diğ., 2011; Mark ve diğ., 2020).



Şekil 4.78. MEMO katkılı kompozitlerin eğme modülü

#### 4.2.2.3. Silan katkılı kompozitlerin darbe özellikleri

Kompozit örneklerin darbe dayanımı verileri Şekil 4.79'da verilmiştir.

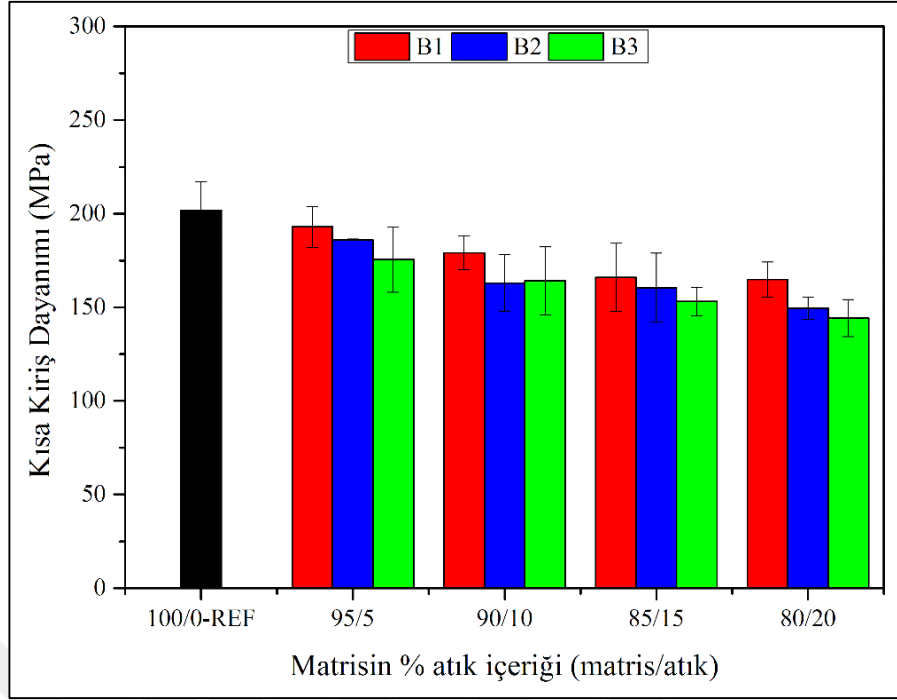


Şekil 4.79. MEMO katkılı kompozitlerin darbe dayanımı

Kompozit malzemelerin darbe testi, malzemenin ani darbe yüküne dayanma kabiliyeti ve kırılma gerçekleşmeden önce absorplanan toplam enerjiyi inceler. Kompozitin darbe performansı, matris ve elyaf arasındaki mekanik bağlanma ile ilgilidir ve reçinedeki kırılma, elyaf delaminasyonu ve elyaf ayrılması (pull-out) ile gerçekleşir (Prabhu ve diğ., 2020). MEMO silan bağlayıcı varlığında üretilen kompozit örneklerin darbe özellikleri incelendiğinde, ortalama %8 oranında bir iyileşme görülmektedir. Atık ilavesi ile darbe dayanımında gözlenen %31'lik kayıp, aynı kompozitlerin MEMO varlığında hazırlanması durumunda ortalama %23 değerine düşürülebilmektedir. Bu bulgudan yola çıkarak, MEMO silan bağlayıcı ilavesinin matris-elyaf arasındaki bağlanmayı iyileştirdiğini bir kez daha söylemek mümkündür.

#### 4.2.2.4. Silan katkılı kompozitlerin kısa kiriş özellikleri

Kompozit örneklerin kısa kiriş dayanımı verileri Şekil 4.80'de verilmiştir. Matris ile elyaf ve atık arasındaki yapışma düzeyi, kısa kiriş testi ile tabakalar arası kesme dayanımı (interlaminar shear stress) ölçülerek belirlenebilir (Park ve Jin, 2001).



Şekil 4.80. MEMO katkılı kompozitlerin kısa kiriş dayanımı

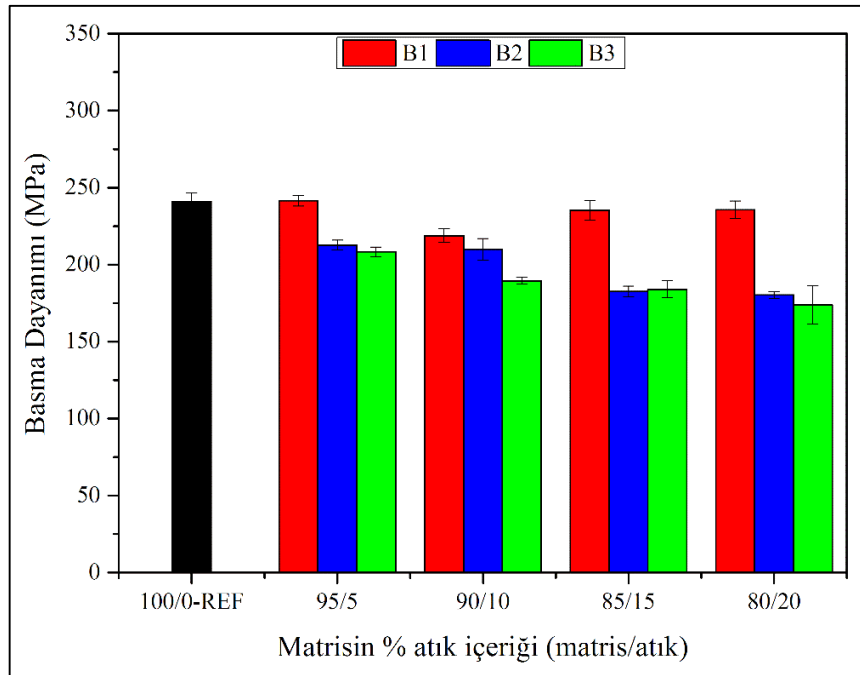
Silan varlığında üretilen kompozit örneklerin kısa kiriş dayanımı incelendiğinde, ortalama %7 oranında bir iyileşme görülmektedir. Atık ilavesi ile gözlenen %25'lik kayıp, bu durumda ortalama %18 düzeyine inmiştir. Silan bağlayıcı varlığında kompozitlerin tabakalar arası kesme dayanımında gözlenen iyileşme matris-elyaf-silan arasındaki arayüzey yapışma derecesinin artmasına bağlanabilir. Literatürde farklı yapıdaki kompozitler için de benzer sonuçların elde edildiği çalışmalara rastlanmaktadır (Park ve Jin, 2001; Yang ve diğ., 2013).

#### 4.2.2.5. Silan katkılı kompozitlerin basma özellikleri

Şekil 4.81'de kompozit örneklerin basma testi sonuçları görülmektedir. Diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi basma özelliklerinde de silan modifikasyonu ile bir iyileşme kaydedilmiştir. Atık ilavesi, basma dayanımında ortalama %19'luk bir kayba yol açmaktadır. Silan modifikasyonu yapıldığı durumda %7 oranında bir iyileşme sağlanarak, bu kayıp %12'ye düşürülmüştür. Atığın kompozit içerisinde değerlendirilmesi ile en az etkilenen mekanik özelliğin basma dayanımı olduğu görülmektedir. Hem küçük taneli atık ilavesi durumunda, hem de MEMO silan bağlayıcısı kullanılarak hazırlanan kompozitlerde, kontrol örneğine benzer basma dayanımı değerleri ölçülmüştür. Bu durum, literatürde, kompozit yapılarda kullanılan

dolgunun/katkının partikül boyutunun küçülmesiyle malzeme rijitliğinin artması şeklinde açıklanmıştır (Aruniit ve diğ., 2011).

Literatürde atık CTP'nin, yine polyester matrisli kompozitlerde doğrudan kullanımına yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmakla birlikte atık CTP'nin çimento, beton gibi ürünlerde agrega yerine kullanımı üzerine daha çok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda, atık CTP kullanımı ile kompozitlerin basma dayanımı değerlerinin iyileştiği (Meira-Castro ve diğ., 2013; Asokan ve diğ., 2010; Farinha ve diğ., 2019), bunun yanı sıra, iri taneli atıkların küçük taneli atıklara göre, daha uzun elyaf taşımalarına bağlı olarak daha başarılı sonuçlar verdiği de görülmektedir (Meira-Castro ve diğ., 2013; Ribeiro ve diğ., 2015). Atığın reaktif silanlarla modifiye edildikten sonra değerlendirildiği bazı örnek çalışmalarda da, tez çalışmasında olduğu gibi, büyük tane boyutlu atıkların silan varlığında kompozit matrisini daha az zayıflattığı göze çarpmaktadır (Ribeiro ve diğ., 2015). Atık CTP, matris içerisinde dolgu yerine kullanıldığında karışıma ve viskoziteye bağlı olarak atık partikülleri çevresinde boşluk kalması ihtimali düşüktür. Bu tez çalışmasında, söz edilen bulgunun aksine bir davranış gözlenmesinin nedeninin, elyaf işleme sırasında reçine içerisindeki atıklardan dolayı yeni elyaf katları arasında boşluklar kalması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.81. MEMO katkıli kompozitlerin basma dayanımı

Elyaf takviyeli kompozit örneklerin mekanik dayanımı genel hatlarıyla gözden geçirildiğinde, MEMO silan bağlayıcı ile gerçekleştirilen modifikasyonun tüm mekanik özelliklere olumlu katkılarının olduğunu söylenebilir. Atığın doğrudan kullanılmasıyla hazırlanan kompozitlere kıyasla, silan bağlayıcı modifikasyonu sonrasında kullanılan ile hazırlanan kompozitler arasında mekanik özelliklerde, silan ile ilişkilendirilebilecek ortalama %10'luk bir gelişme elde edilebilmiştir. Silan bağlayıcı modifiyeli kompozitlerin çekme testi örneklerinin kopma yüzeylerinden yapılan morfolojik analizler de bu bulguları destekler niteliktedir.

#### **4.2.3. Silan katkılı kompozitlerin dinamik mekanik özellikleri**

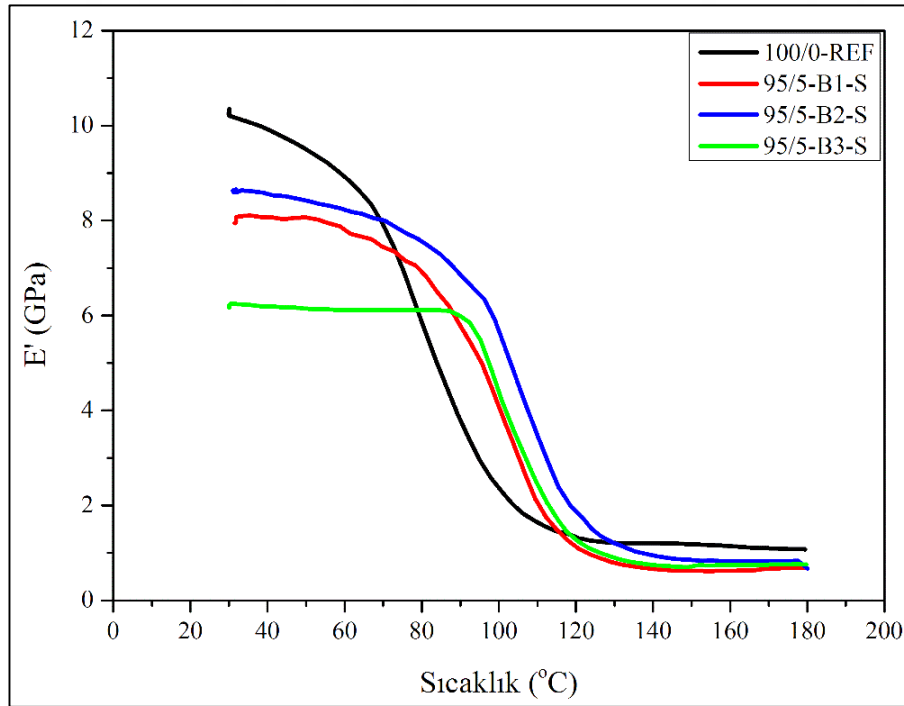
Silan varlığında üretilen kompozit örneklerin içeriğindeki atık miktarı ve atık tane boyutunun dinamik-mekanik özelliklere ve kompozitin ısı geçişlerine etkisini incelemek amacı ile örnekler, DMA cihazında üç nokta eğme deformasyon modunda sıcaklık taraması yapılmıştır. Şekil 4.82 - 4.85'te atık ilavesinin, Şekil 4.86 - 4.88'de ise atık tane boyutunun kompozitlerin depo modülüne etkisi verilmiştir.

Silan katkılı kompozitlerin sıcaklığa bağlı olarak depo modülü değerlerindeki değişimler incelendiğinde, bu değişimin, silan kullanılmadığı durumda olduğu gibi (Şekil 4.35 - 4.41) kompozitlerin içerdiği atık miktarına ve atığın boyutuna bağlı olarak farklı eğilimler sergilediği görülmektedir. En yüksek başlangıç dinamik modül değeri 10 GPa ile kontrol numunesinde elde edilmiştir. Şekil 4.82'de %5 atık içeren kompozitler için depo modülü değerlerinin atık yüklemesiyle düştüğü ve B1 ile B2 boyutlu atık içeren silan katkılı kompozitlerin modül eğrilerinin benzer olduğu görülmektedir. B1 ve B2 boyutunda atık kullanıldığı durumda silan katkısı ile modül değerlerindeki düşüş daha ileri sıcaklıklara taşınırken B3 boyutunda silan bağlayıcının ilave bir katkısı olmamıştır. %10 atık içeren silan katkılı kompozitler için (Şekil 4.83) ise B2 ve B3 boyutlu atık içeren kompozitlerin modül eğrileri benzer eğilim göstermekle birlikte silan katkısının modül başlangıç değerlerini arttırdığı görülmektedir. Silan kullanılmadığı durumda B1 boyutlu atıkta 7 GPa, B2 ve B3 boyutlu atıkta ise 4 GPa başlangıç modül değeri elde edilirken, silan kullanıldığı durumda bu değerler sırası ile 8 GPa ve 5,5 GPa'ya yükselmiştir. %15 ve %20 atık içeren silan katkılı kompozitler için (Şekil 4.84 ve 4.85) ise silan kullanılmadığı duruma benzer modül eğrileri elde edilmekle birlikte başlangıç modül değerlerinde

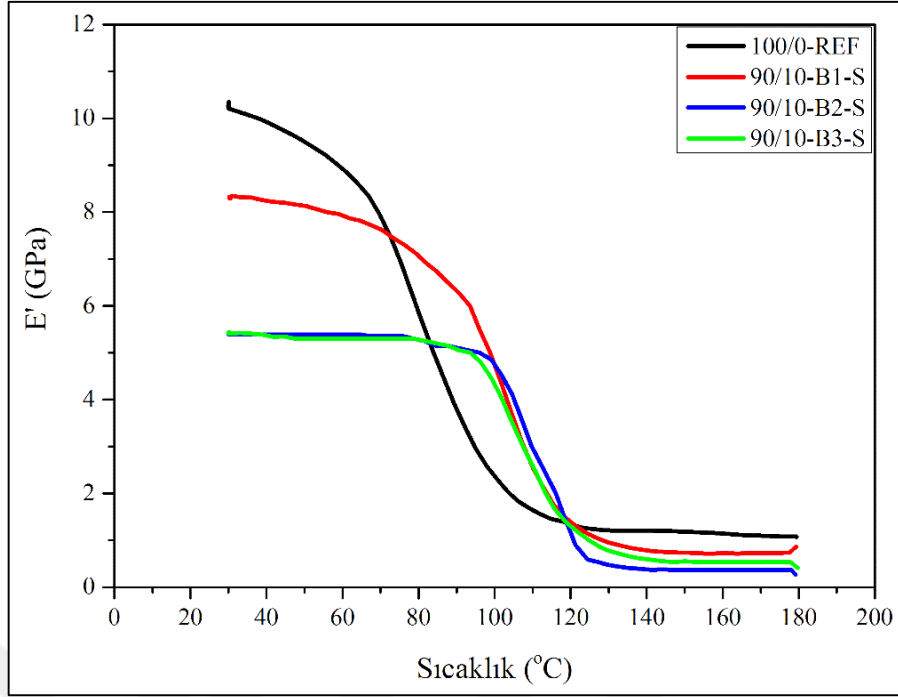


yine artış gözlenmiştir. Atık ilavesi ile kompozitlerde depo modülündeki düşüşün, atık tane boyutu ile orantılı olmadığı, atık tane boyutunun büyümesi ile depo modülündeki kaybın azaldığı görülmektedir. Bu durum, atığın tane büyüklüğünün artmasıyla, kompozit içindeki atık miktarının artışı kaynaklı olumsuz değişimlerin bir miktar kompanse edildiğini işaret etmektedir.

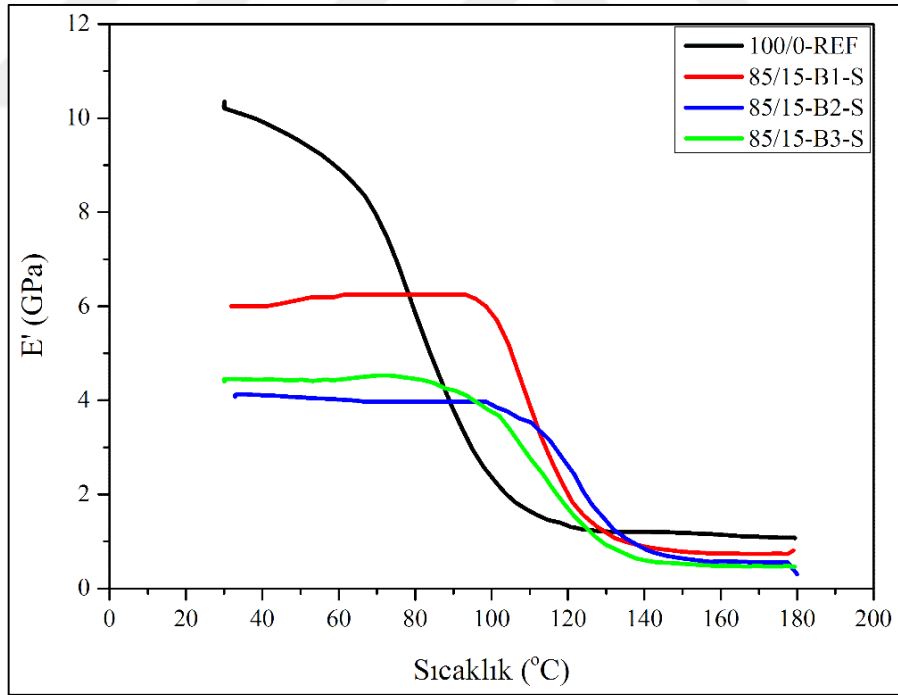
Şekil 4.86 - 4.88’de depo modülündeki değişim, tane boyutlarına göre gruplandırılarak farklı bir şekilde raporlanmıştır. Buradan, atık miktarındaki artışın dinamik-mekanik özellikler üzerindeki etkisinin tane boyutu etkisine göre daha düzenli olduğu görülmektedir. B1 boyutlu atık kullanıldığı durumda (Şekil 4.39) sadece yüksek atık oranlarında (%15 ve %20) modül düşüşleri daha ileri sıcaklıklara taşınırken, silan kullanıldığı durumda ise (Şekil 4.86) tüm atık oranları için modül düşüşleri ileri sıcaklıklara taşınarak kontrol numunesine göre daha olumlu sonuçlar vermiştir. B2 boyutlu atık kullanılan silan katkıli kompozitlerde (Şekil 4.87), silan kullanılmadığı duruma (Şekil 4.40) göre yine modül düşüşleri ileri sıcaklıklara taşınırken, başlangıç modül değerlerinde belirgin iyileşme gözlenmiştir. Bu durum, B3 boyutlu atık kullanılan silan katkıli kompozitlerde (Şekil 4.88) de benzer seyretmektedir.



Şekil 4.82. MEMO kullanıldığı durumda %5 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi



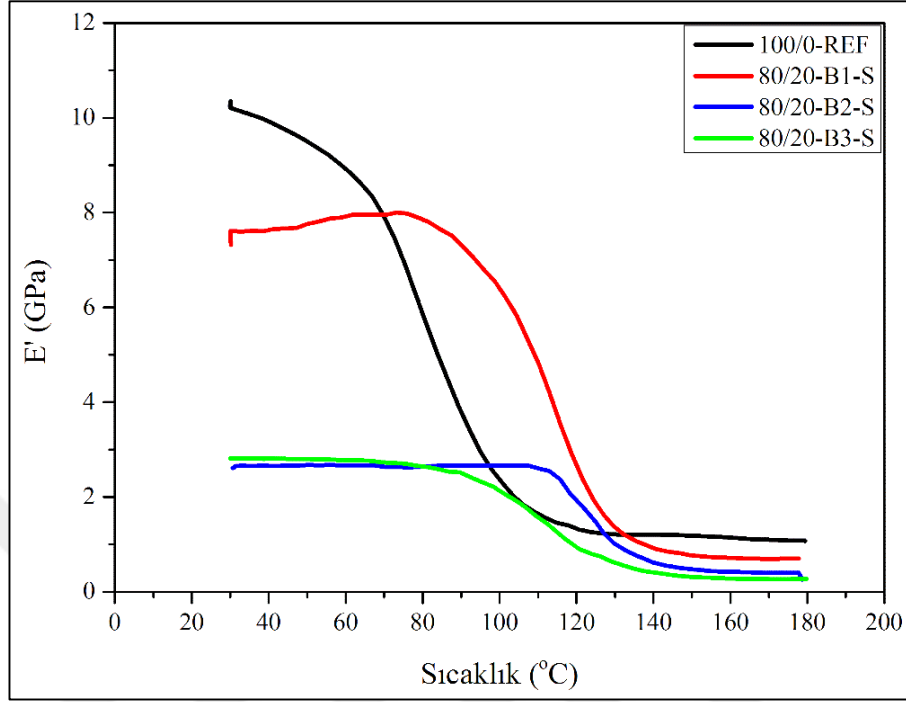
Şekil 4.83. MEMO kullanıldığı durumda %10 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi



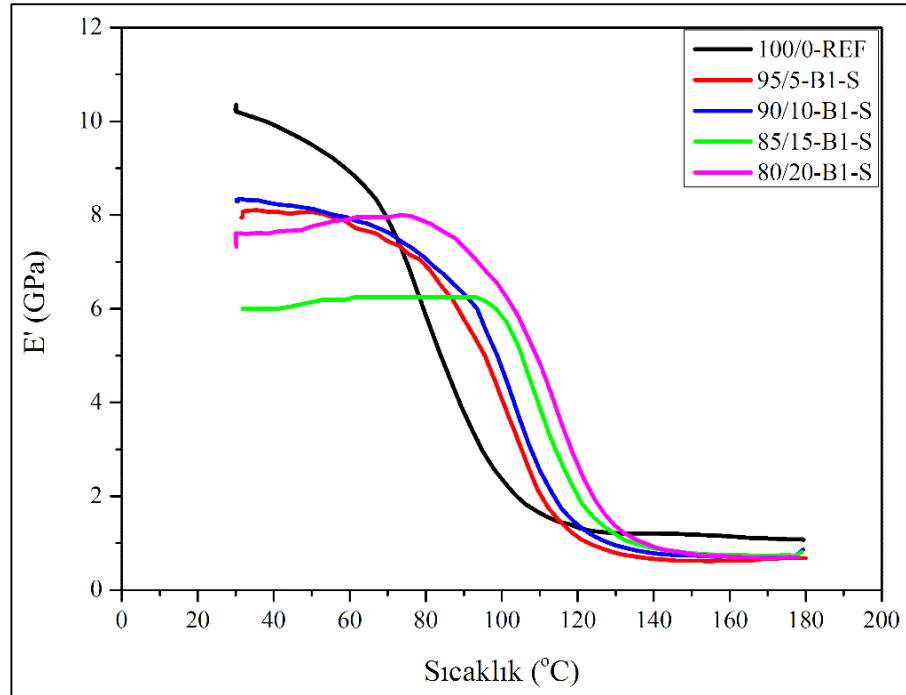
Şekil 4.84. MEMO kullanıldığı durumda %15 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi

Genel itibari ile silan katkılı kompozit örnekler üzerinde atık oranının, atık tane boyutuna göre daha belirgin ve sistematik değişikliklere yol açtığı söylenebilir. Silan katkısı, silan kullanılmadığı duruma göre modül başlangıç değerlerini ve düşüş

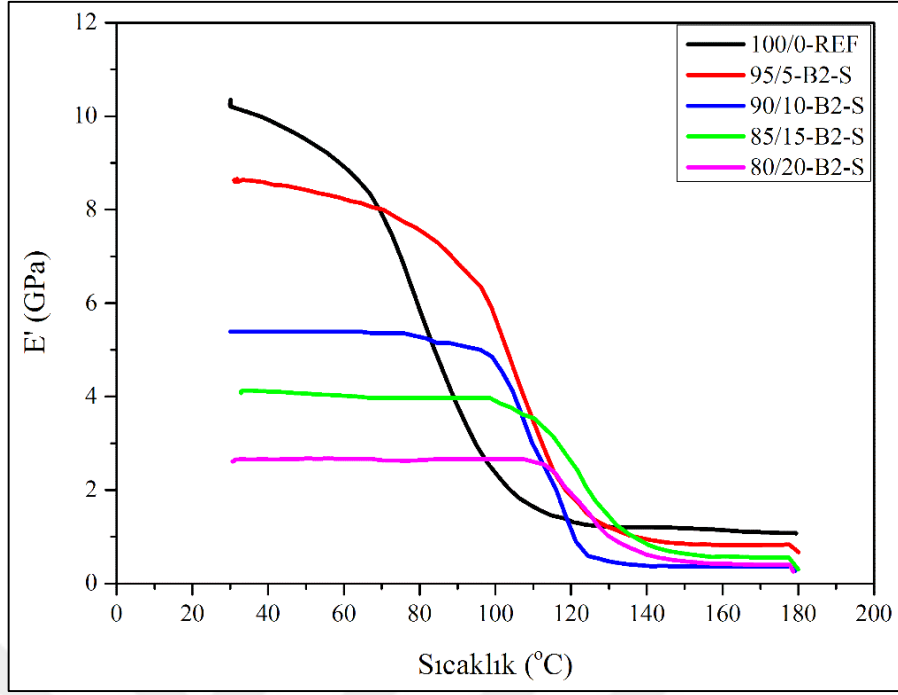
sıcaklıklarını arttırmıştır. Kompozitin depo modülündeki iyileşme, matris-elyaf arayüzey etkileşiminin ve bağ kuvvetinin artması ile açıklanabilir (Eng ve diğ., 2016).



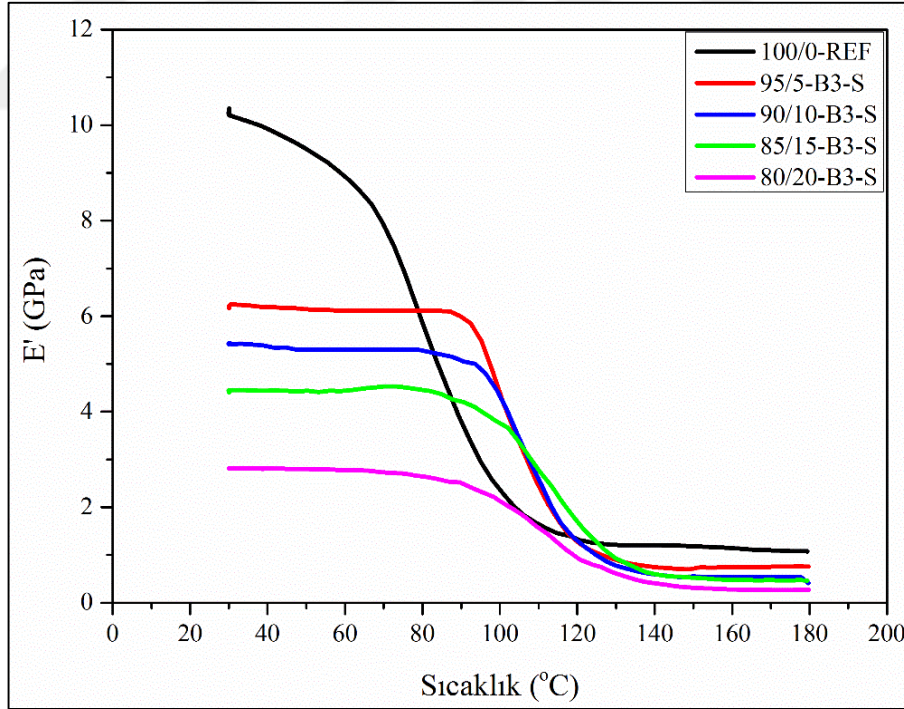
Şekil 4.85. MEMO kullanıldığı durumda %20 oranında atık ilavesinin kompozitlerin depo modülüne etkisi



Şekil 4.86. MEMO kullanıldığı durumda B1 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi

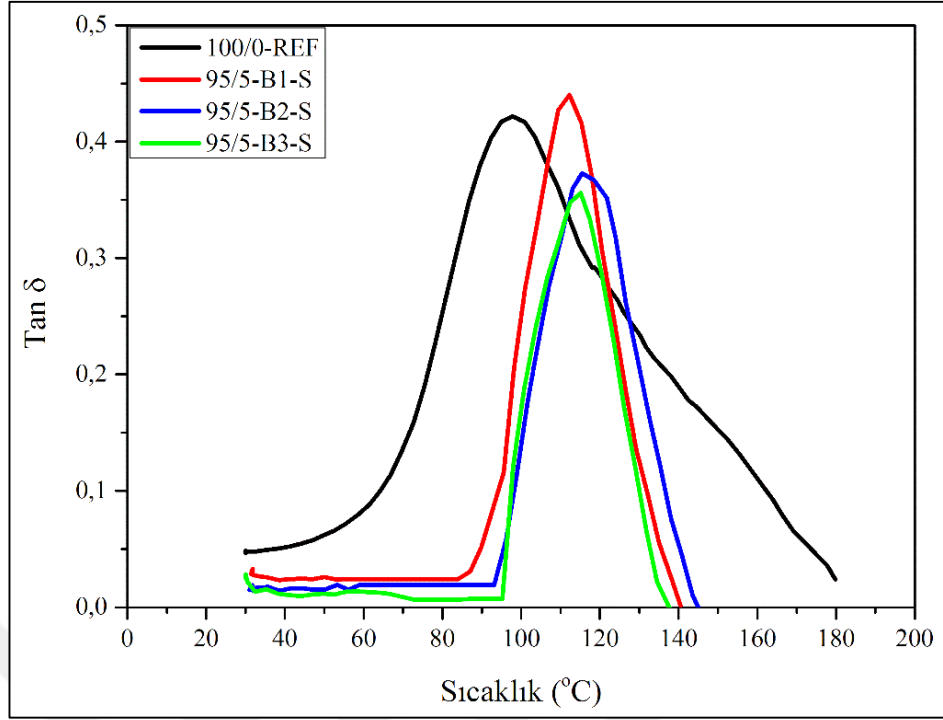


Şekil 4.87. MEMO kullanıldığı durumda B2 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi

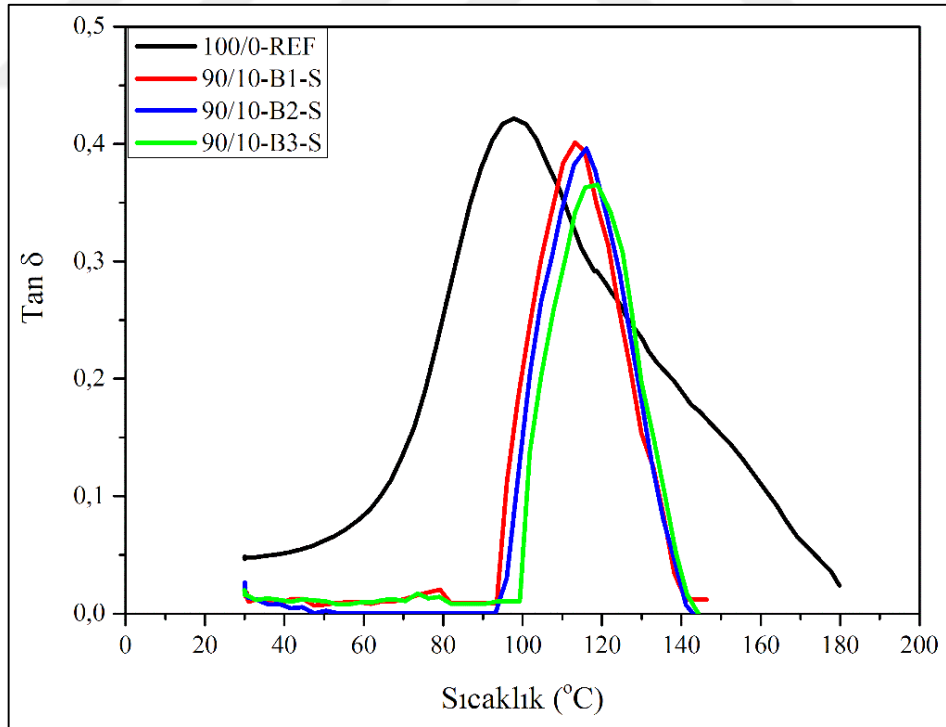


Şekil 4.88. MEMO kullanıldığı durumda B3 boyutlu atığın kompozitlerin depo modülüne etkisi

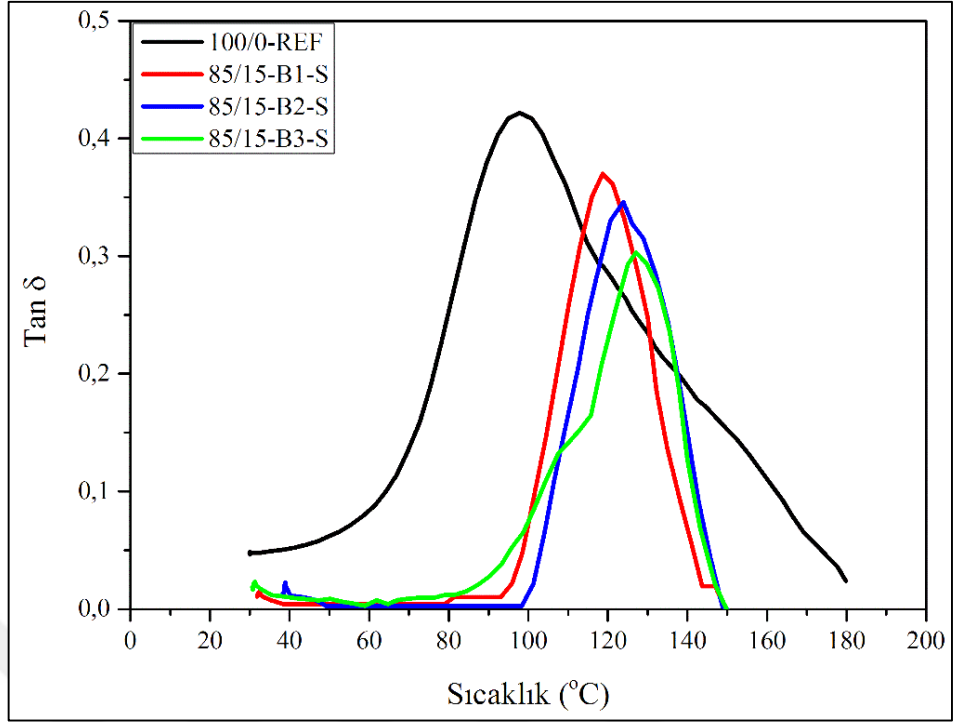
MEMO silan bağlayıcı varlığı durumu için, Şekil 4.89 - 4.92'de atık ilavesinin, Şekil 4.93 - 4.95'te ise atık tane boyutunun kompozitlerin  $\tan \delta$  üzerindeki etkisi verilmiştir.



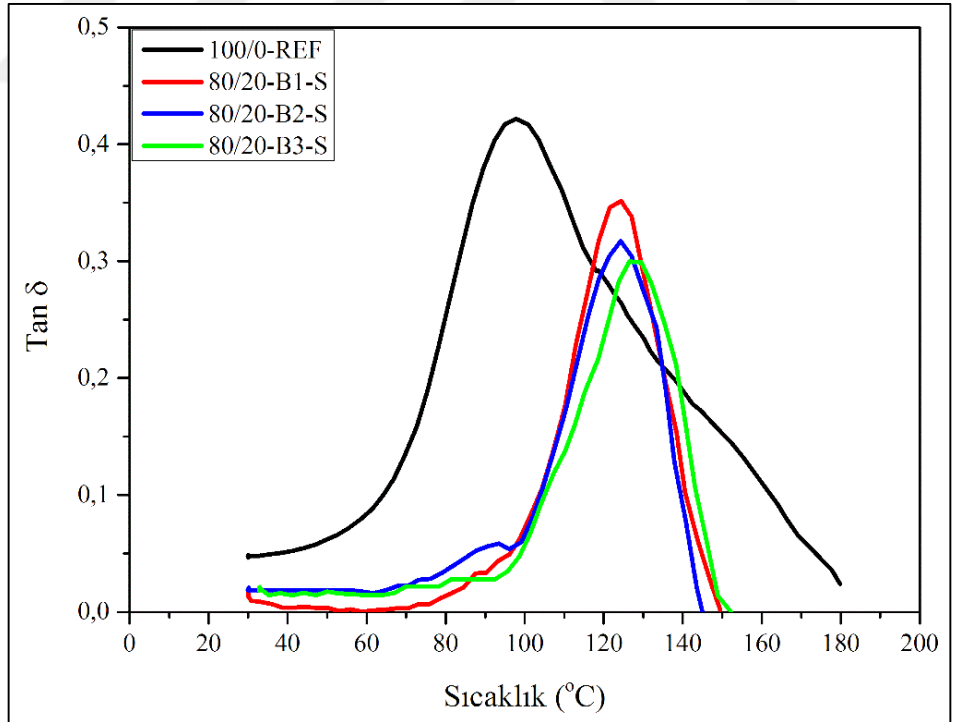
Şekil 4.89. MEMO kullanıldığı durumda %5 oranında atık ilavesinin kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



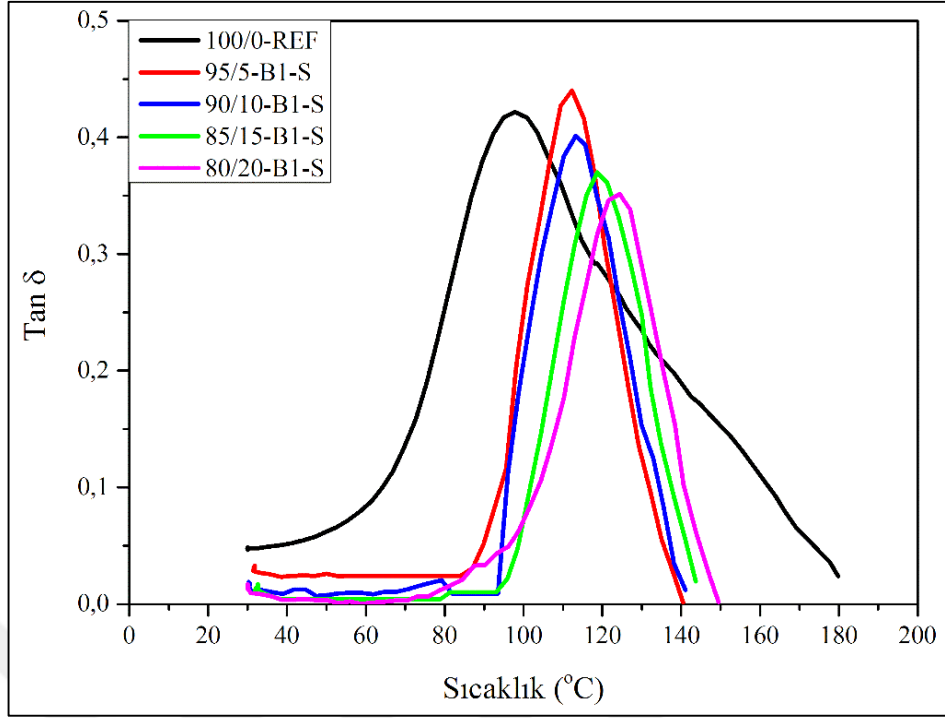
Şekil 4.90. MEMO kullanıldığı durumda %10 oranında atık ilavesinin kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



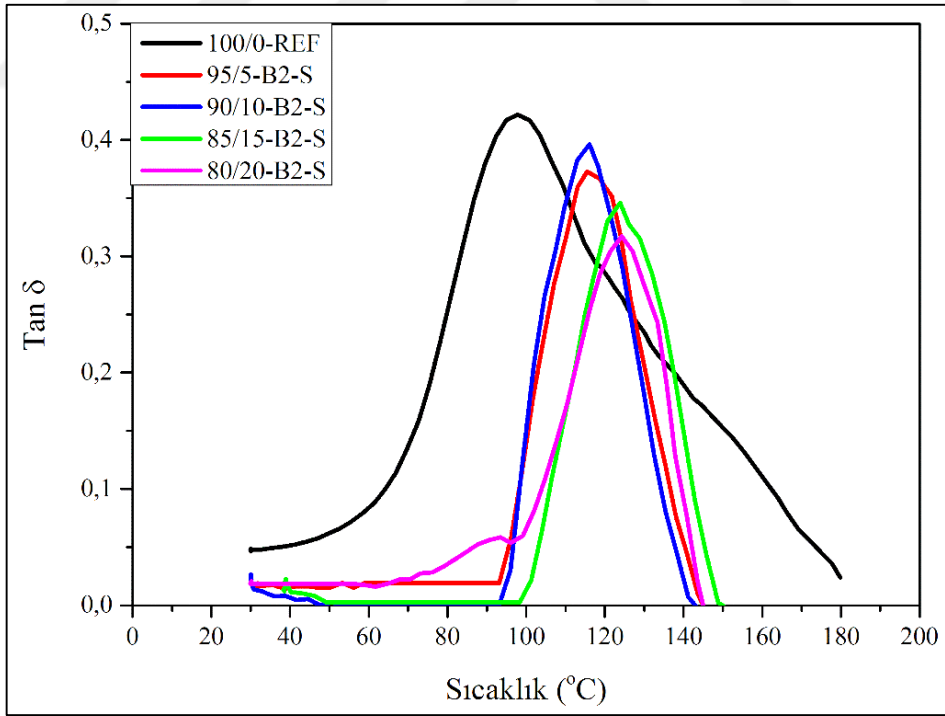
Şekil 4.91. MEMO kullanıldığı durumda %15 oranında atık ilavesinin kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



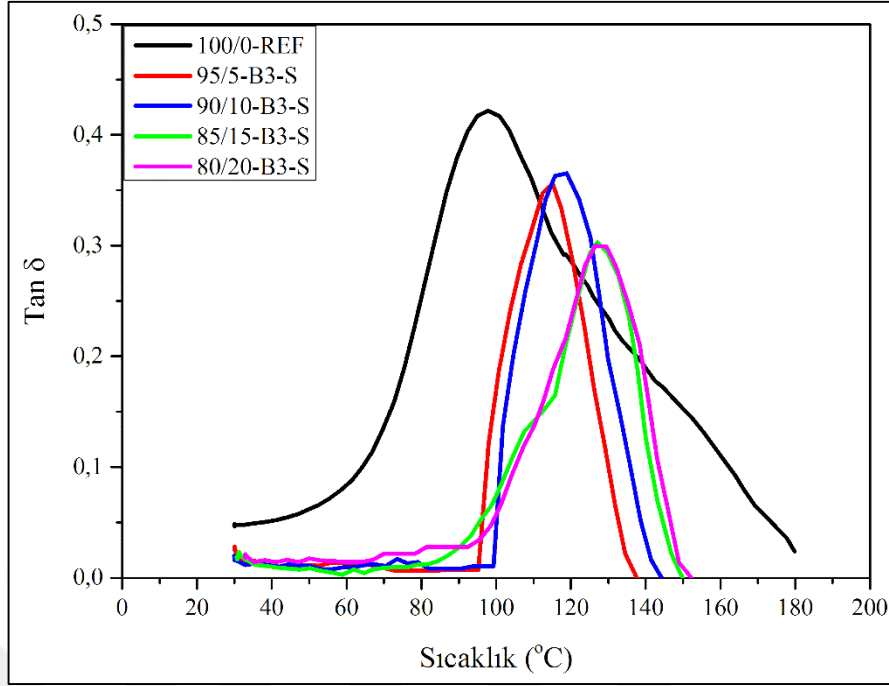
Şekil 4.92. MEMO kullanıldığı durumda %20 oranında atık ilavesinin kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



Şekil 4.93. MEMO kullanıldığı durumda B1 boyutlu atığın kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



Şekil 4.94. MEMO kullanıldığı durumda B2 boyutlu atığın kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi



Şekil 4.95. MEMO kullanıldığı durumda B3 boyutlu atığın kompozitlerin tan  $\delta$  değerine etkisi

Sıcaklık taraması ile elde edilen tan  $\delta$  profilleri, silanın farklı bileşimlerdeki kompozitlerin  $T_g$ 'deki değişimi ve atık-matris arayüzey etkileşimi değerlendirmek için kullanılmıştır.

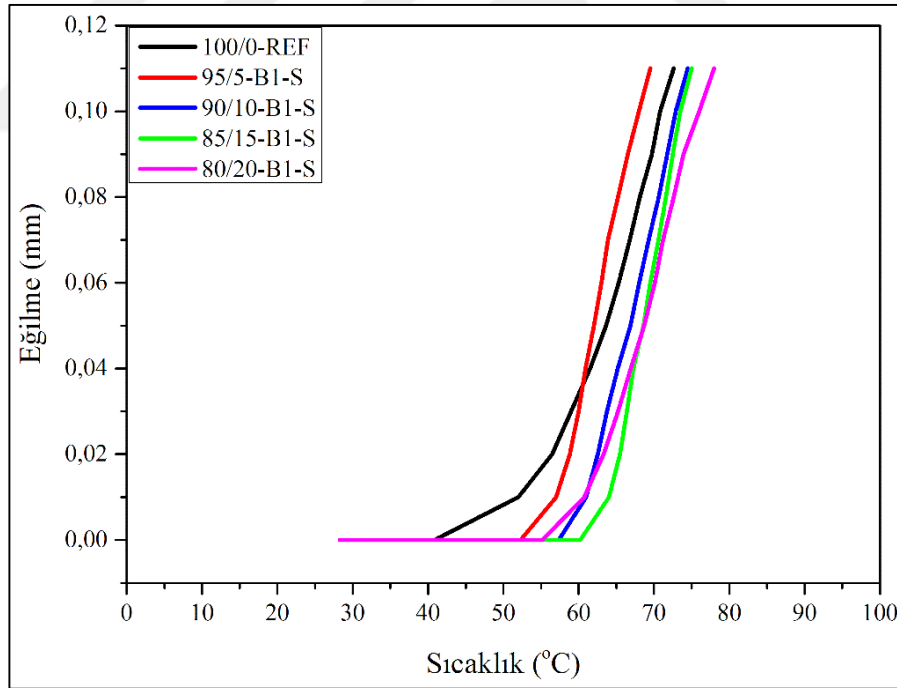
Şekiller incelendiğinde, hem kullanılan atık miktarının artışı ile, hem de tane boyutunun artışı ile kompozit örneklerin  $T_g$  değerlerinde artış gözlenirken, tan  $\delta$  pik yüksekliklerinde belirgin azalış gözlenmiştir.  $T_g$  değerlerindeki artış, atık kullanımı ile kompozit içerisindeki zincir hareketliliğinin kısıtlandığını ve buna bağlı olarak da kompozitlerin servis sıcaklığının yükseldiğini işaret etmektedir. Tane boyutu etkisi için Şekil 4.90 - 4.92 incelendiğinde, daha büyük tane boyutu kullanımında  $T_g$ 'deki artışın daha belirgin olduğu görülmektedir. MEMO ile hazırlanan kompozitlerin  $T_g$  değerlerinde silan kullanılmayan kompozitlerinkine göre bir değişim olmadığı, bununla birlikte, camsı geçiş bölgesinde elde edilen tan  $\delta$  pik yüksekliklerinin ise azaldığı görülmektedir. Romanzini ve diğ., (2015b) doymamış polyester/montmorillonit kompozitleri ile yaptığı çalışmada metakrilat grubu bulunan silan bağlayıcı ile yapılan modifikasyon sonucu polimer matrisin  $T_g$  değerlerinde değişim gözlenmezken tan  $\delta$  pik yüksekliğinin azaldığı raporlanmıştır. (Gharbi ve diğ., 2014; Idicula ve diğ., 2005) yaptığı ve silan bağlayıcı kullanılan çalışmalarda da, camsı



geçiş bölgesinde ölçülen  $\tan \delta$  pik yüksekliğinin azalması ile ilgili olarak, reçine-dolgu/takviye yapışmasındaki iyileşmenin dolgu/takviye çevresinde zincir hareketliliğini kısıtlanması sonucu gerçekleştiği ispatlanmıştır. Benzer birçok araştırma sonucuyla da (Karslı Yılmaz, 2014; Lavoratti ve diğ., 2018; Cui ve Kessler, 2014; Mohanty ve diğ., 2006; Paul ve diğ., 2010; Guo ve diğ., 2012) desteklendiği üzere atık içeren kompozitlerde silan bağlayıcının polimer-takviye arayüzey etkileşimini güçlendirerek camsı geçiş sırasında daha düşük miktarda enerji sönümlenmesini sağladığı, bunun sonucu olarak da dinamik-mekanik analizde bu geçiş bölgesindeki  $\tan \delta$  pik yüksekliğinin daha düşük ölçüldüğü söylenebilir.

#### 4.2.4. Silan katkılı kompozitlerin yük altında eğilme sıcaklığı (HDT)

Bu bölümde, silan varlığında, kompozit içindeki atık oranının ve atığın tane boyutunun malzemenin yük altında eğilme sıcaklığına etkisi araştırılmış, HDT testi sonuçları atık tane boyutuna göre gruplandırılarak Şekil 4.96 - 4.98’de verilmiştir.

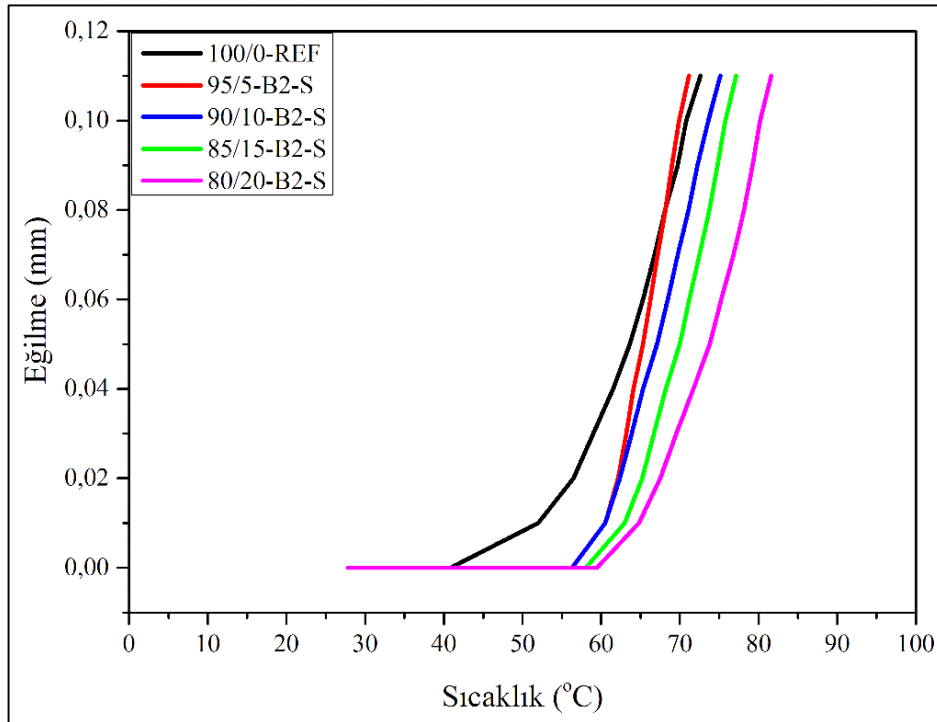


Şekil 4.96. MEMO kullanıldığı durumda B1 boyutlu atığın kompozitlerin HDT değerine etkisi

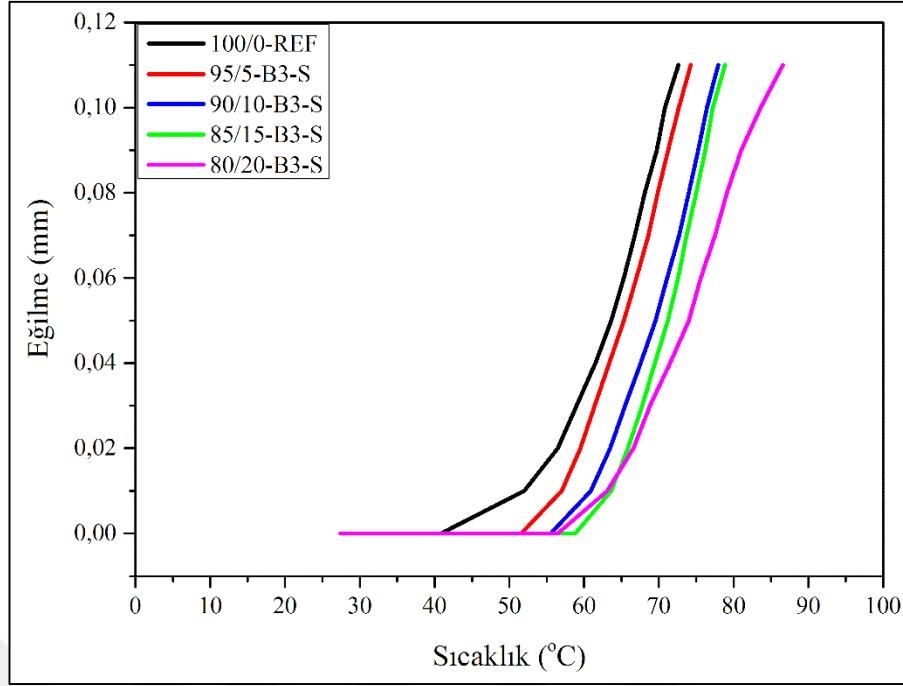
Bir önceki bölümde, silan içermeyen kompozitlerin HDT testi sonuçları, atığın kompozit malzemenin ısıl kararlılığını iyileştirdiği göstermişti. Silan varlığında üretilen kompozitlerde de hem atık miktarının, hem de atık tane boyutunun artışı ile

yük altında eğilme sıcaklığında bir miktar iyileşme gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, kompozitlerin ilk yumuşama sıcaklıklarının daha ileriye taşındığı görülmektedir. Bu bulgu,  $T_g$ 'deki değişime benzer şekilde, atığın kompozit yapısındaki moleküler hareketliliği kısıtlayarak malzemenin servis sıcaklığını geliştirdiğini destekleyen bir bulgudur. Romanzini ve diğ. (2015b) tarafından yapılan çalışmada, silan modifikasyonunun, çalışılan kompozit bileşiminde HDT değerlerinde  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar bir iyileşme sağladığı belirtilmiştir. Luo ve diğ. (2016) yaptığı çalışmada, mısır elyafı takviyeli poli(laktik asit) kompozitlerinde %2 oranında AMMO silan bağlayıcı kullanıldığı durumda HDT değerinde  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik bir iyileşme gözlenmiştir. Tez çalışmasında ise, B1 ve B2 olmak üzere göreceli daha düşük tane büyüklüklerinde atık ilavesi durumunda silan modifikasyonunun kompozitlerin HDT değerlerinde belirgin bir değişime neden olmadığı tespit edilirken, daha büyük tane boyutlu (B3) atık içeren kompozitlerde ortalama  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik bir artış gözlenmiştir.

En yüksek atık oranı ve iri tane boyutlu atık (80/20-B3) kullanıldığı durumda, HDT değeri %14 oranında artarken, aynı kompozit bileşiminde silan bağlayıcı da yer aldığına bu değere ilave olarak %6 oranında bir artış daha elde edilmiştir.



Şekil 4.97. MEMO kullanıldığı durumda B2 boyutlu atığın kompozitlerin HDT değerine etkisi



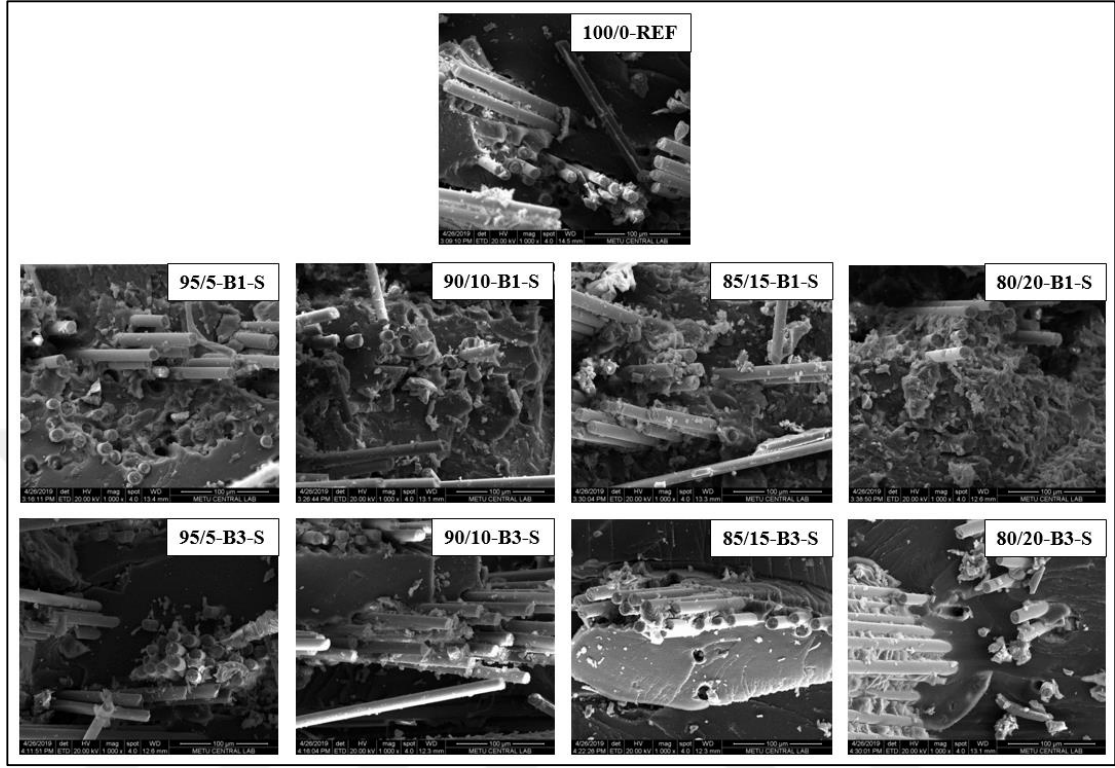
Şekil 4.98. MEMO kullanıldığı durumda B3 boyutlu atığın kompozitlerin HDT değerine etkisi

#### 4.2.5. Silan katkıli kompozitlerin morfolojik özellikleri

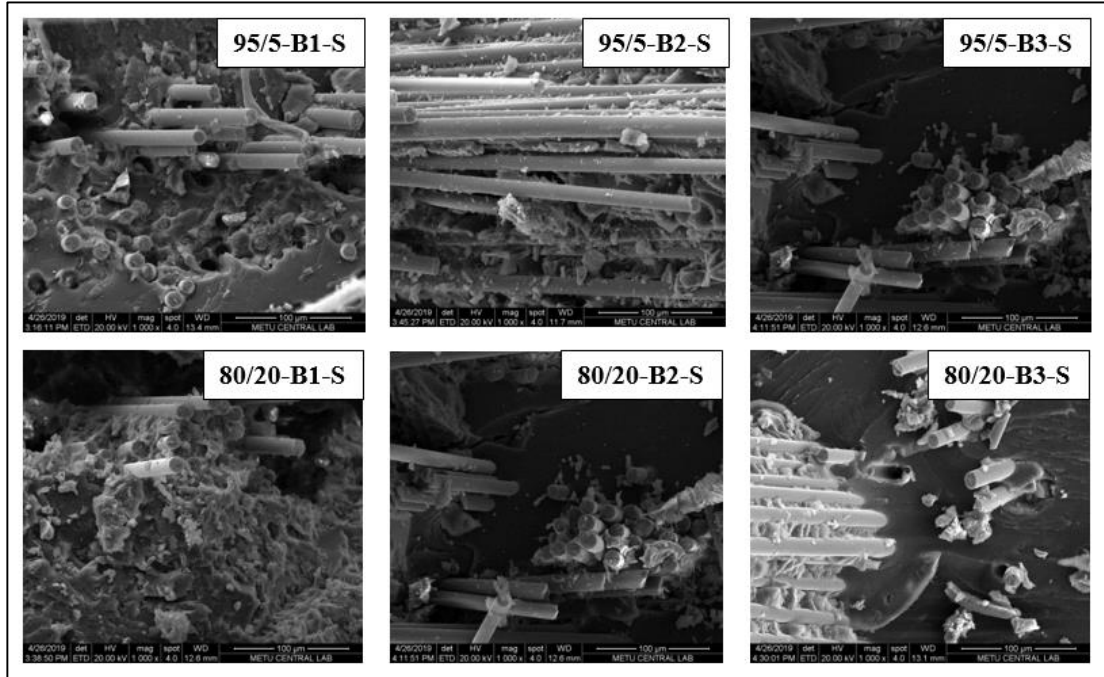
Bu bölümde değerlendirilen kompozit örneklerinin morfolojileri de diğer örneklerde olduğu gibi, çekme testinden elde edilen kırılma yüzeylerinden SEM analizi ile değerlendirilmiştir. Şekil 4.99 ve 4.100'de atık içeren ve silan modifikasyonu uygulanmış kompozit örneklerin x1000 büyütme ile elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir.

SEM görüntülerinden, silan içermeyen kompozitlerde atık içeriğine da tane boyutundaki artış ile matris-takviye arayüzeyinde belirgin bir farklılık olmadığı anlaşılmaktadır. Atık içerisinde bulunan elyafların da polimer matrise bağlanabildiği görülmektedir. Silan bağlayıcı (MEMO) kullanılması durumunda ise elyaf-matris ve atık-matris arayüzeylerindeki etkileşimin çok daha iyi olduğu gözlenmiştir. Bu bulgu, silan ilavesiyle kompozitlerin mekanik dayanımındaki artışı da açıklar niteliktedir. Literatürde rastlanan benzer çalışmalarda (Huang ve diğ., 2018; Prabhu ve diğ., 2020; Jin ve Park, 2001) silan modifikasyonu ile polimer matrisin elyafları daha iyi sardığı ve bu sayede arayüzey yapışmasının çok daha iyi olduğu ifade edilmektedir. Aynı çalışmalarda, çalışılan kompozit bileşiminde silan bağlayıcı kullanılmadığı durumda

kırılma sırasında elyafların matris içerisinden ayrıldığı (fiber pull-out) görüntülenmiş ve elde edilen zayıf mekanik özellikler bu görüntüler ile açıklanmıştır.



Şekil 4.99. MEMO kullanıldığı durumda atık oranının matris-elyaf etkileşimine etkisi

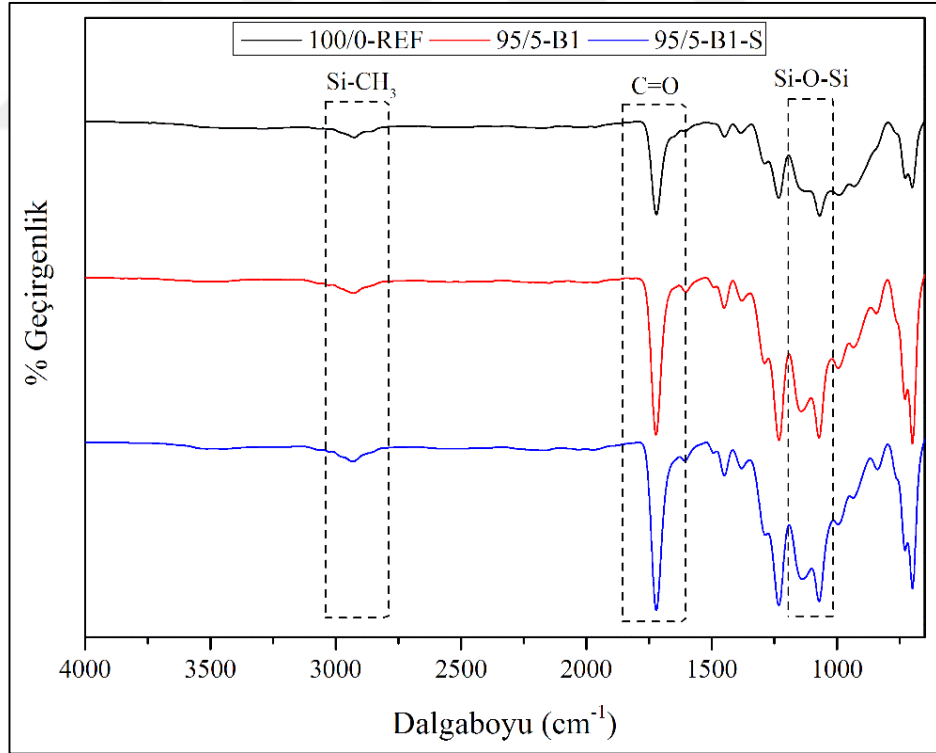


Şekil 4. 100. MEMO kullanıldığı durumda tane boyutunun matris-elyaf etkileşimine etkisi

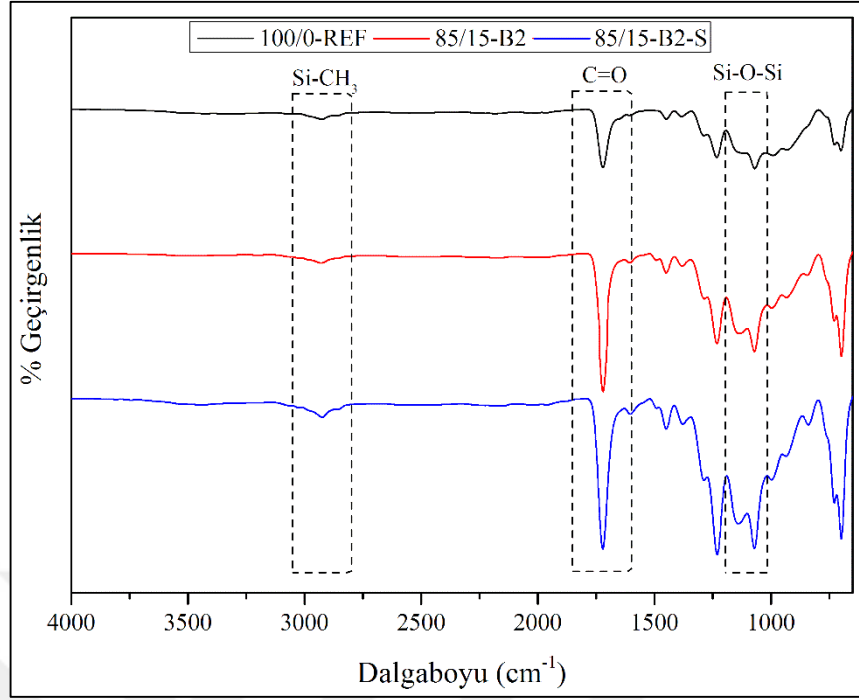
#### 4.2.6. Silan katkılı kompozitlerin yapısal özellikleri

Yapılan silan modifikasyonun kompozit bileşenleri arasında meydana getirdiği muhtemel etkileşimlerin belirlenmesi amacıyla örneklerin FTIR spektrumları elde edilmiştir. Şekil 4.101 - 4.103'te her bir tane boyutu için birer kompozit grubunun kontrol örneği, silansız ve silanlı örnek için FTIR spektrumları verilmiştir.

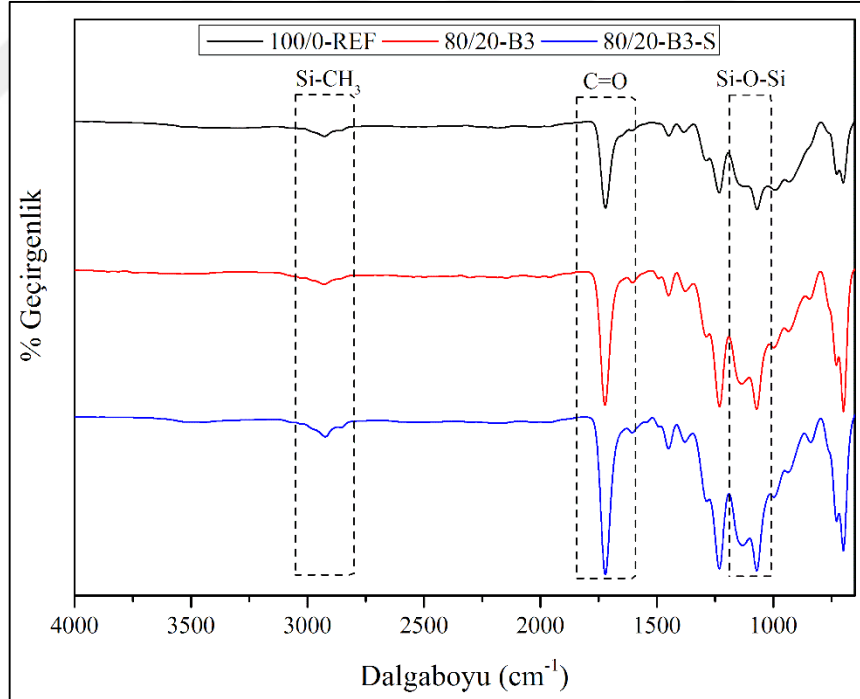
1720-1730  $\text{cm}^{-1}$  dalgaboyu aralığında esterden gelen C=O esneme piki doymamış polyesterin karakteristik pikidir (Jia ve diğ., 2010; Huang ve diğ., 2018). MEMO silan bağlayıcı için, 2945-2955  $\text{cm}^{-1}$  bandı silandaki  $\text{CH}_3$  gruplarının asimetric gerilme titreşimini göstermekte ve 2895  $\text{cm}^{-1}$  bandı ise silanın  $\text{CH}_2$  gruplarının gerilme titreşimine denk gelmektedir. 1630  $\text{cm}^{-1}$  bandı C=C gerilme titreşimi, 1720  $\text{cm}^{-1}$  bandı C=O gerilme titreşimi ve 1050-1100  $\text{cm}^{-1}$  dalgaboyu aralığı Si-O-Si gruplarının gerilme titreşimi ile ilişkilidir (Park ve Jin, 2001; Romanzini ve diğ., 2015; Mishra ve diğ., 2012; Gharbi ve diğ., 2014).



Şekil 4.101. B1 boyutunda atık kullanıldığı durumda kimyasal modifikasyonun yapısal analizi için FTIR spektrumları



Şekil 4.102. B2 boyutunda atık kullanıldığı durumda kimyasal modifikasyonun yapısal analizi için FTIR spektrumları



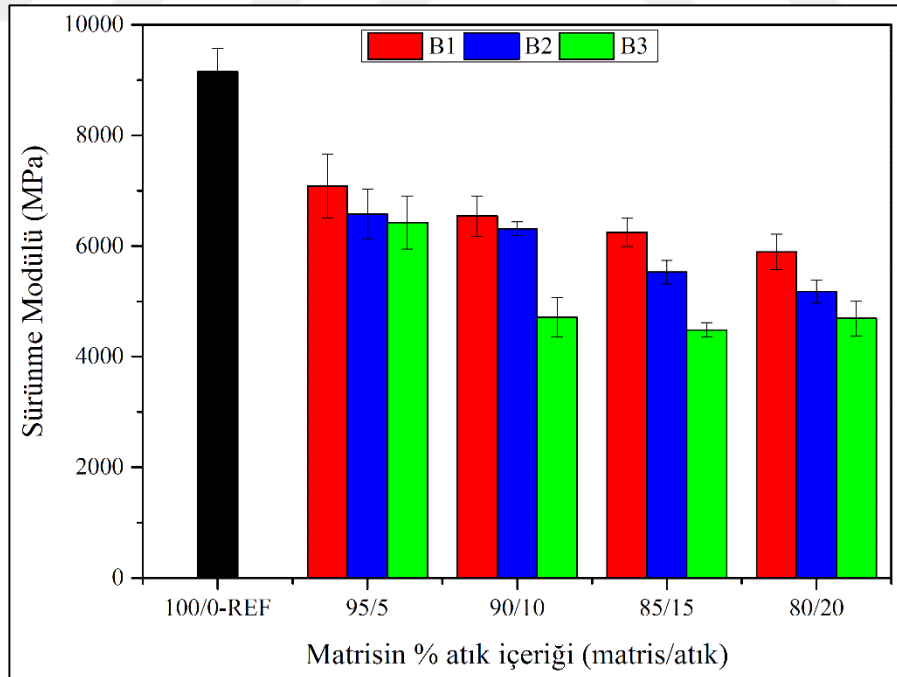
Şekil 4.103. B3 boyutunda atık kullanıldığı durumda kimyasal modifikasyonun yapısal analizi için FTIR spektrumları

FTIR spektrumları incelendiğinde, kontrol örneği de dâhil olmak üzere silan kullanılmamış kompozit örnekte de silanın karakteristik pikleri görülmektedir. Bu durum kompozit üretiminde kullanılan cam elyafın ön kaplamasında silan bağlayıcı

kullanılması kaynaklı olabilir. Fakat silan bağlayıcı ilave edilen kompozitlerde, 1070-1100  $\text{cm}^{-1}$  bandında görülen Si-O-Si pik şiddetinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte yine silanın C=O gerilme titreşimi verdiği 1720  $\text{cm}^{-1}$  bandında da pik şiddetinde hafif bir artış gözlenmiştir.

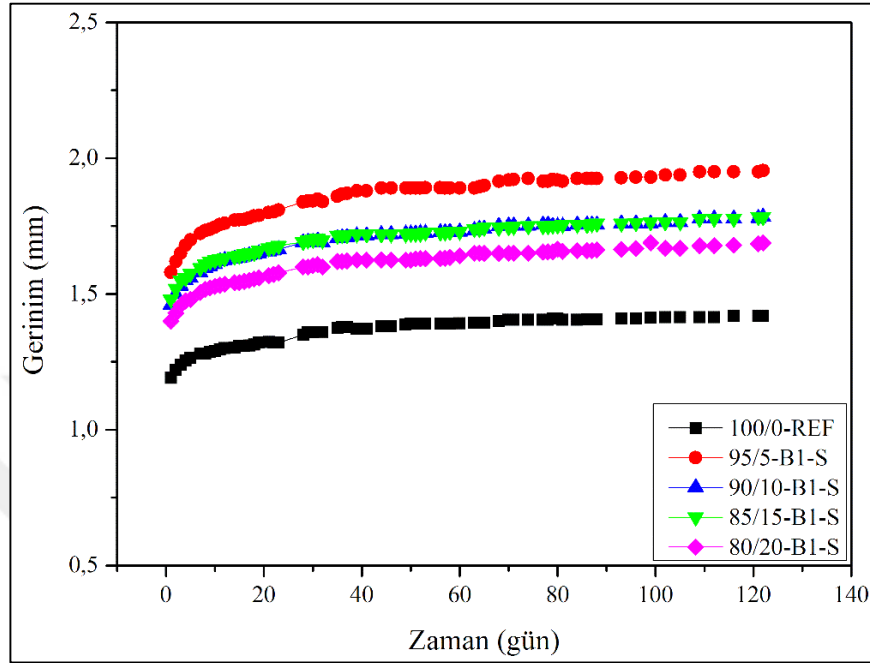
#### 4.2.7. Silan katkılı kompozitlerin sürünme özellikleri

Sürünme, malzemenin sabit sıcaklık ve sabit yük altında, visko-elastik deformasyon nedeni ile kalıcı olarak şekil değiştirmesidir (Hearn, 1997) ve malzemenin viskoelastik davranışı hakkında bilgi verir (Li ve diğ., 2019). Silan katkılı kompozit örneklerin sürünme modülü Şekil 4.104'te verilmiştir. Sürünme modülü, örneklere ağırlık yüklenmesinden 1 saat ve 24 saat sonra ölçülen eğilme miktarları kullanılarak TS EN ISO 899'a göre hesaplanmıştır. Şekil 4.104 incelendiğinde, daha önce aynı örnekler için yapılan mekanik testlerden elde edilen sonuçlara paralel olarak, atık tane boyutu ve yükleme oranının artışı ile  $E_c$  değerinin de düştüğü görülmektedir. Bununla birlikte, silan kullanılmadığı durum ile kıyaslama yapıldığında ortalama %6 daha yüksek eğilme modülü değerleri elde edildiği anlaşılmaktadır.

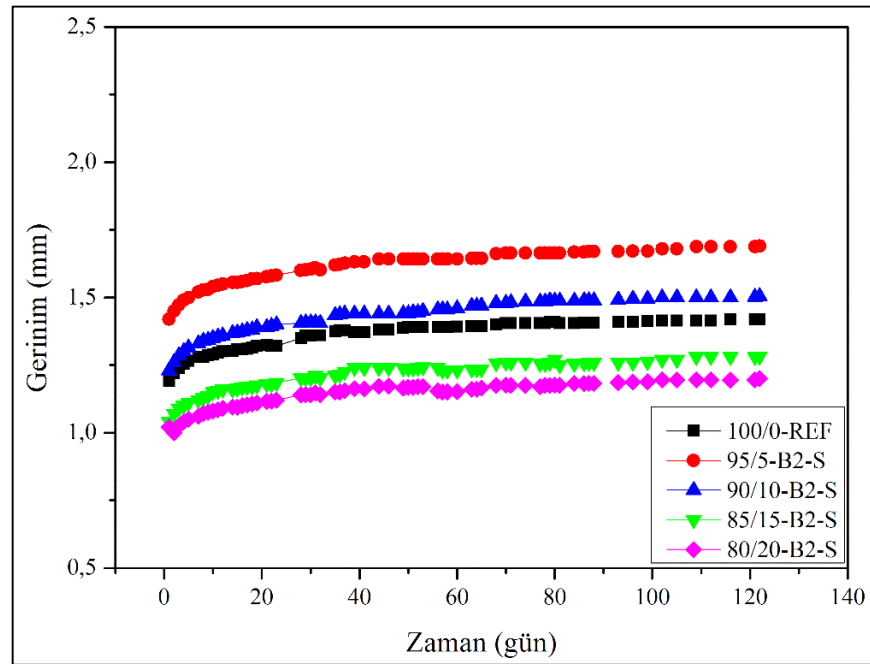


Şekil 4.104. MEMO kullanıldığı durumda kompozitlerin sürünme davranışı

Kompozit örneklerin uzun vadedeki sürünme davranışlarını incelemek amacı ile 120 gün devam ettirilen test sonuçları gerinim-zaman grafikleriyle Şekil 4.105 - 4.111’de raporlanmıştır.

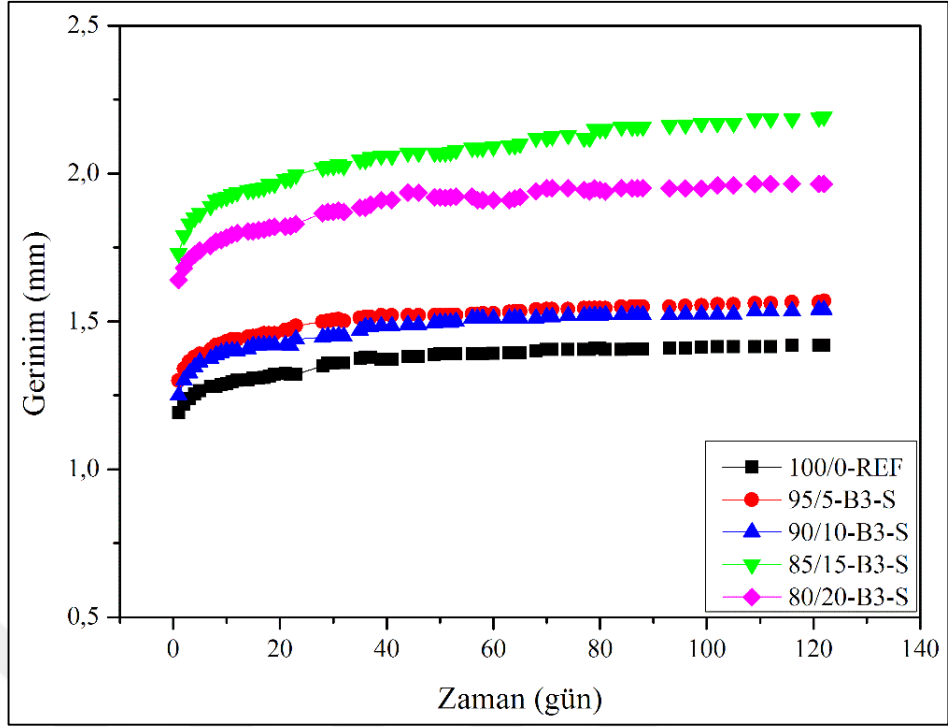


Şekil 4.105. MEMO kullanıldığı durumda B1 boyutunda atığın kompozitlerin sürünme davranışına etkisi

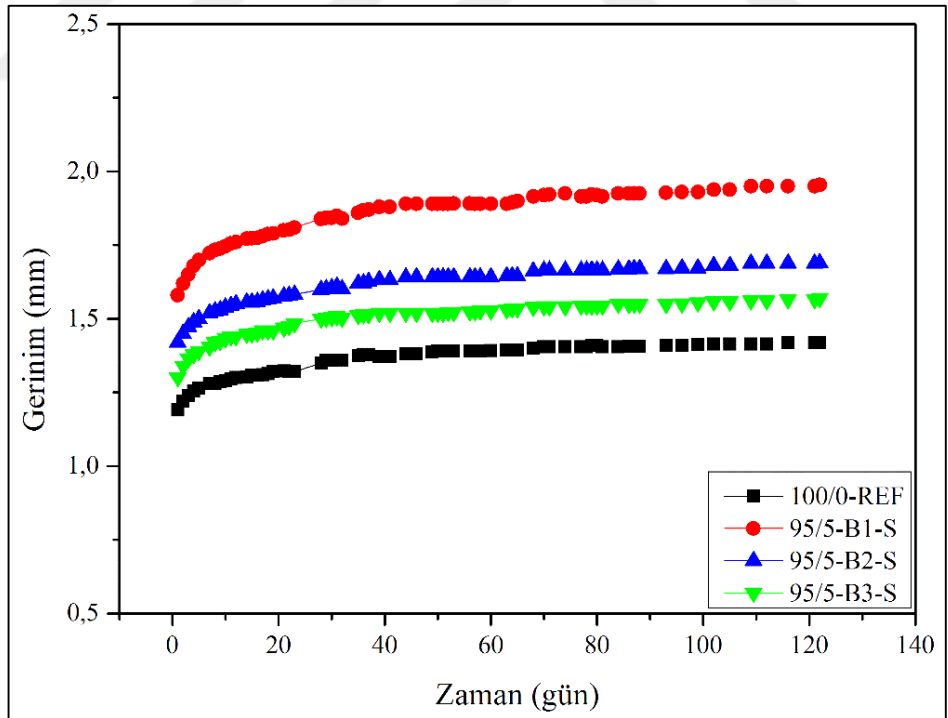


Şekil 4.106. MEMO kullanıldığı durumda B2 boyutunda atığın kompozitlerin sürünme davranışına etkisi

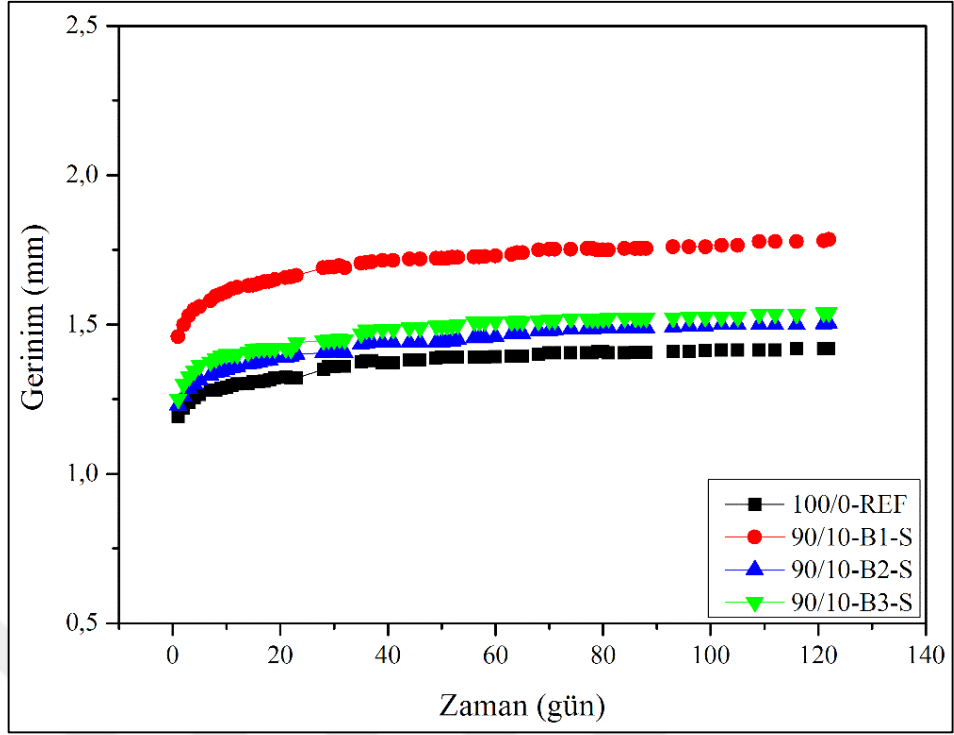




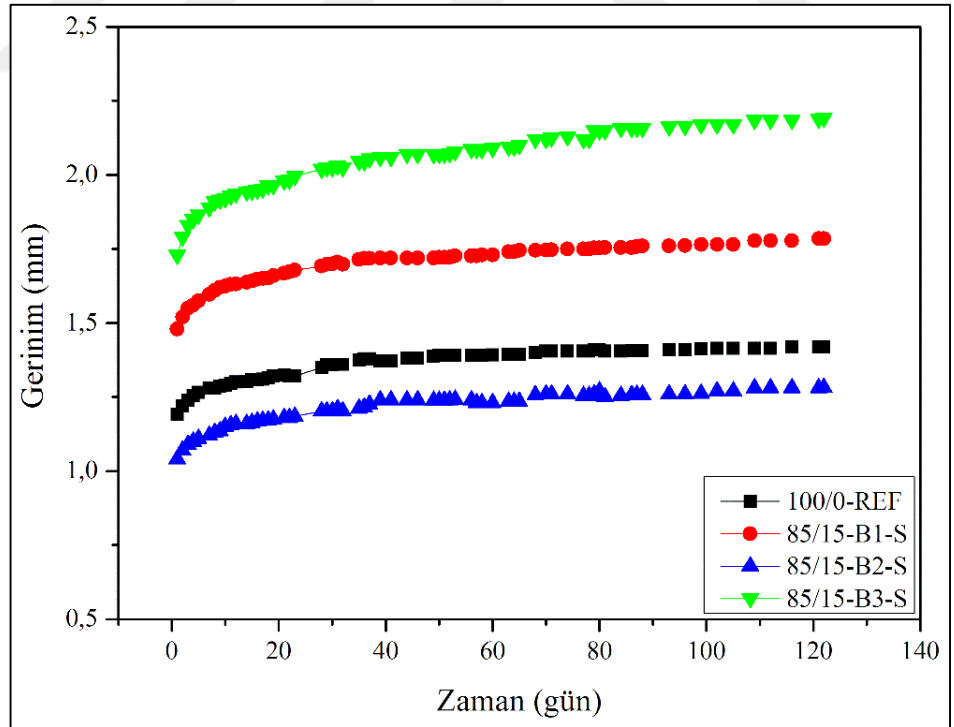
Şekil 4.107. MEMO kullanıldığı durumda B3 boyutunda atığın kompozitlerin sürünme davranışına etkisi



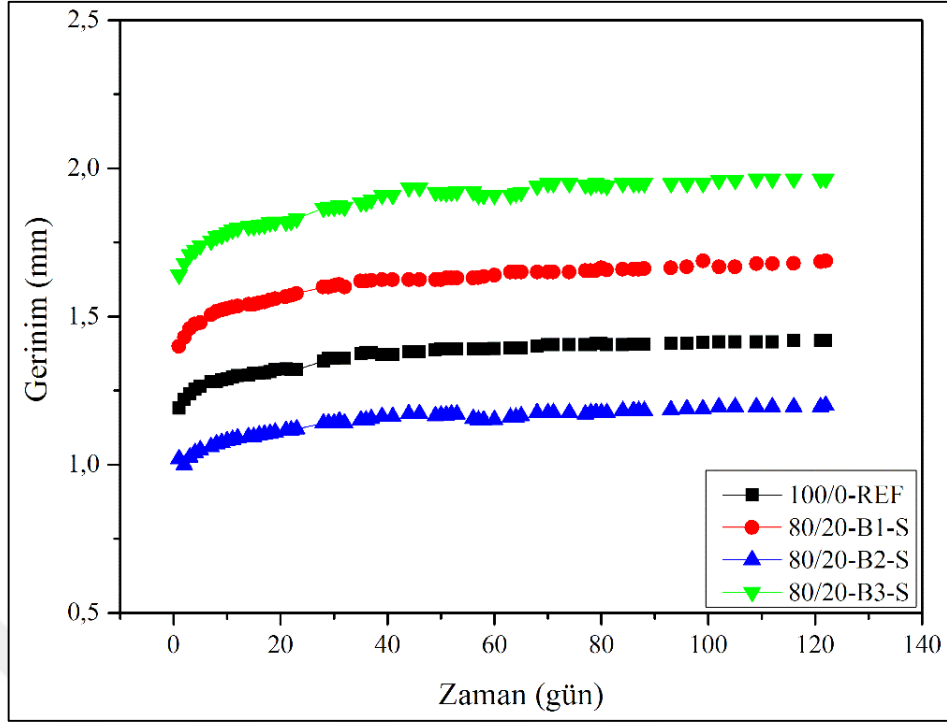
Şekil 4.108. MEMO kullanıldığı durumda %5 oranında atık ilavesinin kompozitlerin sürünme davranışı



Şekil 4.109. MEMO kullanıldığı durumda %10 oranında atık ilavesinin kompozitlerin sürünme davranışı



Şekil 4.110. MEMO kullanıldığı durumda %15 oranında atık ilavesinin kompozitlerin sürünme davranışı



Şekil 4.111. MEMO kullanıldığı durumda %20 oranında atık ilavesinin kompozitlerin sürünme davranışı

Silan katkıli kompozit örneklerin uzun süreli sürünme davranışları incelendiğinde, kullanılan atık miktarının artışı ile birlikte sürünme ile uzama miktarının azaldığı görülmüştür. Sonuçlar atık tane boyutu açısından değerlendirildiğinde ise, tane boyutunun artışı ile bir miktar iyileşme gözlenmekle birlikte, sürünme davranışı en iri tane boyutu (B3) ile ince tane boyutunda (B1) benzerdir. Bu durum, sürünme davranışının belli bir tane boyutuna kadar iyileştiğini ve sonrasında kullanılan iri tanelerin çevresinde kalan boşlukların oluşturduğu zayıf noktalardan olumsuz etkilendiğini, bir başka deyişle sürünmenin kolaylaştığını işaret etmektedir. Silan katkıli kompozit örneklerin 120 gün sonundaki sürünme miktarları Tablo 4.5'te verilmiştir. Silan kullanılmadığı duruma ait sonuçlar ile karşılaştırıldığında, silan katkıli kompozitlerde elde edilen deplasman değerlerinde bir miktar iyileşme gözlenmiştir. Takemura ve diğ. (2012) yaptığı çalışmada silan ilavesi ile kompozitlerin sürünme davranışında benzer değişimler elde edilmiş ve bu bulgu silan varlığında gelişen arayüzey yapışması ile ilişkilendirmiştir.

Tablo 4.5. Kompozit örneklerin 120 gün sonundaki sürünme miktarları

<b>Örnek</b>	<b>Deplasman (mm)</b>
100/0-REF	0,23
95/5-B1	0,375
90/10-B1	0,325
85/15-B1	0,305
80/20-B1	0,288
95/5-B2	0,27
90/10-B2	0,275
85/15-B2	0,242
80/20-B2	0,18
95/5-B3	0,27
90/10-B3	0,29
85/15-B3	0,462
80/20-B3	0,325

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli polyester esaslı atıklarının verimli geri kazanımı amacı ile benzer bileşimdeki kompozit malzeme içerisinde yeniden kullanılması değerlendirilmiştir. Hazırlanan kompozitlerin yük taşımayacak animasyon/eğlence ürünlerinde kullanımı hedeflenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında atık tane boyutu ve atık miktarının değişken olarak alınmasıyla üretilen kompozitlerin fiziksel, mekanik, ısıl, dinamik-mekanik, morfolojik ve sürünme özellikleri incelenmiştir. İkinci aşamada ise matris-atık ve matris-elyaf arayüzey etkileşimini iyileştirmek için çeşitli silan bağlayıcılar kullanılmış, silan bağlayıcı tipi ve kullanım oranının etkileri araştırılmıştır.

Atık içeren reçine ile kompozit hazırlanmadan önce, atık ilavesinin reçinenin reolojik özellikleri ve kür profilinde meydana getirdiği değişiklikler araştırılmış, bu amaçla başlangıçta ve atık ilavesi sonrasında reçinenin jelleşme süresi, pik kür sıcaklığı, pik kür süresi, viskozitesi, post-kür uygulanmadan önceki ve sonraki lineer büzülmesi ve sertlikleri ölçülmüştür. Atık ilavesinin polyesterin jel ve kür süresini kısalttığı, ancak eşdeğer başlatıcı konsantrasyonu uygulandığında bu durumun önlenebildiği görülmüştür. Atık miktarının artışı ile elde edilen daha düşük pik kür sıcaklıkları ise azalan ısı kapasitesine bağlanmıştır.

Kullanılan atık miktarının artışı ile viskozite ve tiksotropi değerleri de artış göstermiştir. Viskozite artışı, reçinenin işlenebilirliği açısından olumsuz bir sonuç meydana getirirse de tiksotropi, el yatırması prosesinde ihtiyaç duyulan bir özelliktir ve dolayısı ile tiksotropi artışı olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Lineer büzülme, bir kompozit parçadaki artık gerilimi tanımlamak için önemli bir parametredir ve istenmeyen bir etkidir. Atık CTP kullanımı ile lineer büzülme oranının yarı yarıya azaldığı görülmüştür. Dolayısı ile atık CTP kullanımının bu anlamda dolaylı bir fayda sağladığı da düşünülmüştür. Ayrıca atık ilavesinin sertlik artışına neden olması, kompozitlerin bu çalışmadaki kullanım amacı göz önünde bulundurularak bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

Çalışmanın birinci aşamasında, atık tane boyutu, atık oranı ve elyaf kat uygulama sayısının kompozitin mekanik özelliklerine etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Atık kullanılmadığı durumda (100/0-REF) kat uygulama sayısı artışı ile mekanik özelliklerin iyileştiği görülmüştür. Fakat atık ilavesi ile bu durum bir avantaja dönüştürülememiştir. Çekme sırasındaki davranış kat sayısı ile belirgin bir farklılık göstermezken, eğme ve darbe testlerinde en iyi sonuçlar 6 kat işleme ile üretilen kompozitlerde elde edilmiştir. Ayrıca kat sayısının artışı ile kısa kiriş dayanımındaki düşüş de göz önünde bulundurularak optimum işleme sayısı 6 olarak belirlenmiştir.

Kompozitlerin mekanik özellikleri genel olarak değerlendirildiğinde, hem atık tane boyutu hem de atık miktarının artışı ile beklenildiği üzere mekanik özelliklerde kayıp gözlenmiştir. CTP atığı sadece fiziksel işlemde geçerek toz haline getirildiği için kimyasal bağlanmaya katılmayarak kompozit içerisindeki çaprazbağ yoğunluğunu düşürmektedir.

Atık oranının ve tane boyutunun artışı ile kompozit örneklerin elyaf içeriğinin azaldığı görülmüştür. Azalan elyaf oranının kompozitin mekanik özelliklerinde belirgin bir kayba yol açması beklenen bir sonuçtur. Bu durum, reçine içerisindeki atık oranı artışı ile viskozitenin artması sonucu elyafların ıslanması için daha fazla reçineye ihtiyaç duyulması ile açıklanabilir. Endüstriyel uygulamalarda bu amaçla çeşitli katkı maddeleri veya solventler kullanarak reçine viskozitesini düşürmek mümkündür. Buradan hareketle, atık varlığının, elyaf oranındaki azalmadan bağımsız olarak kompozit özelliklerine bireysel etkilerinin de araştırılması için kompozitlerin mekanik özellikleri, içerdikleri elyaf oranına göre normalize edilerek de değerlendirilmiştir. Normalize özellik kayıpları, orijinal mekanik özellik değişimleri ile kıyaslandığında neredeyse üçte bir düzeyindedir. Buradan, kompozit özelliklerindeki kaybın tamamının doğrudan kompozit içindeki atık varlığından kaynaklanmadığı, bir kısmının atık içeren reçinenin modifiye edilmeden uygulanması nedeniyle prosesteki güçlüklerden kaynaklandığı düşünülmüştür.

Dinamik-mekanik analiz sonuçları incelendiğinde, yüksek oranda atık kullanımında modül değerlerindeki düşüşün daha yüksek sıcaklıklara taşındığı görülmüştür. Yüksek oranlardaki atıklarda bu durum daha da belirgindir. Benzer şekilde tane boyutundaki artış ile de modül değerlerindeki düşüş daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmiştir. Bir

başka deyişle, hem kullanılan atık miktarının hem de atık tane boyutunun artışı ile kompozit örneklerin camsı geçiş sıcaklıklarının arttığı görülmüştür.  $T_g$  değerlerindeki artış, atık kullanımı ile kompozit içerisindeki zincir hareketliliğinin kısıtlandığını ve kompozitlerin kullanım sıcaklığı sınırlarının yükseldiğini göstermektedir. Bu bulguları destekler şekilde atık miktarının ve atık tane boyutunun artışı ile kompozitlerin yük altında eğilme sıcaklıklarının da arttığı görülmektedir.

SEM görüntülerinden, atık ilavesi ile ya da tane boyutu artışı ile matris-takviye arayüzeyinde herhangi bir değişim ya da olumsuz bulgu görülmemekle birlikte, atık içerisinde bulunan elyafların da yapıya bağlanabildiği görülmektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, atığın yeni üretilen kompozitlerde kullanımı durumunda mekanik özelliklerdeki kaybı en aza indirmek amacı ile atık-matris arayüzey etkileşimini silanlama yoluyla geliştirmek üzere AMMO, MEMO ve VTMO silan bağlayıcı katkıları ile çalışmalar yapılmıştır. Ön çalışmalar değerlendirildiğinde, en olumlu sonuçların atık miktarı baz alınarak %1 MEMO kullanımında elde edildiği görülmüş ve çalışmanın devamında elyaf takviyeli kompozit örnekleri söz konusu oranda MEMO kullanılarak üretilmiştir.

MEMO ilavesi ile üretilen kompozitlerin çekme dayanımında %17, eğme, kısa kiriş ve basma dayanımında %7, darbe dayanımında %8 oranına kadar iyileşme sağlanmıştır. SEM analizi ile, MEMO kullanıldığı durumda kompozit örneklerde elyaf-matris ve atık-matris yüzeylerinin çok daha iyi bağlandığı görülmüştür. Bu durum, silan bağlayıcı kullanıldığı durumda gözlenen mekanik dayanım artışını açıklar niteliktedir.

Dinamik-mekanik analiz sonuçlarında, silan katkısının başlangıç dinamik depo modülü değerlerini ve modülün hızlı düşüş sergilediği sıcaklıklarını arttırdığı görülmüştür. Kompozitin depo modülündeki iyileşme, matris-elyaf arayüzey etkileşiminin ve bağ kuvvetinin artması ile açıklanabilir. Hem kullanılan atık miktarının artışı ile, hem de tane boyutunun artışı ile kompozit örneklerin  $T_g$  değerlerinde artış gözlenirken,  $\tan \delta$  pik yüksekliklerinde belirgin bir şekilde azalma gözlenmiştir.  $T_g$  değerlerindeki artış, atık kullanımı ile kompozit içerisindeki zincir hareketliliğinin kısıtlandığını ve buna bağlı olarak da kompozitlerin servis sıcaklığının yükseldiğini işaret etmektedir.  $\tan \delta$  pik yüksekliğinin azalması ile ilgili olarak da,

reçine-dolgu/takviye yapışmasındaki iyileşmenin dolgu/takviye çevresinde zincir hareketliliğini kısıtlaması sonucu gerçekleştiği bilinmektedir.

B1 ve B2 olmak üzere göreceli daha düşük tane büyüklüklerinde atık ilavesi durumunda silan modifikasyonunun kompozitlerin HDT değerlerinde belirgin bir değişime neden olmadığı tespit edilirken, daha büyük tane boyutlu (B3) atık içeren kompozitlerde ortalama 4 °C'lik bir artış gözlenmiştir.

Silan katkılı kompozit örneklerin uzun vadedeki sürünme davranışları incelendiğinde, kullanılan atık miktarının artışı ile birlikte sürünme miktarının azaldığı görülmektedir. Tane boyutunun artışı ile de sürünme özelliklerinde bir miktar iyileşme gözlenmiş ve en iri tane boyutunda (B3) ince tane boyutuna benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, sürünme davranışının belli bir tane boyutuna kadar iyileştiğini ve sonrasında kullanılan iri tanelerin çevresinde kalan boşluklar (zayıf noktalar) sebebi ile zayıfladığını işaret etmektedir. Silan kullanılmadığı durum ile karşılaştırıldığında, silan katkılı kompozitlerde elde edilen deplasman değerlerinde bir miktar iyileşme elde edildiği söylenebilir.

Malzeme değeri oldukça yüksek olan bu atıkların, yeni üretilen CTP ürün içinde, uygun tane büyüklüğünde ve/veya uyumluluğunun geliştirilmesi yoluyla matris-atık etkileşimi artırılarak değerlendirilmesinin, atıkların katma değerinin artırılabilmesi ve olumsuz çevresel etkilerinin giderilmesi anlamında önemli bir katkı olabileceği düşünülmektedir.

Çalışmada kullanılan el yatırması tekniğinin çok sayıda avantajlı yönü olmakla birlikte, basınçlı kalıplamada olduğu gibi basınç etkisinde atık taneleri sebebi ile oluşabilecek boşluklu yapının giderilebilmesi söz konusu değildir. CTP esaslı atığın yeni kompozit malzemelerde değerlendirilmesi amacı ile, el yatırması prosesinin; tek yüzü düzgün ürün eldesi, açık kalıp prosesi olması sebebi ile stiren emisyonu, işgücü yoğun bir proses olması ve üretim kalitesinin işçinin yeteneklerine bağlı olması gibi bazı dezavantajlarını ortadan kaldıracak basınçlı kalıplama teknikleri ile çalışılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, atık içeren kompozitlerin yüksek servis sıcaklıklarına uygunluğunu değerlendirmek amacı ile yüksek sıcaklıklarda mekanik ve dinamik özelliklerin incelenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

Adams D. F., Carlsson L. A., Pipes R. B., *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*, 3rd ed., CRC Press, London, 2003.

Akovali G., *Handbook of Composite Fabrication*, 1st ed., Rapra Technology Ltd., Shrewsbury, 2001.

Anane-Fenin K., Akinlabi E. T., Recycling of Fibre Reinforced Composites: A Review of Current Technologies, *DII-2017 Conference on Infrastructure Development and Investment Strategies for Africa: Infrastructure and Sustainable Development - Impact of Regulatory and Institutional Framework*, Livingstone, Zambia, 30 August-1 September 2017.

Ansari M. N. M., Ismail H., The Effect of Silane Coupling Agent on Mechanical Properties of Feldspar Filled Polypropylene Composites, *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2009, **28**, 3049-3060.

Aruniit A., Kers J., Tall K., Influence of Filler Proportion on Mechanical and Physical Properties of Particulate Composite, *Agronomy Research*, 2011, **1**, 23-29.

Asmatulu E., Twomey J., Overcash M., Recycling of Fiber-Reinforced Composites and Direct Structural Composite Recycling Concept, *J. Compos. Mater.*, 2014, **48**(5), 593-608.

Asokan P., Osmani M., Price A. D. F., Assessing the Recycling Potential of Glass Fibre Reinforced Plastic Waste in Concrete and Cement Composites, *J. Cleaner Prod.*, 2009, **17**(9), 821-829.

Asokan P., Osmani M., Price A. D. F., Improvement of the Mechanical Properties of Glass Fibre Reinforced Plastic Waste Powder Filled Concrete, *Constr. Build. Mater.*, 2010, **24**(4), 448-460.

ASTM D2344, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, *ASTM International*, West Conshohocken, 2016.

Badawy A. A. M., Impact Behavior of Glass Fibers Reinforced Composite Laminates at Different Temperatures, *Ain Shams Eng. J.*, 2012, **3**, 105-111.

Bower D. I., *An Introduction to Polymer Physics*, 1st ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2002.

Brundle C. R., Evans C. A., Wilson S., *Encyclopedia of Materials Characterization*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, Massachusetts, 1992.

- Campbell, F., C., *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, 1st ed., Elsevier, Oxford, 2004.
- Carlsson L. A., Adams D. F., Pipes R. B., Basic Experimental Characterization of Polymer Matrix Composite Materials, *Polym. Rev.*, 2013, **53**(2), 277-302.
- Carraher C. E., *Polymer Chemistry*, 7th ed., CRC Press, Florida, 2008.
- Chan N., Carran G., Page D. J. Y. S., Cunningham N., Heat Deflection and Mechanical Properties of PVC/PMMA/Clay Composites, *64th Annual Technical Conference, Society of Plastics Engineers*, Charlotte, USA, 1 May 2006.
- Chen J., Teng Z., Wu J., Recycling of Waste FRP and Corn Straw in Wood Plastic Composite, *Polym. Compos.*, 2017, **38**(10), 2140-2145.
- Cheremisinoff N. P., *Polymer Characterization-Laboratory Techniques and Analysis*, 1st ed., Noyes Publications, New Jersey, 1996.
- Conroy A., Halliwell S., Reynolds T., Composite Recycling in the Construction Industry, *Composites Part A*, 2006, **37**(8), 1216-1222.
- Correia J. R., Almeida N. M., Figueira J. R., Recycling of FRP Composites: Reusing Fine GFRP Waste in Concrete Mixtures, *J. Cleaner Prod.*, 2011, **19**(15), 1745-1753.
- Cui H., Kessler M. R., Pultruded Glass Fiber/Bio-Based Polymer: Interface Tailoring With Silane Coupling Agent, *Composites Part A*, 2014, **65**, 83-90.
- Cunliffe A. M., Williams P. T., Characterisation of Products From The Recycling of Glass Fibre Reinforced Polyester Waste By Pyrolysis, *Fuel*, 2003, **82**(18), 2223-2230.
- Dehghan A., Peterson K., Shvarzman A., Recycled Glass Fiber Reinforced Polymer Additions to Portland Cement Concrete, *Constr. Build. Mater.*, 2017, **146**, 238-250.
- de Marco I., Caballero B., Torres A., Laresgoiti F., Chomon J., Cabrero A., Recycling Polymeric Waste by Means of Pyrolysis, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2002, **77**(7), 817- 824.
- Dizdar Z., Poli(Laktik Asit) Esaslı Filmlerin Isı ve Basınç Yardımıyla Kendine ve Etilen Vinil Alkol Kopolimerine Yapışma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2012, 301628.
- Driscoll S. B., *The Basics of Testing Plastics: Mechanical Properties, Flame Exposure, and General Guidelines*, ASTM International, 1st ed., Mayfield, 1998.
- Durgun İ., Vatansever O., Ertan R., Yavuz N., Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kompozit Parça İmalat Yöntemlerinin Deneysel Olarak Karşılaştırması, *Mühendis ve Makine*, 2014, **55**(649), 58-63.
- EL-Wazery M. S., EL-Elamy M. I., Zoalfakar S. H., Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites, *Int. J. Appl. Sci. Eng.*, 2017, **14**, 121-131.

Eng C. C., Ibrahim N. A., Zainuddin N., Ariffin H., Yunus W. M. Z. W., Chemical Modification of Oil Palm Mesocarp Fiber by Methacrylate Silane: Effects on Morphology, Mechanical, and Dynamic Mechanical Properties of Biodegradable Hybrid Composites, *Bioresources*, 2016, **11**, 861-872.

Farinha C. B., Brito J., Veiga R., Assessment of Glass Fibre Reinforced Polymer Waste Reuse as Filler in Mortars, *J. Cleaner Prod.*, 2019, **210**, 1579-1594.

Feng Y., Zhao F., Xu H., Recycling and Utilization of Waste Glass Fiber Reinforced Plastics, *International Symposium on Materials Application and Engineering (SAME 2016)*, Chiang Mai, Thailand, 20-21 August 2016.

Fu S., Lauke B., Effects of Fiber Length and Fiber Orientation Distributions on the Tensile Strength of Short-Fiber-Reinforced Polymers, *Comp. Sci. Technol.*, 1996, **56**(10), 1179-1190.

Garcia D., Vegas I., Cacho I., Mechanical Recycling of GFRP Waste as Short-Fiber Reinforcements in Microconcrete, *Constr. Build. Mater.*, 2014, **64**(1), 293-300.

Ghandi K., A Review of Ionic Liquids, Their Limits and Applications, *Green Sustainable Chem.*, 2014, **4**(1), 44-53.

Gharbi A., Hassen R. B., Boufi S., Composite Materials From Unsaturated Polyester Resin And Olive Nuts Residue: The Effect of Silane Treatment, *Ind. Crops Prod.*, 2014, **62**, 491-498.

Gharde S., Kandasubramanian B., Mechanochemical and Chemical Recycling Methodologies For The Fibre Reinforced Plastic (FRP), *Environ. Technol. Innovation*, 2019, **14**, 1-30.

Grammatikos S., Tsampas S., Papatzani S., Luping T., Löfgren I., Petterson J., On the Mechanical Recycling of Decommissioned Insulation Polymer Composite Components, *4th International Conference on Manufacturing Technologies (ICMT)*, Seattle, USA, 17-19 January 2020.

Guo C., Li L., Wang Q., Investigation on the Compatibilizing Effect of M-Isopropenyl- $\alpha,\alpha$ -Dimethylbenzyl Isocyanate Grafted Polypropylene on Polypropylene and Wood Flour Composites, *Wood Sci. Technol.*, 2012, **46**, 257-270.

Hearn E. J., *Mechanics of Materials: An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials*, Butterworth-Heinemann, 3rd ed., Oxford, 1997.

Hodgkinson J. M., *Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2000.

Huang Z., Ge H., Zhao Y., Liu F., Yin J., Reuse FRP Waste as Filler Replacement for Sisal Fiber Reinforced Sheet Molding Compound, *Polym. Compos.*, 2018, **39**(6), 1896-1904.

Husseinsyah S., Mostapha M., The Effect of Filler Content on Properties of Coconut Shell Filled Polyester Composites, *Malaysian Polymer Journal*, 2011, **6**, 87-97.

Idicula M., Malhotra S. K., Joseph K., Thomas S., Dynamic Mechanical Analysis of Randomly Oriented Intimately Mixed Short Banana/Sisal Hybrid Fibre Reinforced Polyester Composites, *Compos. Sci. Technol.*, 2005, **65**, 1077-1087.

Ikenaga K., Nagamitsu H., Kikukawa T., Kusakabe K., *International Conference on Process Engineering and Advanced Materials (ICPEAM2018)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 13–14 August 2018.

Iwaya T., Tokuno S., Sasaki M., Goto M., Shibata K., Recycling of Fiber Reinforced Plastics Using Depolymerization By Solvothermal Reaction With Catalyst, *J. Mater. Sci.*, 2008, **43**(7), 2452-2456.

İlhan R., Feyzullahoğlu E., Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaflar ve Dolgu Maddeleri, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2019, **6**(2), 355-381.

Jang J., Lee J. Y., Jeong J. K., Performance Improvement of Glass-Fiber-Reinforced Polystyrene Composite Using a Surface Modifier. II. Mechanical Properties of Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1996, **59**, 2069-2077.

Jia Z., Li X., Zhao Q., Effect of Artificial Weathering on Surface Properties of Unsaturated Polyester (UP) Resin, *Mater. Chem. Phys.*, 2010, **121**(1-2), 193-197.

Jiang G., Pickering S. J., Lester E. H., Turner T. A., Wong K. H., Warrior N. A., Characterisation of Carbon Fibres Recycled From Carbon Fibre/Epoxy Resin Composites Using Supercritical N-Propanol, *Compos. Sci. Technol.*, 2009, **69**(2), 192-198.

Job S., Recycling Glass Fibre Reinforced Composites - History And Progress, *Reinf. Plast.*, 2013, **57**(5), 19-23.

Kamimura A., Kazuo Y., Kuratani T., Oishi Y., Watanable T., Yoshida T., Tomonaga F., DMAP as an Effective Catalyst to Accelerate the Solubilization of Waste Fiber-Reinforced Plastics, *ChemSusChem*, 2008, **1**(10), 845-850.

Kao C. C., Ghita O. R., Hallam K. R., Heard P. J., Evans K. E., Mechanical Studies of Single Glass Fibres Recycled From Hydrolysis Process Using Sub-Critical Water, *Composites Part A*, 2012, **43**(3), 398-406.

Karlı Yılmaz N. G., Karbon Lif Takviyeli Termoplastik Karmaların Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 283046.

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

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

Kennerley J. R., Kelly R. M., Fenwick N. J., Pickering S. J., Rudd C. D., The Characterisation and Reuse of Glass Fibres Recycled From Scrap Composites By The Action of a Fluidised Bed Process, *Composites Part A*, 1998, **29**(7), 839-845.

Kimm M., Pico D., Gries T., Investigation of Surface Modification and Volume Content of Glass and Carbon Fibres From Fibre Reinforced Polymer Waste For Reinforcing Concrete, *J. Hazard. Mater.*, 2020, **390**, 1-12.

Kouparitsas C. E., Kartalis C. N., Varelidis P. C., Tsenoglou C. J., Papaspyrides C. D., Recycling of the Fibrous Fraction of Reinforced Thermoset Composites, *Polym. Compos.*, 2002, **23**(4), 682-689.

Krauklis A. E., Karl C. W., Gagani A. I., Jorgensen J. K., Composite Material Recycling Technology – State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s, *J. Compos. Sci.*, 2021, **5**(1), 1-33.

Krzan A., Microwave Irradiation as an Energy Source in Poly(Ethylene Terephthalate) Solvolysis, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1998, **69**(6), 1115–1118.

Kubota S., Ito O., Miyamoto H., Method Of Recycling Cured Unsaturated Polyester Resin Waste, 1998, U. S. Patent No. 5,776,989A., *U. S. Patent and Trademark Office*.

Kumar D., Singh K. K., Ansari M. T. A., Effect of Ply Lay Up Sequence on Interlaminar Shear Strength of Symmetric and Asymmetric GFRP Composite, *Mater. Today: Proc.*, 2020, **22**(4), 2241-2246.

Lampman S., *Characterization and Failure Analysis of Plastics*, ASM International, 1st ed., Ohio, 2003.

Lavoratti A., Zattera A. J., Amico S. C., Mechanical and Dynamic-Mechanical Properties of Silane-Treated Graphite Nanoplatelet/Epoxy Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2018, **135**, 1-10.

Lee G. W., Lee N. J., Janga J., Lee K. J., Nam J. D., Effects of Surface Modification on the Resin-Transfer Moulding (RTM) of Glass-Fibre/Unsaturated-Polyester Composites, *Compos. Sci. Technol.*, 2002, **62**, 9-16.

Lee S., Kim W. S., Dissolution Technology Development of E-Glass Fiber for Recycling Waste of Glass Fiber Reinforced Polymer, *J. Korean Ceram. Soc.*, 2019, **56**(6), 577-582.

Lester E., Kingman S., Wong K. H., Rudd C., Pickering S., Hilal N., Microwave Heating as a Means For Carbon Fibre Recovery From Polymer Composites: a Technical Feasibility Study, *Mater. Res. Bull.*, 2004, **39**(10), 1549-1556.

Li X., Liu W., Fang H., Huo R., Wu P., Flexural Creep Behavior and Life Prediction of GFRP-Balsa Sandwich Beams, *Compos. Struct.*, 2019, **224**, 1-12.

Lim H., Hoag S. W., Plasticizer Effects on Physical–Mechanical Properties of Solvent Cast Soluplus Films, *Pharm. Sci. Tech.*, 2013, **14**(3), 903-910.

Lin T., Jia D., He P., Wang M., Liang D., Effects of Fiber Length on Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Short Carbon Fiber Reinforced Geopolymer Matrix Composites, *Mater. Sci., Eng A.*, 2008, **497**(1-2), 181-185.

Luo H., Zhang C., Xiong G., Wan Y., Effects of Alkali and Alkali/Silane Treatments of Corn Fibers on Mechanical and Thermal Properties of Its Composites With Polylactic Acid, *Polym. Compos.*, 2016, **37**, 3499-3507.

Mark H. F., *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, 1st ed., John Wiley & Sons, Inc., Chichester, 2004.

Mark U. C., Madufor I. C., Obasi H. C., Mark U., Influence of Filler Loading on the Mechanical and Morphological Properties of Carbonized Coconut Shell Particles Reinforced Polypropylene Composites, *J. Compos. Mater.*, 2020, **54**(3), 394-407.

Meira Castro A. C., Riberio M. C. S., Santos J., Meixedo J. P., Silva F. J. G., Fiuza A., Dinis M. L., Alvim M. R., Sustainable Waste Recycling Solution for the Glass Fibre Reinforced Polymer Composite Materials Industry, *Constr. Build. Mater.*, 2013, **45**, 87-94.

Menard K. P., *Dynamic Mechanical Analysis A Practical Introduction*, 1st ed., CRC Press, Boca Raton, 1999.

Menczel J. D., Prime R. B., *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications*, 1st ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2009.

Miracle D. B., Donaldson S. V., *ASM Handbook Volume 21: Composites*, 1st ed., ASM International, Ohio, 2001.

Mishra A. K., Allauddin S., Narayan R., Aminabhavi T. M., Raju K. V. S. N., Characterization of Surface-Modified Montmorillonite Nanocomposites, *Ceram. Int.*, 2012, **38**(2), 929-934.

Mohanty H., Verma S. K., Nayak S. K., Dynamic Mechanical and Thermal Properties of MAPE Treated Jute/HDPE Composites, *Compos. Sci. Technol.*, 2006, **66**, 538-547.

Nagel U., Yang L., Kao C. C., Thomason J. L., Effects of Thermal Recycling Temperatures on the Reinforcement Potential of Glass Fibers, *Polym. Comp.*, 2018, **39**(4) 1032-1040.

Nawab Y., Shahid S., Boyard N., Jacquemin F., Chemical Shrinkage Characterization Techniques for Thermoset Resins and Associated Composites, *J. Mater. Sci.*, 2013, **48**(16), 5387-5409.

Nikje M. M. A., Nazari F., Microwave-Assisted Polymerization of Poly(Ethylene Terephthalate) [PET] at Atmospheric Pressure, *Adv. Polym. Technol.*, 2006, **25**(4), 242–246.

Ozkoc G., Bayram G., Bayramlı E., Short Glass Fiber Reinforced ABS and ABS/PA6 Composites: Processing and Characterization, *Polym. Compos.*, 2005, **26**, 745-755.

Palmer J., Ghita O. R., Savage L., Evans K. E., Successful Closed-Loop Recycling of Thermoset Composites, *Composites Part A*, 2009, **40**(4), 490-498.

Park S., Jin J., Effect of Silane Coupling Agent on Interphase and Performance of Glass Fibers/Unsaturated Polyester Composites, *J. Colloid Interface Sci.*, 2001, **242**(1), 174-179.

Paul S. A., Sinturel C., Joseph K., Mathew G. D. G., Pothan L. A., Thomas S., Dynamic Mechanical Analysis of Novel Composites From Commingled Polypropylene Fiber and Banana Fiber, *Polym. Eng. Sci.*, 2010, **50**, 384-395.

Perrin D., Clerc L., Leroy E., Lopez-Cuesta J. M., Bergeret A., Optimizing a Recycling Process of SMC Composite Waste, *Waste Management*, 2008, **28**, 541-548.

Peters S. T., *Handbook of Composites*, 2nd ed., Chapman & Hall, London, 1998.

Pickering S. J., Kelly R. M., Kennerley J. R., Rudd C. D., Fenwick N. J., A Fluidised-Bed Process For The Recovery of Glass Fibres From Scrap Thermoset Composites, *Compos. Sci. Technol.*, 2000, **60**(4), 509-523.

Pickering S. J., Recycling Technologies For Thermoset Composite Materials-Current Status, *Composites Part A*, 2006, **37**(8), 1206-1215.

Pimenta S., Pinho S. T., Recycling Carbon Fibre Reinforced Polymers For Structural Applications: Technology Review And Market Outlook, *Waste Management*, 2011, **31**(2), 378-392.

Pingale N. D., Shukla S. R., Microwave Assisted Ecofriendly Recycling of Poly(Ethylene Terephthalate) Bottle Waste, *Eur. Polym. J.*, 2008, **44**(12), 4151-4156.

Pingale N. D., Shukla S. R., Microwave-Assisted Aminolytic Depolymerization of PET Waste, *Eur. Polym. J.*, 2009, **45**(9), 2695-2700.

Prabhu L., Krishnaraj V., Sathish S., GokulKumar S., Karthi N., Study of Mechanical and Morphological Properties of Jute-Tea Leaf Fiber Reinforced Hybrid Composites: Effect of Glass Fiber Hybridization, *Mater. Today Proc.*, 2020, **27**, 2372-2375.

Ratna D., *Handbook of Thermoset Resins*, 1st ed., iSmithers, Shrewsbury, 2009.

Reimer L., *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, 1998.

Ribeiro M. C. S., Meira-Castro A. C., Silva F. G., Santos J., Meixedo J. P., Fiuza A., Dinis M. L., Alvim M. R., Re-Use Assessment of Thermoset Composite Wastes as Aggregate and Filler Replacement for Concrete-Polymer Composite Materials: A Casestudy Regarding GFRP Pultrusion Wastes, *Resour. Conserv. Recycl.*, 2015, **104**, 417-426.

Ribeiro M. C. S., Fiuza A., Ferreira A., Dinis M. L., Castro A. C. M., Meixedo J. P., Alvim M. R., Recycling Approach Towards Sustainability Advance of Composite Materials' Industry, *Recycling*, 2016, **1**(1), 178-193.

Romanzini D., Piroli V., Frache A., Zattera A. J., Amico S. C., Sodium Montmorillonite Modified with Methacryloxy and Vinylsilanes: Influence of Silylation on the Morphology of Clay/Unsaturated Polyester Nanocomposites, *Appl. Clay Sci.*, 2015a, **114**, 550-557.

Romanzini D., Frache A., Zattera A. J., Amico S. C., Effect of Clay Silylation on Curing and Mechanical and Thermal Properties of Unsaturated Polyester/Montmorillonite Nanocomposites, *J. Phys. Chem. Solids*, 2015b, **87**, 9-15.

Saçak M., *Polimer Teknolojisi*, 1. baskı, Gazi Kitapevi, Ankara, 2005.

Sathishkumar T. P., Satheeshkumar S., Naveen J., Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites - A Review, *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2014, **33**(13), 1258-1274.

Shi J., Bao L., Kobayashi R., Kato J., Kemmochi K., Reusing Recycled Fibers in High-Value Fiber-Reinforced Polymer Composites: Improving Bending Strength By Surface Cleaning, *Compos. Sci. Technol.*, 2012, **72**(11), 1298-1303.

Shima H., Takahashi H., Mizuguchi J., Recovery of Glass Fibers from Fiber Reinforced Plastics, *Mater. Trans.*, 2011, **52**(6), 1327-1329.

Shokoohi S., Azar A. A., Effect of Coupling Agents on Polymer-Filler Surface Interactions, Morphology and Properties of Fiber-Reinforced Thermoplastics, *J. Reinf. Plast. Compos.*, 2009, **28**, 2131-2141.

Suyama K., Kubota M., Shirai M., Yoshida H., Effect of Alcohols on The Degradation of Crosslinked Unsaturated Polyester In Sub-Critical Water, *Polym. Degrad. Stab.*, 2006, **91**(4), 983-986.

Takagi H., Ichihara Y., Effect of Fiber Length on Mechanical Properties of "Green" Composites Using a Starch-Based Resin and Short Bamboo Fibers, *JSME Int. J. Ser. A*, 2004, **47**(4), 551-555.

Takemura K., Takada Y., H. Katogi H., Effect of Treatment Using Silane Coupling Agent on Creep Properties of Jute Fiber Reinforced Composites, *WIT Trans. Built Environ.*, 2012, **124**, 417-424.

Torres A., de Marco I., Caballero B. M., Laresgoiti M. F., Cabrero M. A., Chomon M. J., GC-MS Analysis of The Liquid Products Obtained In The Pyrolysis of Fibre-Glass Polyester Sheet Moulding Compound, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2001, **58-59**, 189-203.

TS EN ISO 75, Plastikler- Yük Altında Eğilme Sıcaklığının Tayini- Bölüm 1: Genel Deney Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2020.

TS EN ISO 899, Plastikler-Sünme Özelliğinin Tayini Bölüm 2: Üç Noktalı Yüklemede Eğilme Sünmesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2006.



Turkmen I., Koksal N. S., Investigation of Mechanical Properties and Impact Strength Depending on the Number of Fiber Layers in Glass Fiber- reinforced Polyester Matrix Composite Materials, *Mater. Test.*, 2014, **56**, 472-478.

URL - 1: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/fiber-reinforced-polymer-frp-composites-market>, (Ziyaret tarihi: 8 Ekim 2020).

URL - 2: [https://www.nxtbook.fr/newpress/jecomposites/jcm2009\\_136/index.php](https://www.nxtbook.fr/newpress/jecomposites/jcm2009_136/index.php), (Ziyaret tarihi: 5 Kasım 2020).

URL - 3: [http://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2018/11/CTP\\_Teknolojisi.pdf](http://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2018/11/CTP_Teknolojisi.pdf), (Ziyaret tarihi: 02 Kasım 2015).

URL - 4: [https://www.shinetsusilicone-global.com/catalog/pdf/SilaneCouplingAgents\\_e.pdf](https://www.shinetsusilicone-global.com/catalog/pdf/SilaneCouplingAgents_e.pdf), (Ziyaret tarihi: 5 Kasım 2020).

URL - 5: <https://www.wacker.com/h/en-us/medias/6085-EN.pdf>, (Ziyaret tarihi: 5 Kasım 2020).

URL - 6: <https://www.gelest.com/wp-content/uploads/Goods-PDF-brochures-couplingagents.pdf>, (Ziyaret tarihi: 5 Kasım 2020).

URL - 7: [https://www.scottbader.com/wp-content/uploads/3381\\_crystic-handbook-dec-05.pdf](https://www.scottbader.com/wp-content/uploads/3381_crystic-handbook-dec-05.pdf), (Ziyaret tarihi: 02 Kasım 2020).

Ünügül T., Kloropren ve Klorlanmış Polietilenin Reaktif Silanlar Eşliğinde Vulkanizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2020, 650966.

Wait C. F., The Reuse and Recycling of Glass Fibre Waste, Master Thesis, The University of Birmingham, School of Metallurgy And Materials, Birmingham, 2010, 136736819.

Wang R., Zheng S., Zheng Y., *Polymer Matrix Composites and Technology*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2011.

Wang X., Zhao X., Wu Z., Zhu Z., Wang Z., Interlaminar Shear Behavior of Basalt FRP and Hybrid FRP Laminates, *J. Compos. Mater.*, 2016, **50**(8), 1073-1084.

Williams P. T., Cunliffe A., Jones N., Recovery of Value-Added Products From The Pyrolytic Recycling of Glass-Fibre-Reinforced Composite Plastic Waste, *J. Energy Inst.*, 2005, **78**(2), 51-61.

Yang J., Xiao J., Zeng J., Bian L., Peng C., Yang F., Matrix Modification with Silane Coupling Agent for Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites, *Fibers Polym.*, 2013, **14**, 759-766.

Zabihi O., Ahmadi M., Liu C., Mahmoodi R., Li Q., Ferdowsi M. R. G., Naebe M., A Sustainable Approach to the Low-Cost Recycling of Waste Glass Fibres Composites towards Circular Economy, *Sustainability*, 2020, **12**(2), 641-651.

Zaharri N. D., Othman N., Mohd Ishak Z. A., Effect of Silane Modification on Mechanical and Thermal Properties of Ethylene Vinyl Acetate (EVA)/Zeolite Composites, *WIT Trans. Eng. Sci.*, 2013, **78**, 289-299.



## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Yıldız S.**, Karaağaç B., Güzeliş S. G., Utilization Of Glass Fiber Reinforced Polymer Wastes, *Polymer Composites*, 2021, **42**, 412-423.

Türkmen M., **Yıldız S.**, Güzeliş S. G., Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Kalıplama Teknolojisinde Insertli Bağlantı Elemanlarının Kullanımı, *Putech&Composites*, 2019, **45**, 38-43.

**Yıldız S.**, Güzeliş S., Karaağaç B., Geri Kazanılmış Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Atıklarının Yeni Matris Mekanik ve Dinamik Mekanik Performansına Etkisi, *7. Uluslararası Katılımlı Polimer Bilim ve Teknoloji Kongresi*, Eskişehir, 9-12 Eylül 2018.

**Yıldız S.**, Güzeliş S., Karaağaç B., Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Atıkların Geri Kazanımı, *Putech&Composites*, 2019, **37**, 8-18.

**Yıldız S.**, Güzeliş S., Karaağaç B., Recovery of Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Waste, *5<sup>th</sup> International Polymeric Composites Symposium*, İzmir, 2-4 October 2017.

**Yıldız S.**, Öztürk C., Cansun A., Sur Ö., Karaağaç B., Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Atıklarının Geri Kazanımı, *Composites Turkey*, 2016, **12**, 66-67.

**Yıldız S.**, Karaağaç B., Özkoç B., Toughening of Poly(Lactic Acid) with Silicone Rubber, *Polymer Engineering and Science*, 2014, **54**, 2029-2036.

**Yıldız S.**, Karaağaç B., Katkı Maddelerinin Kauçuk İçinde Göçü (Migrasyonu), 2013, **50**, 20-24.

Şen M., Dikicier E., Babapour A., **Yıldız S.**, Karaağaç B., Deniz V., Empirical Models for the Sulfur Vulcanization Kinetics and Their Use in The Identification of Cure Characteristics of Rubber Blends, *ISPART 2013*, Ankara, 29-31 May 2013.

**Yıldız S.**, Karaağaç B., Özkoç G., Mechanical and thermal properties of poly(lactik acid)/silicone rubber blends, *The 28<sup>th</sup> International Conference of The Polymer Processing Society (PPS-28)*, Pattaya, 11-15 December 2012.

Babapour A., Dikicier E., **Yıldız S.**, Karaağaç B., Şen M., Deniz V., Görgülü H., Rheological, mechanical, and aging properties of NR/EPDM, NR/CR, and NR/BR based rubber compounds, *BRIA Third Scientific and Practical Conference*, Sofia, 2-3 November 2012.

Şen M., Dikicier E., Babapour A., **Yıldız S.**, Karaağaç B., Deniz V., Empirical Models for the Sulfur Vulcanization Kinetics and Their Use in the Identification of Cure Characteristics of NR/BR NR/CR and NR/EPDM Blends, *BRIA Third Scientific and Practical Conference*, Sofia, 2-3 November 2012.

**Yıldız S.**, Karaağaç B., Özkoç G., Poli(Laktik Asit)/Silikon Kauçuk Harmanlarının Mekanik ve Termal Özellikleri, *Kimyevi Maddeler ve Mamülleri Sektöründe 2. Ar-Ge Proje Pazarı*, İstanbul, 18-19 Eylül 2012.

Babapour A., Dikicier E., **Yıldız S.**, Karaağaç B., Şen M., Deniz V., Görgülü H., NR/EPDM, NR/CR ve NR/BR Temelli Kauçuk Karışımlarının Reolojik, Mekanik ve Yaşlanma Özellikleri, *1. Ulusal Kauçuk Kongresi*, İstanbul, 14-15 Eylül 2012.

**Yıldız S.**, Karaağaç B., Özkoç G., Poli(Laktik Asit)'in Silikon Kauçuk ile Toklaştırılması, *4. Ulusal Polimer Bilimi ve Teknolojisi Kongresi*, Çanakkale, 5-8 Eylül 2012.

**Yıldız S.**, Karaağaç B., Şen M., Deniz V., NR/EPDM Karışımlarında Dolgu Etkinliği ve Vulkanizasyon Kinetiğinin İncelenmesi, *4. Ulusal Polimer Bilimi ve Teknolojisi Kongresi*, Çanakkale, 5-8 Eylül 2012.

Öter M., **Yıldız S.**, Karaağaç B., Deniz V., Lastik Hamurlarındaki Aromatik İşleme Yağlarının Değiştirilmesi, *Kauçuk*, 2011, **43**, 42-49.

## ÖZGEÇMİŞ

Sibel YILDIZ, lise öğrenimini Rahmi Kula Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun oldu. 2011-2013 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2013 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora öğrenimine başladı. 2014 yılından bu yana Polin Su Parkları A. Ş. firmasında Kompozit Ar-Ge Yöneticisi olarak çalışmaktadır.

