

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOĞAL LİF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE LİF / MATRİS ARA YÜZEY  
İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI VE ÇEVRESEL KOŞULLARA GÖRE  
KARAKTERİZASYONU**

**DOKTORA TEZİ**

**Mehmet Safa BODUR**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Makina Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2016**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOĞAL LİF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE LİF / MATRİS ARA YÜZEY  
İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI VE ÇEVRESEL KOŞULLARA GÖRE  
KARAKTERİZASYONU**

**DOKTORA TEZİ**

**Mehmet Safa BODUR  
(503092041)**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Makina Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa BAKKAL**

**HAZİRAN 2016**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503092041 numaralı Mehmet Safa BODUR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "DOĞAL LİF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE LİF / MATRİS ARA YÜZEY İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI VE ÇEVRESEL ŞARTLARA GÖRE KARAKTERİZASYONU" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. Mustafa BAKKAL**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN**      .....

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Ömer Berk BERKALP**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Bülent EKER**      .....

Namık Kemal Üniversitesi

**Yrd. Doç.Dr. Canan Gamze GÜLERYÜZ**.....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi**      : 23 Mayıs 2016

**Savunma Tarihi**      : 27 Haziran 2016



*Aileme,*





## ÖNSÖZ

Tez çalışmamın, planlanmasından sonuçlanmasına kadar ki tüm sürecinde değerli bilgilerini ve desteğini benden samimiyetle esirgemeyen, bir ağabey gibi yaklaşan danışmanım ve değerli hocam Doç.Dr. Mustafa BAKKAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman manevi desteklerini ve güvenlerini hissettirerek bana güç veren, aileme sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca doktora tezimin bir bölümünü Washington State Üniversitesinde yürütmem için 1 yıl ( 01.02.2015 - 01.02.2016) destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TUBITAK) teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Mayıs 2016

Mehmet Safa Bodur  
(Makine Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET .....	xxi
SUMMARY .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Konu .....	1
1.2 Amaç ve Kapsam .....	2
<b>2. KOMPOZİT MALZEMELER.....</b>	<b>5</b>
2.1 Matris Malzemeleri .....	6
2.2 Takviye Malzemeleri.....	9
2.3 Lif Takviyeli Kompozitler.....	9
2.3.1 Doğal lif takviyeli kompozitler .....	10
2.3.1.1 Pamuk lifi .....	12
2.3.1.2 Lif kaynağı olarak tekstil atıklarındaki mevcut durum .....	14
<b>3. LİTERATÜR.....</b>	<b>19</b>
3.1 Doğal Lif Takviyeli Kompozit Malzemeler .....	19
3.2 Lif / Matris Ara Yüzey İyileştirme Çalışmaları .....	22
3.3 Atmosfer Şartlarının Etkileri .....	24
3.4 Elastiklik Modülü Tahminlerinde Kullanılan Yöntemler .....	29
3.4.1 Sonlu elemanlar yöntemi .....	29
3.4.2 Analitik modeller ile kompozitlerde elastiklik modülü tahminleri .....	32
3.4.2.1 Analitik modeller .....	32
<b>4. MALZEME &amp; YÖNTEM .....</b>	<b>41</b>
4.1 Malzeme .....	41
4.2 Kompozit Test Plakası Üretimi .....	42
4.3 Test ve Analizler .....	43
4.3.1 Mekanik testler.....	43
4.3.1.1 Üç nokta eğme testi .....	43
4.3.1.2 Çekme testi.....	44
4.3.1.3 Darbe testi .....	44
4.3.2 Isıl analizler.....	45
4.3.2.1 Dinamik mekanik analiz (DMA) .....	45
4.3.2.2 Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC).....	45
4.3.3 Kimyasal analizler.....	45
4.3.2.1 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrofotometresi (FTIR) .....	45
4.3.4 Fiziksel analizler .....	46

4.3.4.1 Renk ölçümü .....	46
4.3.4.2 Optik mikroskop.....	46
4.3.4.3 Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) .....	46
4.4 Hızlandırılmış Çevresel Yaşlandırma İşlemleri .....	47
4.4.1 Ultraviyole (UV) ışık altında hızlandırılmış yaşlandırma işlemi .....	47
4.4.2 Nem yutum çalışmaları .....	47
<b>5. ARA YÜZEY İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI.....</b>	<b>49</b>
5.1 Silan Uygulaması.....	49
5.1.1 Malzeme ve yöntem .....	49
5.1.2 Sonuçlar ve yorumlar .....	50
5.2 Alkalın Uygulaması.....	54
5.2.1 Malzeme ve yöntem .....	54
5.2.2 Sonuçlar ve yorumlar .....	55
5.3 Alkali Silan Uygulaması.....	58
5.3.1 Malzeme ve yöntem .....	58
5.3.2 Sonuçlar ve yorumlar .....	59
5.4 Lif / Matris Ara Yüzey Bağlayıcı Ajan Olarak Maleik Anhidrit Katkı İlavesi	60
5.4.1 Sonuçlar ve yorumlar .....	60
5.5 Alkalın Uygulaması Ve Maleik Anhidrit Bağlayıcı Ajan Katkı İlavesi.....	63
5.5.1 Sonuçlar ve yorumlar .....	63
5.6 Atık Polimer Matris Kullanımı.....	70
5.6.1 Malzeme ve yöntem .....	70
5.6.2 Sonuçlar ve yorumlar .....	71
5.7 Maliyet Analizi.....	88
5.7.1 Analizde hesaba katılan maliyetler ve kabuller.....	89
5.7.1.1 Hammadde ve kullanılan kimyasal maliyetleri .....	89
5.7.1.2 Elektrik maliyeti .....	91
5.7.1.3 Personel maliyeti .....	91
<b>6. ÇEVRESEL KOŞULLARIN ETKİLERİ.....</b>	<b>93</b>
6.1 Malzeme ve Yöntem.....	93
6.2 Sonuç ve Tartışma .....	94
6.2.1 UV ışık altında yaşlandırma işleminin mekanik özellikler üzerine etkileri.....	94
6.2.2 UV ışık altında yaşlandırma işleminin kimyasal özellikler üzerine etkileri.....	97
6.2.3 UV ışık altında yaşlandırma işleminin fiziksel özellikler üzerine etkileri.....	101
6.2.4 Nem yutumunun fiziksel ve mekanik özellikler üzerine etkileri .....	105
6.2.5 UV koruyucu katkıların mekanik özellikler üzerine etkileri.....	111
6.2.6 UV koruyucu katkıların ısı özellikler üzerine etkileri.....	116
6.2.7 UV koruyucu katkıların yaşlandırmaya karşı performansı .....	118
6.2.8 UV koruyucu katkıların renk değişimleri üzerine etkileri .....	124
<b>7. DOĞAL LİF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE ELASTİKLİK MODÜLÜ TAHMİN YÖNTEMLERİ .....</b>	<b>127</b>
7.1 Malzeme ve Yöntem.....	127
7.2 Sonuç ve Tartışma .....	128
<b>8. SONUÇLAR .....</b>	<b>139</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>141</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>153</b>

## **KISALTMALAR**

<b>UV</b>	: Ultra Viole Işıık
<b>PE</b>	: Polietilen
<b>PP</b>	: Polipropilen
<b>DYPE</b>	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
<b>MAPP</b>	: Maleik Anhidrit Polipropilen
<b>HALS</b>	: UV Işıık Dengeleyici (Hindered Amine Light Stabilizer)
<b>UVA</b>	: Ultra Viole Absorban
<b>AO</b>	: Antioksidan
<b>oDYPE</b>	: Orjinal Düşük Yoğunluklu Polietilen
<b>aDYPE</b>	: Atık Düşük Yoğunluklu Polietilen
<b>FTIR</b>	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>DSC</b>	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
<b>DMA</b>	: Dinamik Mekanik Analiz
<b>SEM</b>	: Tarayıcı Elektron Mikroskobu
<b>MRoM</b>	: Düzenlenmiş Karışımlar Kuralı (Modified Rule of Mixture)
<b>CAD</b>	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)



## SEMBOLLER

<b>E</b>	: Elastiklik modülü
<b><math>\sigma</math></b>	: Çekme dayanımı
<b>V</b>	: Hacimsel oran
<b><math>\eta</math></b>	: Düzeltme katsayısı
<b><math>\beta</math></b>	: Lif ucundaki gerilme yığılma oranı
<b>l</b>	: Lif uzunluğu
<b>v</b>	: Poisson oranı
<b>r</b>	: Lif yarıçapı
<b><math>\Phi_{max}</math></b>	: Liflerin maksimum yığılma oranı
<b><math>A_f</math></b>	: Olasılık yoğunluk fonksiyonu
<b><math>\alpha</math></b>	: Hirsch modeli amprik katsayısı
<b><math>\rho</math></b>	: Yoğunluk
<b>G</b>	: Kayma modülü
<b><math>K_R</math></b>	: Shear Lag modeli katsayısı
<b>u</b>	: Yer değişimi
<b>F</b>	: Kuvvet
<b>R</b>	: Şekil değişim hızı (eğme testi)
<b>d</b>	: Numune kalınlığı (eğme testi)
<b>L</b>	: İki destek arası mesafe (eğme testi)
<b>m</b>	: Yük – şekil değişim eğrisi eğimi (eğme testi)
<b><math>a_{cN}</math></b>	: Darbe dayanımı
<b>W</b>	: Kırılma enerjisi
<b><math>\Delta E</math></b>	: Toplam renk değişimi
<b><math>\Delta a</math></b>	: Yüzeydeki kırmızı veya yeşil renkteki değişim
<b><math>\Delta b</math></b>	: Yüzeydeki sarı veya mavi renkteki değişim
<b><math>\Delta W_t</math></b>	: Belirli bir zaman dilimi için nem yutum miktarı
<b><math>W_i</math></b>	: Numunelerin kuru haldeki ağırlığı
<b><math>W_s</math></b>	: Numunelerin belirli bir zaman dilimindeki ağırlığı
<b><math>T_i</math></b>	: Numunelerin kuru haldeki kalınlığı
<b><math>T_s</math></b>	: Numunelerin son haldeki kalınlığı
<b>TS</b>	: Şişme miktarı
<b><math>T_m</math></b>	: Erime sıcaklığı
<b><math>H_m</math></b>	: Erime ısısıYük – şekil değişim eğrisi eğimi (eğme testi)
<b><math>X_c</math></b>	: Yüzde (%) kristallik
<b><math>T_c</math></b>	: Kristalleşme sıcaklığı
<b><math>E'</math></b>	: Sönüm modülü
<b><math>M_w</math></b>	: Molekül ağırlığı





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Bazı polimerlerin genel özellikleri .	7
Çizelge 2.2 : Lif takviyeleri ve özellikleri.	12
Çizelge 3.1 : Shear lag modeli için farklı $K_R$ seçenekleri	39
Çizelge 4.1 : Ekstrüdere ait özellikler.....	42
Çizelge 4.2 : Ekstrüder üretim parametreleri.	43
Çizelge 5.1 : Kumaşların 1 ve 3 saat bekletildiği silan çözelti bileşenleri.	50
Çizelge 5.2 : Ara yüzey iyileştirme işlemine göre kompozitlerdeki darbe dayanım değerleri.....	67
Çizelge 5.3 : Saf DYPE ve kompozit numunelere ait ısıl analiz sonuçları.	68
Çizelge 5.4 : Çalışma kapsamında incelenen numuneler ve içerikleri.	70
Çizelge 5.5 : Kompozit ve saf DYPE malzemenin mekanik dayanım sonuçları	82
Çizelge 5.6 : Matris ve kompozitlerin DSC sonuçları.	88
Çizelge 5.7 : Elektrik maliyeti.	91
Çizelge 5.8 : İşletme için gerekli personel sayısı ve görevlendirme.	91
Çizelge 5.9 : Kompozit ve katkısız polimer ile saksı üretimi / maliyet analizi	92
Çizelge 6.1 : Kullanılan test numuneleri ve içerikleri.	94
Çizelge 6.2 : Gruplar ve gruplara ait dalga boyları.	98
Çizelge 6.3 : Saf DYPE matris ve kompozitlere ait karbonil değerleri.	101
Çizelge 6.4 : Kompozit numuneler ve içerikleri.....	112
Çizelge 6.5 : UV koruyucu katkı türü ve oranlarına göre kompozitlerin ısıl özellikleri.....	118
Çizelge 6.6 :Bekleme sürelerine göre kompozit malzemelerin çekme dayanımlarındaki değişim oranları.....	119
Çizelge 6.7 : UV ışık altında bekleme sürelerine ve UV koruyucu katkılarına göre kompozitlerin ısıl özelliklerindeki değişimler.....	123
Çizelge 6.8 : Katkı türü, oranları ve bekleme sürelerine göre kompozitlerde gözlenen renk değişimleri.....	125
Çizelge 7.1 : Elastiklik modülü tahmin yöntemlerinde kullanılan matris ve pamuk lifi takviyesine ait başlıca özellikler .	127
Çizelge 7.2 : Analitik modellere ve lif oranlarına göre elastiklik modüllerindeki farklar.	129
Çizelge 7.3 : Kompozit malzemelerin hacimsel lif oranlarına göre elastiklik modülü değerleri	136



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Kompozitlerin sınıflandırılması. ....	6
Şekil 2.2 : Mercedes-Benz E serisinde kullanılan farklı doğal lif takviyeli kompozit parçalar. ....	12
Şekil 2.3 : Pamuk lifinin fiziksel görünüşü ve kısımları. ....	13
Şekil 2.4 : Endüstriyel tekstil atığı mevcut bertaraf durumu. ....	15
Şekil 3.1 : 0.25 M NaOH ile muamele edilen liflerin muamele süresine göre durumu. ....	22
Şekil 3.2 : Doğal lif takviyeli kompozitlerde görülen foto bozunma adımları. ....	27
Şekil 3.3 : Doğal liflerdeki karakteristik özellikleri meydana çıkaran yapıları. ....	27
Şekil 4.1 : Kompozit yapı içeriğindeki DYPE matris (solda), pamuk lifi kaynağı olarak tekstil atığı (sağda). ....	41
Şekil 4.2 : Tez boyunca izlenen yöntemin şematik gösterimi. ....	42
Şekil 5.1 : Silan oranı ve liflerin çözeltide bekleme sürelerine göre elastiklik modülündeki değişim grafikleri. ....	51
Şekil 5.2 : Ara yüzey iyileştirme işlemi uygulanmayan lif / matris ara yüzey durumu. ....	51
Şekil 5.3 : Silan uygulamasına ait şematik gösterim. ....	52
Şekil 5.4 : Silan uygulaması sonrası lif ve matris ara yüzey tutunma durumu. ....	53
Şekil 5.5 : Silan oranı ve liflerin çözeltide bekleme sürelerine göre eğme özelliklerindeki değişim grafikleri. ....	54
Şekil 5.6 : Liflerin değişik NaOH miktarı ve bekleme süresine göre kompozit çekme özelliklerindeki değişimi. ....	56
Şekil 5.7 : Pamuk lifi yüzey durumu a) Alkalın uygulamasız (20 kX) b) 5 saat 1 M NaOH sonrası (20 kX)c) Alkalın uygulamasız (5 kX) d) 5 saat 1 M NaOH sonrası (5 kX). ....	58
Şekil 5.8 : Liflerin NaOH ve bekleme süresine göre kompozit eğme özelliklerindeki değişimi. ....	58
Şekil 5.9 : Alkali-silan uygulamasının kompozitlerin çekme özellikleri üzerine etkisi. ....	59
Şekil 5.10 : Alkali-silan uygulamasının kompozitlerin eğme özellikleri üzerine etkisi. ....	60
Şekil 5.11 : Bağlayıcı ajan (Maleik Anhidrit) katkısının çekme özellikleri üzerine etkisi. ....	61
Şekil 5.12 : Bağlayıcı ajan katkılı kompozitlere ait ara yüzey durumu. ....	62
Şekil 5.13 : Bağlayıcı ajan (Maleik Anhidrit) katkısının eğme özellikleri üzerine etkisi. ....	63
Şekil 5.14 : NaOH + MA uygulamasının çekme özellikleri üzerine etkileri. ....	64
Şekil 5.15 : Kompozitlerin FTIR spektrumu. ....	64
Şekil 5.16 : NaOH+MA işleminden geçirilmiş kompozit malzemelere ait eğme testi sonuçları. ....	65

<b>Şekil 5.17</b> : Lif / matris ara yüzey iyileştirme yöntemlerine göre darbe dayanım değerlerindeki değişim grafikleri. ....	<b>66</b>
<b>Şekil 5.18</b> : Kompozitlere ait DSC grafikleri. ....	<b>69</b>
<b>Şekil 5.19</b> : Saf o-DYPE, a-DYPE ve Kompozitlerin çekme dayanımındaki değişimi. ....	<b>71</b>
<b>Şekil 5.20</b> : Maleik anhidrit bağlayıcı ajan kullanılmadan üretilen kompozit malzemenin arayüzey bağlanma durumu. ....	<b>72</b>
<b>Şekil 5.21</b> : Matris ve lif arasındaki arayüzey bağlanma durumu a) 1970X b) 5780 X c) 2530X d) 4340 X. ....	<b>73</b>
<b>Şekil 5.22</b> : Selülöz ve maleik anhidrit düşük yoğunluklu polietilenin esterifikasyon reaksiyonu. ....	<b>74</b>
<b>Şekil 5.23</b> : FTIR: (a) 30/65/0; (b) 30/0/65; (c) 10/0/85. ....	<b>75</b>
<b>Şekil 5.24</b> : Saf ve geri dönüşümlü düşük yoğunluklu polietilenin FTIR analizi. ....	<b>76</b>
<b>Şekil 5.25</b> : Kompozit ve saf DYPE matrislerin elastiklik modülü değişimleri. ....	<b>76</b>
<b>Şekil 5.26</b> : Kompozit ve saf DYPE matrislerin kopma uzaması değişimleri. ....	<b>77</b>
<b>Şekil 5.27</b> : Kompozit ve saf DYPE matrislerin eğme dayanımı değişim grafikleri. ....	<b>79</b>
<b>Şekil 5.28</b> : Kompozit ve saf DYPE matrislerin eğme modülündeki değişim grafikleri. ....	<b>80</b>
<b>Şekil 5.29</b> : Kompozit ve saf DYPE matrislerin darbe dayanımlarındaki değişim grafikleri. ....	<b>81</b>
<b>Şekil 5.30</b> : Kompozitlerin çekme özelliklerinin katkı oranına göre değişim grafikleri. ....	<b>83</b>
<b>Şekil 5.31</b> : Kompozitlerin eğme özelliklerinin katkı oranına göre değişim grafikleri. ....	<b>84</b>
<b>Şekil 5.32</b> : Kompozitlerin darbe dayanımının katkı oranına göre değişim grafiği. ....	<b>85</b>
<b>Şekil 5.33</b> : Kompozit ve saf matris elemanlarının farklı sıcaklıklardaki sönüm modülü değişimi. ....	<b>85</b>
<b>Şekil 5.34</b> : Kompozit ve saf matris elemanlarının farklı sıcaklıklardaki Tan Delta değişimi. ....	<b>86</b>
<b>Şekil 5.35</b> : Saf matris ve kompozitler için erime ve soğuma eğrileri. ....	<b>87</b>
<b>Şekil 5.36</b> : Maliyet analizi için kullanılan saksı modeli. ....	<b>89</b>
<b>Şekil 6.1</b> : Çevresel şartların etkisini incelemek amacıyla izlenen yöntem. ....	<b>93</b>
<b>Şekil 6.2</b> : UV bekleme süresine göre kompozitlerin ve DYPE matris malzemesinde çekme dayanımındaki değişim grafikleri. ....	<b>95</b>
<b>Şekil 6.3</b> : UV bekleme süresine göre kompozitlerin ve DYPE matris malzemesinde elastiklik modülündeki değişim grafikleri. ....	<b>95</b>
<b>Şekil 6.4</b> : UV bekleme süresine göre kompozitlerin ve DYPE matris malzemesinde darbe dayanımındaki değişim grafikleri. ....	<b>97</b>
<b>Şekil 6.5</b> : Matrise ait FTIR spekturumu (üst (0saat), en alt (1000saat)). ....	<b>98</b>
<b>Şekil 6.6</b> : T-FRP kontrol numunesine ait FTIR spektrumu (üst (0saat), en alt (1000saat)). ....	<b>99</b>
<b>Şekil 6.7</b> : Farklı lif / matris ara yüzey iyileştirme uygulamalarına sahip kompozitlere ait FTIR grafikleri başlangıç. ....	<b>100</b>
<b>Şekil 6.8</b> : Farklı lif / matris ara yüzey iyileştirme uygulamalarına sahip kompozitlere ait FTIR grafikleri (1000 saat). ....	<b>100</b>
<b>Şekil 6.9</b> : Kompozit ve matris DYPE numunelerine ait UV ışık altında yaşlandırma neticesindeki solna ( $\Delta L$ ) ve toplam renk değişim ( $\Delta E$ ) grafikleri. ....	<b>102</b>
<b>Şekil 6.10</b> : Renk değişimleri başlangıç (sol) ve 1000 saat (sağ). ....	<b>103</b>

<b>Şekil 6.11</b> : Kompozitlerde UV ışık altında yaşlandırma neticesinde gözlenen makro yüzey çatlakları a) Yaşlandırılmamış b) 1000 saat yaşlandırılmış numune.....	<b>104</b>
<b>Şekil 6.12</b> : Doğal lif takviyeli kompozitlerde nem yutum mekanizması. ....	<b>105</b>
<b>Şekil 6.13</b> : Kompozitlere uygulanan kimyasal uygulamalara göre nem yutum miktarları.....	<b>106</b>
<b>Şekil 6.14</b> : Nem yutum işleminin kompozitlerin çekme özelliklerine etkisi.....	<b>108</b>
<b>Şekil 6.15</b> : Nem yutum işleminin kompozitlerin darbe dayanımına etkisi. ....	<b>109</b>
<b>Şekil 6.16</b> : Üretim / numune hazırlama ve test – analiz basamakları.....	<b>112</b>
<b>Şekil 6.17</b> : Kimyasal katkı oranlarına göre kompozitlerin çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerlerindeki değişimleri.....	<b>113</b>
<b>Şekil 6.18</b> : Kompozitlere ait kopma uzaması değerleri.....	<b>114</b>
<b>Şekil 6.19</b> : Kompozitlere ait eğme özellikleri. ....	<b>115</b>
<b>Şekil 6.20</b> : Kompozitlere ait darbe dayanım değişimleri. ....	<b>116</b>
<b>Şekil 6.21</b> : UV koruyucu katkı içeriğine göre kompozitlerin DSC eğrileri.. ....	<b>117</b>
<b>Şekil 6.22</b> : Koruyucu katkı tipine, oranlarına ve bekleme sürelerine göre kompozitlerin çekme dayanım değerlerindeki değişimleri. ....	<b>119</b>
<b>Şekil 6.23</b> : Koruyucu katkı tipine, oranlarına ve bekleme sürelerine göre kompozitlerin elastiklik modülü değerlerindeki değişimleri.. ....	<b>121</b>
<b>Şekil 6.24</b> : Koruyucu katkı tipine, oranlarına ve bekleme sürelerine göre kompozitlerin darbe dayanım değerlerindeki değişimleri.....	<b>122</b>
<b>Şekil 6.25</b> : UV koruyucu katkı tipi, oranı ve bekleme sürelerine göre kompozitlerdein % kristallik değerlerindeki değişim grafikleri. ....	<b>123</b>
<b>Şekil 7.1</b> : Farklı lif takviyeli kompozitlere (solda) ve saf DYPE matrisine (sağda) ait deneysel gerilme – birim şekil değişim eğrisi.....	<b>128</b>
<b>Şekil 7.2</b> : Kompozit malzemedeki farklı lif oranları ve mevcut analitik modellere göre elastiklik modülü değerlerindeki değişim.....	<b>128</b>
<b>Şekil 7.3</b> : Pamuk liflerinin matris içerisindeki yönelmeleri. ....	<b>130</b>
<b>Şekil 7.4</b> : Sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere pamuk lifine (solda) ve DYPE matris (sağda) malzemesine ait çekme testi sonuçları.....	<b>131</b>
<b>Şekil 7.5</b> : Kompozit malzemenin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi amacıyla oluşturulan CAD katı modeli a) Lif dağılımının optik mikroskop görüntüsü b) Pamuk lifi kesit boyutları c) Oluşturulan CAD modeli....	<b>132</b>
<b>Şekil 7.6</b> : Kompozit yapıdaki lifler gözönüne alınarak matris hacminin oluşturulması.....	<b>133</b>
<b>Şekil 7.7</b> : Solidworks programında lif ve matris hacimlerinin bir araya getirilmiş durumu (sağda), ANSYS Workbench programına katı modelin aktarılması (solda).....	<b>133</b>
<b>Şekil 7.8</b> : a) Pamuk lifi ve DYPE matrisin programda tanımlanması b) DYPE matris elemanına c) Pamuk lifi takviyesine ait sonlu elemanlar ve deneysel çekme testi sonuçları. ....	<b>134</b>
<b>Şekil 7.9</b> : Kompozit yapıya uygulanan ağ oluşturma (meshing).....	<b>135</b>
<b>Şekil 7.10</b> : Kompozit çekme numunesine uygulanan sınır şartları. ....	<b>135</b>
<b>Şekil 7.11</b> : %25 pamuk lifi içeren kompozit numuneye ait sonlu elemanlar ve deneysel elastik şekil değişim bölgesi.....	<b>136</b>
<b>Şekil 7.12</b> : Sonlu elemanlar analizi sonucu a) Gerilme dağılımı b) Toplam şekil değişim dağılımı c) Lif ve matris ara yüzeyi. ....	<b>137</b>
<b>Şekil 7.13</b> : Kompozit yapıda gözlenebilen bazı kusurlar a) Lif / matris ara yüzeyinde zayıf tutunma b) Yüzeyde gözlenen hava boşlukları.....	<b>137</b>



# DOĞAL LİF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE LİF / MATRİS ARA YÜZEY İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI VE ÇEVRESEL KOŞULLARA GÖRE KARAKTERİZASYONU

## ÖZET

Doktora tezi kapsamında, öncelikle sentetik lif takviyeli kompozitlere alternatif olarak düşünülebilen “Doğal Lif Takviyeli Kompozit” granüllerin tasarlanması, üretilmesi, performans özelliklerinin incelenerek iyileştirme teknikleri irdelenmiştir. Ayrıca dış ortam ürünlerinde kullanımı göz önünde bulundurularak çevresel şartlar altında performansının irdelenmesi ve son aşamada mekanik performanslarının öngörülebilmesi amacıyla kullanılan analitik ve sonlu elemanlar yöntemlerinin uyarlanabilirliklerinin araştırılması gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemenin doğal lif takviyesi olarak kullanılan pamuk lifi, mevcut sistemde sınırlı bir toplama ve geri kazanımı bulunan ve sistemli olarak toplanmayan evsel ve endüstriyel tekstil atıklarından sağlanmıştır. Matris malzemesi olarak ekstrüzyon yöntemi ile şekillendirmeye uygun olabilecek Düşük Yoğunluklu Polietilen (DYPE) termoplastik malzemesi tercih edilmiştir. Bu tarz kompozitlerin özelliklerinin her yönüyle belirlenebilmesi ve karakterizasyonu amacıyla bir çok test ve analizden faydalanılmıştır. Mekanik testler olarak kompozitlere çekme, darbe, üç noktadan eğme ve Dinamik Mekanik Analiz (DMA) testi uygulanmıştır. Diğer taraftan Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi (FTIR) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizleri kimyasal ve ısıl özelliklerin saptanması amacıyla tercih edilmiştir. Foto spektrometre cihazı, optik mikroskop ve Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM) ise kompozitlerin fiziksel özelliklerini ve iç yapılarının irdelenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Kompozit yapı içerisinde en uygun yapıyı oluşturmak amacıyla lif matris ara yüzey iyileştirme çalışmalarına ağırlık verilmiştir. Bu amaçla çeşitli kimyasal iyileştirme işlemleri gerçekleştirilmiş ve çalışmalar neticesinde %70-80'lere kadar mekanik performansta artış elde edilmiştir. Mekanik performans bakımından en ideal kompozit yapının oluşturulmasıyla birlikte sıra kompozit granüllerin kullanım amacına yönelik olarak öngörülen ortam şartlarının, kompozit numunelerin mekanik, fiziksel, kimyasal ve ısıl özellikleri üzerinde etkileri uygulanan çeşitli yaşlandırma prosedürleriyle incelenmiştir. Çalışma kapsamında doğal lif takviyeli kompozitlerin kullanımı için en büyük engel olan nem yutumu özelliğinin ve güneş ışınlarının (UV) kompozitlerin çekme ve darbe özellikleri yanında ısıl, kimyasal, fiziksel ve mikroyapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. 1000 saate kadar yapılan yaşlandırma işlemlerinin ideal özellikteki kompozitlerin üzerine etkileri irdelenmiş ve raporlanmıştır. Ayrıca çevresel şartlara karşı kompozitlerin özelliklerini koruyabilmesi amacıyla tercih edilebilecek kimyasal yöntemler çalışma kapsamında

irdelenmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre lif ve matris ara yüzey durumunun iyileşmesiyle birlikte mekanik ve fiziksel özelliklerin korunabildiği ve nem yutumu özelliklerinin de iyileştiği görülmüştür. Diğer yandan UV koruyucu katkıların türü ve oranlarına göre kompozitlerin mekanik veya fiziksel özelliklerinin korunmasında kayda değer bir şekilde etkili oldukları görülmüştür. Tez çalışmasının son aşamasında kompozitlerin çekme özellikleri göz önünde bulundurularak elastik bölgenin modellenmesiyle ilgili yürütülen analitik ve sonlu elemanlar yöntemleri öncü sonuçlar sunmuş ve ileride yürütülebilecek benzer çalışmalara yol göstermesi amaçlanmıştır.

Doktora tezinin sunmuş olduğu tüm sonuçlar doğrultusunda bu tür yeni ve özgün bir kompozit malzemenin alternatif olarak belli uygulamalarda tercih edilerek ekonomik anlamda, çevresel anlamda ve belli iş olanakları sağlayarak sosyal anlamda faydalar sağlayabileceği sonucuna varılmıştır.



# **FIBER / MATRIX INTERFACIAL IMPROVEMENT TECHNIQUES AND CHARACTERIZATION DUE TO ENVIRONMENTAL CONDITIONS FOR NATURAL FIBER REINFORCED COMPOSITES**

## **SUMMARY**

Within the scope of The Doktoral Thesis, design, manufacturing and also techniques to improve the fiber/matrix interfacial adhesion were examined for “The Natural Fiber Reinforced Composite” granules as an alternative material to syntetic fiber reinforced composites. The performance under the environmental conditions were also studied taking into account the usage for outdoor applications. In the final stage, the adaptability of the analytical and finite element methods was investigated in order to predict the mechanical performance. The cotton fiber as natural fiber reinforcement in the composite material was collected from the domestic and industrial textile waste which results from the present system with a limited collectin and recycling and can not be collected systematically. As the matrix, low density polyethylene (LDPE) which may be suitable for forming by extrusion was preferred. To determine every aspect of the characteristics of this type of composite, a lot of testing and analysis to characterization has been benefited. Tensile, impact, three-point bending and Dynamic Mechanical Analysis (DMA) testing were performed as mechanical tests while Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Differential Scanning Calorimetry (DSC) analysis were preferred for chemical and thermal investigations respectively. Photo-spectrometer, optical microscope and Scanning Electron Microscopy (SEM) were also used to evaluate the physical and micro structures of this novel composites.

The improvement techniques for fiber matrix interfacial adhesion specifically was focused on in order to create the most appropriate composites structure. For this purpose, five different chemical methods namely, silane treatment, alkaline treatment, alkali-silane treatment, maleic anhydride, and alkali-maleic anhydride coupling agents were applied to evaluate the suitable process parameters (concentration, soaking time, ratio by weight) for the enhanced properties of T-FRP composites. Tensile, three-point flexural and impact tests were performed on both untreated and treated composites for comparison purpose. Treated and untreated T-FRP composites were characterized using scanning electron microscopy, differential scanning calorimetry, and Fourier-transform infrared spectroscopy to evaluate thermomechanical properties of composites. According to the results, approximately 70% and 45% rise for the tensile and flexural strength can be achieved by improving the poor interfacial adhesion between fiber and matrix for untreated composite. The best tensile and flexural strength values were obtained from the composites with maleic anhydride. Although, the mechanical properties were found to be increased

about 30 - 40% by the alkaline and silane treatment alone, the combination of these treatments can be counted as more effective way to improve the interfacial adhesion. Surprisingly, it is interesting to note that the tensile and flexural properties were dramatically decreased approximately 40% by applying the alkaline treatment before addition of the maleic anhydride. In contrast to the tensile and flexural tests, impact test results showed that impact strength was somewhat negatively influenced with the chemical treatments compared to the untreated composite. Probably it is because of brittle fiber characteristics become more dominant on the properties of composites, as better adhesion and interfacial bonding between fiber and matrix occurred by chemical treatments. Thermal analysis showed that the melting behavior for all composite samples was observed to show slight changes compared to the pure LDPE matrix. However, addition of cotton fibers without any treatment (untreated composite) caused some increment in the crystallization temperature ( $T_c$ ) and the degree of crystallinity ( $X_c$ ) of LDPE matrix. Overall results shows that the T-FRP is a effective novel material for further property development via chemical treatments. After the ideal composite structures were created in terms of mechanical performance, effects of anticipated environmental conditions for the purpose of usage on the chemical, physical, mechanical and thermal properties of composite granules were investigated with the implementation of various aging procedure. For this purpose, the effect of water sorption which is the biggest obstacle for the use of natural fiber reinforced composites and UV radiation on the thermal, chemical, physical and microstructure properties addition to tensile and impact properties of composite samples. This study elaborates and present the detailed information about the effects of aging process up to 1000 hours on the composite samples with the ideal characteristics. Degradation of physical, mechanical and chemical properties of T-FRP composites was evaluated through common chemical treatments such as maleated coupling, alkaline treatment, silane treatment and alkali-silane treatment. Untreated and chemically treated T-FRP composites were subjected to water uptake and UV exposure up to 1000 hours. Tensile and impact properties were mechanically examined, and the changes on the physical properties due to water uptake, swelling and color change were investigated. In addition, Fourier Transform Infrared Spectrum (FTIR) analysis was performed in order to evaluate the chemical changes after exposure. Results show that reduction about 10-15% in TS values for all composite samples were found (less than reduction in TS of pure LDPE) after 1000h UV exposure time. Because, composite samples have a lower amount of polymer subjected to the photo oxidative degradation. The highest overall drop in TS values was observed for composites with chemical treatments. This result is likely due to degradation of fiber/matrix interfacial adhesion which is more predominant on the reduction in TS compared to control sample. For impact strength, it is interesting to note that chemically treatment lead the composites to be less affected samples after UV exposure. FTIR results showed that the chemically treated composites have lower stability than the untreated T-FRP composites with longer UV exposure. All composite samples have shown the surface degradation after 500h of UV exposure and then the cracks seemed to be increased with longer UV exposure. Samples with chemical treatments showed a lower rate of water absorption around 0.2~0.6% after 1000 h of water immersion. The extent of drops varies and depends on the chemical treatment. Composites with maleic anhydride exhibit the best tensile properties after 1000h of soaking time establishing a strong interface between cotton fiber and polymer matrix. The change in IS with water immersion was found to be more complex and also likely to be more dependent on the treatment type compared with

the results for TS with water absorption. Chemical treatment with MA or Si is very sufficient to provide water uptake resistance. On the other hand, under UV exposure higher drops might be occurred in mechanical properties for the chemically treated composites which should be taken into account specifically for the outdoor applications exposed to sun light too much.

In addition, chemical methods which may be preferred in order to protect the properties of composites against environmental conditions have been analyzed in the scope of this work and positive results have been obtained. According to test results, the mechanical and physical properties can be protected as well as water sorption behavior recovered as the improvement of fiber and matrix interface was observed. On the other hand, the UV protective additives showed a significant manner to be effective on the retention of mechanical or physical properties of the composites according to the types and proportions. The effect of photostabilizers on the mechanical, thermal and physical properties of textile fiber reinforced polymer (T-FRP) composites was investigated for unweathered and accelerated ultra violet (UV) weathering conditions. Three different type of photostabilizers were chosen at varying concentrations in order to obtain the best formulations. The first phase of this study examined the effect of incorporating different concentrations of ultra violet absorber (UVA), hindered amine light stabilizers (HALS) and antioxidants (AOs) into T-FRP composites for unweathering condition. Tensile, flexural and impact tests were performed for the mechanical properties as well as differential scanning calorimetry (DSC) analysis for thermal properties. According to test results, photostabilizers do not influence mechanical and thermal properties significantly. In the second phase of the study, the influence of the photostabilizers on the durability performance of T-FRP composites under accelerated UV weathering was determined by tensile test, thermal analysis and color measurements. The results showed that the efficiency of the photostabilizers is highly dependent on the type, concentration and also weathering time. According to test results, tensile properties of T-FRP with photostabilizers were influenced badly in higher photostabilizer concentrations for all chemically stabilized composites as well as flexural properties were seemed to be changed in the same manner with tensile testing results while impact strength of T-FRP composite were not affected by either photostabilizer types or concentrations. DSC results show that almost no change has been observed in the melting temperature for the composites independent to photostabilizer type or concentrations. On the other hand, stabilized T-FRP composites were found to have generally lower crystallinity values compared to T-FRP composite for the unweathering condition.

Composites with the addition of the Chimasorb and Tinuvin at the concentrations of 0.5wt% and 0.2 wt% respectively exhibited lower mechanical properties drop and showed higher durability during 240 h of UV weathering. However, it is worth noting that photostabilizers at the concentrations of 0.4 wt% and 1wt% for Tinuvin and Irganox should be taken into account as promising photostabilizers and concentrations for the long term UV weathering. The crystallinity value for unstabilized T-FRP composite (control) was found to be increased for the first stage of accelerated UV exposure until a drop was reached with 240 h of UV exposures. For stabilized composites, gradual increase in crystallinity % was observed during 120 h of UV weathering, followed by almost same crystallinity % values up to 240 h. These results from DSC supports the ability and efficiency of the stabilizers. Color measurements overallly show that, the effectiveness is highly dependent to the type and concentration of the stabilizers. Although AOs are not as effective as HALS on the retention of mechanical properties during weathering, they may be considered to

be an alternative photostabilizer for the physical retention at the adequate concentrations.

In the final stages of thesis, the finite element methods and analytical works are carried out regarding the modeling of elastic behavior as the tensile properties of composite and presented pioneering results and it is intended to show the way for similar studies which may be conducted in the future.

In accordance with all the results that have been presented in this Doctoral Thesis, it is concluded that the new and unique composite material presented as an alternative material can provide economic, environmental and social benefits by providing certain job opportunities with the preference for in some applications.

## 1. GİRİŞ

### 1.1 Konu

20. yüzyılın ikinci yarısında başlamış olan kompozit malzemelerle ilgili araştırmalar günümüze kadar hızla devam etmiştir. Polimer malzemelere kazandırılabilen özellikler sayesinde, diğer malzemelerden üretilen ürünlerin performans özellikleri önce yakalanmış, sonra büyük oranda geçilmiştir. Bu durum kompozit sektörüne ilginin daha da artmasını sağlamıştır. Ağırlık / dayanım oranının düşük olması, maliyetin diğer malzeme türlerine göre düşük kalması ve aşınmaya karşı dayanımlarının iyi olması polimer esaslı kompozitlerin yaygınlaşmasında önemli etkenler olmuştur. Kullanım yerlerine göre çeşitli dayanım değerlerinin takviye yoluyla artırılabilmesi metal veya diğer malzemelerin kullanıldığı yerlerde kullanılmasına imkân sağlamıştır. Bunun yanında işlenebilme kolaylığı kompozit malzemelere önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca üretilebilirlik açısından ergime sıcaklıklarının düşük olması sayesinde ısı ve basınç yöntemiyle kolaylıkla şekillendirilebilmeleri ürün tasarımlarında çeşitlilik ve kolaylık sağlamaktadır.

Kompozit malzeme üretiminde çok çeşitli takviye malzemeleri kullanılmakla birlikte son yıllarda çevresel duyarlılığın artması ve kaynakların azalması ile birlikte cam elyafı, aramid gibi sentetik liflerin yerine selülozik esaslı doğal liflerin kullanımı da yaygınlaştırılmaya çalışılmaktadır. Bunun yanı sıra doğal lif kaynakları olarak atık malzemelerin kompozit üretiminde değerlendirilebilmesi ve bu sayede çevre kirliliğinin önüne geçilebilmesi, geri dönüşümün sağlanması ve kompozit üretim maliyetlerinin düşürülmesi üzerine araştırma ve çalışmalar uluslararası seviyede hızlanmıştır.

Öncelikle tez kapsamında atık tekstil takviyeli polimer kompozitine ait granülün hazırlanması, dayanım değerlerini makul bir seviyeye çekmek için lif / matris ara yüzey iyileştirme çalışmalarının incelenmesi üzerine çalışılmıştır. Daha sonra kompozit granüllerin dış ortam ürünlerinde alternatif bir malzeme olarak düşünülmesi amacıyla çevresel şartlar altındaki performans çalışmaları

yürütülmüştür. En son olarak da gelişigüzel lif dağılımına sahip doğal lif takviyeli kompozitlerde dayanım tahminlerinde kullanılacak yöntemlerin incelenmesi gibi çalışmalar yürütülmüştür. Geniş kapsamlı ve uluslararası nitelikteki çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçların, bu tarz kompozitlerin ileride uygulama alanlarında kullanımını kolaylaştıracak ön bilgileri sağlaması öngörülmüştür..

Genel olarak çalışmayla birlikte hem tekstil atıklarının kompozit üretimde kullanılarak ekonomiye tekrardan kazandırılması, hem de plastik kullanımının olabildiğince azaltılması sonucunda doğaya daha az zarar veren, çevre dostu bir malzeme elde edilmiştir. Ayrıca ekonomik ve çevresel faydaların yanı sıra, kompozitlerin üretimi için geliştirilen yöntemler ile beraber çeşitli iş imkânları da sağlanarak sosyal açıdan da önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## **1.2 Amaç ve Kapsam**

Yürütülmüş olan doktora tezinin amacı mevcut sistemde sınırlı bir toplama ve geri kazanımı bulunan evsel ve endüstriyel tekstil atıklarının polimer malzemelerle birlikte değerlendirilerek ekonomik, çevresel ve sosyal faydaların beklendiği kompozit malzemelerin tasarım ve endüstriyel üretim sistematığının geliştirilmesidir. Kısa lif şeklinde matris içindeki atıklarla elde edilen malzemenin çevresel şartlarda beklenen dayanımı sağlayabilecek kompozit ürünlere dönüştürülmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca doktora tezi sayesinde tekstil atıklarının bertarafına katkı sağlanırken, plastik atıkların değerlendirilmesiyle atık miktarı da azalacaktır. Üretilecek yeni kompozit malzeme granülü alternatif kullanım alanları, yeni ürün ve üretim yöntemlerine imkan sağlayabileceğinden elde edilecek kazanımlar çalışmanın sonrasında daha da artacaktır. Bu çalışma ile ticari değeri olmayan atık malzemelerin ülkemiz endüstrisinde önemli bir yer alan ve hızla gelişen bu sektörler için değerli bir malzeme haline dönüştürülmesi de hedeflenmektedir.

Genel olarak çalışmanın hedeflerine bakıldığında, yurt içinde daha önce kullanılmamış, atık kumaşlarla desteklenmiş PE matrisli kompozit granüllerin eldesi ve geliştirilmesinin yanısıra çevresel şartların kompozit malzemeye etkileri üzerine çalışma gerçekleştirilmiştir. Elde edilecek kompozit granülleri sayesinde ülkemizde tekstil alanında önemli bir sorun haline gelen ve kayıp olarak nitelendirilen atıkların plastik kullanım miktarını azaltmasıyla birlikte ürün maliyetlerinde düşüşe neden

olması beklenmektedir. Ayrıca başarılı olması durumunda polimer malzeme de atık ürünlerden elde edileceğinden çalışmanın ülke ekonomisine katkısı iki katına çıkmış olacaktır.

Çalışma kapsamında kompozit granüllerinin tekrarlı granülasyon işlemi ile sahip olacağı fiziksel ve mekanik özellikleri, yapılan öncül testler ve karakterizasyon çalışmaları ile ortaya çıkarılmıştır. Bu sayede en ideal üretim yöntemi belirlenip, doktora tez çalışmasının temeli oluşturulmuştur. İdeal kompozit yapının ve üretim şeklinin belirlenmesi sonrasında kompozit yapıda görülen zayıf lif matris arayüzey durumu sonucunda sınırlı dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Düşünülen kompozit granüllerin uygulamalar içerisinde alternatif malzeme olarak yer alması amacıyla öncelikli olarak mekanik dayanım değerlerinde iyileştirme çalışmaları yürütülmüştür. Bu kapsamda lif/matris arayüzey durumunu ve dolayısıyla mekanik dayanım değerlerini iyileştirmek için çeşitli kimyasal işlemlerden faydalanılmıştır. Kimyasal işlemlerin ideal parametreleri yapılan mekanik testler yardımıyla belirlenmiştir. Lif / matris arayüzey iyileştirme çalışmaları sonrasında kompozit malzemenin “dış ortam”larda kullanılabilmesi amacıyla yaşlandırma çalışmaları yürütülmüştür. Bu kapsamda kompozit numuneler iklimlendirme kabinlerinde ultraviyole (UV) ışık altında hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz bırakılmışlardır. Diğer yandan doğal lif takviyeli kompozit için liflerin “hidrofilik” yapısında kaynaklanan ve bu kompozitlerin kullanımda olumsuzluk teşkil eden nem yutumu özellikleri incelenmiştir. Yaşlandırma çalışmaları neticesinde kompozitlerin mekanik, ısı, fiziksel ve kimyasal yönden ne kadar etkilendikleri çalışma kapsamında irdelenmiştir. Ayrıca çevresel şartların kompozit malzeme üzerine olumsuz etkilerini en aza indirgeyebilmek amacıyla kullanılan yöntemleri ve sonuçları da çalışma içeriğinde verilmiştir. Tez çalışmasının son aşamasında ise gelişigüzel lif dağılımına sahip doğal lif takviyeli kompozit malzemelerin dayanım değerlerinin önceden tahmin edilebilmesi amacıyla kullanılan yöntemler ele alınmıştır. Bu kapsamda sonlu elemanlar yöntemi ve mevcut analitik yöntemlerden faydalanılarak kompozit malzeme için uygunlukları araştırılmıştır.

Özetle tez çalışmasının hedefleri şu şekilde sıralanabilir;

- Plastik hammaddede kullanımını azaltarak özellikle PE ve PP için yurtdışına olan bağımlılığı azaltmak,

- Geri dönüştürülemeyen tekstil atıklarının miktarını azaltmak ve tekrar ekonomiye kazandırmak,
- Önemli bir maliyeti katma değere çevirerek geri dönüşüm sektöründe farklı iş olanaklarını sektöre kazandırmak,
- Diğer evsel ve endüstriyel kaynaklı atıklar için Ar-Ge çalışması sistemi geliştirmek,
- Değerlendirilemeyen Tekstil Atıkları için veri tabanı oluşturmak,
- İlçe belediyelerince belediye atığı düzenli depolama tesislerine bertaraf amaçlı taşınan karışık atıkta mevcut tekstil ve diğer plastik (PE, PP...vb.) atıkların oranlarını düşürmek.

Genel olarak, çalışmanın sonrasında ortaya çıkan sonuçlar doğrultusunda, yeni ve alternatif bir malzeme olarak atık kumaş takviyeli polimer matrisli yeni bir kompozit granül eldesi sağlanıp, kompozit granüllerin potansiyel sektörlerin ( park bahçe peyzaj sektörü, beyaz eşya, otomotiv gibi) ürünlerinde kullanılan mevcut hammaddelerin yerini alması öncelikli hedef olarak görülmektedir.



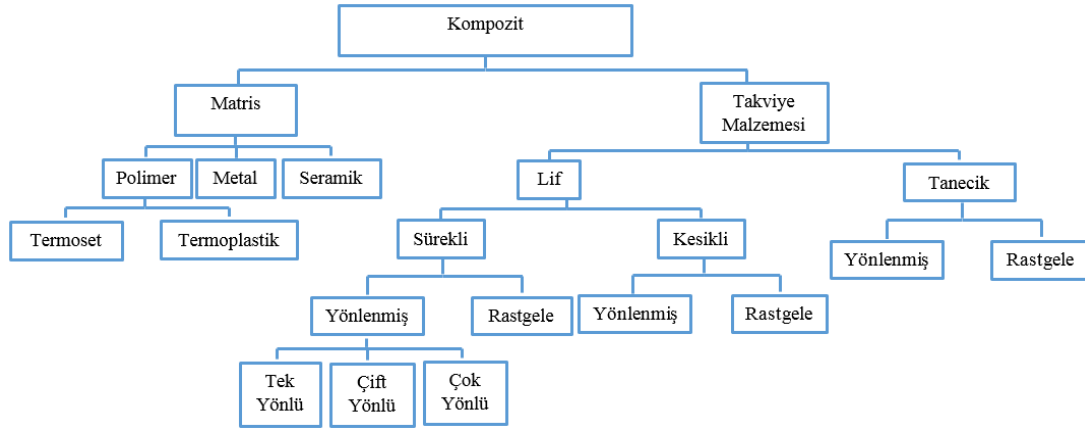
## 2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit, kelime olarak iki veya daha fazla parçadan oluşan anlamına gelmektedir. Kompozit malzemeler farklı ve aralarında kimyasal etkileşimler olmayan maddelerin birbirlerinin zayıf yönlerini iyileştirerek üstün özellikler elde etmek amacıyla bu malzemelerin makro seviyede belli bir düzende bir araya getirilmesiyle hazırlanan malzemelerdir [1].

Kompozit malzemelerin bilinen ilk kullanım alanı inşaat sektörüdür. Çamur ve samanın karıştırılması ile hazırlanan kompozit malzemeler, ilk kullanılan yapı malzemeleridir. 1950'li yıllarda ise kompozit malzemeler araç gövdeleri için otomotiv sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. 1960'lı yıllara kadar kompozit malzemelerden teknolojik problemleri çözmek amacıyla faydalanılmıştı fakat bu yıllardan sonra polimer esaslı kompozit malzemelerle birlikte kompozitler mühendislik malzemeleri olarak yaygınlaşmaya başlamışlardır. Kompozit malzemeler yapısal uygulamalarda çelik ve alüminyumun yerine kullanıldıklarında genellikle daha iyi performans gösterdiklerinden hızlı bir büyüme göstermişlerdir. Günümüzde birçok mühendislik alanında kompozit malzemelerin kullanımı, enerji açısından büyük oranda tasarruf sağlamaktadır [2].

Kompozit malzemeler, matris ve takviye edici malzemedan oluşurlar. Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir takviye ve takviyenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunmaktadır. Takviye, kompozit malzemeye mukavemet ve yük taşıma gibi dayanım özellikleri sağlarken, matris malzemenin amacı kompozit malzemenin kopmasını geciktirmek, lifleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır [3].

Kompozitler matris türüne göre; polimer esaslı kompozitler, metal esaslı kompozitler ve seramik esaslı kompozitler şeklinde üçe ayrılır. Takviye ediciler açısından sınıflandırıldığında; lif takviyeli kompozitler ve tanecik takviyeli kompozitler olarak ikiye ayrılır. Şekil 2.1'de kompozitlerin sistematik bir şekilde sınıflandırılması görülmektedir.



**Şekil 2.1** : Kompozitlerin sınıflandırılması.

## 2.1 Matris Malzemeleri

Bir kompozit malzemedeki matrisin görevleri; lifi / takviyeyi bir arada tutarak bireysel hareket etmelerine engel olmak, kompozit malzemeye yüklenen yükü liflere aktarmak, kompozit malzemeye şekil verildiğinde bu şekli muhafaza etmek ve çevresel faktörlerin neden olabileceği kimyasal ve fiziksel etkilere karşı kompozit malzemeyi korumaktır.

Matris malzemeleri liflerin çevresini sarar. Bu yüzden dışarıdan gelebilecek her türlü etkenden ilk etkilenecek olanlar matris malzemeleridir. Bu yüzden kompozit malzemelerin bazı özelliklerini matris malzemeler belirler. Örneğin yüksek sıcaklığa dayanamayan bir lif malzemesi, daha yüksek sıcaklığa dayanabilen ve ısı yalıtımı yüksek olmayan bir matris malzemesi içerisinde yüksek sıcaklıkta kullanılabilen bir kompozit oluşturabilir [4].

Kompozit yapılarda yükü taşıyan takviyelerin fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi bulunmayan bir lif demeti düşünüldüğünde yük bir ya da birkaç lif tarafından taşınacaktır. Matris ise yükün tüm liflere eşit olarak dağılımını sağlamaktadır. Kayma yüküne dayanım liflerle matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kayma mukavemeti özelliklerini gerektirir. Lif yönlenmelerine dik doğrultudaki dayanım, matrisin mekanik özelliklerine ve lif ile matris arasındaki bağ kuvvetlerine bağlı olup, kompozit yapının mukavemetini belirler. Matris, life göre daha zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur [5].

Kompozitlerde matris olarak polimerler, metaller ve seramikler kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında incelenen kompozit malzemenin matris elemanı termoplastik bir malzeme olarak seçildiği için bundan sonra diğer malzemeler incelenmeyecek ve sadece termoplastik matrislerin özellikleri ile açıklanacaktır.

Termoplastik malzemeler genel olarak diğer polimerik matris malzemesi olan termoset malzemelere göre daha sünek ve tok malzemelerdir. Termoplastikler herhangi bir takviye malzemesi olmadan, yük altında çalışılmayan uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Şekillendirilebilmeleri için ısıtılmaları gereken termoplastik polimerler, soğuduktan sonra bu şeklini korur. Bu polimerler, özelliklerinde önemli değişiklikler olmadan defalarca ısıtılarak yeni şekillere sokulabilir [6]. Termoplastik molekülerde çapraz bağ oluşumu gözlenmemektedir, dolayısıyla esnek ve şekillendirilebilirdirler.

Yük altında çalışılan yapısal uygulamalar için kullanılan termoplastik malzemeler genellikle dolgu ve takviyeler ile birlikte kullanılmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda termoplastik malzemeler termosetlere nazaran düşük sürünme direnci göstermektedir ve kimyasallara karşı daha az dayanıklıdır. Termoplastik malzemelerin birbirleriyle kaynak-bağlantı yapılabilmesi termoset malzemelere oranla daha kolaydır. Termoplastik kompozitler termosetlere kıyasla daha yüksek sıcaklık ve basınçta şekillendirilebilir [7]. Çizelge 2.1'de bazı yüksek dayanımlı polimerlere ait genel özellikler gösterilmiştir.

**Çizelge 2.1:** Bazı yüksek dayanımlı polimerlerin genel özellikleri [7].

Polimer Malzeme	Yoğunluk (g / cm <sup>3</sup> )	Elastiklik Modülü GPa	Çekme Dayanımı MPa
Naylon	1,1	1,3-3,5	55-90
PEEK	1,3-1,35	3,5-4,4	100
PPS	1,3-1,4	3,4	80
Polyester	1,3-1,4	2,1-2,8	55-60
Polikarbonat	1,2	3,5	55-70
Asetal	1,4	0,7-1,4	70
Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE)	0,94	1-1,2	19-20

Tez çalışması kapsamında termoplastik olarak düşük yoğunluklu polietilen (DYPE) malzemesi tercih edilmiştir. Düşük yoğunluk polietilen, kimyasal olarak en basit ancak en son bulunan plastiklerden birisi olarak sağlam, esnek ve yalıtkan bir yapıya sahiptir. Diğer taraftan ısı, ışık ve oksijene karşı dayanıklı değildir. Katkı maddelerinin kullanımı ve molekül yapısının ayarlanması ile daha dayanıklı polietilen ürünleri elde edilebilmektedir. Bu özellikleriyle polietilen, ambalaj malzemesi, ağır hizmet torbaları esnek hortumlar, değişik amaçlı borular, mutfak eşyası, oyuncak, bidon, şişe vb. üretiminde kullanılmaktadır.

Termoplastik reçine gruplarından olan alçak yoğunluklu polietilen, etilenin polimerizasyon reaksiyonu ile elde edilir ve genel olarak geniş bir sıcaklık aralığında hem yüksek dayanımlı esnek olabilme özelliği taşır [6].

Düşük yoğunluklu polietilen (DYPE) bir otoklavda veya boru tipi tübular reaktörde, etilen monomerlerinin 1200-3000 atm basınç ve 130-350°C sıcaklıkta, organik peroksitlerin yardımıyla polimerizasyonu ile elde edilir. DYPE'nin yoğunluğu 0.910-0.925 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişir [8].

DYPE'nin tüm kullanımları için tüketimi 140 bin tonu bulmuştur. DYPE'nin en önemli kullanım alanı film üretimidir. Öyleki, film üretimindeki kullanımı, toplam kullanımın % 90'ını oluşturmaktadır. Film kullanımının % 50'si gıda ve endüstriyel ürünlerin paketlenmesinde ve geriye kalan diğer kısım ise tarımda kullanılmaktadır [9].

Polietilenlerin genel karakteristik özellikleri şöyledir:

- Yüksek dayanım,
- Asit, baz ve çözücülere dayanıklıdır,
- Dielektrik özellikleri üstündür,
- Çevre şartlarına dayanıklıdır,
- Kolay işlenebilirler [9].

## 2.2 Takviye Malzemeleri

Kompozitlerde lifler ve farklı geometrilerde tanecikler takviye amacıyla kullanılır. Liflerin boyları, kesitlerinden belirgin olarak büyüktür. Tanecikli takviyeler ise üç yöndeki boyutları yakındır ve belirgin farklılık bulunmaz.

Takviye elemanının temel fonksiyonları;

- Kompozit yapıya gelen yükün yaklaşık %70 - 90'lık kısmını taşımak.
- Kompozit malzemenin dayanımını, ısıl kararlılığını ve rijitliğini ve diğer yapısal özelliklerini sağlamak.
- Kullanılan takviye malzemesine göre elektriksel iletkenliği veya yalıtkanlığı sağlamak [7].

Takviye elemanları parçacık, lif, dolgu, ince tabakalı şeklinde olabilmektedirler. Uygulama alanına ve üretim yöntemine göre takviyelerin şekli seçilir. Yapısal uygulamalar için sürekli ve uzun lifler tavsiye edilirken, yapısal olmayan ve yük altında çalışmayacak ve enjeksiyon ve ekstrüzyon yöntemleri ile üretimi gerçekleştirilecek kompozit malzemeler için kısa lif takviyeler tavsiye edilebilir. Kısa lif takviyeli kompozit malzemeler uzun lif takviyeli kompozit malzemelere nazaran daha düşük dayanım özellikleri sergilemektedir [7].

## 2.3 Lif Takviyeli Kompozitler

Lif takviyeli kompozitler ince liflerin matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Liflerin matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun liflerin matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile lifler doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, liflere dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş lif takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa liflerle ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Liflerin mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, liflerin uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından liflere iletilen yük miktarı artmaktadır. Lif yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir. Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur ise lif matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise liflerle temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da lif ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir [2].

Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu lif şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeki değerlerinden çok üst düzeyde olabilmektedir. Örneğin; karbon liflerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği ise 3 kat daha yüksektir. Lifler günümüzde düşük performanslı ev eşyalarından roket motorlarına kadar kullanım alanı bulan malzemeler olmuşlardır [3].

Cam, karbon, aramid, bor, polietilen, poliamit, poliester, doğal lifler veya dokumalar kompozit hazırlamada kullanılan liflere örneklerdir. Bu lifler içerisinde genel amaçlı ticari kompozitlerde en fazla cam lifler, ileri kompozitlerde ise aramid ve karbon lifleri kullanılmaktadır [1].

Tezin bir sonraki başlığında üzerinde çalışılan kompozit malzeme olarak doğal lif takviyeli kompozit malzemeler ile ilgili literatür bilgilerinin yanı sıra uygulama alanlarıyla ilgili bilgiler verilmiştir.

### **2.3.1 Doğal lif takviyeli kompozitler**

Bilindiği üzere inşaat, uçak, otomotiv, plastik endüstrisi gibi farklı alanlarda lif takviyeli kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit yapıyı desteklemek ve güçlendirmek amacıyla kullanılan takviye lifleri çoğunlukla cam, boron, karbon, aramid gibi insan yapımı malzemelerdir ve düşük yoğunlukta sağladıkları yüksek performans ile oldukça tercih edilen malzemeler konumuna gelmişlerdir. Geçtiğimiz son on yıl içerisinde doğal ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen liflerin kompozit malzemelerde kullanımına yönelik çok sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Çalışmaların ortak gayesi biobozunabilirliği düşük olan yapay lifler yerine biobozunabilirliği yüksek lifler kullanarak, kullanım sonrası çevresel problemlere neden olmayacak yeni kompozit malzemeler geliştirmek ve yenilenebilir kaynakların kullanımına yönelmektir [5]. Bunlara ek olarak özellikle cam liflerine kıyasla solunum ve cilt problemleri gibi sağlık sorunları bakımından zararsızdırlar [6].

Doğal lifler olarak çoğunlukla bitkisel lifler kullanılmasına rağmen az miktarda da olsa hayvasal lif olan ipek lifi kullanımı da görülmektedir [7,8]. Çalışmalarda genellikle jüt, kenevir, kenaf, sisal ve ağaç lifleri önemli mekanik özellikleri nedeniyle kompozit malzemelerde kullanılan en önemli liflerdendir[9-14]. Ayrıca bitkisel lif takviyesi olarak; tekstil endüstrisinde en çok kullanılan lif olan pamuk lifi

ve keten gibi liflerin kullanımının yanısıra araştırmanın yapıldığı bölgeye özgü liflerin ve zirai ürünlerin kompozit olarak kullanılabilirliklerinin incelenmesi adına araştırmalarda yer aldığı görülmektedir. Çalışmalarda kullanılan jüt, rami, sisal, bambu, hindistan cevizi, kapok gibi liflerin; genellikle Güney Amerika, Afrika ve Hindistan gibi bölgelerde yaygın olarak yetiştirilen liflerdir ve ilgili araştırmaların bu bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir.

Araştırmaların ortaya koyduğu ürünlerin hemen hemen hepsinde polimerin (saf reçine) mekanik özelliklerde iyileşme olduğu ve özellikle darbe dayanımının lif takviyesiyle yüksek oranda geliştiği görülmektedir [15-21]. Yüksek performanslı liflerden oluşan kompozit yapılarla karşılaştırıldığında ise doğal lifli kompozitlerin dayanım değerlerinin daha düşük değerler verdikleri görülmektedir. Bu sebeple ürünlerin kullanım alanları için yüksek mekanik performans gerektiren alanlar yerine, daha basit kullanım alanları önerilmektedir; bu sebeple cam, karbon, aramid vb. takviyeli kompozitler yerine alternatif bir malzeme olarak sunulmaktan daha çok, düşük ve orta yükleri taşıyabilecek masa, raf, kapı gibi iç mekân uygulamaları veya çatı, otomobil parçası, drenaj panelleri gibi dış mekân uygulamalarında kullanılabilecekleri ifade edilmiştir [19,20].

Doğal lif takviyeli kompozit malzemeler otomotiv parçalarında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Örneğin Mercedes marka arabaların kapı panellerinde, 2000 model Chevrolet arka bagaj panellerinde ve Almanya'da üretilen Golf marka arabaların çeşitli parçalarında doğal lif takviyeli kompozitleri görmek mümkündür [22]. Şekil 2.2'de Mercedes-Benz E serisinde kullanılan farklı doğal lif takviyeli kompozit parçalar sergilenmiştir.



**Şekil 2.2 :** Mercedes-Benz E serisinde kullanılan farklı doğal lif takviyeli kompozit parçalar [22].

Doğal lif takviyeleri olarak pamuk lifi, ağaç lifi, jüt, kenevir lifi, sisal lifi, keten, rami lifi ve hindistan cevizi lifi gibi birçok lif çeşitleri bulunmaktadır. Çizelge 2.2’ de doğal lifleri, sentetik lifleri ve özellikleri kıyaslama amaçlı verilmiştir.

**Çizelge 2.2:** Lif takviyeleri ve özellikleri.

Lif / takviye	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Uzama (%)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)	Referanslar
Pamuk	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6	[23,24,25]
Jüt	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5	[23,24]
Keten	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6	[24]
Sisal	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22,0	[24,24]
Ağaç	1,5	-	1000	40,0	[26]
E-cam	2,5	2,5	2000-3500	70,0	[27]
Aramid	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-37,0	[27]
Karbon	1,4	1,4-1,8	4000	230,0-240,0	[27]

### 2.3.1.1 Pamuk lifi

Tez içeriğinde incelenen kompozit malzemenin takviye elemanı olarak seçilen pamuk lifi, tekstil sanayi için büyük önem taşımaktadır. Türk tekstil sanayi, sağladığı katma değer, tekstil ihracatının ülke ekonomisine kazandırdığı döviz miktarı, emek

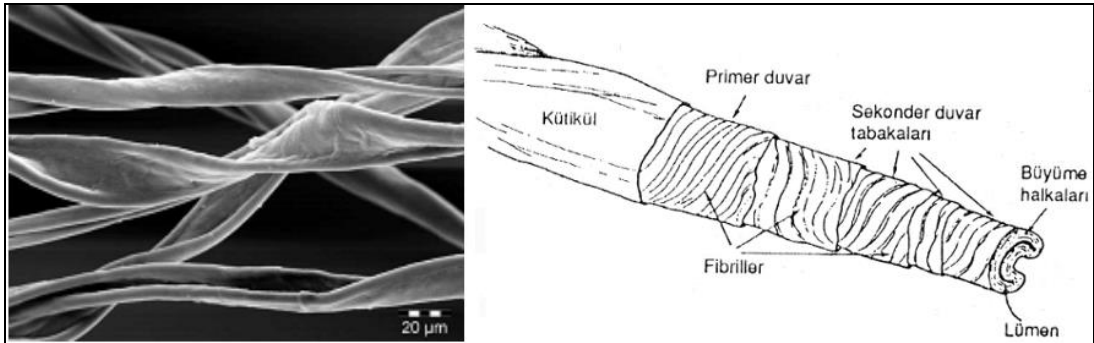


yoğun iş gücü olması nedeniyle yaratılan istihdam hacmi ile vazgeçilemez bir sektördür. Pamuk lifi ise ülkemizde tekstil sektörünün stratejik hammaddesidir [28].

Malvaceae familyasından Gossypium sınıfına ait olan pamuk bitkisi, koza içerisinde tohumları bulunan, tohumların üstü beyaz veya krem rengi tüylerle kaplı olan bir bitkidir. Bu tüyler kısa veya uzun olabilmekte, kısa olan tüylere 'hav', uzun olan tüylere ise 'lif' denilmektedir. Bu bitki, ideal miktarda gelişim gösterebilmek için ortalama 6-7 ay arasında ılık ve sıcak hava, yeterli derecede güneş ışığı ve bol nem gerektirmektedir [29].

Pamuklar lifi karakterlerine göre kısa lifli, orta lifli, uzun lifli ve çok uzun lifli pamuklar olarak dört gruba ayrılmaktadır. Dünya'da ve Türkiye'de genel olarak orta uzunlukta pamuklar üretilmektedir [28].

Pamuk lifinin özellikleri, diğer lifler arasında kolayca tespit edilebilmesini sağlar. Tek bir hücreden oluşan lif, mikroskop altında incelendiğinde, uzunluğu boyunca merkezi bir kanal veya lümenin yer aldığı, bükülmüş ve çökmüş düz bir tüp şeklinde görülmektedir. Lümenin içi boştur ve bu kısımda hava bulunmaktadır, bu hava pamuğun sıcak tutma özelliğini sağlamaktadır [29].



**Şekil 2.3 :** Pamuk lifinin fiziksel görünüşü ve kısımları [30].

Şekil 2.3'de görüldüğü üzere lif boyunca ekseni boyunca spiraller ve kıvrımlar belirgin şekilde görülmektedir ayrıca helis yönü sık sık değişmektedir. Bu durum kompozitlerde liflerin matrise daha rahat bir şekilde tutunması bakımından kolaylık sağlamaktadır. Pamuk lifinin dış tabakasını oluşturan kütikül, pektinleri ve proteinimsi maddeleri içeren vakslı bir tabaka olup, lifi korur ve yıkama işlemi ile liften uzaklaştırılabilir. İnce fibrillerden oluşan selülozdan oluşan primer duvar, ince hücre duvarıdır. Sekonder duvar, pamuğun ana kısmını oluşturan selüloz tabakalarından meydana gelmektedir. Lifin uzunluğu boyunca yer alan içi boş kanal ise lümen olarak adlandırılmaktadır.

Genel olarak pamuk lifinin özelliklerini şu şeklide sıralayabiliriz;

- Pamuk lifinin yoğunluğu 1,52 – 1,54 g/cm<sup>3</sup> tür.
- Pamuk lifi, mukavemet açısından yün ve ipek arasında yer almaktadır.
- Pamuğun kopma dayanımı yaş halde daha yüksektir.
- Pamuk lifinin kopma uzunluğu %5 ile %10 arasında değişmektedir.
- Pamuk lifinin uzunluğu 10-55 mm arasında değişmektedir [29].

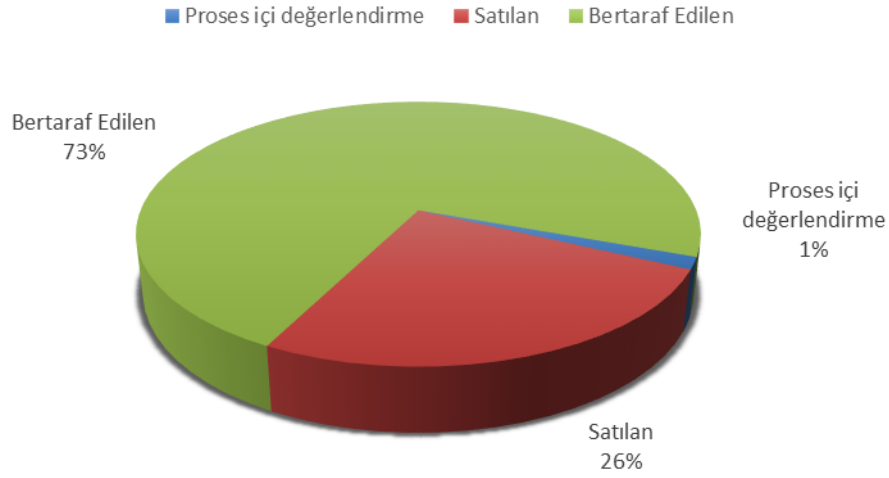
Tez çalışmasında doğal lif takviyesi olan pamuk lifi kaynağı olarak atıkların yeniden değerlendirilerek ekonomiye kazandırılması amacıyla endüstriden toplanan pamuklu atık kumaşlar tercih edilmiştir. Atık kumaşlarda boya mevcut olup, toplandıktan sonra herhangi bir işlemde geçirilmemiştir.

### **2.3.1.2 Lif kaynağı olarak tekstil atıklarındaki mevcut durum**

Gelişen tekstil teknolojisine paralel olarak ortaya çıkan ve çok özel uygulama alanları bulabilen endüstriyel tekstil, günümüzde oldukça önemli hale gelmiştir. Endüstriyel tekstil, bugün için tıptan tarıma, inşaat sektöründen değişik endüstriyel uygulamalara, uzaydan savunma sanayiine kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Tekstil endüstrisindeki hızlı gelişme, insanların örtünme ve diğer günlük ihtiyaçlarını karşılamanın ötesinde, günümüzde çok geniş uygulama sahasında rahatlıkla görülebilmektedir.

Bu kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahip tekstil ürünleri, kullanım ömürlerini ve işlevlerini tamamladıkları ya da ihtiyaç duyulmadığı zaman uzaklaştırılmak istenen atıklar haline gelmektedir. Tekstil atıkları büyük oranda üretimin yapıldığı sanayiden gelmekte ve ürünler lif, iplik kumaş, konfeksiyon atığı, elyaf atığı, pamuk tozu, üstübü, kadife tozu gibi endüstriyel atık şeklinde olabilmektedir. Atıkların bir bölümü geri dönüştürülerek ağırlıklı dokunmamış kumaş ve bir miktar da iplik üretiminde kullanılmaktadır. Gördükleri bazı kimyasal ve ısı işlemler yüzünden bu şekilde değerlendirilemeyen tekstil atıkları da mevcuttur. Bunlar üretici firmalar tarafından çöpe atılmakta veya yakılmaktadır. Evsel tekstil atıkları ise kaynağında ayrıştırılmadığından çöp olarak nitelendirilmekte ve düzenli depolama yönetimi ile bertaraf edilmektedir. Endüstriyel tekstil atıkları ise bazı tekstil fabrikalarından düzensiz olarak ara toplayıcılar tarafından toplanarak, tekstil geri dönüşümü yapan firmalara gönderilmektedir. Bu firmalarda türlerine göre ayrılan tekstil atıkları, kullanım amaçlarına göre keçe, iplik vb. ürünlere dönüştürülmekte ve yatak ve

otomobil vb. sektörlerde kullanılmaktadır. Şekil 2.4’de Türkiye İstatistik Kurumu’na göre endüstriyel tekstil atıklarının mevcut bertaraf durumları gösterilmektedir [31].



**Şekil 2.4 :** Endüstriyel tekstil atığı mevcut bertaraf durumu [31].

2006 yılı verilerine göre, Türkiye’deki belediyelerin; 22 tane düzenli depolama tesisi, 3 tane yakma tesisi, 4 tane kompost tesisi bulunmakta olup bu bertaraf ve geri kazanım tesislerine getirilen toplam atık miktarı 10.247.491 tondur ve bu atıkların 249.409 tonunu tekstil atıkları oluşturmaktadır. 2008 yılı verilerine göre Türkiye’deki sanayi grubunda yaratılan endüstriyel katı atık miktarının %4,37’sini tekstil ürünleri ve giyim eşyası imalat atıkları oluşturmaktadır [32].

Tekstil atığınının geri dönüşümü ise tekstil ile ilgili üretim birimlerinde katı atıkların (parça kumaş, iplik atıkları, şilte, lif atığı, pamuk tozu, üstüğü ve kadife tozu gibi) bir kısmını geri dönüşüm için hurdacılara satmakta, bir kısmı da çöpe atılmakta veya yakılmaktadırlar. Atıklar hurdacılar tarafından toplanıp şekil ve tiplerine veya karışımlarına göre sınıflandırılır. Bazı tekstil atıklarından keçe ve temizlik aracı yapılabilir. Parça kumaş ve üstüğüler büyük oranda geri kazanılırken iplik fabrikası atıkları, özellikle telef yakılmakta veya çöpe atılmaktadır. Kadife tıraş tozunun beyaz olanı tutkal yapımında ve banknotlarda kullanılırken, renkli olanları atılmaktadır.

Tekstil; ambalaj sanayinde genel olarak torba, çuval gibi formlarda kullanılmaktadır. Ayrıca ambalajlamada kullanılan halat, urgan, rafya, sicim, ip gibi malzemeler de tekstil ürünleri arasında yer almaktadır. Geri kazanılmış tekstil ambalajlarından

dolgu ve yalıtım malzemesi olarak yararlanılabilmektedir. En büyük tekstil geri dönüşümü olarak artık kumaş ya da işlenmiş hali olan keçe gösterilebilir.

Naylon, polyester gibi termoplastik lifler içeren tekstil atıkları eritme ve yumuşatma işlemiyle plastik kısım alındıktan sonra geri dönüştürülebilir [33].

Özellikle tekstil atıklarının geri dönüştürülmesiyle beraber;

- Çöplüğe giden artık miktarlarının azaltılmasının sağlanması

Geri dönüşümün uygulanması ile çöplere giden atık miktarlarının önemli ölçüde azalması sağlanır. Bu şekilde atıkların taşınması ve depolanması gibi işlemlerde daha az alan ve daha az enerji kullanılmış olur.

- Enerji tasarrufu sağlanması

Geri dönüşüm sayesinde malzeme üretiminde endüstriyel işlem sayısı azaltılır. Bu sayede enerji tasarrufu sağlanmış olur. Örneğin; metal içecek kutularının geri dönüşümü işleminde bu metaller direkt olarak eritilerek yeni ürün haline dönüştürüldüğünde bu metallerin üretimi için kullanılan maden cevheri ve bu cevherin saflaştırılma işlemlerine gerek olmadan üretim gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde bir alüminyum kutunun geri dönüşümünden %96 oranında enerji tasarrufu sağlanabilir [34].

- Ekonomiye katkı sağlanması

Hammaddenin azalması ve doğal kaynakların hızla tükenmesi ekonomik problemlerin ortaya çıkmasına neden olur. Bu problemlerin ortaya çıkmasını geri dönüşüm sayesinde engelleyerek ekonomi üzerinde olumlu bir etki yapılması sağlanır. Geri dönüşüm yapılarak hem yeni iş imkânları yaratılmış olur hem de doğal kaynakların en verimli şekilde kullanılması sağlanarak gelecek kuşaklara doğal kaynaklardan yararlanma olanağı sağlanacaktır.

- Geleceğe yatırım yapılması

Maliyetlerin azaltılması, enerji verimliliği, kaynakların korunması ve mesleki gelişim, ülkelerin güçlü bir ekonomiye ulaşmasını sağlayarak geleceğe önemli miktarda yatırım yapılmasını sağlar.

- Doğal kaynakların korunması sağlanması

Doğal kaynaklar dünya nüfusunun artması ile her geçen gün azalmaktadır. Bu nedenle değerlendirilebilir nitelikli atıkları geri dönüştürülerek doğal kaynakların korunması sağlanır.



### 3. LİTERATÜR

Tekstil atıkların oluşum sonrası çevresel problemlere yol açmaması için kontrolü gereklidir. Bu amaçla kullanılan yöntemlerden biri, atık malzemelerin çeşitli kullanım alanlarında değerlendirilmek amacıyla kompozit malzeme üretiminde kullanımınıdır. Bu sayede değersiz sayılan ürünler hammadde veya yan ürün olarak başka ürünlerde kullanılabilmekte ve hem çevresel hem de ekonomik olarak büyük faydalar sağlanabilmektedir. Gerek tekstil atıklarının değerlendirilmesi üzerine, gerekse de doğal liflerin sentetik lifler yerine alternatif olarak kompozit malzemelerde kullanılabilirliği üzerine pek çok uluslararası araştırma ve yayın bulunmaktadır.

Ayrıca kompozit malzemelerle ilgili yürütülen yeni çalışmaları, günümüzde çevresel duyarlılığın artışıyla birlikte “doğal lif takviyeli kompozitler” ve “atık malzemelerden kompozit üretimi” olarak farklı başlıklar altında toplayabilmek mümkündür.

Literatür araştırması kapsamında doğal lif takviyeli kompozitler, lif / matris ara yüzey iyileştirme çalışmaları, çevresel koşulların etkileri ve dayanım değerlerinin tahmininde kullanılan yöntemler üzerine çalışmalar incelenmiş ve dört ana başlık altında toplanmıştır.

#### 3.1 Doğal Lif Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bateman ve Wu tarafından 2001 yılında yayınlanan çalışma atık tekstil malzemesinin değerlendirilmesi amacıyla oldukça güzel bir örnektir. Çalışmada atık halılardan yararlanılması amacıyla naylon hammaddeli halı ve düşük yoğunluklu polietilenden oluşan karma malzemeler hazırlanmıştır. Halılar yaklaşık 30 cm<sup>2</sup>'lik parçalara kesilmiş ve ilk önce polietilenle lamine edilmiştir. Daha sonra lamine edilmiş parçalar bir giyotinle doğranmış ve bir kırıcı yardımıyla ekstrüzyona uygun boyutlarda parçacıklar haline getirilmiştir. Ekstrüzyon işleminden sonra enjeksiyon makinesiyle karma malzemeler oluşturulmuş ve çekme deneyleri ASTM 638 standardına uygun olarak yapılmıştır. Elastiklik modülü en yüksek değere % 50 halı

takviyeli karma malzemede ulaşılırken; çekme dayanımı, uzama ve spesifik çekme enerjisi takviye oranı azaldıkça azalmakta ve en yüksek değerlere saf polietilen ile ulaşılmaktadır [35].

Bir diğer çalışmada, takviye malzemesi olarak pamuk lifi atığı, matris malzemesi olarak da nonwoven polipropilen atıkları kullanılmıştır. Kullanılan nonwoven atıkların erime noktası pamuğun bozunma sıcaklığının altında yer almaktadır. Üretim metodu olarak, enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılmıştır. Nonwoven atıkları küçük parçalar halinde kesilmiş ve belirli oranlardaki pamuk atığı ile birlikte, granülleştirmeden, doğrudan enjeksiyon kalıplama makinesine beslenmiştir. Katkı maddesi ilave edilmiştir. Kalıplama sıcaklığı, nonwoven atıkların (PP'nin) erime sıcaklığı esas alınarak ayarlanmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerlerinin artan takviye oranı ile arttığı görölmektedir. Bu gelişim, katkı maddesi ilavesi ile iyileştirilmiş lif dağılımı ve yüzey adhezyon kuvveti ile açıklanmaktadır. Çalışmanın devamında, üretilen plakalar eritilerek tekrar kalıplama işlemine sokulmuştur. İkinci kalıplama işleminde, malzemenin ilk çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerlerine kıyasla, artış gözlenmiştir. Bu da tekrar kalıplama ile artan lif dağılımı beklenen bir sonucu olarak açıklanabilmektedir [36].

Priya ve arkadaşları tarafından 2005 yılında yayınlanmış olan alışma, Hindistan bölgesinde üretilen ipek kumaşlardan oluşan atıkların değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Tekrar kullanımı mümkün olmayan atık ipek kumaşlar, epoksi reçine kullanılarak kalıplanmış ve farklı takviye oranlarında kompozit yapılar oluşturulmuştur. Yapılan testler sonucunda çekme ve eğilme özelliklerinin takviye oranı yükseldikçe, arttığı görölmüştür. %25 ipek kumaş oranında saf epoksiye göre %65 daha yüksek çekme dayanımı ve yaklaşık %30 daha yüksek eğilme dayanımı elde edildiği ifade edilmiştir. Kimyasal olarak da solvent ve bazı bazlara karşı iyi bir dayanıma sahip olduğu görölmüştür [37].

Priya ve arkadaşlarının bir önceki çalışmalarının devamı niteliğindeki bu yayınlarında ise atık ipek kumaşlarla oluşturulan epoksi matrisli kompozitlerin darbe ve basma özellikleri ve bunun yanısıra yoğunluk, boşluk oranı ve ağırlık düşüşü özellikleri incelenmiştir. Standartlara göre yapılan testler sonucunda darbe dayanımının ve basma dayanımının takviye oranının yükselmesiyle arttığı ve % 25 ipek kumaş takviyeli kompozitin saf epoksi ile karşılaştırıldığında darbe dayanımının yaklaşık % 83, basma dayanımının yaklaşık % 50 arttığı belirtilmiştir. Kompozitlerin



yoğunluk ve ağırlıkları ipeğin yoğunluğunun daha az olması sebebiyle, saf epoksiye göre daha düşük değerler vermiştir. Boşluk oranının da takviye oranı arttıkça azaldığı görülmüştür [38].

Ju'nior ve arkadaşlarının 2003 yılında yayınladıkları bu çalışmada bezayağı dokuma rami-pamuk karışımı kumaşlar polimer matrisli kompozitte takviye olarak kullanılmıştır. Kompozitler pres kalıpları ile hazırlanmış ve kumaşlar kalıp boyutunda kesilerek tabaka tabaka yerleştirilmiştir. Kompozitin çekme dayanımı rami liflerinin oryantasyonu ve hacimsel miktarına bağlı olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlarda gerilme kuvvetlerini kontrol eden ana parametrenin gerilme eksenine yönüne paralel rami hacimsel miktarı olduğu görülmüştür. Pamuğun etkisinin ise minimum düzeyde olduğu görülmüştür. İçerisinde hacimsel olarak %45 rami içeren kompozitin, saf poliester plaka ile karşılaştırıldığında %338 daha iyi gerilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür [39].

Dhaka ve arkadaşlarının 2006 yılında yayınladıkları çalışmada dokunmamış kumaş yapısında bulunan kenevir lifleri ile doymamış polyesterden, elle yatırma ve pres kalıplama yöntemlerinin kombinasyonu ile kompozit yapılar oluşturulmuştur. Elde edilen kompozitler 25°C ve 100°C sıcaklıkta suya daldırılmış ve sonrasında çekme ve eğilme testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre lif miktarının artışı, selüloz miktarı ve boşluk miktarının artışına bağlı olarak su emilim miktarını arttırmış; su alımının artışı lif-matris arayüz oluşumunu olumsuz etkilemiş dolayısıyla hem çekme hem de eğilme özelliklerinde azalma gözlenmiştir [40].

Sam-Jung Kim ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışmada doğal takviyeli/PP matrisli kompozit malzemenin mekanik davranışı incelenmiştir. Doğal takviye olarak ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında odun lifi ve pamuk lifleri kullanılmış ve her iki lifin kompozit malzeme üzerine etkileri karşılaştırılmıştır. Odun lifinin kompozit malzeme içerisindeki oranı arttıkça malzemenin çekme dayanımında azalış gözlenirken, pamuk lifi içeren kompozit malzeme ise pamuk lif miktarı arttıkça çekme dayanımında artış gözlenmiştir. Bu artışın sebebi olarak ise pamuk liflerinin odun liflerine nazaran biraz daha karmaşık ve birbirine dolanmış bir formda olması gösterilmiştir [41].

Gowda ve arkadaşlarının doğal lifli kompozitlerle ilgili yapmış oldukları çalışmada, çekme, kesme, eğilme, darbe ve basma dayanımları yanında sertlik ölçümü testleri de

uygulanmıştır. Yapılan testlerden elde edilen veriler sonucunda, kompozitlerin cam takviyeli kompozitlere rakip olamayacağı, ama odun esaslı kompozitler ve bazı plastikler için iyi bir rakip olabileceği söylenmiş; raf, masa üstleri, paneller gibi iç mekan uygulamaları ve hatta çatı, otomobil parçaları, drenaj boruları gibi dış mekan uygulamalarında kullanılabilmesine değinilmiştir. Dış mekân uygulamaları için öncelikle su ve hava şartlarına dayanımlarının araştırılması gerektiği belirtilmiştir [20].

### **3.2 Lif / Matris Ara Yüzey İyileştirme Çalışmaları**

Maleik bağlayıcı ajanları : Dolgu maddesi ve lif takviyeler içeren kompozitlerin güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Maleik anhidrit, kompozitlerin mekanik özelliklerini ve arayüzey bağlanmasını iyileştirmek için polimer matriste kullanıldığı gibi lif yüzeyini modifiye etmek için kullanılır. PP zinciri maleik anhidritin yapışmasını ve maleik anhidrid aşılınmış polipropilen oluşmasını sağlar. Sıcak Maleikanhidrit polipropilen (MAPP) kopolimeri ile işlenmiş selüloz lifler arayüzey arasında kovalent bağları sağlar. Doğal liflerin yüzey modifikasyonu için kaplama ajanı olarak kullanılan MAPP, bitkisel fiber takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı, elastiklik modülü, eğme dayanımı, sertlik ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir [42].

Selüloz yüzeyinde bulunan hidroksil gruplarının maleik anhidrit ile reaksiyonu sayesinde lifler arasındaki molekül içi hidrojen bağlarında bir azalma olur. Bu da liflerin matris içinde daha iyi dağılmasına neden olur [43].

Alkali İşlemi : Alkali işleme veya merserizasyon liflerin iyi şişebilmesi için güçlü baz içeren oldukça konsantre sulu çözeltisine maruz bırakmak olarak tanımlanmıştır. Bunun sonucunda lifin yapısı, boyutları, morfolojisi ve mekanik özellikleri değişir. Sodyum hidroksit (NaOH), bitkisel liflerin yüzeyini temizlemek için kullanılan en yaygın kimyasaldır ve kısa uzunluktaki kristaller üreterek ve depolimerizasyon ile doğal selüloz I ve selüloz III'un yapısını değiştirir. Uygun merserizasyon parametreleri seçilerek dayanım ve kopmadaki uzama gibi temel lif özelliklerini değiştirebilir [44].

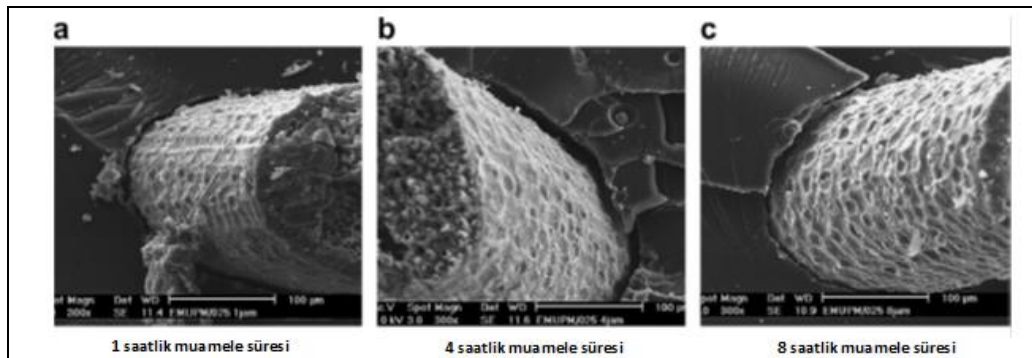
Silan İşlemi : Silan, lif modifikasyonu için kullanılan reaktif türlerinin en önemli üyelerinden biridir. Mineral lifler ile polimeri birleştirmek için geliştirilen kaplama

ajanlarının ana grubu organik silanlardır. Kaplama ajanlarındaki organik fonksiyonelli grup polimer ile reaksiyona sebep olur, bu reaksiyon 2 şekilde olabilir; kopolimerizasyon ve/veya iç içe geçmiş ağ oluşturarak [44]. Silan kaplama ajanları lif-matris arayüzeyindeki selüloz üzerindeki hidroksil gruplarının sayısını azaltabilir. Nemin varlığında, hidroliz edilebilir alkoksi grubu silanolün oluşumuna öncülük eder. Sonra silanol lif üzerindeki hidroksil gruplarıyla reaksiyona girer, hücre duvarında kararlı kovalent bağlar oluşturur. Böylece, silan uygulamasıyla elde edilen hidrokarbon zincirleri lif ve matris arasındaki kovalent bağ sayesinde çapraz bağlı bir ağ oluşturarak liflerin şişmesini engeller [44].

Silan kaplama ajanı ile modifiye edilmiş lif ve matris arasındaki etkileşimin alkali işlem ile modifiye edilmiş liften çok daha güçlü olduğu kanıtlanmıştır. Buda silan ile işlem görmüş kompozitin alkali ile işlem görmüş kompozitten daha yüksek çekme dayanımının olduğunu göstermektedir [44].

Munir Taşdemir ve arkadaşları tarafından 2009 yılında yayınlanan çalışmada, ağaç lifi takviyeli DYPE karma malzemeler oluşturulmuş ve lif-matris arayüzeyinin geliştirilmesi amacıyla maleik anhidrit modifiyesi yapılmıştır. Oluşturulan malzemede ağaç lifi takviyesiyle elastiklik modülü ve sertlik artmıştır, çekme dayanımı ve kopma uzama değerleri düşmüştür [45].

Bachtar ve arkadaşlarının NaOH ile muamele üzerine gerçekleştirdiği bir çalışmada ise şeker kamışı lifi farklı molaritedeki baz çözeltilerinde, değişen sürelerde muamele edilmiştir. Çalışmada NaOH uygulaması sonrası liflerin yüzeyinde görülen değişim şekil 3.1'de görülmektedir. Kompozitin çekme dayanım değeri 0.25 M NaOH derişiminde 1 s muamelesiyle yaklaşık %25 artış göstermiştir. Elastiklik modülü ise yaklaşık %20 artmıştır [46].



**Şekil 3.1 :** 0.25 M NaOH ile muamele edilen liflerin muamele süresine göre durumu [46].

Hibritleştirme: Doğal lif takviyeli polimer matrisli kompozitlerdeki lif matris ara yüzeyini iyileştirmede kullanılan kimyasal ve fiziksel iyileştirme yöntemlerine önemli bir alternatif olarak hibritleştirme işlemi son yıllarda üzerine çalışılan önemli konular arasında yer almaktadır. Polimer matrisli doğal lif takviyeli kompozitlerin hibritleştirme çalışmalarında iki farklı doğal lif takviyesinin yanı sıra doğal lif / sentetik lif takviyeli kompozit oluşumu veya iki farklı polimer matris kullanılarak hibritleştirme yapılabilmektedir. Jarukumjorn ve arkadaşlarının 2009 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada sisal lifi ve cam elyaf takviyeli polipropilen (PP) matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmadan çıkan sonuçlara göre çekme dayanımı, eğme dayanımı ve darbe dayanımının cam elyaf takviyesiyle arttığı ayrıca nem yutumu özelliklerinin de iyileştiği vurgulanmıştır. Nem yutumu miktarının cam elyaf oranıyla ters orantılı bir şekilde azaldığı vurgulanmıştır [47]. Thwe ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ise cam elyaf takviyesinin doğal lif takviyeli kompozit malzemelerin mekanik performansında iyileştirmesinin yanı sıra çevresel şartların olumsuz etkilerinden de koruduğunu çalışmasında vurgulamıştır [48]. Doğal lif takviyeli kompozitlerin hibritleştirilmesiyle ilgili bir diğer çalışmada ise kenevir / cam elyaf takviyeli hibrit PP kompozitlerin mekanik, nem yutumu ve ısıl özellikleri irdelenmiştir. Çalışmadan çıkan sonuçlara göre cam elyaf takviyesiyle beraber mekanik özelliklerin önemli derece arttığı görülmüştür. Cicala ve arkadaşlarının 2009 yılında yürüttüğü çalışmada ise kompozit malzemenin hibritleşmesiyle birlikte cam elyaf takviyeli kompozite kıyasla aynı dayanıma sahip fakat %20 daha ucuz ve %23 daha hafif bir hibrit kompozit yapının oluşturulabileceği görülmüştür [49].

### **3.3 Atmosfer Şartlarının Etkileri**

Dış ortam uygulamalarında kullanılacak olan doğal lif takviyeli kompozit malzemeler güneş ışığından gelen ultraviyole ışınlarına maruz kaldıkları için renklerinde solma ve zincir yapılarındaki bozunma nedeniyle mekanik özelliklerinde de azalma görülmektedir. Bunu önlemek için doğal lif takviyeli kompozit malzemelerin ultraviyole absorpsiyonuna karşı özelliklerinin iyileştirilmesi için antioksidan, UV dengeleyici (HALS), UV absorban vs. gibi katkı maddeleri kullanılabilir. Diğer yandan doğal liflerin “hidrofilik” yapısından kaynaklanan nem yutumu özelliklerinin de ayrıca incelenmesi gerekmektedir. Genel olarak bu

kompozitlerin nem yutum özelliklerini kontrol edebilmek amacıyla lif / matris ara yüzey iyileştirme yöntemlerinden faydalanılmaktadır.

Doğal lif takviyeli malzemelerin nem yutumu ve UV absorpsiyonuna karşı dayanımını arttırmak için yapılan bazı literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir.

Nem yutumu: Doğal lif olarak kullanılan jüt, keten, pamuk gibi lifler kimyasal yapılarında bulunan hidroksil gruplarından dolayı fazlaca nem tutarlar. Ayrıca oluşturulan kompozit malzemelerde lif ve polimer matris arasındaki ara yüzey bağlanmanın zayıf olmasından dolayı lif etrafında bulunan boşluklarda bu malzemelerin nem yutumunu arttırmaktadır. Nem yutumu azaltılması için çeşitli kimyasal yöntemler (maleik anhidrit bağlama ajanı, alkalizasyon, silan bağlama ajanı, asetilasyon vs.) ya da çeşitli katkı maddeleri kullanılarak azaltılabilmektedir.

Alkalizasyon işlemi (NaOH) doğal lif takviyeli kompozit malzemelerde ara yüzey bağlanmayı arttırmak için kullanılan yöntemlerden biridir. Ayrıca bu işlemin nem yutumunu da azalttığı gözlemlenebilmektedir. Sodyum hidroksit selüloz üzerindeki hidroksil gruplarının hidrojen bağı yapma kapasitesini azaltarak bu grupların su molekülleri ile bağ yapmasını engeller [50]. Bir diğer kimyasal işlem olan asetilasyon işlemi de doğal lif takviyeli kompozit malzemelerin nem yutma özelliğini azalttığı bilinmektedir. Konuyla ilgili yapılan çalışmada artan asetilasyon oranlarıyla birlikte keten/polipropilen kompozit malzemenin nem yutma yüzdesinde azalma gözlemlenmektedir[51].

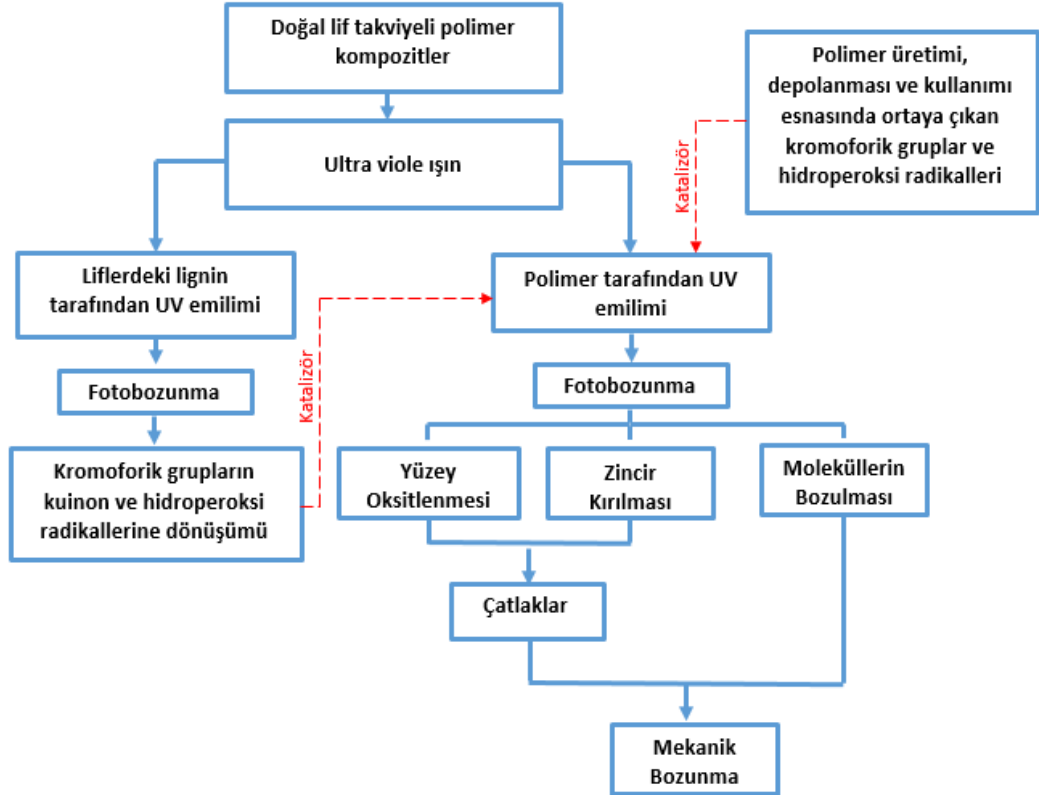
Kaewkuk ve arkadaşlarının yaptığı bir başka çalışmada ise üretilen sisal-polipropilen kompozit malzemelerinde MAPP bağlama ajanı kullanılmış ve nem yutum özelliğinde azalma gözlemlenmiştir. MAPP bağlama ajanı ile oluşturulan güçlü lif-matris ara yüzeyi sayesinde su molekülleri ara yüzey boşluklarına girememektedir. Bu yüzden maleik anhidrit ile modifiye edilmiş kompozit malzemelerde nem yutumu düşük seviyede tutulduğu gözlenmiştir [52].

Silan bağlama ajanları da nem yutumunu azaltan bir başka kimyasal yöntemdir. Demir ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada hem silan bağlama ajanı hem de maleik anhidrit bağlama ajanı kullanılmış ve nem tutma özellikleri incelenmiştir. Luffa-polipropilen kompozit malzemelerin nem yutum özelliklerinde silan bağlama ajanı ile %39, maleik bağlama ajanı ile %28,5 oranında azalma gözlenmiştir. Bağlama ajanlarının lifin yapısında bulunan selülozun hidroksil grupları ile bağlanması sonucu

selüloz moleküllerinin su ile hidrojen bağı oluşturma kapasitesi azalır. Ayrıca ara yüzey boşluklarını dolduran bağlama ajanları suyun lif-matris ara yüzeyine girmesini engellediği ve bu sayede nem yutum miktarlarının azaldığı gözlenmiştir [53].

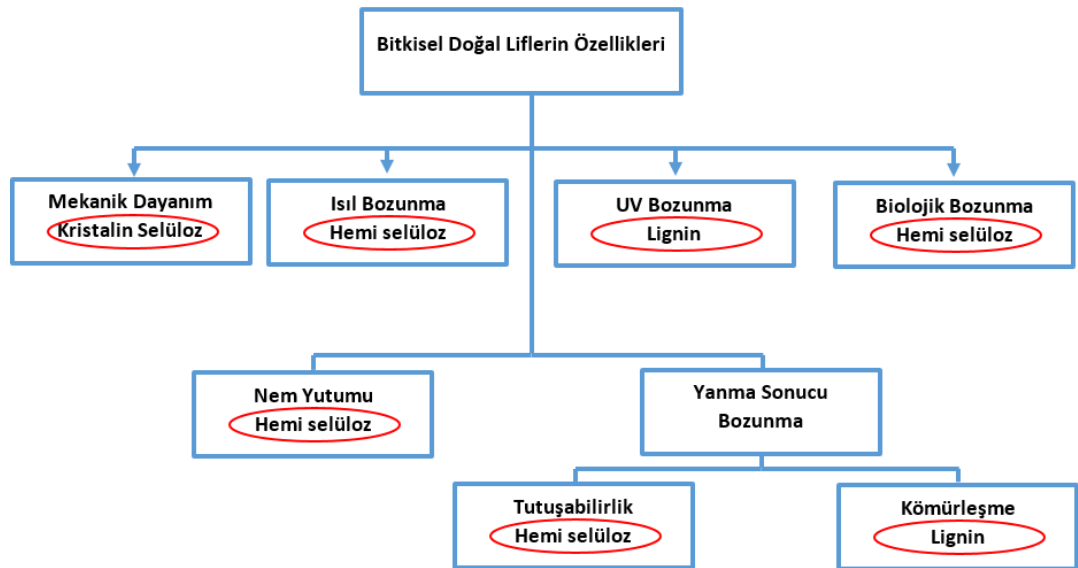
Ultraviyole (UV) absorpsiyonu:

Doğal lif takviyeli kompozitlerin dış ortam ürünlerinde kullanılabilmesi için dış ortam şartlarına karşı da uygun özellikleri taşıması gereklidir. Bu tür kompozitlerin direkt olarak gün ışığına maruz kalmaları sonucu kovalent bağlarının zarar görmesiyle renk değişimi-sararma-, yüzey pürüzlülüklerinin artışı, mekanik özelliklerinde düşüşler ve kırılganlıklarında artma meydana gelmektedir[54,50]. Dış ortam malzemesi olarak bu tür malzemelerden istenilen özellikler ise, UV ışınlarına karşı direnç, nem yutumuna karşı direnç ve boyutsal kararlılık olarak sayılabilmektedir [55,56]. Fotobozunma olayı polimer malzemelerde birim monomerlerde (oksidlenme), zincirlerde (çapraz bağlanma, zincir kopması), yapısal (kristal ve moleküllerin bozulması) veya makroskopik düzeyde gerçekleşebilmektedir [55]. Ultraviyole radyasyon polimer malzemelerin kimyasal yapısını etkileyerek zincir kırılmalarına ve zincir çapraz bağlanmalarına neden olabilmektedir. Yaşlandırma ile bozunma sırasında foto radyasyon, ısıl bozunma, foto oksidlenme ve hidroliz etkili olmaktadır. Bu tür etkenler polimer malzemedeki kimyasal, fiziksel ve mekanik bir takım değişimlere neden olabilmektedir [56,57].Foto bozunma olayı UV ışınlarıyla başlatılan foto oksidlenmeden ileri gelmektedir. Foto oksidlenme, oksijenin polimer malzemenin yüzeyinden başlayarak içeriye doğru difüzyonuyla devam gerçekleşmektedir. Şekil 3.2’de foto bozunma adımları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Doğal lif takviyeli kompozitlerde görülen foto bozunma adımları [55].

Bu tür kompozit malzemelerde kullanılan doğal liflerin yapısında olan lignin özellikle UV ışınlarına karşı bozulmaya neden olan yapı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ligninin yapısında ışık absorbe eden yapılar olarak fenolikler, hidroksil grupları, çift bağlar ve karbonil grupları olarak sayılabilmektedir. Şekil 3.3’da doğal liflerin hangi yapının ne tür özellikleri ön plana çıkardığı görülmektedir.



Şekil 3.3 : Doğal liflerdeki karakteristik özellikleri meydana çıkaran yapıları [56].

Doğal lif takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerindeki değişimin temel nedenleri yüzeydeki oksidasyon, matris kristalleşme değerlerindeki değişim ve lif matris ara yüzeyindeki bozunma olarak gösterilebilir [58]. Kompozit malzemelerin foto bozulması birçok faktörden etkilenebilmektedir. Bu faktörlere örnek olarak lif miktarı, lif matris ara yüzey bağlayıcı ajanları, üretim yöntemi ve yaşlandırma şartları olarak sayılabilir. Doğal lif miktarının artışıyla birlikte oksitlenme hızı artmaktadır diğer yandan lif matris uyumunu arttırıcı kimyasal katkıları ile oksitlenme hızı yavaşlamaktadır [55].

Kompozit malzemelerin bozulması esnasında zincir kırılması ve çapraz bağlanma mekanizmaları ortaya çıkmaktadır. Zincir kırılması moleküler ağırlığını azaltırken, çapraz bağlanma ise moleküler ağırlığı arttırmaktadır. Zincir kırılması karboksil ve vinil gruplarının ve ayrıca kristaliniti değerlerinin artışıyla ortaya çıkmaktadır. Zincirlerin kırılmasıyla ortaya çıkan kısa zincirler daha hareketli olup daha kolay kristalize olabilmektedir. Bu durumda kristalleşme oranı artmakta ve polimer malzemenin gevrekliği artmaktadır. Diğer yandan çapraz bağlanma polimer malzemenin kristalleşme değeri üzerine etkisi yoktur. Zincir kırılması daha çok amorf bölgede görülüp, oksijenin bu bölgede difüzyonuna bağlıdır. Çapraz bağlanma ise kusurlu olan kristal bölgelerde görülmektedir.

Doğal lif takviyeli kompozit malzemelerin ultraviyole ışınların mekanik, fiziksel, kimyasal ve ısı özellikleri üzerine zararlı etkisinden korumak amacıyla antioksidan, UV dengeleyici (HALS), UV absorban vs. gibi katkı maddeleri kullanılabilir.

Ultraviyole absorplayıcılar (UVA) zararlı ultraviyole ışınlarını güçlü bir şekilde absorplayarak malzemelerin renginin solmasını önleyici olarak görev alırlar. Antioksidanlar (AOs) ise ultraviyole ışınlarına maruz kalıp bozunarak ortaya çıkan serbest radikalleri ortamdan uzaklaştırıp malzemeyi ultraviyole ışınlarından korurlar. Ultraviyole dengeleyici olarak görev alan ve genel anlamda HALS (Hindered Amine Light Stabilizers) olarak adlandırılan bu katkı malzemeleri son yıllarda plastiklerin dış ortam uygulamalarında en çok kullanılan katkı malzemeleridir [59,55].

Hamid ve arkadaşlarının 2012 yılında yaptığı çalışmada antioksidanların pirinç-talaş/aDYPE kompozit malzemeler üzerindeki termal ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada antioksidanların malzemeyi oksidasyondan korumasının yanı sıra mekanik özelliklerinde de iyileşme sağladığı belirtilmiştir. Ancak yapılan



termogravimetrik analizlerde antioksidan kullanımının malzemenin termal özelliklerinde bir değişime yol açmadığı gözlemlenmiştir [60].

Mausher ve arkadaşları ise ultraviyole absorban (UVA) ve HALS'ın ağaç lifi katkılı plastik kompozit malzemelerindeki renk değişimi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada çeşitli HALS ve UVA katkı malzemeleri hem tek başlarına hem de karıştırılarak kullanılmıştır. Yapılan FTIR analizinde kullanılan katkı malzemelerinin karbonil absorban değişimine etkisi incelenmiştir. Sekonder amin triazin HALS katkı maddesinin ortamda bulunan serbest radikalleri uzaklaştırma etkisinin en düşük olduğu bundan dolayı da karbonil absorban değişimini arttırmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı çalışmada HALS katkı malzemesinin içerisine UVA eklenerek malzemenin renk solmasında azalma olduğu belirtilmiştir [61].

Hemmati ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada şeker kamışı lifi takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin dış ortam uygulamalarında kullanılması için iklimlendirme özellikleri incelenmiştir. UV absorban kullanımının malzemenin renginin solmasını önlediği gözlemlenmiştir. Ayrıca UV absorbanların doğal liflerin yapısında bulunan ligninin ultraviyole ışınlarına maruz kalmasından dolayı bozulması sonucunda oluşan kromofor grupları önleyici ve polimerlerin ultraviyole ışınlarına maruz kalmasından dolayı bozulması sonucunda oluşan serbest radikallerin ortamdan uzaklaşmalarını engelleyici etkisi bulunmadığı belirtilmiştir [62].

### **3.4 Elastiklik Modülü Tahminlerinde Kullanılan Yöntemler**

#### **3.4.1 Sonlu elemanlar yöntemi**

Sonlu elemanlar yöntemi, ilk olarak 1950'li yıllarda karmaşık yapıdaki hava taşıtlarının gerilme analizi için kullanılmaya başlanmıştır. Yöntem, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen veya fonksiyonel minimizasyonu olarak formüle edilebilen problemleri çözmek için kullanılan sayısal bir tekniktir. Bu teknik çeşitli mühendislik disiplinlerinde fiziksel bir olayın tasarım ve modellenmesinde önemli yer edinmiştir [63]. Sonlu elemanlar yöntemi, sonlu elemanlardaki yaklaşık fonksiyonlar, araştırılan fiziksel alanın uç noktasal (nodal) değer terimlerinde belirlenmektedir. Sürekli fiziksel problem, bilinmeyen uç noktasal (nodal) değerli süreksiz sonlu eleman problemine dönüştürülmektedir. Bu yöntemin uygulanması için basit yaklaşım fonksiyonları oluşturulmaktadır. Genellikle CAD (bilgisayar

destekli tasarım) çizimiyle geometrisi belirlenmiş sistem veya yapıya sonlu elemanlar yönteminin uygulanması şu şekilde gerçekleşmektedir [64];

1. Sonlu elemanlar analiz tipinin belirlenmesi; statik, dinamik, doğrusal ve doğrusal olmayan.
2. Sonlu elemanlar tipinin belirlenmesi; kiriş, tabakalı, kabuk, asimetrik, vb.
3. Modelin seçilmesi; Tamamı üç boyutlu ortotropik - anizotropik, iki boyutlu ortotropik / anizotropik, vb.
4. Statik, dinamik, çevrimsel uygulanan yüklerin, momentlerin, sıcaklıkların, vb. belirlenmesi.
5. Kinematik başlangıç koşullarının belirlenmesi.
6. Çözüm yönteminin (iterasyon, tanjant yöntemi) ve kontrol parametrelerinin belirlenmesi.
7. Çeşitli bölgelerdeki deformasyon, gerilme, vb. belirlenip ana yapının davranışının saptanması.

Özellikle 2, 3 ve 7. şıkların seçimi kompozit malzemede büyük önem taşımaktadır. Bu durumların yanında homojenizasyon ve yöne bağlı değerlerin belirlenmesi kompozit yapılar için çözümün en önemli aşamalarıdır. Sonlu elemanlar yönteminde yaklaşık çözümün bulunmasında üç ana yaklaşım vardır:

Doğrudan Yaklaşım: Problemin ana hatlarına bağlı olarak en temel şekilde çözümdür.

Ağırlıklı Yaklaşım: Bu çok yönlü yöntem ısı transferi ve akışkanlar mekaniği gibi karmaşık problemlerin istenilen yöne ağırlık verilerek çözümünü kapsar.

Kararsızlık Yaklaşımı: Bu yöntem ise genellikle kararsız olarak kendini gösteren özelliklerin temel alınmasıyla uygulanır. Genel olarak sistemin potansiyel enerjisine göre kararsızlık belirlenir [65].

Buna göre en temel fonksiyon;

$$[K] \times [u] = [F] \quad (3.1)$$

olarak ifade edilir. (K= katılık matrisi, u= yer değiştirmeler, F= kuvvetler)

Sonlu elemanlar yöntemi, adından da anlaşabileceği üzere sonlu sayıdaki bilinmeyenlerden faydalanılarak sistemin fiziksel cevabının bulunması esasına dayanır. Sonlu elemanlar yöntemi sahip olduğu çeşitli üstünlükler nedeniyle farklı disiplinlerde kendine yer bulmaktadır. Yöntemin sağladığı avantajlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Değişik malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermez.
- Geometri ve malzeme doğrusallıktan sapmaları, kalıtsal olsa bile (örneğin zamana bağlı) malzeme özellikleri, kolaylıkla göz önüne alınabilir.
- Çok bağlantılı bölgeler (yani bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgeler zorluk çekilmeksizin incelenebilir.
- Sonlu elemanlar, boyutları ve şekillerinin esnekliği nedeniyle, verilen bir cisimi temsil edebilir, hatta karmaşık şekilli bir cisimde daha güvenilir olabilir.
- Sınır şartları kolayca uygulanır.
- Sonlu eleman metodunun çok yönlülük ve esnekliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamak için çok etkin bir şekilde kullanılabilir [63].

Kompozit malzemelerin üretim süreci ve karakterizasyon aşamalarındaki maliyetleri en aza indirgeyebilmek amacıyla ve gerçekleştirilen tasarımların geliştirilmesi amacıyla tahmin yöntemlerinden faydalanılmaktadır [66]. Yöntemlerin karmaşıklığına karşın, birim hücrenin üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar model yaklaşımı tekstil lifi takviyeli kompozit malzemelerin elastiklik modülü veya hasar analizlerinin tahmininde en çok tercih edilen yöntem olarak göze çarpmaktadır. Yöntem içeriğinde üç boyutlu modelde tekstil lifleri ortotropik yapılı ve matris malzemesi ise izotropik özelliklere sahip bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşımın ilk örnekleri Whitcomb [67], Guedes ve Kikuchi [68] tarafından yapılan çalışmalarda ortaya atılmıştır. Yaklaşımın uygulamaları ise takip eden çalışmalarda [69-71] elastiklik modülü ve katsayılarına sahip birim hücrelerden faydalanılarak ısıl genleşme katsayılarını bulmak amacıyla kullanılmıştır. Modelleme

yaklaşımlarında genellikle lif yapısı, temsili (veya kendini tekrarlayan) hacim elemanı, nadiren de birim hücreler (elemanlar) ve uygun sınır şartları modellenebilir. Böylelikle modellenen elemanın davranışı bütün yapının davranışına yakınlaştırılabilmektedir [72]. Bunun yanı sıra, farklı Poisson oranları kullanılarak farklı yaklaşımlar da geliştirilmiştir [73-75]. Diğer yandan Lomov ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada olduğu gibi sonlu elemanlar yöntemini bu amaç doğrultusunda tasarlanmış analiz yazılımları sayesinde kolaylaştırılarak modellemeler yapmak da mümkündür [76].

### **3.4.2 Analitik modeller ile kompozitlerde elastiklik modülü tahminleri**

Doğal lif takviyeli kompozitlerin elastiklik modülü değerlerinin tahmini için mevcut çalışmalar nadir olmakla beraber genellikle kısa lif takviyeli kompozitler için tercih edilen modellerin uygulanabilirliği ve bu modellerin ne kadar yakınlıkta sonuçlar ortaya çıkarabildiği belirlenmelidir. Kısa lif takviyeli kompozitlerin çekme özelliklerinin tahmin edebilmek için farklı mikro ve makro mekanik yöntemler kullanılabilmektedir.

#### **3.4.2.1 Analitik modeller**

Kompozit malzemelerin teorik dayanım değerlerine ulaşmak için lif ve matrisin hacimsel oranlarını, liflerin dağılım şeklini (yönlendirilmiş veya gelişigüzel) ve mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Elastiklik modülü ve çekme dayanımı mühendislik yapılarında kullanılan malzemelere ait özellikler içerisinde en önemlileri olarak değerlendirilmektedir. Kompozit malzemelere ait bu özellikler bir çok parametreye bağlı olarak değişse de genel olarak;

- a) Lif malzemesi
- b) Matris malzemesi
- c) Lif hacimsel oranı
- d) Lif uzunluğu
- e) Lif dağılımı
- f) Lif-matris ara yüzey tutunma durumu gibi parametrelere bağlıdır.

Lif ve matris malzemesi, lif hacimsel oranı, lif uzunluğu ve dağılımı kompozitlerin elastiklik modülü ve dayanımını teorik olarak hesaplayabilmek için en çok kullanılan parametrelerdir.

Kompozit malzemelerin elastiklik modülü tahminlerinde bir çok yöntem bulunması karşın, doğal lif takviyeli kompozitlerin karmaşık yapılarından dolayı mevcut bulunan her yöntem kullanılamamaktadır. Dolayısıyla mevcut yöntemler arasında kıyaslama yapılarak hangi yöntemin daha uygun olduğu bulunmalıdır. Elastiklik modülünün tahmin edilebilmesi için ortaya çıkan mevcut yöntemler genel olarak 2 gruba ayrılmaktadır. 1. ve en önemli grup, liflere ve matris malzemesine ait en temel özellikleri ve lif matris karışım durumlarını göz önünde bulundurur. Bu tür modeller;

- 1) Karışım kuralı [77]
- 2) Cox modeli [78]
- 3) Halpin-Tsai ve Tsai-Pagano modeli [79-80]
- 4) Nielson modeli
- 5) Christensen ve Waal modeli
- 6) Manera yaklaşım modeli
- 7) Lif yoğunluk fonksiyon modeli – Pan modeli
- 8) Hirsch modeli [81]
- 9) Shear Lag

Diğer grup ise lif ve matrisin birbirleriyle karşılıklı etkileşimlerini dikkate alarak kompozitlerin elastiklik modülü hakkında fikir verir [82-85].

#### 1) Karışım kuralı

Karışım kuralı kompozit malzemelerin elastiklik modülü hesaplamalarında kullanılan yöntemler arasındaki en çok tercih edilen yöntem olarak sayılabilmektedir. Bu yöntem önerilen diğer yöntemlere göre çok daha eski bir yöntem olup, tek yönlü uzun sentetik liflerle desteklenmiş kompozit malzemeler için başarılı sonuçlar vermiş bir yöntemdir. Karışım kuralının standart olarak gösterimi aşağıdaki formüllerde gösterilmiştir.

$$E_c = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad \text{-(Yüke paralel yönlenme)} \quad (3.2)$$

$$E_c = \frac{1}{\frac{V_f}{E_f} + \frac{(1 - V_f)}{E_m}} \quad \text{-(Yüke dik yönlenme)} \quad (3.3)$$

$E_c$ , kompozit yapının elastiklik modülü,  $E_f$ , lifin elastiklik modülü,  $E_m$ , matrisin elastiklik modülü,  $V_f$ , ise lifin hacimsel oranıdır. Düzenlenmiş karışım kuralı ise lifin yönlendirilmesi ve lif uzunluğunun etkisi gibi faktörleri göz önüne alarak  $\eta$  katsayısını hesaplamalara katmıştır (Formül 3.4). İdeal  $\eta$  katsayısını bulmak için bazı araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Örneğin Zarate ve arkadaşlarının 2000 yılında yaptığı bir araştırmada  $\eta$  katsayısının gelişigüzel doğal lif takviyeli kompozit malzemeler için yaklaşık 0.2 olarak hesaba katılması gerektiği sonucuna varmışlardır [86].

$$E_c = \eta V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (3.4)$$

## 2) Cox modeli

Cox modeli, karışım kuralında hesaba katılan  $\eta$  katsayısını, temel olarak lif uzunluğunu ve lif uçlarındaki gerilme yığılma oranını dikkate alan “kayma gecikmesi” (shear lag) analizlerini ekleyen bir modeldir. Hesaplamadaki  $\eta$  katsayısı aşağıdaki formül 3.5 ile hesaplanmaktadır.

$$\eta = 1 - \frac{\tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)}{\left(\frac{\beta l}{2}\right)} \quad (3.5)$$

Formülde liflerin uzunluğunu “ $l$ ” ile, liflerin uçlarındaki gerilme yığılma oranlarını gösteren katsayıyı ise “ $\beta$ ” ifade etmektedir. “ $\beta$ ” formül 3.6 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\beta = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{E_m}{E_f(1+\nu) \ln \sqrt{\frac{\pi}{4V_f}}}} \quad (3.6)$$

Formül 3.6’daki  $\nu$  sembolü liflere ait “poisson” oranını,  $r$  ise liflerin yarıçaplarını göstermektedir.

## 3) Halpin-Tsai ve Tsai-Pagano modeli

Halpin – Tsai modeli yönlendirilmiş kısa lif destekli kompozit malzemelerin elastiklik modülünü tahmin etmek için kullanılmaktadır [79,80]. Kompozit

malzemelerin elastiklik modülü aşağıdaki formül 3.7 yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$E_{11} = \frac{1 + 2(l_f / d_f) \eta_L V_f}{1 - \eta_L V_f} E_m \quad (3.7)$$

Formül 3.7'deki “ $\eta_L$ ” parametresi formül 3.8 yardımıyla çözümlenip formül 3.7'de yerine konularak kompozit malzemeye ait elastiklik modülü bulunabilir.

$$\eta_L = \frac{(E_f(d_f) / E_m) - 1}{(E_f(d_f) / E_m) + 2(l_f / d_f)} \quad (3.8)$$

Formül 3.7 ve 3.8'deki “ $d_f$ ” ve “ $l_f$ ” sırasıyla lifin ait çap ve uzunlukları belirtmektedir. Çalışmalar neticesinde Halpin-Tsai modeli kullanılarak yapılan elastiklik modülü hesaplamalarında genellikle yüklemeye doğrultusunda liflerle desteklenmiş kompozit malzemeler için yakın sonuçlar verdiği bulunmuştur. Diğer yandan Tsai-Pagano modeli ise gelişigüzel dağılımlı liflerle desteklenmiş kompozitlerin elastiklik modülü hesaplamaları için alternatif oluşturmuştur. Formül 3.9'da görüldüğü gibi  $\eta$  parametresi hem yük doğrultusunda hem de yüke dik doğrultuda olacak şekilde hesaplamalara dahil edilmiştir.

$$E_{ran} = \frac{3}{8} E_{11} + \frac{5}{8} E_{22} \quad (3.9)$$

$E_{11}$  değeri Halpin-Tsai modelinde hesaplanan elastiklik modülü değeridir. Diğer yandan  $E_{22}$  değerinin formül 3.10 yardımıyla hesaplanmalıdır. Formül 3.10 daki  $\eta_T$  parametresinin nasıl hesaplandığı formül 3.11'de görülmektedir.

$$E_{22} = \frac{1 + 2\eta_T V_f}{1 - \eta_T V_f} E_m \quad (3.10)$$

$$\eta_T = \frac{(E_f(d_f) / E_m) - 1}{(E_f(d_f) / E_m) + 2} \quad (3.11)$$

#### 4) Nielson modeli

Nielson modelinde yine Halpin-Tsai modeli baz alınarak geliştirilmiş ve özellikle gelişigüzel kısa lif dağılımına sahip kompozitlerin elastiklik modülü ve çekme dayanımı hesaplamaları için geçerli bir model olarak düşünülmüştür [87]. Nielson modelinde elastiklik modülü ve çekme dayanımını tahmin edebilmek için formül 3.12 kullanılmaktadır.

$$X_c = X_m \left( \frac{1 + A\eta V_f}{1 - \eta\psi V_f} \right) \quad (3.12)$$

$$\psi = 1 + \left( \frac{1 - \phi_{\max}}{\phi_{\max}^2} \right) V_f \quad (3.13)$$

$$A = K - 1 = 2l/d \quad (3.14)$$

$$K = 1 + 2l/d \quad (3.15)$$

$$\eta = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + A} \quad (3.16)$$

Formül 3.12'deki X sembolü kompozit malzemeye ait bulunmak istenen özellik olup, formül 3.13'deki  $\phi_{\max}$  parametresi, liflerin maksimum yoğunluk oranını temsil etmektedir. Gelişigüzel lif dağılımına sahip kompozitler açısından bu değer 0.82 olarak alınabilmektedir. Diğer yandan l/d oranı ise liflerin boy/en oranını temsil ederek hesaplamalarda kullanılmaktadır.

#### 5) Christensen ve Waal modeli

Christensen ve Waal modeli, 3 boyutlu gelişigüzel lif dağılımına sahip bir kompozit sistemin davranışı incelenerek ortaya çıkmıştır. Bu modelde lif dağılımı ve lif/matris etkileşimleri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmaktadır. Özellikle hacimsel olarak düşük lif oranlarına sahip kompozitlerin elastiklik modülü hesaplamalarında daha yakın sonuçlar çıkabilmektedir. Elastiklik modülü formül 3.17 yardımıyla hesaplanmaktadır [88].



$$E_{3-D} = \frac{c}{6} E_f + [1 + (1 + \nu_m)c] E_m \quad (3.17)$$

Formüldeki “c” katsayısı kompozit yapı içindeki liflerin hacimsel oranı olup, 0.2’den daha düşük alınmalıdır. Diğer yandan “ $\nu_m$ ” parametresi ise matris fazın “poisson” oranını göstermektedir.

Lee ve arkadaşlarının konuyla ilgili yaptığı çalışmalarda Christensen ve Waal modelinden elde ettikleri sonuçlar ile kendi deneysel verileri karşılaştırılmıştır [89]. Çalışmaların sonucunda deneysel ve analitik sonuçlar arasında yaklaşık olarak %0~15 aralığında farkların olduğu gözlenmiştir. Deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farkların nedeni olarak ise kısmen zayıf lif/matris arayüzey durumu ile kısa liflerden kaynaklanan lif uç etkisi (end effect) olarak gösterilmiştir.

#### 6) Manera yaklaşım modeli

Manera’nın 1977 yılında önerdiği yaklaşım modelinde gelişigüzel cam lifi takviyeli kompozitlerin elastiklik özelliklerini tahmin edebilmek amacıyla yaklaşım denklemleri önerilmiştir. Tsai ve Pagano modeli [90] tarafından tanımlanan sabit özellikler Puck’un mikromekanik denklemlerinde kullanılarak Manera modeli geliştirilmiştir. Manera modelinde kabuller yapıp, Puck denklemini basite indirgemıştır. Yapılan kabullere göre, kompozitteki lifler yüksek boy/en oranına ve 2 boyutlu gelişigüzel lif dağılımına sahiptirler. Ayrıca gelişigüzel lif dağılımına sahip kompozitleri her doğrultuya yönelmiş sonsuz sayıda katmana sahip laminatlar olarak kabul ederek kompozitlerin elastiklik özelliklerini tahmin edecek bir model geliştirmiştir. Buna göre Manera’nın yaklaşım modelinin formül 3.18 yardımıyla ifade edilebilmektedir [91].

$$\bar{E} = V_f \left( \frac{16}{45} E_f + 2 E_m \right) + \frac{8}{9} E_m \quad (3.18)$$

#### 7) Lif yoğunluk fonksiyon modeli – Pan modeli

Pan 1996 yılında “kayımlar kuralından” yola çıkarak geliştirdiği modelinde lif hacimsel oranı ile lif alansal oranı arasında bir ilişki kurarak bir model ortaya çıkarmaya çalışmıştır [92]. Bu amaç doğrultusunda lif dağılımını ifade edebilmek

bakımından formül 3.19’da görüldüğü gibi “olasılık yoğunluk fonksiyonu” denilen bir kavram ortaya atmıştır ve bu kavramı modelinde kullanmıştır.

$$A_f(\Theta, \Phi) = \Omega(\Theta, \Phi) V_f \quad (3.19)$$

Buna göre Pan’nin geliştirdiği modelde elastiklik modülü şu şekilde ifade edilmektedir (Formül 3.20).

$$E_c(\Theta, \Phi) = E_f \Omega(\Theta, \Phi) V_f + E_m (1 - \Omega(\Theta, \Phi) V_f) \quad (3.20)$$

Formül 3.20’deki ifadeyi 3 boyulu gelişigüzel lif dağılımına sahip kompozitlerin elastiklik modülünü hesaplamak için sadeleştirildiğinde formül 3.21’deki gibi bir ifade ortaya çıkmaktadır.

$$E_c^{3D} = E_f \frac{V_f}{2\pi} + E_m \left(1 - \frac{V_f}{2\pi}\right) \quad (3.21)$$

#### 8) Hirsch modeli

Hirsch modeli gelişigüzel lif dağılımına sahip kompozitlerin çekme özelliklerini tahmin etmek amacıyla sıklıkla kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Model, karışımlar kuralının paralel ve seri olan modellerinin bir kombinasyonu olarak düşünülebilmektedir. Doğal lif takviyeli kompozitlerin çoğu için gelişigüzel lif dağılımı göz önüne alındığından dolayı liflerin yük durumuna göre hem paralel durumda hem de seri durumda olduğu varsayılarak böyle bir model önerilmiştir. Hirsch modelinin gösterimi formül 3.22’de görülmektedir [81].

$$X_c = \alpha [V_f X_f + (1 - V_f) X_m] + (1 - \alpha) \left[ \frac{1}{V_f / X_f + (1 - V_f) / X_m} \right] \quad (3.22)$$

Formüldeki  $\alpha$  katsayısı amprik bir katsayısı olup, 0 ile 1 değerleri arasında lif dağılımına, lif uzunluğuna ve lif uçlarındaki gerilme yığılmasına bağlı olarak seçilir. X sembolü kompozit malzemeye ait bulunmak istenen özelliği göstermektedir. Formül 3.22 kompozit malzemenin elastiklik modülü ve çekme dayanımı için de kullanılmaktadır.

### 9) Shear Lag modeli

Shear Lag modeli genellikle yönlendirilmiş ve kısa lif takviyeli kompozitler için kullanılan bir mikromekanik modeldir [78]. Genellikle gerilme yönündeki elastiklik modülü tahminlerinde deneysel sonuçlar yakın değerler vermektedir. Model, l uzunluğundaki, r yarıçapındaki ve R yarıçapındaki bir matris kabuğunun içine yerleştirilmiş bir lifi dikkate alarak oluşturulmuştur. Modelin elastiklik modülü için kullandığı formül ve gerekli katsayılar aşağıda verilmiştir.

$$E_{11} = \eta_l V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (3.23)$$

$$\eta_l = 1 - \frac{\tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)}{\frac{\beta l}{2}} \quad (3.24)$$

$$\beta = \left(\frac{H}{\pi_f^2 E_f}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

$$H = \frac{2\pi G_m}{\ln\left(\frac{R}{r_f}\right)} \quad (3.26)$$

$$R = r_f \sqrt{\frac{K_R}{V_f}} \quad (3.27)$$

Formüllerdeki  $E_f$  ve  $E_m$  sırasıyla lif ve matrisin elastiklik modülleri,  $G_m$  ise matrisin kayma modülü ve  $\eta_l$  ise lif uzunluğuna bağlı olarak değişen etkinlik faktörüdür.  $K_R$  katsayısı ise genellikle çizelge 3.1'de sunulan seçeneklerden bir tanesi seçilmektedir. Büyük  $K_R$  katsayıları daha düşük elastiklik modülü değerleri ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

**Çizelge 3.1 :** Shear lag modeli için farklı  $K_R$  seçenekleri [93].

Lif paketlenme durumu	$K_R$
Cox	$2\pi/\sqrt{3} = 3.628$
Kompozit silindirleri	1
Hegzagonal	$\pi/2\sqrt{3} = 0.907$
Kare	$\pi/4 = 0.785$

Sentetik kısa lif takviyeli kompozitlerin dayanım değerlerini önceden tahmin edebilmek amacıyla birçok analitik model kullanılmaktadır. Kompozitlerin dayanım değerlerini tahmin edebilmek için kullanılan analitik yöntemlerin çoğu “karışım kuralı” esas alınarak elde edilen modellerdir [94-96]. Ji Zhao Liang ve arkadaşlarının 2011 yılında yürüttüğü bir çalışmada ara yüzey dayanım faktörünü göz önünde bulunduran analitik modellerin sentetik lif takviyeli polimer kompozitlerin dayanım değerlerini tahmin etmek amacıyla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [97]. Piggott ve arkadaşları ise liflerin kırılma esaslı teorilerini dikkate alan modeller üzerine durmuşlardır [98]. Diğer yandan Epaarachchi ve arkadaşları yürüttüğü bir çalışmada gelişigüzel lif dağılımına sahip sentetik lif/vinil ester kompozitlerinin mekanik özelliklerini tahmin edebilmek için amprik modelleri kullanmışlardır [99].

Sentetik lif takviyeli kompozitlerin dayanım değerlerini tahmin edebilmek amacıyla birçok çalışma yürütülmesine rağmen doğal lif takviyeli kompozitler üzerine çok nadir çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin Bigiotti ve arkadaşları %20 keten lifi takviyeli polipropilen kompozitlerin dayanım değerlerini tahmin etmek amacıyla yarı amprik modellerden faydalanmıştır [100]. Bir diğer çalışmada ise %10-%60 hacimsel oranlarında farklı doğal lif takviyeli kompozitlerin elastiklik modülü değerleri mevcut analitik modeller ile hesaplanmış ve deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonucunda Halpin – Tsai modelinin deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar çıkaran model olduğunu görmüşlerdir [101].

## 4. MALZEME & YÖNTEM

### 4.1 Malzeme

Tez kapsamında genel olarak oluşturulan kompozit yapı içerisinde takviye malzemesi, pamuk lifi ve matris malzemesi için düşük yoğunluklu polietilen (DYPE) tercih edilmiştir. Daha önceden de bahsedildiği üzere pamuk lifi kaynağı olarak tekstil atıkları kompozit yapı içerisinde değerlendirilmiştir. Zorlu Tekstil' den tedarik edilen tekstil atıkları 30 Ne numaralı ve %100 pamuktan üretilmişlerdir. Matris malzemesi olarak kullanılan polimer matris ise PETKİM'den tedarik edilmiş ve G03 kodlu DYPE malzemedir. Takviye ve matris elemanlarının kompozit yapı içerisindeki oranları çalışmaların içeriğine göre değişiklik göstermiştir.



**Şekil 4.1 :** Kompozit yapı içeriğindeki DYPE matris (solda), pamuk lifi kaynağı olarak tekstil atığı (sağda).

Diğer yandan lif / matris ara yüzeyi iyileştirme yöntemlerinde kullanılan silan (Trimethoxysilane (3-mercaptopropyl) katkısı, Sigma-Aldrich firmasından, alkalın uygulamasında kullanılan Sodyum hidroksit (NaOH) Merck firmasından ve maleik anhidrit ara yüzey bağlayıcı ajanı (Fusabond E226) ise DuPont firmasından tedarik edilmiştir. Yaşlandırma çalışmalarında ultraviyole absorban (UVA), amin ışık düzenleyici (HALS) ve antioksidan (AOs) olarak sırasıyla Tinuvin 326, Chimasorb 944 ve Irganox 1010 kullanılmıştır. Kimyasallar, BASF Schweiz AG firmasından tedarik edilmiştir.

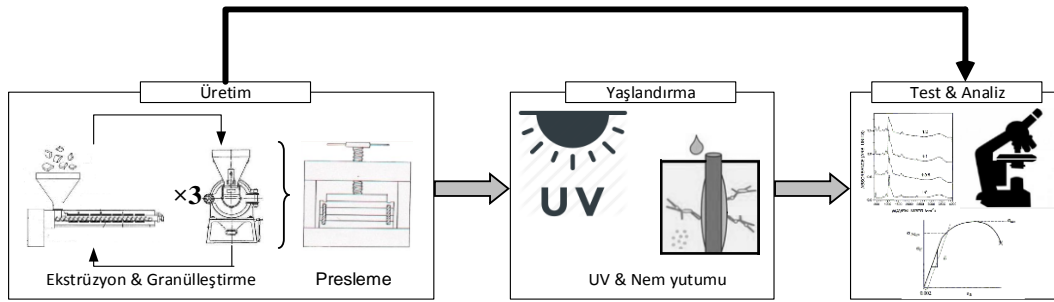
## 4.2 Kompozit Test Plakası Üretimi

Tez çalışması kapsamında kompozitlerin üretimi için özel vida – kovan tasarımına sahip tek vidalı ekstrüder makinası kullanılmıştır. Özel tasarım sayesinde kırpık şeklindeki tekstil atıklarının Ekstrüder içerisinde tıkanması engellenmiştir. Çizelge 4.1’ de kullanılan ekstrüdere ait özellikler verilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Ekstrüdere ait özellikler.

Özellik	Detay
Vida	Ø 70 x 140 kovan vidası
Kovan rezistansları	3 bölge rezistans ve trifaze fanlar
Ana motor	30kw 1500 d/dk.
Vida devri (maks.)	90 d/dk.
Çıkış kalıbı	400 m genişliğinde 8 mm levha kalıbı

Şekil 4.2’ de çalışmaların içeriğine göre değişebilen üretim, test ve analiz basamakları görülmektedir. Buna göre polimer granülleri istenilen ağırlık ve hacim oranlarına uygun olarak tekstil atıklarıyla karıştırılmıştır. Bu amaçla atık ürünler 20x20 mm boyutlarında kesilerek ekstrüderde rahat akışın sağlanabileceği boyutlarda kesilmişlerdir. Karışım özel tasarım yüksek hatveli ve kovan ucu karıştırıcısı bulunmayan ekstrüderde akışkan hale geldikten sonra çıkıştaki plaka kalıbında plaka halini almıştır.



**Şekil 4.2 :** Tez boyunca izlenen yöntemin şematik gösterimi.

Kompozit plakanın mekanik ve fiziksel özellikleri (çekme, darbe, eğme dayanımı, yoğunluk ve homojenizasyon) hazırlanan test numunesi ile kontrol edilerek istenen özelliklerin sağlanamaması halinde mekanik kırıcı ile küçük boyutlara kırılarak tekrar granül haline getirilmiştir. Bu işleme granülleştirme adı verilmiştir. İdeal kompozit yapıların eldesi için gerekli olan granülleştirme ve tekrarlı ekstrüzyon işlemleri genel olarak çalışmalarda üç kez tekrarlanmıştır. Üretilen kompozit

plakanın istenilen özellikleri sağlaması halinde son defa kırıcı ile granül haline getirilerek öngörülen ürünler için kompozit hammadde hazır hale getirilmiştir. Çalışmaların içeriğine göre gerekli olan test numuneleri elde edilen kompozit hammadde kullanılarak ekstrüderde üretilerek akış diyagramındaki yaşlandırma veya test / analiz basamakları takip edilmiştir.

Çizelge 4.2’ de ekstrüderde tercih edilen üretim parametreleri yer almaktadır. Sıcaklık ve vida hızına ait değerler üretilen malzemeye göre çeşitli denemeler sonucu ortaya çıkmış ideal parametrelerdir. Ayrıca kompozitlerin üretiminde herhangi bir ısıl nedenden dolayı lif bozunmaya sebep olmamak için daha düşük sıcaklık değerleri tercih edilmiştir.

**Çizelge 4.2 : Ekstrüder üretim parametreleri.**

Malzeme	Isıtıcı 1 (°C)	Isıtıcı 2 (°C)	Isıtıcı 3 (°C)	Çıkış (°C)	Vida hızı (devir/dk.)
DYPE	180	185	190	195	30
Kompozit	165	170	175	180	30

### **4.3 Test ve Analizler**

Tez çalışması kapsamında yeni bir malzeme çeşidi olarak böyle bir kompozit türünün karakterizasyonu için mekanik, fiziksel ve kimyasal birçok çeşit test ve analizden yararlanılmıştır. Ayrıca çevresel yaşlandırma işlemleri yapılarak “dış ortam” ürünlerinde alternatif bir malzeme olarak düşünülmesi amacıyla söz konusu özellikleri üzerine bir temel oluşturulmuştur.

#### **4.3.1 Mekanik testler**

##### **4.3.1.1 Üç nokta eğme testi**

Kompozit malzemelere ait eğme özelliklerini (eğme dayanımı ve eğme modülü ) incelemek amacıyla 3 noktadan eğme testi ASTM D790 standartlarına uygun bir şekilde yapılmıştır. 3 noktadan eğme testinde 2 alt destek arası numune kalınlıklarının 16 katı olacak şekilde ayarlanmıştır. Numuneler ise 138×20×7 mm boyutlarında elde edilmiştir. Şekil değiştirme hızı Formül 4.1’den hesaplanarak 3,14 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Ayrıca eğme dayanımı ve modülü Formül 4.2 ve 4.3 kullanılarak bulunmuştur.

$$R = ZL^2 / 6d \quad (4.1)$$

$$\sigma_f = 3PL / 2bd^2 \quad (4.2)$$

$$E_f = L^3m / 4bd^3 \quad (4.3)$$

Formüllerdeki R şekil değişim hızı, Z standart olup 0,01 değeri alınır. d numunenin kalınlığı, P en yüksek yük, b numunenin eni, L iki destek arasındaki mesafe ve m yük-şekil değişim eğrisinin eğimi olarak gösterilmektedir. Her bir test için en az 5 deney yapılmış olup değerler aritmetik ortalama alınarak bulunmuştur.

#### 4.3.1.2 Çekme testi

Malzemelerin çekme deneyi ASTM D638-08 standardına uygun olarak Shimadzu AG-IS çekme cihazı kullanılarak yapılmıştır. Numune boyutları, numune kalınlıklarının 7 mm ve altında değerlerde olması sebebiyle ilgili standarttaki “tip 1” göre belirlenmiştir. Deneylerde her bir malzeme türü için en az 5 adet numune kullanılmıştır. Çekme deneyi ile beraber malzemenin çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerleri elde edilmiştir. Çekme deneyi oda sıcaklığında gerçekleştirilip, şekil değiştirme hızı olarak 50 mm/dk olarak ayarlanmıştır.

#### 4.3.1.3 Darbe testi

Malzemelerin darbe testleri EN ISO 179: 1997 standardına uygun olarak “Devotrans Charpy” darbe deney cihazı kullanılarak yapılmıştır. Test numuneleri ilgili standartta belirtilen boyutlarda kesimi gerçekleştirilmiş olup çekiç hızı olarak 3,8 m/s’dir. Numunelere “tip A” geometrisinde ve boyutlarında çentik açılmıştır. Darbe testinde malzemenin kırılma enerjileri skaladan okunup, darbe dayanımları EN ISO 179: 1997 standardında geçen çentikli malzemeler için kullanılan formül yardımıyla Kj/m<sup>2</sup> biriminde hesaplanmıştır (Formül 4.4).

Darbe Dayanım Formülü:

$$a_{cN} = \frac{W \times 10^3}{h \times b_N} \quad (4.4)$$



$a_{cN}$ : Darbe dayanımı (  $Kj/m^2$  )

W: Kırılma enerjisi ( J )

h: Malzeme kalınlığı ( mm )

$b_N$ : Malzeme kenarı ile çentik ucu arası mesafe ( mm )

### **4.3.2 Isıl analizler**

#### **4.3.2.1 Dinamik mekanik analiz (DMA)**

Kompozitlerin ve saf düşük yoğunluklu polietilen plakalarının dinamik mekanik davranışları Mettler Toledo SDTA 861 dinamik mekanik analiz (DMA) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DMA örnekleri üç noktalı esneme modu ile test edilmiştir. Örnek boyutları 90 x 10 x 4 (boy x en x kalınlık) olacak şekilde ayarlanmıştır. Test sıcaklık aralığı ısıtılma hızı 3°C/dk. olacak şekilde -40°C ile 100°C arasında belirlenmiştir. Test koşulları 1Hz sabit frekansta, 1µN ön yükleme ve 15µm genlik olarak belirlendi. Her bir numune tipi için en az 5 örnek test edildi ve aritmetik ortalamaları alınmıştır.

#### **4.3.2.2 Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC)**

Kompozit ve saf matris elemanın ısı özelliklerindeki değişimleri (Erime sıcaklığı, camsı geçiş sıcaklığı, entalpi ve % kristallik değerleri) anlayabilmek amacıyla Diferansiyel Taramalı Kalorimetri analizlerinden faydalanılmıştır. Bu amaçla Perkin-Elmer 4000 diferansiyel taramalı kalorimetri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde ağırlıkları yaklaşık olarak 6-8mg olan örnekler platin kaba tutturularak kullanılmıştır. Bunun yanı sıra sıcaklık değerleri nitrojen ortamda (akış hızı 20mL/dk) ve 10°C/min sıcaklık artış hızında, 30°C den 225°C ye kadar çıkmıştır.

### **4.3.3 Kimyasal analizler**

#### **4.3.3.1 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrofotometresi (FTIR)**

Kompozitlerin kimyasal olarak gerek lif matris ara yüzey iyileştirme tekniklerinde gerekse de yaşlandırma işlemleri neticesinde organik bileşenlerin belirlenmesinde ve değişimlerinin gözlenmesinde kullanılmıştır. Thermo Scientific Nicolet IS 10 marka FTIR spektroskopisi kullanılmıştır. Tüm veriler oda sıcaklığında ve 450 – 4000  $cm^{-1}$

kızılötesi spektrum aralığında  $4 \text{ cm}^{-1}$  sinyal çözünürlüğünde kaydedilmiştir. Matris ve kompozit numunelerin karbonil indeksleri formül 4.5 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Carbonyl Index} = \frac{I_{1712}}{I_{2915}} \quad (4.5)$$

#### 4.3.4 Fiziksel analizler

##### 4.3.4.1 Renk ölçümü

Renk değişim ölçümleri ASTM D2244 standartlarına uygun olarak yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış malzemelerin yüzey renklerindeki değişimler esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Datacolor 3890 marka Foto spektrometre cihazı kullanılarak renk ölçümleri yapılmıştır. Bu sistemde renk değişim ölçümlerinde yüzeyin rengi L, a ve b değerleri elde edilerek ölçülmektedir. L değeri yüzeyin aydınlık veya karanlık oluşuna göre, a değeri yüzeyin kırmızı veya yeşil oluşuna göre, b değeri ise yüzeyin sarı veya mavi oluşuna göre + ve - değerlerde olmaktadır. Bu değerler ve formül 4.6 kullanılarak  $\Delta E$  değerine ulaşıp renk değişimindeki miktarlar sayısal olarak ifade edilebilmektedir.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (4.6)$$

##### 4.3.4.2 Optik mikroskop

Numunelerin yüzeysel anlamda yaşlandırma işlemleri neticesinde değişimlerinin irdelenmesi amacıyla Nikon LV-150 marka optik mikroskop kullanılmıştır.

##### 4.3.4.3 Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM)

Tarayıcı elektron mikroskopisi kompozitlerin yüzeyini analiz etmek ve lif / matris etkileşimlerini incelemek amacıyla kullanılmıştır. Numuneler Jeol JSM 7000F FEG model tarayıcı elektron mikroskobuyla incelenmiştir.  $\text{ZrO}_2$  esaslı elektron kaynağı ve yüksek vakum ortamı SEM analizleri için tercih edilmiştir. Örnekler mikroskopla incelenmeden önce 45 dakika boyunca numunelerin elektriksel iletkenliğini arttırmak amacıyla platinyum kaplama işlemi yapılmıştır.

#### 4.4 Hızlandırılmış Çevresel Yaşlandırma İşlemleri

Kompozit granüllerin dış ortam ürünlerinde alternatif malzeme olarak düşünülebilmesi amacıyla hızlandırılmış şartlarda, belirlenmiş standartlara uyularak UV ışınlarına maruz bırakılmıştır. Diğer yandan doğal lif takviyeli kompozitlerin kullanımda doğal liflerin “hidrofilik” yapısından kaynaklanan yüksek nem yutum özellikleri de çevresel yaşlandırma işlemleri kapsamında değerlendirilmiştir.

##### 4.4.1 Ultraviyole (UV) ışık altında hızlandırılmış yaşlandırma işlemi

Kompozit ve DYPE matris numuneleri Atlas 2000 iklimlendirme kabiniinde yapay 300 nm dalga boyunda UV ışığa maruz bırakılmıştır. Hızlandırılmış yaşlandırma işlemleri ASTM G113 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. İklimlendirme kabin içi sıcaklığı ise 50°C olarak ayarlanmıştır.

##### 4.4.2 Nem yutum çalışmaları

Kompozit numunelerin nem yutum çalışmaları ASTM D-570 standardına uygun bir şekilde yürütülmüştür. Numuneler öncelikle 60°C’ de 3 saatliğine etüvlerde kurularak içerisindeki nem alınmıştır. Bu işlemi takiben oda sıcaklığında soğumaları sağlanmıştır. Oda sıcaklığındaki numunelerin kuru haldeki ağırlıkları hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür. Diğer yandan boyutsal değişimleri gözlemlemek amacıyla numunelerin kalınlıkları elektronik kumpas kullanılarak ölçülmüştür. Sonrasında numuneler oda sıcaklığındaki su banyolarına tamamen batırılmışlardır. İstenilen zaman aralıklarında numuneler çıkarılarak ve yüzeyindeki su tamamen alınarak ağırlıkları ve kalınlıkları ölçülmüştür. Buna göre nem yutum miktarı formül 4.7 ile kalınlık değişim ya da şişme miktarı ise formül 4.8 ile hesaplanmıştır.

$$\Delta W_{(t)} = \frac{W_i - W_s}{W_s} \times 100 \quad (4.7)$$

$$TS = \frac{T_i - T_s}{T_s} \times 100 \quad (4.8)$$

Formüllerdeki  $\Delta W(t)$  belirli bir zaman için yüzde nem yutum miktarını,  $W_i$  numunelerin kuru haldeki ağırlığını,  $W_s$  ise belirli bir zaman için numunelerin son

haldeki ağırlığını göstermektedir. Diğer yandan TS yüzdece şişme miktarı ya da kalınlık değişimini,  $T_i$  numunelerin kuru haldeki kalınlık değerini,  $T_s$  ise numunelerin son haldeki kalınlık değerlerini temsil etmektedir.

## **5. ARA YÜZEY İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI**

Yeni ve alternatif bir kompozit türü olarak “Doğal lif takviyeli kompozit” malzemelerin hafiflik, geri dönüştürülebilirlik, maliyet gibi avantajlarına rağmen uygulamadaki kullanımı, zayıf lif matris ara yüzey durumundan ve dolayısıyla düşük dayanım değerlerine sahip olmasından dolayı sınırlıdır. Diğer taraftan lif / matris ara yüzey tutunma durumunu iyileştirici / geliştirici yöntemler de bilinmektedir. Geliştirilen lif / matris ara yüzey durumu ile kompozit malzemeye gelen yük matris elemanından liflere daha etkin bir şekilde aktarılıp liflerin yükü taşıması sağlanmaktadır. Böylelikle dayanım değerlerinin de yüksek değerlere ulaşması gerçekleşir. Kimyasal ve fiziksel lif / matris ara yüzey durumunu iyileştirme yöntemleri arasında en etkin ve yaygın olarak tercih edilen yöntemler ve bu yöntemlere ait ideal parametreler tez çalışması kapsamında incelenmiştir.

### **5.1 Silan Uygulaması**

Silan uygulaması, kompozitlerin üretimi öncesinde liflere uygulanan bir uygulama olup genel olarak lif ve matris uygunluğunu arttırıcı etkisi vardır. Doğal lifler üretim öncesinde hazırlanan ve bellioranlarda silana sahip olan “silan çözeltisi” içerisinde bir süre bekletilmektedir. Bekletme işlemi sonrasında uygulamaya ait işlemler izlenerek lifler üretim sürecinde kullanılmak için hazırlanmaktadır. Uygulama kullanılan silan bağlayıcı ajanlar, iki ucundaki OH bakımından zengin yüzeylerle reaksiyona girebilen “alkoksisilan” gruplarını içermektedir. Bunun yanında birçok fonksiyonel gruba da sahiptirler. Bu fonksiyonel gruplar sayesinde matris ve lif yüzeyi arasındaki uyumluluk artmaktadır [102].

#### **5.1.1 Malzeme ve yöntem**

Silan kimyasal işleminde % 0.75, % 1,5 ve % 3 silan içeren çözeltiler hazırlanıp 1 ve 3 saat boyunca kumaşlar bu çözeltilerde bekletilmiştir. İşlem sonrasında pH değerini ayarlamak amacıyla asidik asit kullanılmıştır. Sonrasında ise metanol ile kumaşlar

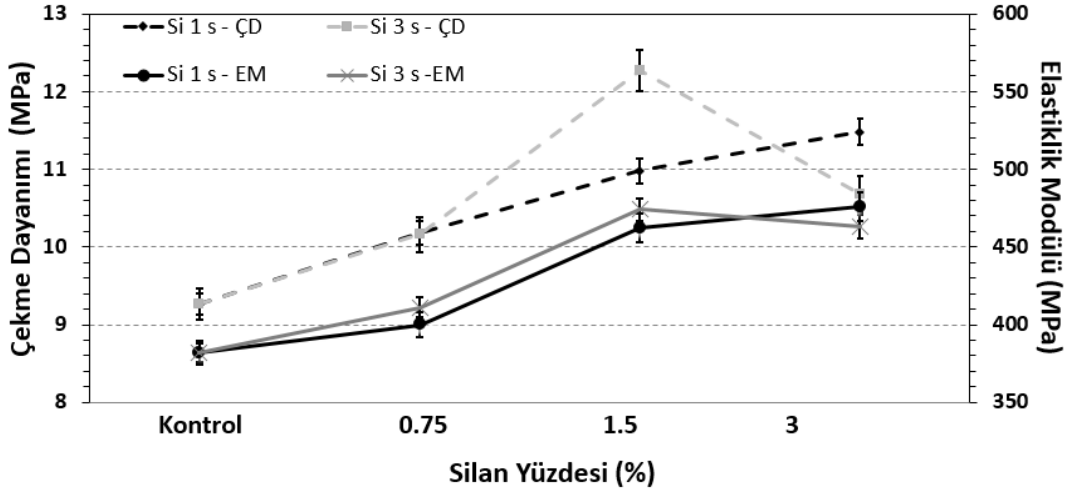
yıkanmış ve üretim öncesinde 3 saat boyunca 70°C'de kurutulmuştur. Çalışma süresince kullanılan çözeltiler ve bekleme süreleri çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.1 :** Kumaşların 1 ve 3 saat bekletildiği silan çözelti bileşenleri.

Çözelti	Silan yüzdesi (%)	Çözücü (etanol/su)
1	0,75	60/40
2	1,5	70/30
3	3	80/20

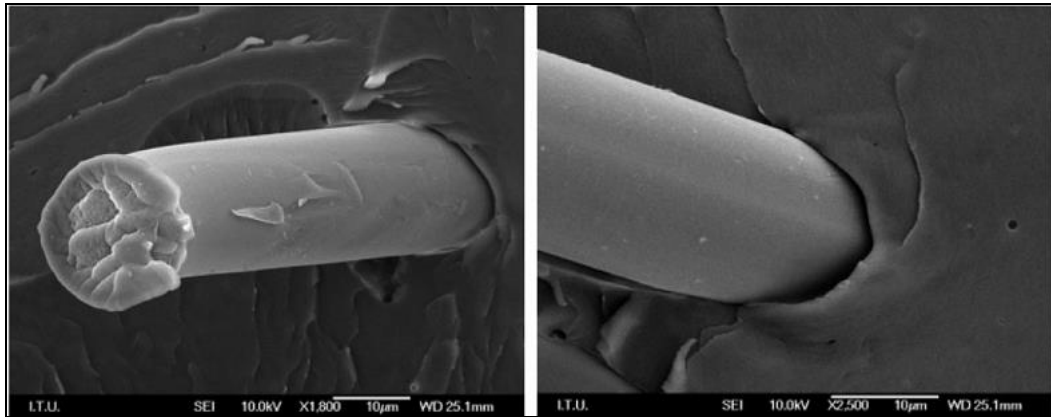
### 5.1.2 Sonuçlar ve yorumlar

Şekil 5.1' de pamuk liflerinin silan çözeltisi içerisinde bekleme süresine ve silan konsantrasyonuna göre kompozit malzemenin çekme özelliklerindeki değişim grafikleri verilmiştir. Sonuçlar kimyasal işleme maruz tutulmamış pamuk lifi takviyeli kompozit malzemenin çekme dayanım değeriyle karşılaştırılmıştır. Ağırlıkça %25 pamuk lifi içeren ve atık DYPE matristen oluşan kompozit malzemenin çekme dayanımı 9,26 MPa olarak bulunmuştur. Şekil 5.2' de görüldüğü üzere zayıf lif / matris ara yüzey durumundan dolayı herhangi bir iyileştirme işlemi uygulanmamış kompozitlerde sınırlı dayanımlar söz konusudur. Grafiğe bakıldığında silan işleminin dayanım değerine olumlu etkilediği görülmektedir. Bekleme sürelerine göre bakıldığında her iki bekleme süresinde çekme dayanımı silan konsantrasyonuna göre doğrusal olarak artış göstermiştir. 1 saatlik bekleme süresi için en yüksek çekme dayanımı %3 silan konsantrasyonuyla birlikte elde edilmiş ve 11,48 MPa çekme dayanımına ulaşılmıştır. Böylelikle pamuk liflerinin %3 silan çözeltisinde 1 saat bekletilmesiyle yaklaşık %25 artış sağlanmıştır. Diğer yandan 3 saat bekleme süresi için de yine aynı değişim görülürken çekme dayanımı en yüksek değerine %1,5 silan çözeltisi ile ulaşılmıştır. Atık kumaşların %1,5 silan çözeltisinde 3 saat bekletilmesiyle silan uygulaması yapılmamış liflerden oluşan kompozit malzemenin dayanımı yaklaşık olarak %32 artışla 12,27 MPa olarak elde edilmiştir. Böylelikle sadece silan kimyasal işlemi uygulanması halinde en ideal şartların %1,5 silan içeren çözelti içerisinde 3 saat bekletilerek oluşturduğu sonucuna varılmaktadır (Şekil 5.1).



**Şekil 5.1 :** Silan oranı ve liflerin çözeltide bekleme sürelerine göre elastiklik modülündeki değişim grafikleri.

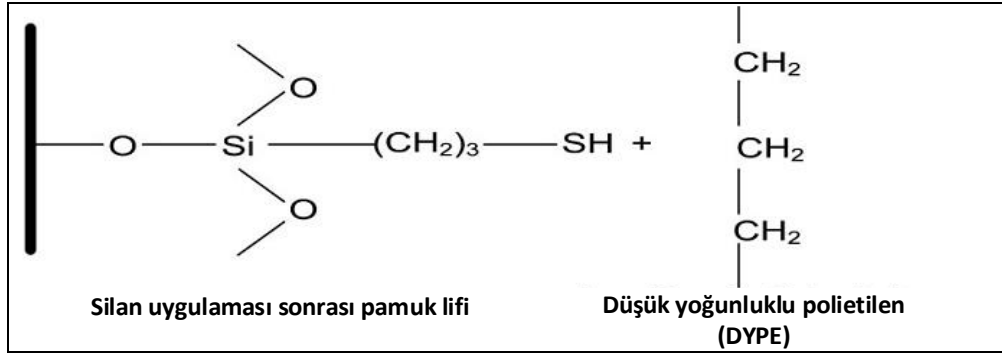
Çekme testinden elde edilen diğer veri, malzemenin rijitliğini temsil eden elastiklik modülüdür. Şekil 5.1’de verilen grafiklere göre kimyasal işlemden geçirilmemiş pamuk liflerinden oluşan kompozitlerin elastiklik modülü 382 MPa olarak ölçülmüştür. Çekme dayanımındaki değişimin elastiklik modülünde de görüldüğü, silan konsantrasyonunun ve bekleme süresinin bu değere olumlu etkilediği şekil 5.1’de gözlenebilmektedir. Her iki bekleme süresine göre paralel değişim gözlenirken en yüksek elastiklik modülü %3 silan içeren çözeltide 1 saat bekleme süresiyle elde edilmiştir. Böylelikle kimyasal işleme uğramamış lif takviyeli kompozite göre yaklaşık %25 artış sağlanarak 476 MPa elastiklik modülü elde edilmiştir. Diğer yandan 3 saatlik bekleme süresi ve %1.5 silan konsantrasyonu için 474 MPa elastiklik modülü elde edilmiştir.



**Şekil 5.2 :** Ara yüzey iyileştirme işlemi uygulanmayan lif / matris ara yüzey durumu.

Silan uygulamasıyla birlikte kompozitlerin çekme özelliklerindeki artışı iki farklı mekanizmayla açıklanabilir. Uygulama esnasında kullanılan su ile birlikte silan

katkısı “silanol” (Si-OH) gruplarına bölünmektedir. Oluşan silanol grupları, doğal liflerin yapısındaki selülozda bulunan -OH gruplarıyla güçlü bir kovalent veya hidrojen bağı oluşturmaktadır. Geri kalan silanol grupları ise hidrojen bağı oluşturabilir ya da etrafındaki silanol gruplarıyla derişime uğrayarak Si-O-Si gruplarını oluşturabilirler. Böylelikle uygulama sonrasında silanol gruplarıyla bağ oluşturan doğal lifler van der Waals kuvvetleriyle hidrofobik karakterdeki polimer zincirlerine bağlanabilirler (Şekil 5.3). Bunun sonucu olarak lif ve matris ara yüzeyinde bir köprü oluşarak kompozit malzemenin dayanım değerlerinde iyileşmeye neden olur.

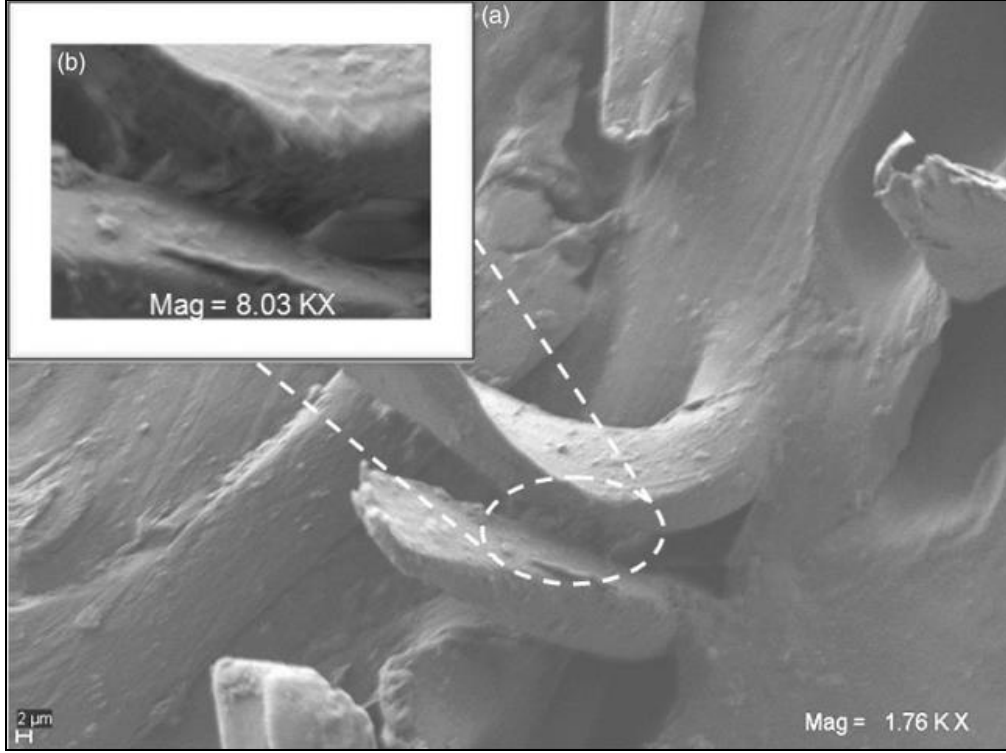


**Şekil 5.3 :** Silan uygulamasına ait şematik gösterim.

Şekil 5.4’ te ise silan uygulamasına sahip kompozit malzemenin lif / matris ara yüzey tutunma durumunu gösteren SEM görüntüsü bulunmaktadır.

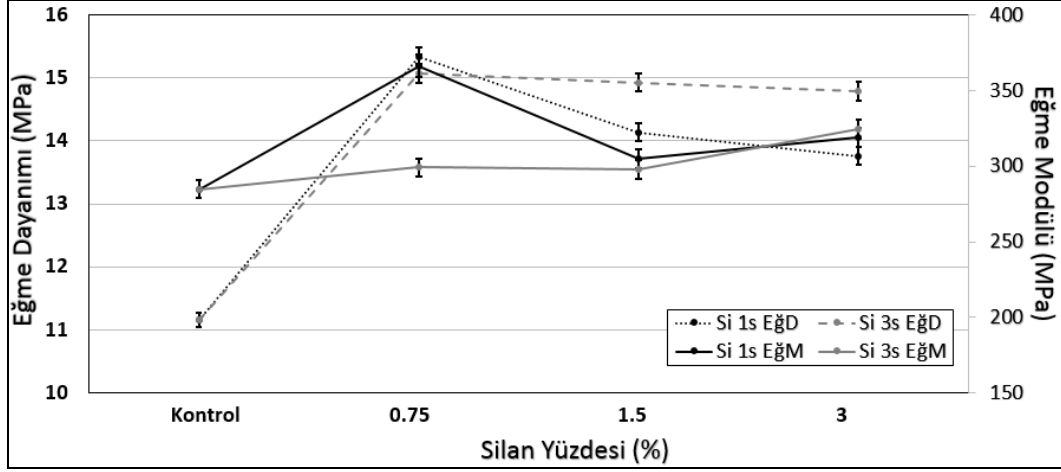
Silan uygulaması hidroliz sürecindeki çözelti derişimi, sıcaklık, bekleme süresi, pH ve silan konsantrasyonu gibi parametrelerden etkilenebilmektedir [103-105]. Diğer yandan en kötü çekme özellikleri %3 silan çözeltisinde 3 saat bekleme süresi sonrasında görülmüştür. Yapılan bazı çalışmalarda silan uygulaması ile çekme özelliklerinin belli şartlarda düştüğü gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak silan uygulamasının yüksek lif miktarına sahip kompozitlerde lif / lif etkileşimi neticesinde lif dağılımını engelleyen bir unsur olduğu düşünülmektedir [106]. Diğer bir açıklama ise yüksek silan konsantrasyonlarında rijit polisiloksan (polysiloxane) grupların oluşumuyla liflerin silan yutum miktarında azalmaların gözlenmesidir [107,108]. Bu sebeplerden dolayı ideal silan miktarı ve bekleme süreleri sonrasında uygulamanın etkinliğinin düşmesi ve dayanım değerlerinde sınırlı artışların gözlenmesi doğal görünmektedir. Benzer sonuçları Franco ve arkadaşlarının yürüttüğü çalışmada da gözlemlenmiştir [109].





**Şekil 5.4** : Silan uygulaması sonrası lif ve matris ara yüzey tutunma durumu.

Çalışma kapsamında çekme testinin yanı sıra eğme özelliklerindeki değişim üç noktadan eğme testi ile incelenmiştir. Şekil 5.5’te farklı oranlarda silan içeren çözeltilerde atık kumaşların kompozit üretimi öncesinde bekleme sürelerine göre eğme dayanımdaki ve eğme modülündeki değişim verilmiştir. Elde edilen sonuçlar herhangi bir kimyasal işleme maruz kalmamış (kontrol) kompozit malzemeye ait eğme dayanım ve eğme modülü değerleriyle kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre eğme dayanım değerleri 1 saat bekleme süresi için % 0,75 silan miktarıyla en üst seviyede olup yaklaşık 11,15 MPa değerinden 15,34 MPa değerine kadar çıktığı görülmektedir. Her iki bekleme süresi için %0,75 silan miktarından daha fazla olan Silan değerleriyle eğme dayanım değerlerinin negatif bir şekilde etkilendiği gözlenmektedir.



**Şekil 5.5 :** Silan oranı ve liflerin çözeltilde bekleme sürelerine göre eğme özelliklerindeki değişim grafikleri.

Eğme modülü değerleri de eğme dayanımı değerlerine paralel bir eğilim göstermektedir. Buna göre kontrol kompozit malzemenin 284 MPa değerindeki eğme modülü atık kumaşların %0,75 silan çözeltilinde 1 saat bekletilmesiyle birlikte yaklaşık 360 MPa değerine ulaştığı bulunmuştur. 1 saat bekleme süresi için eğme modülü değerlerinin çözeltideki silan oranıyla ters orantılı bir şekilde değiştiği söylenebilir. Diğer yandan 3 saat bekleme süresi için eğme modülü değerlerinin silan miktarından bağımsız, yaklaşık olarak aynı kaldığı gözlenmiştir. Kompozitlerin üretim işleminden önce atık kumaşların silan çözeltilinde bekletilmesiyle beraber en yüksek 15,34 MPa eğme dayanımı ve 360 MPa eğme modülünün %0,75 Silan çözeltili ve 1 saat bekleme süresi için bulunduğu görülmektedir.

## 5.2 Alkalin uygulaması

Tez kapsamında lif / matris ara yüzey tutunma durumunu incelemek amacıyla literatürde “Alkalin Uygulaması” olarak geçen NaOH ile pamuk liflerinin üretim öncesinde muamelesi (treatment) gerçekleştirilmiştir.

### 5.2.1 Malzeme ve yöntem

Bu yöntemde öncelikle farklı derişimlere (1M ve 1.5M olmak üzere) sahip NaOH çözeltileri hazırlanmıştır. Atık kumaş parçacıkları hazırlanan NaOH çözeltilinde 1 saat, 3 saat ve 5 saat olacak şekilde bekletilmiştir. Muameleden sonra atık kumaşlar, saf suda pH değeri 7 civarına gelinceye kadar bekletilmiştir. Daha sonra saf sudan çıkarılan kumaşlar etüv yardımıyla kurutulmuştur. Böylece ekstrüzyon makinasında üretime hazır hale getirilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri

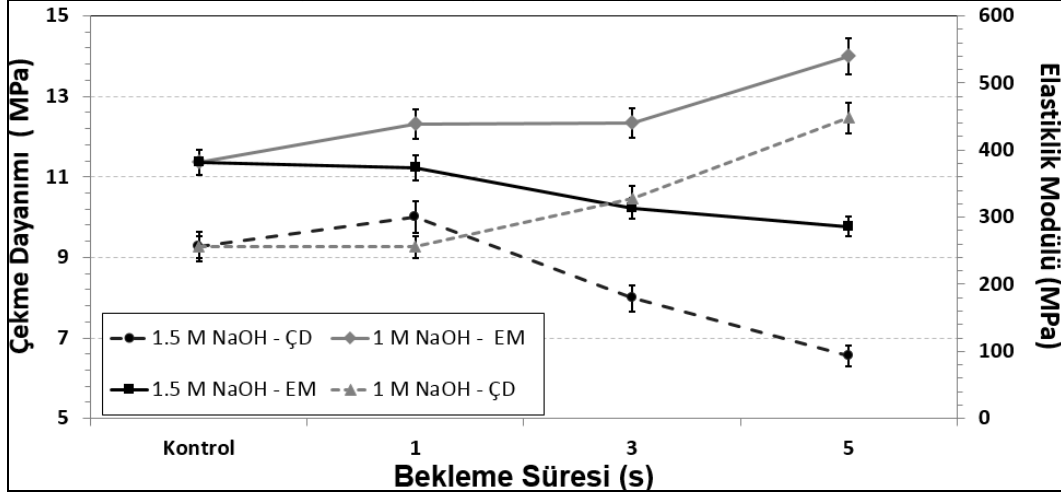
incelenmiştir. Böylelikle NaOH uygulamasında iki parametre olan çözelti derişiminin ve bekleme süresinin lif yüzeyine ve dolayısıyla kompozit malzemelerin mekanik performansındaki değişimler incelenmiştir.

### 5.2.2 Sonuçlar ve yorumlar

Şekil 5.6' da kompozit malzemelere ait kompozit üretiminde kullanılan atık kumaşların NaOH çözeltisinde bekleme süresine ve NaOH derişimine göre çekme dayanımı ve elastiklik modülündeki değişimleri verilmiştir. Ayrıca karşılaştırma amaçlı olarak alkalın uygulaması yapılmamış liflere sahip kompozit numunelerin (kontrol) çekme özellikleri de verilmiştir. Çalışmanın başlangıcında alkalın konsantrasyonunun artışıyla beraber çekme özelliklerinde de artışın gözleneceği beklenmiştir. Fakat 1 M NaOH ve 1 saat bekleme süresi için alkalın uygulamasının beklenildiği kadar etkili olmadığı görülmüştür. Diğer yandan 1 M NaOH çözelti uygulaması için kompozitlerin çekme dayanım değerleri bekleme süresiyle orantılı bir şekilde artarak (%35) 5 saatlik bekleme süresi için en yüksek değeri olan 12,5 MPa değerine ulaşmıştır. Literatürdeki benzer çalışmaları incelediğimizde elde edilen artış oranının diğer çalışmalarda elde edilen artış oranlarıyla örtüştüğü görülmüştür [110-113]. Genel olarak bakıldığında çekme dayanımındaki artışın kaynağı;

- Alkalın uygulamasıyla beraber atık kumaşlardaki liflerin fonksiyonel gruplarını çerçeveleyen ve lifin matrise tutunmasını engelleyen pektin ve yağlı tabakaların temizlenmesinden,
- Uygulamayla beraber liflerin yüzeyinde pürüzlülük oluşturularak toplam tutunma yüzeyinin artırılması ve matris ile iyi bir tutunma durumunun yakalanmasından olabilir.

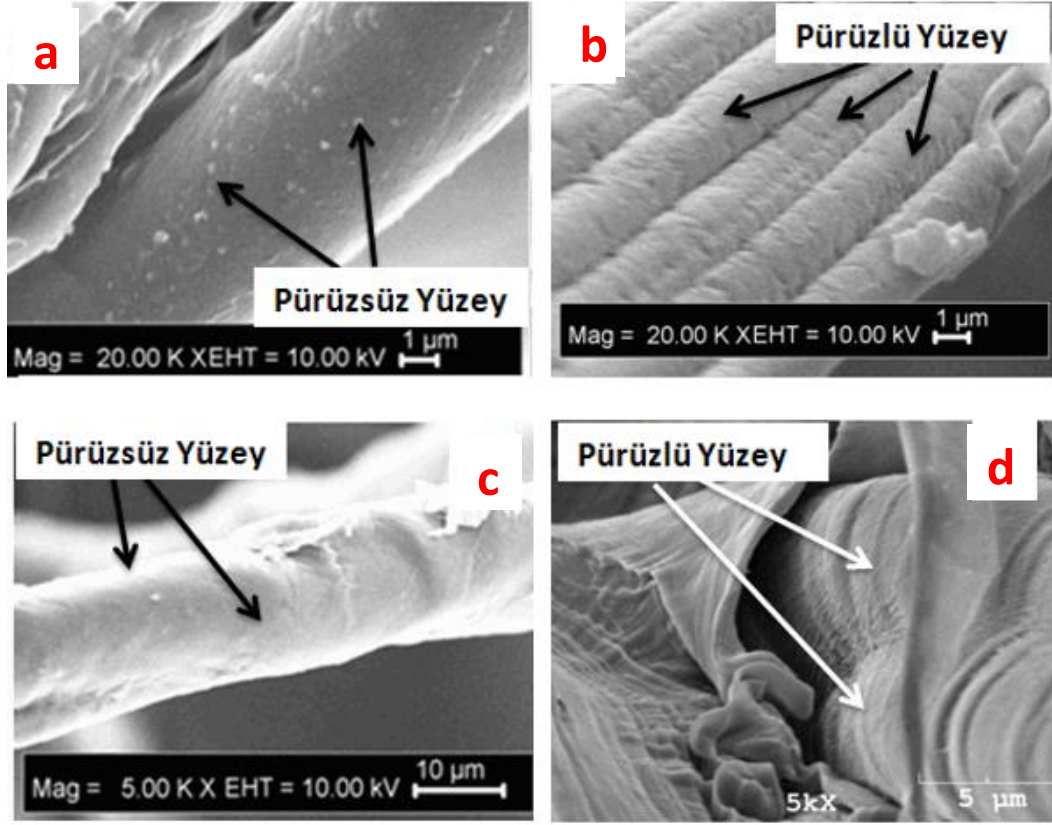
Çekme testi sonuçlarına bakıldığında, 1,5 M NaOH ve 1 saat bekleme süresi için kompozit numunelerin çekme dayanımları kontrol kompozit malzemenin çekme dayanımına göre yaklaşık %10 arttığı görülmüştür. Aynı derişim oranı için bekleme sürelerinin artışıyla beraber dayanım değerlerinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 : Liflerin değişik NaOH miktarı ve bekleme süresine göre kompozit çekme özelliklerindeki değişimi.

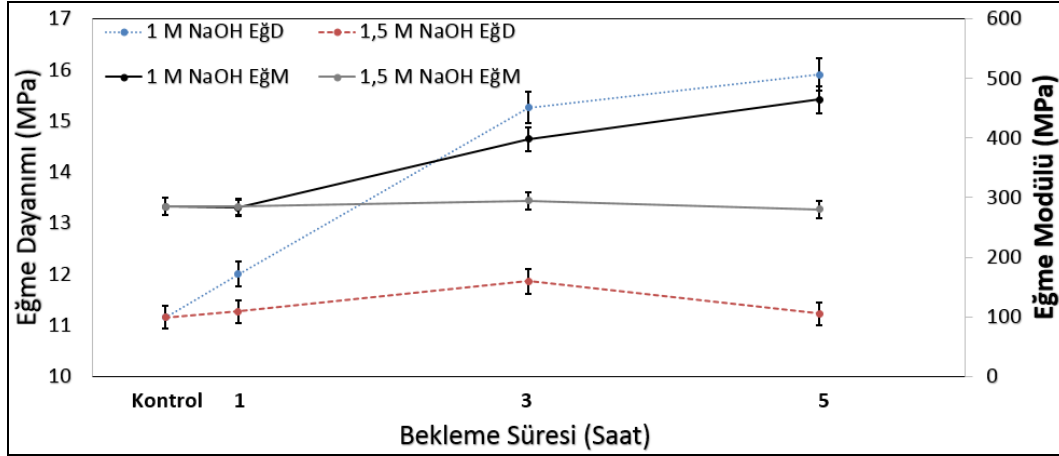
Sonuçlarda görülen dalgalı değişimlerin en büyük nedeni olarak lif / matris ara yüzey tutunma durumunun artışı ve liflerin ideal olmayan alkalın çözeltilerinde bekletilmeleri, dolayısıyla zarar görmelerinin aynı anda görülmeye başlamasıdır. Dolayısıyla ideal alkalın parametrelerinden uzaklaştıkça (yüksek bekleme sürelerinde veya yüksek NaOH derişim değerleri) yükü taşıması beklenen liflerde aşınmaların meydana gelmesi görülebilmektedir. İdeal alkalın uygulamasına kadar dayanım artışları, daha ileri alkalın uygulamalarıyla beraber dayanım değerlerindeki düşüşler Mwaikambo ve arkadaşları tarafından yapılan benzer bir çalışmada da ortaya konmuştur [114]. Çekme testi sonuçlarından elde edilen bir diğer sonuç ise elastiklik modülündeki değişimler de Şekil 5.6' da görülmektedir. Elastiklik modülündeki değişimler de çekme dayanımdaki değişimlere paralellik göstermektedir. 1 M NaOH çözeltisinde bekletilen lif takviyeli kompozitler için, elastiklik modülü bekleme süresinin artışıyla doğru orantılı olarak yaklaşık %40 artış göstermiştir ve 540 MPa değerlerine ulaşılmıştır. Diğer yandan 5 saatlik bekleme süresi sonrasında liflerin zarar görmesinden kaynaklanan düşüşler görülmüştür. 1 M NaOH çözeltisinde 5 saat bekletilen lif takviyeli kompozitlerde elastiklik modülü değerleri 285 MPa'a düşmüştür.

Alkalın uygulamasının liflerin yüzeyini pürüzlendirmesiyle ilgili ortaya atılan varsayımı irdelemek amacıyla Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri çekme numuneleri kullanılarak yapılmıştır (Şekil 5.7). SEM analizlerinden anlaşılacağı üzere alkalın uygulamasının pamuk liflerinin yüzeyinde pürüzlülük meydana getirerek toplam etkin tutunma yüzeyini arttırdığı görülebilmektedir.



**Şekil 5.7 :** Pamuk lifi yüzey durumu **a)** Alkalin uygulamaz (20 kX) **b)** 5 saat 1 M NaOH sonrası (20 kX) **c)** Alkalin uygulamaz (5 kX) **d)** 5 saat 1 M NaOH sonrası (5 kX).

Doğal lif takviyeli kompozit malzemelere uygulanan bir başka en çok kullanılan yöntem olarak alkalin işleminin kompozit malzemeye ait eğme dayanımı ve eğme modülü üzerine etkisi şekil 5.8' de NaOH derişimine (1 M ve 1.5 M) ve bekleme sürelerine (1 s, 3s ve 5s) göre verilmiştir. Yapılan testler sonucunda atık kumaşların 1 M derişime sahip çözeltide bekletilmesi birlikte bekleme süresine paralel olarak eğme dayanımı ve eğme modülü değerlerinin arttığı bulunmuştur. Bunun neticesinde 1 M NaOH çözeltisinde farklı süreler için eğme dayanımı yaklaşık olarak %40 artış göstererek en yüksek 15,91 MPa değerine ulaşmıştır. Bu sonuç ayrıca alkalin iyileştirme çalışmalarında gözlenen en yüksek değer olarak bulunmuştur. Eğme modülü değeri ise 1 M NaOH çözeltisinde farklı sürelerde bekletilmesiyle 284 MPa mertebesinde 464 MPa değerine ulaştığı şekil 5.8' den görülebilmektedir. 1 M NaOH çözeltisi için en ideal bekleme süresinin 5 saat olduğu yapılan deneyler yardımıyla bulunmuştur.



**Şekil 5.8 :** Liflerin NaOH ve bekleme süresine göre kompozit eğme özelliklerindeki değişimi.

Diğer yandan 1,5 M NaOH çözeltisi için ise eğme dayanımı 3 saatlik bekleme süresine kadar bekleme süresi arttıkça eğme dayanımı da artmış fakat 3 saatlik bekleme süresinden sonra eğme dayanımı da düşüş gözlenmiştir. 1,5 M NaOH çözeltisi için en yüksek eğme dayanım değerine 3 saatlik bekleme süresinde ulaşılmış olup yaklaşık olarak %7'lik bir artış elde edilmiştir. 1,5 M NaOH çözeltisi için eğme modülü değerlerinde bir değişimin gözlenmediği ve yaklaşık olarak muamelesiz kompozit malzemenin eğme modülüne yakın olduğu görülmektedir. Atık kumaşların kompozit üretiminden önce alkalin işleminden geçirilmesi neticesinde eğme dayanımda %40, eğme modülünde ise yaklaşık %60 artış sağlandığı bulunmuştur.

### 5.3 Alkali Silan Uygulaması

Literatürde lif / matris ara yüzey iyileştirme çalışmaları incelendiğinde bazı çalışmalarda alkalin ve silan uygulamasının ayrı ayrı liflere uygulandığı görülürken bazı çalışmalarda ise her iki yöntemin verimliliği arttırmak amacıyla peşi sıra liflere uygulandığı ve daha belirgin veya etkin sonuçların bulunduğu gözlenmiştir. Bu amaçla tez çalışması kapsamında alkalin ve silan uygulamasının peşi sıra liflere uygulama işleminin etkinliği de irdelenmiştir.

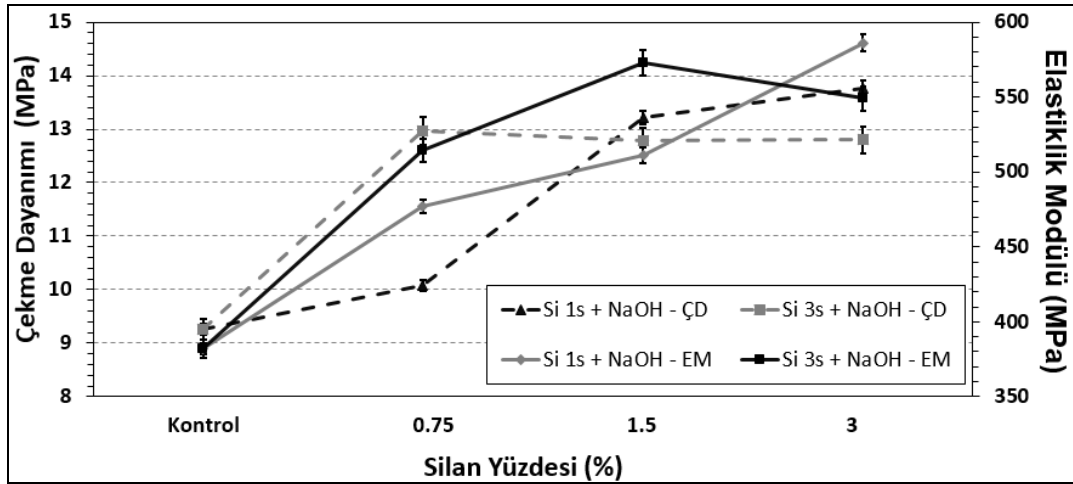
#### 5.3.1 Malzeme ve yöntem

Alkali-silan uygulamasını kapsamında alkalin aşamasında daha önceden elde edilen ideal parametreler olarak 1 M NaOH derişimine sahip çözeltide 5 saatlik bekleme süresi tercih edilmiştir. Alkalin uygulaması sonrasında atık kumaşların 2 gün oda

sıcaklığında kuruması beklenilmiştir. Alkalin uygulaması sonrasında atık kumaşlar %0,75, 1,5 ve 3 Silan içeren metanol – su çözeltilerinde farklı bekleme sürelerinde (1s ve 3s) bekletilmiştir. Çözeltinin pH seviyesi 3,5-4 olana kadar asetik asit kullanılmıştır. En son olarak atık kumaşlar etüvde 70°C’de 3 saatliğine bekletilerek üretime hazır hale getirilmişlerdir.

### 5.3.2 Sonuçlar ve yorumlar

Alkali – silan uygulamasına ait çekme testi sonuçları şekil 5.9’ da verilmiştir. Test sonuçlarına göre alkali – silan uygulamasının peşi sıra uygulanması beklenildiği gibi alkalin veya silan uygulamasının tek başına olduğu durumlara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. En yüksek çekme dayanım değeri olarak 13,8 MP değeri elde edilirken, sadece alkalin uygulamasıyla 12,5 MPa, sadece silan uygulamasıyla ise 12,2 MPa çekme dayanım değeri elde edilmiştir. Elastiklik modülü değerlerinde ise sadece alkalin uygulamasına kıyasla %8, sadece silan uygulamasına kıyasla ise %23 artış sağlanmıştır.

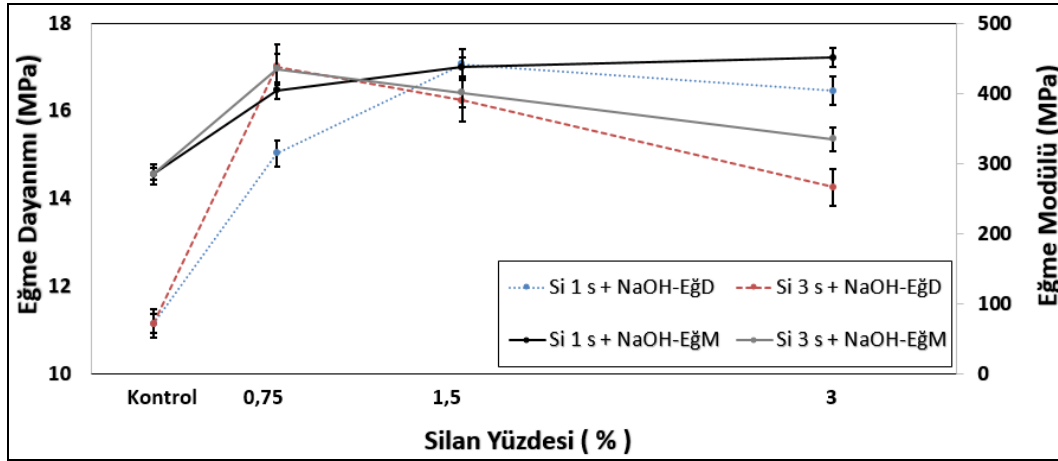


Şekil 5.9 : Alkali-silan uygulamasının kompozitlerin çekme özellikleri üzerine etkisi.

Çekme testi sonuçlarına göre en yüksek dayanım değerlerine ulaşabilmek amacıyla atık kumaşlar öncelikli olarak 1 M NaOH derişimindeki çözeltide 5 saatlik alkalin uygulamasının ardından %3 silan konsantrasyonuna sahip çözeltide 1 saatlik silan uygulamasından liflerin geçmesi gerektiği anlaşılmıştır. Alkali – silan uygulamasıyla beraber atık kumaş içeriğindeki pamuk liflerinin öncelikli olarak daha pürüzlü yüzeylere sahip olması, silan uygulamasıyla beraber ise liflerin matris ile uyumunu sağlamak amacıyla silanol gruplarının lifler ile kovalent bağ (pamuk lifi – O – Si)

yapması sağlanmıştır. Böylelikle her iki uygulamanın etkinliği artırılarak dayanım değerleri daha yüksek seviyelere taşınmıştır.

Daha önceki çalışmalarımızda elde edilen olumlu sonuçlar doğrultusunda alkali – silan uygulamasının, eğme dayanımı ve eğme modülü üzerinde olumlu etkileri hedeflenmiştir. Bu amaçla yürüttüğümüz çalışmalarda bulunan sonuçlar şekil 5.10’ da silan miktarı ve silan çözeltisinde bekleme sürelerine göre verilmiştir. Alkali – silan işleminin birlikte uygulanmasıyla beraber eğme dayanımı kayda değer bir artış göstererek yaklaşık 17 MPa değerine ulaşmıştır. Böylelikle eğme dayanımı için silan ile iyileştirme işlemine göre %11, alkalın işlemine göre ise yaklaşık %7 daha fazla artış sağlanmıştır. Eğme dayanımdaki olumlu sonuçlar eğme modülü değerlerine yansımış olup uygulama yapılmamış kompozit malzemenin 284 MPa eğme modülü değeri 451 MPa değerine ulaştığı şekil 5.10’ daki görülmektedir.



Şekil 5.10 : Alkali-silan uygulamasının kompozitlerin eğme özellikleri üzerine etkisi.

#### 5.4 Lif / Matris Ara Yüzey Bağlayıcı Ajan Olarak Maleik Anhidrit Katkı İlavesi

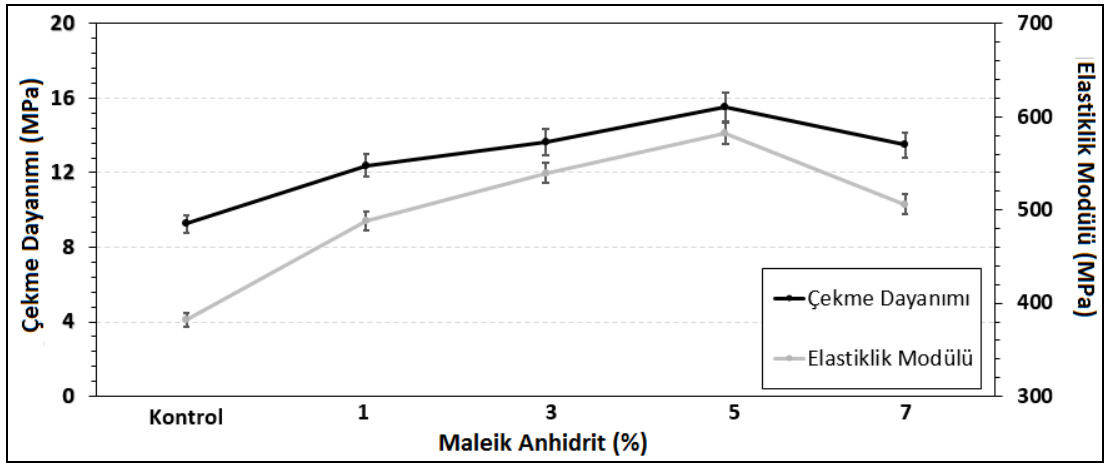
Lif / matris uyumunu arttırmayı yarayan yöntemlerden en etkin olarak tercih edilen maleik anhidrit bağlayıcı ajanlarının katkısı, kompozit üretim aşamasında atık kumaşların ve matris elemanlarıyla beraber granül şeklinde belli oranlarda (%1, 3, 5 ve 7) ilave edilerek kompozitlerin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

##### 5.4.1 Sonuçlar ve yorumlar

Bağlayıcı ajan katkısının kompozitlerin çekme özellikleri üzerine etkisini gösteren grafikler şekil 5.11’ de verilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerleri katkı ilavesiyle doğru orantılı olacak şekilde artış



göstermiş, %5 maleik anhidrit katkısıyla en yüksek değerlerine ulaşılmıştır. Kontrol numunelerine kıyasla çekme dayanımda yaklaşık %65, elastiklik modülü değerlerinde ise %55 artış sağlandığı görülmüştür. Çekme özelliklerindeki artışın en önemli sebebi olarak lif / matris uyumundaki artışa ve matristen life verimli bir şekilde yükün aktarılması gösterilebilir. Diğer yandan lif / matris ara yüzey tutunma durumunu en iyi seviyeye çıkaran kritik katkı ilavesi miktarı bulunmaktadır. Benzer çalışmalar incelendiğinde ideal katkı oranları aşıldığında maleik anhidrit katkısının matris fazı bozarak yük iletme etkinliğini düşürdüğü ve dolayısıyla dayanım değerlerinde düşüşlerin gözlemlendiği görülmüştür [115,116]. Bu çalışmada %25 pamuk lifi içeren DYPE matrisli kompozit malzeme için %5 maleik anhidrit katkısının ideal oran olduğu belirlenmiştir.



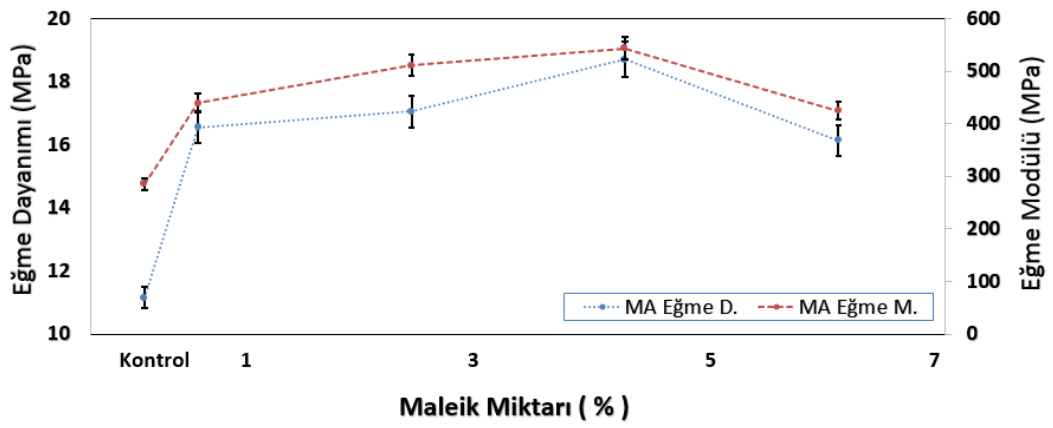
**Şekil 5.11** : Bağlayıcı ajan (Maleik Anhidrit) katkısının çekme özellikleri üzerine etkisi.

Bağlayıcı ajan katkısıyla beraber dayanım değerlerinde artışa sebep olan iyileşmiş lif / matris ara yüzey tutunma durumuna ait SEM görüntüleri şekil 5.12’de verilmiştir. SEM görüntülerinden de anlaşılacağı üzere maleik anhidrit katkısıyla birlikte polimer matris pamuk lifinin çevresini sarmış ve bu durum yük transferini kolaylaştırmıştır.



**Şekil 5.12 :** Bağlayıcı ajan katkılı kompozitlere ait ara yüzey durumu.

Maleik anhidrit bağlayıcı ajanın kompozit malzeme içerisindeki miktarının çekme özellikleri üzerine etkisinin irdelenmesinin ardından eğme özelliklerinin de nasıl etkileneceği bu çalışma kapsamında incelenmiştir. %25 pamuk lifi ve orijinal DYPE matrisli kompozitler üzerine yapılan çalışmanın sonuçları şekil 5.13’ te verilmektedir. Elde edilen eğme testi sonuçlarına göre maleik anhidrit katkısının kompozit malzemelerin eğme dayanımı üzerine etkisinin çekme dayanımına etkisinde daha az olduğu görülmektedir. Eğme dayanım değerlerinin çekme özelliklerinde olduğu gibi %5 değerine kadar yavaş yavaş arttığı ve bu değerden sonra düşüşe geçtiği görülmektedir (Şekil 5.13). Yapılan eğme deneyleri sonucunda en yüksek eğme dayanımı yaklaşık 18,5 MPa, en yüksek eğme modülünün ise yaklaşık 680 MPa olduğu bulunmuştur. Eğme dayanımın %5 Maleik katkısından sonraki düşüşün nedeni olarak çekme dayanımında olduğu gibi kompozitteki pamuk lifine bağlı olmayan ve artan bağlayıcı ajan miktarının kompozit yapıda olumsuz etki yaratması ile açıklanabilir.



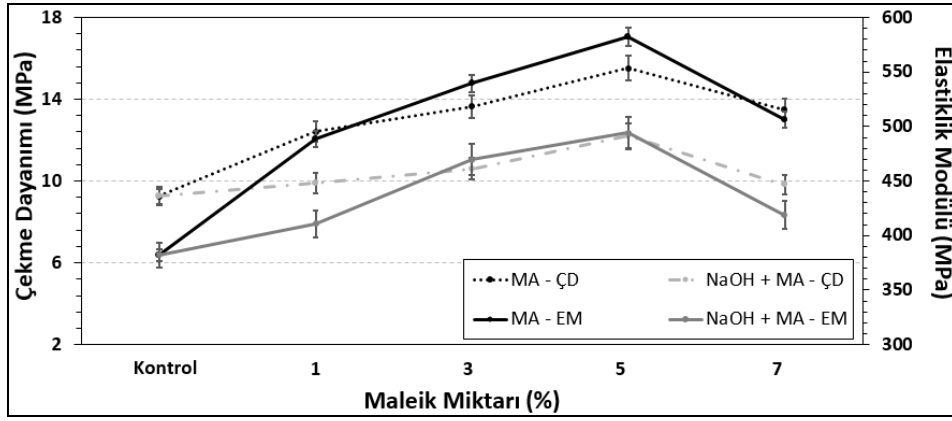
Şekil 5.13 : Bağlayıcı ajan (Maleik Anhidrit) katkısının eğme özellikleri üzerine etkisi.

### 5.5 Alkalin Uygulaması ve Maleik Anhidrit Bağlayıcı Ajan Katkı İlavesi

Çalışmalar neticesinde iyileştirme yöntemleri arasında en etkin yöntemlerin alkalin ve maleik anhidrit katkısıyla iyileştirme yöntemleri olduğu tespit edilmiştir. Pamuk lifleri üzerinde pürüzlülüğü artırıcı etkisiyle alkalin işleminin sonrasında lif matris uyumunu artırıcı etkisi olan ve tutunmayı sağlayan bağlayıcı ajan katkısının birlikte tercih edilmesinin daha iyi sonuçları ortaya çıkaracağı öngörülmüştür. Bu doğrultuda yapılan çalışmalarda atık kumaşlar öncelikle 1 M NaOH çözeltisinde 5 saat bekletilmiştir. Maleik anhidrit kompozit üretimi esnasında katılmıştır. %1, 3, 5 ve 7 oranlarında maleik anhidrit katılarak her iki iyileştirme yönteminin birlikte kullanımında mekanik performansın nasıl etkilendiği çekme, eğme ve darbe testleri yapılarak incelenmiştir.

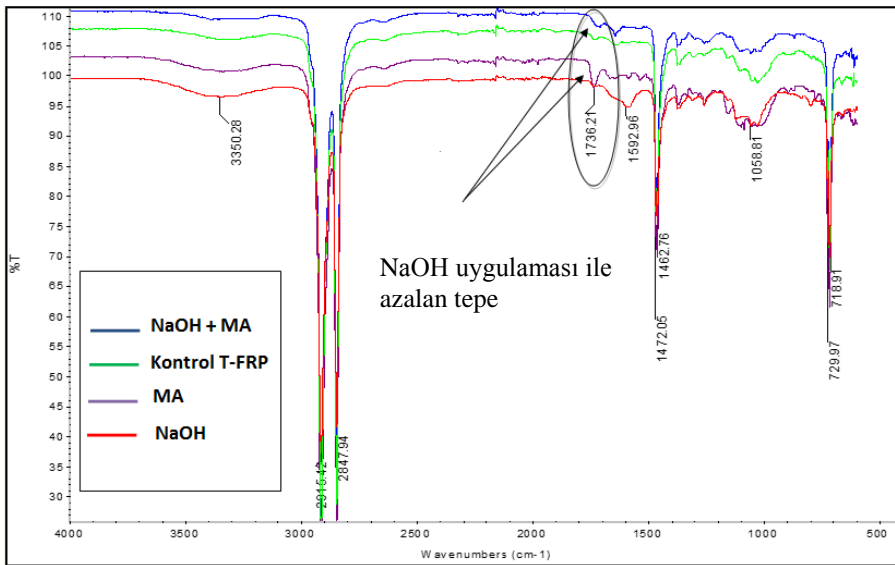
#### 5.5.1 Sonuçlar ve yorumlar

Şekil 5.14' te çekme testi sonucunda bulunan çekme dayanımı ve elastiklik modülündeki değişim maleik anhidrit miktarına bağlı olarak görülmektedir. Sonuçlara bakıldığında atık kumaşların ekstrüzyon işleminden önce alkali işleminden geçirilmesi ve sonrasında maleik anhidrit kullanılması beklentilerin aksine negatif bir etki yaratmıştır. Sadece maleik anhidrit kullanımıyla çekme dayanımı 16 MPa değerine ulaşırken atık kumaşların alkalin ile muamelesi, bu değer düşmesine ve yaklaşık 11 MPa seviyelerinde kalmasına neden olmuştur. Yine aynı şekilde elastiklik modülü değeri 500 MPa değerlerinden 400 MPa seviyelerine gerilediği gözlenmektedir.



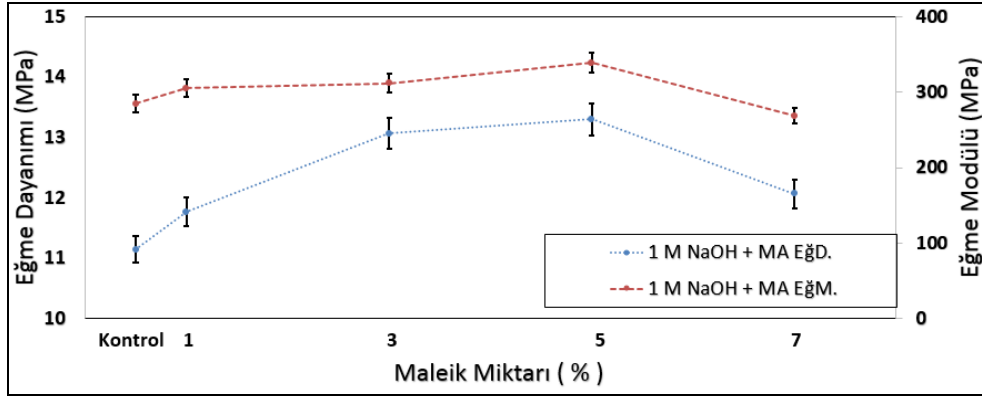
Şekil 5.14 : NaOH + MA uygulamasının çekme özellikleri üzerine etkileri.

Çekme testi sonuçlarına bakıldığında beklentilerimizin tam tersine maleik anhidrit katkısı öncesinde atık kumaşların NaOH çözeltisi içerisinde bekletilmesi negatif bir etki yarattığı görülmüştür. Literatür araştırmaları sonucunda beklenmedik negatif etkinin maleik anhidritin sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, kalsiyum hidroksit, alkali metaller, amineler gibi güçlü baziklerle yüksek sıcaklıklarda katalize olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [117]. Atık kumaşların alkalin (NaOH) çözeltisinde bekletildikten sonra üzerinde kalan NaOH kalıntılarıyla maleik anhidritin ekstrüzyon işleminde reaksiyona girmesi ve bunun neticesinde hem maleik anhidritin hem de matris malzemesinin bozulduğu ve kompozitlerin mekanik özelliklerde düşüşe neden olduğu söylenebilir. Bu çıkarımı desteklemek amacıyla muamelesiz, sadece maleik anhidritli, sadece alkalin işlemi ile iyileştirilmiş ve alkalin işlemi sonrasında maleik anhidrit katılmış kompozitlerin FTIR analizleri yapılmıştır.



Şekil 5.15 : Kompozitlerin FTIR spektrumu.

FTIR spektrumlarından da anlaşılacağı üzere kompozit malzeme ile birlikte selüloz miktarının artışıyla lignin ve hemiselülozik grupların yok olması –OH gruplarına ve dolayısıyla  $3378\text{cm}^{-1}$  civarındaki tepelerin görülmesine sebep olmaktadır. FTIR analizlerinden görüldüğü gibi  $1732\text{ cm}^{-1}$  civarındaki tepeler sadece maleik anhidrit bağlayıcı ajanı içeren kompozitlerde elde edilmiştir. Bu tepe selülozik yapıyla matris ve bağlayıcı ajan arasında bir bağ oluşumuna işaret etmektedir. Diğer yandan maleik anhidritli kompozitlerde üretim öncesi alkalin işleminden geçirmek bu tepenin kaybolmasına neden olmuştur. Kaybolan veya azalan tepe kompozitte lif matris tutunmasını sağlayan bağın bozulduğunu göstermektedir. Bu yüzden alkalin işleminden sonra maleik anhidrit kullanılması daha zararlı olmuştur. Bu durum lif matris tutunma etkinliğini olumsuz etkilemiş ve dolayısıyla kompozitte mekanik performansta düşüşe neden olmuştur.

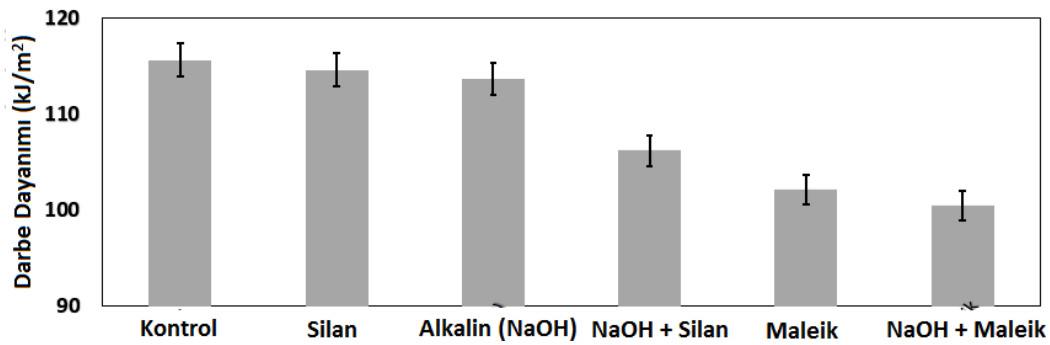


Şekil 5.16 : NaOH+MA işleminden geçirilmiş kompozit malzemelere ait eğme testi sonuçları.

Atık kumaşların öncelikle alkalin işleminden geçirilip üretim esnasında maleik bağlayıcı ajanı kullanılmış kompozitlere (NaOH+MA) ait eğme testi sonuçları şekil 5.16’ da görülmektedir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında eğme testi sonuçları da çekme testi sonuçlarına paralel bir eğilim göstermektedir. Her ne kadar üretim öncesinde alkalin işleminin uygulanmış olması ve kompozit yapının bozulmasına rağmen eğme dayanım değerleri maleik anhidrit miktarıyla doğru orantılı bir şekilde değişmektedir. Eğme dayanımı grafikten de anlaşılacağı üzere %5 maleik anhidrit içeren kompozitte en yüksek değere ulaşmıştır sonrasında ise ideal maleik anhidrit oranının aşılmasıyla beraber değerlerde düşüş gözlenmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere alkalin işleminin maleik anhidrit bağlayıcı ajanının sağladığı lif matris tutunma etkisini büyük ölçüde olumsuz etkilemiştir. Bu durum kompozitlerin eğme özelliklerinin üretim öncesinde alkalin işleminin yapılmamış ve sadece maleik anhidrit

içeren kompozit malzemeye göre %30-%40 düşüş olmasına neden olmuştur. Test sonuçlarına göre yaklaşık 11 MPa değerine sahip her hangi bir işleme tabi tutulmamış kompozit malzemenin eğme dayanımı %5 maleik anhidrit katılmasıyla beraber 13,5 MPa değerlerine ulaşmıştır. Diğer yandan alkalin işleminin kompozitlerin eğme modülü değerlerini eğme dayanım değerlerine göre çok daha olumsuz etkilediği grafikten anlaşılabilir. Yaklaşık olarak 280 MPa değerinde olan kompozit malzemenin eğme modülü değerinde maleik anhidrit katılmasına rağmen üretim öncesindeki alkalin işleminden dolayı artış sağlanamamıştır. Bu çalışmanın neticesinde beklentilerin tam tersine lif yüzeyinde tutunma alanını artırıcı etkisi olan alkalin işleminin maleik anhidrit bağlayıcı ajan kullanımına olumsuz etkilediği görülmüştür.

Çalışma kapsamında lif /matris ara yüzey iyileştirme çalışmalarına ait çekme ve eğme özellikleri üzerine etkilerinin yanı sıra kompozitlerin mekanik özellikleri arasında darbe dayanım değerlerindeki değişimleri de incelenmiştir. İyileştirme çalışmaları sonrasında en iyi çekme ve eğme özellikleri gösteren kompozitlere ait darbe dayanım değerleri şekil 5.17’de verilmiştir. Genel olarak incelendiğinde muamelesiz, yani herhangi bir iyileştirme çalışmasına tabi tutulmamış %25 atık kumaş takviyeli DYPE matrisli kompozit malzemenin darbe dayanım değeri 115 kJ/m<sup>2</sup> değerinde bulunmuştur. Polimer matrise atık kumaş takviyesinin saf polimer matris darbe dayanımını oldukça düşürdüğü gözlenmiştir. Saf DYPE matrisin darbe dayanımı önceki çalışmalardan elde edilen test sonuçlarına göre 400 kJ/m<sup>2</sup> mertebesindedir. Bu düşüşün nedeni olarak atık kumaş takviyesinin oldukça sünek DYPE matrise göre gevrek olması ve dolayısıyla bunu kompozit yapıya yansıtması olarak düşünülmektedir.



Şekil 5.17 : Lif / matris ara yüzey iyileştirme yöntemlerine göre darbe dayanım değerlerindeki değişim grafikleri.

Diğer yandan kompozitlerin çekme ve eğme özelliklerini %80 mertebesine kadar iyileştirme gerçekleştiren yöntemlerin darbe dayanım değerlerine olumlu katkı yapmadığı şekil 5.17'deki grafikten anlaşılabilir. Genel olarak darbe test sonuçları incelendiğinde beklenildiği gibi lif matris uyumluluğunu arttıran iyileştirme yöntemleri darbe dayanım değerlerini düşürmüştür. Bu durumun sebebi olarak lif matris tutunma kalitesinin artmasıyla kompozit malzeme matristen ziyade lifin özelliklerini daha çok göstermektedir. Böylelikle gevrek olan pamuk lifleri yüzünden kompozit malzemenin darbe dayanım değerleri de beklenildiği gibi düşmektedir. Sonuç olarak yaklaşık 115 kJ/m<sup>2</sup> mertebelerindeki darbe dayanım değeri lif matris ara yüzey iyileştirme çalışmaları neticesinde 100 kJ/m<sup>2</sup> seviyelerine kadar gerilediği görülmektedir. Aynı zamanda çizelge 5.2' de ara yüzey iyileştirme işlemlerine göre kompozit numunelere ait darbe dayanım değerleri detaylı bir şekilde sunulmuştur.

**Çizelge 5.2 :** Ara yüzey iyileştirme işlemine göre kompozitlerdeki darbe dayanım değerleri.

İşlem	İçerik (%)	Bekleme Süresi (S)	Darbe Dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )
Kontrol	25	-	115
	0.75	1	109
		3	114
Silan(Si)	1.5	1	113
		3	114
	3	1	113
		3	112
		1	114
		3	112
Alkalin(NaOH)	1 M	3	112
		5	109
	1.5 M	1	108
		3	109
		5	109
		0.75	1
NaOH (1M 5h) + Si	1.5	3	96
		1	95
	3	3	102
		1	97
	1	3	96
		-	102
Maleik Anhidrid (MA)	3	-	100
	5	-	95
	7	-	92
	1	-	97
NaOH (1M 5h) + MA	3	-	97
	5	-	100
	7	-	95

Lif / matris ara yüzey tutunma durumunu iyileştirici yöntemlerin kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesinden ardından ısı özellikleri üzerine etkilerini irdellemek için DSC analizleri de gerçekleştirilmiştir. Kompozit numunelerin erime sıcaklıkları  $T_m$ , erime ısıları  $H_m$  ve kristallik yüzedeleri  $X_c$  gibi ısı özellikleri analiz sonrasında belirlenmiştir.

Analizi gerçekleştirilen malzemelerin kristal yüzdesinin hesaplanmasında Mathew ve arkadaşlarının (2006) formülü kullanılmaktadır. [118]:

$$\%Kristallik = \frac{\Delta H}{\Delta H_m} \times \frac{100}{W} \quad (5.1)$$

Formüldeki  $\Delta H$  saf DYPE matrisin erime ısını temsil etmektedir ve diğer kaynaklarda da belirtildiği gibi erime eğrisinin altında kalan alan ile hesaplanmaktadır [119-121]. Diğer yandan  $\Delta H_m$  %100 kristalin DYPE matrisin erimesi için harcanan ısı miktarı ve  $W$  ise kompozit malzemedeki hacimsel olarak PE miktarının temsil etmektedir. Wunderlich'e (1990) göre  $\Delta H_m$  için uygun değer 293 J/g olduğu görülmektedir ve hesaplamalarda da bu değer kullanılmıştır [122].

**Çizelge 5.3 :** Saf DYPE ve kompozit numunelere ait ısı analiz sonuçları.

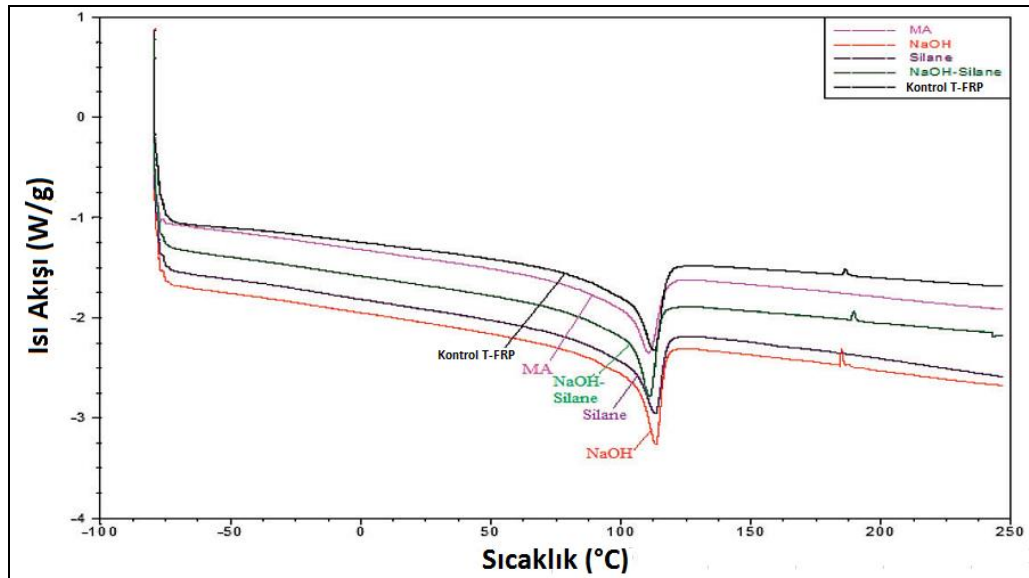
Numune	$T_m$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$X_c$ (%)	$T_c$ (°C)
DYPE	115,48	73,3	25,02	93,76
Kontrol	111,6	87,6	39,8	94,8
Alkali uygulanmış	113,4	68,5	31,2	94,3
Maleik Anhidrit uygulanmış	113,8	67,2	35,3	94,6
Silan uygulanmış	113,2	62,7	28,5	94,5
Alkali-silan uygulanmış	110,1	68,7	31,3	96,6

Şekil 5.18 ve çizelge 5.3'te herhangi bir işlemten geçmeyen kontrol kompozitin ve farklı ara yüzey iyileştirme çalışmasına sahip kompozitlere ait ısı analiz sonuçlarını göstermektedir. Buna göre eğriler tüm kompozit numuneler için erime sıcaklığını göstermek amacıyla tek bir geniş endotermik tepe göstermişlerdir. Erime sıcaklığını gösteren tepelerin numuneden numuneye değişmediği de söylenebilmektedir. Ayrıca çizelge 5.3'de sunulan DSC sonuçlarına göre, tüm kompozit numuneler saf DYPE matris numunelerine göre az da olsa farklılık göstermiştir. Ayrıca saf DYE matrisin



içerisini pamuk lifi katarak kompozit oluşturmanın kristalleşme sıcaklığı  $T_c$  ve DYPE matrisin kristallik derecesi  $X_c$  değerlerinde değişime neden olduğu söylenebilir. Kompozit oluşturarak DYPE matrisin kristallik değerleri %25'den %40'a kadar arttığı görülmüştür. Bu durumun sebebi olarak selülozik liflerin DYPE matris yapısı içerisinde çekirdeklenme ajanı (nucleating agent) olarak davranarak kristalleşmeyi kolaylaştırması ve kristalleşmenin daha erken başlaması gösterilebilir [123].

Diğer taraftan lif / matris ara yüzey iyileştirme uygulamalarının DYPE matrisin  $H_m$  erime ısısı değerlerini de düşürdüğü yapılan DSC analizleri sonucunda anlaşılmıştır. Bu durum temel sebebi olarak matris ile lif arasındaki fiziksel bağın artmasıyla matristen life ısı geçişinin hızlanması olarak gösterilmiştir. Araujo ve arkadaşlarının konu üzerine yayınladığı bir çalışmaya göre kompozitlerin  $H_m$  değerleri saf DYPE matrisin  $H_m$  değerini %80 altında kalması durumunda liflerin polimer matrisle kristallik derecesini düşürerek etkileşime girdikleri açıklanmıştır [124]. Dolayısıyla lif ve matris arasındaki etkileşimin artmasının polimer matrisin kristallik derecesini düşürmeye neden olduğu söylenebilir. DSC sonuçlarına göre kontrol kompozit numunelerin erime ısısı değeri 87 J/g iken iyileştirme yöntemlerinin uygulandığı kompozit numunelerde ise bu değer 68 J/g olarak ölçülmüştür. Bu sonuç iyileştirilmiş kompozitlerin şekillendirilmesi için gerekli ısı enerjisinin, iyileştirme öncesine göre %20 daha düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.18 : Kompozitlere ait DSC grafikleri.

## 5.6 Atık Polimer Matris Kullanımı

Doğal lif takviyeli kompozitlerin lif / matris ara yüzeyi iyileştirme çalışmaları için yapılan geniş kapsamlı literatür çalışmaları neticesinde bazı durumlarda atık polimer matris kullanımının da bağlayıcı ajan katkısının etkinliğini arttırabildiği görülmüştür. Doktora tezinin amacına uygunluğu nedeniyle kompozit malzemeyi hem atık liflerden hem de atık polimerden oluşturma fikri uygulanmıştır. Doktora tezinin bu bölümünde atık polimer matris kullanımının mekanik dayanım etkileri irdelenmiştir.

### 5.6.1 Malzeme ve yöntem

Ağırlıkça %10, %20, %30 oranında üç farklı atık pamuk kumaş takviyeli kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde lif / matris ara yüze tutunma durumunu arttırmak amacıyla daha önceki sonuçların ışığında ağırlıkça %5 maleik anhidrit bağlayıcı ajanı kullanılmıştır. Üretilen malzemeler, çizelge 5.4'te gösterilmiştir. Çizelgeye göre kompozit numunlere belli kodlamalar yapılmıştır. Kodlamadaki ilk rakam ağırlıkça pamuk lifi miktarını, ortadaki rakam ağırlıkça atık DYPE miktarını, sondaki rakam ise ağırlıkça orijinal DYPE miktarını göstermektedir. Örneğin 10/30/55 kodlamalı kompozitte ağırlıkça %10 pamuk lifi, %30 atık DYPE matris, %55 oranında ise orijinal DYPE matris ve ayrıca %5 maleik anhidrit katkısı içermektedir. Çizelgede gösterilen tüm oranlar ağırlıkça oranlar olarak gösterilmiştir.

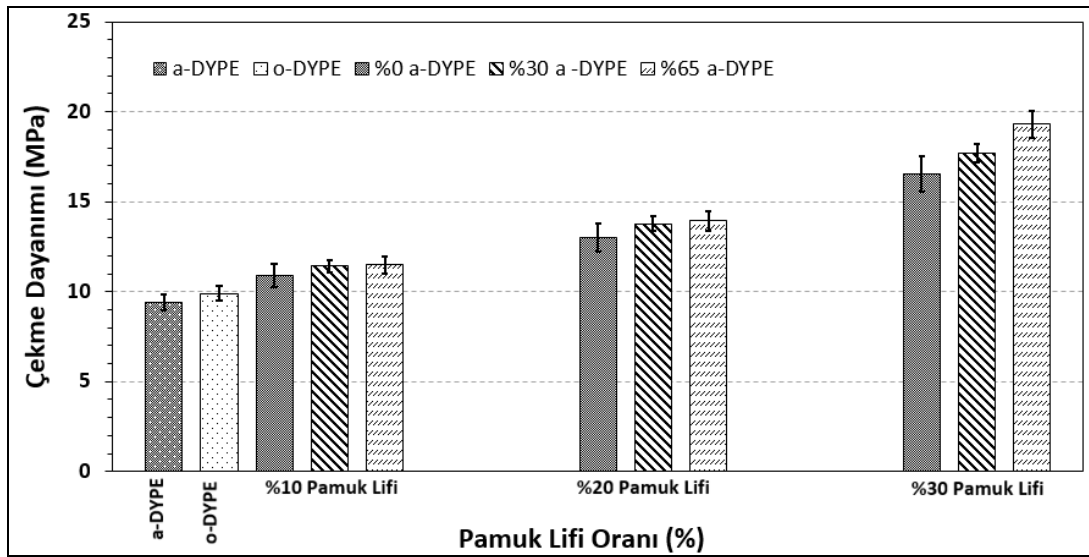
**Çizelge 5.4 :** Çalışma kapsamında incelenen numuneler ve içerikleri.

Malzeme (Kodlama)	Pamuk Lifi (%)	Atık DYPE (a-DYPE) (%)	Orjinal DYPE (o-DYPE) (%)
0/0/100	0	0	100
0/100/0	0	100	0
10/0/85	10	0	85
20/0/75	20	0	75
30/0/65	30	0	65
10/30/55	10	30	55
20/30/45	20	30	45
30/30/35	30	30	35
10/65/20	10	65	20
20/65/10	20	65	10
30/65/0	30	65	0

## 5.6.2 Sonuçlar ve yorumlar

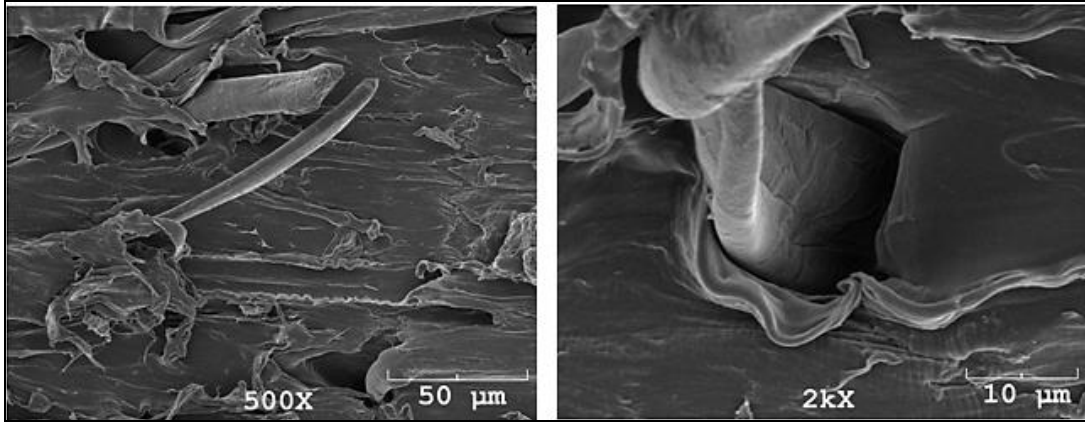
Şekil 5.19' da kompozitteki pamuk lifi ve geri dönüşümlü alçak yoğunluklu polietilen oranına göre çekme dayanımındaki gelişimi görülmektedir. Karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla saf orjinal DYPE (o-DYPE) ve geri dönüşümlü atık-DYPE (a-DYPE) malzemelerinin de dayanım değerleri grafiğin soldaki 2 sütununda verilmiştir. Böylelikle geri dönüşümün DYPE matris üzerine dayanım açısından etkisi gözlenebilmektedir. Diğer sütunlarda %0, %30 ve %65 oranında atık DYPE matris ve %5 oranında maleik anhidrit içeren kompozit malzemelerin çekme dayanım değerleri görülmektedir. Bu sayede atık DYPE matris oranının çekme dayanımı üzerine etkisi irdelenebilmiştir.

Şekil 5.19' daki grafiklere göre kompozit malzemedeki atık DYPE matris oranı ve pamuk lifi miktarının artışıyla dayanım değerleri buna paralel olarak arttığı görülmektedir. Matris malzemesi olarak DYPE'nin geri dönüşümüyle 9.91 MPa olan çekme dayanımı yaklaşık olarak 9.45 MPa dayanım değerine kadar düşmüştür. Buna neden olarak çevresel şartların malzeme üzerine etkisi ve ısıl bozulmalar olduğu düşünülmektedir. %10 pamuk lifi, %5 maleik katkısı ve %85 o-DYPE ile oluşan kompozit (10/0/85) ile çekme dayanımı 10.90 MPa değerine ulaşmıştır. Atık DYPE matris içermeyen ve %5 katkı ilaveli kompozit malzemelerin çekme dayanım değerleri yapıda lif oranının artmasıyla beraber artmış ve 16.54 MPa değerine ulaşmıştır (Şekil 5.19).



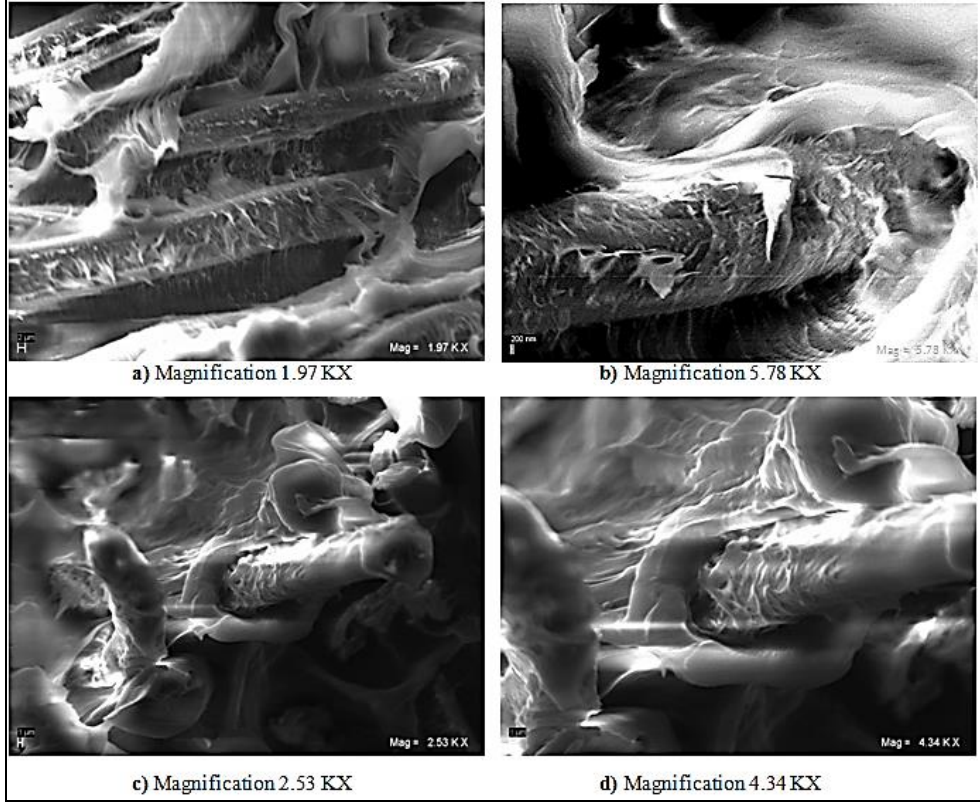
Şekil 5.19 : Saf o-DYPE, a-DYPE ve Kompozitlerin çekme dayanımındaki değişimi.

Pamuk lifinin artışıyla çekme dayanımının artması 2 nedene bağlanabilmektedir. Bunlardan biri pamuk lifi çekme dayanımının DYPE matris malzemesine göre daha yüksek olması ve dolayısıyla kompozit malzemeler için geçerli olan "karışım kuralı" gereği dayanımın yükselmesidir. İkinci bir neden ise katkı olarak katılan "maleik anhidrit" malzemesinin artan kumaş oranıyla daha etkin olması ve lif matris arayüzey tutunma olasılığını arttırmasıdır (Şekil 5.21). Şekil 5.20’de Maleik Anhidrit arayüzey bağlayıcı ajanı yokken lif / matris arayüzey durumu görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere lif / matris arayüzeyi oldukça pürüzsüz ve herhangi bir tutunma izine rastlanmamaktadır. Bu durum ise pamuk lifinin sadece karmaşık yapısından dolayı kompozitte sınırlı bir dayanım artışına neden olmaktadır.



**Şekil 5.20 :** Maleik anhidrit bağlayıcı ajan kullanılmadan üretilen kompozit malzemenin arayüzey bağlanma durumu.

Diğer yandan maleik anhidrit bağlayıcı elemanın katılmasıyla matris malzemesinin lif yüzeyine bağlanması / tutunması çok daha rahat olduğu ve lifin yüzeyine dolandığı yapılan SEM analizleri sonucu saptanmıştır (Şekil 5.21). Lif yüzeyine tutunabilen matris, yükü daha rahat pamuk lifine aktarabilmektedir. Böylelikle kompozit yapıda hasar meydana gelmeden daha yüksek yüklere dayanabilmektedir.

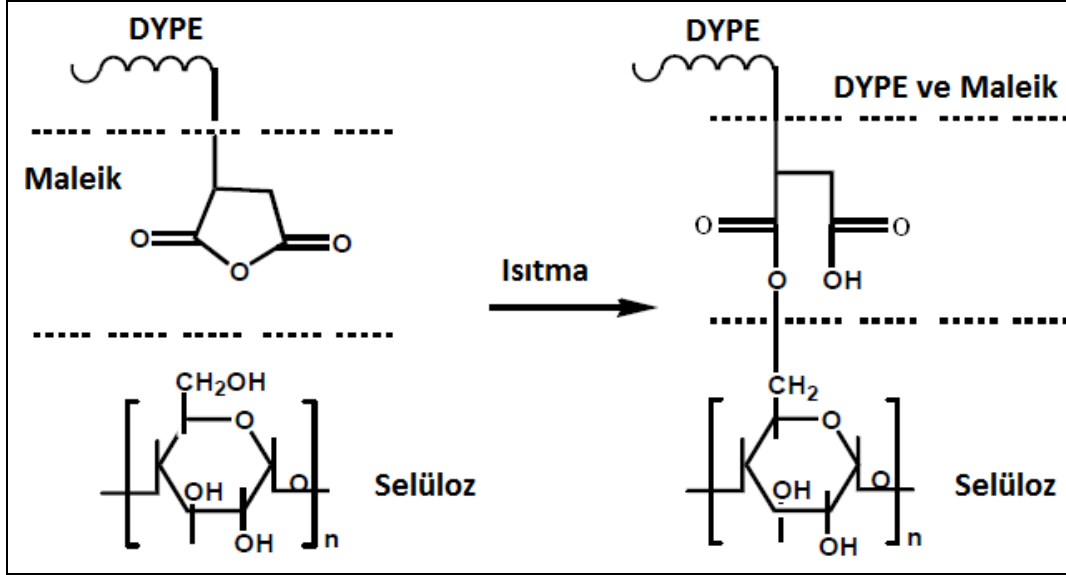


**Şekil 5.21 :** Matris ve lif arasındaki arayüzey bağlanma durumu a) 1970X b) 5780 X c) 2530X d) 4340 X.

Öte yandan şekil 5.19'dan anlaşılacağı üzere atık DYPE oranının artması kompozit malzemenin çekme dayanımı üzerine olumlu bir etki bırakmıştır. Atık matris ilavesinin kompozitin çekme dayanımını artırması şaşırtıcı bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Konuyla ilgili literatür çalışması sonucu bu durumun olağan olduğu anlaşılmıştır. Benzer çalışmalar incelendiğinde FTIR kimyasal analizinden faydalanılarak kompozit yapıdaki dayanımı arttıracak olası bileşenler araştırılmıştır. Bu yüzden çalışma kapsamında atık DYPE matrisin incelenmek amacıyla FTIR analizi yapılmıştır.

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi günümüzde bilim insanları için en önemli analitik tekniklerden biridir. Kızılötesi spektroskopisinin en büyük avantajı her durumdaki bütün örneklerin analiz edilebilmesidir. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi de birçok kızılötesi spektroskopisi örneklerini kolaylaştırmaktadır. Kızılötesi spektrumun kalitesini önemli ölçüde arttırmakta ve veri elde etme süresini minimuma indirmektedir. Ayrıca fourier dönüşümlü kızılötesi spektrumu araştırmacılara süper moleküler yapı hakkında bilgi sağlayabilmektedir. FTIR ayrıca doğal liflerin ve modifiye edilmiş doğal liflerin kimyasal bileşimini belirleme de kullanılabilir [125].

FTIR genellikle aşılama, birbirine bağlanma, merserizasyon gibi birçok kimyasal işlem görmüş doğal lifleri karakterize etmek için kullanılmaktadır. Bu spektroskopik metot ayrıca liflerin yüzey ve arayüzey karakterizasyonu için etkili bir tekniktir. Bu da selüloz ve diğer bileşenler arasındaki yapışmanın daha iyi yorumlanmasına olanak sağlamaktadır [125].

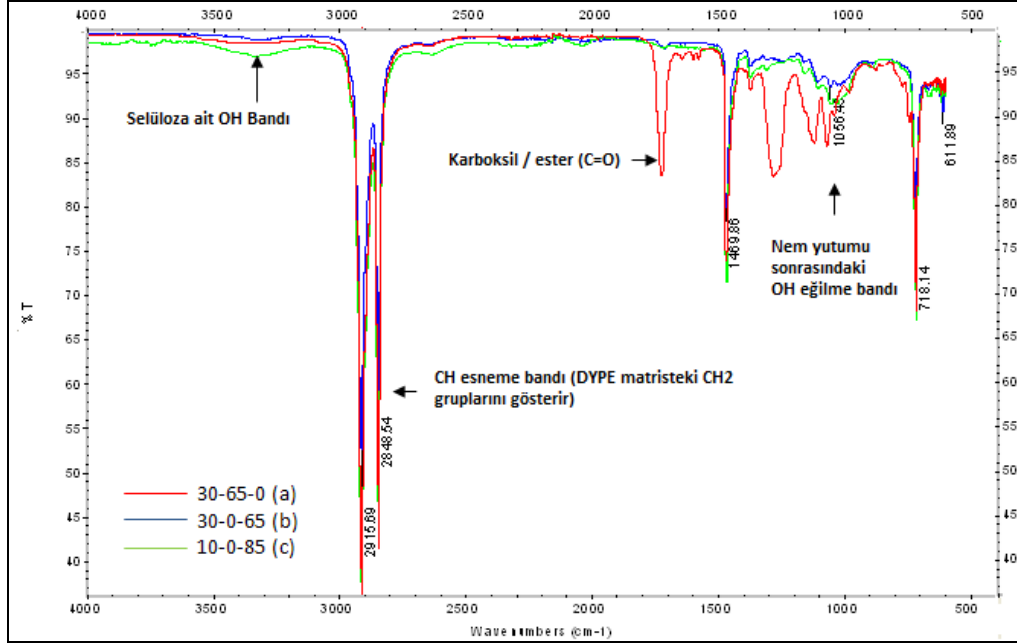


**Şekil 5.22** : Selüloz ve maleik anhidrit düşük yoğunluklu polietilenin esterifikasyon reaksiyonu [126].

FTIR analizleri sonucunda geri dönüşüm işlemiyle beraber matris ile lif arasındaki uyumu daha çok arttıran bileşenlerin ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bu bileşenler geri dönüşümlü düşük yoğunluklu polietilenle pamuk lifinin uyumluluğunu geliştirdiği değerlendirilebilir. Bu durumun bir sonucu olarak en yüksek çekme mukavemeti %65 geri dönüşümlü polietilen matrise %30 pamuk lifi ile yüklenen kompozit malzemede (30/65/0) elde edilmiştir. Geri dönüşümlü düşük yoğunluklu polietilen ile oluşturulan kompozit malzemelerin çekme mukavemetleri saf düşük yoğunluklu polietilen matris ile yapılan kompozit malzemeler ile karşılaştırıldığında %20 artmıştır. Sonuç olarak ağırlıkça %5 maleik anhidrit-düşük yoğunluklu polietilen katkılı geri dönüşümlü düşük yoğunluklu polietilen matris ile yapılan kompozit malzemelerin çekme dayanımı 19.3MPa'a yükselmiştir ki bu saf düşük yoğunluklu polietilenin çekme dayanımından yaklaşık iki kat daha fazladır.

Maleik anhidritin düşük yoğunluklu polietilenin uyumlaştırıcı olarak kompozit üretiminde kullanımının iki nedeni vardır. Bunlardan birincisi, Şekil 5.22'de görüldüğü gibi anhidrit gruplarının selülözdeki hidroksil grupları ile ester bağı

oluşturabilme yeteneğine sahip olması ve hidrolize olmuş maleik anhidritteki karboksil gruplarının ve selülözdeki hidroksil gruplarının birbirleri ile hidrojen bağı oluşturma yeteneğine sahip olmasıdır. İkincisi ise maleik anhidrite aşılınmış polietilen zincirleri ve polietilen matrisin birbiri ile iyi uyumluluğu sağıp olmasıdır [126].

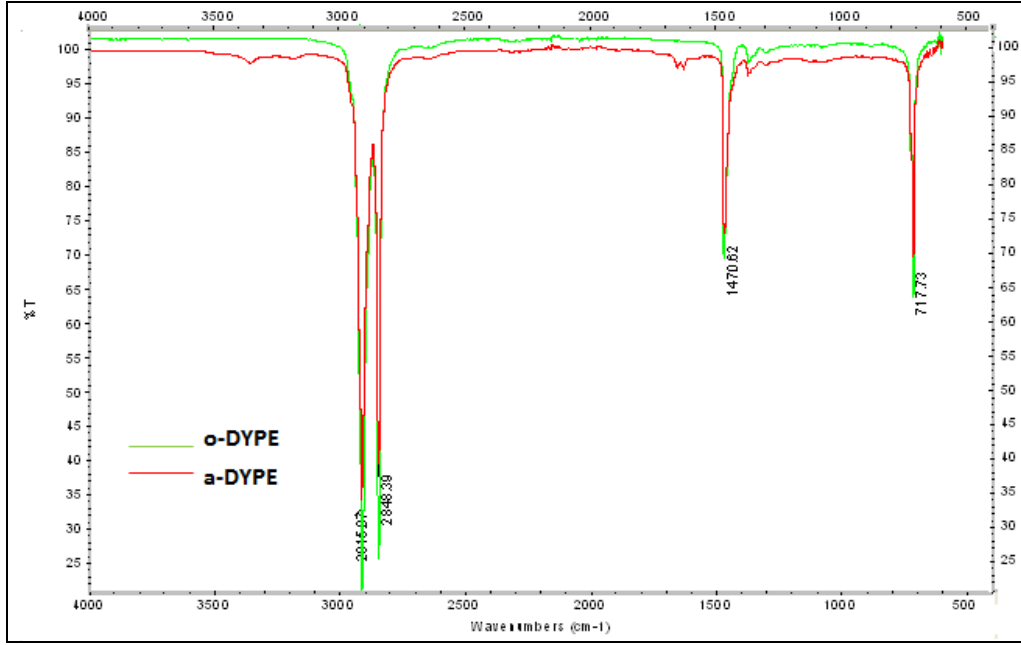


**Şekil 5.23** : FTIR: (a) 30/65/0; (b) 30/0/65; (c) 10/0/85.

Şekil 5.23’de görüldüğü gibi,  $1724.79\text{cm}^{-1}$ ’deki tepede maleik anhidrit ve lif arasındaki esterleşme reaksiyonu sonucunda oluşan C=O bağına belirtir. Çok fazla hidroksil grubuna sahip olan selülöz molekülü ester bağı oluşturmak için maleik anhidrit bağlayıcı ajanı ile reaksiyona girer. Bu tepe sadece %65 geridönüşümlü düşük yoğunluklu polietilen ile yapılmış olan 30/65/0 örneğinde görülüyor. Ayrıca bu tepe esterifikasyon reaksiyonunu geridönüşümlü düşük yoğunluklu polietilen ile yapılan kompozit malzemedeki saf düşük yoğunluklu polietilen ile yapılan kompozit malzemedeki daha etkilidir. Bu sonuç da lifle matris arasındaki iyi bir uyumluluk sağlandığını göstermektedir.  $1469.86\text{cm}^{-1}$  ve  $717.73\text{cm}^{-1}$ ’deki tepeler ise CH<sub>2</sub> eğilme tepeleri olabilir.

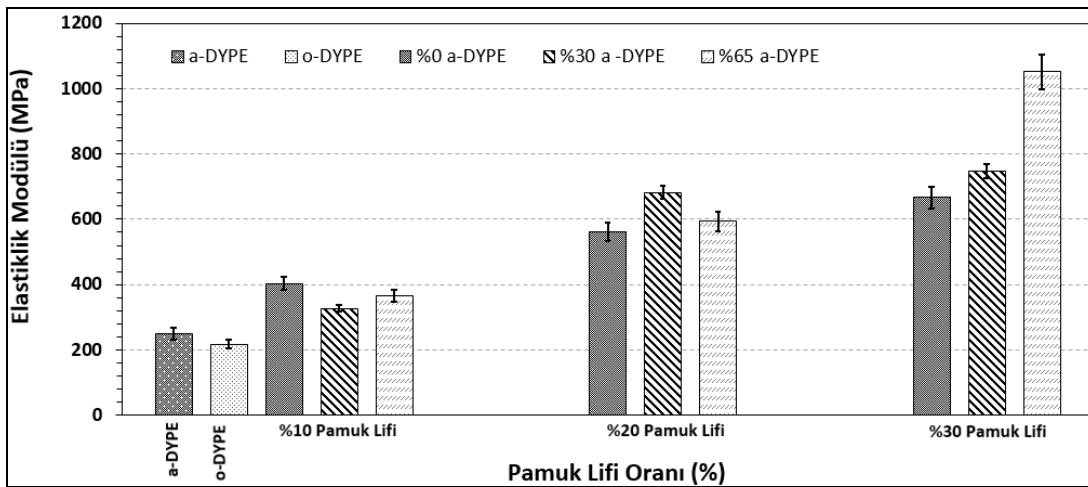
Şekil 5.24’teki FTIR spektrumunda görüldüğü gibi polietilenin OH gerilme pikleri polietilenin yapısından dolayı gözlemlenmemiştir.  $1470\text{cm}^{-1}$ ’de gözükten CH<sub>2</sub> grupları sadece saf ve geridönüşümlü polietilenin yapısında bulunmaktadır. Bu yüzden nem absorpsiyonu yeteneğine sahip değildir. Selülöz yapısındaki fazla hidroksil gruplarından dolayı OH gerilme tepeleri kompozitin spektrumunda

gözlemlenebilir. Pamuk lifinin çok hidrofilik ve kompozitlerin nemi absorpladığı görülür. Saf düşük yoğunluklu polietilenden farklı olarak geri dönüşümlü polietilenin FTIR spektrumu  $1600-1700\text{cm}^{-1}$ 'de karbonil grupları ve çift bağlardan dolayı tepeler göstermektedir [127].



Şekil 5.24 : Saf ve geri dönüşümlü düşük yoğunluklu polietilenin FTIR analizi.

Ayrıca  $3200-3400\text{cm}^{-1}$ 'deki tepeler esterifikasyon reaksiyonundan dolayı selülözdeki kaybolan OH bağlarını göstermektedir.  $2915.69\text{ cm}^{-1}$  ve  $2848.54\text{ cm}^{-1}$ 'deki tepeler CH gerilme tepeleridir. Düşük yoğunluklu polietilendeki  $\text{CH}_2$  gruplarını göstermektedir (Şekil 5.24).

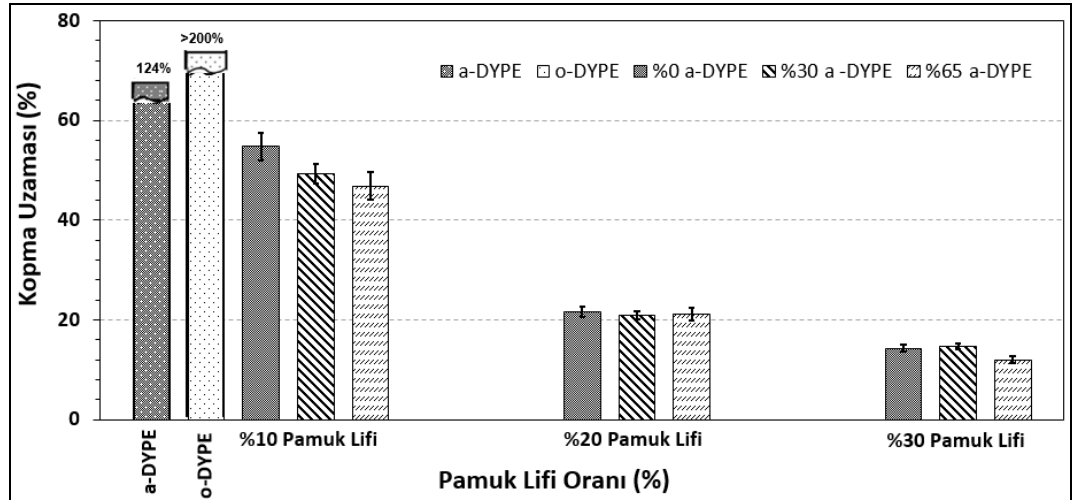


Şekil 5.25 : Kompozit ve saf DYPE matrislerin elastiklik modülü değişimleri.

Atık matris ve pamuk lifi oranının kompozit malzemenin çekme dayanımındaki etkileri irdelendikten sonra çekme testi ile elde edilen, malzemenin rijitliğini ve



küçük şekil değişimlerdeki dayanım değerini ifade eden elastiklik modülündeki değişimleri şekil 5.25'de görülebilmektedir. Beklenildiği gibi geri dönüşüm işleminin matris malzemesinin elastiklik modülünü zincirlerin çapraz bağ oluşturması neticesinde 218 MPa değerinden 249 MPa değerine yükselttiği soldaki 2 sütundan görülebilmektedir. Pamuk lif oranının kompozit malzemenin elastiklik modülü üzerine etkisinin çekme dayanımı üzerine etkisine benzer olduğu ve lif oranıyla beraber elastiklik modülü değerlerinde de artış sağlandığı gözlenmiştir. Bu artış neticesinde atık DYPE matris içermeyen kompozit malzemede (30/0/65) %30 pamuk lifi ile en fazla 667 MPa değerine ulaşılmıştır. Şekil 5.25'den anlaşılacağı üzere elastiklik modülü atık DYPE matris oranıyla beraber artarak %30 atık matris (30/30/35) ile 747 MPa ve %65 atık matris, yani tamamen atık matristen oluşan kompozitte (30/65/0) 1051 MPa değerine ulaşarak kayda değer bir gelişme göstermiştir. Sonuç olarak bakıldığında 30/0/65 ile 30/65/0 kompozitlerin sonuçları karşılaştırılırsa orjinal matris yerine atık matris kullanmak, maliyette önemli derecede azalmalara neden olacağı gibi elastiklik modülü için %58 daha yüksek bir dayanım değerine ulaşılmasını mümkün kılacaktır.



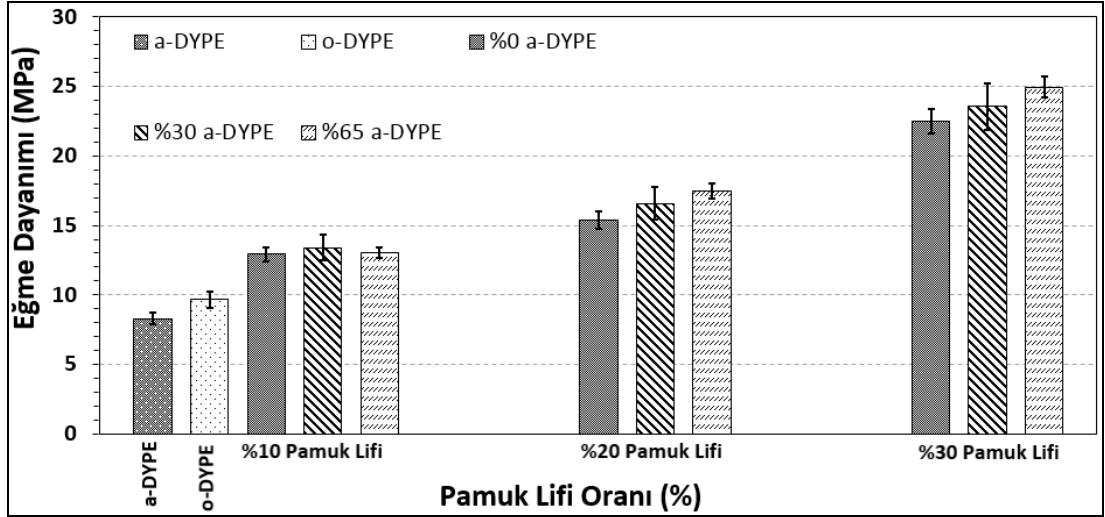
Şekil 5.26 : Kompozit ve saf DYPE matrislerin kopma uzaması değişimleri.

Çekme testi sonuçlarından elde edilen malzeme özelliklerinden bir tanesi de malzemenin yükte hasara uğramadan göstermiş olduğu uzama miktarıdır. Şekil 5.26'da her malzeme çeşidi, saf matris ve kompozit malzemeler için kopma uzama değerlerinin lif ve atık matris oranına göre değişim grafikleri verilmiştir. Saf orjinal DYPE matrisin kopma uzaması çekme makinasının strok mesafesini aşarak %200 birim uzama değerini geçmiştir. Geri dönüşüm işlemiyle beraber ortaya çıkan ısıl-mekanik bozunma sonucu polimer zincir bağlarının kopmasıyla kopma uzaması

değerlerinde düşüş görülmüştür. Bu durumda matris malzemesi DYPE daha gevrek bir malzemeye dönüşmüştür. Gerçekleştirilen çekme testleri sonucu atık DYPE matrisin kopma uzaması yaklaşık %124 olarak ölçülmüştür. Beklenildiği gibi çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerlerindeki değişimlerin aksine kopma uzaması grafikleri lif miktarına ve atık matris oranına bağlı olarak daha farklı bir eğilim göstermiştir. Orjinal matrisli kompozit malzemelerin (10/0/85, 20/0/75, 30/0/65) kopma uzaması değerlerine bakıldığında %10 pamuk lifi ilavesiyle beraber orjinal DYPE matrisli kompozit malzemenin kopma uzaması ani bir düşüşle %54 olurken pamuk lifinin %30 a kadar çıkması kopma uzaması değerinin yaklaşık %75 değer kaybetmesiyle %14 e kadar düşmesine neden olduğu görülmektedir. Buna ilave olarak atık DYPE matris kullanımının kopma uzaması değerlerini daha da kötüleştirdiği şekil 5.24'deki grafiklerden anlaşılabilir. %65 oranında atık matris içeren kompozit malzemelerin kopma uzaması değeri en düşük %30 pamuk lifi içeren kompozitte %12 olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak atık DYPE matris ve pamuk lifinin artışı kompozitlerin çekme dayanımında orjinal saf DYPE'ye göre %95, elastiklik modülünde ise %380 artış, kopma uzamasında ise beklendiği gibi çok yüksek bir düşüş gözlenmiştir.

Atık (geri dönüşüm) LDPE matris (a-LDPE) oranın kompozit malzemelerin çekme özelliklerinin yanısıra eğme özelliklerinin irdelenmesi açısından “3 nokta eğme testi” uygulanmıştır. Kumaş ve atık DYPE matris oranına göre elde edilen test sonuçları şekil 5.27'de verilmiştir. Sonuçlar, kompozit malzemenin eğme dayanımı değişimi çekme dayanımındaki değişime paralel olduğunu göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere saf atık DYPE matrisin eğme dayanımı (8.29 MPa) orijinal saf LDPE matrisin (o-DYPE) eğme dayanımından (9.66 MPa) düşük olmasına rağmen kompozit malzemenin eğme dayanımı atık polimer matrisin kompozit yapıdaki oranını arttıkça arttığı ve %65 atık DYPE oranıyla en yüksek seviyeye ulaştığı görülmüştür. Bunun yanısıra çekme dayanımındaki değişimde de görüldüğü gibi pamuk lif oranının artışı da malzemenin eğme dayanımındaki iyileşmeyi sağlayan bir diğer neden olarak görülmektedir. (Şekil 5.27). Pamuk lifinin oranının artışı ile kompozit malzemeye ağırlıkça %5 oranında eklenen “Maleik Anhidrid” katkısının çok daha etkin olması sağlanmıştır.

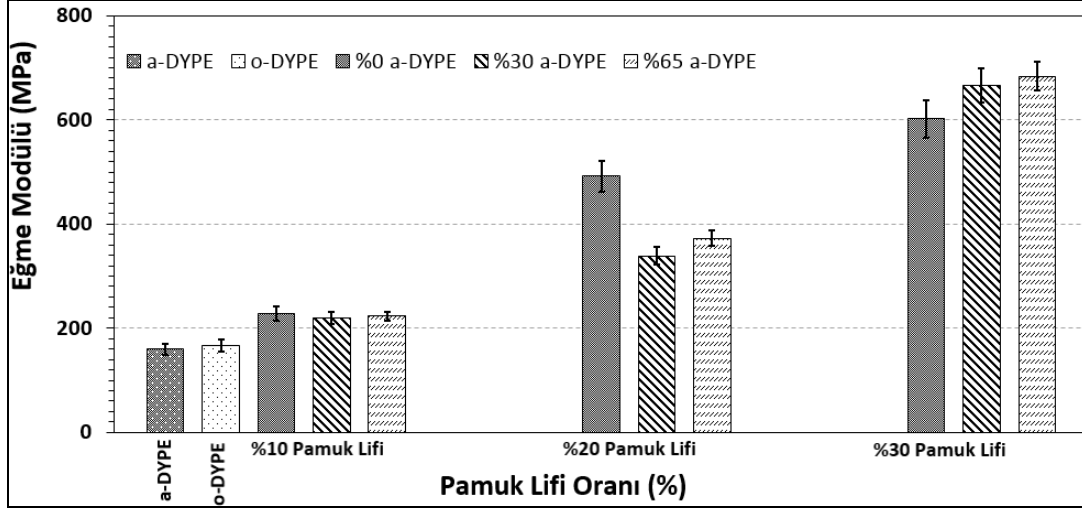


Şekil 5.27 : Kompozit ve saf DYPE matrislerin eğme dayanımı değişim grafikleri.

Şekil 5.27'ye bakıldığında %10 pamuk lifi içeren kompozit malzemelerin eğme dayanımları birbirine çok yakın değerler olup, atık matris oranına göre dayanım değerindeki değişimin sınırlı olduğu görülmektedir. Öte yandan %20 ve %30 pamuk lifi içeren kompozitlerde atık matris oranının dayanım değeri üzerine etkisi daha belirgin olmuştur. Grafiğe göre ağırlıkça %30 pamuk lifi ve %65 atık DYPE (a-DYPE) içeren kompozit yapının ortalama olarak 24.97 MPa eğme dayanımıyla diğer kompozit yapılar arasında en yüksek eğme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen 24.97 MPa lık eğme dayanımı saf orijinal DYPE (o-DYPE) matrisin eğme dayanımının yaklaşık olarak 2 katına karşılık gelmektedir. Böylelikle atık matris kullanımı çekme dayanımında olduğu gibi eğme dayanım değerlerinde de olumlu bir etki yaratmıştır.

Eğme testinde elde edilen bir diğer sonuç ise kompozit malzemenin eğme modülü değerleridir (Şekil 5.28). Şekil 5.28'e göre eğme testi sonuçları pamuk lifinin saf polimer matrise katılmasıyla beraber matris rijitliğinin arttığı ve dolayısıyla eğme modülünün de lif miktarıyla doğru orantılı bir şekilde iyileştiği görülmektedir.

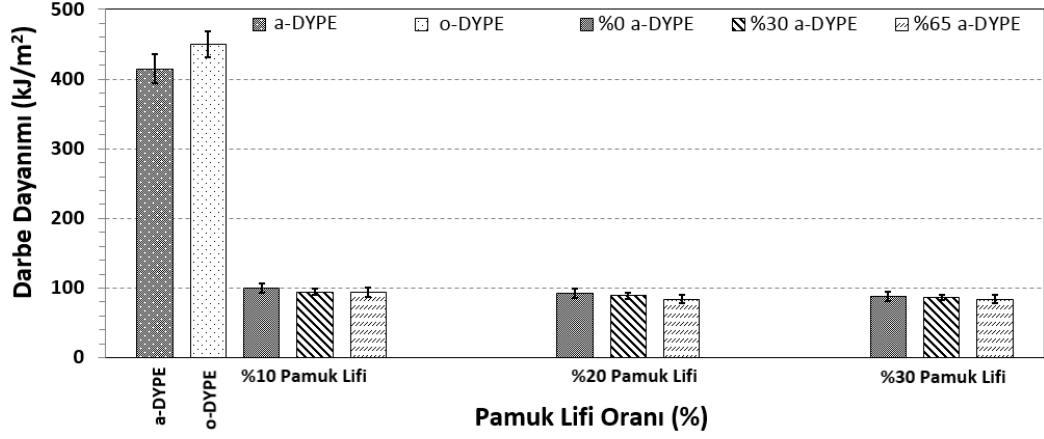
% 10 pamuk lifi içeren kompozit yapılarda her atık matris içeriği için yaklaşık 220 MPa civarında eğme modülü değerleri okunurken ağırlıkça %20 pamuk lifi içeren kompozitlerde yaklaşık 400 – 500 MPa eğme modülü ve %30 pamuk lifinden oluşan kompozit yapılarda ise 650-700 MPa lık eğme modülü değerleri bulunmuştur.



Şekil 5.28 : Kompozit ve saf DYPE matrislerin eğme modülündeki değişim grafikleri.

Yapılan testler sonucunda her iki matris (a-DYPE ve o-DYPE) için 180 MPa civarında olan eğme modülü değeri yaklaşık %300 lük bir artışla 700 MPa değerine % 30 pamuk lifi katkısıyla ulaşabilmektedir. Ayrıca eğme modülü değerleri sabit matris içeriğinde neredeyse hiç değişmediği gözlenebilmektedir. Eğme modülündeki iyileşmenin nedeni olarak pamuk lifinin matrise göre eğme özelliklerinin daha iyi olması ve lif matris ara yüzey durumunun %5 bağlayıcı ajan katkısıyla iyileştirilmesi gibi sebeplerle açıklanabilmektedir.

Kompozit malzemelerin eğme ve çekme dayanımlarındaki değişimine ek olarak malzemelerin ani yüklemeler karşısındaki davranışını incelemek için darbe özelliklerindeki değişim de irdelenmiştir. V-çentik açılmış darbe numunesi kullanılarak testler yapılmıştır. Darbe testile elde edilen sonuçlara göre beklenildiği gibi saf DYPE matrisin geri dönüşümle beraber polimer moleküllerinde görülen mekanik ve ısıl bozunmalar neticesinde daha gevrek hale geldiği ve 450 kJ/ m<sup>2</sup> (o-DYPE) darbe dayanım değerinden 415 kJ/ m<sup>2</sup> (a-DYPE) değerine düştüğü gözlenmektedir (Şekil 5.29). Bu sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir [128]. Pamuk lifi oranının kompozit malzeme içerisinde artışıyla beraber darbe dayanım değerlerinin doğrusal olarak düştüğü görülebilmektedir.



Şekil 5.29 : Kompozit ve saf DYPE matrislerin darbe dayanımlarındaki değişim grafikleri.

Saf DYPE ye göre kompozit malzemelerde görülen düşük darbe dayanımları genel olarak şu iki nedenden kaynaklandığı düşünülmektedir;

- 1) Pamuk lifinin artışıyla beraber lif matris ayrışma olasılığının artışı,
- 2) Pamuk liflerinin gevrek yapısı.

Pamuk liflerinin artışıyla beraber matris ile tam olarak bağdaşmayan pamuk lifleri kendi aralarında temas halinde olması kompozit yapının ani yüklemeler karşısında kırılğan pamuk liflerinden dolayı daha gevrek davranmasına neden olmaktadır. Bu yüzden pamuk lifi ne kadar fazla olursa matris ile çevrili olamayan pamuk liflerinin kompozitte olma olasılığı artmaktadır. Bu durum da yapıyı daha gevrekleştirmektedir. Diğer bir neden ise pamuk lifinin matris malzemesi olan DYPE ye göre daha gevrek olması ve “karışım kuralı” neticesinde kompozit yapının daha gevrek davranmasına neden olmaktadır. Ayrıca saf DYPE malzemenin darbe dayanımı geri dönüşümle beraber azaldığı görülmektedir. Saf orjinal DYPE nin darbe dayanımı 450 kJ/m<sup>2</sup> iken geri dönüşümlü saf DYPE nin darbe dayanımı ise 420 kJ/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Çevresel şartlar (UV, nem, sıcaklık değişimi vs) neticesinde saf DYPE malzemenin moleküler yapısında görülen mekanik ve ısı bozulmaların malzemeyi daha gevrekleştirdiği düşünülmektedir.

Genel olarak çalışmanın bu aşamasına kadar kompozit ve saf matris elemanları üzerine yapılan çekme, eğme ve darbe testleri sonrasındaki mekanik dayanım sonuçları ve standart sapma değerleri çizelge 5.5’te verilmiştir.

**Çizelge 5.5 : Kompozit ve saf DYPE malzemenin mekanik dayanım sonuçları**

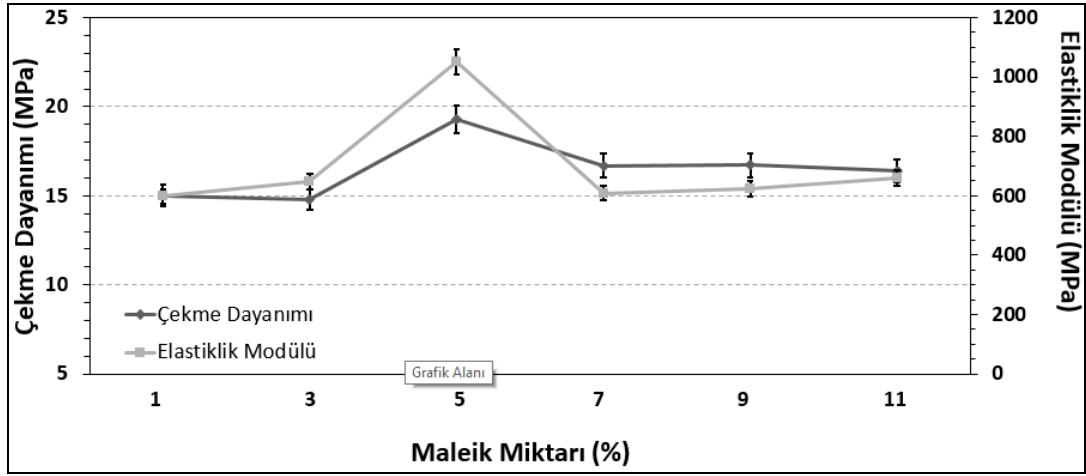
Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastiklik Modülü (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Eğme Dayanımı (MPa)	Eğme Modülü (MPa)	Darbe Dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )
0/100/0	<b>9,45 ±0,51</b>	249,40 ±11,15	124,15 ±11,94	8,29 ±0,26	159,70 ±1,93	415 ±8,95
0/0/100	9,91 ±0,29	218 ±25,42	<b>&gt;200</b>	9,66 ±0,43	165,70 ±21,54	450 ±5,34
10/0/85	10,9 ±0,09	403,07 ±49,78	54,80 ±2,35	12,92 ±0,94	228,96 ±8,51	99,51 ±7,89
20/0/75	13,01 ±0,37	560,29 ±73,96	21,60 ±5,80	15,38 ±0,51	491,61 ±29,59	92,56 ±4,97
30/0/65	16,54 ±0,25	666,79 ±32,47	14,33 ±1,32	22,50 ±0,23	602,11 ±22,75	87,97 ±3,84
10/30/55	11,42 ±0,32	326,09 ±24,72	49,29 ±3,49	13,41 ±0,24	219,72 ±29,17	94,21 ±2,00
20/30/45	13,78 ±0,37	681,89 ±89,84	20,97 ±0,87	16,58 ±0,31	338,37 ±10,69	88,77 ±5,36
30/30/35	17,71 ±0,80	747,91 ±104,71	14,69 ±2,90	23,56 ±0,71	666,34 ±34,84	86,37 ±6,99
10/65/20	11,48 ±0,23	365,74 ±42,72	46,85 ±7,63	13,06 ±0,61	223,23 ±21,29	94,59 ±1,27
20/65/10	13,94 ±0,47	594,20 ±74,57	25,20 ±5,30	17,48 ±0,68	373,06 ±31,01	<b>83,75 ±4,07</b>
<b>30/65/0</b>	<b>19,30 ±0,50</b>	<b>1051 ±127,05</b>	<b>12,13 ±1,46</b>	<b>24,97 ±1,03</b>	<b>683,66 ±51,82</b>	84,16 ±5,79

Çalışmanın ikinci aşamasındaki hedef ise önceki deneyimlere göre ağırlıkça %5 katılan “Maleik Anhidrid” katkısının atık polietilen matris kullanıldığında kompozit yapıdaki ideal miktarını belirlemek olmuştur.

Bu çalışmada % 5 maleik anhidrid katkısının yanında % 1, 3, 7, 9 ve 11 oranlarında katkı içeren atık DYPE matrisli kompozitlerin çekme özellikleri incelenmiştir. Kompozit malzeme içerisindeki atık kumaş oranı önceki çalışmada en iyi özellikleri gösteren %30 pamuk lifli kompozit malzeme olduğundan dolayı %30 pamuk lifi kullanılmıştır. Kompozitteki matris olarak atık DYPE ile daha iyi mekanik özellikler elde edildiğinden dolayı sadece atık DYPE tercih edilmiştir. Şekil 5.30’da bağlayıcı ajan katkısının kompozitlerin çekme özellikleri üzerine etkileri görülmektedir.

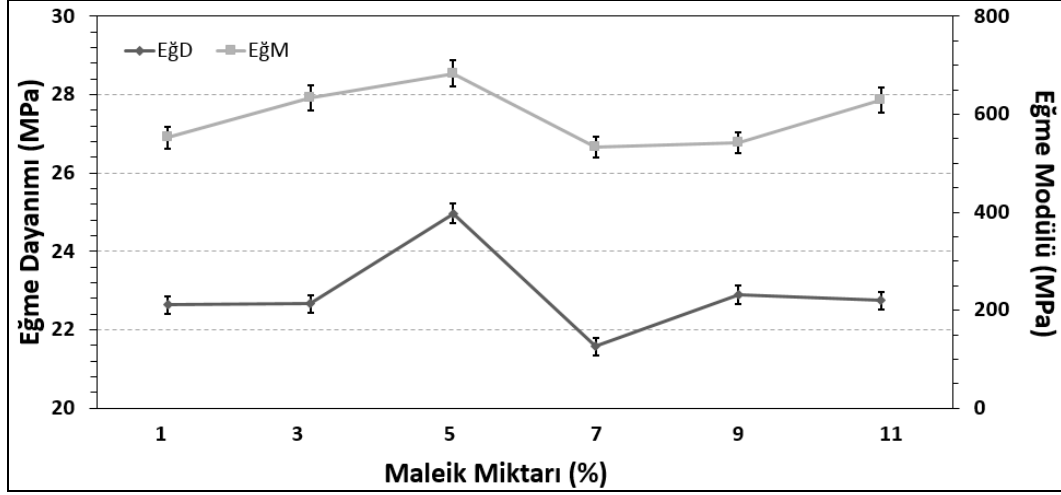
Elde edilen sonuçlara göre katkı oranı arttıkça malzemenin çekme özellikleri doğru orantılı olacak şekilde artmıştır. Bu artış tahmin edildiği ağırlıkça %5 katkı içeren kompozitte en yüksek değere ulaşmıştır ve diğer kompozitlere göre yaklaşık %30 daha iyi mekanik özellikler göstermiştir. Çekme dayanımı ve elastiklik modülünde benzer eğilimler görülürken, kopma uzaması değerlerinde kayda değer bir değişim görülmemiştir. Kopma uzaması değerlerinin ara yüzey bağlayıcı katkısından bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır. Bazı çalışmalardan edinilen bilgilere göre lif ve matrisin en etkili bir şekilde tutunmasını sağlayan kritik bir katkı değeri vardır. Kritik katkı değeri aşıldığında ise özelliklerin düştüğü görülmüştür [115,116]. Sonuç

olarak ağırlıkça %30 pamuk lifi ve matris olarak sadece atık DYPE içeren kompozitte lif matris arasındaki ara yüzey tutunma durumu en iyi %5 MA-DYPE katkısı ile elde edildiği gözlenmiştir.



Şekil 5.30 : Kompozitlerin çekme özelliklerinin katkı oranına göre değişim grafikleri.

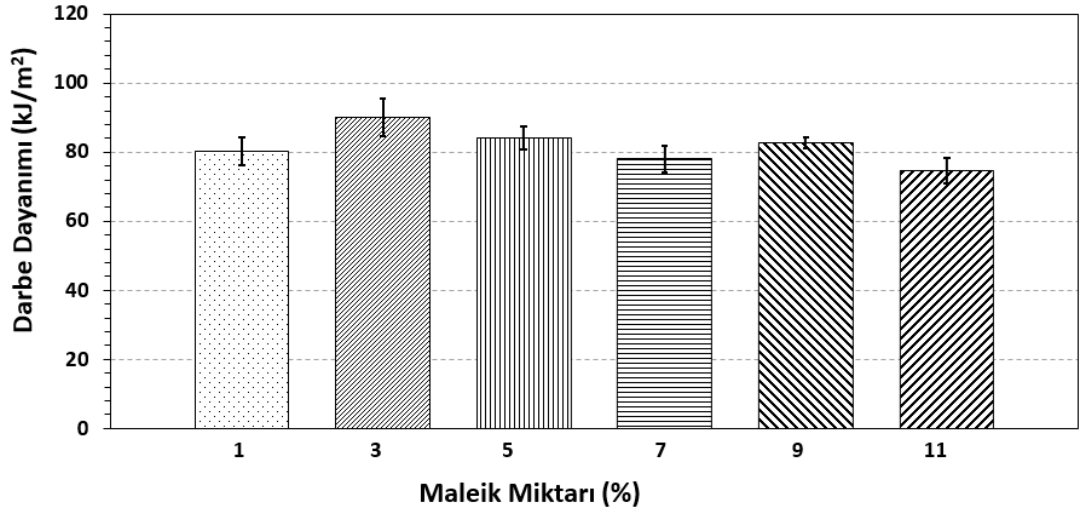
Ara yüzey bağlayıcı ajanın kompozit malzeme içerisindeki miktarının çekme özellikleri üzerine etkisinin irdelenmesinin ardından eğme özelliklerinin de nasıl etkileneceği çalışma kapsamında incelenmiştir. %30 pamuk lifi ve atık DYPE matrisli kompozitler üzerine yapılan çalışmanın sonuçları şekil 5.31’de verilmektedir. Şekil 5.31’e göre bağlayıcı ajanın kompozit malzemedeki miktarının eğme dayanımı üzerine etkisinin çekme dayanımına etkisinde daha az olduğu görülmektedir. Eğme dayanım değerlerinin çekme özelliklerinde olduğu gibi %5 değerine kadar yavaş yavaş arttığı ve bu değerden sonra düşüşe geçtiği görülmektedir (Şekil 5.31). Yapılan eğme deneyleri sonucunda en yüksek eğme dayanımı yaklaşık 25 MPa, en yüksek eğme modülünün ise yaklaşık 680 MPa olduğu bulunmuştur. Eğme dayanımının %5 MA-DYPE katkısından sonraki düşüşün nedeni olarak kompozitteki pamuk lifine bağlı olmayan ve artan MA-DYPE miktarının kompozit yapıda olumsuz etki yaratması ile açıklanabilir.



Şekil 5.31 : Kompozitlerin eğme özelliklerinin katkı oranına göre değişim grafikleri.

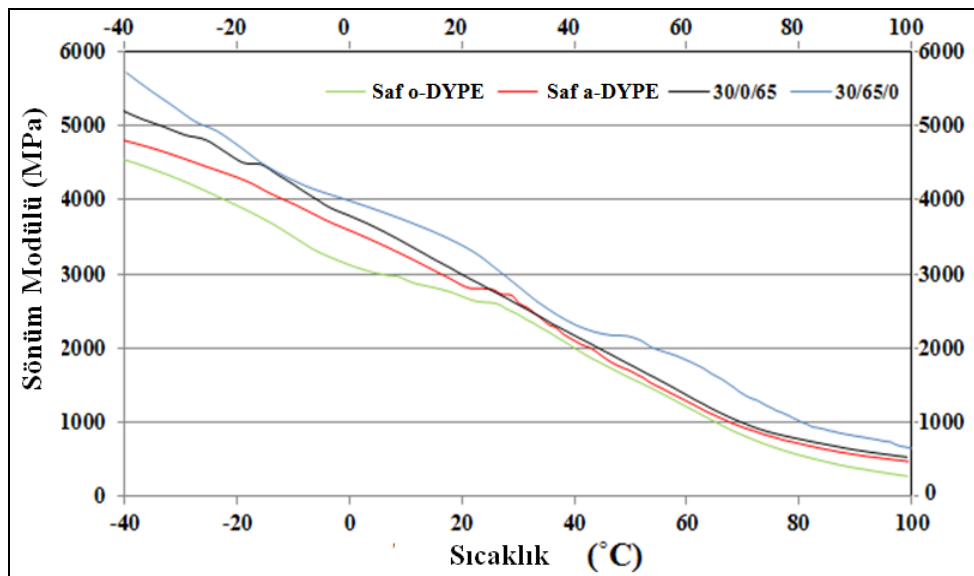
Maleik anhidrit katkı miktarının kompozit malzemenin ani yüklemeler karşısında davranışını nasıl etkilediği öğrenmek için eğme ve çekme testlerinin yanısıra darbe testi de uygulanmıştır. Şekil 5.32’de görüldüğü gibi eğme ve çekme dayanım değerlerindeki değişimin tersine bağlayıcı katkı oranının kompozitteki artışı darbe dayanım değerlerine herhangi bir olumlu katkısı olmamıştır. Buna ilave olarak katkı oranı arttıkça darbe dayanım değerlerinde az da olsa bir düşüş gözlenmiştir. Konuyla ilgili benzer çalışmalar incelendiğinde bu davranışı katkı malzemesinde görülen çapraz bağlanmaya veya zincirlerin birbirine dolanmalarına bağlanmaktadır [129, 130]. Sonuç olarak maleik anhidrit katkısının kompozit malzemenin darbe dayanımına herhangi bir olumlu katkısının olmadığı aksine artan katkı oranıyla darbe dayanımının daha da kötüleştiği anlaşılmıştır. Darbe dayanımdaki düşüşün bir diğer nedeni olarak iyileşen lif matris tutunma durumuyla birlikte kompozitin darbe dayanımında matrise göre daha gevrek davranış sergileyen lifin darbe özelliklerinin daha çok ön plana çıkması gösterilebilmektedir.





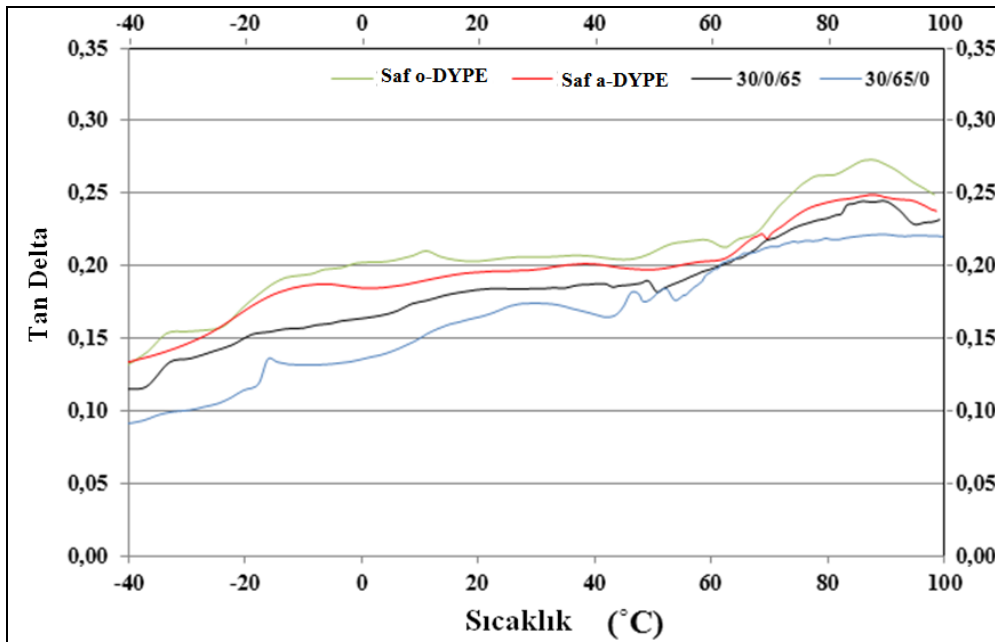
Şekil 5.32 : Kompozitlerin darbe dayanımının katkı oranına göre değişim grafiği.

Çalışma kapsamında incelenen atık polimer matrisli kompozitlerin mekanik performansları incelendikten sonraki aşamada ise mazlemelerin viskoelastik davranışını incelemek amacıyla saf o-DYPE, saf a-DYPE ve kompozitlerin dinamik mekanik analizleri (DMA) -40 ile +100 °C aralığında gerçekleştirilmiştir. Sönüm modülü ( $E'$ ) ve tan delta ( $\tan \delta$ ) değerleri DMA analizi sonucunda elde edilmiştir. Deney numuneleri olarak kompozit yapı oluşturmanın matris yapıya göre ne şekilde etki ettiğini görebilmek amacıyla öncelikle matris elemanı saf orjinal DYPE seçilmiştir. Geri dönüşüm işleminin matris elemanı üzerine etkisi irdelemek amacıyla atık DYPE, ve bu matrislerden oluşan kompozit malzemelerden numuneler tercih edilmiştir.



Şekil 5.33 : Kompozit ve saf matris elemanlarının farklı sıcaklıklardaki sönüm modülü değişimi.

Sönüm modülü malzemenin herhangi bir kalıcı şekil değişimine uğramadan enerji sönümlenme yeteneğinin göstergesidir. Dolayısıyla sönüm modülünün direkt olarak rijitlik ve elastiklik modülüyle birebir bağlantısı bulunmaktadır. Şekil 5.33’de görüldüğü gibi atık DYPE matris malzemesi orjinal DYPE matrise göre daha yüksek sönüm modülü değerine sahiptir. Bunun ana nedeni olarak geri dönüşümle beraber matris malzemesinde görülen çapraz bağlanma gösterilebilir. Kompozitlerde ise pamuk lifinin matris malzemesine katılmasıyla beraber DYPE matrisin zincir hareketlerinin kısıtlanmasından kaynaklanan artış göze çarpmaktadır. Ayrıca MA-DYPE ilavesinin de lif ve matris uyumunu arttırdığı için daha yüksek sönüm modülü değerlerinin elde edildiği görülmektedir (Şekil 5.33). Bu sonuçlar çekme testinden elde edilen sonuçlar ile de örtüşmektedir.



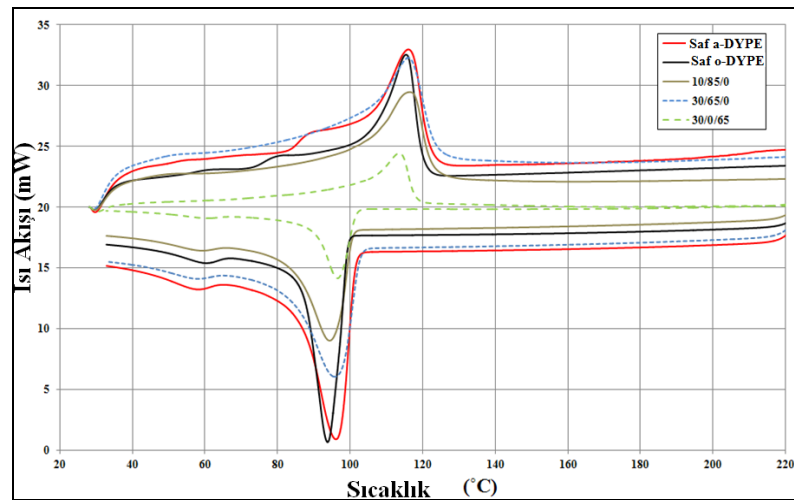
**Şekil 5.34 :** Kompozit ve saf matris elemanlarının farklı sıcaklıklardaki Tan Delta değişimi.

Şekil 5.34’te orijinal, atık DYPE ve kompozit malzemelere ait tan delta değerlerini gösteren grafik görülmektedir. Tan delta değerleri malzemenin çevrimsel yüklemeler esnasında enerji sönümlenme yeteneği gösteren ve malzemenin sönüm katsayısını temsil eden değerlerdir. Bu değer sönüm modülünün kayıp modül tarafından bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Genel olarak grafiğe bakıldığında her malzeme türü için analiz sıcaklığı arttıkça sönüm katsayısının da arttığı rahatlıkla gözlenebilmektedir. DMA çalışmaları sonucunda elde edilen verilere göre saf o-DYPE malzemenin saf a-DYPE malzemeye göre sönüm katsayısı daha yüksek olduğu görülmüştür. Bununla beraber atık kumaş ilavesiyle oluşan kompozit yapının

sönüm yeteneği saf polimer matrise göre daha düşük kalmıştır. Ayrıca beklenildiği gibi atık DYPE matrisin kompozit malzemenin sönüm yeteneğine olumsuz etkilediği DMA sonuçları ortaya çıkmıştır (Şekil 5.34).

Saf polimer matrisin ve kompozitlerin mekanik özelliklerinin yanısıra atık polimer matrisin ve kumaş katkısının ısıl özellikler üzerine etkilerinin incelemek amacıyla DSC analizleri, çalışmanın son aşamasında gerçekleştirilmiştir. Bu analiz yardımıyla malzemenin erime, kristalleşme sıcaklığındaki değişim ve % kristalleşme oranı hesaplanmıştır. Çalışmada geri dönüşüm işleminin polimer matris ve kompozit yapı üzerine etkilerini incelemek amacıyla saf atık DYPE nin ve %65 atık polietilen matrisli kompozitlerin analizi yapılmıştır. Bunun yanında kumaş oranının etkisini anlayabilmek için %10 pamuk lifi içeren kompozit malzemenin DSC analizi de yapılmıştır.

Şekil 5.35'te görüldüğü gibi analizi gerçekleştirilen tüm malzemeler DSC ısınma eğrilerinde sadece tek bir erime noktası göstermiş olup, soğuma grafiğinde de yine şekilde tek bir tane kristalleşme noktası göstermektedir. Saf orjinal, atık DYPE matris ve kompozitler için erime sıcaklıklarının neredeyse hiç değişmediği ve sabit kaldığı yapılan analizler sonucunda görülmüştür. Saf orjinal DYPE için erime sıcaklığı 115.48°C iken saf atık DYPE matris için erime sıcaklığı 116.10°C bulunmuştur. Diğer yandan % 10 pamuk lifi ve %85 o-DYPE içeren kompozit (10/0/85) için erime sıcaklığı 116.42°C, %30 pamuk lifi ve %65 o-DYPE içeren kompozit için 113.60°C ve son olarak %30 pamuk lifi ve %65 atık DYPE içeren kompozit için erime sıcaklığı 116.30°C olarak bulunmuştur (Şekil 5.35).



Şekil 5.35 : Saf matris ve kompozitler için erime ve soğuma eğrileri.

Saf DYPE ve kompozitteki DYPE miktarı için % kristallik miktarı çalışmadaki elde edilen veriler sonucunda hesaplanmıştır ve Çizelge 5.6' da verilmektedir. DSC sonuçlarına göre geri dönüşüm işlemi saf orjinal DYPE nin kristal oranını yaklaşık %25 ten %20 lere kadar düşürmektedir. Bu durumun ana nedeni olarak geri dönüşümle beraber saf orjinal DYPE meydana gelen çapraz bağlanmaya neden olan radikal oluşumları gösterilebilir (Çizelge 5.6).

**Çizelge 5.6 : Matris ve kompozitlerin DSC sonuçları.**

Malzeme	T <sub>m</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)	ΔH (J/g)	% kristallik (DYPE)
Saf o-DYPE	115.48	93.76	73.30	25.02
Saf a-DYPE	116.10	96.13	59.50	20.31
10/0/85	116.42	94.41	74.45	28.81
30/0/65	113.60	96.57	62.10	28.16
30/65/0	116.30	95.92	66.41	30.11

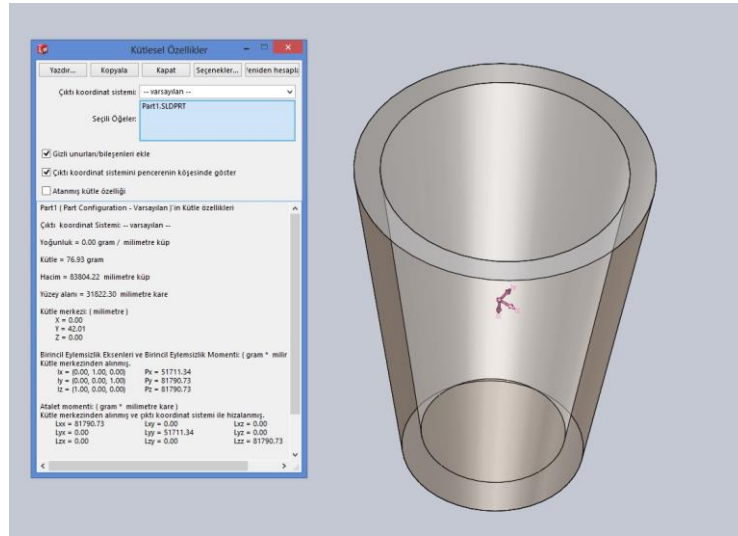
Diğer yandan pamuk liflerinin polimer matrise katılmasının malzemenin ısı özellikleri üzerine etkisini incelemek için farklı oranlarda pamuk lifi (%10 ve %30) içeren kompozitlerin de DSC analizi yapılmıştır. Sonuçlara göre pamuk lifinin polimer matrise katılmasıyla % kristallik miktarında az da olsa bir artış sağlandığı gözlenmiştir. Pamuk lifi katkısıyla % kristallik artışının yanında aynı zamanda kristalleşme sıcaklığının da pamuk lifinin artışıyla arttığı sonucuna varılmıştır. Bu durum pamuk liflerinin matris içerisinde çekirdeklenme / kristallenme merkezlerine neden olması ile açıklanabilmektedir. Lifler matris içerisinde kristalleşme ajanları olarak hareket edip lif çevresindeki matris yapının kristalleşme davranışını etkilediği düşünülmektedir. DSC sonucunda elde edilen veriler bu konuda yapılmış benzer çalışmaların sonuçlarıyla da paralellik taşıdığı görülmüştür [131, 124]. Kompozit malzeme içerisinde DYPE %kristallinite miktarındaki değişim ile çekme testi sonuçları beklenildiği gibi paralellik göstermektedir. DSC sonuçları AlMaadeed ve arkadaşlarının yaptığı çalışma sonuçlarıyla örtüştüğü görülmektedir [132].

## 5.7 Maliyet Analizi

Doktora tezi kapsamında üzerinde çalışılan kompozit yapıların uygulamalarda kullanılabilmesi amacıyla maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla örnek bir ürün olarak park ve bahçelerde kullanılabilen çiçek saksıları tercih edilmiştir. Çiçek saksıları 90 mm derinliğe, 42 mm alt çapa, 70 mm üst çapa ve 5 mm et kalınlığına sahiptirler. Bu boyutlara sahip örnek bir çiçek saksısının 0,932 gr/cm<sup>3</sup> (%25 DYPE +

%75 Pamuk Lifi) yoğunluğa sahip kontrol kompozit malzemeden imal edilebilmesi için maliyet analizi yapılmış ve lif matris ara yüzey iyileştirme işlemlerine sahip kompozitlerin maliyetleri ile karşılaştırılmıştır.

Saksının hacmi yaklaşık olarak  $84 \text{ cm}^3$  bulunmuştur. Ağırlığı ise yaklaşık 80 gr olarak hesaplanmıştır. Termoform işleminde şekillendirilen plakanın yaklaşık olarak %50 oranı pot çemberi arasında kalan kısım olarak kabul edilirse yaklaşık 120 gr toplam harcanması gereken kompozit granül olarak bulunur. Maliyet analizleri hesaplanan bu değerler üzerinden yapılmıştır.



Şekil 5.36 : Maliyet analizi için kullanılan saksı modeli.

### 5.7.1 Analizde hesaba katılan maliyetler ve kabuller

Kontrol kompozit, lif / matris ara yüzey iyileştirme işlemlerine sahip kompozitler ve saf plastik matris ile üretilen çiçek saksısına ait maliyet analizleri için gerekli olan gider maliyetleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

#### 5.7.1.1 Hammadde ve kullanılan kimyasal maliyetleri

Üretimin ana hammaddesini oluşturan DYPE malzeme hurda piyasasından çekilecek olup 02.05.2014 tarihi itibarı ile piyasada 1.500 – 1.800 TL/ton arasında değişen satış fiyatına sahiptir. Bu çalışma için kompozit malzemede kullanılacak olan (atık) a-DYPE üretimi ile sağlanacağı kabul edilmesi takdirde maliyeti, piyasa araştırılması sonucu 850 TL/ton olarak belirlenmiştir. Yukarıda verilen ölçü ve özelliklere göre üretilecek bir saksı için toplam a-DYPE maliyeti %100 a-DYPE içeren 1 saksı için 0.0680 TL olarak gerçekleşecektir.

Çalışmada elde edilen kompozit ürün için en önemli ikinci hammadde kaynağını oluşturan pamuk lifinin piyasa değeri 350 TL/ton olup yukarıda verilen ölçü ve özelliklere göre üretilecek bir saksı için pamuk lifinin maliyeti 0,007 TL olarak gerçekleşecektir. Ayrıca termoform işlemi sırasında pot çemberinde artan malzeme miktarı %33 olarak belirlenmiştir. Bu değer deri dönüştürülmüş DYPE için de geçerli olup yeniden üretime katılabilmektedir.

Maleik Anhidrit Düşük Yoğunluklu Polietilen (*FusaBond E226*) ürün, ağırlıkça %10, %20, %30 olan üç farklı atık pamuk kumaş takviyeli kompozit malzemede denenmiş, %5 Maleik Anhidrit katkısının kompozit üründe mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmüştür. Kullanılan FusaBond E226 kod'lu bağlayıcı ajanının maliyeti 4.17 \$/kg olup yukarıda özellikleri verilen saksı örneği için gerekli FusaBond maliyeti 0.035 TL'ye tekabül etmektedir.

Alkalin uygulamasında numuneler NaOH çözeltilerinde 5 saat boyunca bekletme işleminden geçirilmiştir. 5 saat'lik bekletmenin ardından çözeltinin pH değeri 7 ye düşünceye kadar saf su ile yıkama işlemi yapılmıştır. Atık kumaşlara uygulanan alkalin işleminden sonra silan ile muameleye geçilmiştir. Silan kimyasal işleminde %0.75, %1.5 ve %3 silan içeren çözeltiler kullanılmış, 1 ve 3 saat boyunca kumaşlar bu çözeltilerde bekletilmiştir. İşlem sonrasında pH değerini ayarlamak amacıyla asetik asit kullanılmıştır.

- Alkalin maliyeti için çalışmalarda 3 kg kompozit granül için en ideal 1 M NaOH çözeltisinden yaklaşık olarak 200 gr kullanılmıştır. Merck marka Sodyum Hidroksit kimyasalı maliyeti 39 TL /kg olup ticari olarak yukarıda verilen ölçü ve özelliklere göre üretilecek bir saksı için maliyet 0.31 TL olarak gerçekleşecektir.
- Silan için (%1,5 ) 3 kg kompozit granülde 62 gr SİLAN kullanılmıştır. Silanın birim maliyeti 1200 TL / kg olup ticari olarak yukarıda verilen ölçü ve özelliklere göre üretilecek bir saksı için maliyet 2.97 TL olarak gerçekleşecektir.

Alkalin ve özellikle silan uygulaması, maliyeti beklenenin çok üstünde arttırdığı için ticari olarak uygulanabilirliği açısından diğer uygulamalara göre çok daha maliyetli görülmüştür.

### 5.7.1.2 Elektrik maliyeti

Gerçekleşen çalışma ile kompozit malzeme içinde lif dağılımının homojen olmadığı, atık kumaş takviyeli kompozit plakalar için en iyi lif dağılımının ve mekanik özelliklerin elde edilmesi için 3 kez kırım/ekstrüzyon işlemi yapılması gerektiği önceki bölümlerde bahsedilmişti. Laboratuvar ölçekli yapılan çalışmalarda 3 kg kompozit granül için yaklaşık olarak 30 dk (15 dk ekstrüzyon ve 15 dk kırım ) harcanmıştır. Aşağıdaki çizelge 5.7’de elektrik giderleri ekstrüzyon, kırma ve termoform işlemleri için gösterilmiştir.

**Çizelge 5.7 : Elektrik maliyeti**

Makine	Güç (kW)	Süre (s)	Elektrik Gideri (kr/kWh)	Toplam Maliyet (TL)
Ekstrüder	38,2	0,25	20	1,91 (%87,6)
Granülatör	5,50	0,25	20	0,27 (%12,4)
Termoform	20	0,002	20	0,008 (%0,37)
Toplam Elektrik Maliyeti				2,18

3 kg kompozit granül için harcanan toplam elektrik masrafı 2.18 TL olup ticari olarak yukarıda verilen ölçü ve özelliklere göre üretilecek bir saksı için toplam elektrik maliyeti 0.087 TL olarak gerçekleşecektir.

### 5.7.1.3 Personel Maliyeti

Bu tür bir üretim için gerekli personel ihtiyacı tekstil atığının karışık evsel atık içinden ayrılması durumunda farklı olacaktır. Tekstil atığının ticari işletmelerden getirilmesi durumu ise kalite kontrol ve ön işlem için bir işçi, üretim ve depolama için bir işçi, bakım ve onarım hizmeti için bir tekniker ve ilgili prosesten sorumlu bir formen olmak üzere toplam 4 personel gerektirmektedir (Çizelge 5.8).

**Çizelge 5.8 : İşletme için gerekli personel sayısı ve görevlendirme.**

İŞLEM	PERSONEL SAYISI	PERSONEL MAAŞ (TL)
Proses Yönetimi	1	2,500
Kalite Kontrol	1	2,000
Plaka Hazırlama	1	2,000
Bakım ve Onarım	1	2,250
Toplam Personel Maliyeti (16 saat için)		17,500

Ticari olarak yukarıda verilen ölçü ve özelliklere göre üretilecek 12.000 adet/gün saksı için toplam işçilik maliyeti 0.066 TL olarak gerçekleşecektir.

Yukarıda belirtilen tespitlere göre maliyet analizi özet olarak çizelge 5.9'da verildiği gibidir.

**Çizelge 5.9 :** Kompozit ve katkısız polimer ile saksı üretimi / maliyet analizi.

MALİYET KALEMLERİ	Birim	Kompozit		Polimer
		30/65/0	Kontrol	a-DYPE
1 İlk Yatırım	TL	0,0000	0,0000	0,0000
Maliyeti				
2 İşçilik Maliyeti	TL/Saksı	0,0660	0,0660	0,0660
3 FusaBond E226	TL/Saksı	0,0350	0,0000	0,0000
4 a-DYPE	TL/Saksı	0,0442	0,0510	0,120*
5 Pamuk Lifi	TL/Saksı	0,0084	0,0070	0,0000
6 Kırma	TL/Saksı	0,0100	0,0100	0,0000
7 Ekstrüzyon	TL/Saksı	0,0760	0,0760	0,0250**
8 Termoform	TL/Saksı	0,0003	0,0003	0,0003
9 Kimyasal	NaOH	TL/Saksı	0,0000	0,0000
	Silan	TL/Saksı	0,0000	0,0000
10 Amortisman	TL/Saksı	0,0000	0,0000	0,0000
TOPLAM		0,2360	0,2110	0,2100
MALİYET				

\*a-DYPE ile üretimde kullanılan hammadde piyasa rayıcı üzerinden değerlendirilmiştir (1650 TL/ton).

\*\*Doğrudan polimerden üretim için ekstrüzyon işlemi bir sefer olarak hesaplanmıştır.

Maliyet analizlerinden elde ettiğimiz bilgiler ışığında, kompozitlerin üretiminde özellikle ekstrüzyon işleminin tekrarlı bir şekilde yapılmasından kaynaklanan bir fark ortaya çıkmıştır. İleriki çalışmalarda sürecin iyileştirilmesiyle (daha az tekrarlı kırım veya tek ekstrüzyon işlemiyle kompozit üretimi gibi) birlikte daha düşük üretim maliyetleri hedeflenebilir.

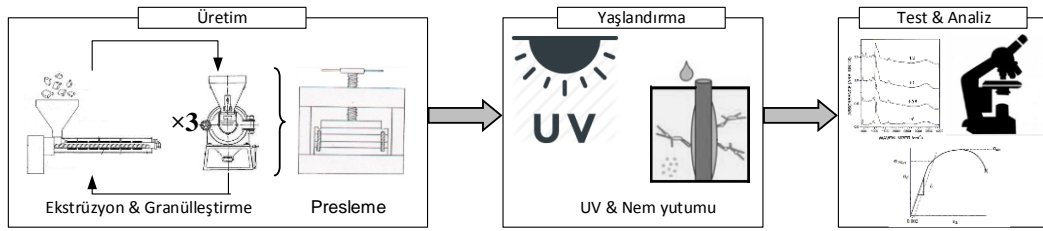


## 6. ÇEVRESEL KOŞULLARIN ETKİLERİ

Bir önceki bölümde (Bölüm 5) pamuk lifi takviyeli kompozitlerin lif / matris ara yüzey tutunma durumlarını iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar tamamlanmıştır. Ardından bu tür kompozitlerin dış ortama uygun ürün olarak düşünülebilmesi amacıyla hızlandırılmış yaşlandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Böylece kompozitlerin uygulamalarda kullanılması söz konusu olduğunda çevresel etkiler sonrasında mekanik, fiziksel, kimyasal ve ısıl özellikleri bakımından özelliklerini hangi derece koruyabildikleri hakkında fikir sahibi olunmuştur. Çalışma kapsamında ayrıca çevresel şartların olumsuz etkilerini en az indirgeyebilmek maksadıyla alternatif yöntemler de irdelenmiştir.

### 6.1 Malzeme ve Yöntem

Çevresel şartların etkilerini incelemek amacıyla yürütülen çalışma iki aşamada incelenmiştir. Birinci aşamada lif / matris ara yüzeyi iyileştirilmiş kompozitler ile herhangi bir iyileştirme uygulanmamış kompozitlerin performansları karşılaştırılmıştır.



**Şekil 6.1:** Çevresel şartların etkisini incelemek amacıyla izlenen yöntem.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise özellikle ultraviyole ışınlarının olumsuz etkisine karşı kullanılması düşünülen kimyasal katkıları ve ideal oranları incelenmiştir. Şekil 6.1'de çalışmaya ait yöntemlerin sıralamasına şematik gösterim bulunmaktadır. Çizelge 6.1'de ise çalışmanın ilk aşaması için incelenen kompozitler ve içerikleri verilmiştir. Numunelere uygulanan ara yüzey uygulamaları bölüm 5'de incelenen uygulamalardır. Bu uygulamalar içerisinde ideal özellikleri sağlayan yöntemler ve numune içerikleri seçilmiştir (Çizelge 6.1).

**Çizelge 6.1 : Kullanılan test numuneleri ve içerikleri.**

Numune	Ara yüzey uygulaması	Malzeme içeriği
DYPE	Yok	Düşük yoğunluklu polietilen
T-FRP (Kontrol) +Si	Yok Silan	Kontrol numunesi (%25 pamuk lifi ve %75 DYPE matris) T-FRP + %1,5 Silan (3s)
+NaOH	Alkali	T-FRP+ 1 M NaOH (5s)
+NaOH-Si	Alkali – silan	T-FRP+ 1 M NaOH (5s) + %1,5 Silan (3s)
+MA	Maleik anhidrit katkısı	T-FRP+ %5 Maleik anhidrit

## 6.2 Sonuç ve Tartışma

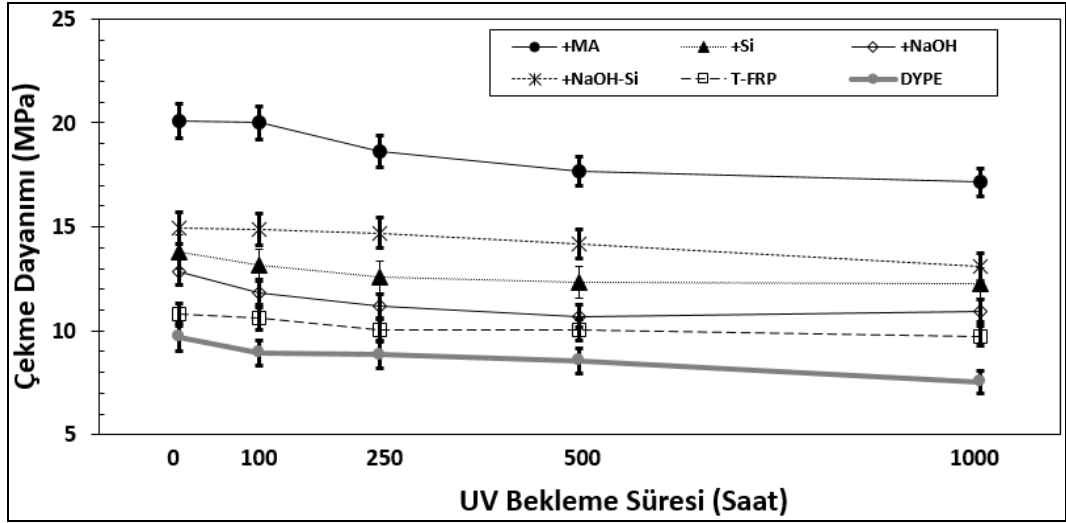
### 6.2.1 UV ışık altında yaşlandırma işleminin mekanik özellikler üzerine etkileri

Şekil 6.2’de bölüm 5’de belirlenen ideal iyileştirme işlemleri uygulanmış kompozitlere ve herhangi bir yaşlandırma işlemine maruz bırakılmamış kompozit malzemeye ait çekme dayanımının UV ışınlar maruz kalma süresine göre değişim grafikleri verilmektedir. Ayrıca saf DYPE matris malzemesinin sonuçları da karşılaştırma amaçlı verilmiştir.

Grafiklere göre, beklenildiği gibi UV ışınlar maruz bırakılma süresi ile çekme dayanımı her kompozit malzeme için doğrusal bir şekilde düşüş göstermiştir. Düşüş miktarları kimyasal iyileştirme yöntemlerine göre değişmektedir. 100 saatlik yaşlandırma süresi için gerek takviyesiz DYPE matrisinde gerekse kompozit malzemelerin çekme dayanımlarında düşüş başlamış, 250, 500 ve 1000 saatlik yaşlandırma testlerinde de lineer olarak devam etmiştir. Buna göre 1000 saatlik UV yaşlandırma neticesinde en çok saf DYPE matriste %22 lik bir düşüş gözlenirken herhangi bir iyileştirme işlemine tabi tutulmamış, sadece %25 atık kumaştan ve %75 DYPE matristen oluşan kompozitte ise yaklaşık %10 bir düşüş gözlenmiştir. DYPE matrisin çekme dayanımındaki düşüşün temel sebebi olarak UV ışınlar altında polimerde görülen zincir kırılmaları ve bozunması sonucunda gerçekleştiği söylenebilir. Kompozitlerin daha az polimere sahip olması daha az düşme miktarlarının gözlenmesinin nedenidir.

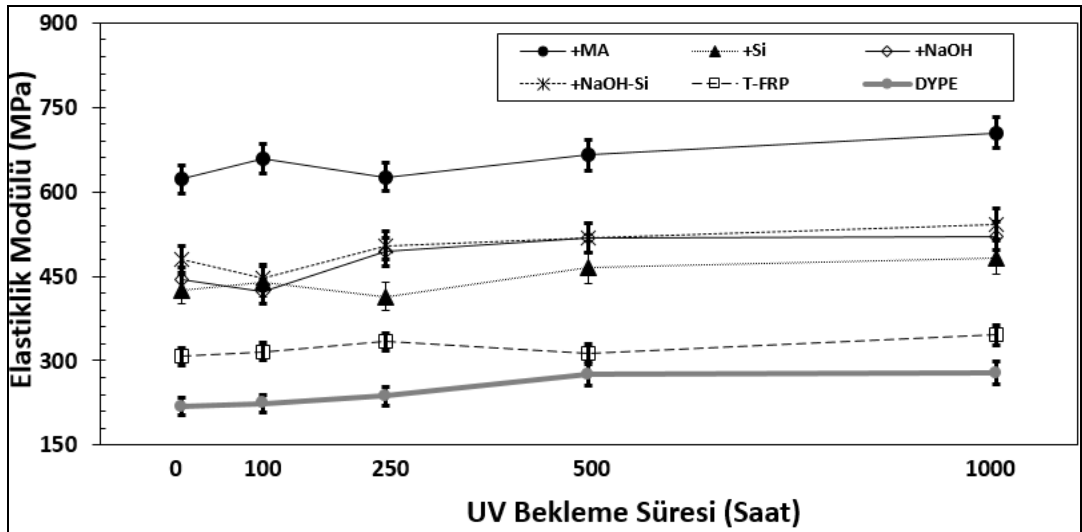
Testlerden elde edilen önemli bir sonuç da beklenilenin tersine lif matris ara yüzey tutunma durumu ve dolayısıyla mekanik performansını iyileştiren yöntemlerin UV ışınlarına karşı kompozite ayrıca bir dayanım sağlamadığı görülmüştür. Bu durum ise

çekme dayanımının lif / matris ara yüzey durumuna bağlı olmasına, dolayısıyla iyileştirme yöntemleriyle güçlü tutunma durumuna sahip olan kompozitlerin UV ışık altında ara yüzeylerin bozunmasına bağlanabilir.



Şekil 6.2: UV bekleme süresine göre kompozitlerin ve DYPE matris malzemesinde çekme dayanımındaki değişim grafikleri.

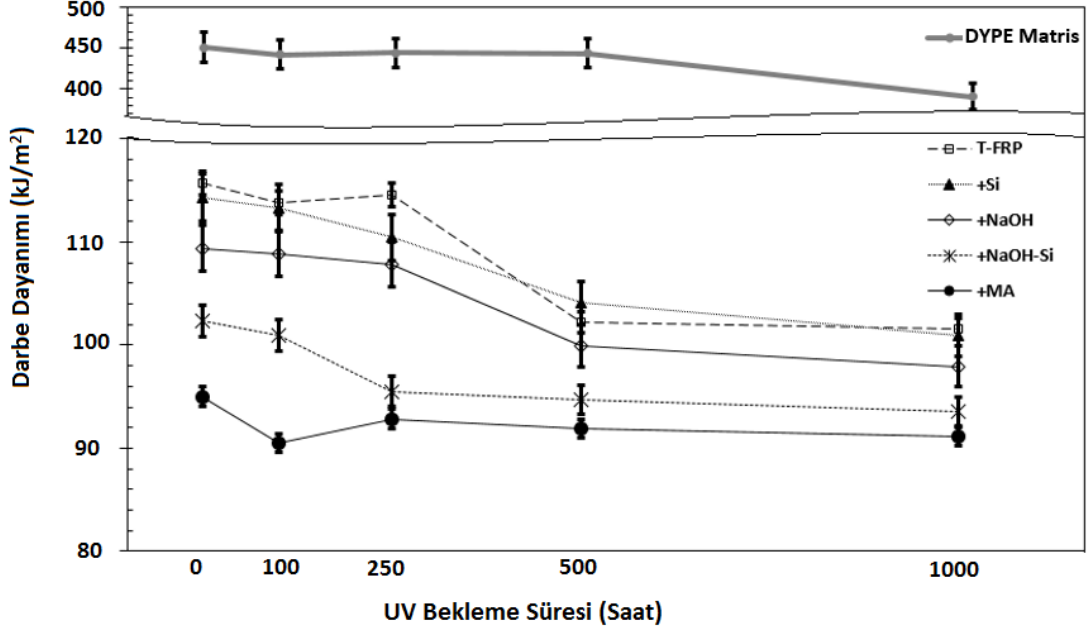
Diğer yandan zaten ara yüzey tutunma durumu nispeten kötü olan T-FRP kompozitlerde ise ara yüzey durumu yaşlandırma neticesinde daha az zarar görmüş ve böylelikle çekme dayanım değerleri daha az değişmiştir. Benzer sonuçlar konuyla ilgili diğer çalışmalarda da gözlenebilmektedir [133]. Sonuçlara bakıldığında iyileştirme işlemlerine tabii tutulmuş kompozitlerin de yaklaşık olarak %10- 14 arasında çekme dayanımlarının düştüğü rahatlıkla söylenebilir.



Şekil 6.3: UV bekleme süresine göre kompozitlerin ve DYPE matris malzemesinde elastiklik modülündeki değişim grafikleri.

Ultra viole (UV) ışınlar altında bekleme süresine göre kompozit ve saf DYPE matris malzemesinin elastiklik modülündeki değişim grafikleri ve eğilimleri şekil 6.3’de görülmektedir. Çekme testi sonuçlarına göre UV ışınlar altında yaşlandırma işleminin kompozit ve saf DYPE matris elemanın çekme dayanım değerleri üzerine etkisinin tersine elastiklik modülü değerleri yaşlandırma süresiyle beraber artış göstermiştir. Saf DYPE matris malzemesinin hiç yaşlandırılmamış durumda elastiklik modülü 218 MPa civarında iken 100 ve 250 saatlik yaşlandırma neticesinde kayda değer bir değişim görülmemiş, fakat 500 saatlik yaşlandırma sonrasında olarak %25 oranında bir artış görülerek yaklaşık 270 MPa değerlerine ulaşılmıştır. 1000 saatlik yaşlandırmanın 500 saatlik yaşlandırma ile aynı etkiyi meydana getirdiği görülmektedir.

Kompozit malzemelerin elastiklik modülündeki değişime baktığımız zaman herhangi bir iyileştirme işlemine tabi tutulmamış %25 atık kumaş ve %75 DYPE matristen oluşan kompozit malzemenin yaşlandırma işleminden en az etkilenen malzeme olduğu görülmektedir. 1000 saat sonrasında yaşlandırılmış kompozitin elastiklik modülün UV ışınlarına maruz kalmamış numunelerin elastiklik modülüne göre yaklaşık olarak %10 daha fazla olduğu görülmektedir. Bir diğer sonuç ise alkalın uygulamalı kompozit numuneler hariç diğer tüm kompozitlerde benzer değişimler göstermişlerdir. Kompozit malzemelerin elastiklik modülü değerleri 500 saat sonrasında hafif bir artış göstermiş 1000 saat neticesinde ise yaklaşık olarak %10-13 arasında bir artış gözlenmiştir. Diğer taraftan alkalın uygulamalı kompozit numuneler ise ilk 500 saat sonrasında hızlı bir artış göstermiştir (%15). 500 ile 1000 saat arasında ise kayda değer bir değişim göstermemiştir. Çekme dayanımının tam tersine elastiklik modülündeki artışın sebebi olarak UV ışınlar altında yaşlandırma işleminin matris malzemesinin de çapraz bağlanmaya neden olduğu benzer çalışmalardan anlaşılmıştır. Bu durumun matris malzemesinin ve dolayısıyla kompozit yapının rijitliğini arttırdığı düşünülmektedir. Ayrıca lif / matris ara yüzey iyileştirme çalışmaları için kullanılan kimyasal katkılarında aynı etkiyi gösterebildiği konuyla ilgili çalışmalarda da desteklenmektedir. [133 - 138].



**Şekil 6.4:** UV bekleme süresine göre kompozitlerin ve DYPE matris malzemesinde darbe dayanımındaki değişim grafikleri.

Şekil 6.4'te ise UV bekleme süresine göre kompozit ve DYPE numunelerin darbe dayanım değerlerindeki değişim grafikleri verilmektedir. Genel olarak polimer matrisin foto bozunmasıyla gevrekliğinin artışı ve yüzey çatlakları ile birlikte darbe dayanımlarında düşüş eğilimleri gözlenmiştir. DYPE matrisin darbe dayanımı ilk 500 saatlik yaşlandırma neticesinde yaklaşık olarak sabit kalmış, 1000 saat sonrasında ise %15 düşüş göstermiştir. Diğer yandan kompozitlerin darbe dayanım değerleri DYPE matrise göre daha az değişim göstermiştir. Kompozit numunelerin darbe dayanımları 500 saat sonrasında yaklaşık olarak %10 oranında düşmüştür. Darbe testinden elde edilen diğer bir bilgi ise lif / matris ara yüzey iyileştirme işlemlerine sahip kompozit numuneler T-FRP numunelerine göre darbe dayanımı açısından daha az etkilenmişlerdir.

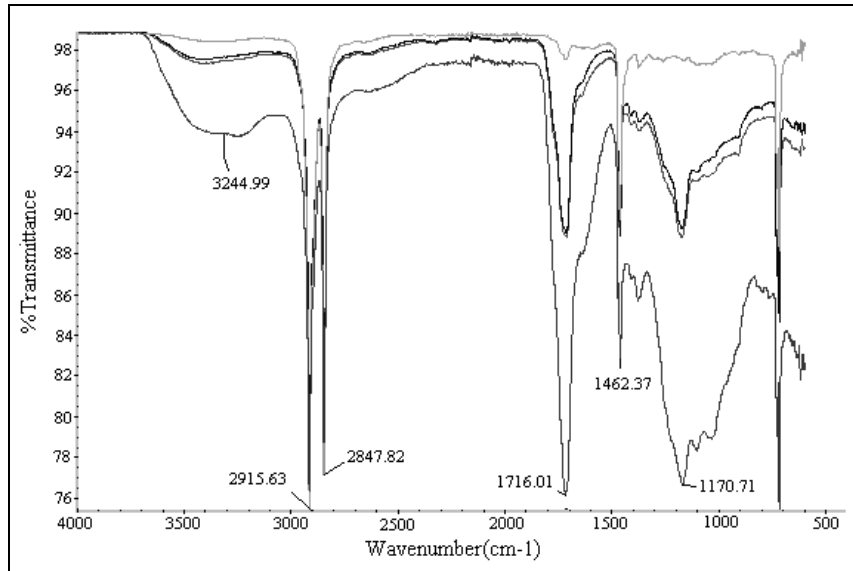
### 6.2.2 UV ışık altında yaşlandırma işleminin kimyasal özellikler üzerine etkileri

Yaşlandırma neticesinde malzemelerde görülen kimyasal değişimleri incelemek amacıyla FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. DYPE matriste bulunan karbonil grupları polimerlerin UV ışık altında bozunmasına neden olan ana ışık emici grupların başında gelmektedir. Çizelge 6.2'de FTIR analizlerinde sıklıkla okunabilecek grupları ve gruplara ait tepelerin dalga boyları verilmiştir. Polimerde gözlenen radikallerin etkilerini anlamak amacıyla karbonil (CO) ve hidroperoksit (OOH) sıklıkları belirlemek tercih edilen yöntem olarak bilinmektedir.

**Çizelge 6.2 :** Gruplar ve gruplara ait dalga boyları [139-142].

Dalga Boyu (cm <sup>-1</sup> )	Tanım
3244	O-H esneme (hidrojen bağlı)
2915	C-H esneme (metil ve metilen gruplarda)
1712	C=O esneme
1472	C-H eğilme, kristalin
1462	C-H eğilme, amorf
1170	C-O esneme
730	C-H salınımı, kristalin
720	C-H salınımı, amorf

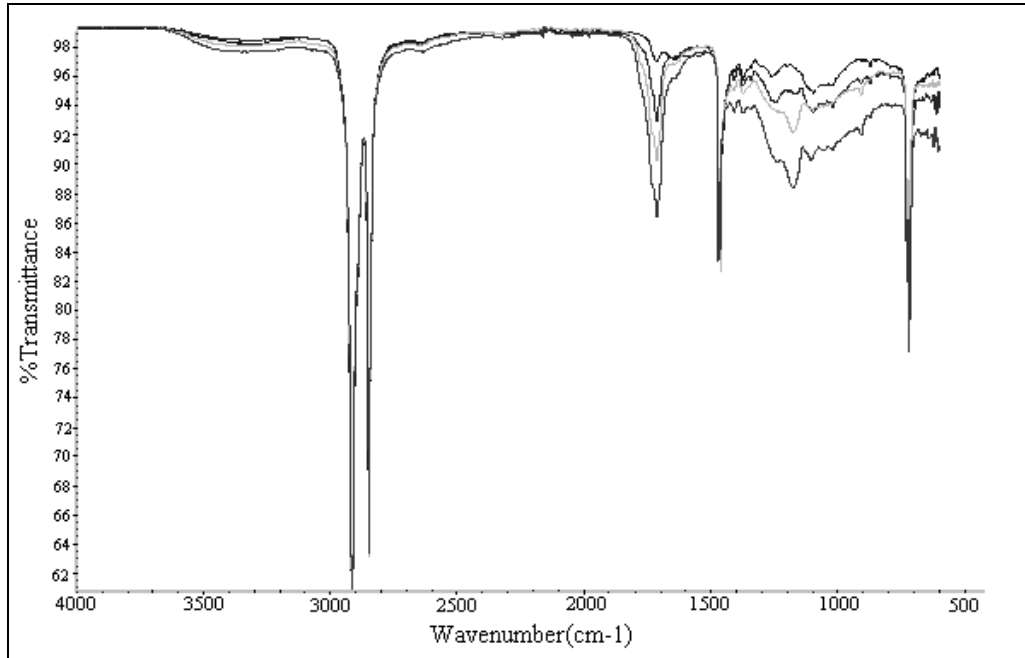
Şekil 6.5'te en üstte yaşlandırılmamış, alta doğru sırasıyla 100, 250, 500 ve 1000 saat yaşlandırılmış DYPE matrise ait FTIR spektrumu görülmektedir. Spektrumdan anlaşılacağı üzere polimer zincir ayrılması veya oksitlenmesi sonucu ortaya çıkabilen karbonil grupları 1700 cm<sup>-1</sup> civarında gözlenebilmektedir. Gözlenen bu tepeler saf DYPE matrisin mekanik özelliklerdeki değişimlere sebep olan foto-oksitlenmeyi gösteren tepeler olarak değerlendirilebilir. Ayrıca zincir ayrılmasının 3200 cm<sup>-1</sup>'deki C-H esnemesindeki ve 1470 cm<sup>-1</sup> civarındaki eğilme salınımlarındaki yoğunlukların azalmasına neden olduğu da söylenebilir [143] (Şekil 6.5). FTIR spektrumunda DYPE matrisin UV ışığa maruz kalması neticesinde hidroksil, keton, karboksil, aldehid, ester gibi oksijen içeren fonksiyonel gruplardaki artışların gözlenmiştir. Gözlenen bu sonuçla beraber DYPE matriste foto-oksitlenmenin gerçekleştiğidesteklenmektedir.



**Şekil 6.5:** Matrise ait FTIR spektrumu (üst (0saat), en alt (1000saat)).

Şekil 6.6 – Şekil 6.8 arasında kompozitlere uygulanan kimyasal işlemlere göre ve UV ışık altında bekleme sürelerine göre FTIR spektrumları verilmiştir. Sonuçlara

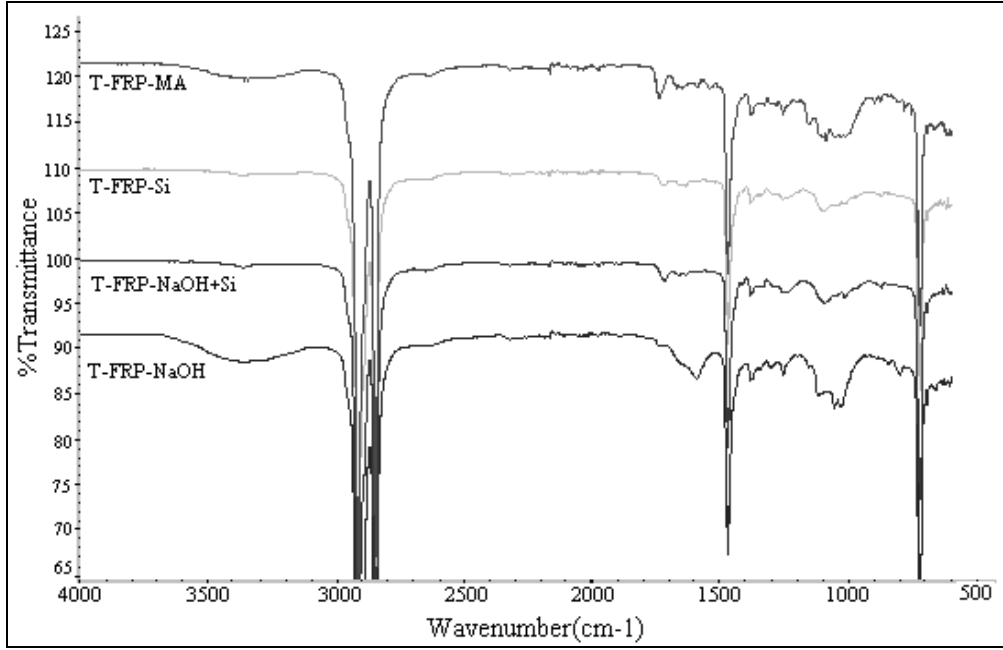
bakıldığında, OH gruplarının, karbonil gruplarının ve üçüncü derece karbonların eğme salınımlarına ait sırasıyla  $3244.99\text{cm}^{-1}$ ,  $1716.01\text{cm}^{-1}$ ,  $1170.71\text{cm}^{-1}$  olan absorpsiyon band yoğunlukları, tüm kompozit numuneler için UV ışık altında bekleme süresinin artmasıyla beraber arttığı gözlenmiştir.  $1170.71\text{cm}^{-1}$  noktasında gözlenen tepe ise genellikle  $1200-1000\text{ cm}^{-1}$  aralığında absorbe olan eter, karboksilik asit ve esterlerin yapıda olduğunu işaret eden C-O esneme salınımını gösteren tepe olarak yorumlanabilir [143]. UV altında yaşlandırma ile farklı bantların yoğunluklarındaki düşüş numunelerdeki yapıların bozunmasından kaynaklandığı düşünülebilir. Elde edilen sonuçlar incelenen diğer çalışmalardaki sonuçlar ile paralellik göstermektedir [144-148].



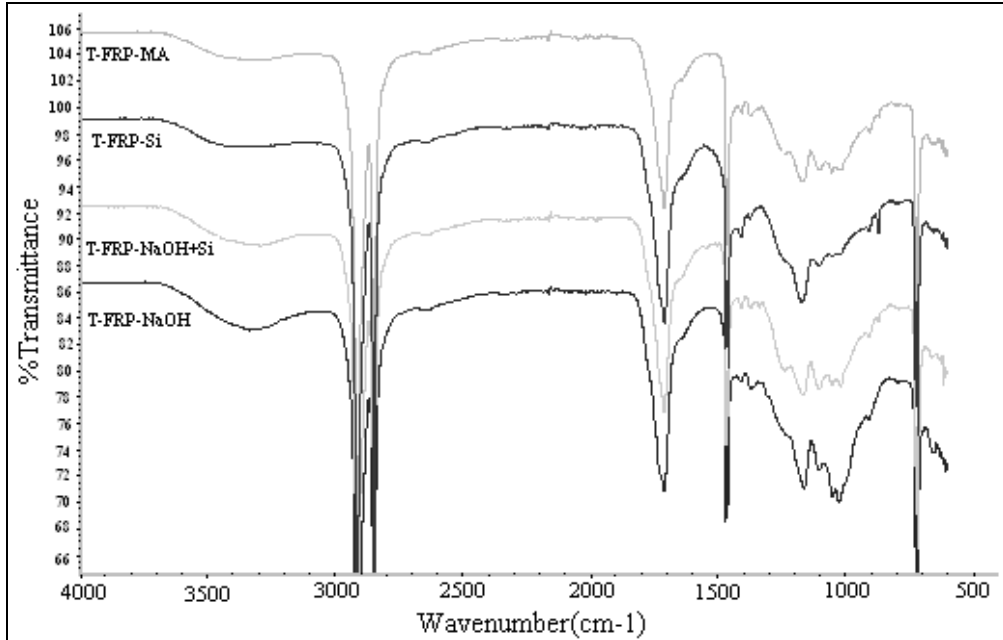
**Şekil 6.6:** T-FRP kontrol numunesine ait FTIR spektrumu (üst (0saat), en alt (1000saat)).

Genel olarak sonuçlara bakıldığında UV bekleme süresi 250 saate kadar çıkıldıkça tüm numunelerin karbonil indekslerinde çok düşük değişimler göze çarpmıştır. Diğer taraftan 500 saat sonrasında ise keskin farklar ortaya çıkmıştır. Karbonil indekslerinde bekleme süresiyle ilgili ortaya çıkan eğilim DYPE matris ve kompozit numunelerin mekanik değişimlerinde gözlenen eğilimle de örtüşmektedir. 1000 saat sonrasında ise FTIR spektrumları kompozit numunelerin DYPE matrise göre çok daha kimyasal olarak kararlı davrandıklarını göstermektedir (Şekil 6.5 - Şekil 6.8 ve Çizelge 6.3). Bunun yanı sıra lif / matris ara yüzey durumunu iyileştirmesi için uygulanan kimyasal uygulamalarla birlikte kompozit malzemenin UV ışık altında

kimyasal olarak kararlılığın olumsuz etkilendiği de söylenebilir. Bu durumun sebebi olarak kimyasal uygulamalarda kullanılan katkıların oksitlenmeye karşı daha duyarlı oldukları söylenebilir [147].



**Şekil 6.7:** Farklı lif / matris ara yüzey iyileştirme uygulamalarına sahip kompozitlere ait FTIR grafikleri başlangıç.



**Şekil 6.8:** Farklı lif / matris ara yüzey iyileştirme uygulamalarına sahip kompozitlere ait FTIR grafikleri (1000 saat).

Çizelge 6.3' te ise DYPE matris ve kompozit numunelere ait karbonil indeksleri görülmektedir. Hiç yaşlandırılmamış durumda, tüm kompozitlerin karbonil indekslerinin DYPE matrise göre daha fazla çıktığı görülmüştür. Bunun temel nedeni



olarak kompozitteki pamuk liflerinin polimer matristeki oksijen miktarını ve karbonil fonksiyonelliğini arttırması olarak gösterilebilir. Bu sonuca ek olarak, lif / matris ara yüzey tutunma durumunu arttıran kimyasal uygulamalarının T-FRP kontrol numuneye göre karbonil indeksinin artmasına yol açtığı görülmüştür. Dolayısıyla karbonil değerlerinin değişimi numuneler arasında hangisinin bozunmaya daha yatkın olduğu hakkında fikir vermektedir. Çizelgede görüldüğü gibi oksitlenmeye daha duyarlı kimyasal grupları içeren maleik anhidrit, silan ve sodium hidroksitle muamele edilmiş kompozitlerde daha UV ışık altında bekletmeyle beraber daha yüksek karbonil değerleri de elde edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında en çok saf DYPE matrisin bozunduğu sonra sırasıyla maleik anhidritli kompozit, alkali silan uygulamalı, silan uygulamalı, alkali uygulamalı ve son olarak da herhangi bir kimyasal işleme tabi tutulmamış kontrol T-FRP kompozit numunesi gelmektedir.

**Çizelge 6.3 : Saf DYPE matris ve kompozitlere ait karbonil değerleri.**

Numuneler	UV Bekleme Süresi (Saat)				
	0	100	250	500	1000
DYPE	0	0.0412	0.1149	0.28	0.479
Kontrol (T-FRP)	0.0034	0.0262	0.1506	0.2667	0.346
+NaOH	0.0065	0.0746	0.1573	0.2647	0.356
+Si	0.0190	0.0436	0.1878	0.2647	0.3654
+NaOH-Si	0.0264	0.0658	0.0772	0.2087	0.4033
+MA	0.0568	0.092	0.1466	0.322	0.451

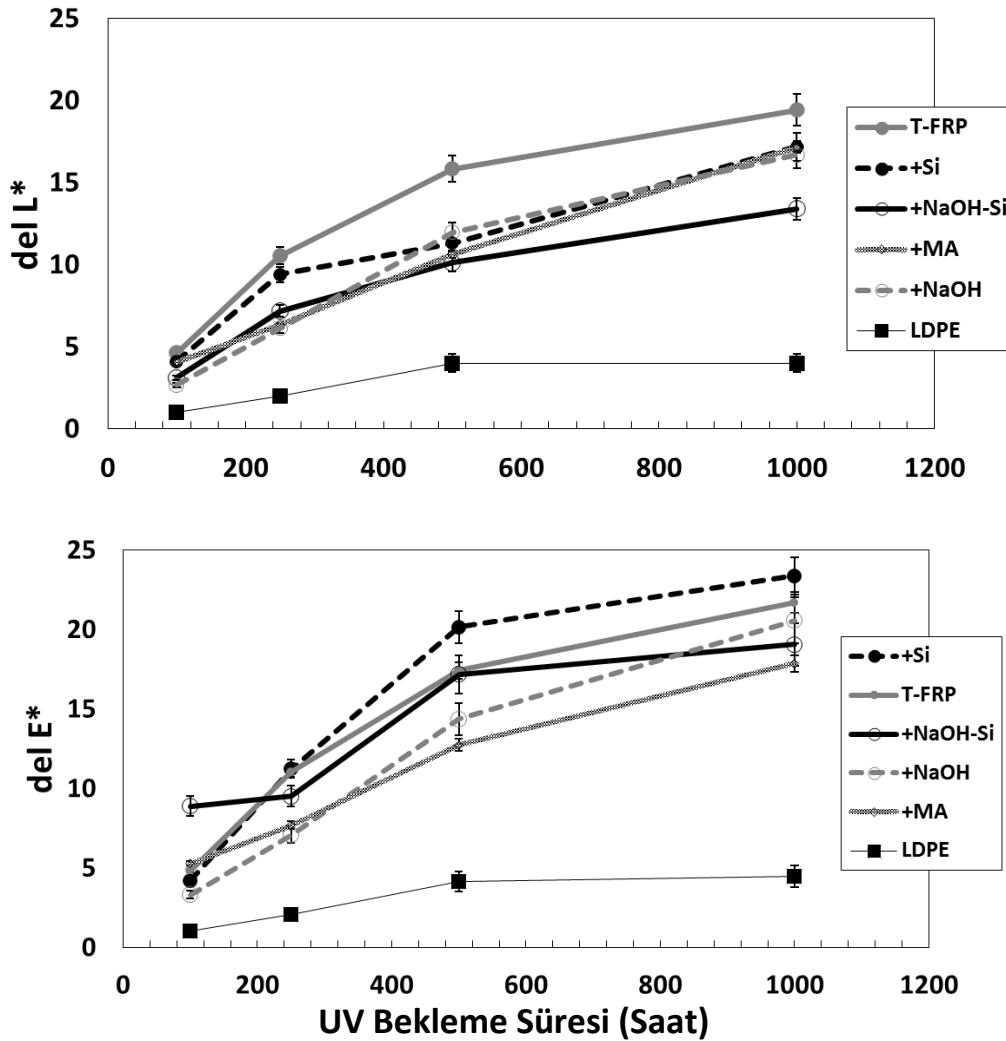
### 6.2.3 UV ışık altında yaşlandırma işleminin fiziksel özellikler üzerine etkileri

Polimer matrisli kompozitlerin UV ışınları altında yaşlandırılmasının malzemelerin mekanik performanslarına etkisinin yanında ayrıca fiziksel olarak dış görünümündeki değişimlerin de incelenmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda kompozitlerin ve saf DYPE matris malzemesinin renk değişim ölçümleri yapılmıştır. Renk değişim ölçümleri ASTM D2244 standartlarına uygun olarak yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış malzemelerin yüzey renklerindeki değişimler esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Datacolor 3890 marka Fotospektrometre cihazı kullanılarak renk ölçümleri yapılmıştır. Bu sistemde renk değişim ölçümlerinde yüzeyin rengi L, a ve b değerleri elde edilerek ölçülmektedir. L değeri yüzeyin aydınlık veya karanlık oluşuna göre, a değeri yüzeyin kırmızı veya yeşil oluşuna göre, b değeri ise yüzeyin sarı veya mavi oluşuna göre + ve - değerlerde

olmaktadır. Bu değerler ve formül 6.1 kullanılarak  $\Delta E$  değerine ulaşıp renk değişimindeki miktarlar sayısal olarak ifade edilebilmektedir.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (6.1)$$

UV ışın altında yaşlandırma işlemi kompozitlerin mekanik özelliklerinde olumsuz etki yaratmasının yanı sıra fiziksel olarak gözle görülebilir solmaya ve sararmaya sebep olduğu görülebilmektedir. Gerçekleştirilen renk ölçüm testleri ile renk değişimleri sayısal olarak ifade edilebilmektedir. Şekil 6.9’de sunulan grafiklerden anlaşılacağı üzere kompozit malzemeler UV ışık altında solma eğilimi göstermişlerdir.

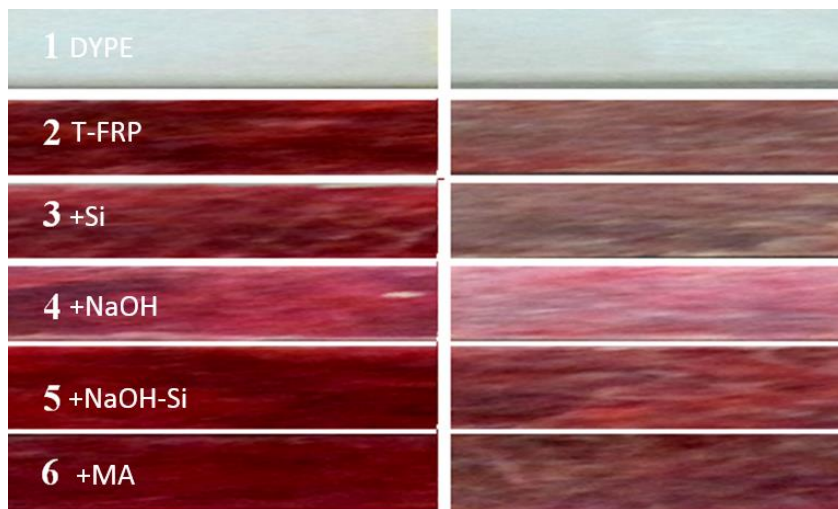


Şekil 6.9: Kompozit ve matris DYPE numunelerine ait UV ışık altında yaşlandırma neticesindeki solma ( $\Delta L$ ) ve toplam renk değişim ( $\Delta E$ ) grafikleri.

Konuyla ilgili çalışmalar incelendiğinde selülozun yapısında bulunan lignin yapısının foto bozunmaya en duyarlı yapıların başında geldiği söylenmiştir. Dolayısıyla

kompozitlerdeki renk değişim olayının temel nedenin ligninin foto oksitlenmesi sonucu, oksijen ve aracı fenoksi radikalleri arasındaki reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan renk değiştirici kimyasal maddeler tarafından kaynaklandığı söylenebilir [149,150].

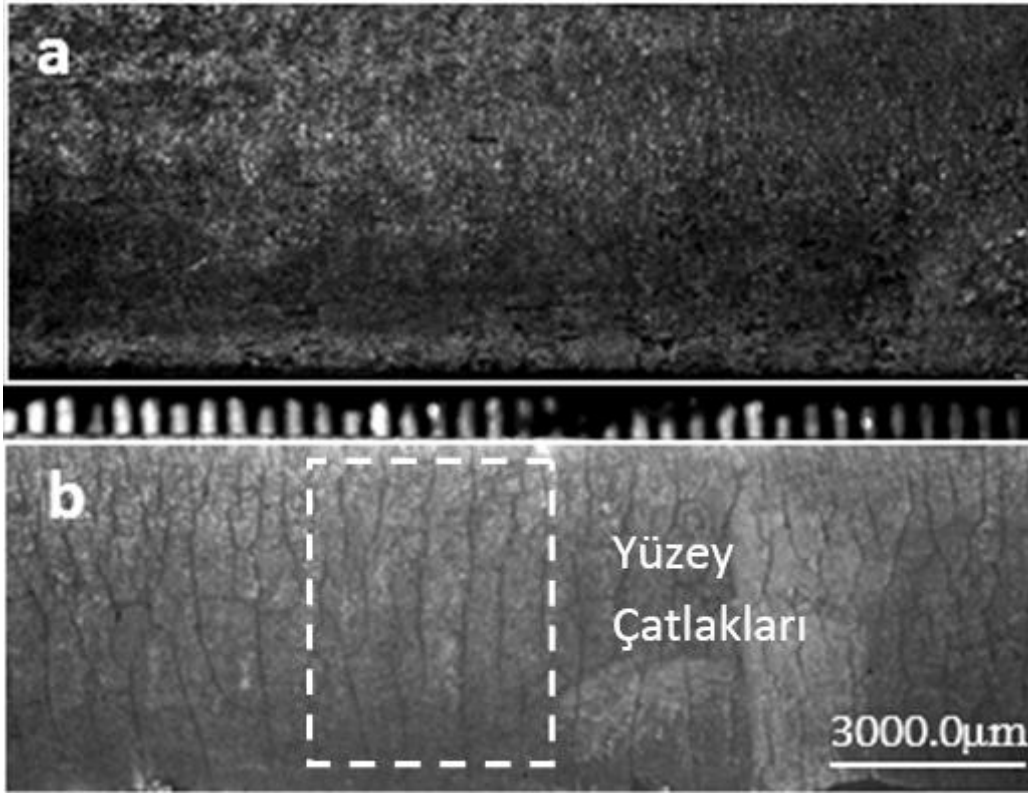
Test sonuçlarına göre genel olarak bakıldığında sarılık ve kırmızılık değerlerini gösteren b ve a değerleri karışık bir seyir izlerken solma değerini ifade eden L değerinin bekleme süresine göre sürekli bir şekilde arttığı rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Bunun yanı sıra toplam renk değişimini ifade eden  $\Delta E$  değerlerinin tüm kompozit numuneler için UV ışık altında bekleme süresiye beraber sürekli arttığı görülebilmektedir. Genel olarak, en belirgin renk değişim miktarları ilk 500 saat bekleme süresi için elde edildiği söylenebilir. 500 ile 1000 saat arası bekleme süreleri için  $\Delta L$  ve  $\Delta E$  değerlerin değişimlerinin azaldığı göze çarpmaktadır. Bir başka deyişle ilk 500 saate kadar hızlı bir renk değişimi, 500 saat sonrasında ise giderek yavaşlayan bir değişim söz konusu olmuştur. Diğer yandan grafiklerden görüldüğü gibi kimyasal uygulamaya sahip olmayan T-FRP kontrol kompozitinde 500 saat sonrasında ciddi bir renk değişimi gözlenmiş ve 1000 saat sonunda en yüksek değerine ulaşmıştır. Solma değerleri  $\Delta L$  bakımından T-FRP kontrol kompozit malzemenin en fazla solmaya uğrayan malzeme olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır. Kimyasal uygulamaya sahip kompozitlerin  $\Delta L$  değerleri 500 saate kadar benzer bir eğilim göstermiştir. Diğer yandan 1000 saat yaşlandırma neticesinde en az solmanın alkali uygulamaya sahip liflerle desteklenmiş kompozitlerde görülmüştür.



**Şekil 6.10:** Renk değişimleri başlangıç (sol) ve 1000 saat (sağ).

Renk ölçümleri saf DYPE matris için de ayrıca yapılmıştır. Bu sayede polimer matrisin kompozit malzemelerde gözlenen renk değişimleri üzerine etkisi de

irdelenmiştir. Ölçüm sonuçlarına bakıldığında 1000 saatlik UV ışık altında yaşlandırma işleminin DYPE matris üzerinde renk değişimi bakımından kayde değer bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Bu sonuç, pamuk lifinin renk değişiminde önemli bir rol oynadığını desteklemektedir. DYPE matriste yaşlandırmayla birlikte sarı-yeşil renk değişiminin gözlemlendiği görülmüştür. Şekil 6.10'da tüm numuneler için yaşlandırılmamış ve 1000 saat yaşlandırılmış yüzey durumları görülebilmektedir.

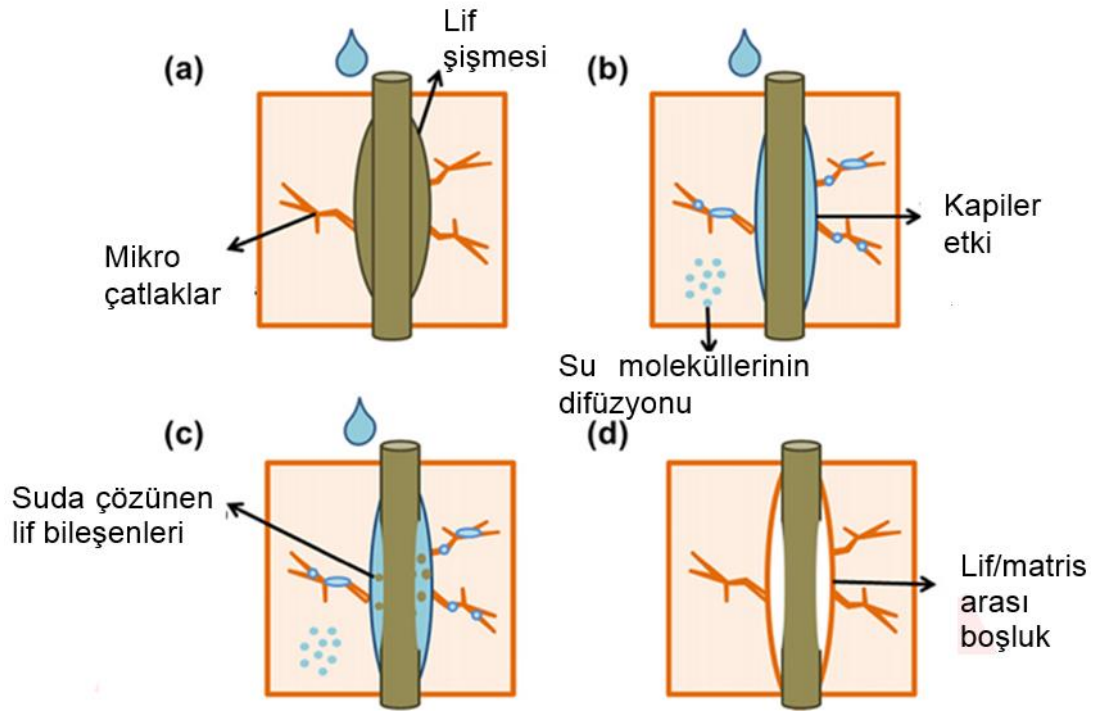


**Şekil 6.11:** Kompozitlerde UV ışık altında yaşlandırma neticesinde gözlenen makro yüzey çatlakları **a)** Yaşlandırılmamış **b)** 1000 saat yaşlandırılmış numune.

Fiziksel incelemeler kapsamında renk ölçümlerinin yanı sıra yüzey durumunun fiziksel analizleri stereo optik mikroskoplar yardımıyla incelenmiştir. Şekil 6.11'de kompozitlere ait başlangıç durumunda ve 1000 saat bekleme sonrasındaki yüzey durumları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kompozit malzemelerin UV ışık altında yaşlandırılmasının fiziksel olarak solmaya neden olmasının yanında yüzeylerinde çatlaklar da oluşabilmektedir (Şekil 6.11). UV ışık altında bozunma neticesinde ilk olarak 1000 saat sonrasında ortaya ve gözle görülebilir ölçekte oluşan çatlaklar mekanik özelliklerdeki düşüşlerin nedenleri arasında da sayılabilmektedir.

#### 6.2.4 Nem yutumunun fiziksel ve mekanik özellikler üzerine etkileri

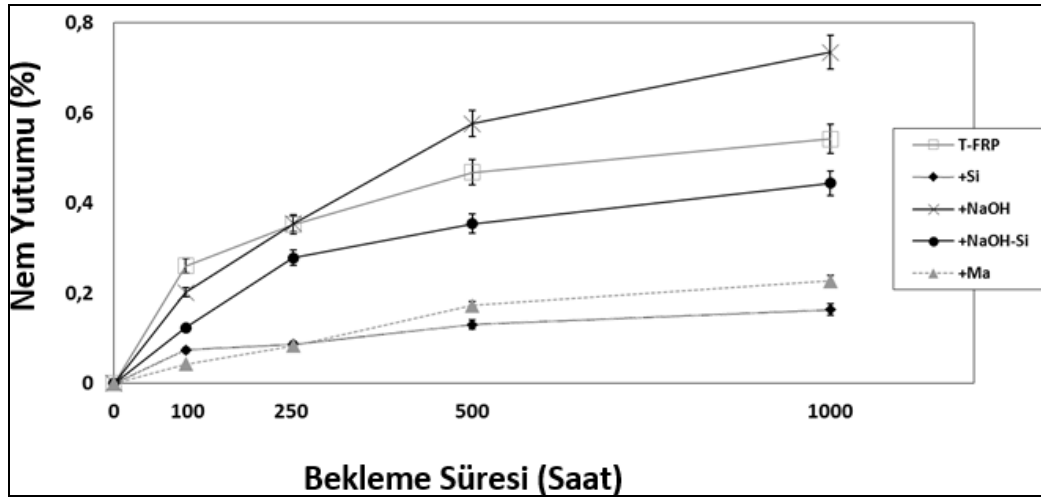
Doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen yaşlandırma işlemlerinde doğal lif takviyeli kompozitlerin performansları için önemli bir etken olan nem yutum özellikleri de incelenmiştir. Özellikle doğal liflerin hidrofilik yapısından kaynaklanan ve kompozitlerin mekanik performansına yansıyan bu durumu şekil 6.12’de sunulan nem yutum mekanizması ile gösterilmiştir. Nem yutumunun ilk aşamasında doğal lifler nem yutum sonrasında şişmeye başlar ve bunun neticesinde matriste mikro çatlaklar meydana gelir (a). Sonraki aşamada ise nem yutumu sonrasında oluşan mikro çatlaklar “kapiler etki” yaratarak su moleküllerinin mikro çatlaklar arasına sızmasına neden olur (b). Bir sonraki aşamada ise lif yüzeyindeki suda çözünebilir parçacıklar liften ayrılarak matris ve lif arasında boşluk oluşmasına, dolayısıyla tutunma durumunun etkilenmesine sebep olmaktadır (c ve d). Nem yutumundan kaynaklanan bu durum kompozitleri mekanik ve fiziksel olarak olumsuz bir şekilde etkilemektedir.



Şekil 6.12: Doğal lif takviyeli kompozitlerde nem yutum mekanizması [151].

Nem yutum çalışmaları kapsamında kompozit malzemelerin çekme, darbe, nem yutumu ve boyutsal kararlılık gibi özellikleri 100, 250, 500 ve 1000 saatlik zaman dilimleri için incelenmiş ve herhangi bir yaşlandırma işlemine maruz bırakılmamış kompozitlerle kıyaslanmıştır. Nem yutum özellikleri incelenirken yaşlandırma işlemi

oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup kompozit numuneler su dolu bir kaba tamamen batırılarak yapılmıştır. Her bir zaman dilimi sonrasında kompozit numunelerin ağırlıkları en az 5 tekrar olacak şekilde ölçümleri yapılarak nem yutumu miktarı hesaplanmıştır. Kompozitlerin mekanik özellikleri ise ölçümlerin hemen sonrasında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kompozit numunelerin çeşitliliği sayesinde lif / matris ara yüzey iyileştirme yöntemlerinin nem yutum özellikleri üzerine etkileri irdelenmiş ve elde edilen sonuçlar göz önüne bulundurularak çözüm olarak da önerilmişlerdir.



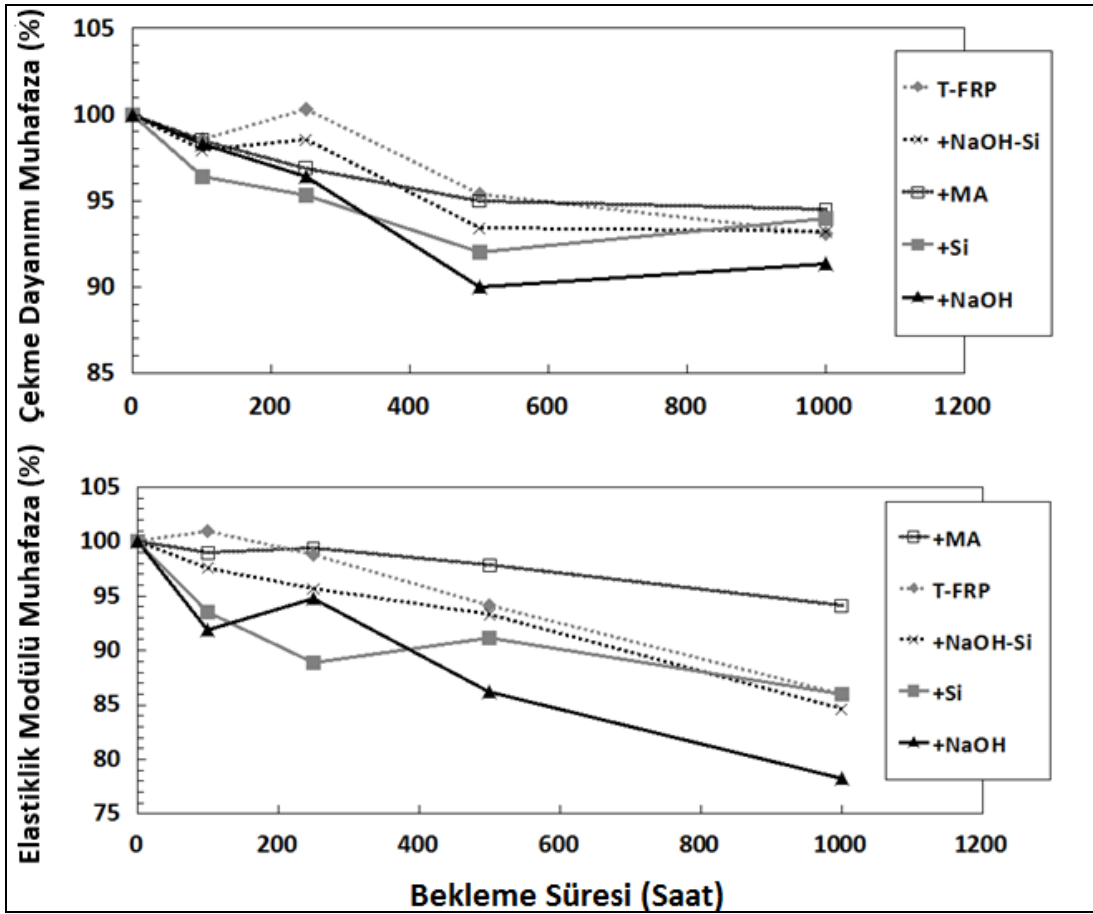
Şekil 6.13: Kompozitlere uygulanan kimyasal uygulamalara göre nem yutum miktarları.

Şekil 6.13'te kompozitlere uygulanan lif / matris ara yüzey iyileştirme çalışmalarına göre nem yutum miktarları bekleme sürelerine göre verilmiştir. Şekil 6.13'ten görüleceği üzere tüm kompozit numunelerde özellikle ilk 100 saatlik zaman diliminde hızlı bir nem yutum davranışı görülmektedir. Diğer yandan nem yutum miktarları ilerleyen bekleme sürelerinde yavaşlayarak artmıştır. Nem yutum çalışmalarından elde edilen bir diğer sonuç ise, kompozitlerin mekanik performanslarını iyileştirme amacıyla yapılmış işlemlerin nem yutum özelliklerine ayrıca olumlu etkilediği görülebilmektedir. Ölçümler sonrasında kimyasal işlem içeren kompozitlerin nem yutum miktarları 1000 saat bekleme sonrasında yaklaşık %0.2~0.6 aralığında değişmiştir. Lif matris ara yüzey durumunun iyileşmesiyle birlikte su moleküllerinin ilerleyebileceği ve kapiler etkinin oluşabileceği bir yapı engellenmesi zayıf lif matris ara yüzey durumuna sahip T-FRP kontrol numunesine kıyasla daha düşük nem yutum miktarlarına okunması neden olmuştur. Şekil 6.13'teki grafiklere göre maleik anhidrit içeren ve silan uygulamasına sahip

kompozitlerin nem yutumu bakımından en iyi performansları gösteren numuneler olduğu söylenebilir. Silan muamelesi ile kompozit malzemelerin nem yutum özellikleri iyileşmesinin sebebi olarak lifin yapısında bulunan selüloz bileşiği silan muamelesinden sonra nem yutamaz yani su ile hidrojen bağı oluşturamaz hale gelmektedir. Bundan dolayı silan ile muamele edilmiş atık kumaş takviyeli kompozitlerin diğer kompozit malzemelere göre nem yutum miktarı düşük kalmıştır. Maleik anhidrit katkısını içeren kompozit malzemelerde de silan ile iyileştirilmiş kompozitlerden elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmiştir. Maleik anhidrit lif ile matris arasındaki uyumu sağlayıp tutunmayı artırarak boşluk miktarını azaltıcı etkisi de vardır. Doldurulan bu boşlukların su moleküllerinin içeriye difüzyonu veya absorpsiyonu zorlaşmaktadır. Böylelikle kompozitlere maleik anhidrit bağlayıcı ajan katkısı mekanik özelliklerdeki iyileştirmenin yanı sıra dolaylı olarak nem yutum özelliklerini de iyileştirmektedir. Diğer taraftan alkalın uygulamasına sahip kompozitler numunelerin ise 1000 saat bekleme süresi sonrası %1.6 nem yutum miktarıyla en kötü performansı sergileyen numuneler olduğu görülmüştür. Alkalın işleme tabi tutulan kompozitlerin en kötü nem yutum özelliklerini sergilemesinin nedeni olarak NaOH çözeltisinde bekletilen liflerin yüzeyleri lifin yapısını oluşturan hemiselüloz, lignin ve diğer bileşenlerinden arındığı için bu liflerde selüloz miktarı daha fazla olmaktadır. Lifin yapısında bulunan selüloz, nemi kolayca tutacağından kompozit malzemede matris ile lif arasında boşluklar oluşacaktır. Bu durum da kompozit malzemenin daha fazla nem yutumuna neden olacaktır. Ayrıca alkalın uygulamasıyla beraber liflerin yüzeylerinde pürüzlülendirilmesiyle birlikte toplam yüzey alanı artmıştır. Artan lif yüzey alanıyla birlikte daha fazla su moleküllerinin yapıya alınması yüksek nem yutum miktarlarını açıklayabilmektedir. Ichazo ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada da benzer sonuçlar bulunmuştur [152]. Herhangi bir iyileştirme işlemine tabi tutulmamış, %25 atık kumaş ve %75 DYPE matris içeren kompozit malzeme ise zayıf lif matris arayüzey durumu ve boşluklu yapısından dolayı ikinci en kötü nem yutum özelliğini sergilemiştir.

Doğal lif takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli etken zayıf lif matris ara yüzey tutunma durumudur. Dolayısıyla lif matris tutunma durumunu bozan her türlü faktörün kompozitlerin mekanik dayanımlarını da olumsuz etkilemesi beklenmektedir. Nem yutum ile yapılan yaşlandırma işlemleri neticesinde kompozitlerin su moleküllerinin lif matris arayüzey bölgelerine difüzyon ile taşıdığı

test ve ölçümler sonucunda belirlenmiştir. Beklenildiği gibi kompozit malzemelerin çekme özelliklerinin nem yutumu sonrasında olumsuz şekilde etkilendiği şekil 6.14'te verilmiştir. Gerek iyileştirme işlemlerine tabi tutulmuş gerekse her hangi bir iyileştirme işlemine tabi tutulmamış kompozitlerde bekleme süresinin artışıyla birlikte düşüş eğilimi gözlenmektedir. Çekme dayanımı ve elastiklik modülünde gözlenen olumsuz durumun sebebi, kompozit yapı içerisine taşınan su moleküllerinin lif ve matris yapısını bozmasının yanı sıra lif / matris ara yüzey tutunma durumunu da olumsuz yönde etkilemesi gösterilebilir.



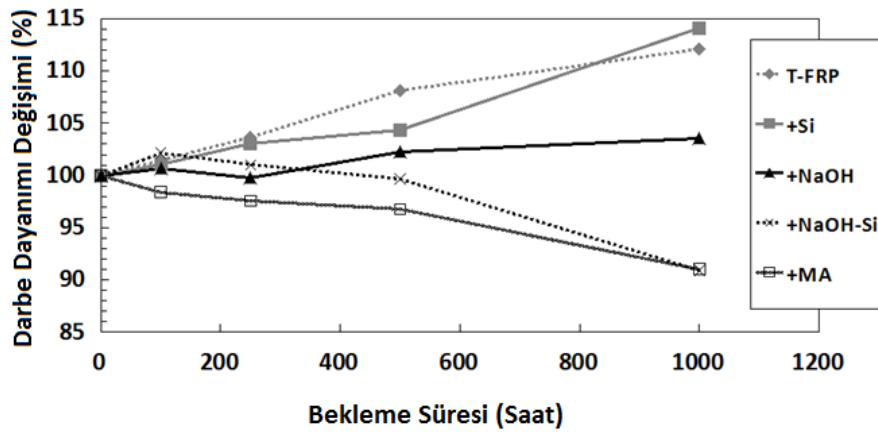
Şekil 6.14: Nem yutum işleminin kompozitlerin çekme özelliklerine etkisi.

T-FRP kontrol numunesinin çekme dayanımı ve elastiklik modülü 1000 saat bekleme süresi sonrasında sırasıyla %5 ve %15 düştüğü görülmüştür. Diğer yandan çekme testi sonuçlarına göre mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla yapılan kimyasal iyileştirme işlemlerinin nem yutum özelliklerine olumlu etkilediği ve bunun da çekme dayanım özelliklerine yansımaktadır. 100 ve 250 saatlik bekleme süreleri için tüm kompozit numunelerin çekme dayanımlarında yaklaşık olarak %5 oranlarında bir düşüş gözlenmiştir. 500 saat sonrasında kimyasal uygulamalara göre düşüş



oranlarında ayrışmalar başlamıştır. 1000 saatlik bekleme süresi sonrasındaki değişim oranlarına bakıldığında ise en düşük oranların maleik anhidrit katılmış ve atık kumaşların silan çözeltilisinde bekletildiği kompozit malzemede görülmektedir. Diğer yandan nem yutumu miktarı en fazla olan alkaline işleme tabi tutulmuş kompozit malzemenin çekme dayanımı ise % 8,68'lik düşüş ile en fazla değişimi gösteren kompozit malzeme olmuştur.

Kompozit malzemelerin elastiklik modülünün bekleme süresine bağlı olarak değişim grafikleri aynı şekilde verilmektedir. Sonuçlarına bakıldığında kompozitlerin çekme dayanımlarındaki değişime paralel olarak bir değişim gözlenebilmektedir. Alkaline işleme tabi tutulmuş kompozit malzemenin elastiklik modülü 1000 saatlik yaşlandırma neticesinde 445 MPa seviyelerinden yaklaşık %20 düşüşle 345 MPa seviyelerine gerilediği görülmektedir. Diğer yandan maleik anhidrit katılı kompozitte düşüş miktarı %5 civarında iken silan ile muamele edilmiş atık kumaş takviyeli kompozit malzemenin elastiklik modülü 1000 saatlik yaşlandırma neticesinde %15 azaldığı görülmektedir. Genel olarak bakıldığında ise nem yutumu ile yaşlandırmanın UV ışın altında gerçekleştirilen yaşlandırmayla bekleme süreleri açısından benzerlik taşıdığı sonucuna varılmıştır. Buna göre kompozit malzemeler 500 saatlik yaşlandırma sürelerine kadar genel olarak mekanik özelliklerini koruyabilmekte fakat bu süreden sonra önemli değişimler gözlenebilmektedir. Bir başka deyişle nem yutumu özellikleri ilk 100 saatlik bekleme sürelerinde görülmüş olsa da çekme özelliklerindeki değişimler esas olarak ilerleyen bekleme sürelerinde (500 saat) görülmüştür. Bu durum temel nedeni olarak da dayanım değerlerini etkileyen temel faktörler olan pamuk lifi ve lif / matris ara yüzey durumunun zamanla ilerleyen bekleme sürelerinde bozunmuş olmasıdır.



Şekil 6.15: Nem yutumu işleminin kompozitlerin darbe dayanımına etkisi.

Nem yutum sonrasında kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla çekme özelliklerinin yanı sıra darbe dayanımlarındaki değişimler de incelenmiştir. Şekil 6.15'te kompozit numunelerin bekleme sürelerine göre darbe dayanımlarındaki değişim oranları verilmiştir. Sonuçlarda ilk dikkate çeken nokta olarak çekme özelliklerine paralel bir değişim gözlenmiştir. 250 saat bekleme süresine kadar tüm kompozit numunelerde değişim oranları birbirine çok yakınken 500 saat bekleme süresi sonrasında kompozit türlerine göre ayrışmalar başlamış ve farklı değişim oranları gözlenmiştir. Bir diğer dikkat çeken sonuç ise her bir kompozit türü nem yutumuyla birlikte farklı eğilimler göstermiştir. Örneğin T-FRP ve +Si uygulaması içeren kompozit numuneler nem yutumuyla beraber darbe dayanım değerleri artış eğilimi göstermiş, diğer taraftan +NaOH-Si ve +MA kimyasal uygulamalarına sahip kompozit numunelerin darbe dayanım değerlerin nem yutumuyla birlikte azalma eğilimi göstermiştir. Buradan anlaşılacağı üzere nem yutumuyla birlikte darbe dayanım değişimlerinin lif / matris ara yüzey iyileştirme işlemlerine çekme özelliklerine göre çok daha bağımlı bir şekilde değiştiği söylenebilir.

Darbe dayanım değerlerinde daha karmaşık ve farklı eğilimlerinin görülmesini aşağıdaki iki nedene bağlayabiliriz;

- +MA ve +NaOH-Si uygulamalı kompozitlerde nem yutumuyla birlikte lif / matris ara yüzey durumunun bozulmasından ziyade matriste çatlak oluşumu şeklinde bir bozunma oluşmuş olabilir. Bu durumda yine lifin gevrek karakteristiği ön plana çıkmış ve bu duruma ilave olarak zamanla oluşan çatlaklar kompozit yapının daha gevrek davranmasına, dolayısıyla darbe dayanım değerlerinin düşmesine neden olmuştur.
- Diğer taraftan +NaOH, +Si ve kontrol kompozit malzemesinin darbe dayanımlarındaki yükseliş eğiliminin nedeni olarak lif / matris ara yüzey tutunma durumunun bu tür kompozitlerde bozunması, dolayısıyla darbe dayanım değerlerinde liften ziyade matris fazının daha baskın olmasına yol açması gösterilebilir. Ayrıca yapı içerisine hapsolan su moleküllerinin yapıda “plastikleştirici” etkisi göstermesi de darbe dayanım değerlerindeki artışın diğer bir neden olarak gösterilebilmektedir [133].

### 6.2.5 UV koruyucu katkıların mekanik özellikler üzerine etkileri

Çevresel şartların kompozitlerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri üzerine etkilerinin incelendiği ikinci aşamada ise özellikle güneş ışınlarının zararlı etkilerinden korunmak amacıyla kullanılacak yöntemler üzerine durulmuştur.

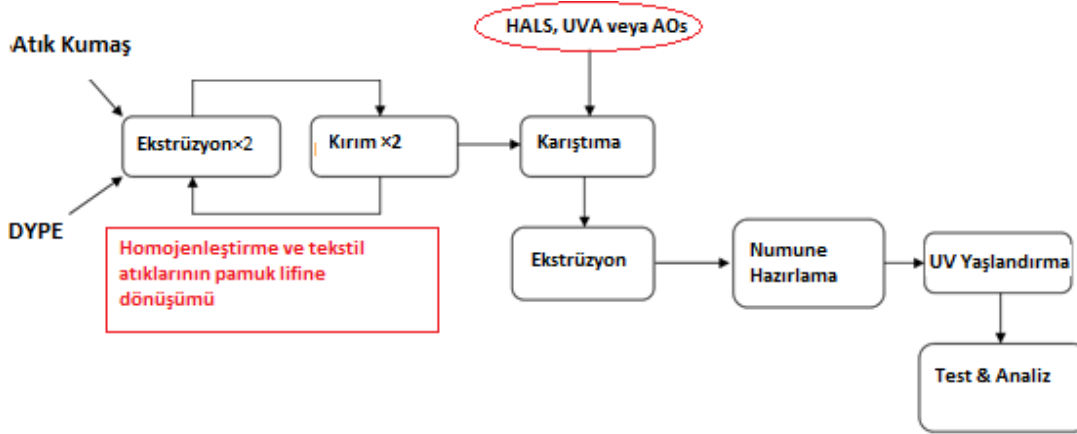
Çalışma kapsamında geniş bir literatür araştırması neticesinde doğal lif takviyeli kompozit malzemelerin dış ortam ürünlerinde kullanılması ve olumsuz çevresel koşullardan en az derecede etkilenmesi sağlayacak bir takım kimyasal katkıları bulunmaktadır. Bunların en önemlileri Antioksidanlar (AOs), HALS ve Absorbanlardır (UVA). Bu tür kimyasal katkıları, kompozit malzemelerin üretimi esnasında toz halinde belli oranlarda katılarak kullanılmaktadırlar. Ultraviyole ışınlarına ve ışığa maruz kalan polimerin sararmasını geciktirir. UVA kimyasal katkıları, polimer malzemeye zararlı etkisi olan yüksek UV enerjisini absorbe edip, bu enerjiyi molekül içi proton transferi ile zararsız bir hale getirerek malzemeyi korur. Moleküler ağırlığı fazla olan UV absorberlerinin kullanılması, polimerin stabilizasyon etkinliğinin artırılmasında önemli bir faktördür. Polimerin üzerinde görünmez bir tabaka oluşturur. Böylece ışık yüzeye gelmeden yansır. Diğer taraftan HALS (Hindered amine light stabilizers) kimyasal katkısı yüksek enerjili ışığın polimer zincirindeki etkisiyle oluşan serbest radikalleri temizleyerek malzemeye zarar verecek zincir reaksiyonları engeller ve bu sayede malzemenin kullanım ömrünü uzatır. UV ışına maruz kalınma süresine göre etkinliği değişmektedir. Kısa sürelerde yüksek koruma etkinliğine sahipken geçen süre içerisinde etkinliği hızlı bir şekilde yitirebilmektedir. Antioksidanlar ise plastik sektörünün her dalına hitap eden geniş bir ürün yelpazesine sahiptir. Antioksidanların en önemli görevi polimer malzemeyi ısıl oksidasyonun yıpratıcı etkilerinden korumak ve bu sayede kullanım ömrünü uzatmaktır. Bu tür bir koruma polimerlere, ısıl işlem, fabrikasyon, depolama ve de oda sıcaklığı uygulamaları süresince gereklidir.

Işık düzenleyici (Light Stabilizers- HALS) olarak Chimasorb 944 katkısı düşük yoğunluklu polietilen için üretici tarafından tavsiye edilen oranlar olan % 0.5 ve % 1 oranları, Antioksidant olarak tinuvin 326 için % 0.2 - 0.4 ve UV absorblayıcı olarak Irganox 1010 için ise % 0.5-1 oranları tercih edilmiştir. Kumaş oranının çalışmalardan elde edilecek sonuçlara herhangi bir etkisinin olmaması açısından ağırlıkça %25 kumaş oranı olacak şekilde sabit tutulmuştur. Çizelge 6.4'te ise çalışma kapsamında incelen kompozitlere ve içerikleri verilmiştir.

**Çizelge 6.4 :** Kompozit numuneler ve içerikleri.

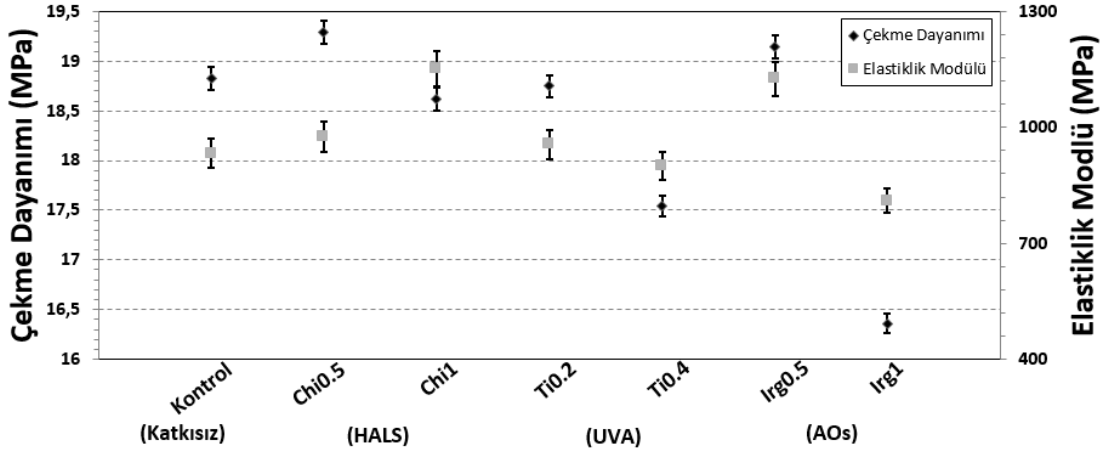
Katkı	Kısaltma	Takviye	Matris	Katkı oranları		
		Pamuk lifi (wt%)	DYPE (wt%)	HALS (wt%)	UVA (wt%)	AO (wt%)
Katkısız	T-FRP ( <i>Kontrol</i> )	25	75	-	-	-
HALS	T-FRP-Chi0.5	25	74.5	0.5	-	-
	T-FRP-Chi1	25	74	1	-	-
UVA	T-FRP-Ti0.2	25	74.8	-	0.2	-
	T-FRP-Ti0.4	25	74.6	-	0.4	-
AOs	T-FRP-Irg0.5	25	74.5	-	-	0.5
	T-FRP-Irg1	25	74	-	-	1

Kompozit malzemelerde kullanılan kimyasallar üretim esnasında toz halinde ekstrüderin besleme kısmından eklenmiştir. Herhangi bir bozunmaya maruz kalmamaları açısından en son basamaktaki ekstrüzyon işleminde kompozit malzemeye eklenmişlerdir (Şekil 6.16).



**Şekil 6.16:** Üretim / numune hazırlama ve test – analiz basamakları.

Çalışmada öncelikle yaşlandırmayı geciktirici katkıların kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemek amacıyla yaşlandırma işlemine uğramamış numuneler üzerine testler ve inceleme yapılmıştır. Sonraki aşamada ise numuneler iklimlendirme kabini hızlandırılmış yaşlandırma işlemine maruz bırakılmışlardır. Böylelikle numunelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri yaşlandırma öncesinde ve yaşlandırıldıktan sonra irdelenmiştir.



Şekil 6.17: Kimyasal katkı oranlarına göre kompozitlerin çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerlerindeki değişimleri.

Şekil 6.17'de her hangi bir yaşlandırma işlemine maruz bırakılmamış, sadece koruyucu kimyasal katkıları numune kalınlığı ve matris malzemesine göre tavsiye edilen farklı ölçülerde içeren kompozitlere ait çekme test sonuçları sunulmaktadır. Karşılaştırma yapılabilmesi açısından koruyucu içermeyen kompozit numunelere ait sonuçlar da verilmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere T-FRP kompozit malzemesinin çekme özellikleri kimyasal katkıların oranlarından ve türlerinden etkilenmiştir. Grafiklere göre antioksidan olarak katılan Irganox 1010 katkısının % 0.5 gibi çok düşük oranda bile katılması elastiklik modülü değerlerinin kontrol numuneye göre yaklaşık % 20 artmasına neden olmuştur. Bunun yanı sıra antioksidan miktarının % 0.5'den % 1'e çıkması durumunda ise kompozit numunelerin çekme özellikleri düşüş eğilimi göstermiştir. Antioksidan miktarıyla gözlenen bu değişim Mohd ve arkadaşlarının yürüttüğü bir çalışmada da gözlenmiştir [153]. Çalışmalarına göre pirinç ve talaş tozu takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen kompozitlerin çekme özelliklerinde % 0.5 antioksidan (Irganoks 1010 ve Irgafos 168 karışımı) katılımıyla artış sağlandığı belirtilmiştir. Diğer taraftan optimum antioksidan oranı aşıldığı durumlarda ise dayanım değerlerinin düştüğü görülmüştür. Buna göre doğal lif takviyeli kompozitlerde antioksidanların ideal oranlarında katılması durumunda lif / matris ara yüzey tutunma durumunu arttırarak dayanım değerlerinde olumlu etki oluşturduğu söylenebilmektedir [154].

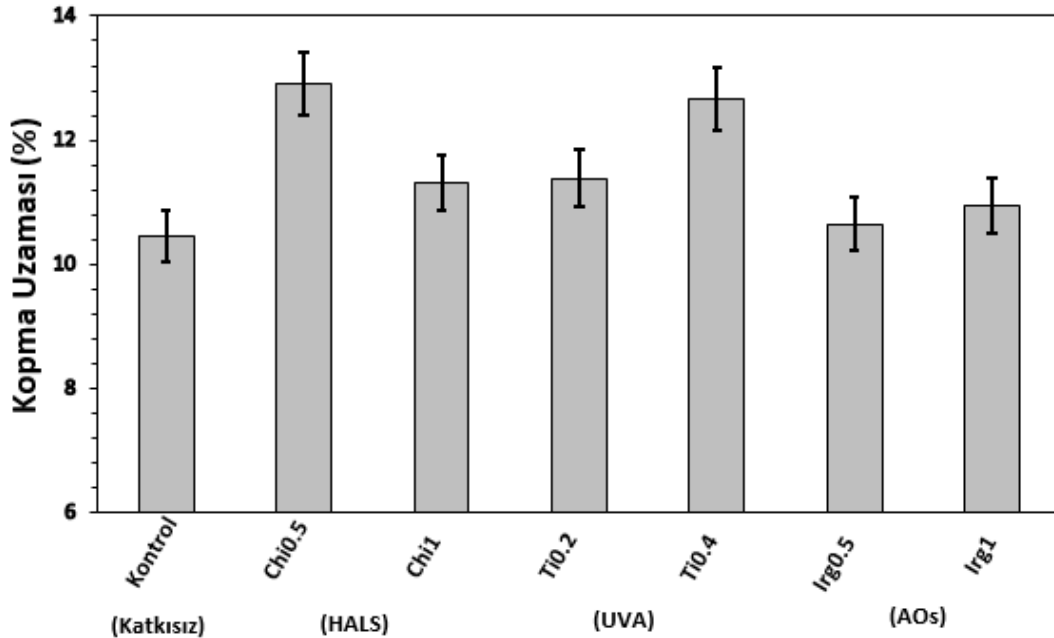
HALS katkısı içeren kompozitlerde ise çekme özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmediği görülmektedir. % 0.5 oranında katkı içeren kompozitlerin çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerleri katkı içermeyen kontrol kompozite kıyasla

kayda değer bir değişim göstermemiştir. Diğer yandan %1 HALS içeren kompozitlerin elastiklik modülleri yaklaşık olarak % 25 daha yüksek ölçülmüştür.

UVA içeren kompozit malzemelerde ise % 0.2 oranının kompozitinin çekme özelliklerine etkisi olmadığı test sonuçlarından görülebilmektedir. Diğer yandan daha yüksek UVA katkısıyla beraber çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerlerinde sırasıyla % 7 ve % 4 düşüşler gözlenmiştir.

Çalışmadan çıkarılabilecek genel bir sonuç olarak çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerlerinin düşük kimyasal katkı oranlarında önemli ölçüde değişmediği, yüksek katkı oranlarında ise tüm katkı türleri için düşüşlerin meydana gelebileceğidir. Bu durumun sebebi kompozitlere katılan UV koruyucu katkıları olarak kullanılan kimyasalların düşük molekül ağırlıklarında sahip olması ve böylelikle kompozit yapıda “plastikleştirici” etkisi oluşturabilmesi gösterilebilir ( $M_{WLDPE}$ :28000 g/mol,  $M_{WAOS}$ :1178 g/mol,  $M_{WHALS}$ :2000-3100 g/mol,  $M_{WUVA}$  :316 g/mol) [155].

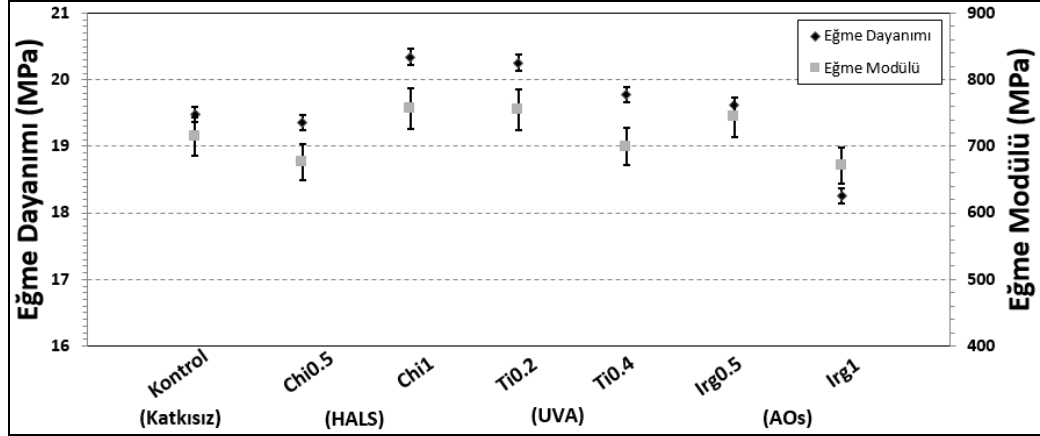
Çekme dayanımı ve elastiklik modülü sonuçlarına ek olarak koruyucu katkıların kopma uzaması değerleri üzerine etkileri de çekme özellikleri kapsamında incelenmiştir (Şekil 6.18).



Şekil 6.18: Kompozitlere ait kopma uzaması değerleri.

Şekil 6.18'deki sonuçlara göre koruyucu katkıların kompozitlerin kopma uzaması değerlerinde kayda değer değişimlere neden olmadığı, fakat genel olarak daha

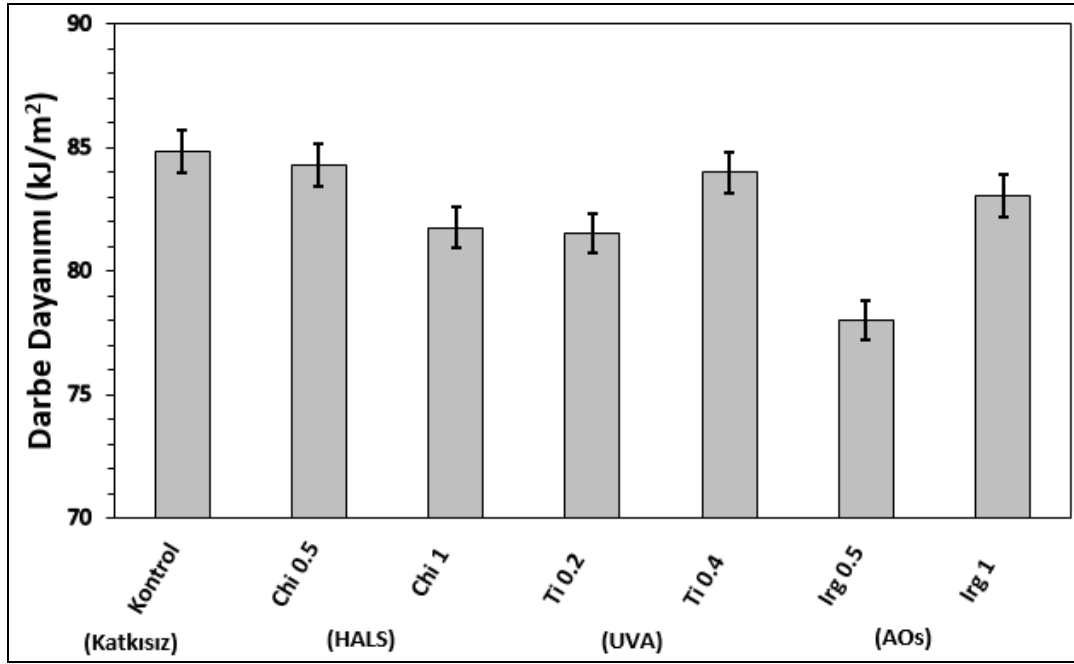
yüksek kopma uzaması değerlerinin görülmesine sebep oldukları söylenebilir. Daha önceden de açıklandığı gibi düşük molekül ağırlıklarına sahip bu tip koruyucu katkıların malzemelerde “plastikleştirici” olarak etki ettiği kopma uzamansı değerlerindeki eğilimden de anlaşılmaktadır. Herhangi bir koruyucu katkı içermeyen kompozit numunelerin kopma uzaması değerleri yaklaşık % 10 civarında iken, UV koruyucu katkı içeren kompozitlerde ise yaklaşık olarak % 11-13 arasında değişen kopma uzaması değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.19: Kompozitlere ait eğme özellikleri.

Şekil 6.19’da ise koruyucu katkı tipi ve oranlarına göre kompozit malzemelerin eğme özelliklerindeki değişim grafikleri verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında eğme dayanımı ve eğme modülü değerlerinin çekme özellikleriyle benzer eğilimde değiştikleri görülmüştür. Herhangi bir katkı içermeyen T-FRP kompozitin eğme dayanımı ve eğme modülü sırasıyla 19.48 ve 714MPa değerlerinde çıkmıştır. Diğer yandan en yüksek eğme dayanımı (20,34 MPa) % 1 Chimasorb (HALS) içeren kompozitte görülürken, en düşük eğme dayanımı (18,26 MPa) ise % 1 oranda Irganoks katkısıyla ölçülmüştür. Eğme testinden elde edilen bir diğer sonuç ise %0.4 Tinuvin (UVA) ve % 0.5 Irganoks (AOs) içeren kompozitlerin koruyucu katkısız T-FRP kompozitlerle aynı eğme özellikleri görülmüştür.

Korucuyu kimyasal katkı türü ve oranları için kompozitlerin darbe dayanım değerleri şekil 6.20’de verilmiştir. Buna göre kimyasal katkı içermeyen kompozit yapının darbe dayanım değeri yaklaşık olarak 85 kJ/m<sup>2</sup> mertebesindedir. Kimyasal katkıların darbe dayanım değerlerine önemli bir etkisinin olmadığı görülürken % 0,5 Irganox katkısıyla beraber yaklaşık olarak 78 kJ/m<sup>2</sup> civarında bir darbe dayanım değeri saptanmıştır. Tüm durumlarda kompozitlerin darbe dayanım değerlerinin 78~82 kJ/m<sup>2</sup> aralığında değiştiği gözlenmiştir.



Şekil 6.20: Kompozitlere ait darbe dayanım değişimleri.

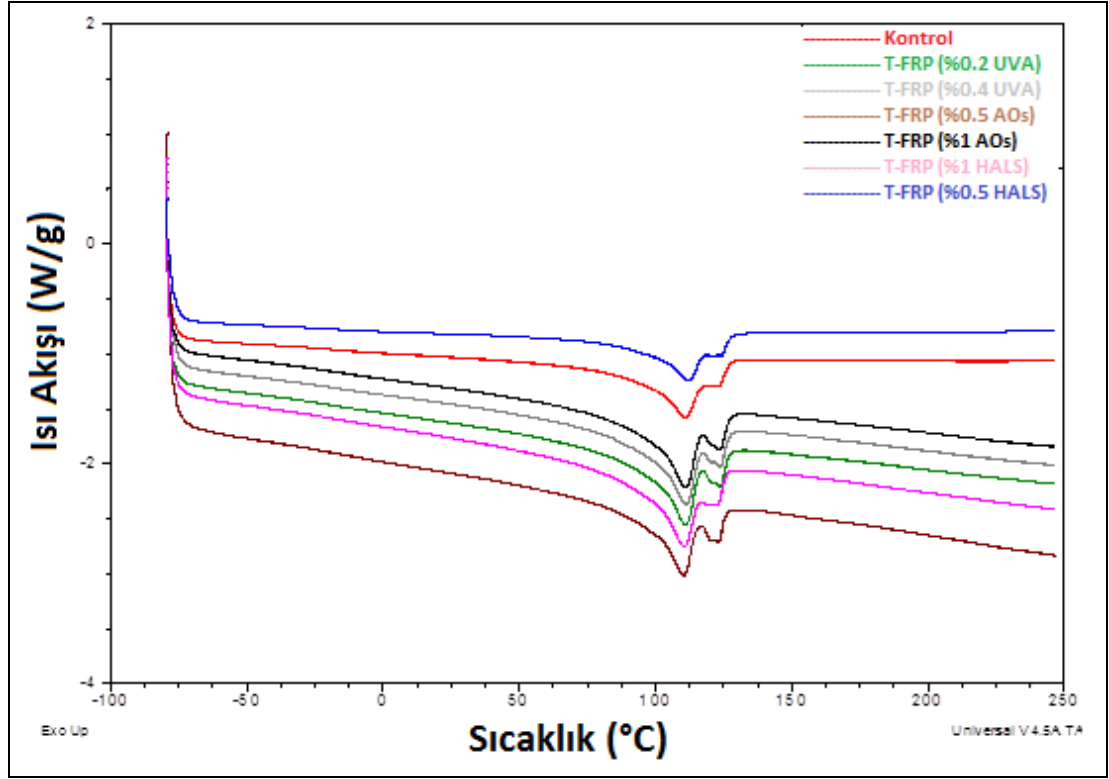
Mekanik testler neticesinde sonuçlara genel olarak bakıldığında yaşlandırma sürecinin olumsuz etkilerini bertaraf etmek ve bozunma sürecini yavaşlatmak amacıyla Düşük Yoğunluklu Polietilen (DYPE) matrisli termoplastik kompozit malzemelere katılan HALS, UV absorband ve Antioksidant gibi kimyasal katkıların en ideal oranları baz alındığında kompozitlerin mekanik özelliklerinde önemli değişimlerin olmadığı çalışma neticesinde bulunmuştur. Bunun yanısıra doğru oranlarda kullanıldığı takdirde belli miktarda artışların bile sağlandığı görülebilmektedir. Çalışmanın devamında kimyasal katkıların bozunma sürecine nasıl bir etkisinin olduğu irdelenecektir. Bu amaçla ideal oranlar göz önüne alınarak katılan kimyasalları içeren kompozit malzemelere iklimlendirme kabinde yaşlandırma işlemi yapılmıştır.

#### 6.2.6 UV koruyucu katkıların ısıl özellikler üzerine etkileri

UV koruyucu katkıların kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin yanı sıra ısıl özellikleri de incelenmiştir. Bu amaçla DSC analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.21’de koruyucu katkı tipi ve kompozit yapı içerisindeki oranlarına göre DSC grafikleri verilmiştir. Şekildeki grafiklerden anlaşılacağı üzere tüm kompozit numuneler koruyucu katkı türü ve oranlarından bağımsız bir şekilde tek bir erime noktası sergilemiştir. Ayrıca koruyucu katkıların ve farklı oranlarının kompozitlerin erime noktasında her hangi bir değişiklik oluşturmamış, yaklaşık olarak aynı erime



noktası değerleri gözlenmiştir. T-FRP kontrol numunesi için erime sıcaklığı 111,2°C okunurken, UV koruyucu katkılı kompozitlerin erime sıcaklıkları 110.8°C ile 112.3°C arasında değişmiştir.



Şekil 6.21:UV koruyucu katkı içeriğine göre kompozitlerin DSC eğrileri.

DSC ısı analizini ayrıca kompozit malzemelerdeki DYPE matrisin % kristallik oranını formül 6.2 yardımıyla hesaplamada yardımcı olabilmektedir.

$$\%Kristallik = \frac{\Delta H}{\Delta H_m} \times \frac{100}{W} \quad (6.2)$$

$\Delta H$  değeri DYPE matris için erime ısısı olup, DSC eğrisinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla bulunmaktadır [156].  $\Delta H_m$  ise %100 DYPE malzemesinin erime ısısı,  $W$  ise DYPE matrisin kompozitteki ağırlıkça oranıdır. Wunderlich'e göre  $\Delta H_m$  değeri 293 J/g olarak alınabilir [122]. Tüm kompozit yapılar için DYPE matrisin kristallik oranı hesaplanmış ve çizelge 6.5'te verilmiştir.

**Çizelge 6.5 :** UV koruyucu katkı türü ve oranlarına göre kompozitlerin ısııl özellikleri.

UV Koruyucu	Malzeme	T <sub>m</sub> (°C)	ΔH (J/g)	X <sub>c</sub> (%)
Katkısız	T-FRP ( <i>kontrol</i> )	111,2	84,4	38,6
HALS	T-FRP-Chi0.5	112,3	73,8	33,3
	T-FRP-Chi1	110,7	80,7	37,5
UVA	T-FRP-Ti0.2	111,2	78,1	35,1
	T-FRP-Ti0.4	111,3	90,8	35,1
AOs	T-FRP-Irg0.5	110,4	80,0	38,5
	T-FRP-Irg1	111,2	77,1	36,2

Genel olarak sonuçlara bakıldığında, UV koruyucu katkılı T-FRP kompozitlerin kontrol numunesine kıyasla daha düşük kristallik değerleri gözlenmiştir. T-FRP kontrol numunesinin kristallik değeri %38,4 iken, katkılı kompozitlerdeki DYPE matrisin kristallik yüzdeleri %33 ile %38,5 değerleri arasında değiştiği bulunmuştur. En düşük kristallik değeri ise %0,5 Chimisorb (HALS) katkılı kompozitlerde görülmüştür.

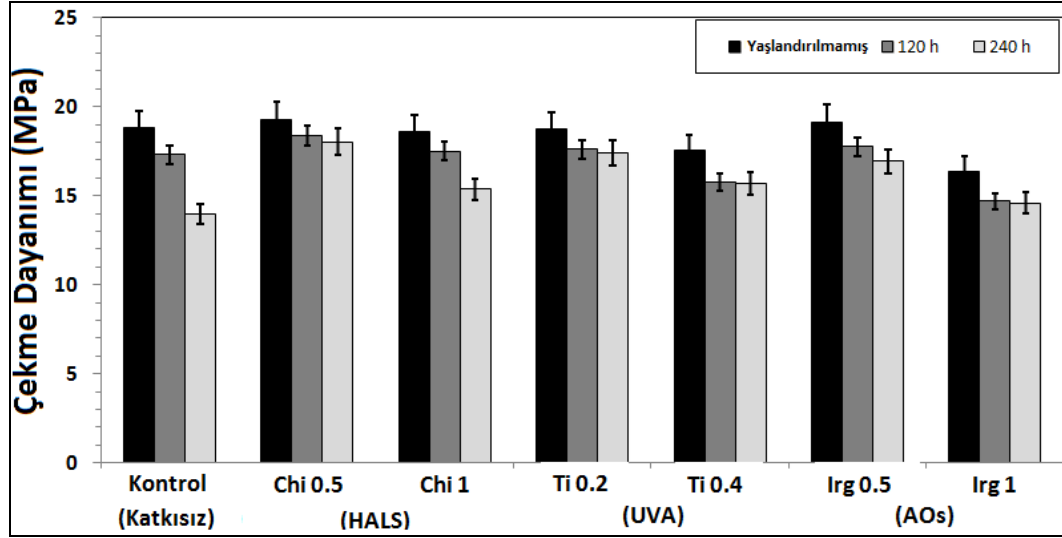
#### **6.2.7 UV koruyucu katkıların yaşlandırmaya karşı performansı**

Çalışmanın bundan sonraki aşamasında koruyucu katkıların UV ışığına maruz kalan kompozitlerin mekanik, ısııl ve fiziksel anlamda etkileri irdelenmiştir. Bu amaçla tüm kompozit numuneler 120 ve 240 saat bekleme sürelerinde hızlandırılmış yaşlandırma işlemine maruz bırakılmıştır. Her iki bekleme süreleri sonrasında kompozitlerin çekme özellikleri, renk değişimleri ve ısııl özellikleri incelenmiştir.

Kompozit malzemelerin Ultra viyole (UV) ışın altında bozunmaya karşı dirençlerinin artırılmasına yönelik olarak katılan kimyasal katkıların çekme dayanımları üzerine etkilerini gösteren grafik şekil 6.22’de gösterilmiştir.

Beklenildiği gibi yaşlandırma beraber tüm kompozit yapıların çekme dayanım değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Düşüş miktarları kullanılan kimyasal katkı ve oranlarına göre farklılık göstermektedir. Buna göre herhangi bir kimyasal katkı kullanılmamış kompozit malzemenin ilk 120 saatlik yaşlandırma süresi baz alındığında çekme dayanımı diğer kompozit malzemelere paralel bir düşüş göstermiştir. İleri yaşlandırma süresi olarak T-FRP kontrol numunesi 240 saatlik yaşlandırmayla beraber en fazla düşüş gösteren malzeme olduğu görülmektedir. 240 saat sonrasında yaklaşık olarak %25’lik bir kayıp ile 18,83 MPa değerinden 13,97 MPa değerine düşüşü söz konusu olmuştur.

UV koruyucu katkıli kompozit numunelerde ise 120 saat bekleme süresi dikkate alındığında katkıların mekanik özellikler üzerine olumsuz etkisi pek görülememiştir. Diğer yandan kimyasal katkıların etkisinin yaşlandırma süresinin artışıyla beraber ön plana çıktığı söylenebilir. Diğer bir deyişle 120 saatlik yaşlandırma süresinde hemen hemen tüm kompozitlerde benzer değer kayıpları gözlenmiş ve yaklaşık olarak düşüş miktarları %10 – 15 arasında değişmektedir. Düşüş miktarları 240 saatin sonrasında da kayda değer bir değişime uğramamıştır.



Şekil 6.22: Koruyucu katkı tipine, oranlarına ve bekleme sürelerine göre kompozitlerin çekme dayanım değerlerindeki değişimleri.

UV koruyucu katkıların bekleme sürelerine göre kompozitler üzerine etkilerini daha net anlayabilmek çizelge 6.6'da bekleme süreleri arasındaki değişim oranları verilmiştir. Çizelgeden anlaşılacağı üzere koruyucu katkı türünden ve oranlarından bağımsız olarak tüm kompozit numunelerin çekme dayanım değerleri 120 saatlik bekleme süresi sonrasında yaklaşık olarak %6-10 arasında düşüş göstermiştir.

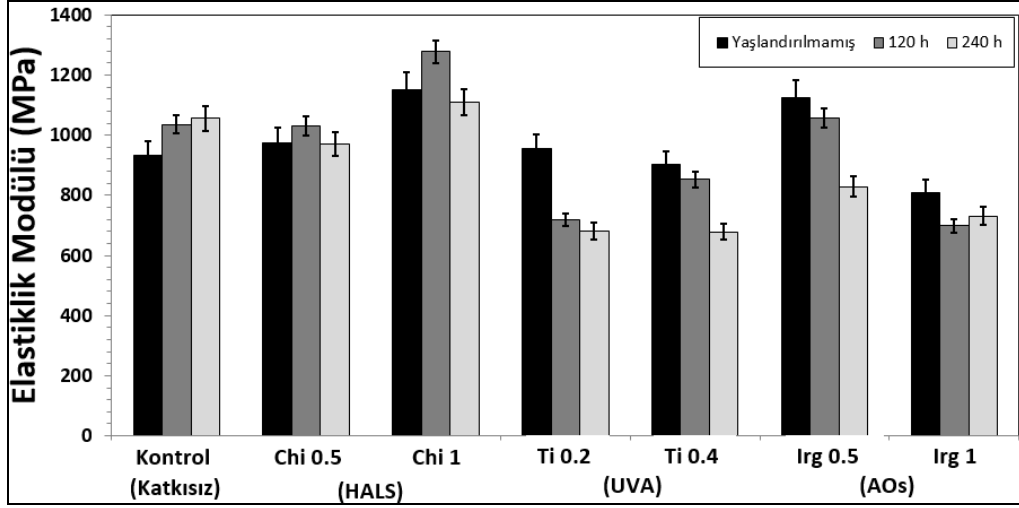
Çizelge 6.6 : Bekleme sürelerine göre kompozit malzemelerin çekme dayanımlarındaki değişim oranları.

Malzeme	$\Delta\sigma_{120-0}$ (%)	$\Delta\sigma_{240-120}$ (%)	$\Delta\sigma_{240-0}$ (%)
T-FRP	-8.12	-19.24	-25.80
T-FRP-Chi0.5	-4.76	-1.85	-3.47
T-FRP-Chi1	-6.06	-12.23	-17.56
T-FRP-Ti0.2	-6.18	-0.96	-7.09
T-FRP-Ti0.4	-10.03	-0.57	-10.54
T-FRP-Irg0.5	-7.31	-4.67	-11.64
T-FRP-Irg1	-10.20	-0.74	-10.88

Diğer taraftan 240 saat ve 120 saat bekleme süreleri arasındaki çekme dayanım değişim değerleri ( $\Delta\sigma_{240-120}$ ) göz önüne alındığında çekme dayanım değerlerindeki

düşüş miktarlarının katkı türüne ve oranlarında bağımlı olarak yavaşlamaktadır. (Çizelge 6.6). Örneğin % 0.4 oranında Tinuvin (UVA) içeren kompozitlerin çekme dayanım değerleri 240 saat sonrasında 120 saat bekleme süresine göre neredeyse değişmediği (-% 0,57) görülmüştür. Diğer taraftan koruyucu katkı içermeyen kompozit numunelerin çekme dayanımı sürekli bir şekilde düşüş göstermiş, 120 ile 240 saat yaşlandırma arasındaki çekme değerlerinde yaklaşık % 20 fark oluşmuştur ( $\Delta\sigma_{240-120}$ : % 19.24). Dolayısıyla bu tür UV koruyucu katkıların yaşlandırma sürelerinin artışıyla etkinlikleri daha ön plana çıkmaktadır. Diğer bir sonuç ise HALS ve UVA katkılı kompozitlerin AOs içeren kompozitlere kıyasla çekme dayanımları dikkate alındığında daha etkili söylenebilir. 240 saat bekleme neticesinde kompozitlere % 0.5 HALS ve % 0.2 UVA katkısıyla en iyi performanslar yakalanırken, AOs katkısının her iki oranlarında ise benzer performanslar yakalanmıştır. Diğer yandan  $\Delta\sigma_{240-120}$  değerlere bakıldığında % 1 Irganox (AOs) katkısının bu süre zarfı için çok etkili olmuştur. Diğer önemli bir sonuç olarak özellikle Chimasorb (HALS) kimyasal katkısının % 0,5 oranında kullanılmasıyla yaşlandırmaya karşı kompozit polimer malzemenin bozunmasını geciktirerek kompozit malzemenin çekme dayanımı önemli bir derecede koruyabilmesidir.

Şekil 6.23'te kompozit malzemelerin yaşlandırma sürelerine göre elastiklik modülündeki değişim grafikleri verilmektedir. Tez çalışmasının daha önceki bölümlerinde gözlendiği gibi bu çalışmanın sonucunda da katkısız kompozit malzemenin elastiklik modülünün UV ışık altında yaşlandırma süresinin artışıyla beraber polimer malzemedeki görülen foto bozunma neticesindeki çapraz bağlanmalardan etkilenecek rijitliğin artması dolayısıyla elastiklik modülün belli oranda artışların görülmesine yol açmıştır. UV koruyucu katkı içermeyen kompozit numuneleri 930 MPa mertebesinde ölçülen elastiklik modülü 120 ve 240 saat yaşlandırma neticesinde sırasıyla %10 ve %13 artış göstererek 1050 MPa mertebesine ulaşmıştır. Diğer taraftan kimyasal katkıların kompozit malzemeye katılmasıyla beraber çoğu kompozit elastiklik modülü yaklaşık olarak ilk duruma göre değişmemekle beraber çok az miktarda düşüşler gözlenmektedir.

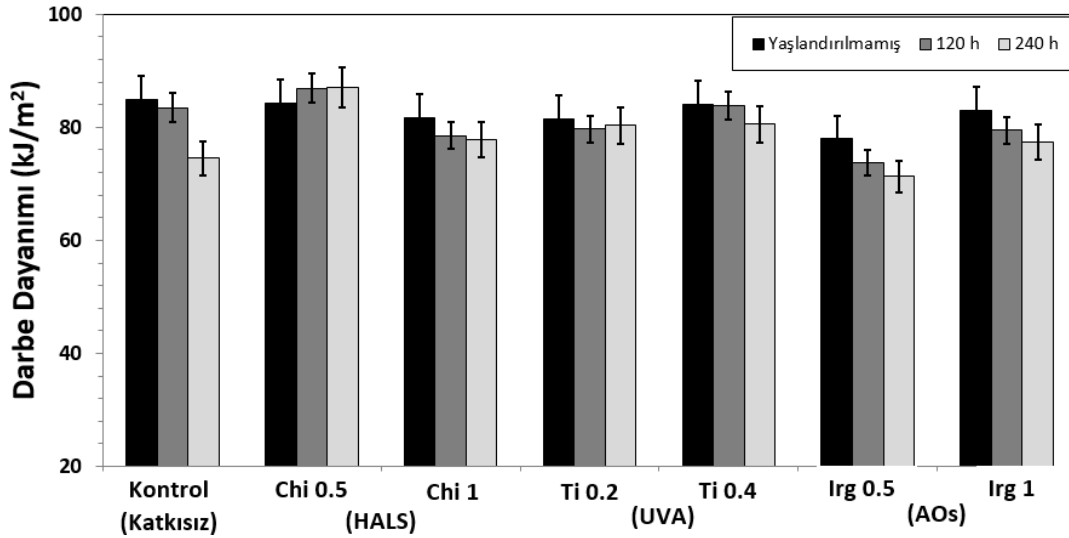


**Şekil 6.23:** Koruyucu katkı tipine, oranlarına ve bekleme sürelerine göre kompozitlerin elastiklik modülü değerlerindeki değişimleri.

Çekme deneyi sonrasında kompozitlerin yaşlandırma işlemiyle beraber kopma uzamalarındaki değişimi gösteren grafik şekil 6.23'te görülmektedir. Beklenildiği gibi kimyasal bozunmayla beraber kopma uzaması değerlerinin de düşüş gösterdiği gözlenmektedir. Katkısız kompozit malzemenin kopma uzaması değerinin 240 saat yaşlandırma neticesinde yaklaşık olarak %20 oranında düştüğü, kimyasal katkıların kompozit malzemeye katılmasıyla birlikte kopma uzamasındaki bu düşüşün %10-12 mertebelerine kadar indiği görülmektedir.

Kompozitlerin çekme özellikleri bakımından genel olarak bakıldığında çekme özellikleri bakımından HALS katkısı sayesinde kompozit malzemenin 240 saat UV ışığı neticesinde %10 oranında bir değişime uğradığı görülmektedir. Etkinlik açısından antioksidantların (%10-12), sonrasında ise UV absorbantların (%12-14) geldiği söylenebilir. Ayrıca her 3 katkı tipinin ideal oranları kullanılarak bozunma miktarlarında bir miktar daha iyileşme sağlanabilmektedir. Çekme özellikleri bakımından Chimasorb 944 (HALS) %0.5, Tinuvin 326 (UVA) %0.2 ve Irganox %1 oranı en ideal oranlar olarak göze çarpmaktadır.

Şekil 6.24'te kompozit malzemelere ait yaşlandırma süresine göre darbe dayanım değerlerindeki değişim grafikleri verilmektedir.



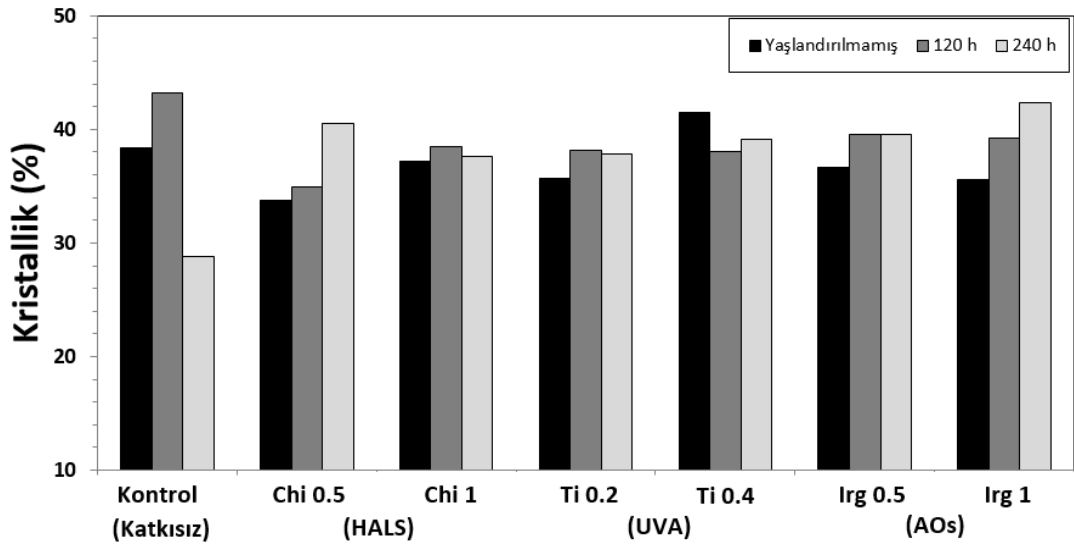
**Şekil 6.24:** Koruyucu katkı tipine, oranlarına ve bekleme sürelerine göre kompozitlerin darbe dayanım değerlerindeki değişimleri.

Grafiğe bakıldığında katkısız kompozit malzemenin 120 saat UV ışık altında yaşlandırma sonrasında darbe dayanımında kayda değer bir değişim gözlenmezken 240 saat sonrasında yaklaşık olarak %10 mertebesinde bir düşüş mevcuttur. Darbe dayanımındaki düşüşlerin temel nedeni olarak polimer matris malzemesindeki foto-bozunma ve yüzeylerde gözlenen mikro çatlaklardır. Diğer yandan kimyasal katkıların kompozitlere eklenmesiyle beraber beklenildiği gibi darbe dayanım değerlerindeki düşüşü azalmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen testlerde esas önemli olan hangi kimyasal katkının ve literatürde bahsedilen ideal oranının kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine nasıl etkilediğidir. Bu açıdan bakıldığında Chimasorb (HALS) katkısının % 0.5 oranında katkısıyla birlikte darbe dayanım değeri her iki yaşlandırma süresi için de değişmezken % 1 oranı için ise 240 saat sonrasında % 4 oranında çok küçük bir düşüş gerçekleşmiştir. Tinuvin (UVA) katkısının % 0.2 oranında kullanılması darbe dayanım değerinin yaklaşık olarak sabit kalmasını sağlamışken, % 0.4 Tinuvin miktarıyla darbe dayanım değeri 240 saat sonrasında yaklaşık olarak % 4 oranında düşüş göstermiştir. Test sonuçları dikkat çeken en önemli bulgu ise Irganox (Antioksidant) katkısının katkıları içerisinde darbe dayanımı açısından en etkisiz katkı olarak bulunması söylenebilir. Irganox katkısının her iki oranı için de yaklaşık olarak % 7-8.5 oranında bir düşüş gözlenmiştir. Genel olarak sonuçlara bakıldığında düşüş miktarları açısından kompozit malzemeleri sıralarsak katkısız kompozit, ırganox katkılı kompozit, tinuvin katkılı kompozit ve chimasorb katkılı kompozit olarak sıralayabiliriz.

**Çizelge 6.7 :** UV ışık altında bekleme sürelerine ve UV koruyucu katkılarına göre kompozitlerin ısıl özelliklerindeki değişimler.

Malzeme	Başlangıç		120 saat		240 saat	
	T <sub>m</sub> (°C)	X <sub>c</sub> (%)	T <sub>m</sub> (°C)	X <sub>c</sub> (%)	T <sub>m</sub> (°C)	X <sub>c</sub> (%)
T-FRP ( <i>kontrol</i> )	111,2	38,4	111,2	43,2	112,0	28,9
T-FRP-Chi0.5	112,3	33,8	111,1	35,0	111,9	40,5
T-FRP-Chi1	110,7	37,2	111,0	38,5	111,3	37,6
T-FRP-Ti0.2	111,2	35,6	110,9	38,2	111,6	37,8
T-FRP-Ti0.4	111,3	41,5	112,3	38,0	111,6	39,1
T-FRP-Irg0.5	110,4	36,6	110,8	39,5	110,9	39,6
T-FRP-Irg1	111,2	35,6	111,4	39,2	110,9	42,3

UV ışık altında yaşlandırma işlemi sonrasında kompozitlerin mekanik özelliklerinin yanı sıra ısıl özelliklerindeki değişimleri de DSC analizleri yardımıyla izlenmiştir. Çizelge 6.7’de bekleme süresi, katkı tipi ve oranlarına göre kompozitlerin erime sıcaklıkları ve % kristallik değerlerindeki değişimleri görülmektedir. Aynı zamanda 6.25’de kompozitlerin bekleme sürelerine göre % kristalliklerindeki değişim grafikleri verilmiştir.



**Şekil 6.25:** UV koruyucu katkı tipi, oranı ve bekleme sürelerine göre kompozitlerdein % kristallik değerlerindeki değişim grafikleri.

DSC analizlerine göre % kristallik oranları kontrol T-FRP kompozitlerde ilk 120 saatlik bekleme süresi içinde arttığı görülmüştür. % kristallik değerlerinde UV ışığı altında yaşlandırmayla beraber artması foto bozunma esnasında polietilende görülen zincir kırılmasına dair bir göstergedir. Bu davranış Norrish I ve Norrish II adında 2 foto bozunma mekanizması, zincir kırılması ve çapraz bağlanmanın beraber görülmesiyle açıklanabilmektedir. Norrish I ve II reaksiyonları amorf bölgelerdeki dolaşıklik yoğunluğunu düşürerek daha düşük moleküllerin yüksek yer

değiştirilebilirlik özellikleri neticesinde kristalize olmalarını sağlamaktadır. Böylelikle polimer yapı içerisinde daha yüksek % kristallik değerlerini okumamızı sağlamaktadır [157]. Diğer yandan, T-FRP kontrol numunelerin % kristallik değerleri beklentilerimizin aksine 240 saatlik bekleme süresi sonrasında düşüş gösterdiği bulunmuştur. Bu durumun ana nedeni olarak DYPE matris malzemesinin zincirleri birbirine bağlayan moleküllerin zarar görmesi gösterilebilir. Zincirler arası bağlayıcı moleküller katlı bir kristalin bölgenin bir parçası olarak şekillenmiş olup, amorf bir bölge arasından diğer bir kristalin bölgeye kadar uzanırlar. Zou ve arkadaşlarına göre bağlayıcı moleküller, zincir kırılmaları meydana geldikçe oksitlenme neticesinde zarar görürler. Böylece, bağlayıcı molekül parçalanmaları % kristallik değerlerinin düşmesine neden olurlar [158]. Çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçlara paralel sonuçlar konuyla ilgili benzer çalışmalarda da görüldüğü gözlenmiştir. Buna göre UV koruyucu katkı içermeyen kompozitlerin % kristallik değerleri UV ışık altında yaşlandırma işleminin ilk aşamalarında yükseliş göstermiş ve en yüksek değerine ulaştıktan sonra bekleme süresiyle birlikte düşüşe geçmiştir [140,159]. Özetle, kontrol T-FRP kompozitlerin % kristallik değerleri 120 saat bekleme süresi sonrasında %12 artarak 38,6'dan 43,2'ye yükselmiş, 240 saat bekleme süresi sonrasında ise yaklaşık olarak %33 oranında keskin bir düşüş sergilemiştir.

Diğer yandan, UV koruyucu katkılı kompozitlerin % kristallik değerlerinde 120 saatlik yaşlandırmayla beraber az da olsa bir artış söz konusu olmuştur. 240 saat bekleme süresi sonrasında ise neredeyse sabit olarak kaldığı gözlenmiştir. Genel olarak DSC analizlerinden elde edilen sonuçlar UV koruyucu katkıların zincir kırılması üzerine etkinliklerinin destekleyen sonuçlardır.

#### **6.2.8 UV koruyucu katkıların renk değişimleri üzerine etkileri**

Kompozit malzemelerde yaşlandırma neticesinde mekanik değişimlerin yanısıra fiziksel, görsel değişimlerin de önüne geçilmesi ve yönde çalışmaların yapılması gerekmektedir. Çünkü bazı koruyucu katkıları mekanik özelliklerin kararlılığı üzerine etkili olurken bazı katkıları ise daha çok fiziksel özellikleri koruma yönünde etkileri vardır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen renk ölçüm sonuçları kompozitlere katılan kimyasal katkı ve oranlarına göre çizelge 6.8'de verilmektedir. Burada verilen değerler yaşlandırılmamış değerler baz alınarak paylaşılmıştır.



Daha önceden sunulan sonuçlara paralel olarak T-FRP kontrol numunesinin  $\Delta E$  ve  $\Delta L$  değerleri ilk 120 saat bekleme süresi sonrasında önemli derecede artmıştır. Ayrıca UV koruyucu katkıların renk değişimleri üzerine 120 saatlik bekleme süresinde herhangi bir olumlu etkisinin olmadığı da anlaşılmaktadır. Her ne kadar tüm kompozit numuneler yaşlandırmayla birlikte renk değişimleri göstermiş olsalar da, UV koruyucu içermeyen numunelerin koruyucu katkıli kompozitlere göre çok daha fazla etkilendiği anlaşılmaktadır. Renk değişim değerleri incelendiğinde en fazla renk değişim miktarının beklenildiği gibi katkısız kompozit malzemede 120 saat yaşlandırma sonrasında %9.5'lik, 240 saat yaşlandırma neticesinde ise yaklaşık olarak %13' lük bir değişim söz konusu olmuştur.

**Çizelge 6.8 :** Katkı türü, oranları ve bekleme sürelerine göre kompozitlerde gözlenen renk değişimleri.

Katkı	Malzeme	UV Bekleme Süresi (Saat)						
		0	120	$L_{120-0}$	$\Delta E_{120-0}$	240	$\Delta L_{240-0}$	$E_{240-0}$
HALS	Katkısız T-FRP			5,42	9,55		8,67	13,04
	T-FRP-Chi0.5			2,39	8,22		5,28	11,19
	T-FRP-Chi1			5,93	9,13		9,13	11,4
UVA	T-FRP-Ti0.2			2,76	4,76		3,67	6,05
	T-FRP-Ti0.4			5,33	8,65		7,37	8,32
AOs	T-FRP-Irg0.5			4,87	7,84		4,15	8,03
	T-FRP-Irg1			5,94	6,74		6,62	7,04

240 saatlik bekleme süresi sonrasında sonuçlardan da anlaşılacağı üzere kimyasal katkıların renk değişimi üzerine önemli derecede etkisi olmuştur. Sonuçlar bize koruyucu katkı türü ve oranlarının oldukça etkili olduğunu da göstermektedir. Çizelge 6.8'e göre HALS katkıli kompozitler 240 saat bekleme süresi sonrasında UVA ve AOs katkıli kompozitlere kıyasla çok daha yüksek renk değişim miktarları

göstermiştir ( $\Delta E:11$ ). Bulunan bu sonuç Muasher ve arkadaşları tarafından sunulan sonuçlara paralellik göstermektedir [160].

Diğer taraftan UVA ve AOs koruyucu katkıların renk değişim miktarları üzerine çok daha etkili olduğu görülmektedir. Örneğin %0.2 Tinuvin (UVA) içeren kompozitler 120 saat neticesinde 4,76 renk değişim miktarı gösterirken, 240 saat bekleme süresi sonrasında bu değer 6,05 mertebelerinde kalmıştır. Böylelikle bu sonuç UV koruyucu katkıların esas olarak ilerleyen bekleme sürelerinde etkinliklerini ortaya çıkardığını desteklemektedir. AOs katkılı kompozitlere bakıldığında ise çok düşük solma ve toplam renk değişim miktarları göze çarpmaktadır. Çünkü Irganox 1010 özellikle plastik, sentetik lifler, elastomerler, yapışkanlar ve yağlar gibi organik malzemelerin özellikle renk değişimi üzerine koruyucu etkilerinin olduğu bilinmektedir ve özellikle polietilen, polipropilen, polibütan ve olefin kopolimerler gibi polimer gruplarında etkili oldukları düşünülmektedir [161]. AOs koruyucu katkıların mekanik özelliklerin korunmasında HALS kadar etkileri görünmese de özellikle ideal oranlarında fiziksel özelliklerin korunmasında değerlendirilebilecekleri yapılan renk ölçümleri neticesinde bulunmuştur (Çizelge 6.8).

Sonuçlara bakıldığında renk değişimi baz alınarak en etkili katkı malzemesi olarak UV Absorbant (Tinuvin) (%6-7 renk değişimi), 2. Etkili katkı olarak Antioksidant (Irganox) ve en etkisiz katkı olarak ise HALS (Chimasorb) kimyasal katkısını sayabiliriz.

## 7. DOĞAL LİF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE ELASTİKLİK MODÜLÜ TAHMİN YÖNTEMLERİ

Tez çalışmasının bu bölümünde genellikle sentetik lif takviyeli kompozit malzemelerin elastik şekil değişim bölgesi esas alınarak elastiklik modülü değerlerinin tahminlerinde kullanılan mevcut modellerin, “Gelişigüzel Kısa Doğal Lif Takviyeli Kompozitlere” uyarlanabilirlikleri araştırılmıştır. Böylelikle mevcut yöntemler arasında kıyaslama yapılarak hangi yöntemin bu tarz kompozitlere göre en uygun olan yöntemler ortaya çıkarılmıştır. Bu amaçla en sık kullanılan analitik modellerden ve sonlu elemanlar yönteminden faydalanılmıştır.

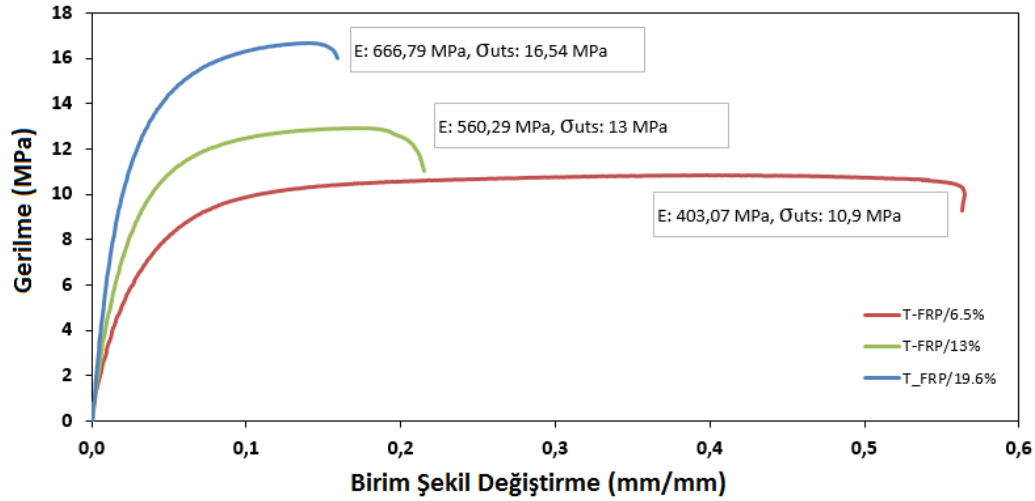
### 7.1 Malzeme ve Yöntem

Kompozit malzemeler hacimce %6.5, 13 ve 19.6 oranlarında gelişigüzel pamuk lifi içeren yapılara sahiptirler. Matris malzemesi olarak düşük yoğunluklu polietilen seçilmiştir. Pamuk lifine ve matris malzemesine ait başlıca özellikler çizelge 7.1’ de verilmektedir.

**Çizelge7.1:** Elastiklik modülü tahmin yöntemlerinde kullanılan matris ve pamuk lifi takviyesine ait başlıca özellikler.

Malzeme	$\sigma_c$ (MPa)	E (MPa)	$\rho$ (g / cm <sup>3</sup> )	$\nu$
DYPE	9.2	220	0.92	0.49
Pamuk lifi	189.5	4700	1.53	0.33

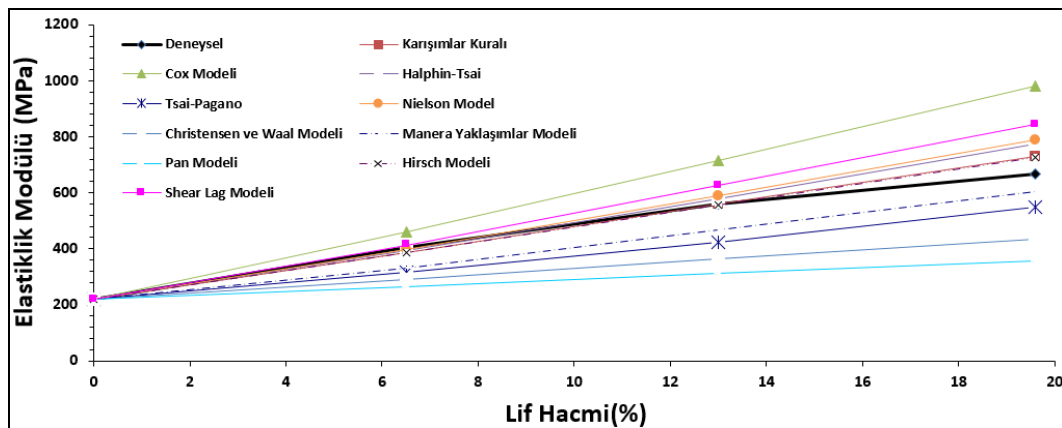
Pamuk liflerine ait ortalama lif uzunluğu 1.18 – 3.67 mm ve lif çapı ise 0.09 mm olarak ölçülmüştür. Bu değerler dikkate alınarak kompozit malzemelere ait teorik dayanım özellikleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.



**Şekil 7.1:** Farklı lif takviyeli kompozitlere (solda) ve saf DYPE matrisine (sağda) ait deneysel gerilme – birim şekil değişim eğrisi.

## 7.2 Sonuç ve Tartışma

Şekil 7.2’de lif hacimsel oranlarına ve analitik modellerden ortaya çıkan sonuçlara göre elastiklik modüllerindeki değişim grafikleri görülmektedir. Genel olarak bakıldığında beklenildiği gibi düşük oranda lif takviyeli kompozit malzemelerin elastiklik modülü deneysel ve teorik olarak birbirine yakın değerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin hacimsel olarak % 6.5 (ağırlıkça %12.5) pamuk lifi içeren kompozit malzeme için MRoM (%3.7), Halpin-Tsai (%2), Nielson (%4), Hirsch (%3.8) ve Shear Lag (%2.7) modelleri kabul edilebilir seviyede en yakın sonuçları ortaya çıkarmıştır.



**Şekil 7.2:** Kompozit malzemedeki farklı lif oranları ve mevcut analitik modellere göre elastiklik modülü değerlerindeki değişim.

Diğer taraftan lif oranı arttıkça deneysel veriler ile analitik modeller arasındaki farkın da arttığı görülmektedir. %13 lif içeren kompozitlerde ise MRoM, Halpin-Tsai,

Nielson ve Hirsch modelleri ile deneysel veriler arasında sırasıyla % 3.7, 3.5, 4.9 ve 0.7 kadar farklar oluşarak en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Tüm lif oranları göz önüne bulundurulduğunda MRoM ve Hirsch modellerinin deneysel verilere en yakın sonuçlar verdiğini görmekteyiz. Bunun yanısıra analitik modellerin bir kısmı deneysel verilere göre daha yüksek değerler ortaya koyarken diğer kısmı ise daha düşük değerleri ortaya koymaktadır. Cox, Halpin Tsai, Hirsch ve Nielson modellerinde deneysel verilere göre daha yüksek değerler bulunmuştur.

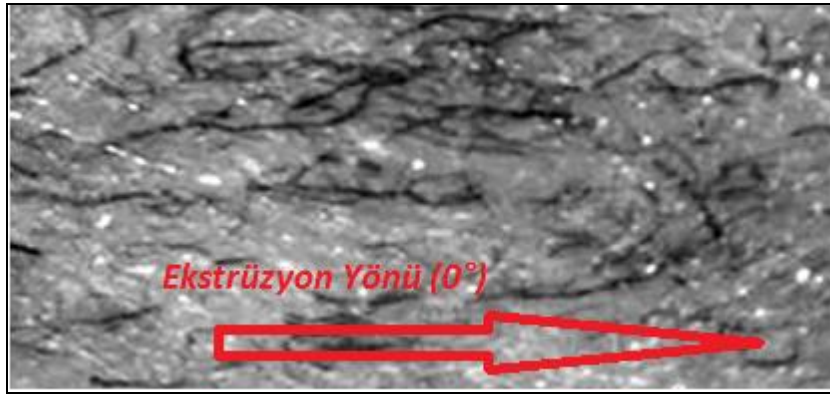
**Çizelge 7.2:** Analitik modellere ve lif oranlarına göre elastiklik modüllerindeki farklar.

Model	Lif Oranı				0	Farklar		
	0	0.065	0.13	0.196		0.065	0.13	0.196
Deneysel	220.0	403.1	560.3	666.8	-	0.0	0.0	0.0
MRoM	220.0	357.3	496.7	636.0	-	-3.7	-0.4	9.2
Cox Modeli	220.0	459.3	716.1	981.0	-	13.9	27.8	47.1
Halpin Tsai	220.0	395.01	579.78	775.15	-	-2.0	3.5	16.3
Tsai Pagano	220.0	314.8	424.1	548.4	-	-21.9	-24.3	-17.8
Nielson Christensen ve Waal modeli	220.0	397.5	587.6	789.8	-	-1.4	4.9	18.4
Manera yaklaşım modeli	220.0	290.4	362.9	435.3	-	-27.9	-35.2	-34.7
Pan Modeli	220.0	329.4	466.9	604.5	-	-18.3	-16.7	-9.3
Hirsch Modeli	220.0	264.6	311.3	357.9	-	-34.3	-44.4	-46.3
Shear Lag Modeli	220.0	387.62	556.18	725.89	-	-3.8	-0.7	8.9
Shear Lag Modeli	220.0	413.92	625.38	844.9	-	2.7	11.6	26.7

Diğer yandan liflerin gelişigüzel dağılımını dikkate alan ve daha tutucu modellerde daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin Tsai-Pagano modelinde  $\eta$  katsayısı uygulanan yük doğrultusu (longitudinal) ve yüke dik doğrultuda (transverse) olacak şekilde hesaplanmıştır. Formül 7.1'e bakıldığında  $E_{random}$  değeri yük doğrultusundaki elastiklik modülü ( $E_{longitudinal}$ ) değerinden ziyade yüke dik doğrultudaki ( $E_{transverse}$ ) elastiklik modülüne daha bağımlı olarak değişmektedir.

$$E_{random} = \frac{3}{8}E_{11} + \frac{5}{8}E_{22} \quad (7.1)$$

Bu model diğer modellere göre biraz daha tutucu (conservative) bir model olarak ortaya çıkmaktadır. Tsai-Pagano modeli kullanılarak bulunan elastiklik modülleri deneysel verilere kıyasla daha düşük değerler olarak karşımıza çıkmaktadır (Çizelge 7.2). Bu düşüncüyü destekleyen bir diğer örnek ise MRoM modelinde gelişigüzel lif takviyeli kompozitler için tavsiye edilen  $\eta$  katsayısının 0.2 yerine 0.6 gibi daha yüksek bir değer deneysel verilere daha yakın sonuçlar ortaya çıkarmasıdır. Bu sonuç kompozit malzememizde lif yönlenmesinin genellikle çekme yüküne paralel olacak şekilde olduğunu ortaya çıkarmakta ve desteklemektedir.



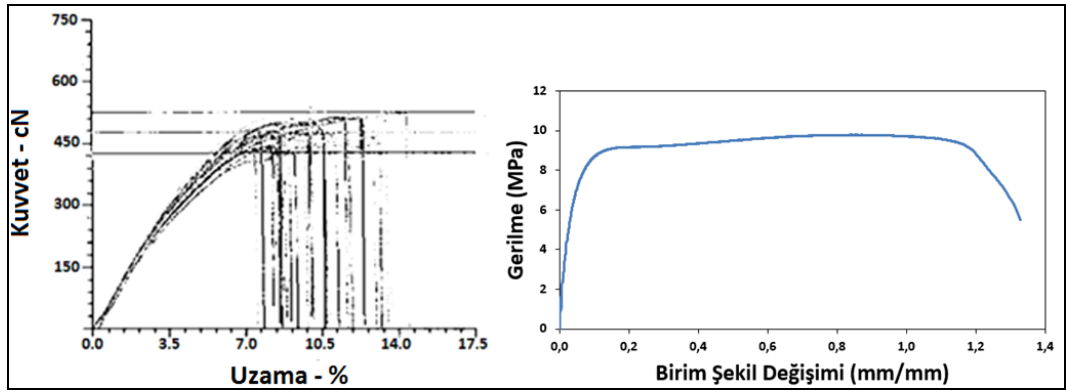
**Şekil 7.3:** Pamuk liflerinin matris içerisindeki yönlenmeleri.

Ekstrüzyon işleminin doğal bir sonucu olarak pamuk lifleri Şekil 7.3'te görüldüğü gibi çoğunlukla ekstrüzyon doğrultusunda yönlenmektedir. Buradan da anlaşılacağı transverse etkiyi daha az göz önünde bulunduran modellerin ekstrüzyon yöntemiyle elde edilen bu tarz kompozit malzemeler üzerine daha yakın sonuçlar çıkaracağı aşikardır.

Genel olarak çıkarılacak sonuçlar;

- 1) Lif oranı arttıkça deneysel ve analitik modeller arasındaki değer farkları da artmaktadır. Bunun nedeni ise, lif oranı arttıkça kompozit yapıda boşluk oluşumu da artmaktadır. Dolayısıyla kompozit yapı, modellerde varsayılan mükemmel yapıdan uzaklaşabilmektedir.
- 2) Kompozit malzemeye ait elastiklik modülü tahminlerinde kullanılabilecek modeller arasında lif yönlenme etkisini en az dikkate alan modellerin daha geçerli olacağı anlaşılmaktadır. Bunun nedeni olarak ekstrüzyon işlemi neticesinde pamuk liflerinin genellikle ekstrüzyon doğrultusunda yönlenmeleridir. (Şekil 7.3).

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini tahmin edebilmek için kullanılan bir diğer yöntem ise “Sonlu Elemanlar” analizidir. Sonlu elemanlar analizlerinde çoğunlukla tüm yapıyı temsil eden, temsili hacim elemanları kullanılmaktadır. Çalışmanın “Sonlu Elemanlar Yöntemi” ile modelleme basamağında deneysel çalışmalarda kullanılan ve hacimsel olarak %6.5, 13 ve 19.6 oranlarında pamuk lifine sahip kompozit malzemelerin modelleme işlemleri optik ve Tarayıcı Elektron Mikroskopu (SEM) görüntülerinden faydalanılarak bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 7.4:** Sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere pamuk lifine (solda) ve DYPE matris (sağda) malzemesine ait çekme testi sonuçları.

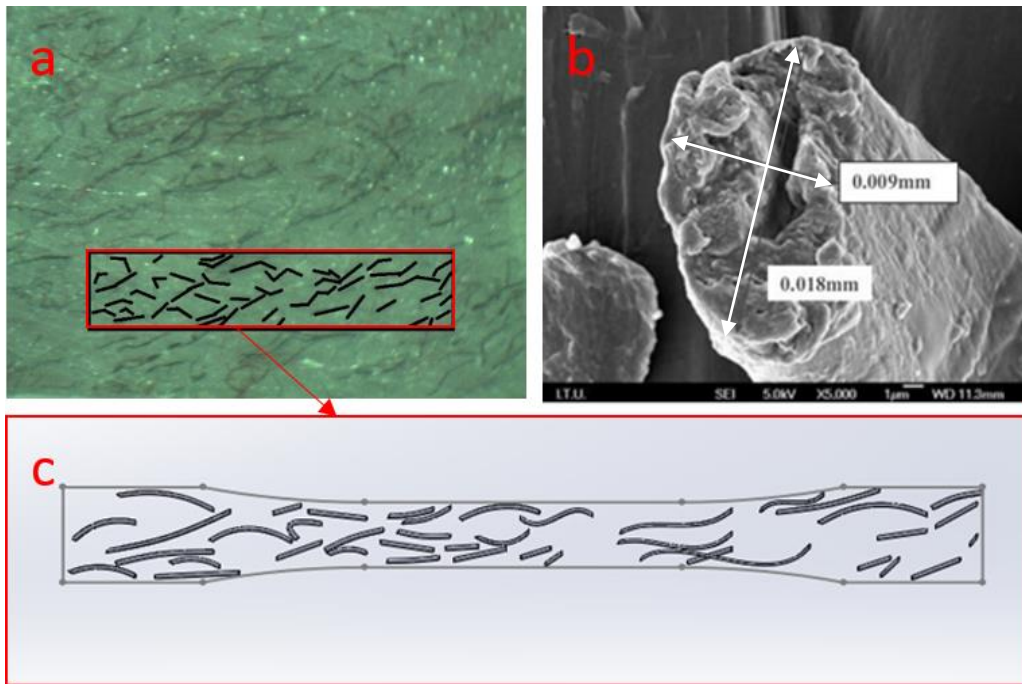
Kompozit malzemelerin bilgisayar destekli tasarım (CAD modelleme) işlemleri Solidworks ve ANSYS Mechanical APDL sürümü aracılığıyla, analiz işlemleri ise ANSYS Workbench sürümü yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin sonlu elemanlar yöntemi ile davranışlarının modellenmesinde en kritik noktalar şunlardır;

- Analizi gerçekleştirilecek ve tüm kompozit yapıyı temsil edecek birim hücrenin gerçeğe en yakın şekilde oluşturulması,
- Lif ve matris malzemesi davranışlarının doğru bir şekilde analiz programında atanması,
- Analiz aşamasında sınır şartlarının doğru şekilde belirlenmesidir.

Ayrıca bu noktalara ilave olarak ağ oluşturma işlemleri (meshing), eleman seçimi, lif matris arayüzey durumunun doğru şekilde tanımlanması gibi noktalar da diğer önemli noktalar olarak sonuçları etkileyebilmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde kompozitlerin modellenmesi ve analizlerin gerçekleştirilmesi için izlenen adımları şu şekilde sıralayabiliriz.

- CAD aşaması: Sonlu elemanlar yöntemiyle kompozitlere ait mekanik özelliklerin tahmin edilebilmesi için kompozit yapının olabildiğince gerçeğine yakın katı modellerin oluşturulması kritiktir. Gelişigüzel lif dağılımına sahip bu tür kompozitlerin lif dağılımları mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bu amaçla CAD aşamasında gelişigüzel lif dağılımına sahip kompozitlerin modellenmesinde şekil 7.5’te görülen örnek bir alan seçilmiştir. Seçilen alandaki liflerin yönlenmesi esas alınarak Solidworks programı yardımıyla kompozit yapının CAD modeli oluşturulmuştur.

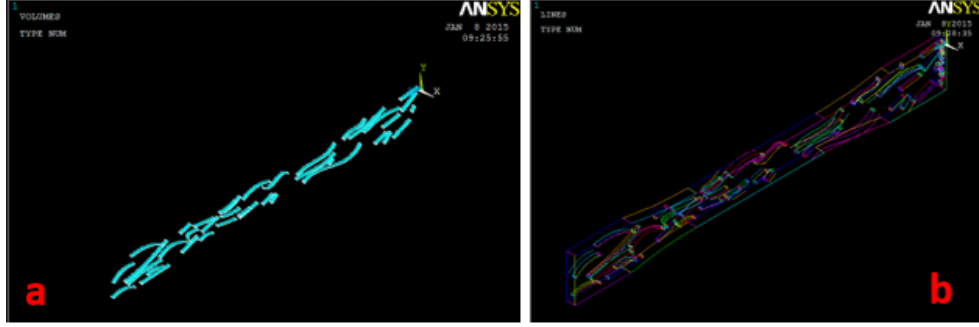


**Şekil 7.5:** Kompozit malzemenin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi amacıyla oluşturulan CAD katı modeli a) Lif dağılımının optik mikroskop görüntüsü b) Pamuk lifi kesit boyutları c) Oluşturulan CAD modeli.

- Analiz programı ANSYS’de CAD modelin aktarılması ve hacimlerin oluşturulması: Modellemenin bu aşamasında ise kompozit yapıyı oluşturan lif ve matris elemanlarının hacimleri oluşturulmuştur. Çalışmadaki amaç lifler gözönüne bulundurularak matris fazı içerisinde lif boşluklarının oluşturulmasıdır. CAD modeli esnasında matris yapısını oluşturmak için “ANSYS” programının “Klasik” sürümünden faydalanılmaktadır. Şekil 7.6’nın “a” kısmında kompozit yapıdaki lifler, “b” kısmında ise programda “Overlap” komutu kullanılarak matristen lif hacimleri çıkartılarak matris

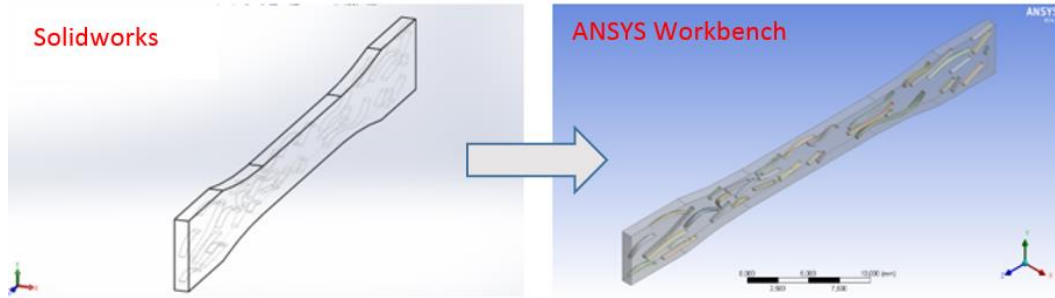


hacmi görülmektedir. Böylelikle lif ve matris fazı modelde üst üste gelmeyecek farklı hacimler oluşturmuşlardır.



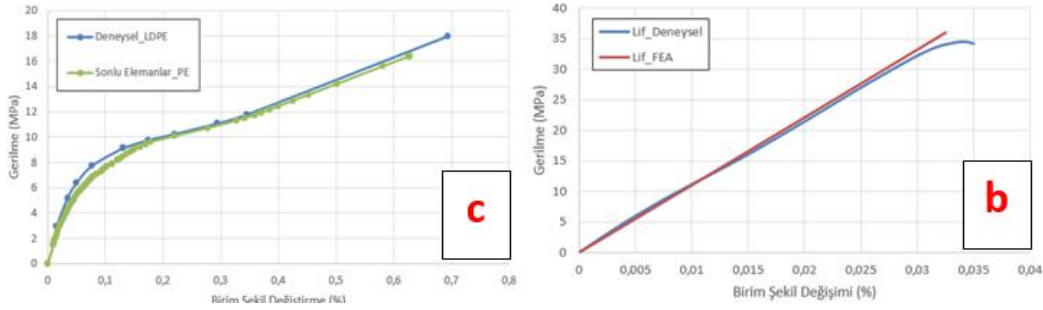
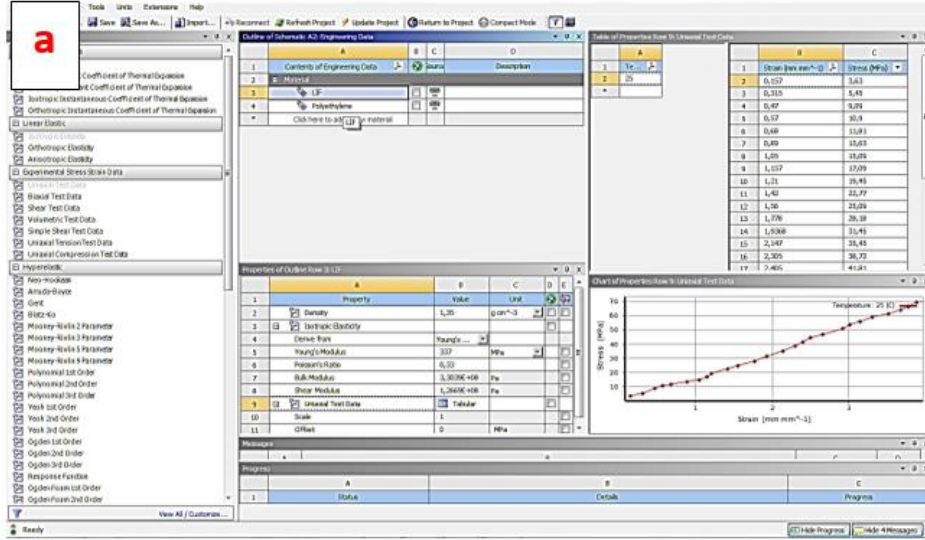
**Şekil 7.6:** Kompozit yapıdaki lifler gözönüne alınarak matris hacminin oluşturulması.

- Matris fazı ile pamuk lifi bir araya getirilerek kompozit yapının son halinin modellenmesi: ANSYS programında oluşturulan matris hacmi ile lifler Solidworks programında bir araya getirilerek kompozit yapı oluşturulur. .STEP uzantısı ile CAD modellenmesi tamamlanmış kompozit yapı ANSYS Workbench sürümüne aktarılarak analiz aşamasına geçilmiştir.



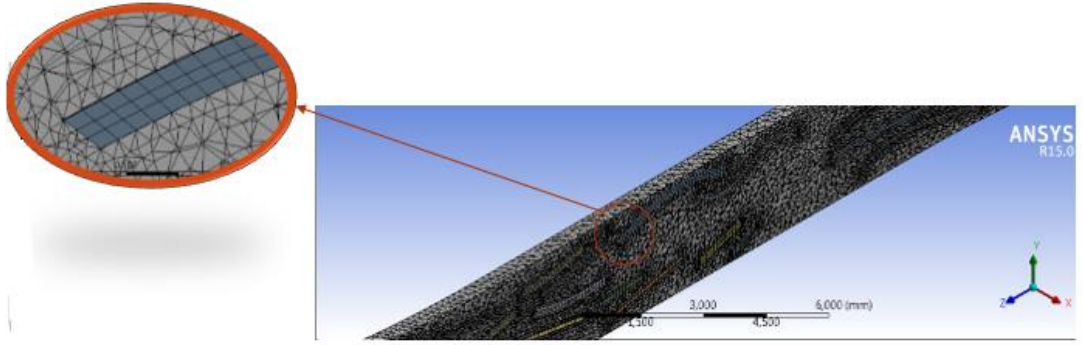
**Şekil 7.7:** Solidworks programında lif ve matris hacimlerinin bir araya getirilmiş durumu (sağda), ANSYS Workbench programına katı modelin aktarılması (solda).

- Kompozit yapıyı oluşturan matris ve takviye elemanlarının tanımlanması: Analiz için katı modeli ANSYS Workbench programına aktarılan kompozit yapının lif ve matris elemanlarının programda tanımlanması ve mümkün olduğunca deneysel verilere yakın sonuçlar elde edilmesi tüm kompozit yapının davranışının modellenebilmesi açısından kritik bir aşamadır. Buradaki elde edilen sonuçlar ne kadar deneysel sonuçlara yakın ise kompozit model üzerinden yapılan Sonlu Elemanlar analizi de o kadar yakın sonuçlar ortaya çıkaracaktır. Buna göre DYPE matris malzemesinin ve pamuk lifinin çekme testi sonucu deneysel verilerinden yola çıkılarak analiz programında matris ve takviye elemanı tanımlanmıştır (Şekil 7.8).



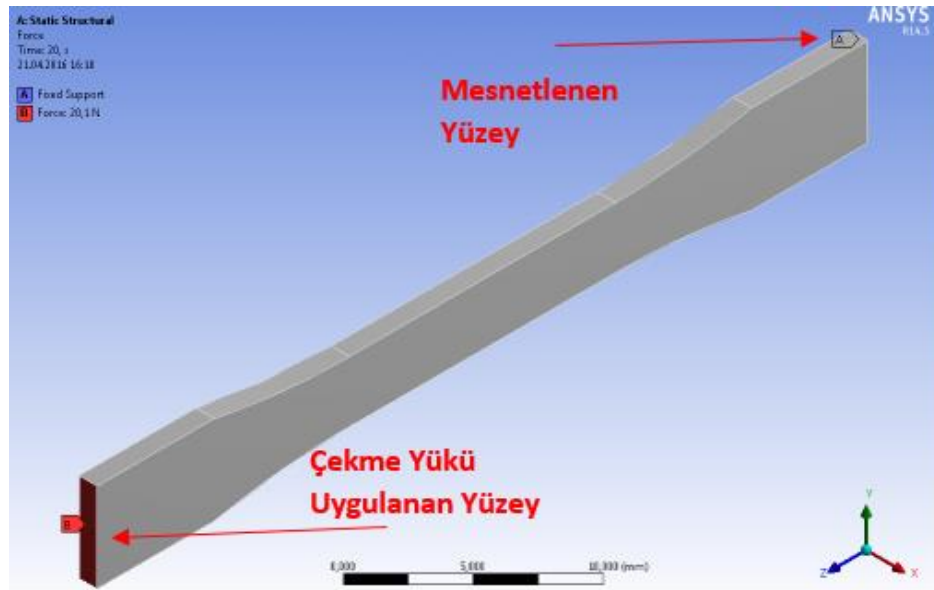
**Şekil 7.8:** a) Pamuk lifi ve DYPE matrisin programda tanımlanması b) DYPE matris elemanına c) Pamuk lifi takviyesine ait sonlu elemanlar ve deneysel çekme testi sonuçları.

- Modeldeki elemanlara ağ oluşturma (Meshing) uygulaması: Ağ oluşturma işlemi (meshing) sonlu elemanlar yönteminde sonuca etki eden bir faktör olarak bilinmektedir. Ağ oluşturma işleminde, kompozit yapı fiziksel etkilere karşı davranışı bilinen çeşitli elemanlara bölünür. Bölme işlemi sonucu, birbirine ortak uç noktaları ile bağlanmış elemanlardan oluşan örgü-ağ şeklinde bir yapı halini alır. Kompozit modele “Mesh” atma aşamasında dikkat edilen kritik noktalar;
- Lif ve matris elemanlarının uç noktaları birleşik olmalıdır.
- Liflere matris malzemesine göre daha hassas “Mesh” uygulanmalıdır.
- Eleman boyutu matris için 0.2mm seçilirken, lifler için 0.1mm uygun görülmüştür.



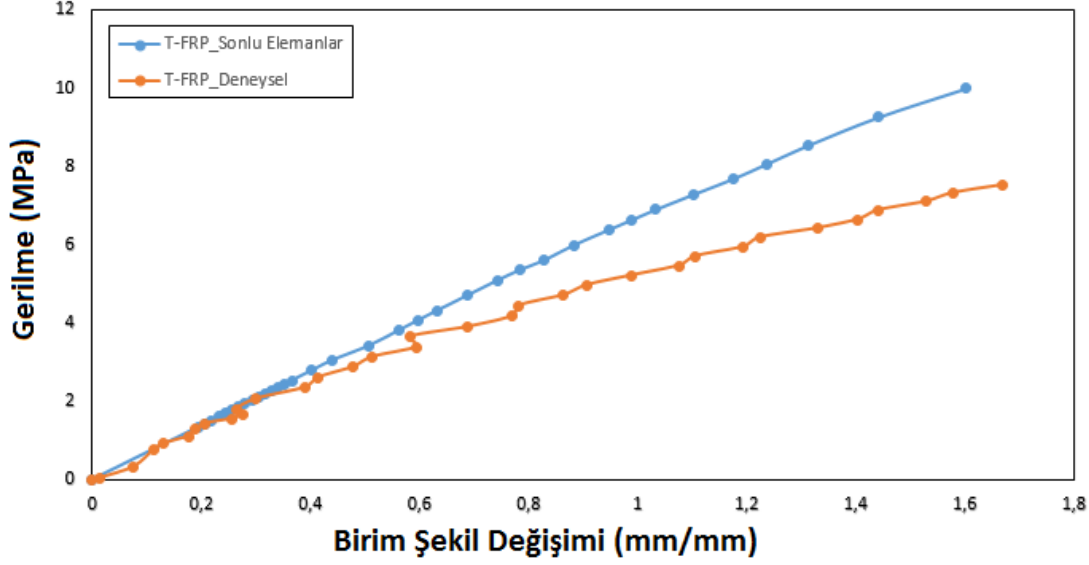
**Şekil 7.9:** Kompozit yapıya uygulanan ağ oluşturma (meshing).

- Sınır şartlarının tanımlanması: Çekme testi koşullarının analiz aşamasında uygulanması amacıyla sınır şartlarının belirtilmesi gerekmektedir. Buna göre kompozit numunenin bir yüzeyi yük uygulama esnasında sabit tutulurken diğer yüzeyine çekme yükü uygulanmaktadır. Çekme yükü çekme testinde olduğu gibi kademeli bir şekilde arttırılmıştır.



**Şekil 7.10:** Kompozit çekme numunesine uygulanan sınır şartları.

- Analiz ve sonuçların yorumlanması: Şekil 7.11’de hacimce %13 pamuk lifi içeren kompozit malzemeye ait deneysel ve sonlu elemanlar analizi neticesindeki gerilme – birim şekil değişimi eğrisi verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde kompozit malzemenin deneysel olarak elastiklik modülü değeri 560 MPa olarak ölçülürken, sonlu elemanlar analizi ile bu değer yaklaşık olarak 657 MPa değerini göstermiştir. İki değer arasında yaklaşık %17 oranında farklılık meydana geldiği görülmüştür.



**Şekil 7.11:** %25 pamuk lifi içeren kompozit numuneye ait sonlu elemanlar ve deneysel elastik şekil değişim bölgesi.

Ayrıca düşük şekil değişim miktarlarında kompozit malzemenin çekme yükü altındaki davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle başarılı bir şekilde modellenirken, yüksek şekil değişim miktarlarında ise deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar arasında farkın açıldığı gözlenmiştir.

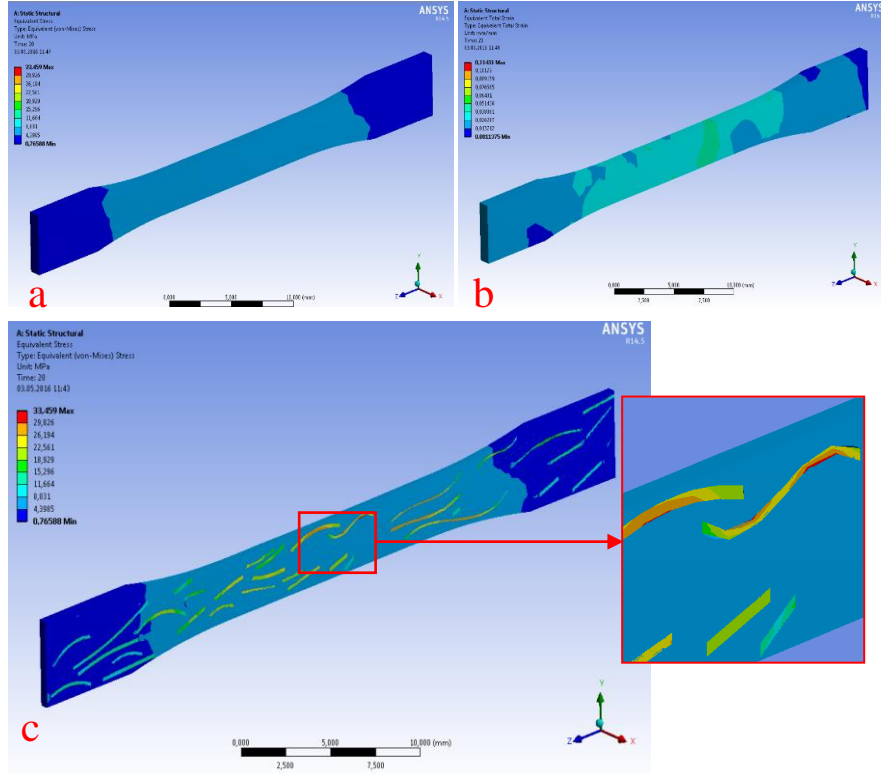
**Çizelge 7.3:** Kompozit malzemelerin hacimsel lif oranlarına göre elastiklik modülü değerleri.

Yöntem	Hacimsel Lif Oranına Göre Elastiklik Modülü (MPa)		
	$E_{6,5}$ (MPa)	$E_{13}$ (MPa)	$E_{19,6}$ (MPa)
Deneysel	403,10	560,30	666,80
Sonlu Elemanlar	492,14	657,21	780,42

Çizelge 7.3'te ise farklı hacimsel lif oranlarına göre deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiş elastiklik modülü değerleri bulunmaktadır. Sonuçlara bakıldığında elastiklik modülü değerleri arasındaki farkın %15 ile %20 arasında değiştiği görülebilmektedir.

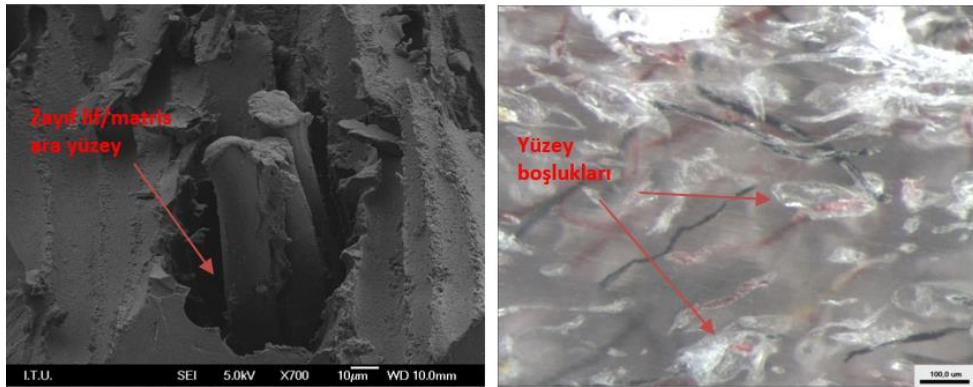
Şekil 7.12'de sonlu elemanlar analizi sonrasında kompozit yapıda görülen gerilme, şekil değiştirme dağılımı ve lif / matris ara yüzeyindeki gerilme değerleri görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda en yüksek gerilme değerlerinin lif matris ara yüzeyinde gözlemlendiği görülmüştür. Dolayısıyla hasarın bu bölgelerde oluşmaya başlamasını bekleyebiliriz. Bir diğer sonuç ise lif matris ara yüzey

durumunun dayanım değerlerindeki kritik önemi, gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi ile ayrıca desteklenmektedir.



**Şekil 7.12:** Sonlu elemanlar analizi sonucu a) Gerilme dağılımı b) Toplam şekil değişim dağılımı c) Lif ve matris ara yüzeyi.

Sonlu elemanlar ile deneysel sonuçlar arasında oluşan farklılıkları desteklemek amacıyla kompozit yapıda oluşabilen bazı kusurlar şekil 7.13'te verilmiştir. Sonuçları karşılaştırılan kompozit yapı lif ve matris ara yüzey durumu %5 maleik anhidrit katkısıyla ideal bir seviyeye çıkarılmış olsa da şekil 7.13'te gözleendiği gibi belli seviyelerde düşük zayıf lif ve matris tutunma durumları da gözlenebilmektedir.



**Şekil 7.13:** Kompozit yapıda gözlenebilen bazı kusurlar a) Lif / matris ara yüzeyinde zayıf tutunma b) Yüzeyde gözlenen hava boşlukları.

Diğer taraftan ekstrüzyon işleminin doğal bir sonucu olarak kompozit yapılar da hava boşlukları yer yer gözelelenebilmektedir. Bu tür faktörler kompozit malzemenin elastiklik modülü üzerine direkt etki eden faktörler olup, deneysel sonuçların daha düşük mertebelerde kalmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiş verilerin daha yüksek çıkması bu tür faktörlerin göz önünde bulundurulmasıyla açıklanabilmektedir.

## 8. SONUÇLAR

Yürütülen doktora tezi çalışmalarında pamuk lifi kaynağı olarak tekstil atığı kumaşlarının değerlendirilerek, polimer matris ile birlikte bir kompozit yapı oluşturması ve bu yapının mekanik ve çevresel özelliklerinin katma değerli ürün imalatına uygun olması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak kompozit bileşimi, istenilen özellikleri sağlayacak şekilde, ekstrüzyon-tekrarlı kırım-ekstrüzyon sırasıyla üretildi. Ardından ara yüzey iyileştirici ve tutunmayı artırıcı yöntemler ile lif / matris ara yüzey bağı güçlendirildi. Ardından istenen mekanik ve fiziksel özelliklere sahip kompozitler değişik sürelerle nem yutumu ve iklimlendirme kabiniinde UV ışık altında yaşlandırıldı. Daha sonra yaşlandırmaya tabi tutulan kompozitlerin özellikleri mekanik testler, fiziksel, kimyasal ve ısı analizler yardımıyla, başlangıç yapısıyla karşılaştırıldı. Ayrıca kompozitlerin içerikleri sayesinde gerek UV ışıklara karşı gerekse de nem yutumuna karşı önlemler üzerine de duruldu. Son olarak gelişigüzel lif dağılımına sahip doğal lif takviyeli kompozitlerin elastiklik modülü değerleri için sonlu elemanlar ve analitik yöntemler yardımıyla tahmin çalışmaları yürütüldü.

Genel olarak sonuçlara bakıldığında;

- Kompozit malzemelerin mekanik dayanım değerlerinde özellikle lif ve matris ara yüzey tutunma durumunun kimyasal yöntemlerin ideal parametreleri ile iyileştirilmesiyle, kayda değer artışlar gözlenmiştir.
- UV ışık altında kompozitlerin mekanik ve fiziksel olarak olumsuz yönde etkilenmelerine rağmen kullanılan kimyasal katkıları (HALS, UVA ve AOs) yardımıyla özelliklerindeki düşüşler veya olumsuz etkilenmelerin en aza indirgenebildiği tespit edilmiştir.
- Doğal lif takviyeli kompozitlerin hammadde olarak kullanılmasının önündeki en büyük dezavantajlardan biri olarak görülen nem yutum özellikleri ve nem yutumu neticesinde mekanik veya fiziksel olarak olumsuz etkilerin, lif ve matris ara yüzey durumununun iyileştirilmesi halinde azaldığı görülmüştür.

- Yönlendirilmiş lif takviyeli kompozitlerin mekanik davranışlarını taklit etmek veya modelleyebilmek amacıyla bir çok yöntem (analitik veya sonlu elemanlar) olmasına karşın gelişi güzel lif dağılımına sahip doğal lif takviyeli kompozitlerin modellenmesiyle ilgili kısıtlı çalışma bulunmaktadır. Dolayısıyla tez çalışmasında yürütülen ve kompozitlerin çekme özellikleri olarak elastik bölgelerinin modellenmesiyle ilgili yürütülen analitik ve sonlu elemanlar yöntemlerinin öncü sonuçlar sunması, ileride yürütülebilecek çalışmalara yol göstermesi bakımından önemlidir.
- Doktora tezi kapsamında gerek mekanik, ısı ve kimyasal olarak gerekse de çevresel koşullara uygulanabilirliği bakımından ideal özelliklere sahip kompozit granül eldesi tez çalışmasının esas çıktısı olarak değerlendirilebilir. Böylelikle ideal özelliklere sahip kompozit granüller kullanılarak farklı üretim yöntemleri (plastik enjeksiyon, ekstrüzyon, termoform vb) ile farklı ürünlerin imalatı ileride mümkün olacaktır.



## KAYNAKLAR

- [1] **Saçak, M.** (2005). *Polimer Teknolojisi*. Ankara: Gazi Yayınevi.
- [2] **Ersoy, M. S.** (2005). *Lif takviyeli polimerik kompozit malzeme tasarımı*. (Yüksek Lisans Tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- [3] **Vatangül, E.** (2008). *Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve ansys 10 programı ile ısı gerilme analizi*. (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [4] **Yıldızhan, H.** (2008). *Polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [5] [Url1<http://www.teknolojikarastirmalar.com/eegitim/yapi\\_malzemesi/icerik/kompozit.htm>](http://www.teknolojikarastirmalar.com/eegitim/yapi_malzemesi/icerik/kompozit.htm), alındığı tarih 10.11.2012.
- [6] **Bilgiç, T.** (2006). *Polimerler –I Bölüm 2: Polietilen*. İstanbul : PAGEV Yayınları
- [7] **Mazumdar, S.K.** (2002). *Composites manufacturing materials, product, and process engineering*. Amerika Birleşik Devletleri : CRC PRESS.
- [8] **Smith, W. F.** (Yazar) & Kınıkoğlu N.G. (Çeviren). (2006). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. İstanbul : Literatür Yayıncılık.
- [9] **T:C. Kalkınma Bakanlığı.** (2001). *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Plastik Ürünleri Sanayii Özel İhtisas Komisyonu Raporu*. Ankara : Özel İhtisas Komisyonu.
- [10] **Satyanarayana, K.G., Arizaga, G.G.C., Wypych, F.** (2009). Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers – an overview, *Progress in Polymer Science*, 34, 982–1021.
- [11] **John, M.J., Thomas, S.** (2008). Review – biofibres and biocomposites, *Carbohydrate Polymers*, 71, 343–64.
- [12] **Lei, Y., Wu, Q., Yao, F. ve Xu, Y.** (2007). Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites, *Composites : Part A*, 38, 1664-1764.
- [13] **Paul, S.A., Boudenne, A., Ibos, L., Candau, Y., Joseph, K.** (2008). Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials, *Composites : Part A*, 39, 1582-1588.
- [14] **Seki, Y.** (2009). Innovative multifunctional siloxane treatment of jute fiber surface and its effect on the mechanical properties of jute/thermoset composites, *Materials Science and Engineering A*, 508, 247-252.
- [15] **Carvalho, L.H., De Souza, G.C., d’Almeida, J.R.M.** (2006). Comparison of mechanical behavior of plain weave and plain weft knit jute fabric

polyester reinforced composites, *Polymer Plastics Technology And Engineering*, 45, 791-797.

- [16] **Medeiros, E.S., Jose, A.M., Kuruvilla, J., Carvalho, L.H., Mattoso, H.C.** (2005). Mechanical properties of phenolic composites reinforced with jüte Cotton hybrid fabrics, *Polymer composites*, 26,1-11.
- [17] **Singleton, C.N., Baillie, C.A., Beaumont, P.W.R., Peijs, T.** (2003). On the mechanical properties, deformation and fracture of a natural fiber/recycled polymer composites, *Composites: Part B*, 34, 519-26.
- [18] **Tserki, V., Matzinos, C., Panayiotou, C.** (2003). Effects of compatibilization on the performance of biodegradable composites using Cotton fiber waste as filler, *Journal of Applied Polymer Science*, 88, 1825-35.
- [19] **Ahmed, N., Khan, J.H.** (2002). Effect of recycling of thermoplastics: evaluation of properties of mixture of recycled high density polyethylene, *The 6 th Saudi engineering conference*, (pp. 359-65). Saudi Arabia : KFUPMi Dhahran, December 5-8.
- [20] **Gowda, M., Naidu, A.C.B., Chhaya, R.** (1999). Some mechanical properties of untreated jüte fabric reinforced polyester composites, *Composites : Part A*, 30, 277-84.
- [21] **Mwaikambo, Y., Elias, T.N.** (1999). The performnace of Cotton kapok fabric polyester composites, *Polymer Testing*, 18, 181-98.
- [22] **Url-2**www.daimlerchrysler.com, Alındığı tarih: 11.05.2011.
- [23] **Bisanda, E.T.N, Ansell, M.P.** (1992). Properties of sisal/CNSL composites, *J Mater Sci*,27,1690–1700.
- [24] **Sridhar, M.K., Basavarajappa, G.** (1982). Evolution of Jute as a Reinforcement in Composites, *Indian J Text Res*, 7(9), 87–92.
- [25] **Zeronian, S.H.** (1991). The mechanical properties of cotton fibers, *J Appl Polym Sci*, 47, 445–461.
- [26] **Michell, A.J., Willis, D. (1978).** Cellulosic fibres for reinforcement, *Appita*, 31(3), 347–354.
- [27] **Saechtling, H.** (1987). *International plastics handbook*. Munchen: Hanser.
- [28] **Güzel, G.** (2010). *Tekstilde pamuğun standardizasyonunun önemi üzerine bir araştırma*. (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [29] **Dayioğlu, P. H., Karakaş, D. H.** (2007). *Elyaf Bilgisi*. İstanbul : Ajans Plaza Tanıtım ve İletişim Hizmetleri.
- [30] **T.C.Milli Eğitim Bakanlığı.** (2011). *Bitkisel Lifler*. Ankara : Megep.
- [31] **Url-3** [http://www.tuik.gov.tr/VeriBilgi.do?alt\\_id=1019](http://www.tuik.gov.tr/VeriBilgi.do?alt_id=1019), Alındığı tarih:02.06.2008.
- [32] **Kozak, M.** (2010). Tekstil Atıkların Yapı Malzemesi Olarak Kullanım Alanlarının Araştırılması, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 62-70.

- [33] **Akdağ, O.N., Kırımhan, S.** (1999). Denizli Organize Sanayi Bölgesi'nde Endüstriyel Katı Atık Durumu ve Geri Kazanımı, *Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1(2), 47-58.
- [34] **Baştürk, A., Gönüllü M. T., Dinçer, Ö.** (1992). *Stratejik yönetim ve işletme politikası*. İstanbul : AGM.
- [35] **Bateman, S.A., Wu, D.Y.** (2001). Composite materials prepared from waste textile fiber, *Journal of Applied Polymer Science*, 81, 3178–3185.
- [36] **Kimura, T., Kataoka, Y., Kondo, Y., Takahashi, T.** (1999). Injection molding of natural fiber reinforced composites using wastes of various fabrics, USA : Georgia Institute of Technology.
- [37] **Priya S.P., Rai S.K.** (2005). Impact, compression, density, void content and weight reduction studies on waste silk fabric/epoxy composites, *Journal of reinforced plastics and composites*, 24, 1485-1494.
- [38] **Priya S.P., Ramakrishna S.K., Raia V.R.** (2005). Tensile, flexural and chemical resistance properties of waste silk fabric reinforced epoxy laminates, *Journal of reinforced plastics and composites*, 24, 643-48.
- [39] **Ju'nior, C.Z.P., de Carvalho L.H., Fonseca V.M., Monteiro S.N., d'Almeida J.R.M.** (2003). Analysis of the tensile strength of polyester/hybrid ramie-cotton fabric composites, *Polymer Testing*, 23, 131-35.
- [40] **Dhakal, H.N., Zhang Z.Y., Richardson M.O.W.** (2006). Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites, *Composites Science and Technology*, 67, 1674-83.
- [41] **Kim S.J., Jin-Bok M., Gue-Hyun K., Chang-Sik H.** (2008). Mechanical properties of polypropylene/natural fiber composite: Comparison of wood fiber and cotton fiber, *Polymer Testing*, 27, 801-806.
- [42] **Chand M. N.** (2008). *Natural fibers and their composites: tribology of natural fiber polymer composites*, USA : Woodhead Publishing.
- [43] **Zafeiropoulos N.E.** (2008). *Engineering the fibre-matrix interface in natural-fiber composites : properties and performance of natural-fiber composites*, USA : Woodhead Publishing.
- [44] **Li L.S.X.** (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites : a review, *Journal of Polymers and the Environment*, 15, 25-33.
- [45] **Taşdemir, M., Biltekin, H., Caneba, G.T.** (2009). Preparation and Characterization of LDPE and PP—Wood Fiber Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 112, 3095–3102.
- [46] **Bachtiar, D., Sapuan, S.M., Hamdan, M.M.** (2008). The effect of alkaline treatment on tensile properties of sugar palm fibre reinforced epoxy composites, *Materials&Design*, 29, 1285-1290.
- [47] **Jarukumjorn, K., Suppakarn, N.** (2009). Effect of glass fiber hybridization on properties of sisal fiber–polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 623–627.

- [48] **Thwe, M.M., Liao, K.** (2002). Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo–glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(1), 43–52.
- [49] **Cicala, G., Cristaldi, G., Recca, G., Ziegmann, G., El-Sabbagh, A., Dickert, M.** (2009). Properties and performances of various hybrid glass/natural fibre composites for curved pipes. *Materials and Design*, 30(7), 2538–2542.
- [50] **Dittenber D.B., GangaRao H.V.S.** (2012). Critical review of recent publications on use of natural fiber composites in infrastructure, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43, 1419-1429.
- [51] **Faruk O., Bledzki A.K., Fink H.P., Sain M.** (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010, *Progress in Polymer Science*, 37, 1552-1596.
- [52] **Kaewkuk S., Sutapun W., Jarukumjorn K.** (2012). Effects of interfacial modification and fiber content on physical properties of sisal fiber/polypropylene composites, *Composites: Part B*, 45, 544-549.
- [53] **Demir H., Atikler U., Balköse D., Tihminhoğlu F.** (2006). The effect of fiber surface treatments on the tensile and water sorption properties of polypropylene-luffa fiber composites, *Composites: Part A*, 37, 447-456.
- [54] **Hollaway L.C.** (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Constr Build Mater*, 24, 2419–45.
- [55] **Matuana L.M, Jin S., Stark N.M.** (2011). Ultraviolet weathering of HDPE/wood–flour composites coextruded with a clear HDPE cap layer. *Polym Degrad Stabil*, 96, 97–106.
- [56] **Wang W., Sain M., Cooper P.A.** (2005). Hygrothermal weathering of rice hull/HDPE composites under extreme climatic conditions. *Polym Degrad Stabil*, 90, 540–50.
- [57] **Beg M.D.H, Pickering K.L.** (2008). Accelerated weathering of unbleached and bleached kraft wood fibre reinforced polypropylene composites. *Polym Degrad Stabi*, 93, 1939–46.
- [58] **Campos A., Marconcini J.M., Martins-Franchetti S.M., Mattoso L.H.C.** (2011). The influence of UV-C irradiation on the properties of thermoplastic starch and polycaprolactone biocomposite with sisal bleached fibers. *Polym Degrad Stabil*, 97, 1948-55.
- [59] **Gijsman P.** (2012). *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, USA:Elsevier.
- [60] **Hamid M.R.Y., Ghani M.H.A., Ahmad S.** (2012). Effect of antioxidants and fire retardants as mineral fillers on the physical and mechanical properties of high loading hybrid biocomposites reinforced with rice husks and sawdust, *Industrial Crops and Products*, 40, 96-102.

- [61] **Mausher M., Sain M.** (2006). The efficacy of photostabilizers on the color change of wood filled plastic composites, *Polymer Degradation and Stability*, 91, 1156-1165.
- [62] **Hemmati F., Garmabi H.** (2012). A study of fire retardancy and durability performance of bagasse fiber/polypropylene composite for outdoor applications, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 26, 1041-1056.
- [63] **Madenci E, Guven İ.,** (2006). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*, USA : Springer.
- [64] **ASM Handbook Volume 21: Composites.** (2001), USA : ASM International.
- [65] **Tan P., Tong L., Steven G. P.** (1997). Modelling for predicting the mechanical properties of textile composites -A review, *Composites Part A*, 28(11), 903-922.
- [66] **Vaidya U.K., Chawla K.K., Thattai parthasarthy K., Balaji, G.A.** (2008). The process and microstructure modeling of long-fiber thermoplastic composites, *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society*, 60,43-49.
- [67] **Whitcomb J.D.** (1990). Three-dimensional stress analysis of plain weave composites. *Composite Materials: Fatigue and Stresses*, 3,16–39
- [68] **Guedes J.M, Kikuchi N.** (1990). Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods, *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering*, 83, 143–198.
- [69] **Chapman, C., Whitcomb J.** (1995). Effect of assumed tow architecture on predicted moduli and stresses in plain weave composites, *J. Composite Materials*, 29(16), 2134–2159.
- [70] **Ng, S.P., Tse, P.C., Lau, K.J.** (1998). Numerical and experimental determination of inplane elastic properties of 2/2 twill weave fabric composites, *Composites Part B*, 29B, 735–744.
- [71] **Dasgupta, A., Agarwal, R.K. Bhandarkar, S.M.** (1996). Three-dimensional modelling of woven-fabric composites for effective thermomechanical and thermal properties, *Composites Science and Technology*, 56, 209–223.7.
- [72] **Karkkainen, R.L., Sankar, B.V.** (2006). A direct micromechanics method for analysis of failure initiation of plain weave textile composites, *Compos Science and Technology*, 66, 137–150.
- [73] **Kim, H.J., Swan, C.C.** (2003). Voxel-based meshing and unit-cell analysis of textile composites, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 56, 977–1006.
- [74] **Lomov, S.V., Belov, E.B., Bischoff, T.** (2002). Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms. Part I - Geometry of the preform, *Composites Part A*, 33, 1171–1183.
- [75] **Takano, N., Uetsuji, Y., Kashiwagi, Y., Zako, M.** (1999). Hierarchical modelling of textile composite materials and structures by the

homogenization method, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 7, 207–231.

- [76] **Lomov, S.V., Ivanov, D.S., Verpoest, I., Zako, M.** (2007). Meso-FE Modelling of Textile Composites: Road map, data flow and algorithms, *Composites Science and Technology*, 67, 1870–1891.
- [77] **Sih, G.C., Carpinteri, A., Surace, G.** (1995). *Advanced technology for design and fabrication of composite materials and structures*, Dordrecht : Kluwer Academic publishers.
- [78] **Cox, H.L.** (1952). The elasticity and strength of paper and other fibrous materials, *Brit J Appl Phys*, 3, 72-79.
- [79] **Halpin, J.C.** (1969). Stiffness and expansion estimates, for oriented short fiber composites, *J Compos Mater*, 3, 720-724.
- [80] **Halpin, J.C., Pagano, N.J.** (1969). The laminate approximation for randomly oriented fibrous composites, *J Compos Mater*, 3, 720-724.
- [81] **Hirsch, T.J.** (1962). Modulus of elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate, *J Am Concrete I*, 59, 427-451.
- [82] **Brody, H., Ward, I.M.** (1971). Modulus of short carbon and glass fiber reinforced composites, *Polym Eng Sci*, 11, 139-151.
- [83] **Chou, T.W. Nomura, S.** (1981). Fiber orientation effects of the thermoplastic properties of short fiber composites. *Fibre Sci Technol*, 14, 279-291.
- [84] **Fu, S.Y. Lauke, B.** (1999). Strength anisotropy of misaligned short-fiber-reinforced polymers, *Compos Sci Technol*, 59, 699-708.
- [85] **Hine, P.J., Davidson, N., Duckett, R.A., Ward, I.M.** (1995). Measuring the fiber orientation and modelling the elastic properties of injection-moulded long-glass-fiberreinforced nylon, *Compos Sci Technol*, 53, 125-131.
- [86] **Zárate, C.N., Aranguen, M.I., Reboredo, M.M.** (2000). Resol-vegetable fibers composites, *J Appl Polym Sci*, 77,1832-1840.
- [87] **Nielson, L. E.** (1974). *Mechanical properties of polymer and composites*, NewYork: Marcel Dekker.
- [88] **Christensen, R.M., Waals, F.M.** (1972). Effective Stiffness of Randomly Oriented Fiber Composites, *Journal of Composite Materials*, 6, 518-532.
- [89] **Lee, L.H.** (1969). Strength-composition relationships of random short glassfiber-thermoplastics composites, *Polymer Engineering and Science*, 9, 213-219.
- [90] **Tsai, S.W., Pagano, N.J.** (1968). *Invariant properties of composite materials*, Stamford : Technomic Publishing Co.
- [91] **Manera, M.** (1977). Elastic properties of randomly oriented short fiber-glasscomposites, *Journal of Composite Materials*, 11, 235-247.
- [92] **Pan, N.** (1996). The elastic constants of randomly oriented fiber composite: A newapproach to prediction, *Science and Engineering of composite materials*, 5, 63-72.

- [93] **Tucker, C.L., Liang, E.** (1999). Stiffness prediction for unidirectional short-fibercomposites: Review and evaluation, *Composites Science and Technology*, 59, 655-671.
- [94] **Curtis, P.T., Bader, M.G., Bailey, J.E.** (1978). The stiffness and strength of a polyamide thermoplastic reinforced with glass and carbon fibres, *J. Mat. Sci.* 13, 377-390.
- [95] **Mehan, M.L., Schadler, L.S.** (2000). Micromechanical behavior of short-fibre polymer composites, *Compos. Sci. Technol.*, 60, 1013-1026.
- [96] **Fu, S.Y., Lauke, B.** (1996). Effects of fibre length and fibre orientation distributions on the tensile strength of short fibre reinforced polymers (SFRP), *Compos. Sci. Technol.*, 56, 1179-1190.
- [97] **Ji-Zhao L.** (2011). Predictions of tensile strength of short inorganic fibre reinforced polymer composites, *Polymer Testing*, 30, 749-752.
- [98] **Piggott, M.R.** (1994). Short fibre polymer composites: a fracture-based theory of fibre reinforcement, *J. Compos. Mater.*, 28, 588-606.
- [99] **Epaarachchi, J., Ku, H., Gohel, K.** (2010). Simplified empirical model for prediction of mechanical properties of random short fibre/vinylester composites, *J. Compos. Mater.*, 44 (6),779-788.
- [100] **Biagiotti, J., Fiori, S., Torre, L., Lopez-Manchado, M.A., Kenny, J.M.** (2004). Mechanical properties of polypropylene matrix composites reinforced with natural fibres: a statistical approach, *Polym Comp.*,25(1), 26-36.
- [101] **Angelo, G.F., Mark, T.K., Ning Y.** (2006). Predicting the elastic modulus of natural fibre reinforced thermoplastics, *Composites: Part A*, 37,1660-1671.
- [102] **Abdelmouleh, M., Boufi, S., Belgacem, M.N., Dufresne, A.** (2007). Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading, *Composites Science and Technology*, 67, 1627-1639.
- [103] **Tesoro, G., Wu, Y.** (1991). Silane coupling agents: the role of the organofunctional group, *J Adhes Sci Technol*, 5, 771-784.
- [104] **Navoroj, S., Culler, R., Koenig, J.L.** (1984). Structure and adsorption characteristics of silane coupling agents on silica and E-glass fiber; dependence on pH, *J Colloid Interf Sci*, 97, 309-317.
- [105] **Riegel, B., Blittersdorf, S., Kiefer, W.** (1998). Kinetic investigations of hydrolysis and condensation of the glycidoxypopyltrimethoxysilane / aminopropyltriethoxy-silane system by means of FT-Raman spectroscopy I, *J NonCryst Solids*, 226, 76-84.
- [106] **Matuana, L.M., Balatinecz, J.J., Park, C.B.** (1999). X-ray photoelectron spectroscopy study of silane-treated newsprintfibers, *Wood Sci Technol* 33, 259-270.
- [107] **Valadez-Gonzalez, A., Cervantes-Uc, J.M., Olayo, R.** (1999). Chemical modification of henequen fibres with an organosilane coupling agent, *Compos Part B: Eng.*, 3, 321-331.

- [108] **Xie, Y., Hill, C., Xiao, Z.** (2010). Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review, *Compos Part A: Appl Sci Manuf.*, *41*, 806–819.
- [109] **Herrera-Franco, P.J. Valadez-Gonza'lez, A.** (2004). Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composites, *Compos Part A: Appl Sci Manuf*, *35*, 339–345.
- [110] **Li, X., Tabil, L.G., Panigrahi, S.** (2007). Chemical treatment of natural fibre for use in natural fibre-reinforced composites: A review, *Polym Environ.*, *15*, 25–33.
- [111] **Cyras, V.P., Vallo, C., Kenny, J.M.** (2004). Effect of chemical treatment on the mechanical properties of starch-based blends reinforced with sisal fibre, *J Compos Mater.*, *38(16)*, 1387–1399.
- [112] **Ouajai, S., Shanks, R.A.** (2005). Composition, structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemical treatment, *Polym Degrad Stab.*, *89*, 327–335.
- [113] **Prasad, S.V., Pavithran, C., Rohatgi, P.K.** (1983). Alkali treatment of coir fibres for coir–polyester composites, *J Mater Sci*, *18*, 1443–1454.
- [114] **Mwaikambo, L., Ansell, M.** (2002). Chemical modification of hemp, sisal, jute and kapok fibres by alkalization, *J Appl Polym Sci*, *84*, 2222–2234.
- [115] **Qiu, W., Zhang, F., Endo, T.** (2003). Preparation and characteristics of composites of high-crystalline cellulose with polypropylene: Effects of maleated polypropylene and cellulose content, *J Appl Polym Sci.*, *87*, 337–345.
- [116] **Keener, T.J., Stuart, R.K., Brown, T.K.** (2004). Maleated coupling agents for natural Ebre composites, *Compos Part A: Appl Sci Manuf*, *35*, 357–362.
- [117]. **Timothy, R.F., Joseph, C.B., Ben, H.** (2001). *Maleic anhydride, maleic acid, and fumaric acid*. USA: Huntsman Petrochemical Corporation Austin Laboratories.
- [118] **Mathew, A.P., Oksman, K., Sain, M.** (2006). The effect of morphology and chemical characteristics of cellulose reinforcements on the crystallinity of polylactic acid, *J. Appl. Polym. Sci.* *101*, 300–310.
- [119] **Bouafif, H., Koubaa, A., Perre, P., Cloutier, A., Riedl, B.** (2009). Wood particle/high-density polyethylene composites: thermal sensitivity and nucleating ability of wood particles, *J Appl Polym Sci.*, *113*, 593–600.
- [120] **Krupa, I., Luyt, A.S.** (2001). Thermal and mechanical properties of LLDPE cross-linked with gamma radiation, *Polym Degrad Stab.*, *71*, 361–6.
- [121] **Marcovich, N.E., Villar, M.A.** (2003). Thermal and mechanical characterization of linear low density polyethylene/wood flour composites, *J Appl Polym Sci.*, *90*, 2775–84.
- [122] **Wunderlich, B.** (1990). *Thermal Analysis*. New York: Academic Press.



- [123] **Mohanty, S., Nayak, S.K.** (2010). Short bamboo fiberreinforced HDPE composites: Influence of fiber content and modification on strength of the composite, *J Reinf Plast Compos.*,29, 2199–2210.
- [124] **Araujo, J.R., Waldman, W.R., Paoli, M.** (2008). Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibers : Coupling agent effect, *Polymer Degradation and Sta*, 93,1770-75.
- [125] **John, L.Z., Wu, Q., Negulescu, I.I.** (2005). Wood – fiber / high density polyethylene composites: coupling agent performance, *J. Appl. Polym Sci*,96,93-102.
- [126] **Majid, R.A., Ismail, H., Taib, R.M.** (2010). Effects of polyethylene-g-maleic anhydride on properties of low density polyethylene/thermoplastic sago starch reinforced kenaf fiber composites, *Iranian Polymer Journal*,19, 501-10.
- [127] **Pedroso, A.G., Rosa, D.S.** (2005). Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends, *Carbohydrate Polymers*, 59, 1–9.
- [128] **Beg, M.D.H., Pickering, K.L.** (2008). Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. Part I: Effects on physical and mechanical properties, *Composites: Part A*, 39, 1091-1100.
- [129] **Sanadi, A.R., Caulfield, D.F., Jacobson, R.E., Rowell, R.M.** (1995). Renewable agricultural fibres as reinforcing fillers in plastics: mechanical properties of kenaf fibre-polypropylene composites, *Ind Eng Chem Res*, 34,1889-96.
- [130] **Rana, A.K., Mandal, A., Mitra, B.C., Jacobson, R., Rowell, R.M., Banerjee, A.N.** (1998). Short jute fiber-reinforced polypropylene composites: effect of compatibilizer, *J Appl Polym Sci.*,69,329-38.
- [131] **Luz, S.M., Tio, J.D., Rocha, G., Gonçalves, A., Jr, A.** (2008). Cellulose and celluloligninb from sugarcane bagasse reinforced polypropylene composites : Effect of acetylation on mechanical and thermal properties,*Composites Part A*, 39, 1362-69.
- [132] **AlMaadeed, M.A., Kahraman, R., Khanam, P.N., Madi, N.** (2012). Date palm wood flour/glass fibre reinforced hybrid composites of recycled polypropylene: Mechanical and thermal properties, *Materials&Design*, 42, 289-94.
- [133] **Joseph, P.V., Rabello, M.S., Mattoso, L.H.C., Joseph, K., Thomas, S.** (2002). Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites, *Compos Sci Technol*, 62,1357–72.
- [134] **Briassoulis, D., Aristopoulou, A., Bonora, M., Verlodt, I.** (2004). Degradation characterisation of agricultural low-density polyethylene films, *Biosystems Engineering*, 88 (2), 131–143.
- [135] **Gulmine, J.V., Janissek, P.R., Heise, H.M., Akcelrud, L.** (2003). Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering, *Polymer Degradation and Stability*, 79, 385–397.

- [136] **Wonseop Jin, M., Abdul, K., Weon-Bae, K., Changwoon, N.** (2004). Effects of UV irradiation on physico-mechanical properties of EPDM/buckminsterfullerene composite, *Polym. Adv. Technol.*, *15*, 662–668.
- [137] **Marcel, I.P., Silvia, P., Cecilia, S., Iuliana, S., Dorina, C., Dana M.C., Niculina, P.** (2013). Mechanical properties and weathering behavior of polypropylene-hemp shives composites, *Journal of Chemistry*, *2013*, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/343068>.
- [138] **Raluca, N.D., Maria, B., Marek, K., Iuliana, S.** (2011). Evaluation of properties of ldpe/oak wood composites exposed to artificial ageing, *Cellulose Chem. Technol.*, *45 (1-2)*, 127-135.
- [139] **Butylina, S., Hyvarinen, M., Karki, T.** (2012). A study of surface changes of wood-polypropylene composites as the result of exterior weathering, *Polymer Degradation and Stability*, *97*, 337-345.
- [140] **Starka, N.M., Matuana, L.M.** (2004). Surface chemistry changes of weathered HDPE/wood-flour composites studied by XPS and FTIR spectroscopy, *Polymer Degradation and Stability*, *86*, 1-9.
- [141] **Carrasco, F., Pages, P., Pascual, S., Colom, X.** (2001). Artificial aging of high-density polyethylene by ultraviolet irradiation, *European Polymer Journal*, *37*, 1457-1464.
- [142] **Butylina, S., Hyvarinen, M., Karki, T.** (2012). Accelerated weathering of wood–polypropylene composites containing minerals, *Composites: Part A*, *43*, 2087-2094.
- [143] **Ramanujam, M.** (2012). *Photo-oxidation and weathering of LDPE studied by surface and bulk analysis.* (Yüksek Lisans Tezi). Berlin Technical University, Berlin.
- [144] **Fabiyi, J.S., McDonald, A.G., Wolcott, M.P., Griffiths, P.R.** (2008). Wood plastic composites weathering: Visual appearance and chemical changes, *Polymer Degradation and Stability*, *93*, 1405-1414.
- [145] **La Mantia, F.P., Morreale, M.** (2008). Accelerated weathering of polypropylene/wood flour composites, *Polymer Degradation and Stability*, *93*, 1252-1258.
- [146] **Ahmad Thirmizir, M.Z., Mohd Ishak, Z.A., Mat Taib, R., Rahim, S., Mohamad Jani, S.** (2011). Natural weathering of kenaf bast fibre-filled poly(butylene succinate) composites: effect of fibre loading and compatibiliser addition, *Journal of Polymer Environment*, *19*, 263-273.
- [147] **Abu-Sharkh, B.F., Hamid, H.** (2004). Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis, *Polymer Degradation and Stability*, *85*, 967-973.
- [148] **Ke-Chang, H., Yong-Long, C., Jyh-Horng, W.** (2012). Natural weathering properties of acetylated bamboo plastic composites, *Polymer Degradation and Stability*, *97*, 1680-1685.

- [149] **Fengel, D., Wegener, G.** (1989). *Wood: chemistry, ultrastructure, reaction*. Berlin: Walter de Gruyter.
- [150] **Kringstad, K.P., Lin, S.Y.** (1970). Mechanism in the yellowing of high yield pulps by light: structure and reactivity of free radical intermediates in the photodegradation of lignin, *Tappi J*,53,2296-301.
- [151] **Azwa, Z.N., Yousif, B.F., Manalo, A.C., Karunasena, W.** (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres, *Materials and Design*, 47, 424–442.
- [152] **Ichazo, M.N., Albano, C., Gonzales, J.** (2001). Polypropylene/wood flour composites: treatments and properties, *Composites Structures*, 54, 207-214.
- [153] **Mohd, H.A.G., Mohd, N.S., Ruey, S.C., Sahrim, A., Mohd, R.Y.H.** (2014). The effects of antioxidants content on mechanical properties and water absorption behaviour of biocomposites prepared by single screw extrusion process, *Journal of Polymers*, 2014,1-6.
- [154] **Klyosov, A.A.** (2007). *Plastic Composites*. New York: John Wiley & Sons.
- [155] **Adel, R.K., Denis, R.** (2013). Degradation behavior of maleated polyethylene/ground tire rubber thermoplastic elastomers with and without stabilizers, *Polymer Degradation and Stability*, 98, 2184-2192.
- [156] **Kong, Y., Hay, J.N.** (2003). The enthalpy of fusion and degree of crystallinity of polymer as measured by DSC, *Eur. Polym. J.* 39, 1721–1727.
- [157] **Jabarin, S.A., Lofgren, E.A.** (1994). Photooxidative effects of properties and structure of high-density polyethylene, *J Appl Polym Sci*,53(4),411–23.
- [158] **Zou, P., Xiong, H., Tang, S.** (2008). Natural weathering of rape straw flour (RSF)/HDPE and nano-SiO<sub>2</sub>/RSF/HDPE composites, *Carbohydrate polymers*,73(3), 378-83.
- [159] **Kaci, M., Sadoun, T., Cimmino, S.** (2001). Crystallinity measurements of unstabilized and HALS-stabilized LDPE films exposed to natural weathering by FT-IR, DSC and WAXS analyses, *Int J PolymAnal Charact*, 6(5),455–64.
- [160] **Muasher, M., Sain, M.** (2006). The efficacy of photostabilizers on the color change of wood filled plastic composites, *Polymer Degradation and Stability*, 91, 1156-1165.
- [161] **Michel, A.T., Billington, S.L.** (2012). Characterization of poly-hydroxybutyrate films and hemp fiber reinforced composites exposed to accelerated weathering, *Polymer Degradation and Stability*, 97, 870-878.



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Mehmet Safa Bodur  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 03.06.1985 - İstanbul  
**E-posta** : mbodur@itu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2007, Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2010, İstanbul Teknik Üniversitesi, Malzeme ve İmalat Teknolojileri Ana Bilim Dalı, Makine Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Misafir Araştırmacı : Washington State Üniversitesi (ABD), Composite Materials and Engineering Center  
(Şubat 2015-Şubat 2016)
- Araştırma Görevlisi : İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği, Malzeme-İmalat Teknolojileri Ana Bilim Dalı  
(Şubat 2009 – )

### DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Bodur, M.S.,** Bakkal, M., Sonmez, H.E. (2015). The effects of different chemical treatment methods on the mechanical and thermal properties of textile fiber reinforced polymer (T-FRP) composites." (*Accepted December. 2015 - Journal of Composite Materials*).

- Hamouda, T., Hassanin, A., Kilic, A., Candan, Z., **Bodur, M.S.** (2015). Sandwich hybrid biocomposites from coir fibers reinforced with fiber glass fabrics: physical and mechanical evaluation. (*Accepted July. 2015 - Polymer Composites*).
- **Bodur, M.S.**, Bakkal, M., Sonmez, H.E. (2015). The effect of recycled-LDPE and maleic anhydride addition on the mechanical and physical properties of the textile waste cotton fiber reinforced polymer (T-FRP) composites. (*Accepted June 2015- Polymer Composites*).
- **Bodur, M.S.**, Bakkal, M., Savas, M., Berkalp, O.B. (2014). A new approach for the development of textile waste cotton reinforced composites (T-FRP) : laminated hybridization vs coupling agents." *Journal of Polymer Engineering*, 2014, doi: 10.1515/polyeng-2013-0281.
- Bakkal, M., **Bodur, M.S.**, Berkalp, O., Yilmaz, S. (2012). The Effect Of Reprocessing On The Mechanical Properties Of The Waste Fabric Reinforced Composites. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 212, Issue 11, November 2012, Pages 2541-2548.
- **Bodur, M.S.**, Gulmez, T., Durademir, A. (2012). Investigations on tensile properties waste fillers reinforced composites." *Defect and Diffusion Forum*. Volumes 326-328 (ISBN: 978-3-03785-400-6) pp. 354-360. (2012). Doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.354.