

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**NANO KATKILI BİYOKOMPOZİTLERİN OTOMOTİV**  
**MALZEMELERİNDE KULLANILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAMİDE TERMEK**

**DENİZLİ, ARALIK - 2021**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**



**NANO KATKILI BİYOKOMPOZİTLERİN OTOMOTİV  
MALZEMELERİNDE KULLANILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAMİDE TERMEK**

**DENİZLİ, ARALIK - 2021**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**HAMİDE TERMEK**

## ÖZET

**NANO KATKILI BİYOKOMPOZİTLERİN OTOMOTİV  
MALZEMELERİNDE KULLANILMASI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
HAMİDE TERMEK  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OTOMOTİV ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. CEM GÖK)  
DENİZLİ, ARALIK - 2021**

Son dönemlerde artan çevresel baskılar ve şirket politikaları nedeniyle otomotiv sanayisinde yakıt maliyetlerini düşürmek ve CO<sub>2</sub> emisyon oranlarını azaltılmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda alüminyum ve çelik malzeme yerine geri dönüşümü olan çevreyle dost malzemeler tercih edilmiştir. Mühendislik ve ticari plastiklerin kullanımının artmasıyla petrol bazlı yakıtta olan bağımlılık da azalmıştır. Bu tez çalışmasında polilaktik asit (PLA), karbon fiber, grafen kullanılarak nano katkılı biyokompozit bir malzeme hazırlanmıştır. PLA özellikleri sayesinde petrol bazlı polimerlere alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır ve katkı maddesi olarak kullanılan karbon fiber ve grafenin mukavemet özelliklerini bir miktar arttırdığı görülmüştür. PLA içerisine %1, %3, %5 ve %10 gram karbon fiber eklenmiştir. En düşük karbon fiber oranına sahip olan PLA'ya 0.1 gram grafen eklenip oluşan etki gözlenmiştir. Dört farklı oranda karbon fiber, kloroform ile çözdürülmüş PLA içerisine eklenmiş ve jel haldeki PLA karbon fiber karışımı atmosfer koşullarında soğumaya bırakılmıştır. Soğuyup katılaştıran malzeme kalıp içerisine alınıp ısıl işlem yapılmış ve sıcak presleme işleminin ardından kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numunelere ilk olarak mekanik özellikleri görmek adına çekme testi, ardından FTIR, SEM, DMA ve EDS analizleri yapılmıştır. Karbon fiber oranının artması yüzde uzamayı düşürmüş ve katkı maddesi olarak grafen kullanılması mukavemeti bir miktar arttırmıştır. Hazırlanan test numunelerinin her bir özelliği kendi aralarında değerlendirilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELEER:** BİYOKOMPOZİT, POLİLAKTİK ASİT, KARBON FİBER, GRAFEN, NANOMALZEME

## **ABSTRACT**

**UTILIZATION OF NANO ADDITIVE BIOCOMPOSITES IN  
AUTOMOTIVE MATERIALS  
MSC THESIS  
HAMİDE TERMEK  
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
AUTOMOTIVE ENGINEERING  
(SUPERVISOR: PROF. DR. CEM GÖK)  
DENİZLİ, DECEMBER 2021**

Due to increasing environmental pressures and company policies in recent years, various studies have been carried out in the automotive industry to reduce fuel costs and reduce CO<sub>2</sub> emission rates. In these studies, environmentally friendly materials that can be recycled have been preferred instead of aluminum and steel materials. With the increasing use of engineering and commercial plastics, the dependence on petroleum-based fuel has also decreased. In this thesis, a nano-doped biocomposite material was prepared by using polylactic acid (PLA), carbon fiber and graphene. Thanks to its PLA properties, it has started to be used as an alternative to petroleum-based polymers, and it has been observed that carbon fiber and graphene, which are used as additives, slightly increase the strength properties. 1%, 3%, 5% and 10% grams of carbon fiber were added to PLA. The effect was observed by adding 0.1 gram of graphene to PLA, which has the lowest carbon fiber ratio. Four different ratios of carbon fiber were added to PLA dissolved with chloroform, and the PLA carbon fiber mixture in gel form was left to cool under atmospheric conditions. The material that cooled and solidified was taken into the mold, heat treated and removed from the mold after the hot pressing process. Firstly, tensile test was performed on the samples removed from the mold in order to see the mechanical properties, then FTIR, SEM, DMA and EDS analyzes were performed. Increasing the carbon fiber ratio decreased the percent elongation and the use of graphene as an additive increased the strength somewhat. Each feature of the prepared test samples was evaluated among themselves.

**KEYWORDS:** BIOCOMPOSITE, POLYLACTIC ACID, CARBON FIBER, GRAPHENE, NANOMATERIAL

## **İÇİNDEKİLER**

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1    Literatür özeti .....	1
1.2    Tezin Amacı .....	3
<b>2. KOMPOZİT MALZEMELER VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>4</b>
2.1    Kompozit Malzeme .....	4
2.2    Kompozit Malzeme Bileşenleri .....	5
2.2.1    Matris .....	5
2.2.1.1    Metal Matrisli Kompozitler (MMK).....	6
2.2.1.2    Seramik Matrisli Kompozitler.....	7
2.2.1.3    Polimer Matrisli Kompozitler .....	8
2.2.1.3.1    Polilaktik Asit (PLA) .....	12
2.3    Kompozit Malzemelerin Elyaf Çeşitleri.....	19
2.3.1    Cam Elyaf Kompozit Malzemeler .....	24
2.3.2    Bor Elyaf Kompozit Malzemeler.....	27
2.3.3    Silisyum Karbür Elyaf Kompozit Malzemeler .....	27
2.3.4    Alumina Elyaf Kompozit Malzemeler.....	28
2.3.5    Karbon Elyaf Kompozit Malzemeler.....	28
2.3.6    Aramid Elyaf Kompozit Malzemeler .....	30
2.4    Kompozit Malzemelerin Matris Çeşitleri.....	31
2.4.1    Epoksi Reçine Matrisler.....	32
2.4.2    Polyester Reçine Matrisli Kompozitler.....	33
2.4.3    Vinilester Reçine Matrisli Kompozitler.....	33
2.4.4    Fenolik Reçine Matrisli Kompozitler .....	33
2.5    Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri .....	33
2.5.1    El Yatırma Yöntemi ile Üretim .....	34
2.5.2    Püskürtme Yöntemi ile Üretim .....	35
2.5.3    Elyaf Sarma Yöntemi ile Üretim .....	36
2.5.4    Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi ile Üretim (RTM) .....	36
2.5.5    Hazır Kalıplama Yöntemi ile Üretim.....	37
2.5.6    Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi ile Üretim .....	38
2.5.7    Vakum Torbalama Yöntemi İle Üretim.....	38
2.5.8    Ekstrüzyon Yöntemi ile Üretim.....	39
<b>3. TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN OTOMOTİV UYGULAMALARI</b> .....	<b>40</b>
3.1    Termoplastiklerin Otomotiv Endüstrisindeki Önemi .....	41
3.2    Orjinal Termoplastik Matrisli Kompozit Kullanımı .....	42
3.3    Geri Dönüşmüş Termoplastik Matrisli Kompozit Kullanımı.....	44
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>48</b>
4.1    Yöntem .....	48
4.1.1    Dinamik Mekanik Analiz.....	49
4.1.2    Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR).....	50

4.1.3	Taramalı elektron mikroskobu.....	51
4.2	Malzemelerin Hazırlanması.....	52
4.2.1	Karışımların Hazırlanması.....	57
<b>5.</b>	<b>BULGULAR .....</b>	<b>60</b>
5.1	Mekanik Özellikler.....	60
5.2	Biyokompozitlerde FTIR Analizi.....	63
5.3	Biyokompozitlerde EDS Analizi.....	66
5.4	FESEM Analizi Sonuçları.....	68
5.5	Dinamik Mekanik Analiz Sonuçları.....	71
<b>6.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>74</b>
<b>7.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>76</b>
<b>8.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>79</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 2.1: Kompozitlerin takviye türüne göre sınıflandırılmasının şematik gösterimi: (a) plaka takviyeli (b) elyaf takviyeli (c) parçacık takviyeli	4
Şekil 2.2: Polimerik matrislerin çekme dayanımları (Biron, 2007).....	10
Şekil 2.3: Polimerik matrislerin kullanım sıcaklıkları (Biron, 2007) .....	11
Şekil 2.4: PLA'nın doğada döngüsünün şematik gösterimi verilmiştir (Xiao ve diğ, 2012).....	14
Şekil 2.5: PLA'nın bozunması (Henton ve diğ, 2005) .....	14
Şekil 2.6: Ticari PLA'nın görüntüsü.....	15
Şekil 2.7: PLA'nın kimyasal yapısı .....	16
Şekil 2.8: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması; (a) elyaf takviyeli kompozitler, (b) parçacık takviyeli kompozitler, (c) tabakalı kompozitler, (d) karma (hibrid) kompozitler (Bağcı, 2010) .....	20
Şekil 2.9: (a) Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler (b) kesikli elyaf takviyeli kompozit malzemeler (Asi, 2008).....	21
Şekil 2.10: Dispersiyonla mukavemeti artırılmış parçacık takviyeli kompozitlerin yapısı .....	21
Şekil 2.11: Tabakalı kompozit malzemelerin genel görünüşü (Demirel, 2007)...	22
Şekil 2.12: Dokuma ve tek yönlü elyafların farklı yönlerdeki özellikleri a) Eşit özellikler, b) Eşit olmayan özellikler (Demirel, 2007).....	22
Şekil 2.13: Tabakalı kompozitlerde yönlendirme şekilleri a) Yarı-izotropik yönlendirme şekline sahip görüntü, b) Tek yönlü yönlendirme şekline sahip görüntü (Demirel, 2007) .....	23
Şekil 2.14: Çok yönlü olarak dokunmuş cam kumaşların farklı iplik açlarına sahip görüntüleri (Demirel, 2007) .....	23
Şekil 2.15: Farklı dokuma elyaf türleri (Vatangül, 2008) .....	24
Şekil 2.16: Dokunmuş cam elyaf ve iplik görüntüsü.....	25
Şekil 2.17: Dokunmuş bor elyaf (Gülmez, 2018).....	27
Şekil 2.18: Dokunmuş karbon elyaf görüntüsü (Gülmez,2018) .....	30
Şekil 2.19: Dokunmuş aramid elyaf görüntüsü (Gülmez, 2018).....	31
Şekil 2.20: El yatırma işlemi (Durgun, 2014).....	35
Şekil 2.21: Püskürtme yöntem ile üretim (Vatangül, 2008) .....	35
Şekil 2.22: Elyaf sarma yöntemi ile üretimin şematik gösterimi (Gülmez, 2018) 36	
Şekil 2.23: RTM metodu (Gülmez, 2018).....	37
Şekil 2.24: Hazır kalıplama yöntemi ile üretim (Gülmez, 2018) .....	37
Şekil 2.25: Enjeksiyon ile kalıplama yönteminin şematik görüntüsü (Gülmez, 2018).....	38
Şekil 2.26: Vakum torbalama yönteminin şematik görüntüsü (Durgun, 2015).....	39
Şekil 2.27: Ekstrüzyon yöntemi ile üretimin şematik gösterimi (Gülmez, 2018). 39	
Şekil 3.1: Binek araçlarında kullanılan kompozit malzemelerin dağılımı (Belingardi vd.2011). .....	40
Şekil 3.2: Avrupa Birliğinde üretilen binek araçlarında termoplastik matrisli.....	42
Şekil 3.3: PP – E-Camından üretilmiş motor altı koruyucusu (Belingardi vd.2011). .....	42



<b>Şekil 3.4:</b> PE matrisli E-Camı fiberlerinden üretilmiş darbe emici tampon bağlantı parçası ve BMW 3 serisi araçlarındaki uygulaması (Belingardi vd.2011).....	43
<b>Şekil 3.5:</b> Toyota binek otomobilleri için Alüminyum ve termoplastik kompozitten imal edilmiş yağ karterleri.....	43
<b>Şekil 3.6:</b> Sırasıyla çelik, alüminyum alaşımı ve PP matrisli kompozitten üretilmiş yağ karterlerinin standart darbe (çarpma) deneyi sonuçları .....	44
<b>Şekil 3.7:</b> Renault otomobillerinde darbe alanında kullanılan geri dönüşmüş termoplastik matrisli kompozitlerden yapılan parçalar. 32 nolu parçalar öncelikli darbeye maruz elemanlardır. ....	44
<b>Şekil 3.8:</b> Otomobilden başlayarak hafif ticari araçlarda geri dönüşmüş termoplastik matrisli kompozit kullanım bölgeleri .....	45
<b>Şekil 3.9:</b> FIAT otomobillerinde ön tamponun darbe deneyi esaslarının şematik gösterilişi (Belingardi vd. 2011).....	45
<b>Şekil 3.10:</b> Honda otomobillerinde kompozit ön tampon.....	46
<b>Şekil 3.11:</b> İnsan ile çarpışma simülasyonu.....	46
<b>Şekil 3.12:</b> Çarpışma modellerinin sonlu elemanlar yöntemiyle gösterimi.....	47
<b>Şekil 4.1:</b> Deney çalışmasında kullanılan granüler formdaki PLA .....	48
<b>Şekil 4.2:</b> DMA cihazının görüntüsü .....	50
<b>Şekil 4.3:</b> FTIR cihazının görüntüsü .....	51
<b>Şekil 4.4:</b> FESEM cihazının görüntüsü.....	51
<b>Şekil 4.5:</b> Kloroform ile çözdürülmüş PLA görüntüsü.....	52
<b>Şekil 4.6:</b> Kapalı kap içerisinde kloroform ile çözülmeye bırakılmış PLA.....	53
<b>Şekil 4.7:</b> Hassas terazi görüntüsü .....	53
<b>Şekil 4.8:</b> Kloroform ile çözdürülmüş sıvı hale gelmiş olan PLA'ya % 1 oranında karbon fiber eklenmesiyle katılaşmaya bırakılmış kompozit malzeme .....	54
<b>Şekil 4.9:</b> % 1 oranında karbon fiber eklenmiş sıvı haldeki PLA oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılmıştır .....	54
<b>Şekil 4.10:</b> 24 saatin sonunda katılaştıran PLA+karbon fiber karışımı .....	55
<b>Şekil 4.11:</b> Çeker ocağı.....	56
<b>Şekil 4.12:</b> Soljel yöntemiyle üretilmiş gözenekli yapıdaki PLA+Karbon fiber karışımı.....	56
<b>Şekil 4.13:</b> TS EN ISO 527-4'e göre yaptırılan çelik kalıbın görüntüsü.....	58
<b>Şekil 4.14:</b> Kalıbın pres makinesi üzerindeki görüntüsü .....	59
<b>Şekil 4.15:</b> Etüv fırının görüntüsü .....	59
<b>Şekil 5.1:</b> 0.1gram grafen katkılı CPC 0.1 kodlu numunenin çekme testi sonuçları .....	61
<b>Şekil 5.2:</b> % 0.1 karbon fiber içeren numunenin çekme testi sonucu.....	62
<b>Şekil 5.3:</b> 0.3 gram karbon fiber içeren cpc 0.3 kodlu numunenin çekme testi sonuçları .....	62
<b>Şekil 5.4:</b> 0.5 gram karbon fiber içeren PLA 'nın çekme testi sonucu.....	62
<b>Şekil 5.5:</b> 0.10 gram karbon fiber içeren PLA 'nın çekme testi sonucu.....	63
<b>Şekil 5.6:</b> 0.1 gram karbon fiber içeren PLA' nın numunenin FTIR analizi .....	64
<b>Şekil 5.7:</b> 0.1 gram karbon fiber içeren ve 0.1 gram grafen ilavesi yapılan numunenin FTIR analizi.....	65
<b>Şekil 5.8:</b> CPC ve CPC+G numunelerinin FTIR analizi .....	65
<b>Şekil 5.9:</b> 0.1 gram karbon fiber ve 0.1 gram grafen içeren numunenin EDS analizi .....	67
<b>Şekil 5.10:</b> 0.1 gram karbon fiber içeren numunenin EDS analizi .....	67

<b>Şekil 5.11:</b> PLA+Karbon Fiber+Grafen ( $c_{pc}=g=0,1$ ) 250X ait FESEM görüntüsü.....	68
<b>Şekil 5.12:</b> PLA+Karbon Fiber+Grafen ( $c_{pc}=g=0,1$ ) 500X ait FESEM görüntüsü.....	69
<b>Şekil 5.13:</b> PLA+Karbon Fiber+Grafen ( $c_{pc}=g=0,1$ ) 1.00K X ait FESEM görüntüsü.....	69
<b>Şekil 5.14:</b> PLA+Karbon Fiber+Grafen ( $c_{pc}=g=0,1$ ) ait FESEM görüntüsü.....	69
<b>Şekil 5.15:</b> PLA+Karbon Fiber ( $c_{pc}=0,1$ ) 250X ait FESEM görüntüsü .....	70
<b>Şekil 5.16:</b> PLA+Karbon Fiber ( $c_{pc}=0,1$ ) 500X ait FESEM görüntüsü.....	70
<b>Şekil 5.17:</b> PLA+Karbon Fiber ( $c_{pc}=0,1$ ) 1.00K ait FESEM görüntüsü .....	71
<b>Şekil 5.18:</b> PLA+Karbon Fiber ( $c_{pc}=0,1$ ) 2.00K X ait FESEM görüntüsü.....	71
<b>Şekil 5.19:</b> PLA matrisli 0.1 gram karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin DMA grafiği.....	72
<b>Şekil 5.20:</b> PLA matrisli 0.1 gram karbon fiber takviyeli ve 0.1 gram grafen katkı maddesi eklenmiş kompozit malzemenin DMA grafiği .....	73

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> Kompozit malzemelerin üstünlükleri ve dezavantajları .....	4
<b>Tablo 2.2:</b> Plastik matrisli kompozitlerin bazı avantaj ve dezavantajları .....	9
<b>Tablo 2.3:</b> PLA'nın diğer polimerle ile mekanik özelliklerinin karşılaştırılması .	18
<b>Tablo 2.4:</b> PLA'nın ısıl özelliklerinin kıyaslanması .....	19
<b>Tablo 2.5:</b> Cam elyafların mekanik özellikleri (Vatangül, 2008) .....	26
<b>Tablo 2.6:</b> Cam elyaflarların içerdiği bileşimler (Vatangül, 2008).....	26
<b>Tablo 2.7:</b> Alümina elyafların fiziksel özellikleri ve kompozisyonu (Gülmez, 2018) .....	28
<b>Tablo 2.8:</b> Karbon elyaf malzemelerin sahip olduğu mekanik özellikler (Gulmez, 2018).....	29
<b>Tablo 2.9:</b> Piyasada yaygın olarak kullanılan aramid elyafların mekanik özellikleri (Gulmez, 2018).....	31
<b>Tablo 2.10:</b> Bazı termoset malzemelerin sahip olduğu mekanik ve fiziksel özelikleri (Demirel, 2007) .....	32
<b>Tablo 3.1:</b> Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan plastikler .....	41
<b>Tablo 4.1:</b> Çalışma kapsamında oluşturulan reçeteler ve kullanım oranları .....	57
<b>Tablo 4.2:</b> TS EN ISO 527-4'e göre çekme deneyi parçası boyutları.....	58
<b>Tablo 5.1:</b> Hazırlanan Kompozit Malzemenin Çekme Testi Sonuçları .....	61

## SEMBOL LİSTESİ

<b>PLA</b>	:	Poli laktik asit
<b>PP</b>	:	Poli propilen
<b>GO</b>	:	Grafen oksit
<b>CF</b>	:	Karbon fiber
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	:	Alüminyum oksit
<b>Si</b>	:	Silisyum

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerini paylaşarak samimi ilgi ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Cem GÖK'e, çalışmamın laboratuvar süreçlerinde kıymetli zamanını ayırarak yardımını esirgemeyen hocam Arş. Gör. Hasan TÜRKMEN'e,

Kalıp tasarımı ve imalatı konusunda destek olan SG KALIP şirketi yöneticisi Soner GÜMÜŞEL'e, laboratuvar uygulamalarında destek olan Rüçhan YILDIZ'a

Maddi ve manevi desteklerini, ilgilerini hiçbir zaman esirgemeyen bu günlere gelmemi sağlayan sevgili aileme ve her zaman desteklerini üzerimde hissettiren dostlarım Cemre Derya DOĞAN'a, Müge PEŞTERE'ye, Buse BİTİKÇİ'ye, Kamile Selin DEMİRCİ'ye ve Dicle ERDEN GÖNENMİŞ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Akademisyen olmamı çok isteyen ve bugünlere gelmemde maddi manevi büyük emeği olan, ilk öğretmenim akıl hocam sevgili dedem Mestan TERMEK'e şükranlarımı sunarım.

Akademisyen olma yolunda atılan ilk adım olan yüksek lisans eğitimimde yazmış olduğum bu tezi akademisyen olmamı çok isteyen ama ne yazık ki merhum olan dedem Sn. Mestan TERMEK'e ithafen yazıyorum.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Literatür özeti

Zamanla teknolojinin gelişmesi ile birlikte daha hafif, dayanıklı, ucuz ve kolay işlenebilen yeni malzemelerin keşfedilme dönemi başlamıştır. Dünya nüfusunun sürekli artmasıyla birlikte doğaya ve insan sağlığına daha az zararlı malzemelerin kullanımını önem kazanmıştır.

Özellikle II. Dünya Savaşından sonra, sentetik malzemeler hızla gelişmeye başlamıştır ve bu gelişmeyle birlikte bu malzemelerin kullanımında oluşan etkiler daha dikkatli bir şekilde incelenmiştir. Burada sözü edilen malzemeler polimerlerdir. Hayatın birçok alanında kullanılan plastikler, lastikler, kaplama malzemeleri, yapıştırıcılar gibi malzemelerin elde edilmesinde kullanılan temel hammadde polimerlerden oluşur (Keskin,2019).

Polimerik malzemelerin birçok avantajı vardır. Bunlar; hafiflik, kolay işlenebilirlik, kimyasal ve atmosferik etkilere karşı dayanıklı olmak, mekanik özellikleri geliştirilebilir ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle; otomotiv sanayi, dekorasyon, uzay-uçak sanayi, tekstil, inşaat, yapıştırıcı, oyuncak ve hediyelik eşya sanayi, eczacılık ve tıp gibi çok çeşitli alanlarda kendisine oldukça geniş kullanım aralığına bulmuştur.

Petrol kökenli polimer malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte beraberinde sorunlar da başlamıştır. Bu malzemelerin çevreye olan etkilerini azaltmak için son yıllarda çalışmalar hızlanmış ve büyük önem kazanmıştır. Bu kapsamda birçok araştırma yapılmış öne çıkan en önemli konu kullanılan polimerin biyobozunur olmasıdır. Bu kapsamda yapılan araştırmalarda daha çok biyo-bozunur polimerlerin kullanım alanının genişletilmesinin önem kazandığı görülmüştür (Belingardi vd ,2011).

Her geçen gün kullanım alanlarının genişlemesiyle birlikte bu malzemelere istenilen özelliklerin kazandırılması da üzerine düşülmesi gereken konulardan birisi olmuştur. Biyo-bozunur polimerler arasında gösterilen poli laktik asit (PLA), üstün mekanik dayanım ve karbon fiberlerle oluşturduğu ara yüz uyumu sayesinde gelecek vaat eden bir polimerdir.

Bunların yanı sıra PLA; gaz geçirgenliği, iyi biyo-uyumluluğu, yüksek derecede saydamlığı gibi özellikleriyle otomobil parçaları, elektrik endüstrisi, yapı malzemeleri ve havacılık endüstrisi gibi hayatın birçok alanında kullanım alanı bulmuştur. Fakat düşük tokluk ve kolay alevlenebilme özellikleri, PLA'nın farklı sektörlerde kullanımını sınırlamaktadır. Bu yüzden PLA'ya yapılan katkı maddeleriyle kullanım alanındaki sınırlamalar ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. PLA'ya yapılan karbon fiber ilavesiyle mukavemet ve tokluk özelliklerinde iyileştirmeler amaçlanmıştır. Grafen de bilindiği üzere çelikten 100 kat daha dayanıklı ve hafif bir malzemedir. Bu çalışmada PLA'ya katkı maddeleri olarak karbon fiber ve grafen ilave edilmiştir. Bu birleşim sonucunda ana matris PLA takviye elemanları da karbon fiber ve grafen olacak şekilde kompozit malzemeler üretilmiştir (Belingardi vd ,2011).

İki veya daha fazla malzemenin makro boyutlarda bir araya gelerek ve ara yüzey oluşturacak şekilde bir araya gelmesiyle oluşturduğu yeni malzemelere kompozit malzeme denir. Kompozit malzeme üretimindeki ilk hedef, tek başına uygun olmayan, birbiri içerisinde homojen olarak çözünemeyen malzemeleri kullanım alanlarına göre yeni özellikler kazandırmaktır. Polimerler 1960 yıllarında gelişmeye başlamasıyla kompozit malzemelerin kullanımı hızla yaygınlaşmıştır.

Otomotiv sektöründe en önemli konularından biri olan ağırlığın azaltılması konusunda son yıllarda çalışmalar yapılmaya başlamıştır. Otomotiv sektöründe kompozit temelli malzemeler zaman geçtikçe metal esaslı malzemelerin yerini almaya başlamıştır. Bunun en temel sebebi metal matrisli malzemelere göre ağırlığının daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Araçlarda yakıt tasarrufu, ivmelenme, doğayı daha az kirletme ve doğaya daha az zarar verme konuları oldukça önemli konular olduğu için araçların nasıl daha hafif hale getirilebileceği konusu ve araçlarda kullanılan bütün parçaların tamamen geri dönüştürülebilir olması hiçbir zaman önemini kaybetmeyecektir (Keskin,2019).

Zamanla doğal kaynakların azalması ve bunun sonucu olarak da bu kaynakların verimli bir şekilde kullanımının öneminin artmasının anlaşılmasıyla birlikte ve yükselen çevresel bilinç şirket ve hükümet politikaları, sentetik malzemelerin yerine çevresel etkileri çok daha düşük olan doğal, biyolojik ve geri dönüştürülebilir malzemelerin almasını sağlamıştır.

Kyoto protokolü başta olmak üzere birçok protokolda emisyon oranlarının düşürülmesine yönelik çalışmalarda doğal malzemelere yönelik ilginin arttığı görülmüştür. Emisyon oranlarının düşürülmesine yönelik daha çok otomotiv sanayiinde araçların hafifletilmesi temel hedef alınarak çalışmalar yapılmıştır.

## **1.2 Tezin Amacı**

Çevreye duyarlı, enerji maliyetlerini düşürmek amacıyla termoplastik malzemelerin kullanımı yapılan tez çalışmasının temel unsurunu oluşturmaktadır.

Geri dönüştürülmüş malzemelerin pek çok sektörde özellikle otomotiv endüstrisinde kullanımı son dönemlerde önemli araştırma konusu olmuştur. İlk hedeflenen öncelikli uygulama alanlarını binek araçlar ve hafif ticari araçlar oluşturmaktadır. Bunlardan ön ve arka darbe emici tamponlar, arka kapak ve kaportalar, iç bagaj parçaları, yağ karteri, koltuk parçaları vb. üzerine çalışmalar yapılmış, sırasıyla önce AB ülkeleri, Japonya ve ABD'de söz konusu araçlarda kullanımı için projelendirilmiş, tasarım ve dayanç esasları belirlenmiştir. Birçok Avrupa birliği ülkesi, ABD ve Japonya söz konusu olan araçlarda ön ve arka emici tamponlar, arka kapak ve kaportalar, iç bagaj parçaları, yağ karteri, koltuk parçaları vb. gibi parçalarda termoplastik esaslı malzemelerin kullanılmasına yönelik birçok proje yapılmış dayanç esaslarına dayanarak projeler yapılmıştır. Buradan hareketle, geri dönüştürülmüş termoplastik matrisli kompozitlerin kullanımı önemle vurgulanmaktadır. Bu çalışmada poli laktik asit (PLA) matrisli termoplastik, toz haline getirilmiş karbon fiber ve takviye malzemesi olarak grafen belirlenmiştir. Daha sonra bölüm laboratuvarında granül halindeki bulunan PLA, kloroform ile birlikte sol-jel yöntemiyle çözdürülmüş ardından etüv fırınında kloroform uçurulmuş malzeme tasarımı yapılmış kalıp içerisine dökülmüştür. Üretilen malzemenin testleri yapılmıştır.

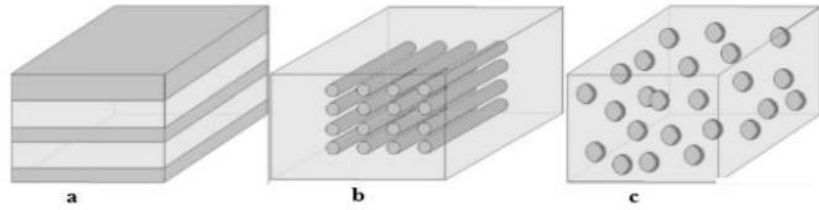


## 2. KOMPOZİT MALZEMELER VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

### 2.1 Kompozit Malzeme

İki veya daha fazla malzemenin makro boyutlarda bir araya gelerek ara yüzey oluşturacak şekilde bir arada bulunmasıyla oluşturduğu yeni malzemeye denir.

Kompozitlerin avantajları sıralanacak olunursa en önemlisi sergilediği özelliklerin kendini oluşturan bileşenlerinkinden daha üstün olmasıdır. Kompozit malzemelerin tasarlanmasıyla malzemedeki dayanım, aşınma dayanımı, hafiflik, tokluk, korozyon direnci, yorulma ömrü, ısıya bağlı davranışlar, termal yalıtım, termal iletkenlik, akustik yalıtım gibi özellikler iyileştirilebilmektedir (Ashton 1969). Sözü edilen konulardan hareketle plastik matrisli kompozitlerin genel anlamda avantaj ve dezavantajları Tablo 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1: Kompozitlerin takviye türüne göre sınıflandırılmasının şematik gösterimi: (a) plaka takviyeli (b) elyaf takviyeli (c) parçacık takviyeli

Tablo 2.1: Kompozit malzemelerin üstünlükleri ve dezavantajları

Kompozit malzemelerin üstünlükleri	Kompozit Malzemelerin dezavantajları
<ul style="list-style-type: none"><li>• Yüksek mukavemet, yoğunluk, rijitlik ve hafiflik işlenebilirlik</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Üretiminin zor olması</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Yüksek korozyon ve sıcaklık dayanımı</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• İşlenme güçlüğü</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Yüksek aşınma ve kimyasal direnç</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Geri dönüşümünün olmaması</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Hava koşulları ve UV ışınlarına karşı dayanım</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Maliyetinin yüksek olması</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Termal ve ısı iletkenliği</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kompozit malzemelerin imal edilirken kullanılan üretim metotlarının kalitesiyle alakalı olarak her zaman ideal özellikler elde edilemez. Aynı kompozit malzeme için bile farklı mukavemet özellikleri gözlenebilir.</li></ul>

## 2.2 Kompozit Malzeme Bileşenleri

Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanı adı verilen iki malzemeden oluşur. Burada kompozit malzemelerin davranışının anlaşılabilmesi için matris ve takviye elemanlarının görevlerinin bilinmesi önemlidir (Yıldızhan 2008 ).

### 2.2.1 Matris

Kompozit malzemelerin matris fazı; metal, polimer veya seramik olabilir (Gay 2003). Kompozitlerde, matris fazının temel görevi beklenen fonksiyonları yerine getirmesidir. Matris, kompozit malzemeye birçok özellikler kazandırır. Bu özellikleri şu şekilde sıralamak mümkün; elyafları bir arada tutmak, elyafların tek başına hareket etmesini engellemek, dışarıdan uygulanan gerilmeyi elyafa iletmek ve bu gerilmeyi homojen bir şekilde dağıtmaktır. Malzemeye bir gerilme kuvveti uygulandığında gerilme kuvvetinin küçük bir kısmı matris tarafından taşınır. Ayrıca matris malzemesi seçilirken malzemenin sünek olmasına dikkat edilmelidir. Dahası elyafların elastiklik modülü matristen çok daha yüksek olmalıdır. Çünkü burada asıl yükü takviye olarak kullanılan elyaflar (fiberler) taşımaktadır.

Matrisin bir diğer görevi kompozit malzemelerde yüzey kalitesi de oldukça önemli olduğu için elyafların yüzeyinin mekanik aşınma gibi veya çevredeki etkilerden doğabilecek kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan hasarlardan korumaktır. Dışarıdan gelen bu etkiler önce yüzeyde başlayıp daha sonra malzeme içerisinde ilerleyen kusurlara neden olur. Bu kusurlar malzemenin mukavemetini etkileyen çekme dayanımında etkisini gösteren kusurlardır (Barut 2015).

Matrisin bir diğer önemli görevi kompozit malzemenin rijitliği sağlamaktır. Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanlarından oluşur. Bu takviye elemanları fiberlerdir. Kompozit malzeme tasarımı gereği matrisler fiberleri birbirinden ayırarak şekildedir. Matris elyafları birbirinden ayırarak malzemeye göreceli bir süneklik ve plastiklik sağlar (Türkmen 2012 ).

Bu sayede oluşan çatlakların elyaftan elyafa geçişi engellenir ve darbe etkisiyle oluşan ani kırılmaların önüne geçilir. Bunun sonucu olarak matris, yapı içerisinde

çatlak ilerlemesinin önüne geçen bariyer görevi görür. Son olarakta matris elyafı birbirinden ayırarak göreceli bir süneklik ve plastiklik sağlayarak oluşan çatlakların elyaftan elyafa geçişini engelleyerek, ani kırılmayı önler (Yıldızhan 2008). Böylece matris çatlak ilerlemesini önleyen bir bariyer görevi görür. Elyaf tek tek hasar görese bile, tüm kompozitin hasara uğraması için kritik bir değerde kırılmanın gerçekleşmesi gerekir (İnançer 2015 ).

Elyafın matristen ayrılmaması için, matris-elyaf arasındaki ara yüzey bağ uyumu olması gerekir. Bu yüzden matris elyaf seçimi yapılırken, ara yüzey uyumu önemli bir seçim kriteridir. Bir kompozitin ne kadar mukavim olduğu uyumlu ara yüzey bağ kuvvetine bağlıdır (Deniz 2005).

Oluşan gerilme kuvvetinin düşük dayanımlı matristen yüksek dayanımlı takviyeye iletmesi gerekir. Bu yüzden bağ kuvvetinin yüksek olması önemli bir kriterdir (Deniz 2005).

Matris malzeme cinsine göre kompozitler üçe ayrılır:

1. Metal matrisli kompozitler (MMK)
2. Seramik matrisli kompozitler (SMK)
3. Polimer matrisli kompozitler (PMK)

#### **2.2.1.1 Metal Matrisli Kompozitler (MMK)**

Metal matrisli kompozit malzemelerin ilk kullanımı 2. Dünya Savaşı yıllarında Alman ordusundaki otomotiv uygulamalarında görülmüştür. Kullanım alanları sıralanacak olursa, yağlamalı yataklar, silah üretiminde kullanılan karmaşık şekilli parçalar, fren pabuçları örnek olarak verilebilir. Bu aksanlarda parçacık destekli kompozitler olarak kullanılmışlardır. Metal matrisli kompozitlerde bulunan metal parçacıklar mukavemeti arttırmak için kullanılır. Mukavemetin yanı sıra kompozitin kullanım sıcaklığındaki sınır matris ve takviyeyi oluşturan bileşenlerin erime ya da yumuşama sıcaklığı ile sınırlıdır (Peters 1998).

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretilmesinde matris malzemesi olarak metal alaşımı tercih edilir. Bu metal alaşımlarda kullanılan elementler Alüminyum (Al), Titanyum (Ti), Magnezyum (Mg), Bakır (Cu), Demir (Fe), Kobalt (Co), Molibden (Mo) ve Nikel (Ni) olarak sıralanabilir. Yüksek süneklik özelliğine sahip olması ve mukavemetinin de istenen seviyede olmasından dolayı bu matris malzemeleri en çok tercih edilen matris malzemeleri arasındadır (Deniz 2005).

Kompozitlerde matris malzemesi metal olarak seçildiğinde takviye malzemesi olarak genellikle karbon ve silikon karbürler seçilir. Bunlar  $Al_2O_3$ , SiC, Gr, Br,  $TiB_2$ , TiC, WC, W ve C gibi seramik malzemeler metallerle bağ oluşturabilir. Bu malzemelerin kompozit malzemelere takviye edilişi elyaf parçacık plakalar ve lif şeklinde olabilir (Barut 2015).

Bu takviyelerin malzemeye kazandırdığı birtakım üstünlükler vardır. Bahsedilen bu özellikler matris malzemesi ile olan uyumu, malzemeye kazandırdığı yüksek elastiklik modülü, yüksek çekme mukavemeti, yüksek ergime sıcaklığı ve düşük yoğunluk gibi özelliklerdir. Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak metal malzemelerin kullanıldığı, takviye elemanı olarak da genellikle seramik malzemelerin tercih edildiği görülmektedir. Çoğunlukla uzay, havacılık ve otomotiv sektörleri alanlarda kullanılmaktadır (Deniz 2005) . Metal matrisli kompozit malzemeler özellikle aşınma dayanımı, yüksek sıcaklığa dayanım, hafiflik, ısıl iletkenlik, özgül rijitlik, ve yüksek dayanımın istendiği yerlerde tercih edilmektedir (Chung 2010).

### **2.2.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler**

Seramikler kayaların çevresel faktörlerin etkisinde kalarak parçalanmasıyla ortaya çıkan kil, kaolen gibi maddelerin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle üretilirler. Seramikler daha genel bir tanımla bir veya daha fazla metalin, ametallerle bileşik oluşturması sonucu oluşan organik olmayan bileşiklerdir. Diğer taraftan tuğla, kiremit, porselen, oksitler, nitritler, boridler, karbidler, silikatlar ve sülfidler seramik grubuna ait malzemelerdir. Seramiklerin içinde buldukları kompozit malzemeye sertlik, basma dayanımı, yüksek aşınma özelliği katması sebebiyle üstün özellikler kazandırır.

Ayrıca seramiklerin ergime sıcaklığı ve yalıtım özelliklerinin yüksek olması gibi özellikleri de vardır (Karşlı 2016) .

Yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda yaklaşık 1000°C'ye kadar olan sıcaklıklarda SMK tercih edilir. Seramik esaslı fiberlere matris malzemesi olarak silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cam-seramik, silisyum nitrid yine seramik esaslı matris malzemesi olarak seçilir (Yıldızhan 2008).

### **2.2.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler**

Polimer matrisli kompozitler (PMK), matris malzemesi olarak polimer esaslı malzemelerin, takviye elemanı olarak da elyafların kullanıldığı kompozit malzemelerdir.

PMK ilk üretilmeye başladıkları dönemlerde matris doymamış poliestерlerden oluşmaktaydı. Termoset malzemelerin gelişmesiyle birlikte polimer matrisli kompozitlerde poliestерler kullanılmaya başlandı. Daha sonra bu gelişmenin ardından termoplastik matrisler gelişmeye başlamıştır.

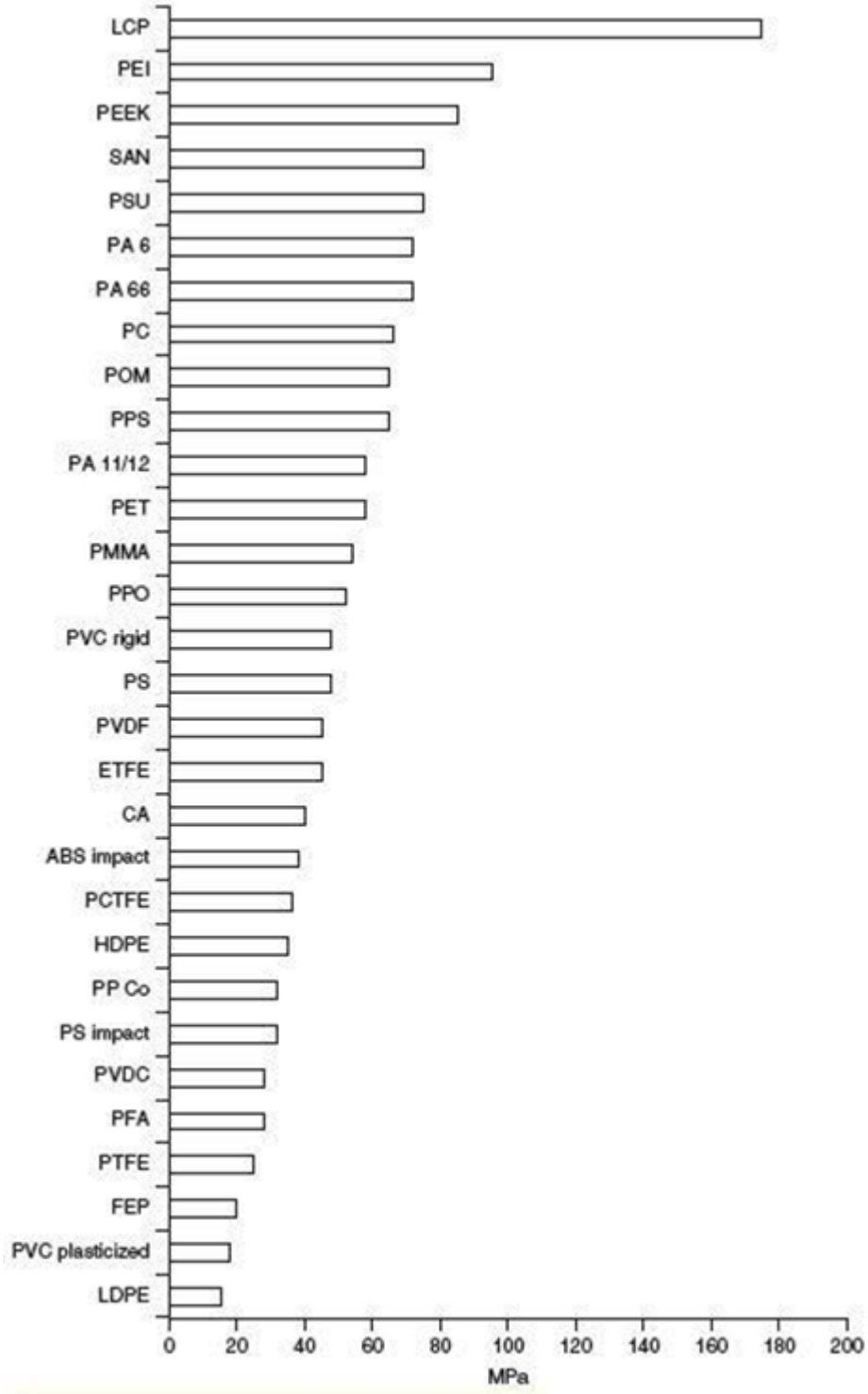
Kompozit malzemeler için kullanılan iki farklı polimer çeşidi vardır. Bunlar;

- %65'i termoset polimerler,
- %35'i termoplastik polimerler

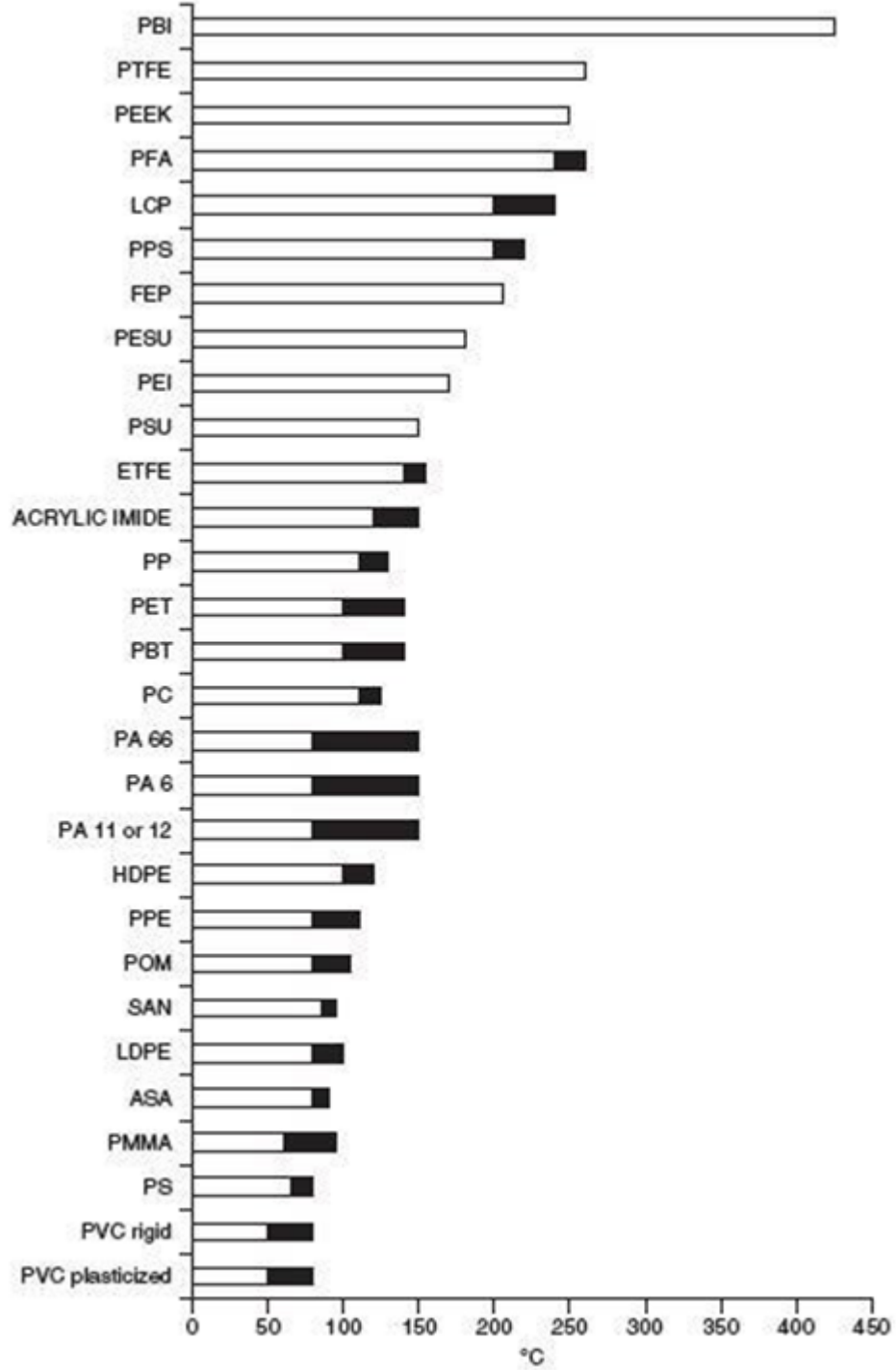
Termoplastik polimerler genellikle polipropilenden oluşur. Termoplastik polimerler mühendislik polimerleri ve polimer endüstrisinde kullanılan polimerler olarak incelenir. Poliestерler, poli(eter imid), poli(eter eter keton) PEEK gibi mühendislik plastikleri ve polimer endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, polietilen (PE), poli(vinil klorür) (PVC), polistiren (PS), poliamid (PA), poli(metil metakrilat) (PMMA), polikarbonat (PC) kullanılmaktadır (Bron 2007).

**Tablo 2.2:** Plastik matrisli kompozitlerin bazı avantaj ve dezavantajları

<b>Avantajları</b>	<b>Dezavantajları</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Hafiflik</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Görece olarak bazı fiberlerin yüksek fiyatları</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Yüksek özgül dayanç ve özgül modül</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Yeni tasarım ilkelerinin geliştirilmesi ve yeni sayısal yöntemlerin kullanılması</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Karmaşık şekilli parçaların kolayca üretilebilmesi</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Üretim aşaması için fazladan zaman harcanması</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Maliyetlerin azalması</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Yeniden tasarlanmış bağlantı elemanları</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Konvansiyonel malzemelere göre mükemmel yorulma dayancı</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Plastikler matrisler için sınırlı kullanım sıcaklık aralıkları</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Uygun malzeme-ortam ikilisi seçildiğinde çok iyi korozyon dayancı</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Su absorpsiyonu için özel önlem gereksinimi</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Mükemmel elektrik ve ısı izolatörlüğü, manyetik alandan etkilenmemesi</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Özel önlemler alınarak UV dayancı arttırılabilir</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Üretimde son işlem olması ve imalatta finisaj işlemlerine gereksinim olmaması</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Geri dönüşümünün zor olması</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• İstenilen mekanik ve fiziksel özelliklerin elde edilmesi</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Seri üretim için özel önlemler alınması, yeni üretim yöntemlerinin geliştirilmesi</li></ul>



Şekil 2.2: Polimerik matrislerin çekme dayanımları (Biron, 2007)



Şekil 2.3: Polimerik matrislerin kullanım sıcaklıkları (Biron, 2007)

Polimer matrisli kompozitlerde; matris malzemesi polimer reçine, takviye elemanı olarak ise elyaflar seçilir. Üretim proseslerinin kolay olması ve üretim maliyetlerinin düşük olması nedeniyle yaygın kullanım alanına sahip kompozitlerden biri de polimer matrisli kompozitlerdir. PMK'ler termosetler, termoplastikler ve elastomerler olarak üçe ayrılırlar (Deniz 2005).



### Termoset Malzemeler:

Termosetler geri dönüşüme uygun olmayan malzemelerdir. Sadece bir defaya mahsus ısıtılıp şekillendirilebilirler. Tekrar ısıtıldığında şekil verilemezler ve şekilleri bozular. Termosetlerin yapılarında bulunan uzun molekül zincirleri çapraz bağlarla birbirlerine bağlanmışlardır ve dolayısıyla tekrar ısıya maruz bırakıldıklarında birbirlerini üzerinde kayma yeteneklerini kaybederler. Genellikle termoset malzemeler ısı ve basınç etkisiyle son halini alırlar ve kompozit malzemelerde bu şekilde kullanılırlar. Termoset reçineler daha çok iç mekan mobilyalarında, deniz taşıtlarında, inşaat sektöründe çeşitli yapı elemanlarında, otomotiv sanayinde kullanılır (Chung 2010).

### Termoset Plastik Malzemeler:

Termoset plastik malzemelerin çok farklı türleri vardır. Termoset plastik malzemeler aşağıda sıralanmıştır.

- Epoksi reçineler
- Polyester reçineler
- Fenolik reçineler
- Silikon
- Poliimid
- Poliüretan
- Siyanet Ester (Chung 2010)

Yukarıda maddeler halinde sınıflandırılan termoset plastik malzemelerin her biri farklı karakteristik özelliklere sahiptir. Sahip oldukları farklı özellikler sayesinde içinde buldukları malzemelere farklı özellikler kazandırmaktadırlar.

#### **2.2.1.3.1 Polilaktik Asit (PLA)**

##### **Laktik Asit**

1780 yıllarında Carl Wilhelm Scheele tarafından bulunmuştur. Hidroksi asitin kimyasal formülü  $CH_3CHOH-COOH$  dur. Kimyasal ismi alfa hidroksi propiyonik asit

olarak bilinmektedir. Molekül yapısında bir adet asimetrik karbon atomu içerir. Laktik asit üretimi kimyasal sentez ya da fermantasyon yolu ile yapılır. Laktik asit endüstriyel açıdan büyük öneme sahiptir.

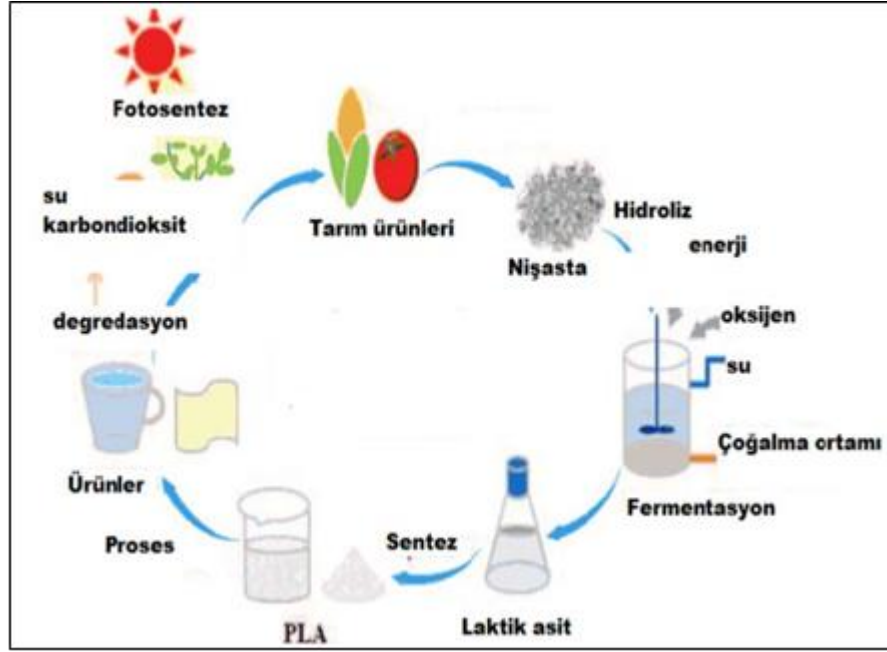
Özellikle ilaç endüstrisinde yüksek polimerleşme derecesine sahip polimer sentezlenirken optik olarak saf laktik asit üretimi önemli rol oynar. Bu bilgilere ek olarak, üretilen poli (laktik asit)in fiziksel özelliklerini izomerik kompozisyon belirler (Tektemur, 2011).

### **Poli (laktik asit)**

PLA'nın monomer yapısını oluşturan laktik asit; mısır, nişasta ve şeker pancarı vb. tamamıyla yenilenebilir doğal kaynaklardan elde edilir. Biyo bazlı plastik olan polilaktik asit (PLA) bazı geleneksel petrol bazlı plastiklerin yerine kullanılabilir. PLA, camsı geçiş sıcaklığı 65-70 °C ve erime sıcaklığı 160-170 °C civarında olan olan yarı kristalin bir polimerdir. Genel olarak bünyesinde poliglikolik asit veya polimandelik asit içerir (Benninnga, 1990).

Polilaktik asit (PLA) yüksek termoplastik özelliğe sahip, monomeri basit bazı şekerlerin fermantasyonu ile üretilen biyobozunur bir polimerdir (Garlotta, 2001).

Petrol bazlı plastikler örnek olarak polistiren (PS) ve polietilen (PE) doğada 500 ile 1000 yıl arasında bozunurken PLA doğada 2 ay içerisinde bozunabilir (Sinclair, R. G 1996).



Şekil 2.4: PLA'nın doğada döngüsünün şematik gösterimi verilmiştir (Xiao ve diğ., 2012)

50°C'nin üstündeki sıcaklıklarda birkaç aydan bir yıla kadar hidroliz olabilme özelliğine biyo-bozunurluk denir. Uygulanabilirlik açısından, toksik olmayan bozunma ürünleri oluşturması oldukça önemlidir. PLA, çevre dostu bir termoplastiktir. Kompostlama alanlarında olduğu gibi, yüksek sıcaklık ve nem koşullarında PLA, çok hızlı bir şekilde degrade olmakta birkaç haftadan birkaç aya kadar Şekil 2.5'de verildiği gibi parçalarına ayrılmakta, ufalanmaktadır (Henton ve diğ., 2005). PLA'nın çevresel bozunması iki aşamalı olarak gerçekleşir. Bozunmanın birinci aşamasında, yüksek molekül ağırlıklı polyester zincirleri hidroliz ile düşük molekül ağırlıklı oligomerlere dönüşür. Hidroliz işlemi nem ve sıcaklıktan doğrudan etkilenir ve asit veya bazların kullanımıyla hız kazanır.



Şekil 2.5: PLA'nın bozunması (Henton ve diğ., 2005)

PLA'in monomerlerine ayrışma şekli hidroliz işlemidir. Eğer servis şartlarında ortam kuru ise 10 yıldan fazla bozunmadan kalabilir (Auras ve diğ., 2004). PLA'nın 32

gün, 50 gün ve 60 gün sonraki bozunma görüntüsü Şekil 2.5’de verilmiştir. PLA’ye su ilave edilerek monomeri olan laktik asite kolayca ayrışabilir ve daha sonra dehidrasyon ile tekrar eski yapısına dönüşür. Yapısındaki ester bağlarının hidroliz olmasıyla birlikte bozunma gerçekleşir. Bunlara ek olarak bozunma işlemi olurken herhangi bir enzim katalizine ihtiyaç duyulmaz (Hartmann, 1998).

Yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilen PLA, diğer ticari polimerlerle karşılaştırıldığında yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Diğer taraftan PLA’nın termal kararlılığı oldukça düşüktür. Bu yüzden ticari polimerlerde alternatif olarak kullanımı oldukça yaygındır.

Şekil 2.6’ da ticari polimerin görüntüsü verilmiştir. PLA’nın termal özelliklerini iyileştirmek için çeşitli PLA karışımları üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (Tsuji ve Fukui, 2003).

PLA üretiminde düşük enerji harcanması ve düşük sera gazı emisyonu gibi çevre dostu olması sebebiyle ambalaj sanayinde gelecekte en çok tercih edilen malzeme olması beklenir (Drumright ve diğ, 2000). PLA ile yapılan ambalajların raf ömrünü uzatmak için antimikrobiyal özellik kazandırılmış olup ambalajlardaki gıda ürünleri daha iyi korunabilmektedir. Bu da tüketicinin sağlığını direkt olarak etkileyen önemli bir faktördür (Jamshidian ve diğ, 2010).



Şekil 2.6: Ticari PLA’nın görüntüsü

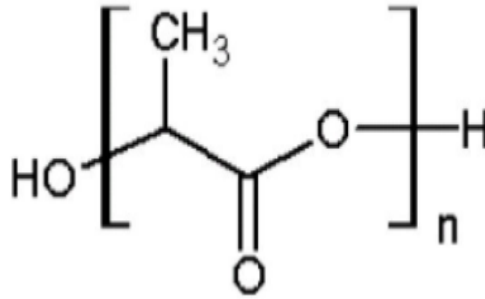
PLA; mekanik özelliklerinin üstün olması, şeffaflıkları ve sağlık açısından güvenilir olma gibi özelliklerinden dolayı ambalajlama, otomobil, mobilya, gıda gibi tüketici mallarında, tekstil ve ilaç sanayinde kendisine geniş uygulama alanı bulabilmektedir.

PET davranışı gösteren PLA aynı zamanda polipropilen ve poliefin performansına sahip tek polimerdir. Bu yüzden birçok polimer prosesinde kendine yer bulabildiği için oldukça geniş kullanım alanına sahiptir (Nampoothiri ve diğ, 2010). Fakat PLA bu üstün özelliklerinin yanında bir takım istenmeyen özelliklere sahiptir ki bu da uygulama alanını kısıtlamasına sebep olmaktadır. Bunlar; düşük ısı ve mekanik dayanım, düşük gaz bariyer özellikleridir. Bu özellikleri de çeşitli katkı maddeleri katılarak nanokompozit üretimiyle gerek endüstriyel gerekse akademik alanda giderilmeye çalışılmaktadır (Li, 2011).

PLA biyobozunur bir polimer olarak biyomedikal uygulamalarında kullanılan en önemli poliyesterdir (Jain, 2000).

### PLA'nın Sentezi

Çok amaçlı biyobozunur bir polimer olan PLA mısır, buğday ve şeker kamışı gibi % 100 yenilenebilir kaynaklardan üretilir (Henton ve diğ, 2005).



Şekil 2.7: PLA'nın kimyasal yapısı

PLA'nın monomeri olan laktik asit (2 $\alpha$ -hidroksi asit)'in iki adet optik konfigürasyon bulundurmaktadır. Bunlar L ve D izomerleri olarak adlandırılırlar. Bakterilerin karbonhidratlardan fermantasyonu ile gerçekleşmektedirler. Endüstriyel laktik asit üretimi yapılırken laktik asit fermantasyonu prosesi, laboratuvar sentez prosesine göre daha fazla tercih edilmektedir. Proses oldukça zor ve maliyetli oldu için fermantasyon daha avantajlı olmaktadır (Datta ve Henry, 2006). Laktik asit fermantasyonunu sağlayan bakteri türü Lactobacillus bakterisidir ve fermantasyon süreci yaklaşık 40 °C dolaylarında ve düşük oksijene ihtiyaç duyularak gerçekleşmektedir.

Fermentasyon için gerekli şeker kaynağı; mısırdan ve patatesten glukoz ve maltoz, şeker pancarı veya şeker kamışından sukroz şeklindedir. Laktik asidin halkalı dimerine laktit adı verilmektedir (Averous, 2004). Polimer zincirindeki stereo izomerlerin dağılımı ve seçimi, laktik asit polimerlerinin termal, mekanik ve biyobozunurluk özelliklerine bağlıdır. Yüksek saflıkta L ve D laktitleri sırasıyla izomerik poli L laktit PLLA ve poli D laktit PDLA'yı oluşturmaktadırlar. Bunlar yüksek erime sıcaklığına (yaklaşık 180 °C) ve 55 °C ile 60 °C aralığında camsı geçiş sıcaklığına sahip polimerlerdir (Averous, 2013).

PLA sentezlenirken polikondenzasyon yöntemi kullanılır. Polikondenzasyon yönteminden sonra süspansiyon ve eriyik polimerizasyonu adımları başlar ve bu sıralanan süreçler PLA üretiminde kullanılan en düşük maliyetli süreçler olarak kabul edilir. Ancak bu sürecin dezavantajı polimerizasyon süresinin uzun olmasıdır. Kondenzasyon yönteminde meydana gelen suyun uzaklaştırılması için yüksek sıcaklık ve vakuma ihtiyaç duyulur. Bu polimerizasyon yöntemiyle düşük molekül ağırlıklı kırılabilir, camsı bir polimer elde edilir. Polimerin molekül ağırlığını ek mukavemetini arttırmak için zincir birleştirme ajanları veya karbonil diimidazol gibi esterifikasyon düzenleyiciler kullanılır. Eğer bu ürünler kullanılmazsa birçok uygulama için istenilen özellikler sağlanamaz (Auras ve diğ, 2004; Averous ve Kalia, 2011).

### **PLA'nın Özellikleri**

PLA'nın mekanik ve ısıl özellikleri, alternatifi olan sentetik polimerlere benzer olmasına rağmen, darbelere karşı düşük darbe dayanımına sahip olması ve yapının kırılabilir olması kullanım alanını önemli ölçüde sınırlamaktadır. PLA'nın bu özellikleri iyileştirmek için genellikle başka polimerlerle kompozit yapılması yoluna gidilmektedir.

Petrol bazlı polimerlerle kıyaslandığında PLA'nın düşük su buharı ve gaz geçirgenliği özellikleri vardır (Pettersson ve Oksman, 2006). PLA 60°C civarında yumuşamaktadır. Ancak PLA'nın su buharı geçirgenliği PET, PP ve PVC'den oldukça yüksektir. PLA diğer ticari polimerlerden PS, PET ve PP ile karşılaştırıldığında en iyi mekanik özelliklere ve en düşük termal dirence sahip bir üründür (Bao ve diğ, 2006).

PLA'nın mukavemet özelliklerinin yanı sıra yüzey kalitesi de oldukça iyidir. Son derece parlak bir yüzeye sahip olan PLA'nın pus oranı % 5'ten azdır. Bunlara ek olarak PLA'nın piyasadaki başarısının nedenlerinden sanayi tipi (katı, sıvı, gress vb.) yağlara karşı kimyasal direncinin yüksek olmasıdır. İçerdiği ürünün aroma kaybını önleyici özellikleri, su buharı geçirgenliğinin yüksek olması ve gıda ile temas konusunda FDA (Food and Drug Administration) onaylı olması sayesinde organik yetiştirilmiş taze gıdaların ambalajlanması için de uygundur (Smith, 2005).

PLA'nın zincir yapısına bakıldığında yönlendirilmemiş kırılğan bir yapıda olmasına rağmen iyi bir mukavemete ve sertliğe sahip olduğu görülür. Zincir yapısına bakıldığında yönlendirilmiş PLA PET'e yakın değerler göstermektedir. Çekme ve bükülme modülü PLA polimerinin YYPE'den, PP'den ve PS'den daha büyüktür. Diğer taraftan darbe dayanımı ve kopma anındaki yüzde uzama değeri petrol kökenli diğer polimerlerden daha düşüktür. Bunun sonucu olarak da PLA düşük tokluğa ve darbe dayanımına sahiptir. Genel olarak bakacak olursak PLA, petrol bazlı diğer termoplastik polimerlerin yerini alabilecek mekanik özellikleri yapısında bulundurulur (Auras ve diğ, 2005). Tablo 2.3'de PLA'nın bazı mekanik özelliklerinin, diğer sentetik polimerler ile karşılaştırılması verilmiştir (Bastioli, 2005).

PLA'nın yapısında bulunan L ve D izomerlerinin oranı işlenebilirliğini, kristalizasyonunu ve bozunma davranışlarını etkiler. PLA'nın stereokimyasal yapısı L, D ve mezo yapıdaki laktidlerin harmanlanmasıyla yada kopolimerizasyonları ile ayarlanabilmektedir. (Auras ve diğ, 2005; Urayama ve diğ, 2003).

**Tablo 2.3:** PLA'nın diğer polimerle ile mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

	Çekme Modülü (MPa)	Çentikli Izod Darbe Dayanımı (J/m)	Eğme Modülü (MPa)	Kopma da Uzama sı (%)	Kopma Dayanımı (MPa)
PLA	3834	24,6	3689	4	66
PS	3400	27,8	3303	2	40
PP	1400	80,1	1503	400	40
PE	1000	128,2	800	600	15

**Tablo 2.4:** PLA'nın ısı özelliklerinin kıyaslanması

	PLA98L	PLA94L	PS	PET
Tg (°C)	61,8	61	100	80
Te (°C)	176,2	140	-	245
$\Delta H_f$ (J/g)	56,4	21,8	-	47,7
Kristalinite (%)	40	25	-	38

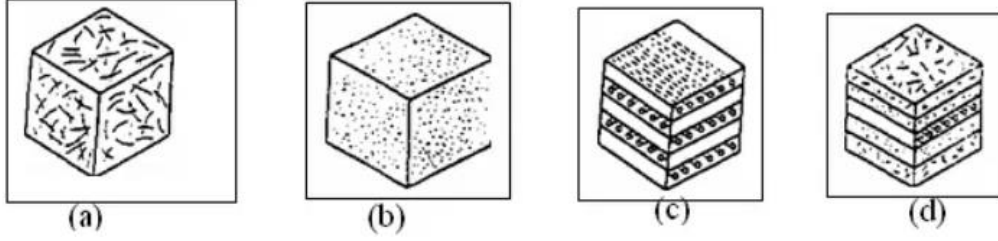
Tablo 2.4'de PLA'nın ısı özellikleri ve kristalinitesi ticari polimerlerle karşılaştırılmıştır (Auras ve diğ, 2005). Çizelge incelendiğinde, PLA98L (% 98 L laktik içeren PLA) ve PLA94L'nin (% 94 L laktik içeren PLA), PS ve PET polimerlerine göre daha düşük Tg'ye sahip olduğu gözlenmektedir. PLA'nın daha iyi yapışma ve işlenebilirlik özelliklerine sahip olduğunu düşük Tg ve Te değerleri göstermektedir. PLA'nın işlenebilmesi için kullanılan yöntemler PLA'nın erime sıcaklığı noktasının üzerindeki sıcaklıklarda eriyik hale getirilmesi esasına dayanmaktadır. Erime sıcaklığına ulaşmış eriyik haldeki polimere uygulanan basınç yardımı ile istenen özellikler verilmektedir. Daha sonra polimere verilen geometri soğuma sonucunda sabitlenmektedir (Auras ve diğ, 2005). PLA temelli ürünler ekstrüzyon, enjeksiyonlu kalıplama, termoformlama, basınçla kalıplama ve şişirerek kalıplama gibi birçok teknikle üretilebilmektedir (Bastioli, 2005).

### 2.3 Kompozit Malzemelerin Elyaf Çeşitleri

Kompozit malzemeler;

- Elyaf takviyeli kompozit malzemeler,
- Parçacık takviyeli kompozit malzemeler,
- Tabakalı kompozit malzemeler,
- Karma (hibrid) kompozit malzemeler olarak da sınıflandırılabilir (Bağcı, 2010).





**Şekil 2.8:** Kompozit malzemelerin sınıflandırılması; (a) elyaf takviyeli kompozitler, (b) parçacık takviyeli kompozitler, (c) tabakalı kompozitler, (d) karma (hibrid) kompozitler (Bağcı, 2010)

### **Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler:**

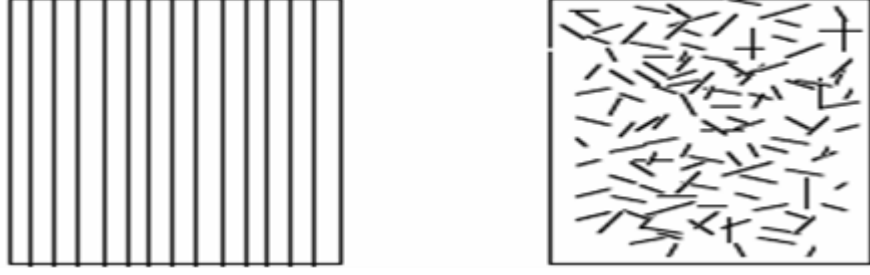
Kompozit yapılarda takviye elemanı olarak kullanılan elyaf üstün mekanik özelliklere sahiptir. Bu nedenle önemli bir takviye elemanıdır.

Kompozit malzemenin mukavemetini belirleyen bir diğer önemli konu da elyafların matris içerisindeki yerleşimidir. Elyafların kompozit malzeme içerisinde yerleşimi oldukça önemlidir. Paralel yönde mukavemeti artırırken, birbirine dik yönde yerleştirildiğinde mukavemeti düşürürler. Bu yüzden her iki doğrultuda istenilen mukavemetin sağlanabilmesi için elyaflar matris içerisinde iki yönlü olarak konumlandırılır.

Üretilecek olan kompozit malzemenin mukavemetini kullanılan elyafların mukavemeti ve özellikleri belirler. Matris yapı içerisinde boşluklar var ise elyaflar ile matrisin temasını azalacağı için kompozit malzemenin mukavemeti düşer. Bu yüzden kompozitlerin mukavemetini belirleyen diğer faktör elyaflar ile matris arasındaki bağ yapısıdır.

Sürekli ve kesikli elyaf takviyeli kompozitler Şekil 2.9’da verilmiştir. Kompozit malzemelerde kullanılmakta olan başlıca elyaf çeşitleri;

- Cam elyafı
- Karbon (Graphite) elyafı, (PAN –polyacrylonitrile ve zift kökenli)
- Alumina elyaflar
- Yüksek yoğunluklu polietilen elyafı
- Polyester elyaflar
- Doğal organik elyaflar
- Seramik elyaflar (Bağcı, 2010).

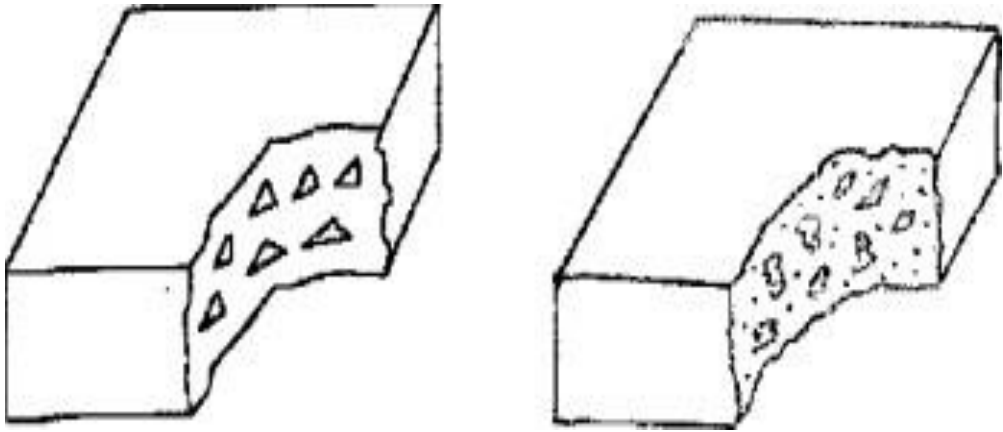


**Şekil 2.9:** (a) Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler (b) kesikli elyaf takviyeli kompozit malzemeler (Asi, 2008)

### **Parçacık Takviyeli Kompozitler:**

Matris malzeme içerisinde yönelmiş (izotrop) yapıları malzemelerin parçacıklar halinde bulunmasıyla elde edilen kompozit yapıdaki malzemelerdir. Kompozit yapının mukavemeti, yapı içerisinde yer alan parçacıkların boyutuna, sertliğine ve yoğunluğuna bağlı olarak artmaktadır (Bağcı, 2010).

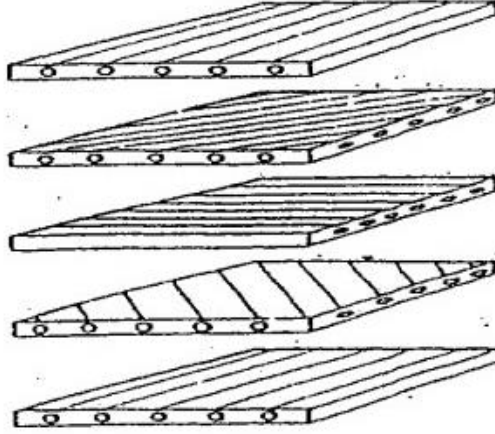
Parçacık takviyeli kompozitlerin özelliklerini parçacıkların boyutları, sahip oldukları yüzey enerjileri, homojen bir şekilde dağılmaları, hacimsel oranları ve bunun gibi faktörler etkiler. Dispersiyonla mukavemeti artırılmış parçacık takviyeli kompozitlerin yapısı Şekil 2.10' da verilmiştir (Asi, 2008).



**Şekil 2.10:** Dispersiyonla mukavemeti artırılmış parçacık takviyeli kompozitlerin yapısı

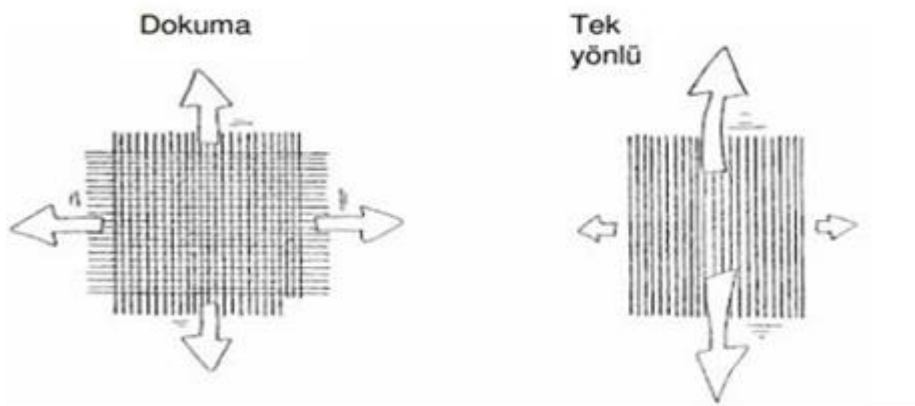
## Tabakalı Kompozit Malzemeler:

Mukavemet (dayanım) değerleri, ısıya ve neme karşı dayanımları oldukça yüksek olan en eski ve en yaygın olarak kullanılan tabakalı kompozitler farklı doğrultudaki elyafların birleşimi ile üretilirler. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemeler, sandviç yapılar uçak parçalarının imalatında yaygın olarak kullanılırlar. Tabakalı kompozit malzemelerin genel görünüşü Şekil 2.11’de verilmiştir.

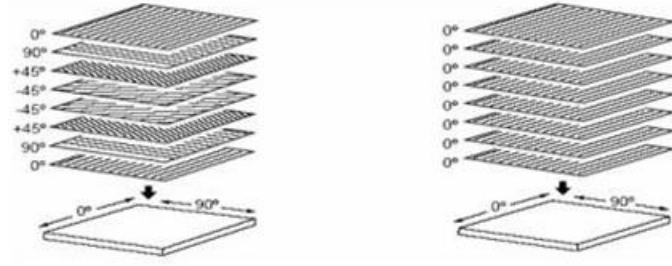


Şekil 2.11: Tabakalı kompozit malzemelerin genel görünüşü (Demirel, 2007)

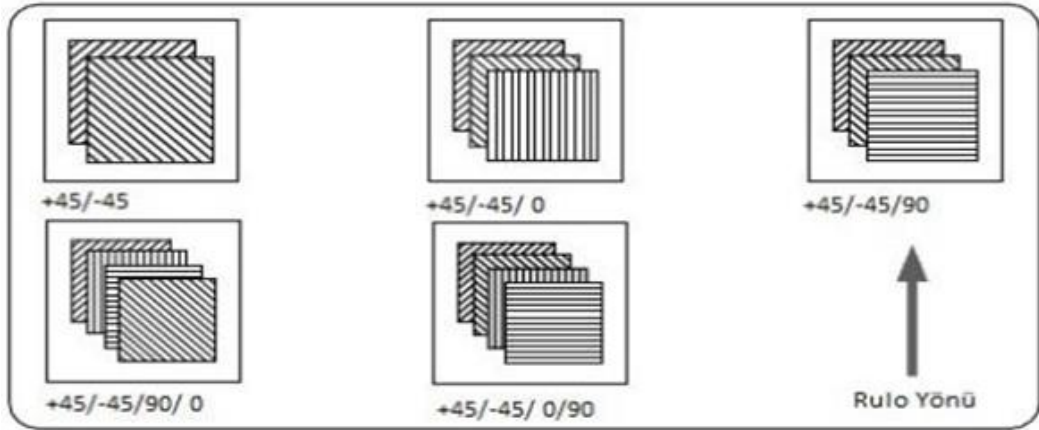
Tek yönlü yönlendirilmiş kompozit malzemeler, yönlendirildiği yönde daha üstün mekanik özellikler sergiler. Farklı yönde yönlendirilmiş kompozit malzemelerdeki yapılar ise farklı özellikler sergiler. Şekil 2.12’ de dokuma ve tek yönlü elyafların farklı yönlerdeki özellikleri verilmiştir. Bütün yön ve doğrultularda benzer özellikler gösteren izotropik malzemeler Şekil 2.13’de gösterilmiştir. Çok yönlü dokunmuş cam kumaşların iplik açılarının örnekleri Şekil 2.14’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Dokuma ve tek yönlü elyafların farklı yönlerdeki özellikleri a) Eşit özellikler, b) Eşit olmayan özellikler (Demirel, 2007)



Şekil 2.13: Tabakalı kompozitlerde yönlendirme şekilleri a) Yarı-izotropik yönlendirme şekline sahip görüntü, b) Tek yönlü yönlendirme şekline sahip görüntü (Demirel, 2007)

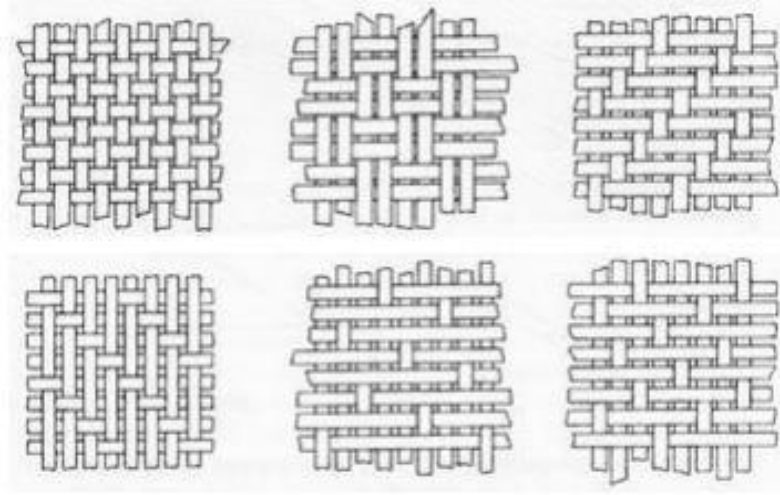


Şekil 2.14: Çok yönlü olarak dokunmuş cam kumaşların farklı iplik açlarına sahip görüntüleri (Demirel, 2007)

### Karma Kompozit Malzemeler:

Kompozit yapı içerisinde iki veya daha fazla elyaf türünün bulunması ile karma hibrit kompozitler elde edilirler.

Karma kompozit yapılar düşük tokluğa sahip fakat basma mukavemeti iyi olan karbon elyafı ile birlikte basma mukavemeti düşük ve iyi tokluk özelliğine sahip olan en çok aramid elyafı elde edilirler.



Şekil 2.15: Farklı dokuma elyaf türleri (Vatangül, 2008)

### 2.3.1 Cam Elyaf Kompozit Malzemeler

Polimer yapılı amorf bir malzeme olan cam elyaflar farklı üretim şekilleriyle imal edilebilirler. Bu imal şekilleri herkesin bildiği bir şişe camı veya yüksek saflıkta olan kuartz camına kadar oldukça geniş bir alan olmakla beraber her alanda yaygın şekilde kullanılabilirler.

Cam elyafı temel madde olarak silis kumu ( $\text{SiO}_2$ ) ve buna ek olarak sodyum, bor, alüminyum, kalsiyum gibi elementlerin oksitlerinden belli oranlarda ilave edilerek 1600 °C'lerde eriyik hale getirilir.

Mono cam lifleri, cam üzerinde yüzlerce delik bulunan kovanlarda çekilmesi ve sonrasında hızla soğutulmasıyla elde edilir. Bunun sonucu olarak 5-24 mikron kalınlığında mono cam lifleri üretilir (Chawla, 2011) . Kompozit malzeme üretim yönteminde kullanılan elyaf türleri arasından cam elyafı oldukça önemli yere sahiptir. Cam elyaf takviyeli malzemeler arasında cam elyaflar ucuz ve en çok tercih edilenler arasındadır (Vatangül, 2008). Şekil 2.16' da iplik ve dokunmuş cam elyaf görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2.16: Dokunmuş cam elyaf ve iplik görüntüsü

Cam elyafların özellikleri;

- Çeliğe göre mekanik özellikleri iyidir,
- Isıya karşı dirençleri kısmen düşüktür,

Yüksek sıcaklıkta yanmazlar,

- Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler,

• Nem absorpsiyon özellikleri yoktur ama özel elyaf kaplama yapılırsa nemi absorbe etme özelliği kazanırlar,

- Tek başlarına elektriği iletmezler (Ağır 2012).

Cam türleri şunlardır:

A Camı: Pencereleerde ve şişe imalatında kullanılan yüksek oranda alkali içeren A camı kompozit malzeme üretiminde çok fazla kullanılmaz. Elektriksel yalıtkanlığı düşük ancak kimyasal dayanımı yüksek olan bir cam türüdür.

C Camı: Depolama tanklarında kullanılan C camının kimyasallara karşı korozyon direnci yüksektir.

E Camı: Takviye elyaflarının üretiminde yaygın olarak kullanılan E camı; mukavemet (dayanım), yalıtkanlık, düşük su emiş miktarı gibi özellikleri bakımından yaygın olarak kullanılan bir cam türüdür.

S Camı: Yüksek sıcaklıklarda yorulma direnci ve mukavemeti iyi bir malzemedir. S camındaki elyaf çapları ile E camındaki elyaf çapları kıyaslandığında; S camındaki tellerin çapları %50 daha düşüktür dolayısıyla lif sayısındaki artış üretilen kompozit malzemelerin daha üstün mekanik özelliklerde olmasını sağlar. Cam malzemelerin takviye elemanı olarak kullanılabilmesi için elyaf haline getirilmesi gerekir (Chawla 2011).

Cam elyaflara çeşitli katkı malzemelerinin ilave edilmesiyle birlikte istenilen özelliklerde malzeme üretilebilir. Cam elyaf üretiminde yaygın olarak plastik veya epoksi reçineler tercih edilir. Cam elyafların mekanik özellikleri Tablo 2.5’de, cam elyafların içerdiği bileşimler ise Tablo 2.6’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.5:** Cam elyafların mekanik özellikleri (Vatangül, 2008)

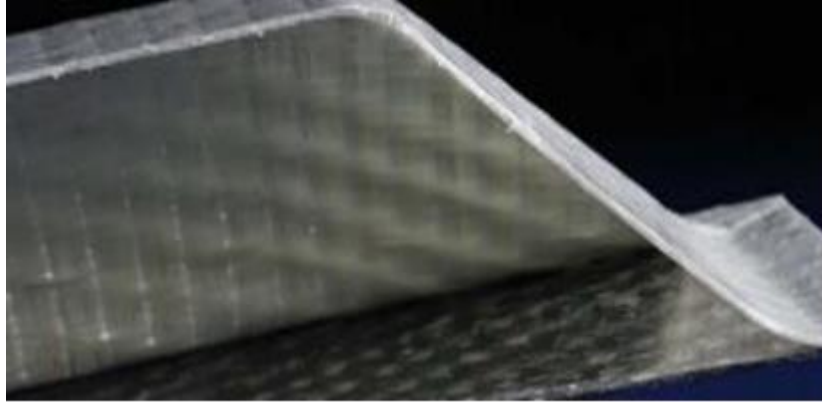
Özellikler	Cam Tipi			
	A	C	E	S
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.5	2.49	2.54	2.48
Elastiklik modülü (GPa)	-	69	72.4	85.5
Çekme mukavemeti (MPa)	3033	3033	3448	4585
Isıl genleşme katsayısı	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727	749	841	970

**Tablo 2.6:** Cam elyaflarların içerdiği bileşimler (Vatangül, 2008)

	Katkı Malzemeleri %			
Silisyum oksit SiO <sub>2</sub>	72	64.4	52.4	64.4
Alüminyum Oksit Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,	0.6	4.1	14.4	25
Kalsiyum Oksit CaO	10	13.4	17.2	-
Magnezyum Oksit MgO	2.5	3.3	4.6	10.3

### 2.3.2 Bor Elyaf Kompozit Malzemeler

Flamanın üzerine bor kaplanmasıyla elde edilen tungsten çekirdek yapısına sahip bor elyaflar yapısı gereği kompozittir. Bor-Tungsten elyaflar sıcak tungsten flamanın hidrojen ve bor triklorür ( $BCL_3$ ) gazından geçirilmesiyle üretilirler. Bor plakalar boyut olarak en düşük 0.05 mm ve en büyük 0.2 mm arasındaki çaplarda üretilebilmektedir. Tungsten çekirdekleri boyut olarak 0.01 mm çapında üretilirler. Oldukça yüksek elastik modülüne ve çekme mukavemetine sahip olan bor elyafların çekme mukavemet değerleri yaklaşık olarak 2758 MPa ile 3447 MPa arasında değişmektedir. Bor elyaflar S camından neredeyse 5 kat fazla elastite modülüne sahiptir. Bor elyaflar diğer elyaf gruplarına göre üstün özellikler sergilediği için havacılık sektöründe geniş kullanım alanına sahiptir. Ancak son dönemlerde karbon elyaflar cam elyaflara göre üstün özellikler sergilediği için cam elyafların yerine geçmiştir. Bor elyaflara Karbür ( $SiC$ ) veya Bor Karbür ( $B_4C$ ) kaplamalar yaparak yüksek sıcaklığa karşı dayanımı artırılmaktadır. Bor karbür kaplaması yapılarak cam elyafların çekme mukavemeti de artmaktadır. Bor elyaflar  $2040^{\circ}C$  erimeye başlarlar (Gülmez, 2018). Dokunmuş bor elyaf görüntüsü Şekil 2.17’ de verilmiştir.



Şekil 2.17: Dokunmuş bor elyaf (Gülmez, 2018)

### 2.3.3 Silisyum Karbür Elyaf Kompozit Malzemeler

Karbürün tungsten çekirdek üzerine kaplanmasıyla, bor elyaf gibi silisyum karbür elyaflar elde edilir. Çap boyutları 0.1 mm ile 0.14 mm arasındadır. Silisyum karbür elyafların yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı bor elyaflara göre oldukça iyidir.



1370°C’ de sahip olduğu dayanımın sadece %30’ unu kaybeder ancak bor elyaf 640 °C’de bu özelliğini koruyabilir.

### 2.3.4 Alumina Elyaf Kompozit Malzemeler

Alümina elyaflar; 0.02 mm çapındaki alümina flamanın üzerine silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) kaplanması ile üretilirler. Alümina elyafların basma kuvvetine karşı gösterdikleri mukavemetleri değerleri yüksek ancak çekme kuvvetine karşı gösterdikleri mukavemetleri değerleri düşüktür. Alümina epoksi kompozit malzemelerin basma mukavemet değerleri 2275 ile 2413 MPa arasındadır. Yüksek sıcaklıklarda üstün dayanım ve mukavemet özellikleri gösteren alümina elyaflar uçak motorlarında kullanılmaktadır (Bağcı, 2005). Alümina elyafın fiziksel özellikleri ve içerdiği kompozisyon Tablo 2.7’ de verilmiştir.

**Tablo 2.7:** Alümina elyafların fiziksel özellikleri ve kompozisyonu (Gülmez, 2018)

	Bileşen (%) Kütlece	Ortalama Çap (µm)	Ortalama Uzunluk (µm)	Yoğunluk (Mg/m <sup>3</sup> )	Elastisile Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik (HV)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>	95	3.5	200	3.4	300	1000	700
	5						

### 2.3.5 Karbon Elyaf Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan takviye malzemesi cam elyaf olsa da karbon elyaf yüksek performanslı kompozit malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Cam elyaf takviyeli kompozitlere göre karbon takviyeli kompozitler mukavemet ve rijitlik gibi mekanik özellikler bakımından daha üstün olmasıyla nedeniyle geniş kullanım alanına sahiptir. Organik elyaf olarak kabul edilen karbon ve grafit elyaflarda hammadde olarak poli-akro-nitril (PAN), selüloz (Rayon) zift (Pitch) kullanılır ve daha çok suni ipek ve poliakrilonitrilden (PAN) ve zift gibi hammaddelerden üretilir.

Kristal ve amorf yapıda olan karbon elyaflar  $268 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğunda liflerin içeriğinde minimum %92 oranında karbon içeren malzemelerdir. Karbon elyaflar epoksi matrisler ile birlikte kullanılırsa mukavemetleri ve sertlik özellikleri iyileşmektedir.

Karbon elyaflar yeni malzemeler olduğu için günümüzde gelişimi hala devam etmektedir (Örs, 2014). Karbon elyafların sahip olduğu mekanik özellikler Tablo 2.8'de verilmiştir.

**Tablo 2.8:** Karbon elyaf malzemelerin sahip olduğu mekanik özellikler (Gulmez, 2018)

Karbon Elyaf Mekanik Özellikleri			
	PAN Temelli Karbon Elyaf	PITCH Temelli Karbon Elyaf	RAYON Temelli Karbon Elyaf
Çekme Modülü (Msi)	33-56 Msi	23-55 Msi	5.9 Msi
Çekme Dayanımı (Msi)	0.48-0.35 Msi	0.2-0.25 Msi	0.15 Msi
Yüzde Uzama (%)	% 1.4-0.6	% 0.9-0.4	% 2.5
Yoğunluk (g/cc)	1.8-1.9 g/cc	1.9-2.0 g/cc	1.6 g/cc
İçeriğindeki Karbon Oranı (%)	%92-100	%97-99	% 99

Karbon elyaflar yüksek ısıya maruz kaldığında karbonlaşır ve grafit meydana gelir. Ama günümüzde karbon ve grafit aynı şekilde tanımlanır. Grafitin elektrik iletkenliği oldukça yüksektir. Çok iyi korozyon dayanımına sahip olan karbon elyaflar aynı zamanda sağlam ve sert bir yapıya da sahiptirler.

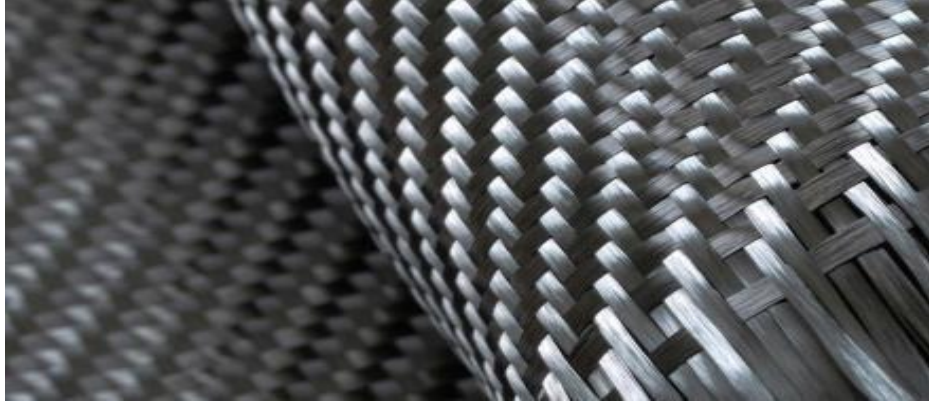
Karbon elyaflar iki temel malzemeden imal edilirler.

- PAN (Poliakrilonitril)
- Zift

PAN tabanlı karbon kullanılarak imal edilen karbon elyaflar daha dayanıklı ve aynı zamanda daha hafif olması için dört işleme tabi tutulur. Bunlar sırasıyla

oksidasyon, karborizasyon, yüzey iyileştirmesi ve kaplama olmak üzere dört aşamalıdır.

Zift tabanlı karbon elyafların mekanik özellikleri PAN tabanlı kompozit malzemelere göre düşük olduğu için geniş kullanım alanına sahip değildir (Örs, 2014). Dokunmuş karbon elyaf Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.18: Dokunmuş karbon elyaf görüntüsü (Gülmez,2018)

### 2.3.6 Aramid Elyaf Kompozit Malzemeler

Aramid, bir çeşit naylon olan aromatik poliamiddir. Aramid elyafı ismi verilen takviye elemanı piyasada ticari isimleri Kevlar ve Twaron isimleri ile anılmaktadırlar. En çok kullanılan Kevlar (Aramid) elyafları Kevlar 29 ve Kevlar 49’ dur. Kevlar 49 özgül rijitlik bakımından daha iyi performans gösteren bir malzemedir. Aramid elyafların dezavantajlı özellikleri; bazı türleri ultraviyole ışın, asit ve tuzlara karşı oldukça hassastır ve malzeme kumaş veya lif halindeyken kesme ve katlama gibi işlemlerin zor olmasıdır. Eğer matris malzemesi ile iyi birleşme olmaz ise oluşan mikro çatlaklar malzemenin su emmesine neden olur (Mazumdar , 2002).

Elyaf eksenine doğrultusunda aramid elyafların mekanik özellikleri oldukça iyi fakat elyafa dik doğrultuda ne yazık ki zayıftır. Aramid elyafların darbeye karşı dayanımı yüksektir. Gevrekliği ise grafit ile kıyaslandığında grafitin yarısı kadardır. Aramid elyaflar düşük ağırlığa, yüksek çekme mukavemetine sahiptirler. Dokunmuş aramid elyaf Şekil 2.19’da verilmiştir. Piyasada yaygın olarak kullanılan aramid elyafların sahip olduğu mekanik özellikler Tablo 2.9’da gösterilmiştir. Aramid

elyaflar, yüksek darbe ve aşınma dayanımı, düşük yoğunluk ve elektrik iletkenliği cam fiberli kompozitlere göre daha hafif olma gibi özellikler gösterirler (Gülmez,2018).



Şekil 2.19: Dokunmuş aramid elyaf görüntüsü (Gülmez, 2018)

**Tablo 2.9:** Piyasada yaygın olarak kullanılan aramid elyafların mekanik özellikleri (Gulmez, 2018)

ELYAF	KARAKTERİSTİK	MODÜL (Gpa)	KOPMA UZAMASI (%)	YOĞUNLUK (g/cm <sup>3</sup> )
Nomex	-	17 Gpa	0.6%	1.38 g/cm <sup>3</sup>
Fibre-B	-	128 Gpa	2. 8%	1.45 g/cm <sup>3</sup>
Kevlar 29	Normal	70 Gpa	2.9%	1.44 g/cm <sup>3</sup>
Kevlar 49	Yüksek Modüle sahip	135 Gpa	2.9%	1.45 g/cm <sup>3</sup>
Kevlar 129	Yüksek Dayanım/mukavemet	99 Gpa	3.4%	1.45 g/cm <sup>3</sup>
Kevlar 149	Yüksek Modül	143 Gpa	2.3%	1.47 g/cm <sup>3</sup>
Twaron	Normal	79 Gpa	3%	1.44 g/cm <sup>3</sup>
Twaron HM	Yüksek Modül	123 Gpa	2.8%	1.44 g/cm <sup>3</sup>
Technore HM	Normal	70 Gpa	3.3%	1.39 g/cm <sup>3</sup>

## 2.4 Kompozit Malzemelerin Matris Çeşitleri

Kompozit yapının içerisinde yer alan matrisler elyafları bir arada tutmaya ve yükün eşit bir şekilde dağılmasını sağlar. Matris yapının içerisinde bulunan elyafların temel görevi kompozite dış çevreden gelecek olan çevreden gelecek etmenlere karşı koruma sağlamaktır. İdeal olan bir matris malzemesinin görevi elyafları bir arada ve sağlam tutabilmektir. Kompozit malzeme içinde yer alan elyaflar ile birlikte kullanılan matrislerin sahip olduğu mekanik özellikler oldukça önemlidir. Yapıda bulunan elyaflar kesme yükü altındaki gerilmelere maruz kaldığında yükün eşit olarak

dağılmasını sağlarken aynı zamanda elyaf ile matris arasında yüksek dayanım ve iyi yapışma özellikleri sağlamalıdır. Endüstride kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matrisler; epoksi, polyester, vinilester ve fenolik reçine olmak üzere dört grupta incelenir. Polyester reçineler yüksek dayanım gerektirmeyen alanlarda kullanılır. Gelişmiş kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinde epoksi reçineler tercih edilir (Bağcı 2005). Bazı termoset malzemelerin sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikler Tablo 2.10’ da verilmiştir.

**Tablo 2.10:** Bazı termoset malzemelerin sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikleri (Demirel, 2007)

Malzeme Özellikleri	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1.11	1.04-1.46	1.24-1.32
Elastik Modül (MPa)	7000	3400	4800
Çekme dayanımı/mukavemeti (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	4.2	1.5-2.0
Isıl İletkenlik	0.19	0.19	0.15
Isıl genleşme katsayısı (I/°C)	45-65	55-100	68

#### 2.4.1 Epoksi Reçine Matrisler

İki veya daha fazla epoksi içeren bileşenin bazik bir ortamda reaksiyona girmesiyle epoksiler oluşur. Uygulanan işlemler sonucunda yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı 150-200°C lere kadar çıkan epoksilerin büzülme oranı %2’ den daha azdır. Epoksi reçine matrislerin aşınma ve kimyasallara karşı direnci yüksektir. Polyesterler ile karşılaştırıldığında yüksek viskoziteye uygun değildirler. Tüm elyaf malzemelerde kullanılan epoksi reçineler her sıcaklıkta sertleşebilme özelliğine sahiptirler. Epoksi reçineler genellikle karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar (Bağcı, 2005).

#### **2.4.2 Polyester Reçine Matrisli Kompozitler**

Polyester reçine matrisler dibazik asitlerin dihidrit alkoller veya dihidrik fenollerle ile yoğuşması sonucu oluşurlar. Polyesterlerin temel bileşenleri polyester bileşeninin doymuş asitle veya glikolle modifikasyonu sonucu elde edilir. Polyester reçineler, matris kullanım alanına göre esnekliği geliştirilerek kopma kuvvetine karşı mukavemet kazandırılabilirler. Polyester reçineler düşük viskoziteye sahiptir. Nemi absorbe edebilme özellikleri oldukça yüksektir (Balcı, 2005). Polyester reçineler çeşitli varyantlar sağlandığında kolayca üretilebilirler.

#### **2.4.3 Vinilester Reçine Matrisli Kompozitler**

Polyesterlerle glikolün bir kısmının yerine doymamış hidrosilik bileşenlerin kullanılmasıyla elde edilen vinilester reçineler, polyester reçine matrislere yapı olarak benzer özellikler gösterir. Kimyasallara ve korozyona karşı gösterdikleri direnç yüksektir. Koroziif ortamlardaki plastik bileşenlerin üretiminde kullanılan vinilester reçineler elyaf ile matris arasında yüksek bağ mukavemeti sergilerler (Bağcı, 2005).

#### **2.4.4 Fenolik Reçine Matrisli Kompozitler**

Fenolik reçine matrisler fenol formaldehit kondenzasyonu sonucunda elde edilir ve bu ham maddenin türevlerinde kullanılırlar. Fenolik reçinelerin yüksek sıcaklığa, su ve alkali harici kimyasal maddelere karşı dirençleri iyidir. Aynı zamanda ısı stabililiteleri ve elektrik iletkenlikleri de iyidir (Vatangül,2008).

### **2.5 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri**

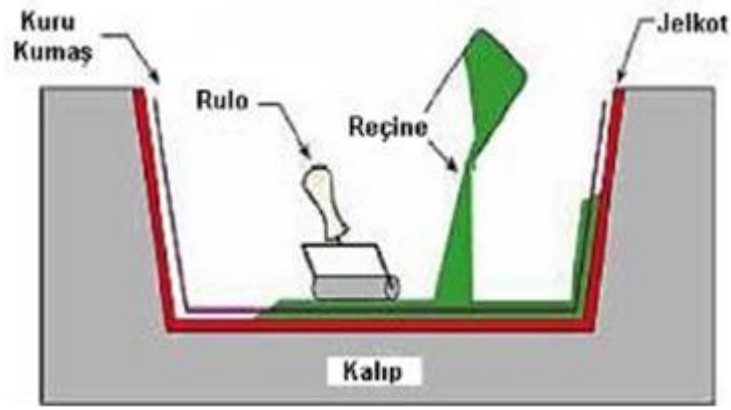
Endüstrinin hızla gelişmesiyle birlikte yüksek kalitede ve seri üretime uygun yöntemlere duyulan ihtiyaç hızla artmıştır. Bu amaçla elyaf takviyeli kompozitlerin farklı üretim yöntemleri ortaya çıkmıştır.

### 2.5.1 El Yatırma Yöntemi ile Üretim

Bu yöntem cam elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemle otomobil, kamyon, tekne gibi taşıtlarda gövde panelleri, yapı sektöründe ise havalandırma sisteminin kanalları, depolama için kullanılan tank gövdeleri, havuzlar gibi pek çok alanda kullanılmaktadır (Deniz, 2005). Bu yöntem polimer matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan açık kalıplama yöntemidir ve yöntemin düşük maliyetli olması öncelikle üretiminde kullanılan aletlerin ucuz olmasıyla ilgilidir. Eğer seri üretim olmayacaksa yani prototip ya da model üretimi söz konusuysa el yatırma yöntemi tercih edilir (İnançer, 2015).

El yatırma yönteminin bazı avantajları vardır. Bunlar; kalıp maliyetinin düşük olması, değişik şekillerde kalıp üretimi yapılabilmesi ve parça boyutlarında sınırlama olmaması sebebiyle oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Ancak bu yöntemin bazı dezavantajları da mevcuttur. Üretilen kompozit ürününün boyutlarında çeşitli sapmalar olabilir. Elyaf dağılımının düzensiz olduğu yerlerde ve ya reçinenin homojen dağılmadığı durumlarda kalınlıkta farklılıklar oluşması bu yöntemin dezavantajlarından biridir. Ayrıca işlem sırasında hava kabarcıklarının yapıda kalması, elyafların serilirken düzgün konumlandırılmamasından dolayı malzemenin mekaniksel özellikleri olumsuz yönde etkilenir (İnançer, 2015). Bu yöntemde reçinenin kalıba yapışmaması için polivinil alkol, silikon, madeni yağlar ve vaks gibi malzemeler kullanılır (Özer, 2015). Bu yöntemde takviye elemanı olarak genelde elyaf, dokuma, keçe gibi malzemeler tercih edilir.

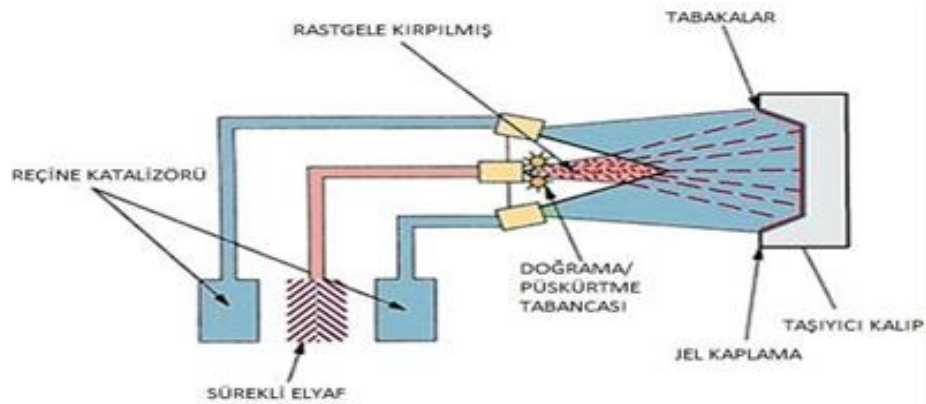
El yatırma yöntemi Şekil 2.20' deki gibi uygulanır. İlk olarak kalıp ayırıcı malzeme kalıba sürüldükten sonra elyaf serilerek üzerine reçine rulo şeklindeki fırça yardımıyla hava kabarcığı kalmayacak şekilde sürülür. İstenilen kalınlık seviyesine ulaşıncaya kadar elyaf ve reçine uygulanmasına devam edilir (Özer, 2015).



Şekil 2.20: El yatırma işlemi (Durgun, 2014)

### 2.5.2 Püskürtme Yöntemi ile Üretim

Püskürtme yöntemi el yatırma yöntemine benzer. Kullanılan takviye malzemesinin kırılmış halde kullanıldığı daha çok kayık, otomobil kaportası, tekne, tank gibi alanlarda kullanılan bir üretim yöntemidir. Püskürtme yönteminde Şekil 2.21'deki gibi özel bir tabanca yardımıyla kırılmış küçük parçacıklar halinde sürekli elyaflar uygun bir hızla reçine ve sertleştirici karışımıyla birlikte kalıba püskürtülür ve sonrasında püskürtme işlemine istenilen kalınlığa ulaşıldığında son verilir. Bu yöntemde oluşan hava kabarcıkları bir rulo yardımıyla giderilir. Bu sayede reçinenin elyafları ıslatma oranı artar. Bu yöntemin avantajları; kullanılan araç gereçlerin ucuz olması, işçilik maliyetlerinin oldukça düşük olması, üretilecek parçalarda boyut sınırlamasının olmaması ve karmaşık şekilli parçalarında bu yöntemle üretilmesidir (Özer, 2015).

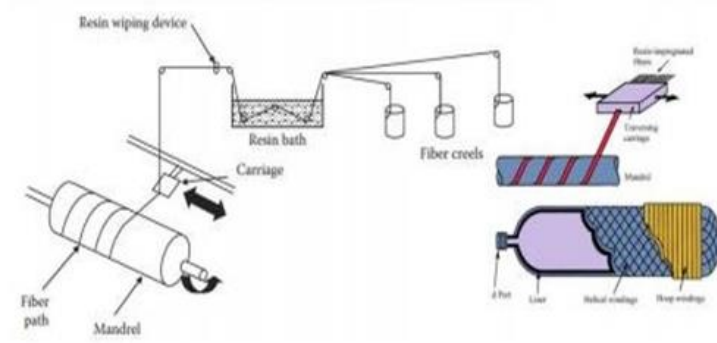


Şekil 2.21: Püskürtme yöntem ile üretim (Vatangül, 2008)



### 2.5.3 Elyaf Sarma Yöntemi ile Üretim

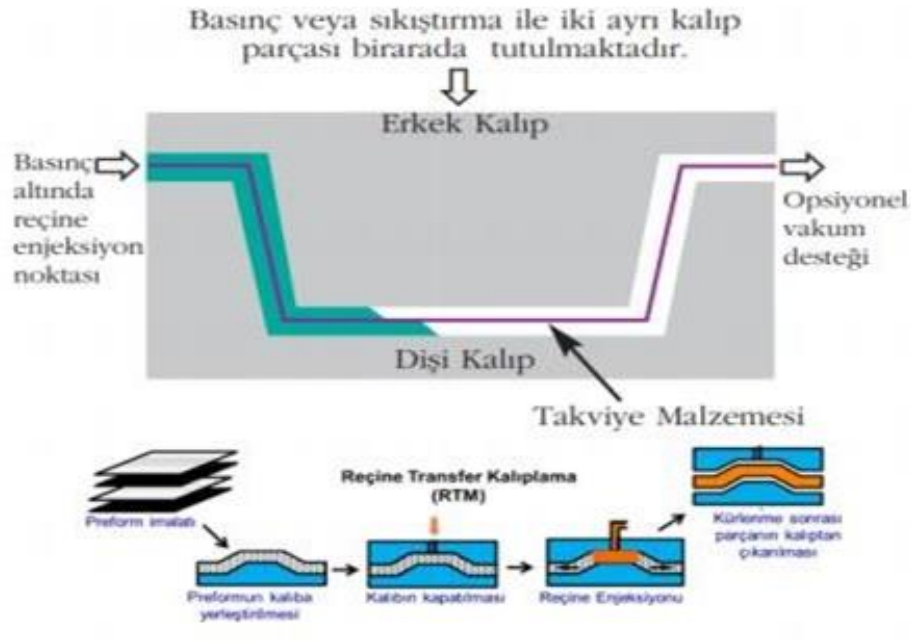
Karmaşık şekilli ürünlerin seri üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde makaradan reçine yardımı ile ıslatılarak geçen elyaflar kalıp üzerine sarılır. Bu sayede farklı açılarla sürekli kalıba sarılmış olan lifler mekanik özellik kazanmış olur. Uygun miktarda elyaf katmanları sarıldıktan sonra ürün sertlik kazanır. Bu yöntemle genelde silindirik borular, araba şaftları ve dairesel basınç tankları üretilir (Gülmez, 2018). Elyaf sarma yöntemi Şekil 2.22’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.22: Elyaf sarma yöntemi ile üretimin şematik gösterimi (Gülmez, 2018)

### 2.5.4 Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi ile Üretim (RTM)

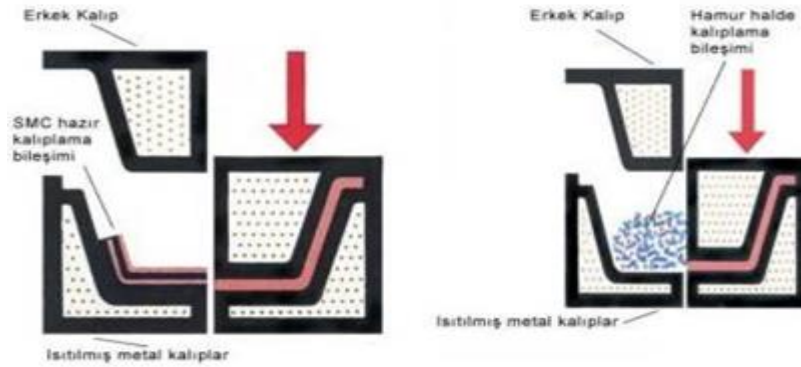
El yatırma işlemine kıyasla parça adedinin fazla istendiği yerlerde kullanılır. El yatırma tekniğine göre daha hızlı ve aynı zamanda uzun ömürlüdür. El yatırma tekniğinde sadece dişi kalıp tercih edilirken RTM’de dişi ve erkek kalıp birlikte kullanılır. Bu yöntemde üretime başlamadan önce kalıp temizlenir. Kullanılan takviye elemanına bağlı olarak kalıp yüzeyine kuru keçe, kumaş veya ikisinin karışımı yerleştirilir ve sonrasında kalıp kapatılır. Reçine her noktaya temas edecek şekilde sisteme basınç yardımı ile pompalanır. Bu yöntemde çevreye zarar vermemek için hava ve zararlı gazların dışarıya atılmasını gerçekleştirmek için vakum kullanılır. Bunun sonucu olarak gözeneksiz temiz yüzeye sahip parçalar üretilebilir (Bağcı 2005). RTM metodu Şekil 2.23’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.23: RTM metodu (Gülmez, 2018)

## 2.5.5 Hazır Kalıplama Yöntemi ile Üretim

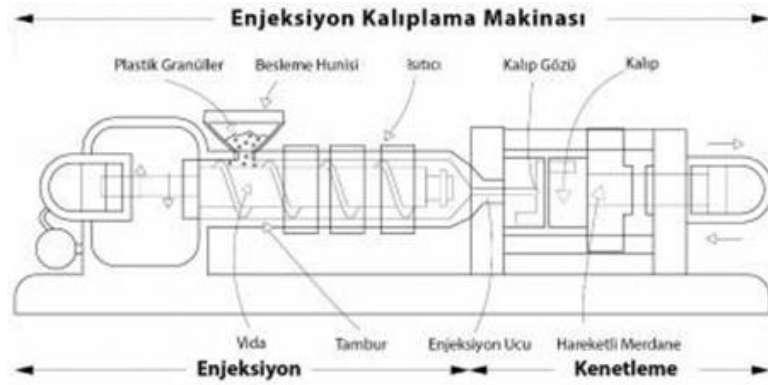
Sıcak pres altında kompozit malzemelerin üretilmesi bu yöntem ile gerçekleştirilir. Geniş kullanım alanına sahip olan hazır kalıplama tekniğinde kalıplama malzemesi olarak genelde cam elyaf, reçine ve dolgu malzemeleri seçilir. Metal parçaların içine gömülmesiyle farklı cidarlarda parçalar üretilebilir. Parçanın her iki yüzeyi kalıp ile şekillenir ve kaliteli bir yüzey elde edilir. Fire oranı düşüktür. Yüksek adetli üretimlerde parça maliyeti düşük olduğu için tercih edilir (Gülmez,2018). Hazır kalıplama yöntemi Şekil 2.24’de gösterilmiştir.



Şekil 2.24: Hazır kalıplama yöntemi ile üretim (Gülmez, 2018)

## 2.5.6 Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi ile Üretim

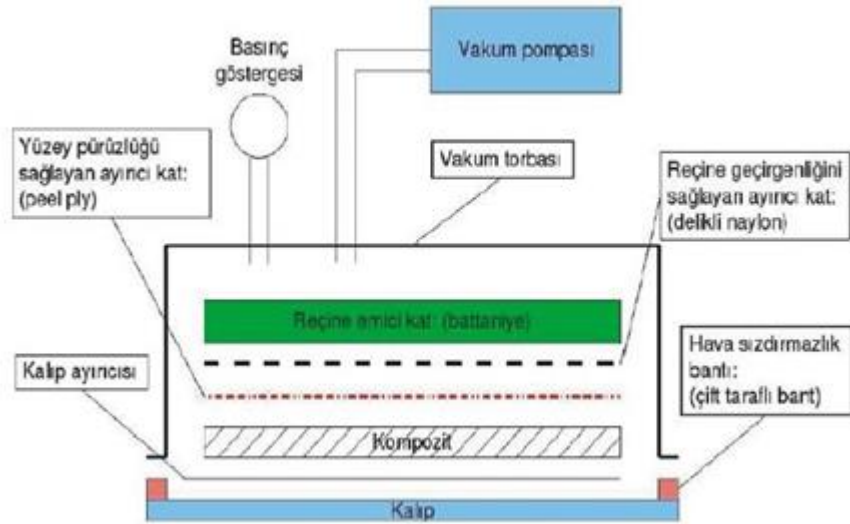
Isıtılan polimer yüksek basınç altında kalıp boşluğuna dolar. Parça katılaştıktan sonra kalıptan çıkartılır. Bu yöntemle istenilen toleranslarda hassas parçalar üretilebilir. Bu teknik seri üretim için uygundur. Kalıpta yapılan iyi bir tasarım çalışmasıyla tek seferde birden fazla parça üretilebilir. Termoplastik malzemelerin üretiminde yaygın olarak bu yöntem kullanılır (Gülmez, 2018). Enjeksiyon ile kalıplama yönteminin şematik görüntüsü Şekil 2.25 de gösterilmiştir.



Şekil 2.25: Enjeksiyon ile kalıplama yönteminin şematik görüntüsü (Gülmez, 2018)

## 2.5.7 Vakum Torbalama Yöntemi ile Üretim

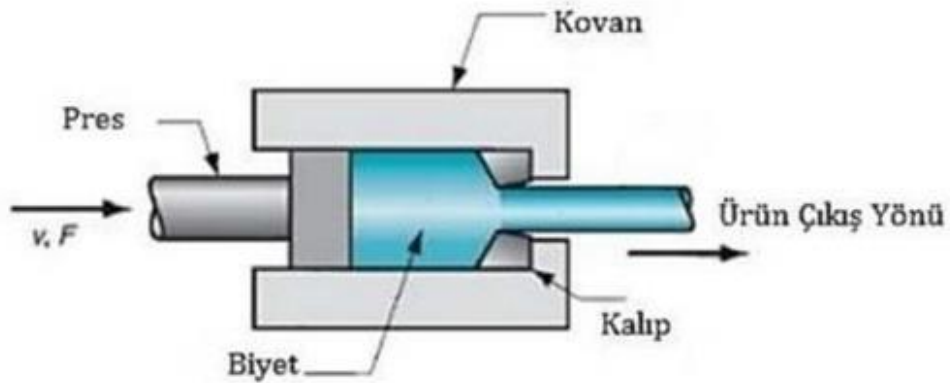
Vakum torbalama tekniğinde lamine edilmiş parçalar basınç altında küre halini alana kadar sıkıştırılır. Bu yöntemle birçok elyaf çeşidi ve reçine ile istenen özelliklerde kompozit ürün elde edilir. Vakumla torbalama yönteminde ilk aşamada kalıbın üzerine elyaflar serilir ve üzerine yerleştirilen vakum torbası ile sistemde sızdırmazlık sağlanır. Ardından düzeneğin iç ortam ve dış ortam basınçları eşit hale getirilir. Vakum pompasının çalışmasıyla sistemdeki hava dışarıya atılır. Vakumlanmış ortam içerisinde reçine ilerleyerek tüm elyafları ıslatır. Bu teknikle karmaşık şekilli kompozit parçalar kolaylıkla üretilebilir (Durgun, 2015). Vakum torbalama yöntemi ile üretimin şematik görüntüsü Şekil 2.26'da gösterilmiştir.



Şekil 2.26: Vakum torbalama yönteminin şematik görüntüsü (Durgun, 2015)

## 2.5.8 Ekstrüzyon Yöntemi ile Üretim

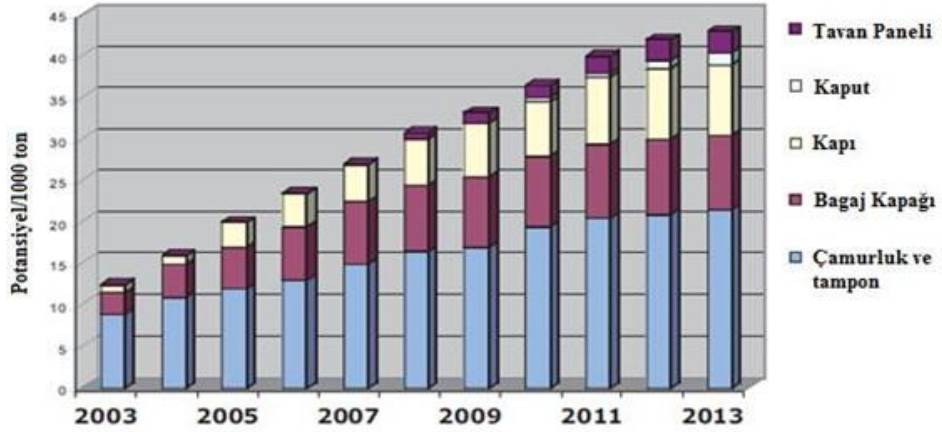
Bu yöntemde kalıpta ısı yardımıyla sıvı hale gelmiş olan plastik basınç yardımıyla biçimlendirilir. Yaygın olarak yüksek molekül ağırlıklı termoplastik imalatında kullanılan ucuz bir yöntemdir (Gülmez, 2018). Ekstrüzyon yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.27’de gösterilmiştir.



Şekil 2.27: Ekstrüzyon yöntemi ile üretimin şematik gösterimi (Gülmez, 2018).

### 3. TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN OTOMOTİV UYGULAMALARI

1980'lerden sonra otomotiv sektöründe ilk olarak binek otomobiller ardından ticari araçlar ve daha sonra da kamyon ve otobüslerin iç kısımlarında plastik kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Bunun yanında 2000'li yılların başından beri bazı makine elemanlarının, kaporta ve tampon gibi dış parçaların üretiminde termoplastik matrisli kompozitlerin kullanım miktarı artmıştır. Kullanımlar, iki ana başlık altında incelenebilir. İlk olarak doğrudan orijinal termoplastiklerin fiberlerle desteklenmesi, diğeri de geri dönüşmüş termoplastik matrisli kompozitlerin kullanılmasıdır. Bu ikinci kullanımda çevreye duyarlı konseptler ve enerji maliyetlerinin düşürülmesi konuları ele alınmıştır. Şekil 3.1'de 2011 yılında yayınlanan ve binek otolarında plastik kullanımını gösteren bir grafik verilmiştir (Belingardi vd.2011).



Şekil 3.1: Binek araçlarında kullanılan kompozit malzemelerin dağılımı (Belingardi vd.2011).

Bu tabloya göre, 2003-2013 yılları arasında tampon ve çamurluklarda kullanılan plastik 1000 ton esas alındığında aracın toplam kütesine oranı başta olmak üzere bagaj kapağında da kullanımı giderek artmıştır. Bunun dışında kapılarda kullanımı da 2003 yılında oldukça az iken 2013 yılında önemli derecede artış göstermiştir. Ayrıca 2010 yılından itibaren kaput kapağı ve üst kaput (kaporta) da kullanılması tahmin edilmektedir.

### 3.1 Termoplastiklerin Otomotiv Endüstrisindeki Önemi

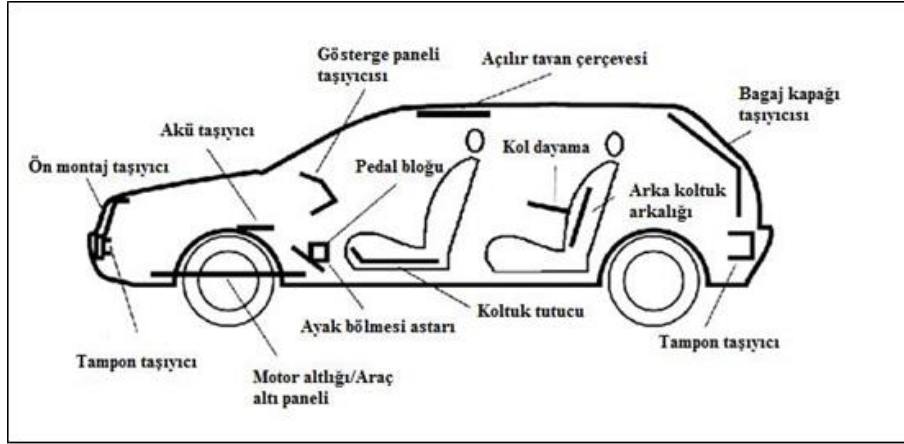
Cam elyaf takviyeli plastikler ilk olarak 1982 yılında hava sürtünme katsayısını azaltmak, motor bölmesini kir vb. dış etkilerden korumak ve motor sesini izole etmek amacıyla kaput altı keçesinde kullanılmıştır. 1992 yılında ise VW grubu tüm yeni araçlarının ön montaj taşıyıcı parçalarını cam takviyeli polipropilenden üretmiştir. 1990 yılında 6000 ton olan cam takviyeli plastik üretim hacmi 1992’de 12 000 tona yükselmiş ve 2000’de ise bu hacmin 40000 tonun üzerine çıktığı görülmüştür (Belingardi vd.2011). Cam takviyeli plastiklerin üretilmesi ve işlenmesindeki en büyük dezavantajı, üretim sırasında yüksek basınç gerektirdiğinden üretim maliyetleri yüksek olmasıdır. Bunlara ek olarak cam elyaf takviyeli plastik yarı mamulü preste işleyebilmek için malzemeyi matrisin ergime sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda ısıtmak gerekmektedir. Bu yüzden, 1990’lardan sonra uzun fiberli kompozit yerine kısa fiberli kompozitler kullanılmıştır (Yaşar, 2000). Bu tür kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri Tablo 3.1’de ticari adlarıyla birlikte gösterilmiştir.

**Tablo 3.1:** Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan plastikler

Kısaltma	Polimer	Kullanım Sıcaklığı (°C)	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)
Torlon®PAI	Poliamidimid	250	275
Aurum® PI	Polyimid	288	250
PES	Polietersülfon	177 - 204	224
PEI	Polieterimid	177 - 204	213
PSO (PSU)	Polisülfon	149 - 171	190
PEEK®	Polietereterketon	204 - 232	143
PPA	Polifitalamid	204 - 232	134
PPS	Polifenilensülfid	204 - 232	92

Kısa fiberli kompozitler yüksek enerji absorpsiyonu ve darbe dayanımı gibi özelliklerinden dolayı yaygın kullanım alanı bulmuştur. Ortalama maksimum 150 °C’a kadar çalışma sıcaklığı olmasına rağmen, aracın içi için -30 ile +110 °C sıcaklık aralığı otomotiv sektörü için yeterlidir. Bu tür kompozitler motorlu taşıtın karşı karşıya kalacağı; akaryakıt, su buharı, temizlik malzemeleri ve koruma malzemeleri, egzoz

gazları, yağlayıcı madde ve tuzlu su gibi çevresel etkilere karşı yeterli kimyasal dayanıma sahiptir. Diğer taraftan, iyi akustik özelliklerinden dolayı da motor sesini izole etmede de kullanılır. Şekil 3.2’de ise Avrupa Birliğinde üretilen binek araçlarda termoplastik matrisli kompozitlerin kullanım yerleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Avrupa Birliğinde üretilen binek araçlarında termoplastik matrisli

### 3.2 Orjinal Termoplastik Matrisli Kompozit Kullanımı

Orijinal termoplastik matrisli kompozit kullanımı, motor parçaları ve tampon uygulamalarında görülmektedir. Sıcak kalıplama yöntemiyle imal edilmiş PP matris ve E-Camı dokumalı ve hacim oranı % 50 olan bir motor altı koruyucusu Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Bu parçanın maliyet hesabı yapıldığında daha önceden üretilmiş olan alüminyum döküm malzemeye göre % 20 daha düşük maliyetli olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.3: PP – E-Camından üretilmiş motor altı koruyucusu (Belingardi vd.2011).

Şekil 3.4'te ise PE matrisli E-Camı fiberlerinden üretilmiş darbe emici tampon bağlantı parçası ve tampon gösterilmiştir.



Şekil 3.4: PE matrisli E-Camı fiberlerinden üretilmiş darbe emici tampon bağlantı parçası ve BMW 3 serisi araçlarındaki uygulaması (Belingardi vd.2011).

Toyota binek otomobilleri için yağ karterlerinin termoplastik matrisli ve karbon dokuma kumaştan sıcak presleme yöntemiyle imalatına geçmiştir. Daha önce sırasıyla çelik döküm ve alüminyum alaşımından üretilen karter günümüzde PP matrisli olarak üretilmiş olup, kullanılmaktadır. Şekil 3.5'te iki farklı malzemeden üretilmiş yağ karterleri gösterilmiştir ( Beg vd 2009).



Şekil 3.5: Toyota binek otomobilleri için Alüminyum ve termoplastik kompozitten imal edilmiş yağ karterleri

Şekil 3.6'da ise Şekil 3.5'te gösterilen yağ karterlerinin standart darbe (çarpma) deneyi sonucu elde edilmiş görüntüler verilmiştir. Stabilize ve asfalt olmayan diğer kullanımlarda sık karşılaşılan yağ karterinin delinmesi problemi de bu şekilde önlenmiş olmaktadır.

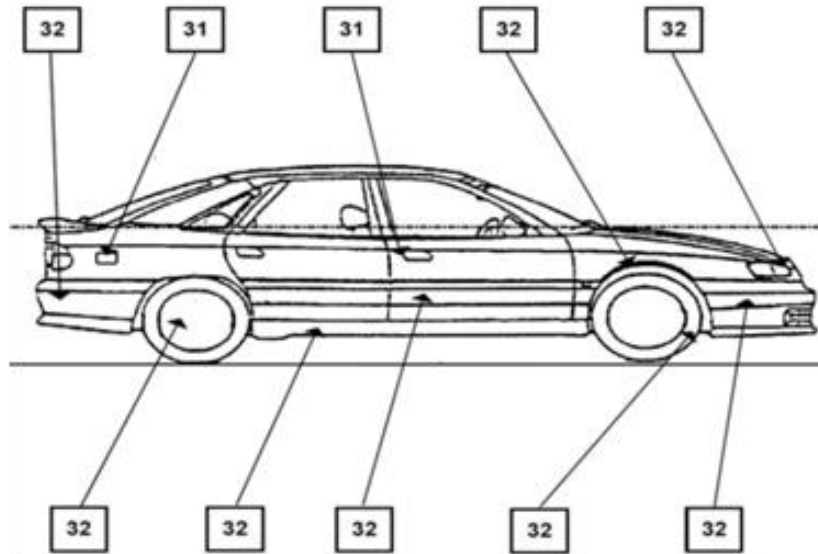




Şekil 3.6: Sırasıyla çelik, alüminyum alaşımı ve PP matrisli kompozitten üretilmiş yağ karterlerinin standart darbe (çarpma) deneyi sonuçları

### 3.3 Geri Dönüşmüş Termoplastik Matrisli Kompozit Kullanımı

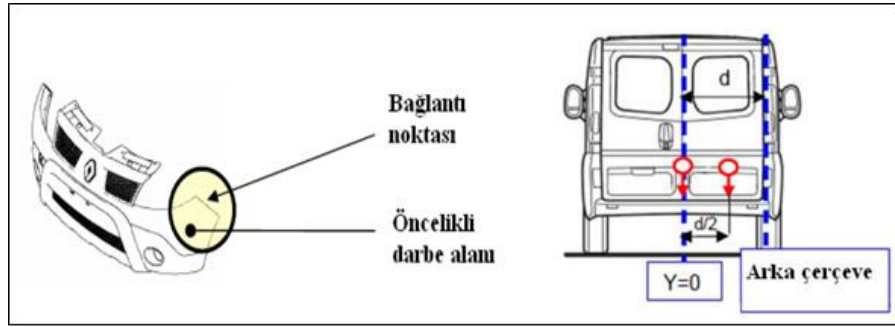
Fransa ve İtalya 2000’li yılların başında önemli çalışmalar yaparak, tampon ve darbe emici elemanların üretiminde geri dönüştürülmüş termoplastik matrisli kompozit malzeme kullanımını gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 3.7: Renault otomobillerinde darbe alanında kullanılan geri dönüşmüş termoplastik matrisli kompozitlerden yapılan parçalar. 32 nolu parçalar öncelikli darbeye maruz elemanlardır.

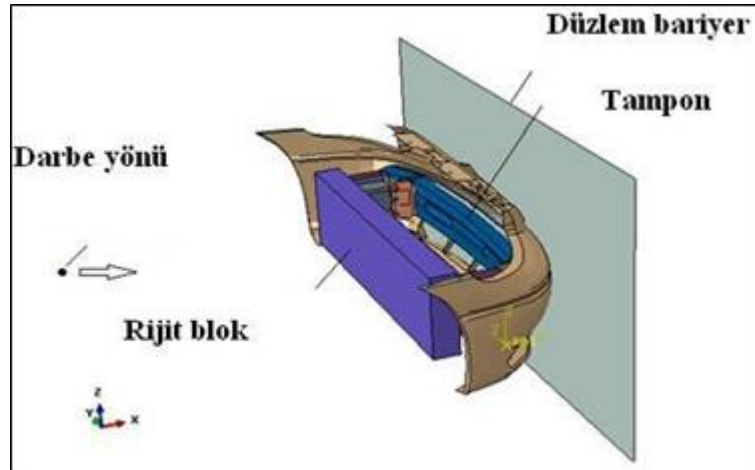
Genel olarak Renault otomobillerinde öncelikli darbe alanları belirlenmiş ve burada -30°C ile +30°C arasında kullanımı öngörülmüştür (Najafi 2013). Şekil 3.8’de öncelikli darbe alanları belirtilmiştir. Ardından bu konuda çalışmalar yaparak hafif ticari araçların ön ve arka tamponları ile birlikte arka kapı ve çerçevesinin imalatına doğru geçişler yapılmıştır. Örneğin aynı firmanın Kangoo modellerinde bu konular

kullanılmış ve özel kalite dataları oluşturulmuştur. Şekil 3.8’de kalite verilerinden alınmış bir resim ve parça detayları gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Otomobilden başlayarak hafif ticari araçlarda geri dönüşmüş termoplastik matrisli kompozit kullanım bölgeleri

Buna benzer bir çalışmada da Fiat firması tarafından tüm binek araçlarının tamponları için yapılmıştır. Bu konuda firma kendi darbe ve güvenlik standartlarını belirlemiştir (Ahmed,Patil 2013).



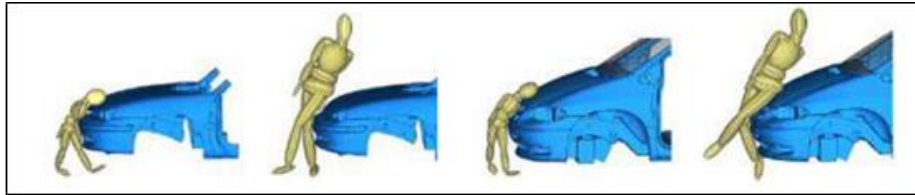
Şekil 3.9: FIAT otomobillerinde ön tamponun darbe deneyi esaslarının şematik gösterilişi (Belingardi vd. 2011)

Benzer çalışmalar aynı dönemlerde Japon otomobilleri için de yapılmıştır. Örneğin Honda firması otomobillerinde önce PP, sonra PE matrisli ve cam fiberli, geri dönüştürülmüş kompozit malzeme kullanımını başlatmıştır. Şekil 3.10’da bu otomobiller için imal edilmiş kompozit tampon gösterilmiştir (Belingardi vd.2011).

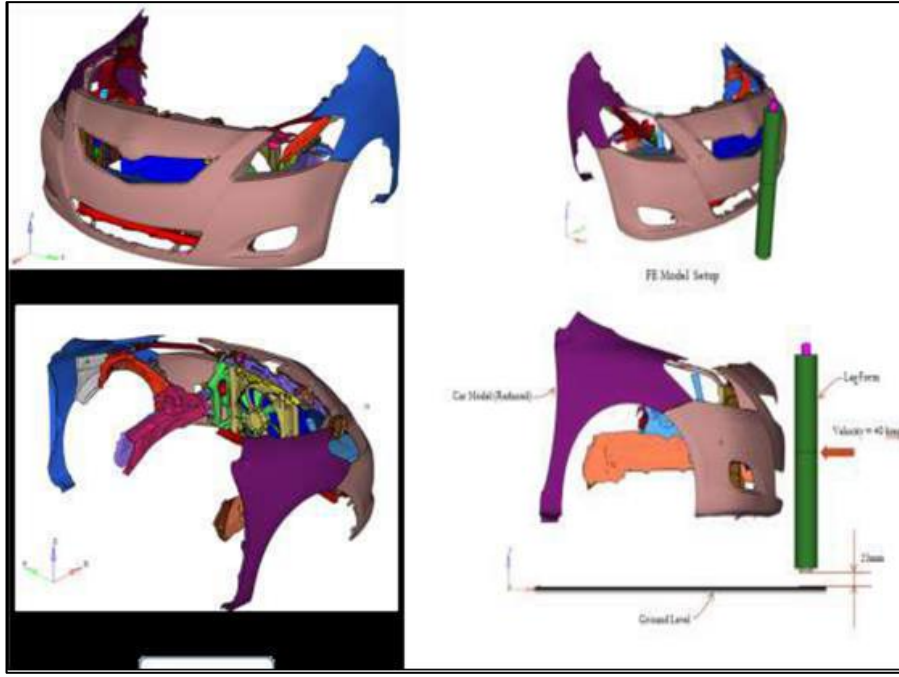


**Şekil 3.10:** Honda otomobillerinde kompozit ön tampon

Şekil 3.11’de benzer şekilde Toyota firmasının Yaris modellerinde kullanılan geri dönüştürülmüş termoplastik matrisli kompozitlerin kullanımı ve insan ile çarpışma simülasyonu verilmiştir (Şekil 3.12).



**Şekil 3.11:** İnsan ile çarpışma simülasyonu



**Şekil 3.12:** Çarpışma modellerinin sonlu elemanlar yöntemiyle gösterimi

Diğer taraftan çarpışma modelleri sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak çözümlenmiş ve sonuçların deneysel çalışmalarla da doğrulanması yapılmıştır. Şekil 3.12’de sözü edilen çalışmalar gösterilmiştir.

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında flmeon.com sitesinden granül halinde tedarik edilmiş olan PLA polimeri, kompozit.net adresinden karbon fiber ve edukim.com'dan kloroform tedarik edilmiştir. Pres işlemi için kalıp ve tasarımı Denizli sanayii bölgesinden bulunan SG kalıp şirketinde yaptırılmıştır. Belirlenen oranlarda hazırlanan reçeteye göre numunelere çekme testi, DMA, FTIR, FESEM, EDS analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.1: Deneysel çalışmada kullanılan granüler formdaki PLA

### 4.1 Yöntem

Yapılmış olan tez çalışması numune hazırlığı dört aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada granül haldeki PLA kloroform yardımıyla çözdürülmüştür ve sol-jel yöntemiyle hazırlanmıştır. Çözünen PLA içerisine belli oranlarda karbon fiber eklenmiştir. Dört farklı yüzdelik oranda karbon fiber, çözülmüş haldeki PLA içerisine eklenmiştir. Petri kabında jel hale gelen PLA+Karbon fiber karışımı oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılmıştır. Burada amaç yapıda bulunan kloroformu uzaklaştırmaktır. Üçüncü aşamada ise oda sıcaklığında katı forma gelen PLA küçük parçalara kesilmiştir. Son aşamada ise küçük parçalara ayrılmış olan PLA+Karbon fiber karışımı kompozit malzeme, polimer çekme testi standardı ölçülerine göre yapılan kalıp içerisine alınıp ısıtılma işlemi için fırına koyulmuştur. Burada yaklaşık yarım saat ısıtılma işlemi uygulandıktan sonra ısınan kalıp pres işlemine tabi tutulmuştur. Kalıp içerisinden

çıkan kaşık numunelere çekme testi yapılmıştır. Çekme testiyle ilgili ayrıntılar diğer bölümde anlatılacaktır. Ardından FESEM, FTR, EDS ve DMA analizleri yapılmıştır.

#### 4.1.1 Dinamik Mekanik Analiz

Polimer gibi bazı malzemeler hem elastik hem de viskoz davranış gösterirler. Bu tür malzemelere viskoelastik malzemeler denir.

Dinamik Mekanik Analiz (DMA), plastik ve polimer kompozit malzemelerin davranışını incelemek için kullanılan analiz yöntemlerinden biridir. Dinamik mekanik analiz yönteminde malzemelerin üzerine belirlenen bir frekansta artıp azalan bir yük uygulanarak malzemenin viskoelastik özellikleri ölçülür. Bu yüzden DMA malzemelerin viskoelastik özelliklerini belirlemek için kullanılan en yaygın yöntemlerinden biridir. Bu analiz yönteminde belirli bir frekansta yük, malzemeye belirli bir sıcaklıkta etki etmektedir. Kullanılan ölçme teknikleri ile çok çeşitli frekanslarda çalışılmaktadır. DMA deneyi sonrasında birçok değer elde edilmektedir (Keskin,2019). Bunlar;

- Esas olarak depolama modülü ( $E'$  storage modülü),
- Kayıp modülü ( $E''$  loss modul) ve
- Sönümlenme modülü ( $\tan(d)$ ) değerleridir.

Geniş sıcaklık aralığında çalışma olanağı DMA yöntemi ile malzemenin bir diğer önemli özelliği camı geçiş sıcaklığının ( $T_g$ ) bulunmasını sağlamaktadır.

Dinamik Mekanik Analiz sertliği ve sönümlenmeyi ölçer, bunlar modül ve  $\tan(d)$  olarak rapor edilir. Depolama modülü,  $E'$  veya  $G'$ , numunenin elastik davranışının ölçüsüdür. Kaybın depoya oranı  $\tan(d)$  ve genellikle sönümlenme olarak adlandırılır. Bir malzemenin enerji dağılımının bir ölçüsüdür (Keskin,2019).

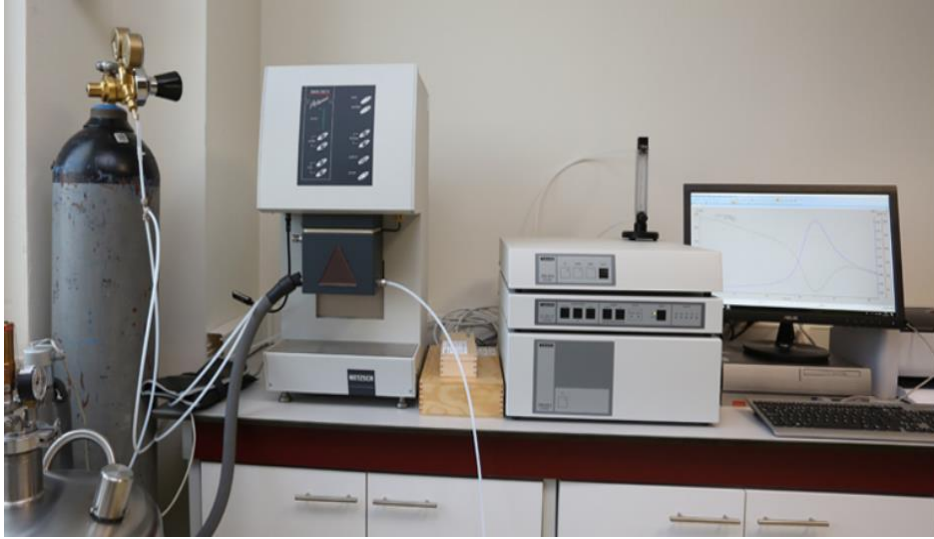
Camsı alanda malzeme oldukça serttir. Numunede bükülmeler ve gerilmeler oluşmaktadır. Depolama modülü( $E'$ ) azaldıkça  $\tan(d)$  değeri yükselir ve numune yavaş yavaş yumuşamaya başlar

### **Sönümlenme Modülü (Tan(d))**

Tan(d),  $E''$ 'nin  $E'$ 'ne oranıdır ve sönümlenme katsayısını vermektedir. Kompozit malzeme içerisindeki sönümlenmeye dolgu malzemeleri ile matris arasındaki kaymalar, çatlaklar ve delaminasyon yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetleri sebep olur.

### **Kayıp Modülü ( $E''$ )**

$E''$ , viskoelastik malzemenin viskoz bileşenini tanımlar. Kayıp Modülünün ( $E''$ )'nün artması dolgu malzemeleri ile matris arasında etkileşimin veya ara yüzey uyumunun azaldığını gösterir (Keskin,2019).



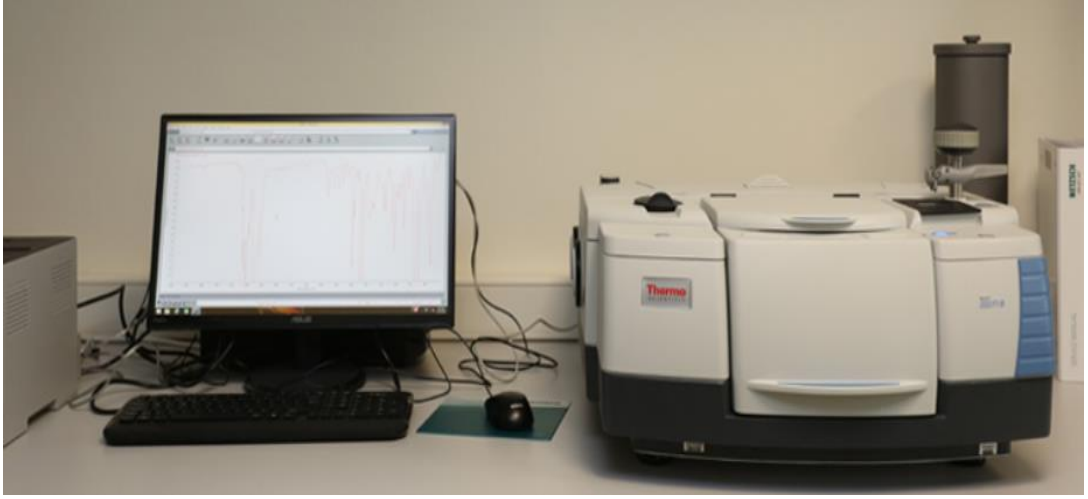
Şekil 4.2: DMA cihazının görüntüsü

### **4.1.2 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)**

FTIR Spektrum Cihazı organik bileşiklerin tanımlanmasında kullanılır. Optik izomerler dışında bütün bileşiklerin IR spektrumu birbirinden farklıdır. FTIR, her dalga boyunu tek tek taramak gerekmediği için spektrum birkaç saniyede kaydedilir ve yarık veya prizma kullanılmadığı için duyarlık değişmeden yüksek ayırmalı spektrum elde edilir (Durmuş, 2016 ). FTIR analizi ile;

- Organik bileşik tanımlama,
- Yüzde derişim,
- Malzeme tanımlama,
- Spektroskopi elde edilir.

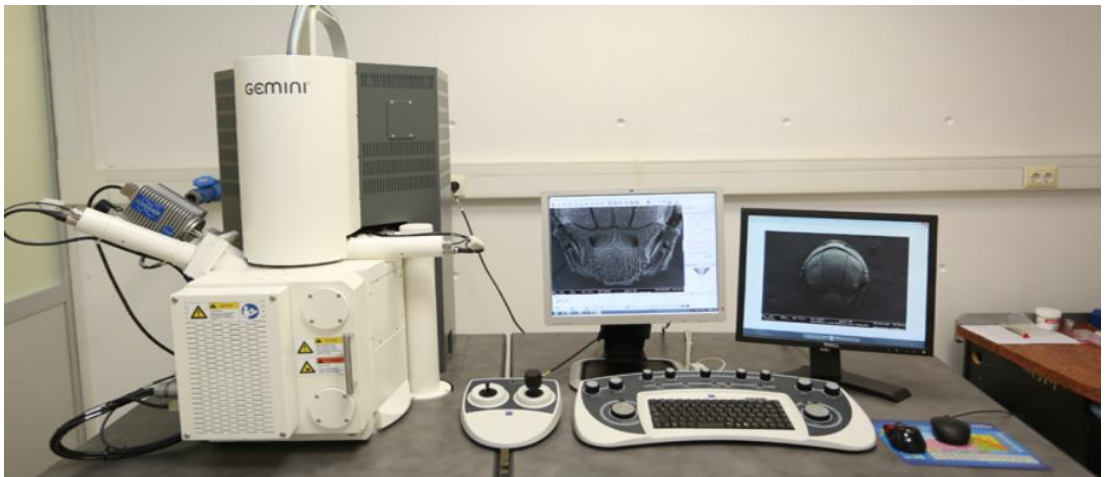




Şekil 4.3: FTIR cihazının görüntüsü

### 4.1.3 Taramalı elektron mikroskobu

Yüksek voltaj ile hızlandırılan elektronların, numune üzerine odaklanması sonucunda, numune yüzeyi taratılarak, gönderilen elektronlar ile numune atomlarının etkileşmesi sağlanır. Ortaya çıkan bu etkileşimlerin uygun dedektörler yardımı ile toplanması ve sinyal güçlendiricilerden geçirilerek katot ışını tüpünün ekranına gönderilmesi sonucunda görüntü elde edilir. Elde edilen görüntülerden numuneye ait tanecik boyutu ve tanecik yerleşimi hakkında bilgiler elde edilebilmektedir (Keskin,2019).



Şekil 4.4: FESEM cihazının görüntüsü

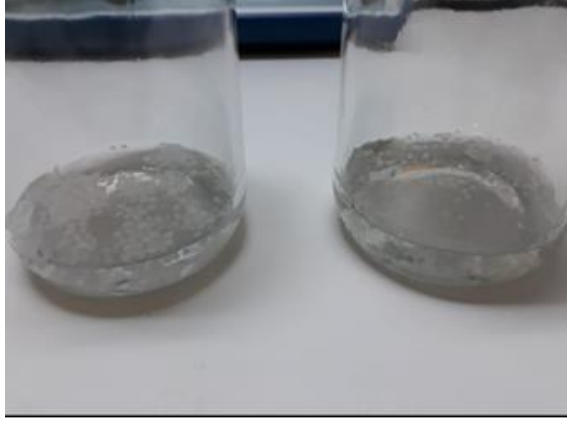


## 4.2 Malzemelerin Hazırlanması

Piyasadan granül halde tedarik edilmiş olan PLA polimeri ve yine aynı şekilde piyasadan tedarik edilmiş olan kloroform ile çözdürülmüştür. Çözünmüş yapı Şekil 4.5'de gösterilmiştir. 10 gr PLA 50 ml kloroform ile birlikte kapalı bir kap içerisinde çözülmeye bırakılmıştır. Granül halindeki PLA kloroform yardımıyla yaklaşık 6 saatin sonunda jel forma geçmiştir. Sıvı hale gelen PLA içerisine ilk olarak % 1 oranında toz halinde olan karbon fiber eklenmiştir. Dört farklı kompozisyonda PLA+Karbon fiber kompoziti hazırlanmıştır. Bunlar : %1 ,%3, %5 ve son olarak % 10 oranındadır. Sıvı hale gelen PLA içerisine sırasıyla 0,1, 0,3, 0,5 ve 1 gram karbon fiber eklenmiştir. Şekil 4.7'de gösterilen hassas terazi yardımıyla belirlenen oranlarda PLA+Karbon fiber kompozit malzeme hazırlanmıştır. Hazırlanan malzeme kapalı kap içerisinde çözülmeye bırakılmıştır. Şekil 4.6'da kapalı kap içerisinde çözülmeye bırakılan PLA gösterilmiştir. Kloroform ile çözdürülmüş sıvı hale gelmiş olan PLA'ya % 1 oranında karbon fiber eklenmesiyle katılaşmaya bırakılmış kompozit malzeme örneği Şekil 4.8'de verilmiştir. Numune hazırlığında son aşama olarak da Kloroform ile çözdürülmüş sıvı hale gelmiş olan PLA'ya % 1 oranında karbon fiber eklenmesiyle katılaşmaya bırakılmış kompozit malzeme örneği Şekil 4.8 de verilmiştir. Şekil 4.9'da % 1 oranında karbon fiber eklenmiş sıvı haldeki PLA oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılmıştır



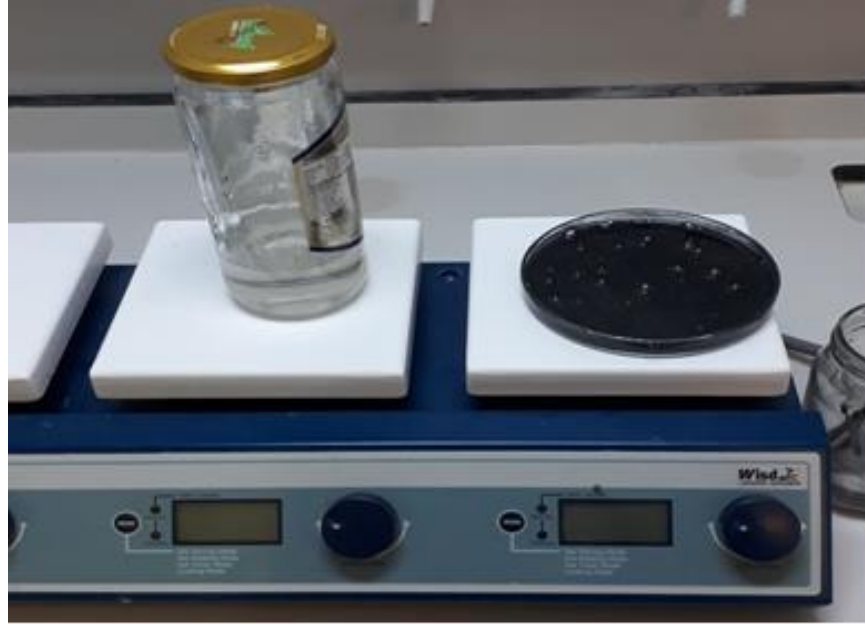
Şekil 4.5: Kloroform ile çözdürülmüş PLA görüntüsü



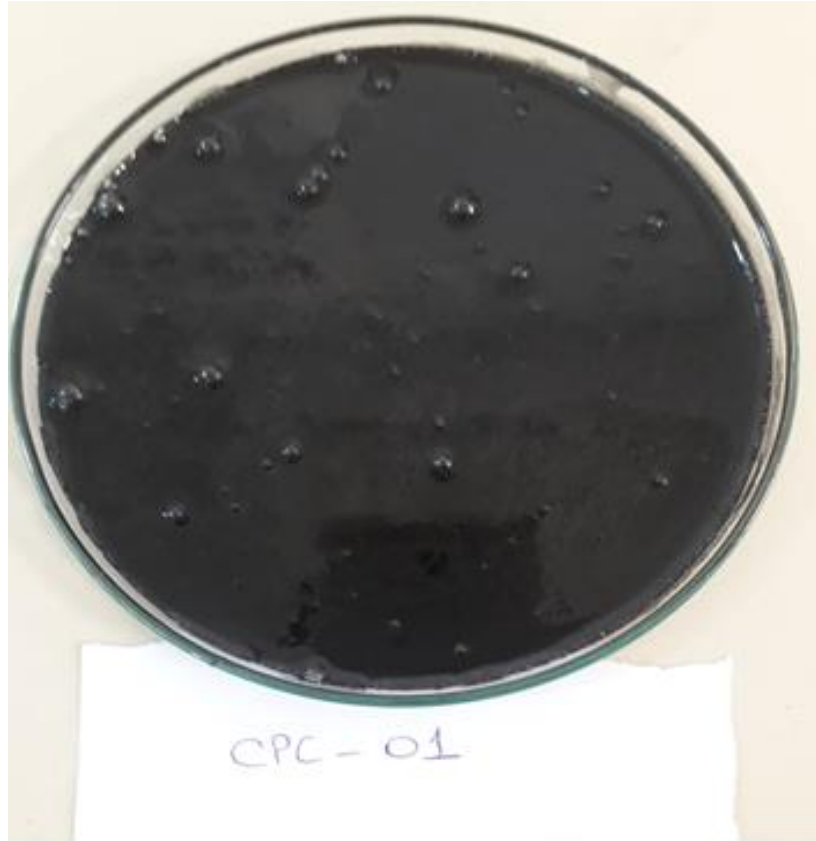
**Şekil 4.6:** Kapalı kap içerisinde kloroform ile çözülmeye bırakılmış PLA



**Şekil 4.7:** Hassas terazi görüntüsü



**Şekil 4.8:** Kloroform ile çözdürülmüş sıvı hale gelmiş olan PLA'ya % 1 oranında karbon fiber eklenmesiyle katılaşmaya bırakılmış kompozit malzeme



**Şekil 4.9:** % 1 oranında karbon fiber eklenmiş sıvı haldeki PLA oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılmıştır



**Şekil 4.10:** 24 saatin sonunda katılaştıran PLA+karbon fiber karışımı

PLA kloroform yardımıyla kapalı kap içerisinde çözdürüldüğünde deney kabı dışarıdan hava almadığı için yapıdan uzaklaşamaz. Granül halindeki PLA tamamen çözünmeyi tamamlayıp sıvı hale geldiğinde içerisine eklenen toz halindeki karbon fiber karıştırıcı yardımıyla PLA ile homojen bir şekilde karışması için yaklaşık on dakika boyunca karıştırılmıştır. Şekil 4.10'daki görüntüyü aldığı anda deney kabı içerisinden petri kabına alınır. Petri kabında katılaşmaya bırakıldığında yapıda kloroform kalan kalmaması için petri kapındaki karışım çeker ocağı içerisine alınmıştır. Şekil 4.11'de çeker gösterilmiştir.



Şekil 4.11: Çeker ocağı

PLA 'nın klorofom ile çözdürülme işlemi çeker ocağı içerisinde yapılmıştır. Aynı şekilde jel forma geçmiş olan PLA çeker ocağı içerisinde oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılmıştır. Şekil 4.11'de çeker ocak içerisinde bırakılmış PLA +karbon fiber karışımının katı haldeki görüntüsü verilmiştir. 24 saatlik bekleme sonrasında yapıda bulunan kloroform uzaklaştırılmıştır. Ancak sol-jel yöntemiyle üretilen PLA, ısı ile işleme tabi tutulup ardından preslendiğinde yapısında bulunan gözenekler nispeten kaybolmuştur. Soljel yöntemiyle üretilmiş gözenekli yapıdaki PLA+Karbon fiber karışımı görüntüsü Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12: Soljel yöntemiyle üretilmiş gözenekli yapıdaki PLA+Karbon fiber karışımı

#### 4.2.1 Karışımların Hazırlanması

Tez çalışması kapsamında kullanılacak olan numuneler aşağıdaki tabloda verilen oranlarda hazırlanmıştır. CPC(0.1) içerisinde 0.1 gr karbon fiber, 50 ml kloroform, 10 gr PLA, CPC(0.3) karışımı içerisinde 10 gr PLA, 50 ml kloroform, 0.3 gr karbon fiber, CPC(0.5) içerisinde 10 gr PLA, 50 ml kloroform, 0.5 gr karbon fiber ve CPC(1) karışımı içerisinde ise 10 gr PLA, 50 ml kloroform, 1 gr karbon fiber bulunmaktadır. Tablo 4.1.'de çalışma kapsamında oluşturulan reçeteler ve kullanım oranları verilmiştir. Tablo 4.1 verilen oranlarda dört farklı oranda reçete hazırlanmıştır.

**Tablo 4.1:** Çalışma kapsamında oluşturulan reçeteler ve kullanım oranları

Grup Adı	POLİLAKTİK ASİT		KARBON FİBER		KLOROFORM	
	MİKTAR %	MİKTAR GR	MİKTAR %	MİKTAR GR	MİKTAR %	MİKTAR GR
CPC (0.1)	1	10 gr	1	0.1 gr	1	50 ml
CPC (0.3)	3	10 gr	3	0,3 gr	3	50 ml
CPC (0.5)	5	10 gr	5	0,5 gr	5	50 ml
CPC (1)	10	10 gr	10	1 gr	10	50 ml

Filameon firmasında tedarik edilen PLA, Edukim kimyadan tedarik edilen kloroform ve Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler Sanayi ve Ticaret Limited Şirketine tedarik edilen karbon fiber Tablo 4.1 verilen oranlarla  $\pm 0,01$  g hassasiyetteki terazide tartılarak hazırlanmıştır.

Hazırlanan dört farklı kompozisyondaki numunelerden karbon fiber oranı en düşük olan CPC 0,1 kodlu numuneye %0.1 gram grafen eklenmiştir. Grafen etkisini görmek için en düşük karbon fiber oranına sahip numune seçilmiştir.

Belirlenen reçeteye göre hazırlanan numuneler pres işlemi öncesi kalıp içerisine alınarak ısıtma işlemi fırınında yapıdaki 50 ml kloroformu uçurmak için yaklaşık  $250^{\circ}\text{C}$ 'de 30 dakika bekletilmiştir. Etüv fırının görüntüsü Şekil 4.15'de verilmiştir. Isıtma işlemi fırınından çıkarılan kalıp soğumadan pres işlemine tabi tutulmuştur.



**Şekil 4.13:** TS EN ISO 527-4'e göre yaptırılan çelik kalıbın görüntüsü

Oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılan PLA+karbon fiber kompoziti katılaştıktan sonra makas yardımıyla küçük parçalara kesilmiştir. Kesilen parçalar kalıp içerisine alınmıştır. Ardından içerisinde parçalar bulunan kalıp ısıtma fırınına koyulmuştur. 250 °C'de yaklaşık yarım saat bekledikten sonra preslenmiştir. Pres işleminden sonra numune kalıptan çıkarılmıştır. Tablo 4.2'de verilen çekme numunesi boyutları TS EN ISO 527-4 standardından alınmıştır. Pres işlemi sonrasında kalıbın ölçüleri olması gereken çekme numunesi boyutlarında olduğu için kalıptan çıkan numuneler doğrudan çekme testine tabi tutulmuştur.

**Tablo 4.2:** TS EN ISO 527-4'e göre çekme deneyi parçası boyutları

Anlam	Sembol	Ölçü(mm)
Toplam uzunluk	L <sub>3</sub>	≥ 150
Dar paralel kenarlı kısmın uzunluğu	L <sub>1</sub>	60 ± 0,5
Yarıçap	R	≥ 60
Uçlardaki genişlik	b <sub>2</sub>	20 ± 0,2
Dar kısmın genişliği	b <sub>1</sub>	10 ± 0,2
Kalınlık	h	2–10
Ölçme uzunluğu	L <sub>0</sub>	50 ± 0,5
Çeneler arasındaki başlangıç mesafesi	L	115±1



**Şekil 4.14:** Kalıbın pres makinesi üzerindeki görüntüsü

Isıl işlem fırınından çıkarılan sıcak kalıp presleme işlemine tabi tutulmuştur.20 bar basınçla 2 dakika boyunca preslenmiştir. Şekil 4.14’de preslenen numune kalıbı verilmiştir.



**Şekil 4.15:** Etüv fırının görüntüsü



## 5. BULGULAR

### 5.1 Mekanik Özellikler

Hazırlanan 4 farklı orana sahip olan polimer matrisli kompozit malzemeye ilk olarak mekanik özelliklerini görmek adına çekme testi yapılmıştır. Çekme testleri TS EN ISO 527-4'e standardına göre yapılmıştır.

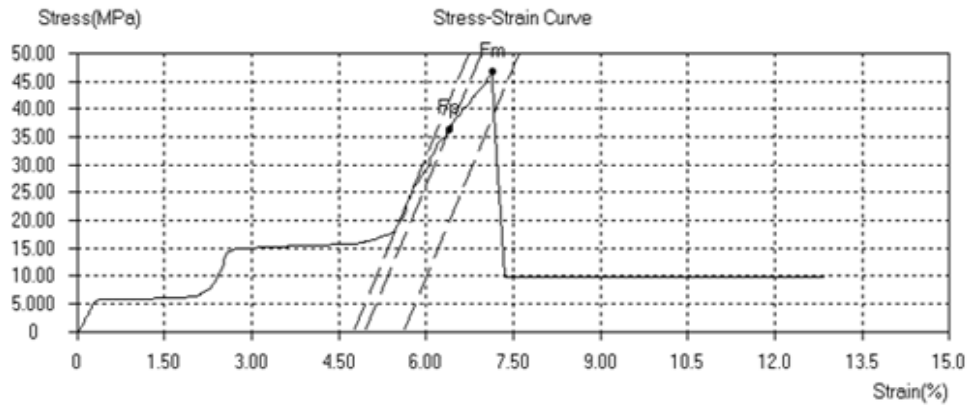
Maksimum çekme kuvveti (mukavemeti) ve % uzama miktarını görebildiğimiz çekme testinde doğrusal çizgi altında kalan bölge numune için güvenli bölgeyi temsil eder. Güvenli bölgeden anlaşılması gereken numunenin plastik deformasyona (kalıcı deformasyon) uğramadan sağlam bir şekilde formunu koruduğu bölgedir.

Elde edilen çekme kuvveti, elastikiyet modülü ve gerinim değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre en yüksek çekme kuvvetine karşı direnci gösteren numune %10 karbon fiber içeriğine sahip olan 4 numaralı CPC 0.10 kodlu numunedir. Üretilmiş olan PLA matrisli kompozit malzemede karbon fiber oranı arttıkça çekme mukavemetinin arttığı yüzde uzamanın %10'a kadar düştüğü görülmüştür.

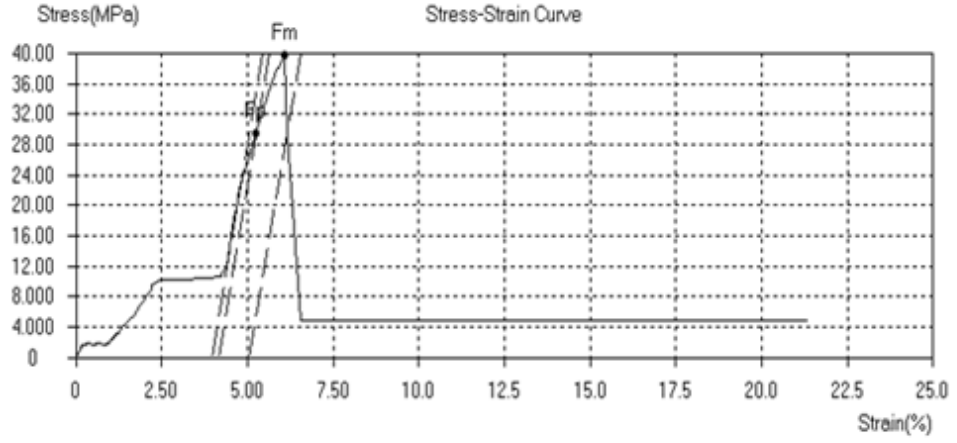
Buna ek olarak en düşük karbon fiber oranına sahip CPC 0,1 kodlu numuneye 0.1 gram grafen ilave edilip yeni karışım yapılmıştır. Bu karışımında grafen ilavesiyle mukavemet artmış yüzde uzama düşmüştür.

**Tablo 5.1:** Hazırlanan Kompozit Malzemenin Çekme Testi Sonuçları

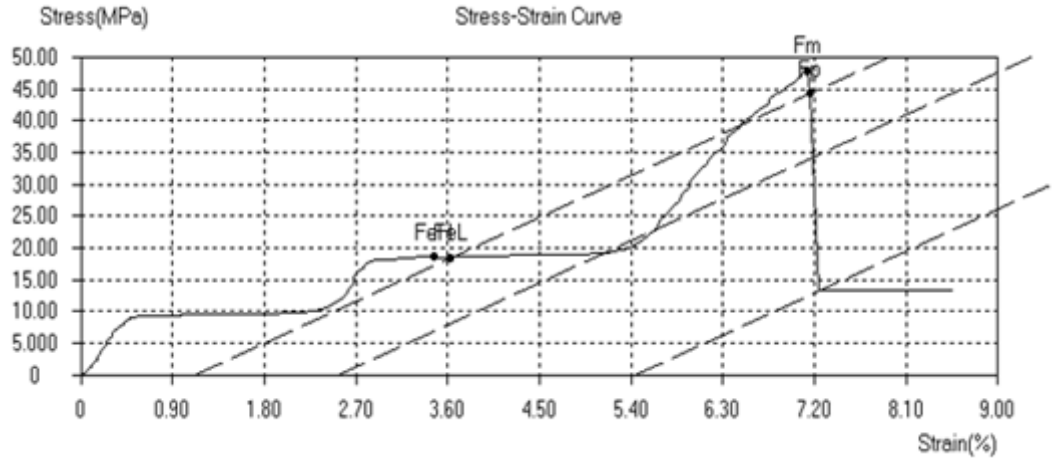
Numune	Çekme Mukavemeti MPa	Akma Mukavemeti Mpa	Çekmede Elastikiyet Modülü MPa	% Uzama
CPC (0.1)	28	24	1	9,5
	37	26	2	10,2
	40	29	3	21
CPC (0.3)	48	44	1	7,2
	48	34	2	10,7
	42	29	5	21
CPC(0.5)	34	27	3	7,2
	34	23	5	7
	29	29	2	12,5
CPC (1)	49	42	3	10,8
	37	28	4	11,9
	24	5	-	10
CPC 0.1+ GRAFEN 0.1	47	26	2	12,5



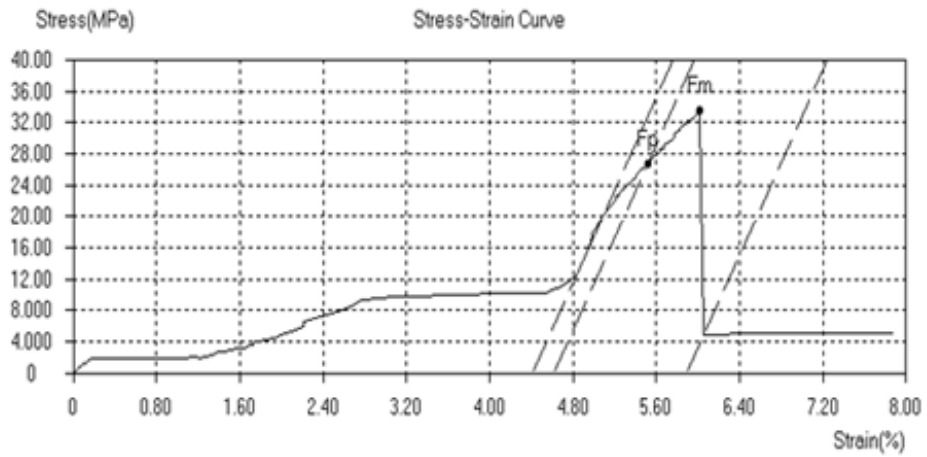
**Şekil 5.1:** 0.1gram grafen katkılı CPC 0.1 kodlu numunenin çekme testi sonuçları



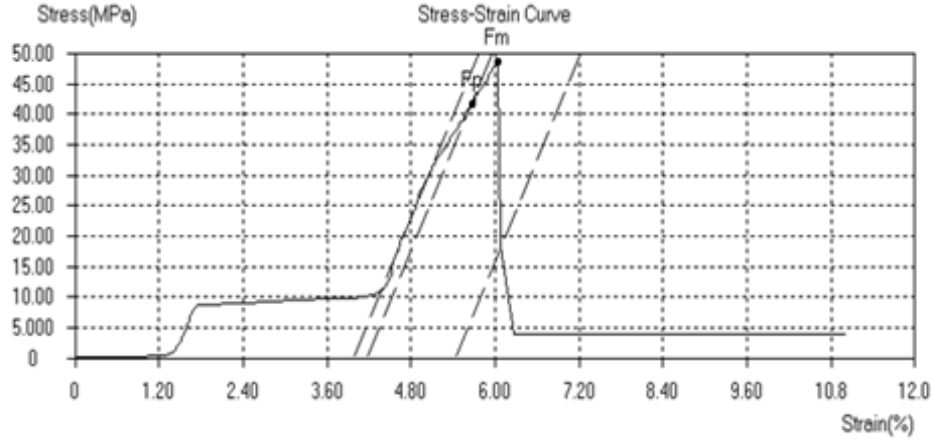
Şekil 5.2: % 0.1 karbon fiber içeren numunenin çekme testi sonucu



Şekil 5.3: 0.3 gram karbon fiber içeren cpc 0.3 kodlu numunenin çekme testi sonuçları



Şekil 5.4: 0.5 gram karbon fiber içeren PLA 'nın çekme testi sonucu



Şekil 5.5: 0.10 gram karbon fiber içeren PLA 'nın çekme testi sonucu

Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de verilen grafiklere bakıldığında ortalama % 12 uzama, 40 MPA çekme mukavemeti ve 30 MPA akma mukavemeti olduğu görülmüştür. Karbon fiber oranı arttıkça çekme mukavemeti artmış, yüzde uzama azalmıştır.

## 5.2 Biyokompozitlerde FTIR Analizi

PLA + Karbon Fiber (CPC 0.1) ve PLA + Karbon Fiber + Grafen (CPC+G) kimyasal yapısı FTIR spektrometresi ile incelenmiştir. Günümüzde fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) oldukça sık kullanım alanı olan bir analitik yöntemdir. Yapıda bulunan moleküllerin titreşim hareketine dayanan bir tekniktir. Doğada bulunan her maddenin kendine özgü bir infrared spektrumu bulunur.

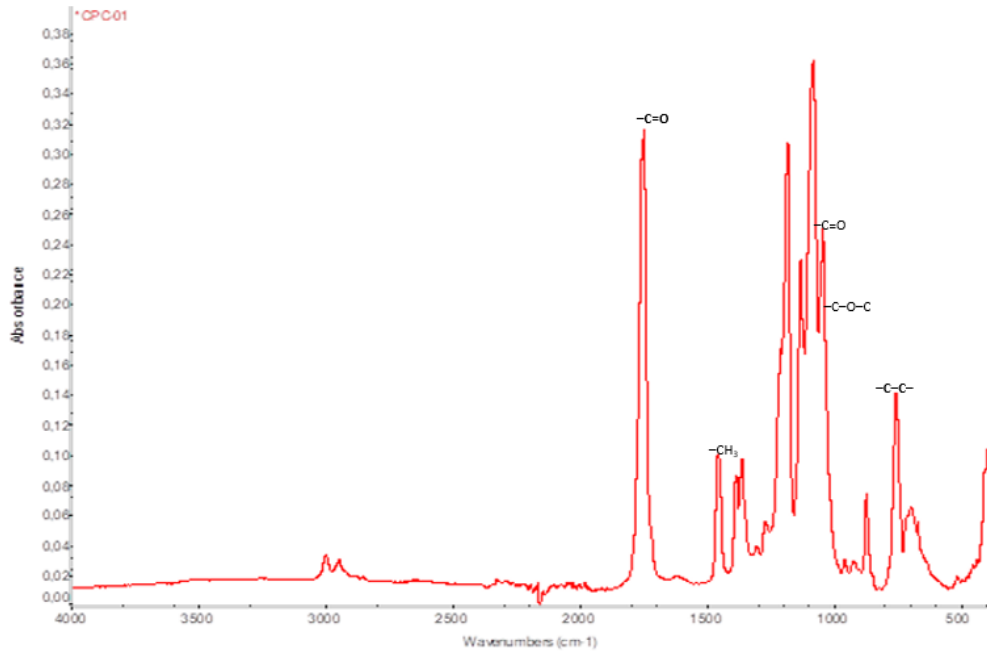
Aşağıdaki analizde değiştirilmemiş CF'nin FTIR spektrumlarını görülmektedir. 721, 1378, 1459, 1626, 2852, 2923 ve 3428  $\text{cm}^{-1}$ 'de birkaç farklı absorpsiyon tepe noktası vardır. Bu piklerden 721  $\text{cm}^{-1}$ 'deki tepe metilenin (-CH<sub>2</sub>-) bükülme titreşimlerine, 1378 ve 1459  $\text{cm}^{-1}$ 'deki tepeler ise sırasıyla CH<sub>3</sub> gruplarının ve CH bağlarının bükülme titreşimlerine ve 2852 ve 2923  $\text{cm}^{-1}$ 'deki tepeler, CH bağlarının germe titreşimleridir. 1626  $\text{cm}^{-1}$ 'deki pikler, C=C veya C=N gruplarının germe titreşimlerine; 3428  $\text{cm}^{-1}$ 'deki tepe noktası, OH gruplarının germe titreşimlerine

aittir. Bu sonuçlar, CF yüzeylerine bazı polar grupların eklendiğini ve CF'nin bir boyutlandırma maddesi ile muameleden sonra hidrofilik hale geldiğini göstermektedir.

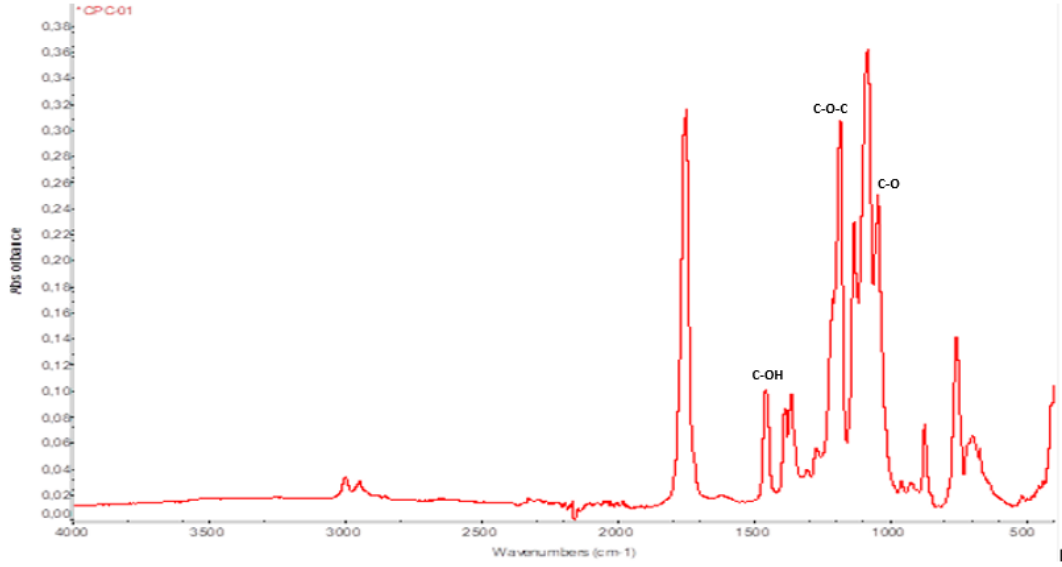
PLA'nın FTIR spektrumları görüntülendi. PLA için  $\text{-C=O}$  germe ( $1720 \text{ cm}^{-1}$ ),  $\text{-CH}_3$  büküm ( $1452 \text{ cm}^{-1}$ ),  $\text{-C=O}$  büküm ( $1270 \text{ cm}^{-1}$ ),  $\text{-C-O-C}$  germe ( $1185 \text{ cm}^{-1}$ ),  $\text{-C-O-}$  germe ( $1130$  ve  $1088 \text{ cm}^{-1}$ ), OH bükme ( $1046 \text{ cm}^{-1}$ ) ve  $\text{-C-C-}$  şekilsizliğe atfedilen esneme ve kristal fazlar (sırasıyla  $863$  ve  $758 \text{ cm}^{-1}$ ) olarak görülmüştür.

Polimer malzemelerin bozunma, polimerizasyon gibi kimyasal reaksiyonlarla sahip olduğu özellikleri değiştiğinde ya da kimyasal bağlar oluşturulduğunda FTIR-ATR'de yeni bant oluşumu veya kimyasal kaymalar beklenir.

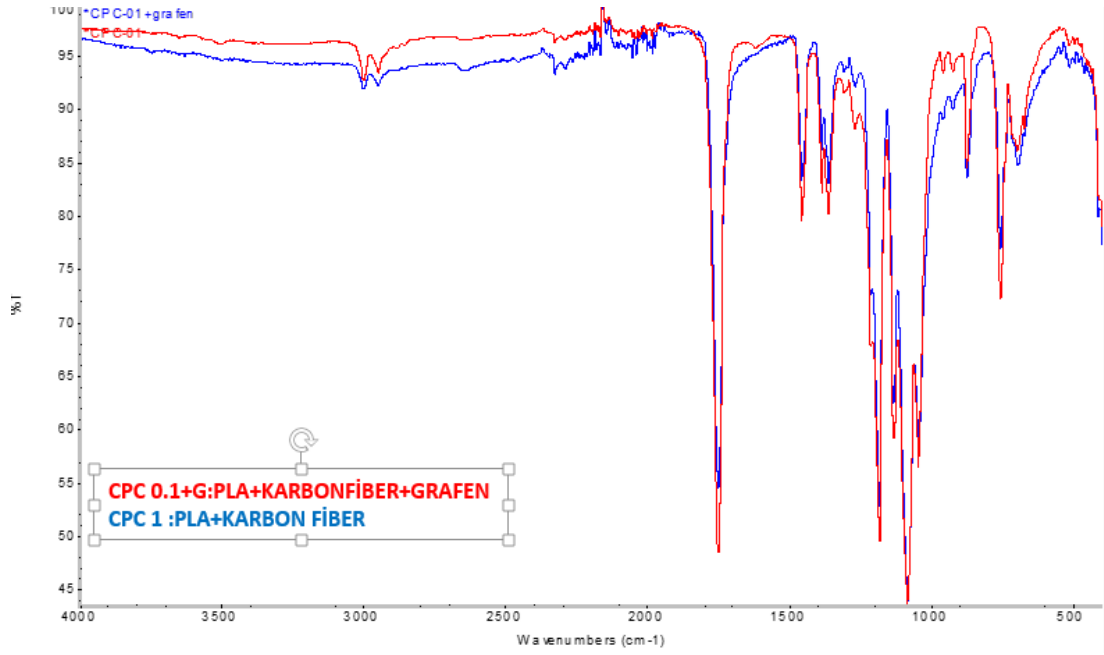
GO (grafen oksit)'a dair,  $1066 \text{ cm}^{-1}$  seviyesindeki pikin C-O gerilmesine ait olduğu,  $1288 \text{ cm}^{-1}$  seviyesindeki pikin C-O-C gerilmesine ve  $1587 \text{ cm}^{-1}$  seviyesindeki pikin C-OH gerilmesine ait olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 grafikleri incelendiğinde grafiklerde pik seviyelerinin çok yakın olduğu görülmektedir. PLA matrisli karbon fiber takviyeli kompozit malzemeye grafen ilavesi grafiklerdeki pik seviyelerinde değişikliğe sebep olmamıştır.



Şekil 5.6: 0.1 gram karbon fiber içeren PLA' nın numunenin FTIR analizi



Şekil 5.7: 0.1 gram karbon fiber içeren ve 0.1 gram grafen ilavesi yapılan numunenin FTIR analizi

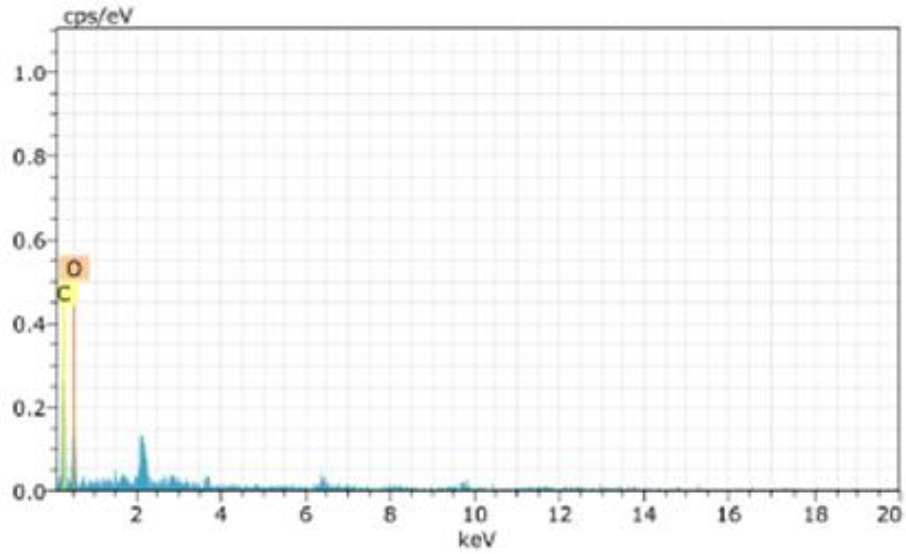
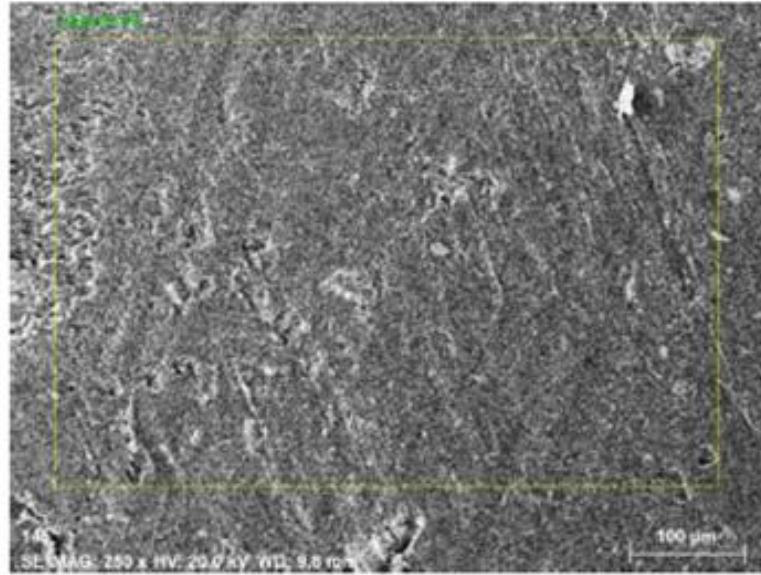


Şekil 5.8: CPC ve CPC+G numunelerinin FTIR analizi

Şekil 5.8' de ise CPC ve CPC+G numunelere yapılan FTIR analizlerinin karşılaştırma grafiği görülmektedir.

### 5.3 Biyokompozitlerde EDS Analizi

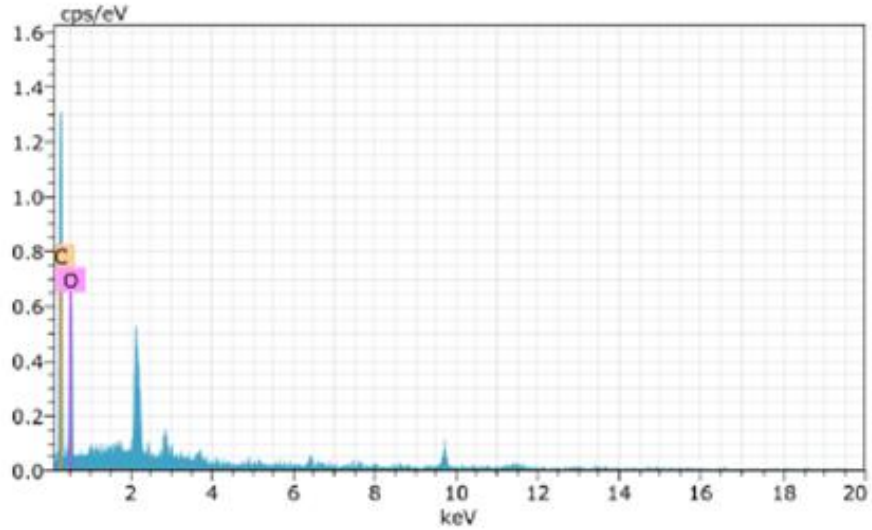
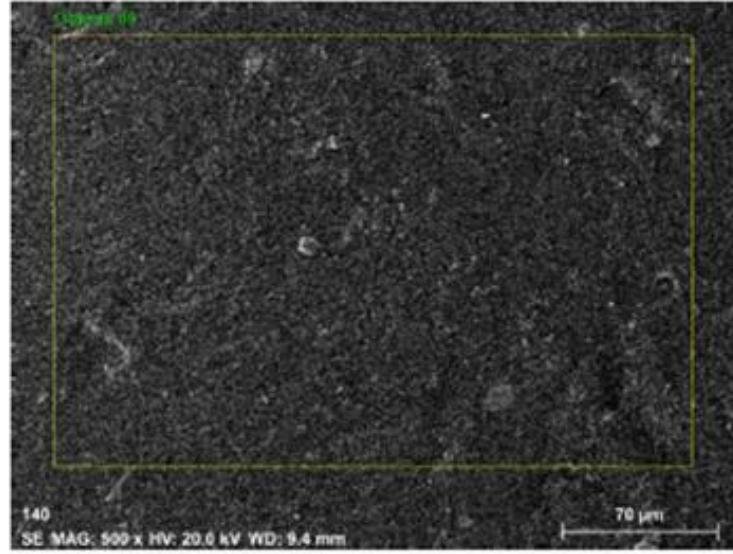
Yapılan EDS analizinde yüzeyde bulunan elementler görülmüştür. Yapıda yüzdece fazla orana sahip olan element karbondur. CPC ( 0.1) kodu verilen numunede iç yapı içerisinde % 54.11 karbon atomu ve % 45.89 O<sub>2</sub> olduğu görülmüştür. Yapılmış olan bu yüksek lisans tez çalışmasında laboratuvar ortamında üretilen malzeme iletken olmadığı için elektron ışını tarafından taranırken şarj olmaya (yük birikmesi) eğilimli olduğu için numune altın ile kaplanmıştır. Şekil 5.9'da verilen EDS analiz grafiğindeki sarı pikler numune yüzeyindeki altın sebebiyle oluşmuştur.



Spectrum: Objects 89

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	54.11	54.11	61.10	18.89
O	8	K-series	45.89	45.89	38.90	20.73
Total:			100.00	100.00	100.00	

Şekil 5.9: 0.1 gram karbon fiber ve 0.1 gram grafen içeren numunenin EDS analizi



Spectrum: Objects 89

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	51.11	51.11	58.20	10.73
O	8	K-series	48.89	48.89	41.80	11.75
Total:			100.00	100.00	100.00	

Şekil 5.10: 0.1 gram karbon fiber içeren numunenin EDS analizi

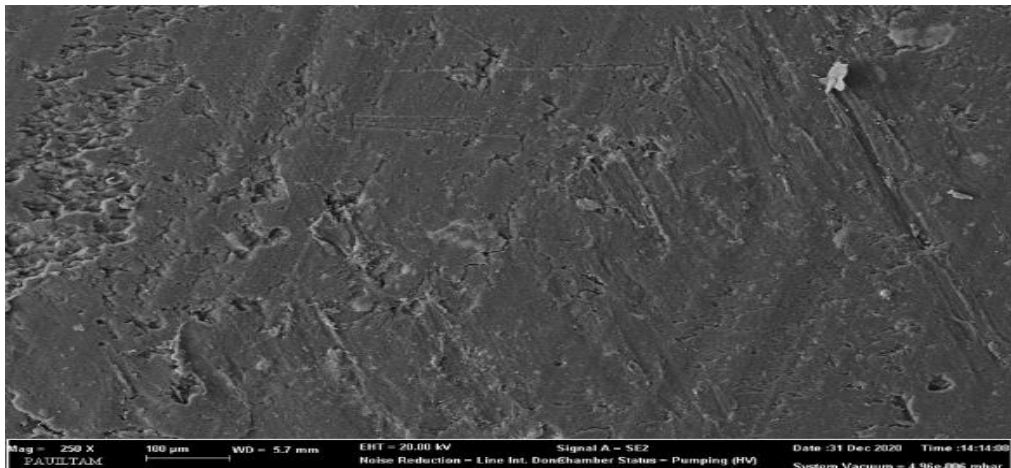


Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 da verilen grafiklere bakıldığında PLA matrsli karbon fiber takviyeli kompozit malzemeye grafen ilave edilmesi grafikte verilen piklerde değışikliğe sebep olmamıştır. Kompozit malzeme içerisinde yaygın olarak karbon (C) ve oksijenin (O<sub>2</sub>) yer aldığı görülmektedir.

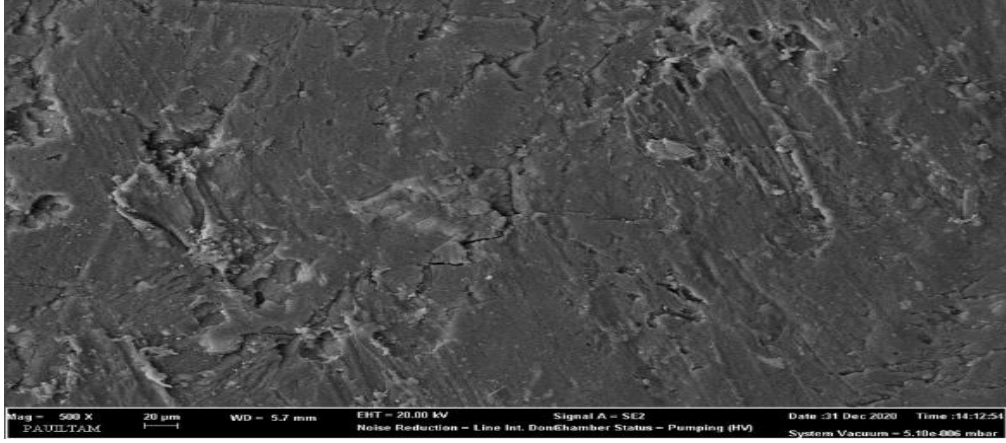
#### 5.4 FESEM Analizi Sonuçları

Karbon fiber takviyeli PLA ve yine karbon fiber takviyeli grafen nano katkısı içeren kompozitlerin morfolojik özelliklerinin incelenmesi Pamukkale Üniversitesi İleri Araştırma Merkezinde bulunan Gemini 300 model sem cihazı ile gerçekleştirildi. Analiz numunenin çekme testi sonucu oluşan kopma yüzeyinden gerçekleştirilmiştir. İncelemeden önce numunelerin yüzeyleri altın ve paladyum ile kaplanmıştır.

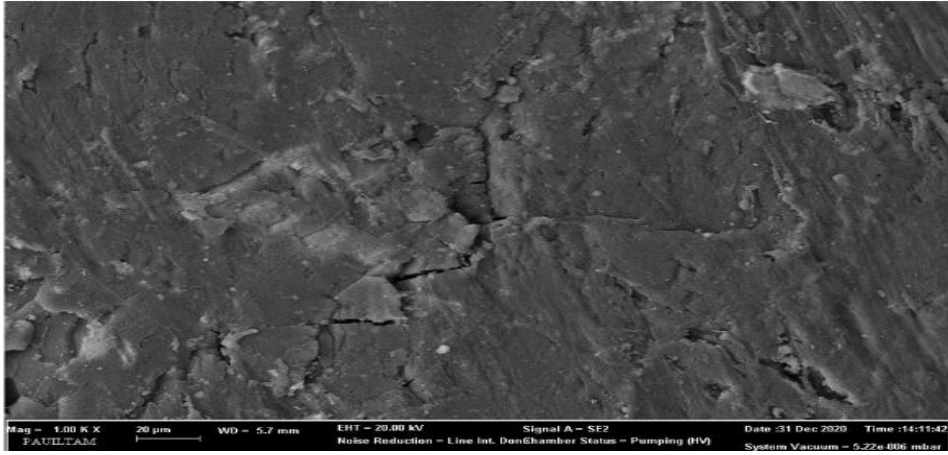
Şekil 5.11, 5.12, 5.13 ve 5.14’de sırasıyla PLA+Karbon Fiber+Grafen (cpc=g=0,1) kompozitlerin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, PLA + CF + GO numunesinde grafenin eklenmesiyle karbon fiber matrise tam tutunamamıştır. Bu durum mekanik özelliklerin daha düşük olmasına sebebiyet vermiş olabilir.



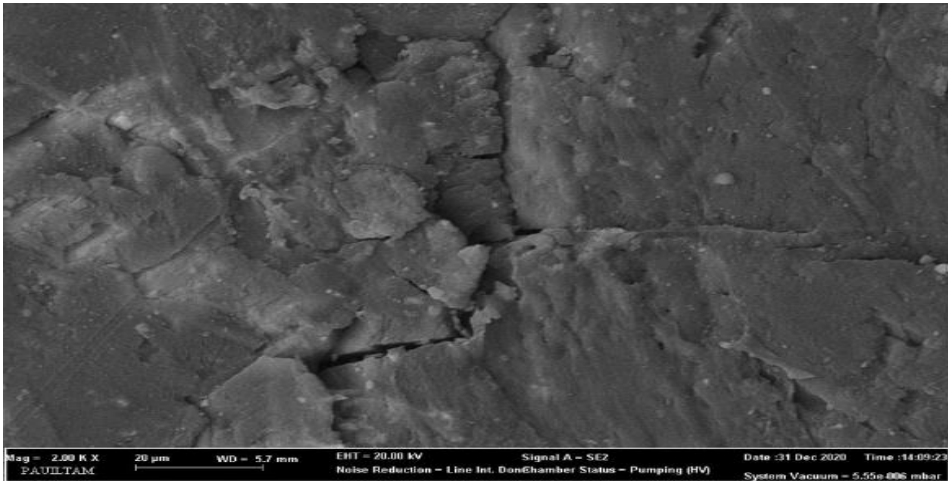
Şekil 5.11:PLA+Karbon Fiber+Grafen (cpc=g=0,1) 250X ait FESEM görüntüsü



Şekil 5.12: PLA+Karbon Fiber+Grafen (cpc=g=0,1) 500X ait FESEM görüntüsü



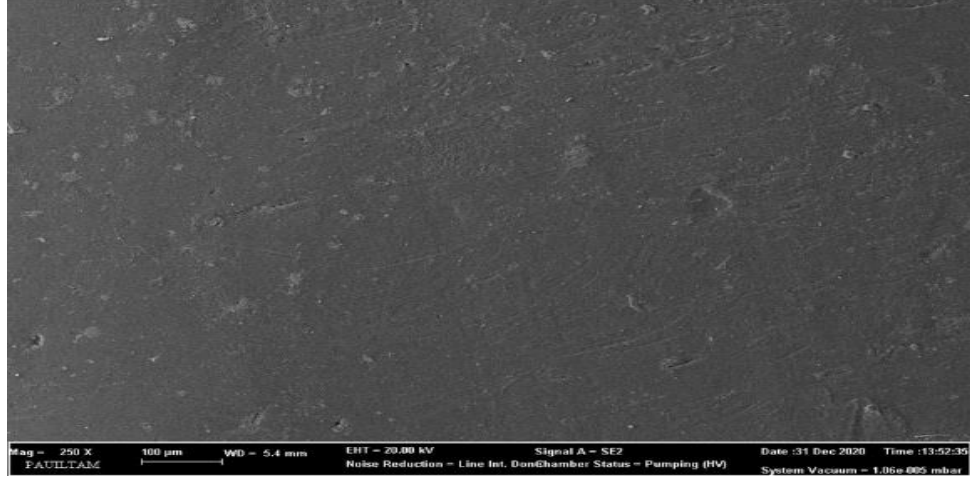
Şekil 5.13: PLA+Karbon Fiber+Grafen (cpc=g=0,1) 1.00K X ait FESEM görüntüsü



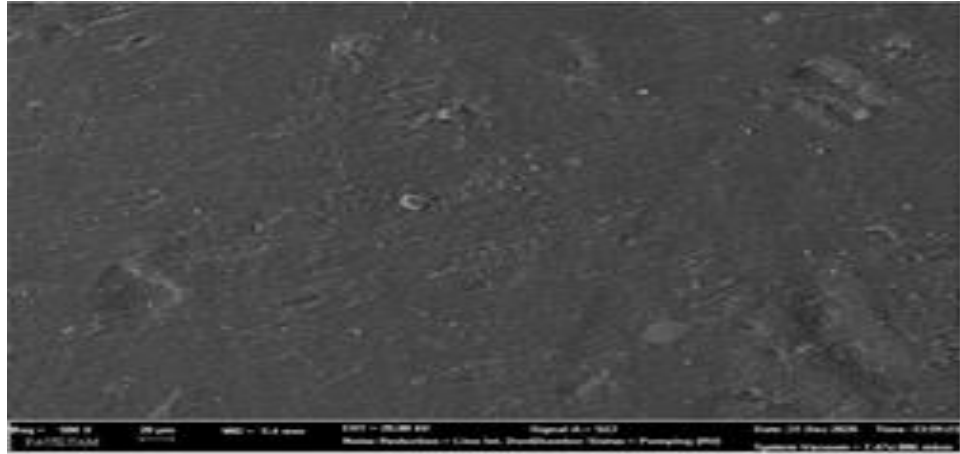
Şekil 5.14: PLA+Karbon Fiber+Grafen (cpc=g=0,1) ait FESEM görüntüsü

Şekil 5.15, 5.16, 5.17 ve Şekil 5.18'deki SEM görüntüleri incelendiğinde, PLA+Karbon Fiber numunesinde karbon fiber ile PLA matris arasında oluşan

arayüzey ve liflerin dağılımı diğer numunelere göre (PLA+Karbon+Grafen) daha homojen ve kararlı olduğu söylenebilir. Morfolojik yapılar incelendiğinde 250X, 500X, 100KX ve 200KX büyütmede yapının oldukça homojen dağıldığı söylenebilir.

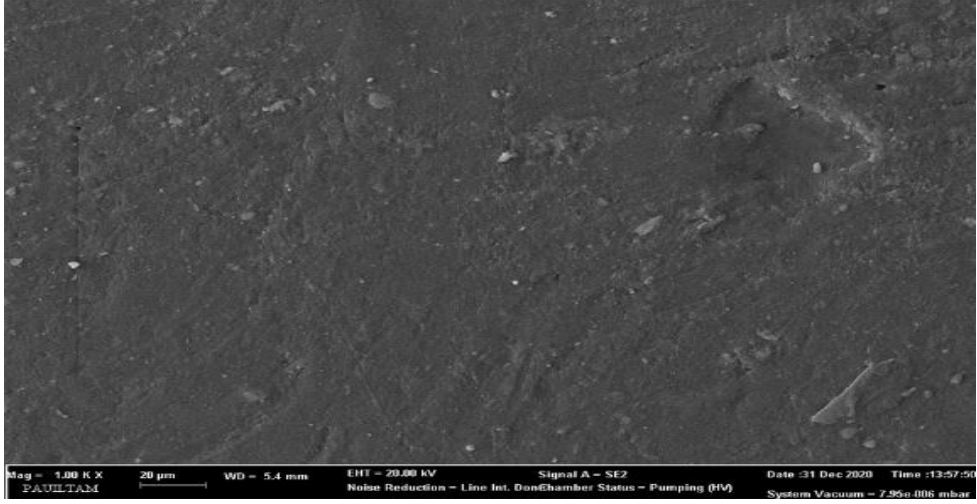


Şekil 5.15: PLA+Karbon Fiber (cpc=0,1) 250X ait FESEM görüntüsü

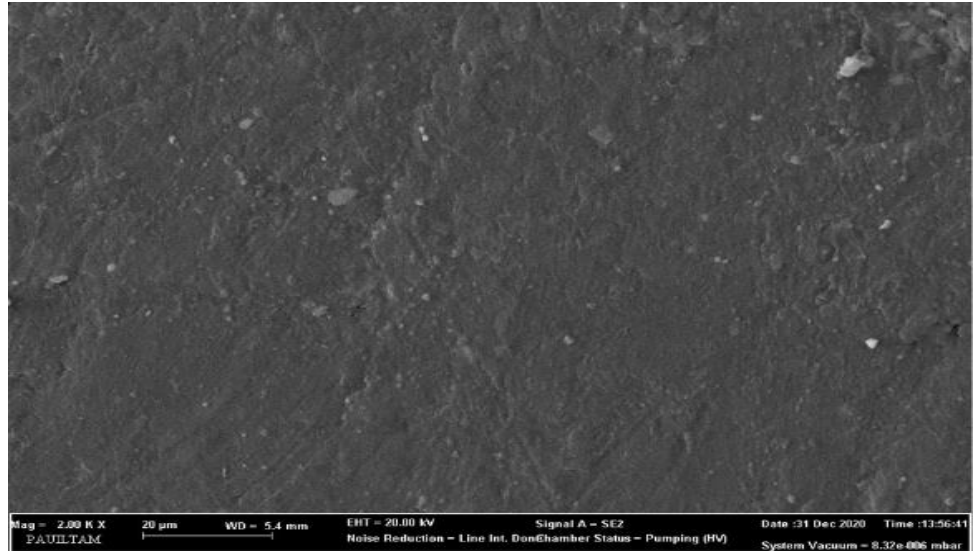


Şekil 5.16: PLA+Karbon Fiber (cpc=0,1) 500X ait FESEM görüntüsü

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri yapıdaki fiber dağılımlarını, fiberlerin geometrisini, fiber-matris arayüzeyini ve matrisin kırılırken gösterdiği davranışı belirlemek amacıyla kullanılır. PLA+Karbon Fiber (cpc=0,1) her büyütmede aynı oranda homojen bir dağılıma göstermiştir. PLA ve karbon fiber arasında mükemmel bir ara yüzey uyumu vardır.



Şekil 5.17: PLA+Karbon Fiber (cpc=0,1) 1.00K ait FESEM görüntüsü



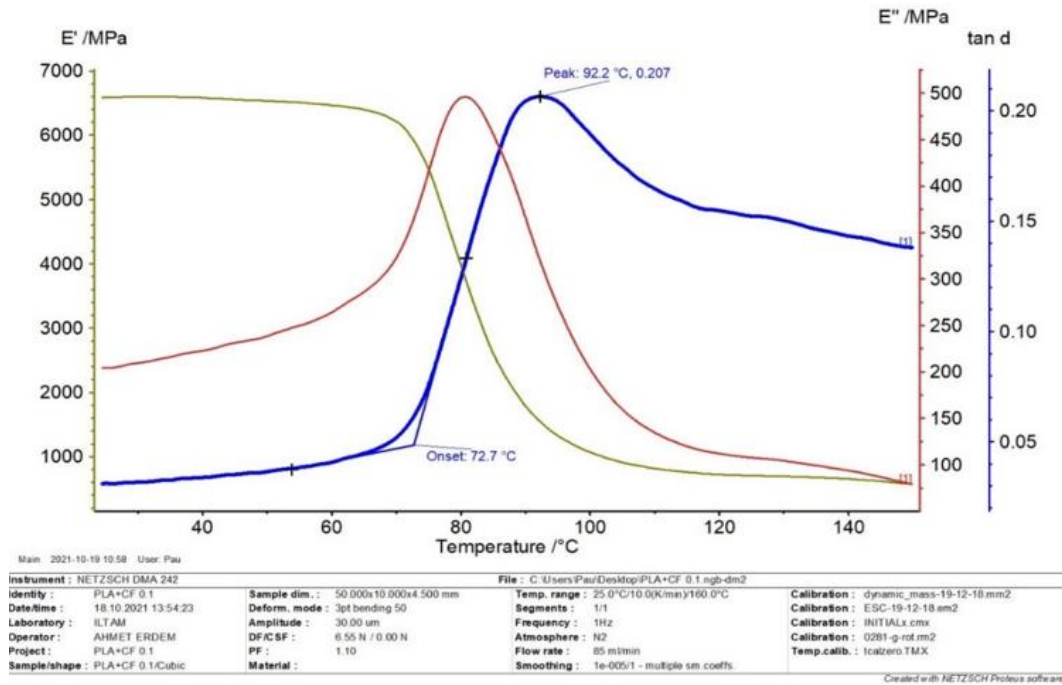
Şekil 5.18: PLA+Karbon Fiber (cpc=0,1) 2.00K X ait FESEM görüntüsü

## 5.5 Dinamik Mekanik Analiz Sonuçları

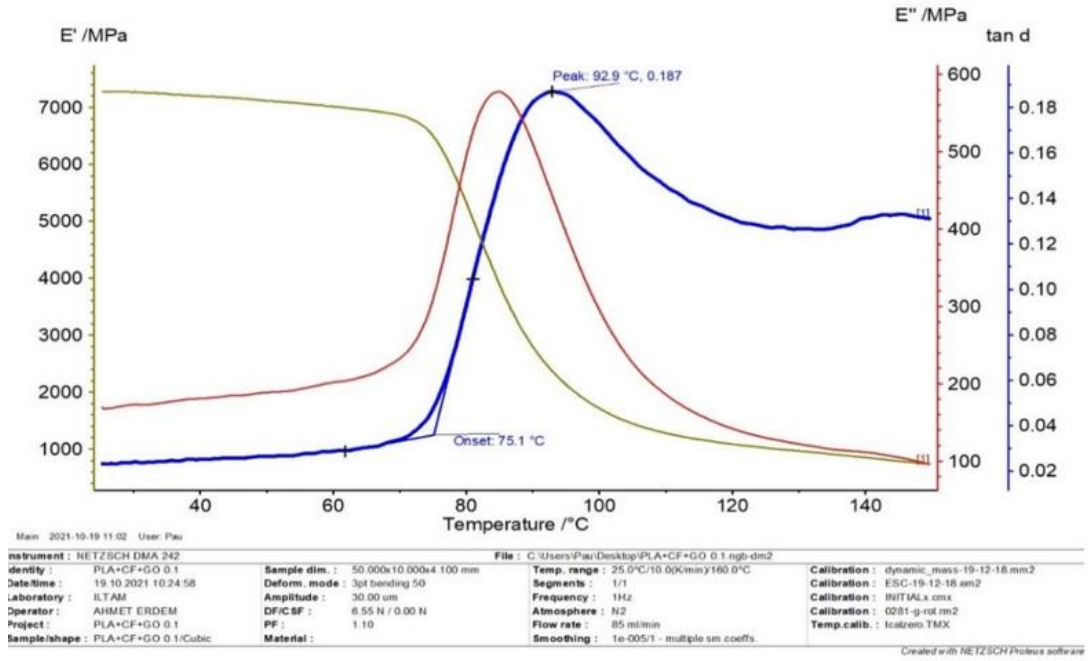
DMA testleri gerilim modunda belirlenen bir frekansta artıp azalan yük motoru kullanarak malzemelerin viskoelastik özelliklerini ölçmek ve elastik-viskoz modül değerleri ile malzemenin mekanik özellikleri ve Tg değerlerinin edinilmesi için yapılmıştır. Bir malzeme üzerine yük uygulandığında, deformasyon oluşur. Eğer malzeme ideal elastik malzeme ise, yük kaldırıldığında deformasyon ortadan kalkar. Fakat bazı malzemelerde, örneğin polimerlerde, deformasyon doğrusal değildir ve gecikmeli gerçekleşir. Elastik davranışın zıttı viskoz davranıştır. İdeal viskoz bir malzemede deformasyon hızı yük ile doğru orantılıdır. Polimer bazı malzemeler gibi ,

hem elastik hem de viskoz davranış gösterdikleri için bu tür malzemelerin viskoelastik özelliklerini görmek adına DMA analizine başvurulur. Yapılan bu tez çalışmasında üretilmiş olan kompozit malzemenin viskoelastik özelliklerini ve camsı geçiş sıcaklığını görmek için DMA yapılmıştır.

Şekil 5.19 ve Şekil 5.20 bakıldığında Tan(d)'nin ilk pik yaptığı sıcaklık camsı geçiş sıcaklığının çok yakın değerler olduğu görülmektedir. PLA matrisli karbon fiber takviyeli kompozite grafen ilave edilmesi malzemede Depolama modülü (E) Sönümlenme Modülü (Tan(d)) ve Kayıp Modülü (E'') gibi değerlerinde bir değişikliğe sebep olmamıştır.



Şekil 5.19: PLA matrisli 0.1 gram karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin DMA grafiği



Şekil 5.20: PLA matrisli 0.1 gram karbon fiber takviyeli ve 0.1 gram grafen katkı maddesi eklenmiş kompozit malzemenin DMA grafiği

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasında matris malzeme olarak PLA takviye elemanı olarak karbon fiber ve nano katkı olarak grafen tercih edilmiştir. Matris malzemesi olarak PLA 'nın tercih edilmesinin sebebi diğer termoplastik malzemelere göre daha üstün mekanik özelliklere sahip olmasıdır. Literatür taraması yapıldığında tampon gibi darbeye maruz kalan birçok otomotiv parçasında polimer matrisli kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Tez çalışması kapsamında karbon fiber ve grafen takviyeli PLA biyokompozitlerine ait özellikler incelenmiştir. PLA içerisine 4 farklı oranda karbon fiber takviyesi yapılmıştır. İlk olarak mekanik özellikleri görmek için 4 farklı orana sahip numunelere çekme testi yapılmıştır. Yapılan çekme testi sonucunda 4 farklı oranda karbon fiber ilavesi yapılmasına rağmen her oranda birbirine yakın mukavemet değerleri görülmüştür. Karbon fiber oranı arttıkça mukavemet değerinin artacağı düşünülmüştür ama değerler birbirine yakın çıkmıştır. Sadece karbon fiber oranı arttıkça yüzde uzamada düşme görülmüştür. 4 farklı oranda en düşük karbon fiber oranına sahip olan numuneye grafen ilave edilmiştir. En düşük orana karbon fiber ilave edilmesinin sebebi grafenin mukavemeti ne derecede etkileyeceğini görmektir. Yapılan grafen ilavesiyle malzemenin mukavemeti bir miktar artmış ama yüzde uzama değeri düşmüştür.

Temin edilen granül halindeki PLA kloroform yardımıyla çözdürülmüş ve jel hale gelince içerisine karbon fiber eklenmiştir. Sıvı haldeki PLA karbon fiber karışımı atmosfer ortamında katılaşmaya bırakıldığı için içerisine oksijen girmiştir. Yapı içerisine yerleşen oksijenin mukavemeti düşürdüğü düşünülmektedir. Ayrıca granül halde satın alınan PLA' da boyutlandırma, ekstrüzyon, gibi birçok ısıl ve mekanik işlemlere maruz kaldığı için beklenen mukavemeti sağlayamadığı düşünülmektedir. Bütün bunların sonucu olarak da mekanik özellikler negatif etkilenmiştir. Sonraki dönemlerde yapılacak çalışmalarda polimer malzemeler toz şeklinde temin edilirse kloroform ile çözdürme işlemi atlandığında yapıya girecek olan oksijenin engelleneceği düşünülmektedir. Bunun sonucu olarak da mukavemet artışı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca sıcak presleme esnasında biyokompozit oluşturulmasında

daha az gözenek (boşluk) oluşumu için biyokompozit granülleri yerine biyokompozit toz halde kullanıldığında yine mukavemet arışı olacağı düşünülmektedir.

Jel haldeki PLA ve karbon fiber karışımı atmosfer ortamında soğumaya bırakıldıktan sonra katılaştırılıp ardından kesilip küçük parçalar halinde kalıba alınıp ısıtıl işlem fırınına atılmıştır. Bu işlemde de homojen bir şekilde erime değil de kalıp içerisinde katman şeklinde bir dağılma görülmüştür. Bunun sonucu olarak da kalıptan çıkan çekme numunesi tam homojen karışmış ve pürüzsüz yüzeyde değildir. Sonraki çalışmalarda farklı yöntemlerle PLA ve karbon fiberin karışımı sağlanabilirse daha iyi sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir.

Kompozitlerin maliyetlerinin saf malzemelere kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Maliyetlerin yükselmesinin sebebi uyumlaştırıcı kimyasal malzemenin pahalı olmasıdır. Daha ucuz uyumlaştırıcılar kullanılarak maliyet düşürülebilir.



## 7. KAYNAKLAR

Ahmed, S. ve Patil, G., “Bumper Shape Optimization for Pedestrian Safety”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3: 1724-1732. (2013).

Ashton, J.E., Halpin, J. C. ve Petit, P. H., “Primer on Composite Material: Analysis, Technomic Publishing Co. Inc.” Westport, (1969).

Auras R., Selke S., Harte B., “Polylactides a new era of biodegradable polymers for packaging application, Annual Technical Conference”, USA, 1-10, (2005).

Averous L., “Biodegradable Multiphase Systems Based on Plasticized Starch: A Review, *Journal of Macromolecular Science*”, C4(3), 231 – 274, (2004).

Averous L., Kalia S., “Biopolymers: biomedical and environmental applications, John Wiley, Scrivener Publishing”, USA, 13-39, (2011).

Averous, L., “Synthesis, Properties, Environmental and Biomedical Applications of Poly(lactic acid), Handbook of Biopolymers and biodegradable plastics”, USA, 109-128, (2013).

Bao, L., Dorgan, J.R., Knauss, D., Hait, S., Oliveira, N.S., Maruccho, I.M., “Gas Permeation Properties of Poly(lactic acid) Revisited, *Journal of Membrane Science*”, 285, 166–172, (2006).

Barut, C., “Aramid esaslı kompozit malzemelerin balistik performanslarının ve mekanik davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 5-34, (2015).

Bastioli, C., “Handbook of Biodegradable Polymers”, 183-209, (2005).

Beg, M.D.H., Pickering, K.L., Ahmed, I. ve Hassan, Z., “Recycling of Thermoplastic Composites: Quality and Durability”, *International Conference on Mechanical Engineering*, 26-28 December 2009, Dhaka. (2009).

Belingardi, G., Koricho, E.G. ve Martorana, B., “Design Optimization and Implementation of Composite and Recyclable Thermoplastic Materials for Automotive Bumper”, *ACOMEN 2011 - International Conference on Advanced Computational Methods in Engineering*, 14-17 November 2011, Liege. (2011).

Benninnga, H., “A History of Lactic Acid Making, Kluwer Academic Publishing”, Boston, (1990).

Biron M., “Thermoplastics and Thermoplastic Composites, 1st ed.”, Elsevier Ltd., Amsterdam, (2007).

Chawla, K.K., "Composite Materials Science and Engineering, Third Edition" *Springer*, New York, USA, 11-140, (2011).

Chung, D.L., "Composite Materials Science and Materials, Second edition", *Springer*, New York, 14-21, 25-26, (2010).

Deniz, M.E., "Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıtılma işlemle presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarım ve imalatı", Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, 4, 32-47, (2005).

Gay, D., Hoa, S. V. and Tsai, S.W., "Composite materials design and applications, 4th ed.", *CRC Press*, New York, 15-20, 151, 168, 187-209, (2003).

Hartmann, H., "High molecular weight polylactic acid polymers, in Biopolymers from Renewable Resources", Berlin, 367 – 411, (1998).

Henton, D.E., Gruber, P., Lunt, J., Randall J., "Polylactic acid thecnology, İnançer, G., "Farklı takviye malzemeli plastik kompozitlerin darbe davranışına çevrenin etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 13-25, (2015).

İnançer, G., "Farklı takviye malzemeli plastik kompozitlerin darbe davranışına çevrenin etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 13-25, (2015).

Jain, R.A., "The manufacturing techniques of various drug loaded biodegradable poly(lactide-coglycolide) (PLGA) devices, *Biomaterials*", 21, 90-2475, (2000).

Jones, R.M., "Mechanics of Composite Materials, Second Edition", *Taylor&Francis Group*, Virginia, (1999).

Joshia S.V., Drzal L.T., Mohanty A.K. ve Arora S. "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?", *Composites Part A: applied science and manufacturing*", 35:371-376, (2004).

Karlı, M., "Hafif silahlar için polimer kompozit malzeme seçimi", Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 17-25, (2016).

Keskin, M., "Naylon 6.6 Nanoelyaf ile Takviye Edilmiş Epoksi Nano Kompozitlerin Üretimi ve Dinamik Mekanik Analizi (DMA)", Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2019).

Li, Y., *Biodegradable Poly(lactic acid) Nanocomposites: Synthesis and Characterization (Doktora Tezi)*, Kansas State University, Kansas, Michigan, 527-569, (2011).

Mazumdar, S. K., "Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering", *CRC Press*, London, 23-51, (2002).

Najafi, S.K., “Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review”, *Waste Management*, 1-8, (2013).

Özer, H., “Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 10-37, (2015).

Petersson, L., Oksman, K., “Biopolymer Based Nanocomposites: Comparing Layered Silicates and Microcrystalline Cellulose As Nanoreinforcement Composites, *Science and Technology*”, 66, 2187–2196, (2006).

Reddy, G., Altaf, M., Naveena, B.J., Venkateshwar, M., Kumar, E.V., “Amylolytic bacterial lactic acid fermentation-A review”, *Biotechnology Advances*, 26, 22–34, (2008).

S. T. Peters, “Handbook of Composites, Second Edition, Process Research”, Mountain View, California, (1998).

Sinclair, R. G., “The Case for Polylactic Acid as a Commodity Packaging Plastic”. *Journal of Macromolecular Science-Pure and Applied Chemistry*, 33(5), 585-597, (1996).

Smith, R., “Biodegradable polymers for industrial applications”, London, (2005).

Tektemur E., “Poli(Laktik Asit) Üretimine İşletme Parametrelerinin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2011).

Tsai, S.W. ve Hahn, H. T., “Introduction to Composite Materials, Technomic Publishing Co., Inc.”, Westport, (1980).

Türkmen, İ., “Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 6-9, 23-24, (2012).

Xiao, L., Wang, B., Yang, G., Gauthier, M., “Poly (Lactic Acid)-Based Biomaterials: Synthesis, Modification and Applications”, *Biomedical Science, Engineering and Technology*, 3502, (2012).

Yaşar, İ. ve Arslan, F., “Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozitlerde Elyaf Hacim Oranı ve Elyaf Doğrultusunun Tribolojik Özelliklere Etkisi”, *Tübitak*, 24: 181-191, (2000).

Yıldızhan, H., “Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek lisans tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta , 5-6, (2008).