

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GERİ DÖNÜŞMÜŞ TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN OTOMOTİV
ENDÜSTRİSİNDE UYGULAMASI**

ALİ RIFAT ÜNAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET ÜNAL**

İSTANBUL, 2013

Termoplastik matrisli kompozitler son on yılda kullanımı yaygınlaşmış yeni nesil kompozitlerdir. Özellikle enerji, havacılık ve otomotiv uygulamalarında gittikçe yaygınlaşan kullanım alanı bulmaktadır. Diğer taraftan, çevre dostu olmamalarından dolayı kompozitlerin geri dönüşümü her zaman sorun olmuştur. Buradan hareketle geri dönüşüm 21. Yy'da öncelikli alanlar konusunda yer aldığından, termoplastik matrisli kompozitlerin geri dönüşümü ve otomotiv endüstrisinde uygulaması doğrudan cazip bir konu haline gelmiştir. Söz konusu temel iki nedenden hareketle tamamı laboratuvar çalışması olan bu tez yapılmıştır.

Çalışmalarda konunun teorik kısımları öncelikle incelenmiş ve daha sonra deneysel uygulamalara geçilmiştir. Bu amaçla altyapı oluşturulması sağlanmıştır. Birinci aşamada çift vidalı ekstrüderin kurulumu yapılmış, proses koşulları optimize edilmiştir. Daha sonra orijinal ve geri dönüşüm prosesleri yapılmıştır. YTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında numune üretimi ve karakterizasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada bölümümüzün tüm çalışanlarından ve laboratuvar olanaklarından büyük ölçüde yararlanılmıştır.

Dört yarıyılık yüksek lisans eğitiminin son üç yarıyılını bu çalışmanın deneysel kısımlarına harcadım. Gerek bazı cihazların sağlanması, gerekse kurulumunda kendi çapımda görevler üstlendim. Deneyler özellikle yoğun geçen, uzun çalışmalar sonucu gerçekleştirilmiştir. Deney malzemelerinin temininde üniversitemizin altyapısından büyük ölçüde yararlandım. Bu aşamada ve karakterizasyon deneylerinin yapılmasında bana yardımcı olan Arş. Gör. Aylin BEKEM hocama öncelikle teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Diğer taraftan, bölümümüz çalışanlarının da iyi niyetleri ve yardımseverliklerini burada belirtmek isterim. SEM görüntülerinin alınmasında bana yardımcı olan, lisans eğitimimde de büyük emekleri geçen KOÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı, hocam Prof. Dr. Muzaffer ZEREN'e ayrıca şükranlarımı belirtmek isterim. Son olarak da tüm eğitim hayatım boyunca yanımda olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2013

Ali Rifat ÜNAL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖZET	xv
ABSTRACT.....	xix
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
KOMPOZİT MALZEMELER	4
2.1 Matris Türüne Göre Kompozit Malzemeler	7
2.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)	7
2.1.2 Metal Matrisli Kompozitler (PMK)	7
2.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler (SMK).....	8
2.2 Destek Tütüne Göre Kompozitler	8
2.3 Sandwich Yapılı Kompozitler	9
BÖLÜM 3	
POLİMER MATRİS VE FİBER MALZEMELERİ	11
3.1 Matris Malzemeleri	11
3.1.1 Termoset Matrisler	11
3.1.2 Termoplastik Matrisler	13
3.1.2.1 Poliolefinler	14

3.1.2.2 Poliolefin Türleri.....	16
3.2 Fiber Malzemeleri	20
3.2.1 Cam Fiberler.....	21
3.2.1.1 Cam Fiber Kompozisyonları	21
3.2.1.2 Cam Fiber Türleri	22
3.2.2 Karbon Fiberler	24
3.2.3 Aramid Fiberler	29
3.2.4 Bazalt Fiberler	30
3.3 Kompozit Malzeme Mikromekanığı.....	32
BÖLÜM 4	
PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ	36
4.1 Kompozitlerin Geri Dönüşümündeki Termal Yöntemler	37
4.1.1 Kompozitlerin Akışkan Yataklı Geri Dönüşüm Prosesi.....	38
4.1.2 Kompozitlerin Geri Dönüşümünde Piroliz	42
4.1.2.1 Piroliz Reaksiyonları	43
4.1.2.2 Polimer Matrisli Kompozitler için Piroliz Koşulları.....	43
4.1.2.3 Piroliz Ürünlerinin Çevreye Etkisi.....	44
4.2 Kompozit Malzemeleri Geri Dönüştürmede Mekanik Yöntemler	45
4.2.1 Atık Polimerlerin Yapısı	47
4.2.2 Atık Plastikleri Sınıflandırma	50
4.2.3 Plastik Atıkları Hazırlama (Ayrıştırma ve Prosese Uygun Hale Getirme)	50
4.2.3.1 Atık Toplama	51
4.2.3.2 Atık Malzemeleri Ayırma	51
4.2.3.3 Boyut Küçültme ve Öğütme	54
4.2.3.4 Atık Yıkama	55
4.2.3.5 Küçük Parçacıklı Plastik Atıkların Ayrıştırılması	56
4.2.3.6 Atık Kompozit Partiküllerini Kullanılabilir Boyuta Getirme.....	61
BÖLÜM 5	
TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN OTOMOTİV UYGULAMALARI	64
5.1 Termoplastiklerin Otomotiv Endüstrisindeki Önemi	65
5.2 Orjinal Termoplastik Matrisli Kompozit Kullanımı	67
5.3 Geri Dönüşmüş Termoplastik Matrisli Kompozit Kullanımı	69
BÖLÜM 6	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	73
6.1 Kullanılan Malzemeler	73
6.2 Granül İmalatı	74
6.3 Plakaların Hazırlanması	76
6.4 Plakaların Kodlanması	79
6.5 Yapılan Deneyler	79
6.5.1 Çekme Deneyi	79
6.5.2 Eğme Deneyi	84

6.5.3 Darbe Deneyi	86
6.5.4 Kalsinasyon Deneyi	90
6.5.5 Yoğunluk Deneyi	92
6.5.6 MFR (Erime Akış Hızı) Deneyi.....	94
6.5.7 DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Deneyi	95
6.5.8 Elek Analizi	96
6.5.9 Kırılma Tokluğu (K_{1C}) Deneyi.....	97
6.5.10 UV Deneyleri	101
6.5.11 SEM Görüntüleri	103
 BÖLÜM 7	
DENEY SONUÇLARI (BULGULAR).....	104
7.1 Çekme Deneyi Sonuçları	104
7.2 Eğme Deneyi Sonuçları	108
7.3 Darbe Deneyi Sonuçları.....	110
7.4 Kalsinasyon Deneyi (Cam Hacim Oranı) Sonuçları.....	111
7.5 Yoğunluk Deneyi Sonuçları	112
7.6 MFR (Erime Akış Hızı) Deneyi Sonuçları.....	112
7.7 DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri) Deneyi Sonuçları	113
7.8 Elek Analizi Deneyi Sonuçları	114
7.9 Kırılma Tokluğu (K_{1C}) Deneyi Sonuçları	116
7.10 UV Deneyi Sonuçları.....	118
7.11 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri	122
 BÖLÜM 8	
SONUÇ VE ÖNERİLER	124
KAYNAKLAR.....	129
ÖZGEÇMİŞ.....	137

SİMGE LİSTESİ

°C	Derece Santigrad
A	Kesit alanı (mm ²)
a _{CN}	Darbe dayancı (kJ/m ²)
Al ₂ O ₃	Alüminyumoksit
b	Numune genişliği
B ₂ O	Boroksit
B ₂ O ₃	Bortrioksit
BaO	Baryumoksit
C	Karbon
CaO	Kalsiyumoksit
d	Fiber çapı
E	Elastiklik Modülü
E _c	Darbe enerjisi (J)
F	Kuvvet (N)
Fe ₂ O ₃	Demiroksit
G	Kayma Modülü
G _{1C}	Kırılma Enerjisi
h	Numune kalınlığı
K _{1C}	Kırılma Tokluğu
K ₂ O	Potasyumoksit
l	Numune uzunluğu
l/d	Fiber geometrik oranı
M	Ağırlık oranı (%)
M	Modül
m	Numune kütlesi (gr)
M _e	Eğme momenti
MgO	Magnezyumoksit
Na ₂ O	Sodyumoksit
SiC	Silisyumkarbür
SiO ₂	Silisyumdioksit
S _n	Elek üstünde kalan malzeme oranı (%)
V	Hacim oranı (%)
W	Elekte kalan malzeme ağırlığı (g)

W	Mukavemet momenti
Y	Yapıştırıcı ilave edilmiş
ϵ	Kopma uzaması, gerinim (%)
η_0	Fiber oryantasyon faktörü
η_l	Fiber boy faktörü
ν	Poisson oranı
ξ	Halpin-Tsai katsayısı
ρ	Yoğunluk (g/cm^3 , Mg/m^3)
σ	Dayanç (MPa)

KISALTMA LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	American Standard for Testing and Materials
BMC	Bulk Moulding Compound
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics
COD	Crack Opening Displacement
CTP	Cam Takviyeli Polimer
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EN	European Norm
EPFM	Elastic-Plastic Fracture Mechanics
FCC	Sıvı Katalizör Parçalanması
GD	Geri Dönüşmüş
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastics
HDPE	High-Density Polyethylene
HM	Yüksek Modül (High Modulus)
HM	Yüksek modüllü
HS	Yüksek Dayançlı
IM	Orta Modül (Intermediate Modulus)
ISO	International Organization for Standardization
KOÜ	Kocaeli Üniversitesi
LCD	Liquid-crystal-display
LDPE	Low-Density Polyethylene
LEFM	Linear-Elastic Fracture Mechanics
LLDPE	Linear Low-Density Polyethylene
LM	Düşük Modül (Low Modulus)
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MAH	Maleik Anhidrit
MDPE	Medium-Density Polyethylene
MFI	Melt-Flow Index
MFR	Melt-Flow Rate
MMK	Metal Matrisli Kompozit
NIR	Near Infrared
ORJ	Orijinal

PA	Poliamid
PAI	Poliamid İmid
PAN	Poliakrilonitril
PBT	Polibütilen Tereftalat
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PEEK	Polieter Eterketon
PEI	Polieter İmid
PES	Polieter Sülfon
PET	Polietilen Tereftalat
PEX	Çapraz bağlı Polietilen
PI	Poliimid
PLC	Programmable Logic Controller
PMK	Plastik Matrisli Kompozit
PP	Polipropilen
PPA	Polifital Amid
PPO	Polifenilen Oksit
PPS	Polifenilen Sülfid
PPS	Polifenilen Sülfid
PS	Polistiren
PSO	Polisülfon
PSU	Polisülfon
PVC	Polivinil klorür
SEM	Scanning Electron Microscope
SENB	Single-Edge-Notch Bending
SMC	Sheet Moulding Compound
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
TPU	Termoplastik Poliüretan
TS	Türk Standartları
UHMW	Ultra-High Molecular Weight
UV	Ultraviyole
VW	Volkswagen
YTÜ	Yıldız Teknik Üniversitesi
YYPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
Z-N	Ziegler-Natta

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Fiber veya fillerlerin şekline göre kompozit türleri a) Parçacık destekli kompozit, b) Yonga destekli kompozit, c) Fiber destekli kompozit 4
Şekil 2.2	Matris içerisinde olası fiber türleri a) Eş yönlü sürekli fiberler b) Eş yönlü süreksiz fiberler c) Gelişigüzel dağılmış süreksiz fiberler (Kırpık) 6
Şekil 2.3	Kompozit malzemelerin en genel biçimiyle gruplanması [1]..... 6
Şekil 2.4	Tabaka yapılı kompozitler a) Düz dolgulu, b) Balpeteği yapısı 9
Şekil 3.1	Karbon-Karbon çift bağı 14
Şekil 3.2	C-C atomlarının daha basit yapılara kırılması 15
Şekil 3.3	Poliolefin türleri 16
Şekil 3.4	Etilen merinden polietilen sentezi 17
Şekil 3.5	İzotaktik polipropilenin konfigürasyonu 19
Şekil 3.6	Sindiotaktik polipropilenin konfigürasyonu 19
Şekil 3.7	Bazı cam fiber türleri a) Dokuma, b) Keçe, c) Kırpık fiberler..... 24
Şekil 3.8	Karbon fiber türleri a) Sürekli fiber, b) Kırpık, c) Dokuma kumaş..... 28
Şekil 3.9	Fiberlere paralel (1) ve dik (2) yöndeki zorlamalar ve modelleri a) Voight, b) Resus..... 33
Şekil 4.1	Geri dönüşümün ekonomik modeli 36
Şekil 4.2	Termoset matrisli kompozitlerin geri dönüşüm yöntemleri..... 38
Şekil 4.3	Akışkan yataklı geri dönüşüm prosesi akış diyagramı [24] 38
Şekil 4.4	Akışkan yatakta geri dönüşüm [28] 39
Şekil 4.5	Geri dönüştürülmüş karbon fiberler [19] 39
Şekil 4.6	Geri dönüştürülmüş cam fiberlerin SEM görüntüsü [24] 40
Şekil 4.7	SMC yöntemiyle üretilmiş kompozit malzemeden elde edilen cam fiberlerin uzunluk dağılımı grafiği [24]..... 40
Şekil 4.8	Geri dönüştürülmüş karbon fiberlerin SEM görüntüsü [19]..... 41
Şekil 4.9	Kazanılmış fiberlerin olası kullanım yerleri [25]..... 42
Şekil 4.10	Polietilen 47
Şekil 4.11	Polietilen malzemenin nihai ürüne dönüşüm aşamaları 48
Şekil 4.12	Toplanan atıklardaki plastik maddelerin oranları [34] 49
Şekil 4.13	Polimer geri dönüşümündeki büyüme [13] 49
Şekil 4.14	Geri dönüşüm sembolleri [15] 50
Şekil 4.15	Mekanik geri dönüşüm akış şeması [29]..... 51
Şekil 4.16	El ile atık ayırma tesisinden bir görüntü [29]..... 52
Şekil 4.17	Atık ayırma akış şeması [13] 53

Şekil 4.18	Öğütücü bıçakları [29].....	54
Şekil 4.19	Öğütücü şematik görüntüsü [29]	55
Şekil 4.20	Flotasyon işlemi [29]	56
Şekil 4.21	Hidrosiklonun şematik görüntüsü [33]	58
Şekil 4.22	Triboelektriksel özellikler [13]	59
Şekil 4.23	Elektrostatik Ayırma [13]	60
Şekil 4.24	NIR kullanılarak yapılan bir çalışmada plastik sınıflandırılma oranları [13].	61
Şekil 4.25	Erema düzeneği [31]	62
Şekil 4.26	Ekstrüzyon prosesi [30].....	63
Şekil 4.27	Ekstrüzyon sayısı ile fiber boyundaki azalış [22].....	63
Şekil 5.1	Binek araçlarında kullanılan kompozit malzemelerin dağılımı [78].....	64
Şekil 5.2	Avrupa Birliğinde üretilen binek araçlarında termoplastik matrisli kompozitlerin kullanım yerleri [78]	67
Şekil 5.3	PP – E-Camından üretilmiş motor altı koruyucusu [78].....	67
Şekil 5.4	PE matrisli E-Camı fiberlerinden üretilmiş darbe emici tampon bağlantı parçası ve BMW 3 serisi araçlarındaki uygulaması [78]	68
Şekil 5.5	Toyota binek otomobilleri için Alüminyum ve termoplastik kompozitten imal edilmiş yağ karterleri	68
Şekil 5.6	Sırasıyla çelik, alüminyum alaşımı ve PP matrisli kompozitten üretilmiş yağ karterlerinin standart darbe (çarpma) deneyi sonuçları	69
Şekil 5.7	Renault otomobillerinde darbe alanında kullanılan geri dönüşmüş termoplastik matrisli kompozitlerden yapılan parçalar. 32 nolu parçalar öncelikli darbeye maruz elemanlardır.	69
Şekil 5.8	Otomobilden başlayarak hafif ticari araçlarda geri dönüşmüş termoplastik matrisli kompozit kullanım bölgeleri	70
Şekil 5.9	FIAT otomobillerinde ön tamponun darbe deneyi esaslarının şematik gösterilişi [78].....	70
Şekil 5.10	Honda otomobillerinde kompozit ön tampon	71
Şekil 5.11	Geri dönüştürülmüş Toyota Yaris tamponu	71
Şekil 5.12	a) Spor otomobil, b) Panelvanlarda önce 6 yaşında, sonra ise yetişkin bireylerde çarpışma modellemesi	72
Şekil 5.13	Toyota Yaris ön tamponu için a) sonlu elemanlar modellenmesi ve b) sonuçların çarpma testiyle doğrulanması.....	72
Şekil 6.1	Deneylerde kullanılan JY-52, konik çift vidalı ekstrüder resmi	74
Şekil 6.2	Çift vidalı ekstrüderin çalışır haldeki panoramik görüntüsü.....	75
Şekil 6.3	a) Ekstrüder kafasından çıkan dörtlü makarna görüntüsü, b) Döner kafadan kesme bıçakları	75
Şekil 6.4	Ekstrüder vidasının şematik gösterilişi.....	76
Şekil 6.5	JY-52 modeli için 35 d/d ile dönen çift vida görünümü	76
Şekil 6.6	a) Makarnadan kesme kafası yardımıyla kesilerek elde edilen granüller, b) Granüllerin kalıba alınması, c) Sıcak presleme, d) Nihai ürün olan deney plakalarının elde edilmesi	77
Şekil 6.7	İzotermal ve izostatik özelliklere sahip plaka basma kalıbı	78
Şekil 6.8	Sıcak izostatik, iki fonksiyonlu pres, alt göz sıcakta presleme, üst göz plakaların deforme olmaması için soğukta bekleme gözleridir. a) Pres açık konumda, b) Pres kapalı konumda numune preslenirken	78
Şekil 6.9	Kaşık şekilli çekme numunesi.....	80

Şekil 6.10	Numune kesme bıçağı.....	80
Şekil 6.11	MARES marka, TST-SE-J-2T model universal çekme makinası.....	81
Şekil 6.12	Çekme deneyi sonucu elde edilen gerilme – gerinim eğrisi (GD4 – P2 – Ç1 – UV1 numunesi için).....	82
Şekil 6.13	Kaşık numunelerine pim deliklerinin delinmesi işlemi	83
Şekil 6.14	Çekme numunelerin a) deney öncesi, b) deney sonrası resimleri.....	83
Şekil 6.15	Çekme deneyinde kullanılan mekanik eksansometre	84
Şekil 6.16	Üç noktalı eğme deneyinin şematik gösterilişi	84
Şekil 6.17	TS EN ISO 14125 standardına göre üç noktalı eğme deneyinin yapılışı.....	85
Şekil 6.18	Eğme deneyi sırasında elde edilen kuvvet – sehim eğrisi (GD4 – P3 – E2 – UV1 numunesi için).....	86
Şekil 6.19	TS EN 10045’e göre Charpy ve Izod numuneleri [98].....	87
Şekil 6.20	V çentiğinin açılmasında kullanılan “CHARPY IMPACT TESTER DVT CD 1 I” modeli cihaz	88
Şekil 6.21	TS EN ISO 179-1’e göre hazırlanan çentik darbe numunesi	88
Şekil 6.22	Darbe numunesinin yerleştirilmesi.....	89
Şekil 6.23	Devotrans marka, “Charpy Impact Tester DVT CD C” model 5J kapasiteli darbe cihazı	89
Şekil 6.24	Darbe deneyi öncesi ve sonrası numune görüntüsü	90
Şekil 6.25	Protherm marka, “PLF 120/5” model kül fırını	91
Şekil 6.26	Kalsinasyon testi sonrasında cam fiberlerin makro görüntüsü	92
Şekil 6.27	Nikon SMZ645 marka stereo ışık mikroskobu	92
Şekil 6.28	Stereo mikroskop görüntüleri a) Orijinal numune, b) Dördüncü çevrim	93
Şekil 6.29	AND marka GR200 model hassas terazi ve yoğunluk kiti	93
Şekil 6.30	Devotrans marka, “Melt Flow Indexer (MFI) DVT EA” model cihaz	95
Şekil 6.31	DSC düzeneğinin şematik yapısı.....	96
Şekil 6.32	Intertek marka standart DSC cihazı	96
Şekil 6.33	Loyka marka standart elek analizi cihazı.....	97
Şekil 6.34	ISO 13586’ya göre bütünsel (compact, CT) deney numunesi.....	99
Şekil 6.35	ISO 13586’ya göre tek kenarından çentik açılmış üç noktalı eğme (single-edge-notch bending, SENB) deney numunesi	99
Şekil 6.36	DEWALT marka döner diskli testere ve elmas kesme diski	100
Şekil 6.37	ISO 13586’ya göre Kırılma Tokluğu deneyinin yapılışı	100
Şekil 6.38	Kırılma tokluğu deneyleri için elde edilen karakteristik yük-çatlak ağzı açılımı eğrisi (GD3-P1-K1C)	101
Şekil 6.39	K _{1C} deneyi uygulanmış bir numune.....	101
Şekil 6.40	Deneylerde kullanılan standart UV kabini a) Kapalı, b) Açık konumda	102
Şekil 6.41	JEOL 6060 marka Tarama Elektron Mikroskobu (SEM)	103
Şekil 6.42	BAL-TECH Sputter düzeneği	103
Şekil 7.1	Çekme Dayancı – Çevrim sayısı grafiği.....	107
Şekil 7.2	Elastiklik Modülü – Çevrim sayısı grafiği.....	107
Şekil 7.3	Kopma Uzaması – Çevrim sayısı grafiği.....	107
Şekil 7.4	Eğme Dayancı – Çevrim sayısı grafiği.....	109
Şekil 7.5	Sehim – Çevrim sayısı grafiği.....	109
Şekil 7.6	Darbe Dayancı – Çevrim sayısı grafiği	111
Şekil 7.7	DSC sonuçları	113
Şekil 7.8	Ortalama tane boyutu indeksinin çevrim sayısı ile değişimi.....	116

Şekil 7.9	Kırılma tokluğunun çevrim sayısı ile değişimi	118
Şekil 7.10	Çekme dayancının UV süreciyle değişim grafiği	119
Şekil 7.11	Eğme dayancının UV süreciyle değişim grafiği	120
Şekil 7.12	Darbe dayancının UV süreciyle değişim grafiği.....	120
Şekil 7.13	Kırılma Tokluğunun UV süreciyle değişim grafiği.....	121
Şekil 7.14	ORJ-P1 numunesi için a) 0 ve b) 192 saat sonucu kırık yüzey görüntüleri	121
Şekil 7.15	Orijinal ve GD4 numunelerinin a) 0 ve b) 480 saat sonundaki durumları .	122
Şekil 7.16	ORJ numunesi için 20 ve 75 büyütmede alınan kırık yüzey görüntüleri....	122
Şekil 7.17	GD1 numunesi için 20 ve 75 büyütmede alınan kırık yüzey görüntüleri...	122
Şekil 7.18	GD2 numunesi için 20 ve 75 büyütmede alınan kırık yüzey görüntüleri...	123
Şekil 7.19	GD3 numunesi için 20 ve 75 büyütmede alınan kırık yüzey görüntüleri...	123
Şekil 7.20	GD4 numunesi için 20 ve 75 büyütmede alınan kırık yüzey görüntüleri...	123

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Plastik matrisli kompozitlerin bazı avantaj ve dezavantajları [4] 5
Çizelge 3.1	Termoset reçinelerin avantaj ve dezavantajları [22] 12
Çizelge 3.2	Bazı termoset reçinelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [6]..... 13
Çizelge 3.3	Polietilenin proses özellikleri [8] 18
Çizelge 3.4	Polietilenin mekanik özellikleri [8] 18
Çizelge 3.5	Polipropilenin proses özellikleri [8] 19
Çizelge 3.6	Polipropilenin mekanik özellikleri [8] 20
Çizelge 3.7	Cam elyafı türlerinin kimyasal kompozisyonları [15] 22
Çizelge 3.8	PAN bazlı karbon fiberlerin mekanik özellikleri [9] 27
Çizelge 3.9	Zift bazlı karbon fiberlerin mekanik özellikleri 28
Çizelge 3.10	Yüksek modüllü aramid fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri 30
Çizelge 3.11	Bazalt ve S-Camı fiberlerinin kimyasal kompozisyonları [9] 31
Çizelge 3.12	Tek bir bazalt ve S-Camı filamentin mekanik ve ısıl özelliklerinin karşılaştırılması [14] 32
Çizelge 3.13	Dik yönde zorlama yapıldığında (E_2 / E_m) oranının (E_m / E_f) ile değişimi. 34
Çizelge 4.1	Polimerlerin kullanım alanları ve fiziksel özellikleri [13] 46
Çizelge 4.2	Polietilenlerin kullanım yerleri [13] 47
Çizelge 4.3	Bazı polimer türlerinin yoğunlukları [29] 57
Çizelge 4.4	Bazı ilavelerle suyun yoğunluk değişimi, değerler 100 g suya katılan miktarları göstermektedir [29] 57
Çizelge 5.1	Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan plastikler 66
Çizelge 6.1	TS EN ISO 527-4'e göre çekme deneyi parçası boyutları 80
Çizelge 6.2	TS EN ISO 14125'e göre üç noktalı eğme numunesi boyutları 86
Çizelge 6.3	UV deneyleri için seçilmiş periyotlar 102
Çizelge 7.1	Çekme deneyi kullanılarak optimum imalat koşullarının belirlenmesi. 105
Çizelge 7.2	Dört geri dönüşüm için çekme deneyi sonuçları 106
Çizelge 7.3	Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'nin ortalama sonuçları 106
Çizelge 7.4	Eğme deneyi sonuçları 108
Çizelge 7.5	Eğme deneyinin (Çizelge 7.4) ortalama sonuçları 109
Çizelge 7.6	Darbe deneyi sonuçları ve ortalamaları 110
Çizelge 7.7	Kalsinasyon deneyi sonuçları 111
Çizelge 7.8	Yoğunluk deneyi sonuçları 112
Çizelge 7.9	MFR (Erime Akış Hızı) deneyi sonuçları 112
Çizelge 7.10	DSC deneyi sonucunda saptanan ergime sıcaklıkları 114

Çizelge 7.11	Orijinal numuneler için elek analizi verileri.....	114
Çizelge 7.12	GD1 numuneleri için elek analizi verileri.....	115
Çizelge 7.13	GD2 numuneleri için elek analizi verileri.....	115
Çizelge 7.14	GD3 numuneleri için elek analizi verileri.....	115
Çizelge 7.15	GD4 numuneleri için elek analizi verileri.....	116
Çizelge 7.16	Orijinal ve dört geri dönüşüm için kırılma tokluğu deneyi sonuçları	117
Çizelge 7.17	Çekme dayancının UV süreçleriyle değişiminin ortalama değerleri	119
Çizelge 7.18	Eğme dayancının UV süreçleriyle değişiminin ortalama değerleri	119
Çizelge 7.19	Darbe dayancının UV süreçleriyle değişiminin ortalama değerleri.....	120
Çizelge 7.20	Kırılma tokluğunun UV süreçleriyle değişiminin ortalama değerleri	121

GERİ DÖNÜŞMÜŞ TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE UYGULAMASI

Ali Rıfat ÜNAL

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Termoplastik matrisli kompozitler yeni nesil plastik malzemeler olup, son on yılda yaygın kullanım alanı bulmuştur. Kullanım alanları enerji, otomotiv ve havacılık uygulamalarıdır. Önceleri plastik matrisli kompozitler tanımından termoset matrisli kompozitler anlaşılmasından dolayı tanımlarda özellikle termoplastik matris kavramı vurgulanmıştır. Termoplastik matrisli kompozitlerin tercih edilmelerinin en büyük nedeni doğayı kirletmeyen, çevre dostu malzemeler olmasının yanında; enerji, otomotiv ve havacılık uygulamalarında, özgül dayanç ve özgül modülünün yüksek olması verilebilir. Kompozitlerin sadece türü ve üretim yöntemleri değil, ayrıca kullanım sonrası çevreyi doğrudan kirletmesi de önemli bir gerçektir. Böylece orijinal termoplastik matrisli kompozitlerin kullanımının yanında geri dönüşmüş termoplastiklerin kullanımı da önem kazanmıştır. Bu durumda termoplastik matrisli kompozitler; orijinal malzemelerin kullanımı ve geri dönüşmüş malzemelerin kullanımı olarak iki bölümde incelenir.

Bu çalışma sekiz bölümden oluşmuştur. Girişten sonraki birinci bölümde tezin amacı, hipotezi ve literatür özeti verilmiştir. Kompozit malzemelerin teorisi olan mikromekanik modeli matematik eşitlikler yardımıyla ikinci bölümde ele alınmıştır. Üçüncü bölümde ise polimer matrisler ve fiber malzemeleri; deneylerde kullanılan HDPE matris ve süreksiz E-Camı fiberler detayları verilerek incelenmiştir.

Dördüncü bölümde geri dönüşüm yöntemleri tüm detayları ele alınarak verilmiştir. Burada, AB ve dünyada kullanılan geri dönüşüm yöntemleri istatistik verilere dayandırılarak, avantaj ve dezavantajlarıyla birlikte incelenmiştir. Bu bölümde ayrıca yaygın olarak kullanılan mekanik geri dönüşüm yöntemi uygulamalar için gerekli altyapı ve donanımlarıyla birlikte ele alınmıştır. Beşinci bölüm tezin otomotiv uygulamalarını içermektedir. İlk olarak döküm yöntemi ile üretilen metalik otomotiv parçalarının yerine ekstrüzyonla imal edilmiş orijinal kompozit malzemelerin kullanımı ele alınmıştır. İlk aşamada; hedeflenmiş uygulama alanları yağ karterleri, üst ve alt motor bloklarıdır. İkinci aşamada, geri dönüştürülmüş kompozitlerin başlıca kullanım alanı olan darbe emici tamponlar, araç içi bölmeler ve bazı toplu taşıma araçlarındaki kaporta kullanım koşulları ve spesifikasyonları ele alınmıştır. Bu çalışmanın temel amacı olan darbe emici tamponlar ve uygulamaları burada detaylı incelenmiştir.

Altıncı bölüm deneysel çalışmaların yapıldığı bölüm olup, ilk aşamada geri dönüşüm prosesi detaylı olarak incelenmiştir. İkinci aşamada numunelerin üretimi yapılmış; mekanik, fiziksel ve teknolojik deneylerle numune karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Buradaki çalışmaların tümünde ISO EN standartları kullanılmıştır. Yedinci bölüm, altıncı bölümün değerlendirilmesi şeklindedir. Burada, elde edilmiş bulgular çizelge ve analitik sonuçlarla verilmiş, geri dönüşüm ile malzeme davranış ve özelliklerinin matematik değişimi ifade edilmiştir. Bu bölümde ayrıca ışık ve taramalı elektron mikroskobu resimleri detaylı olarak verilmiş ve yorumları yapılmıştır. Son olarak darbe emici tamponlar gibi dış kaporta uygulamalarında özelliklerin değişimi yine bu bölümde verilmiştir.

Son bölüm olan sekizinci bölümde sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu bölümde özellik değişimlerinin yanında daha sonraki çalışmalar için temel oluşturacak önemli bulgular da yorumlanmıştır. Tezin tamamı deneysel esaslarla elde edilmiş verilerin uygulamaya yönelik değerleri olduğundan; daha sonra yapılacak çalışmalar için de veri tabanı oluşturma özelliği de vardır.

Anahtar Kelimeler: Termoplastik matrisli kompozit malzemeler, geri dönüşüm, polietilen, E-camı, otomotiv uygulamaları

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE EFFECTS OF RECYCLING ON THERMOSET MATRIX COMPOSITES IN AUTOMOTIVE APPLICATIONS

Ali Rifat ÜNAL

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Thermoplastic matrix composites are new generation of plastic matrix composites, which are widely used in practice in the last decade. Particularly in the energy, automotive and aerospace applications come into prominence. Previously, thermoset matrix composites were understood in the words of plastic matrix composites. Because of this reason, thermoplastic matrix is especially emphasized. Non-polluting, eco-friendly sources of energy applications in aerospace and automotive applications required specific strength and low weight are particularly preferred. Not only the production of the products in question, but also the direct pollution of the environment after use, is the inevitable reality. Therefore, prior to the use of thermoplastics original, then the re-use of recycled thermoplastics were studied in two stages.

This study consists of a total of eight sections. In the first section, under the heading of Introduction, was given aim of the thesis, hypothesis and the summary of the literature. Composite materials were introduced in the second section and with the help of micromechanic models, the mathematics of the subject was studied. Polymer matrix and fiber materials were dealt in the third section with the subject more on the HDPE matrix and discontinuous E-glass fibers, which were used in the experiments are given in detail.

The fourth section is the section of recycling methods are discussed in detail. Here, recycling methods used in the EU countries and in the world, along with advantages and disadvantages, are examined also with the given the statistical results. Commonly used mechanical recycling method by examining the infrastructures needed for applications in studies are also given here. The fifth section is the automotive applications of the thesis. At first, the casting method to be used instead of metal parts made of composites manufactured by injection molding were discussed. In the first stage, especially oil pans, upper and lower block covers are among the targeted applications. Primarily application of recycled composites are, impact-absorbing bumpers, automotive applications used in the vehicle compartment separators, and some of the public transport bonnets. The study is based on and aimed, the applications of impact-absorbing bumper and principles of project and application are needed in this regard.

The sixth chapter is a comprehensive section containing the experimental works, in which the first stage of the recycling process and the parameters have been discussed. The sample productions were made in the second step; mechanical, physical and technological experiments were made and test results were obtained. In the experiments on the subject, ISO EN standards were used. The seventh section is in the form of assessment of the sixth chapter, the findings were given in tabular and analytical and the change of properties and material behaviour with recycling are expressed in mathematics. Light and scanning electron microscopy studies were also given in this section. Change of properties for automotive parts, which were designed for outdoor, such as bumpers, etc. with the UV light, was also given in this section.

The last section is the eighth section, where the results were examined. The results of changings were interpreted in this section and qualified advices for the progression of the study were also given in here. Because of the whole study based on the experimental procedures and directly to the applications, it consisted an important database for the nextly serious project works.

Keywords: Thermoplastic matrix composite materials, recycling, polyethylene, E-glass, automotive applications

1.1 Literatür Özeti

En az iki malzemenin kimyasal bağ oluşturmaksızın, aralarında bir arayüzey oluşturacak şekilde bir araya gelmesiyle oluşan yeni malzemelere kompozit malzemeler denir. Bu çalışma için 90 adet yayın incelenmiştir. Bunlardan yaklaşık 10 adedi konunun teorik temelini oluşturmak amacıyla incelenen ileri düzey kitap ve el kitabı şeklindeki yayınlardır. Kalan yayınlar son 10 yılın yapılan çalışmaları olup bunların da %70'ini son 5 yılın yayınları oluşturmaktadır. Zaten termoplastik matrisli kompozitlerde son 10 yılın çalışmalarıdır. Bunların geri dönüşümü Avrupa Birliği kriterlerinde çevreye duyarlı teknolojiler kapsamında değerlendirilmiş konular olup son 5 yılın önde gelen konuları olarak kendini göstermiştir. Ayrıca otomotiv endüstrisinde görece olarak daha düşük enerji maliyetleri nedeniyle de bugün üzerinde çalışılan öncelikli alan konuları arasında yer almaktadır. İlk etapta enerji maliyetlerindeki azalma %10 olarak düşünülmektedir. Diğer taraftan Mühendislik termoplastikleri kullanılarak elde edilen kompozitler tüm plastik matrisli kompozitler içerisinde ağırlıkça %5 civarında iken günümüzde bu oran %20-25 dolaylarındadır. Son 5 yıldaki bu hızlı gelişim konunun önemini kendiliğinden ortaya çıkarmaktadır. Son yapılan çalışmalarda ise geri dönüşüm işlemleri ele alınmış, bunlardan mekanik geri dönüşümün avantajlı yönleri de vurgulanarak, bu konunun kuramsal ve uygulamaya yönelik tarafları incelenmiştir. Ayrıca doku içerisindeki fiber boyunun geri dönüşüm çevrimine bağlı olarak matematik eşitlikleri elde edilmiştir. Sonuçlar, dönüşümün gidişatını verecek şekilde de grafiklerle ifade edilmiştir. Böylelikle orijinal malzeme kullanımını azaltarak; aynı özellikleri verecek geri dönüşmüş kompozit

malzeme kullanımı yoluna gidilmektedir. Burada doku resimleri, geri dönüşmüş malzeme karakterizasyonları da değerlendirilerek somut sonuçlara varılmıştır. Öte yandan AB ülkeleri ve Japonya otomotiv endüstrisinde söz konusu geri dönüşmüş malzeme kullanılarak üretilen parça özelliklerini projelendirerek kendi şartnameleri arasına koymuştur. Tüm bu bilgilerin ışığında konular sentezlenmiş ve deneysel çalışma olarak Lisansüstü projesi gerçekleştirilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Literatür özetinde de ele alındığı gibi birinci aşamada çevreye duyarlı, ikinci aşamada enerji maliyetlerini düşürmek amacıyla geri dönüştürülmüş termoplastik malzemelerin yeniden kullanımı çalışmanın temel unsurunu oluşturmaktadır. Geri dönüştürülmüş malzemelerin özellikle otomotiv endüstrisinde kullanımı hedeflenmektedir. Binek araçları ve hafif ticari araçlar öncelikle uygulama alanlarını oluşturmaktadır. Bunlardan ön ve arka darbe emici tamponlar, arka kapak ve kaportalar, iç bagaj parçaları, yağ karteri, koltuk parçaları vb. üzerinde çalışmalar yapılmış, sırasıyla önce AB ülkeleri, Japonya ve ABD’de söz konusu araçlarda kullanımı için projelendirilmesi yapılmış, tasarım ve dayanç esasları belirlenmiştir. Ülkemizde de binek araçları ve hafif ticari araçlar yaygın olarak üretilmektedir. Buradan hareketle, geri dönüştürülmüş termoplastik matrisli kompozitlerin kullanımı önem kazanmaktadır. Bu çalışmada Polietilen (PE) matrisli ve kırık E-Camı fiberli kompozitin ilk aşamada özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra kurulmuş laboratuvar ölçekli pilot tesiste geri dönüşüm parametreleri optimize edilerek standart üretim yöntemi saptanmış ve bu yöntemin parametreleri sabit tutularak 4 geri dönüşüm yapılmıştır. Her bir geri dönüşümün sonuçları belirlenmiş ve dönüşüm prosesi analitik olarak ifade edilmiştir. Bu veriler kullanılarak, orijinal malzeme kullanmaksızın geri dönüşümün melezlenmesi ile otomotiv parçalarının üretimi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

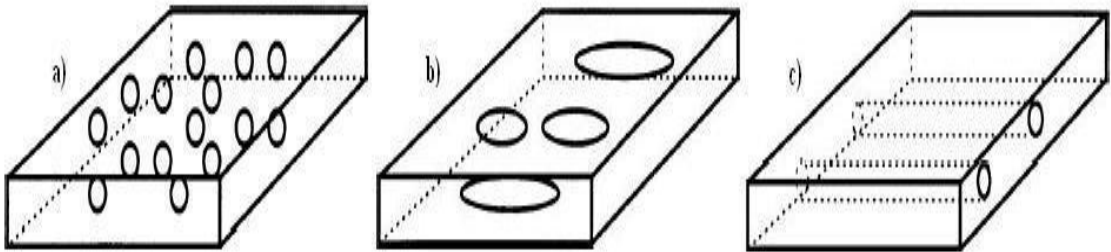
Kompozit malzemeler makroskobik düzeyde matris ve fiber veya filler olarak tanımlanan takviye elemanı malzemelerinden oluşmaktadır. Kompozit yapıların temel

felsefesi şu şekildedir: Ana doku olarak adlandırılan matris sünek (Elastiklik Modülü (E) düşük, kopma uzaması (%ε) yüksek) olup temel amacı malzemeyi ve dolayısıyla fiberleri bir arada tutmaktır. Fiberler ise kompozit malzemede taşıyıcılık görevi görerek sistemin yükünü taşıyan, görece yüksek elastiklik modülü ve düşük kopma uzama değerlerine sahip malzemelerdir. Bu ngr koşullarını sağlayan önemli malzeme grubu plastik matrisli kompozitlerdir. Termoset veya termoplastik matris doğal olarak sünek ana dokuyu oluşturmakta, buna karşın yükü taşıyan yüksek dayanç ve modüllü fiberler ise yükü taşımaktadırlar. Plastik matrislerin gelişimi ve güncel uygulama alanı termoplastik matrislerdir. Öte yandan doğada plastiklerin kolayca czlmediğinden hareketle enerji maliyetleri de göz önünde bulundurularak konunun önemi kendiliğinden ortaya cıkılmaktadır. Fiber geometrisi ve dokuda bulunuşu dayancı etkileyen birincil önemli parametredir. Gelişigüzel dağılımlı kırık fiberlerin her cvrimde geometrik oranları (l/d) değişeceğinden, bu değişimin kompozit özelliklerini nasıl etkileyeceği calışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Fiber geometrisi ve fiberlerin dokuda dağılımı analiz yöntemleriyle belirlenmiş, konuya etkiyen parametreler belirlenerek, geri dönüşmüş kompozitin kullanım alanı net olarak belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

KOMPOZİT MALZEMELER

En az iki malzemenin kimyasal bağ oluşturmaksızın, aralarında bir arayüzey oluşturacak şekilde bir araya gelmesiyle oluşan yeni malzemelere kompozit malzemeler denir [1]. Kompozit malzemelerin en önemli avantajı, sergilediği özelliklerin kendini oluşturan bileşenlerinkinden üstün olmasıdır. Kompozit malzemelerin oluşturulmasıyla malzemede dayanım, tokluk, korozyon direnci, aşınma dayanımı, hafiflik, yorulma ömrü, ısıya bağlı davranışlar, termal yalıtım, termal iletkenlik, akustik yalıtım gibi özellikler iyileştirilebilmektedir [2]. Sözü edilen konulardan hareketle plastik matrslili kompozitlerin genel anlamda avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1’ de verilmiştir. Kompozit malzemeler yükü taşıyan fiber veya filler ile bunları dokusunda bulunduran matrsten oluşur [3], [4]. Bu makroskobik bir görünüş olup en genel biçimiyle fiber veya fillerlar Şekil 2.1’ de verildiği gibi şematize edilirler.



Şekil 2.1 Fiber veya fillerlerin şekline göre kompozit türleri a) Parçacık destekli kompozit, b) Yonga destekli kompozit, c) Fiber destekli kompozit

Çizelge 2.1 Plastik matrisli kompozitlerin bazı avantaj ve dezavantajları [4]

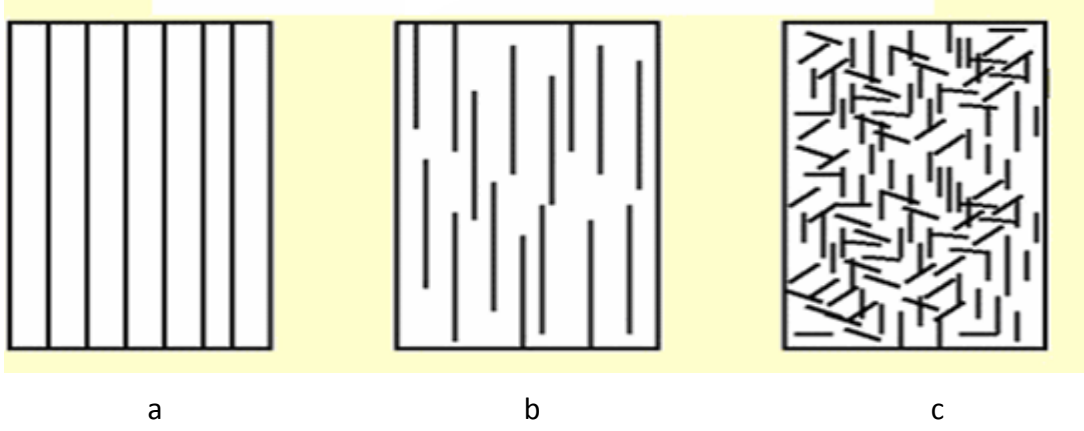
Avantajları	Dezavantajları
Hafiflik	Görece olarak bazı fiberlerin yüksek fiyatları
Yüksek özgül dayanç ve özgül modül	Yeni tasarım ilkelerinin geliştirilmesi ve yeni sayısal yöntemlerin kullanılması
İstenilen mekanik ve fiziksel özelliklerin elde edilmesi	Seri üretim için özel önlemler alınması, yeni üretim yöntemlerinin geliştirilmesi
Karmaşık şekilli parçaların kolayca üretilebilmesi	Üretim aşaması için fazladan zaman harcanması
Maliyetlerin azalması	Yeniden tasarlanmış bağlantı elemanları
Konvansiyonel malzemelere göre mükemmel yorulma dayancı	Plastikler matrisler için sınırlı kullanım sıcaklık aralıkları
Uygun malzeme-ortam ikilisi seçildiğinde çok iyi korozyon dayancı	Su absorpsiyonu için özel önlem gereksinimi
Mükemmel elektrik ve ısı izolatörlüğü, manyetik alandan etkilenmemesi	Özel önlemler alınarak UV dayancı arttırılabilir
Üretimde son işlem olması ve imalatta finisaj işlemlerine gereksinim olmaması	Geri dönüşümünün zor olması

Şekil 2.1’de de gösterildiği gibi kompozit malzemeler kullanılan destek malzemelerine ve elde edilmesi istenen optimum özelliklere göre aşağıdaki biçimde gruplandırılır:

- Fiber destekli kompozitler
- Parçacık destekli kompozitler
- Tabaka yapıli kompozitler

Plastik matrisli kompozitlerde en çok kullanılan fiber destekli kompozitlerdir [5]. Burada fiberler sürekli eş yönlü, kırpık, keçe ve dokuma şeklinde olabilir. Fiberlerin dokuda bulunuşları Şekil 2.2’ de şematik olarak gösterilmiştir. Fiberler yüksek dayanç

ve elastiklik modüllü malzemeler olduğundan söz konusu gevreklik özelliklerini görece olarak daha düşük özelliklere sahip (sünek matris) ana dokuya gereksinim duyarlar.

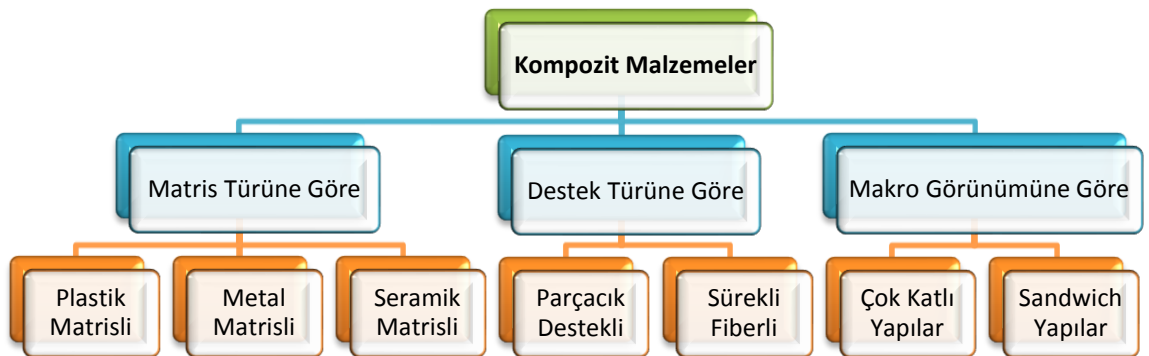


Şekil 2.2 Matris içerisinde olası fiber türleri a) Eş yönlü sürekli fiberler b) Eş yönlü süreksiz fiberler c) Gelişigüzel dağılmış süreksiz fiberler (Kırpık)

Ana doku yani matris, plastik, metal ve seramik olabilir. Buna göre de kompozitler matrislerine göre aşağıdaki gibi gruplanabilir [6]:

- Plastik matrisli kompozitler (PMK)
- Metal matrisli kompozitler (MMK)
- Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Hem matris hem de fiberlerin tümü göz önünde bulundurulduğunda kompozit malzemeler Şekil 2.3'teki gibi gruplanabilir.



Şekil 2.3 Kompozit malzemelerin en genel biçimiyle gruplanması [1]

2.1 Matris Türüne Göre Kompozit Malzemeler

Yukarıda da belirtildiği gibi kullanılan matrislere göre kompozit malzemeler polimer matrisli, metal matrisli, seramik matrisli olmak üzere üç grupta incelenir. Üretilen kompozit malzemenin kullanılacağı ortam gereksinimleri (sıcaklık, nem, kimyasal ortam vb.) matris malzemesi tarafından karşılanır [7].

2.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)

Polimerler tartışmasız en yaygın olarak kullanılan matris malzemesidir. Polimerler termoset ve termoplastik olarak iki grupta incelenir. Termoset polimerler kütleme işlemi ile yüksek oranda çapraz bağlar ile bağlanırlar ve bu üç boyutlu moleküler ağ yapısı yüksek sıcaklıklara dayanım sağlar. Kompozit uygulamalarda kullanılan termoset reçineler epoksi, polyester ve fenolik reçinelerdir. Termoplastik polimerler ısı polimerlerdir. Çapraz bağ içermezler, yüksek sıcaklıkta erirler ve düşük sıcaklıkta yeniden katılaşırlar. Kompozit malzeme üretiminde Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Poliimid (PI), Polietereeterketon (PEEK), Polifenilensülfid (PPS) en çok kullanılan termoplastiklerdir [4], [8], [9].

2.1.2 Metal Matrisli Kompozitler (PMK)

Metal matrisli kompozit uygulamaları ilk defa 2. Dünya Savaşı yıllarında Alman ordusundaki otomotiv uygulamaları ile kullanılmaya başlanmıştır. Kendinden yağlamalı yataklar, karmaşık şekilli silah parçaları, fren pabuçları vb. yerlerde kullanılmıştır. Genelde parçacık destekli kompozitler olarak kullanılırlar. Sünek metal matrisin içinde barındırdığı sert ve kırılgan parçacıklar öncelikle sertlik ve aşınma dayancını arttırmak amacıyla kullanılırlar. Kompozitin kullanım sıcaklığı sınırı kendisini oluşturan bileşenlerin erime ya da yumuşama sıcaklığı ile sınırlıdır. En yaygın olarak kullanılan ticari MMK'ler alüminyum magnezyum ve titanyum alaşımlarının, silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3), karbon ve grafit ile takviyelendirilmesi sonucu oluşurlar [4], [5], [8].

2.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)

Yüksek sıcaklık uygulamalarında, 1000°C'ye kadar seramik matrisli kompozitler (SMK) malzemeler kullanılır. Matris malzemesi olarak silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3), cam-seramik, silisyum nitrür gibi seramik, yine seramik esaslı fiberler ile takviye edilir. Karbon matris ise grafit fiber preform üzerine, pirolitik grafitten buhar biriktirme yöntemi ile üretilir. Buradaki uygulamalarda seramik matristen öteye seramik melez kompozitler ön plana çıkar. Zira bunlarda destek elemanında başka bir seramiktir. Endüstride yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanıldığı gibi, biyo medikal ve dental uygulamalarında çok yaygındır [4], [5], [8].

2.2 Destek Tütüne Göre Kompozitler

Kompozit malzemelerin özellikleri; kompoziti oluşturan bileşenlerin özelliklerine, geometrisine ve fazların dağılımına bağlı olarak değişir. En önemli parametre ise destek malzemesinin matris içindeki fiber hacim oranıdır. Destek elemanının kompozit malzeme içerisindeki dağılımı kompozitin homojenlik ve uniform özellikleri belirler. Uniform olmayan destek elemanı dağılımı, malzeme içinde heterojenlik ve kırılmaya elverişli zayıf bölgelerin oluşumunu artırır. Takviye elemanının geometrisi ve yönlenmesi malzeme sisteminin anizotropi özelliklerini etkiler [6], [10], [11].

Partikül destekli kompozitlerde çeşitli boyut ve şekillerdeki partiküller matris içinde gelişigüzel biçimde dağılır. Partiküllerin gelişigüzel dağılımı dolayısıyla, parçacık takviyeli kompozit malzeme yaklaşık olarak homojen kabul edilir ve izotropik özellikler gösterir. Partikül destekli kompozitler metal dışı matris içinde metal dışı partikül (beton, kauçuk benzeri partikül takviyeli kırılğan polimer matris), metal dışı matris içinde metalik partikül (alüminyum partikül destekli poliüretan kauçuk), metalik partikül destekli metalik matris (işleme kabiliyetini geliştirmek için kurşun partikül takviyeli çelik) ve metal dışı partikül destekli metalik matris (silisyum karbür partiküllü alüminyum) bileşenlerinden oluşabilir [10], [12].

Fiber destekli kompozitlerde takviye amaçlı kullanılan fiber malzemeleri sürekli fiber, uzun – kısa fiber, organik-inorganik fiber gibi çeşitli şekillerde olabilir. Kullanılan

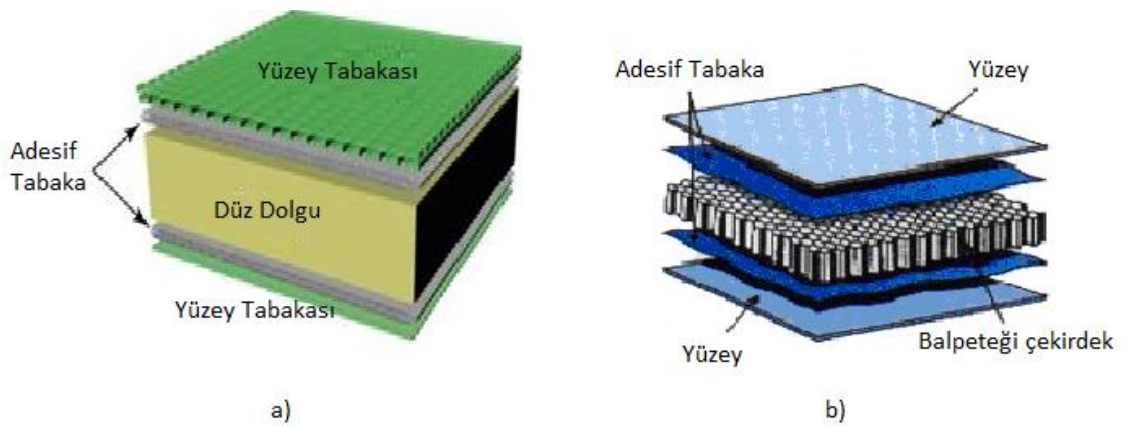
fiberlerin çeşidi, fiziksel özellikleri, matris ile uyumu, matris içindeki dağılımı ve matris içindeki hacim oranı kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirler [10].

2.3 Sandwich Yapılı Kompozitler

Genel anlamıyla makro kompozitler konusu içerisinde yer alan yapısal kompozit malzemeler; iki yüzey plakası arasına düşük yoğunluklu bir dolgu malzemesinin yapıştırılması ile oluşurlar [13]. İlk olarak 1940'lı yıllarda havacılık sektöründe yapısal hafiflik sağlayarak uçuş mesafesini azaltmak amacıyla kullanılmıştır [12]. Yapısal kompozitlerin 3 ana bileşeni vardır [14]:

- Dış yüzeyde ince ve güçlü yüzey tabakları,
- İki yüzü arasında hafiflik sağlayan ve yük taşıyan dolgu malzemesi,
- Yüzey plakaları ve dolgu malzemesini birbirine yapıştıran adesif tabaka.

Sandwich yapılı kompozit malzemelerden tek dolgulu ve balpeteği (honeycomb) yapılar Şekil 2.4' de şematik olarak gösterilmiştir. Bu tip yapılar birim hacimde dayanç arttırmak ya da bütünsel anlamda hafiflik sağlamak amacıyla kullanılırlar. Daha çok uzay ve havacılık sanayinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra kargo konteynerları, hızlı yat uygulamaları, otomotiv parçaları ve içyapı uygulamaları gibi birçok kullanım alanına sahiptirler [15], [16].



Şekil 2.4 Tabaka yapılı kompozitler a) Düz dolgulu, b) Balpeteği yapısı

Sandwich yapılarda artan dolgu malzemesi yapısal hafiflik sağlarken, eğme dayancında büyük bir artış sağlanır. Tüm bileşenleri aramitten oluşan bir sandwich

yapıda dolgu malzemesinin kalınlığı iki katına çıkarıldığında eğme dayancı 3,5 kat artmaktadır. [3]. Ana bileşenlerden yüzey plakaları dış yükleri (özellikle eğme ve darbeler) taşıırken, dolgu malzemeleri hafifliğin yanı sıra özellikle kayma yüklerini taşırlar. Genelde dolgu malzemeleri; polimer esaslı köpükler, kâğıt, poliefin, metal balpeteği malzemelerden seçilir. Yüzey plakaları ile dolgu malzemelerini birleştiren polimer esaslı yapıştırıcılardır. Genel olarak epoksi ve formaldehit reçineler kullanılır. Bunların kürlenmesini sağlamak amacıyla ısı ve basınç birlikte uygulanır [4], [17].

POLİMER MATRİS VE FİBER MALZEMELERİ

3.1 Matris Malzemeleri

Plastikler ısıya ve çözücülere karşı gösterdikleri davranışlarına göre Termoplastikler, Termosetler ve Elastomerler olarak üç grupta incelenmektedir. Elastomerlerin Bölüm 2’de belirtildiği gibi tabaka yapılı kompozitlerde düz dolgu olarak kullanılması bir tarafa bırakılırsa, plastik matrisli kompozitlerde Termoset ve Termoplastik matrisli olarak iki ana başlık altında incelenirler [2], [18].

3.1.1 Termoset Matrisler

Termoset malzemeler oda sıcaklığında sıvı halde bulunan ısı ve çözücülere karşı dirençli, bir ya da iki komponentli malzemelerdir. Kovalent bağların oluşturduğu çapraz bağlar polimer zincirinin hareketini büyük ölçüde engellediğinden, termoplastiklere göre daha rijittir (sert ve kırılğan). Çapraz bağlanma oranı arttıkça molekül hareketleri kısıtlandığı için sertlik doğal olarak artar. Ancak bu durumda darbe dayancının düşmesi kullanımda sakıncalar oluşturur. Öte yandan söz konusu kuvvetli çapraz bağlar nedeniyle oluşan boyutsal kararlılık aynı zamanda ısı dengeye ve görece yüksek sıcaklıklara dayancı da arttırmaktadır [19].

Termoset reçineler oda sıcaklığında akışkan halde olduklarından fiberleri ıslatma özellikleri çok iyi olup, bu da kullanım kolaylığı sağlamakta ve porozite içermeyen kompozit malzeme üretimine olanak tanımaktadır. Termoset reçineler, son şekillerini

almaları için, belirli sıcaklık aralıklarında ya da oda sıcaklığında kürleme işlemine tabi tutulurlar. Kürleme çevriminin uzun olması üretim oranının düşük olmasına neden olmaktadır. Termoset malzemelerin bir kez kürlendikten sonra tekrar şekil verilememesi ve geri dönüşümünün olmaması en büyük dezavantajdır [20], [21]. Termoset reçinelerin önemli üç türü olan Polyester, Epoksi ve Vinilesterin avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Termoset reçinelerin avantaj ve dezavantajları [22]

Reçineler	Avantajları	Dezavantajları
Polyester	- Kolay kullanım ve E-camı ile mükemmel yapışma - Isıl dayanç (150-200°C) - Saydamlık-yarı saydamlık - Düşük maliyet	- Orta düzeyde mekanik özellikler - Kendini çekme - Alev alabilir - Nemli ve sıcak ortamlarda dayancın düşmesi - Sınırlı saklama ömrü
Epoksi	- İyi mekanik, kimyasal ve ısı özellikler, - Düşük kendini çekme (~%1) - Kendi kendini söndürme - Fiberlere ve metale iyi yapışma - Solventsiz işleme	- Uzun kürleme çevrimi - Isıl yaşlanma - Darbe ve neme duyarlı - Düşük renklendirilebilirlik
Vinilester	- İyi kimyasal dayanç - Yaşlanma dayancı - Yorulma dayancı	- Büzülme - Post-kür gerekli - Yüksek maliyet

Termoplastik malzemelerin hammaddeleri katı halde (granül, agromel ve toz) bulunmaktadır. Kompozit üretimi sırasında bu hammaddeler eriyerek istenilen şekli almaktadır. Buna karşın termoset reçineler viskoz halde bulunur ve üretim sonrasında kürleme prosesi (post-cure) ile katılışır. Termosetlerin, proses süreci

termoplastiklere göre daha uzundur. Ancak termoplastikler gibi özel kalıp ve takımlara gereksinim duyulmaz. Bu malzemelerin en büyük dezavantajı geri dönüşümün zor veya sınırlı olmamasıdır [22]. Termoset reçinelerin viskoz halde olması dolayısıyla, kompozit malzeme üretimi sırasında matris-fiber ara yüzeyinin yapışma özellikleri çok iyidir. Buna karşın termoplastik matrisler gibi özel bağlayıcılara gereksinim duymaksızın iyi bir arayüzey oluştururlar [6]. Bazı termoset reçinelerin çeşitli özellikleri Çizelge 3. 2’ de görülmektedir.

Çizelge 3.2 Bazı termoset reçinelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [6]

Termoset Reçineler	Yoğunluk (g/cm³)	Çekme Modülü GPa (10⁶ psi)	Çekme Dayanımı MPa (10³ psi)
Polyester	1.1 – 1.4	1.6 – 4.1 (0.23 – 0.6)	35 – 95 (5.0 – 13.8)
Epoksi	1.2 – 1.4	2.5 – 5.0 (0.36 – 0.72)	50 – 110 (7.2 – 16.0)
Fenolik	1.2 – 1.4	2.7 – 4.1 (0.4 – 0.6)	35 – 60 (5.0 – 9.0)

En yaygın biçimde kullanılan termoset reçineler polyester ve vinilesterdir. Diğerleri ise organik matrisler olup; epoksi, bismaleimid ve poliimiddir. Epoksi, bismaleimid ve poliimid reçineleri yüksek mekanik özellikli ve pahalı reçinelerdir. Yüksek mekanik özellikli spor malzemeleri, kimyasal proses boruları vb. uygulamalarda kullanılırlar. Genel amaçlı polyesterler ise ev-banyo gereçlerinde, otomotivde, denizcilikte vb alanlarda geniş kullanım alanı bulurlar [23].

3.1.2 Termoplastik Matrisler

Termoplastik polimerler zayıf Van Der Waals bağlarının bir arada tuttuğu çok uzun molekül zincirleri halinde bulunan, ısı karakterli malzemelerdir. Isıtıldıklarında intermoleküler kuvvetler zayıflar ve yumuşayıp erirler. Bu özelliklerinden dolayı, örneğin enjeksiyonla bir kalıba basılarak kolayca şekillendirilir ve böylece soğuma sonucu kalıbın şeklini alırlar. Bu işlem yeniden ısıtılarak defalarca tekrarlanabilir. Bu da yeniden kullanım ve düşük enerji maliyetleri nedeniyle büyük avantaj oluşturmaktadır.

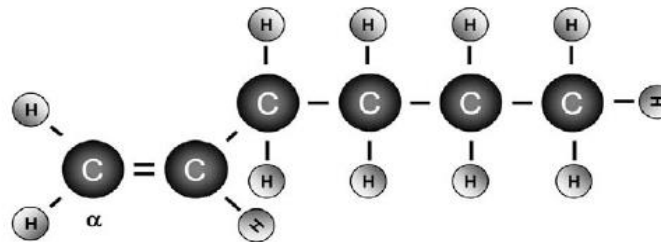
Ayrıca imalat sonrası bir kürlenme işlemine gereksinim olmaması da seri üretime olanak sağlar [17], [24].

Termoplastikler kristalin ve amorf olarak sınıflandırılabilirler. Pratikte tamamen kristalin bir yapı elde etmek mümkün olmasa da kristalin ve yarı-kristalin eğilim gösterebilirler. Polipropilen ve naylon yüksek derecede kristalin özellik gösterirken, polistiren ve akrilik her zaman amorfudur. Termoplastik malzemelerde kristallik derecesi malzemenin termal özelliklerini ve üretim koşullarını belirler [17].

Matris olarak kullanımları, termosetlere göre daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geridönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Termoplastik malzemeler proses zorluğu ve yüksek maliyetleri dolayısıyla kompozit üretiminde termosetlere nazaran daha az tercih edilmekte iken; günümüzde bu problemler çözülerek hızlı ve hatasız üretimlere geçilmiştir. Kullanım sıcaklıkları genelde düşük gibi görünse de 60°C ile 245°C arasında çalışabilen termoplastik malzeme çeşitleri bulunmaktadır. Mühendislik anlamda yaygın olarak kullanılan termoplastik türleri Poliolefinlerdir [5].

3.1.2.1 Poliolefinler

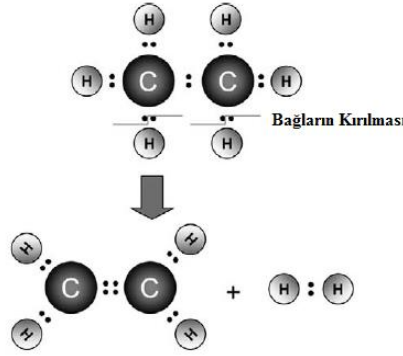
Poliolefinler, olefin veya alkin monomerlerinden üretilirler. Organik kimyaya göre alkin, olefin veya olefineler yapılarında en az bir tane doymamış C-C bağı bulundurlar. Bu durum Şekil 3.1' de şematik olarak modellenmiştir. En basit alken etilendir. Ana yapısında çift bağa sahip bu olefinlerin özel ailesi α -olefinleridir [25].



Şekil 3.1 Karbon-Karbon çift bağı

Çift bağı yapıya sahip olmalarından dolayı, kimyasal reaksiyonlarda çok farklı sentez reaksiyonları oluşturabilirler. Özellikle düşük molekül ağırlıklı etilen ve propilenin daha uzun hidrokarbon zinciri üretmede sayısız kimyasal sentezi vardır. Bu çift bağ moleküle reaktivlik kazandırır ve birçok uygulamada kullanmayı sağlar [17].

Çeşitli olefin kaynakları mevcut olup, alkin için en yaygın endüstriyel sentez yöntemi ham petrolün parçalanmasıyla meydana gelir. Parçalama işlemi kompleks moleküllerin C-C atomlarının daha basit yapılara kırılması işlemiyle gerçekleşir. Bunlardan en yaygın bilineni buharla parçalanma yöntemidir. Bu yöntem; Şekil 3.2' de gösterildiği gibi doymuş hidrokarbonların genellikle doymamış daha küçük yapılara bölündüğü petrokimyasal bir üretim şeklidir. Alkin, etilen ve propilenin de temel üretim yöntemini oluşturmaktadır [17].



Şekil 3.2 C-C atomlarının daha basit yapılara kırılması

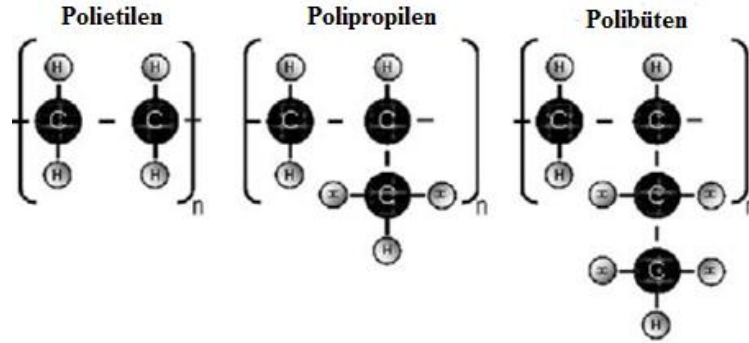
Buharla parçalama yöntemi, gaz veya sıvı fazdaki petrol yağı, buharla seyreltilmiş LPG veya etan kısa bir süre içinde oksijenle birlikte fırında ısıtılarak gerçekleştirilir. Genellikle reaksiyon sıcaklığı çok yüksektir (~850 °C). Ancak reaksiyon çok kısa bir sürede gerçekleşir [26]. Modern parçalama fırınlarında bu zaman milisaniyeler mertebesine kadar düşürülmüştür (buhar hızı ses hızındadır) ki bu sayede arzu edilen ürün özellikleri geliştirilir. Parçalama sıcaklığına ulaşıldığında reaksiyonu durdurmak için gaz aniden soğutulur. Reaksiyon sonucu işlenen hammaddeye, hidrokarbon-buhar oranına, parçalama sıcaklığına bağlı olarak ürünler elde edilir [17].

Hafif hidrokarbon hammaddeleri (ethan, LPG, Hafif petrol) zengin olarak alkin ürünlerinin yanında etilen, propilen ve bütadien ürünleri de verir. Ağır hidrokarbon hammaddeleri ise aynı ürünlerin bazılarını verebildiği gibi bunların yanında aromatik hidrokarbonlar

ve benzin gibi ürünlerde verirler. Daha yüksek parçalama sıcaklıkları etilen ve benzen verir. Öte yandan düşük sıcaklıklar daha çok propan, C4- hidrokarbonlar ve sıvı ürünler verir. Etilen buharla parçalama sonucu elde edilir. Bununla birlikte propilen sade bir yanüründür. Propilen sentezi propan dehidrojenasyonu gibi başka metodlarla gerçekleştirilir. FCC (sıvı katalizör parçalaması) LPG propilen ve bütlen kaynağı için önemli kaynaktır [17].

3.1.2.2 Poliolefin Türleri

Önemli Poliolefin türleri olan polietilen, polipropilen ve polibüten molekülleri Şekil 3.3' te şematik olarak gösterilmiştir.



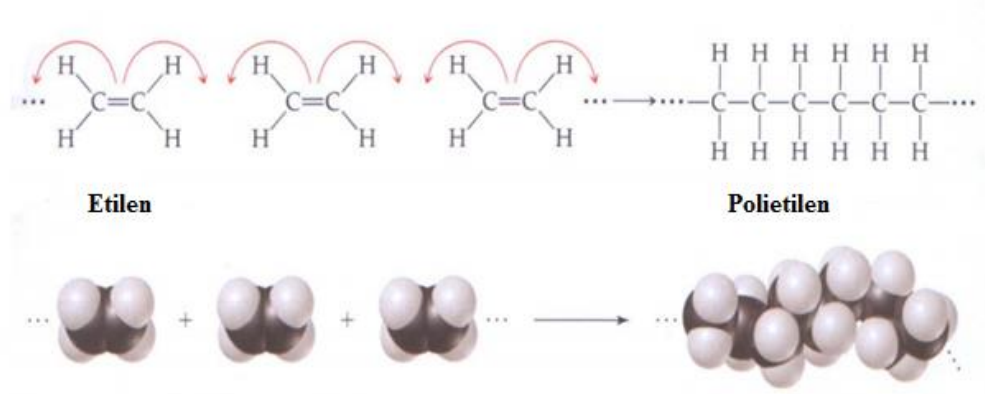
Şekil 3.3 Poliolefin türleri

Bunlardan en yaygın kullanılanı polietilen olup, farklı üç çeşidi vardır. Bunlar düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) , lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) olarak adlandırılırlar [17].

a) Polietilen

Düşük yoğunluklu polietilen, etilen kullanılarak ağır otoklav veya tubuler reaktör polimerizasyonu koşullarında yüksek sıcaklık ve basınç altında üretilirler. Yüksek yoğunluklu polietilen ise Ziegler-Natta katalizör sistemleri ile üretilir. Molekülü düşük dallanmaya sahiptir. Düşük dallantılı olması yüksek kristallik özelliği kazandırılmasını sağlamaktadır (70-90%). Düşük yoğunluklu Polietilende ise bu oran (40-60%) daha düşüktür. Diğer taraftan yüksek yoğunluklu Polietilenin daha hızlı kristallenme özelliği vardır. Bu özellik polimerin yoğunluğunu ve ergime sıcaklığını da artırmaktadır. Her ikisi karşılaştırıldığında yüksek yoğunluklu Polietilenin düşük yoğunluklu Polietilene

göre artış gösteren özellikleri; çekme dayancı, tokluk, kimyasallara karşı daha kararlılık ve görece olarak daha yüksek sıcaklıklarda çalışma şeklinde sıralanabilir. Artış gösteren bu özelliklerin yanı sıra, azalan bazı özellikleri ise; uzama, kolay çatlak oluşum özelliği ve düşük sıcaklıklarda daha gevrek tutum göstermesi olarak sıralanabilir [17]. Polietilene ait plimerizasyon modeli Şekil 3.4' te şematik olarak gösterilmiştir. Bunlara göre yüksek yoğunluklu Polietilen diğerine göre yapısal uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.4 Etilen merinden polietilen sentezi

Ender kullanılan bir diğer Polietilen türü de çapraz bağlı polietilen (PEX) dir. Çapraz bağlanma ile polietilen moleküllerin ana zincirlerinin güçlü kimyasal bağlarla bağlanması sonucu elde edilir. Çapraz bağlanma fiziksel ve kimyasal yöntemlerle gerçekleştirilir. Fiziksel çaprazlama yöntemi radyasyon ile kimyasal çaprazlananlar genellikle peroksit ajanı veya silan kullanılarak yapılır.

Çapraz bağlı polietilen üretimi polietilenin ana zincirine (backbone) silan molekülü aşılmasını gerektirir. İnceltilmiş ve aşılınmış içerik katalizörle birlikte Sioplas veya Monosil metodu uygulanarak yapılır. Bu metodlar özel ekstrüzyon cihazları ile yapılır. Ekstrüzyon işleminden sonra buhar veya sıcak suya bırakılır ve son çapraz bağlanma işlemi yapılmış olur. Bu şekilde çapraz bağlanma ile ısı ve kimyasallara karşı dayançta önemli artışlar elde edilmektedir. Polietilenin proses özellikleri Çizelge 3.3'te, mekanik özellikleri ise Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Polietilenin proses özellikleri [8]

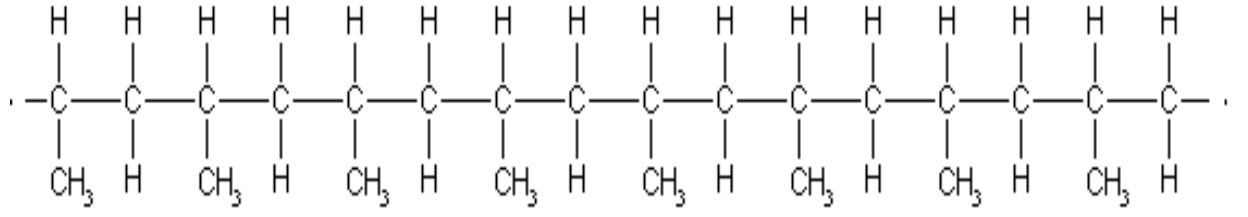
	LLDPE	LDPE	HDPE
Uygulama Sıcaklığı (°C)	120 - 130	105 - 115	130 – 138
Kalıplama Basıncı (bar)	150 – 300	150 – 310	233 - 388
Kalıp Çekmesi	0,02	0,02	0,018

Çizelge 3.4 Polietilenin mekanik özellikleri [8]

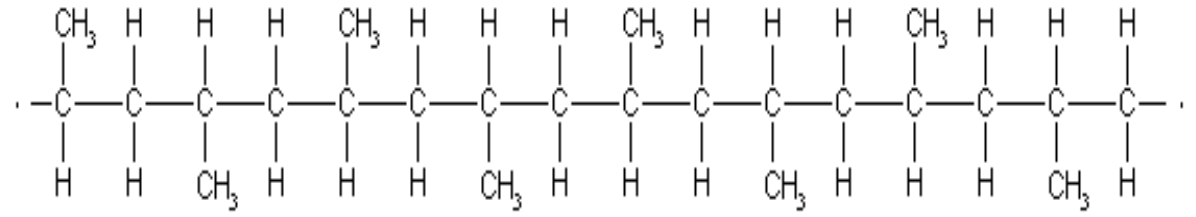
	LLDPE	LDPE	HDPE
Yoğunluk (g/cm ³)	0,91 – 0,925	0,926 – 0,94	0,941 – 0,96
Kristallik Derecesi (%)	55 – 65	30 – 50	70 - 90
Molekül Ağırlığı (10 ³) (g/mol)	10 – 30	30 – 50	50 -250
Çekme Dayanımı (MPa)	8 – 45	3 - 56	10 – 43
Çekme Modülü (MPa)	140 - 1000	110 – 1200	180 - 1800
Uzama (%)	8 – 30	13 - 400	6 - 45

b) Polipropilen

Polipropilen en önemli ikinci endüstriyel poliolefindir. İzotaktik PP en düşük yoğunluğa sahip olanıdır (0.90 - 0.91 g/cm³). Yüksek kristal ergime sıcaklığı vardır (165°C). İlk endüstriyel üretimi 1950 yılında Z-N katalizörleri keşfi sonunda yapılmıştır. Slurry prosesi ile üretilmeye başlanmıştır. Polipropilen, polipropilen homopolimerinden elde edilir. Şekil 3.5 ve 3.6'da görüldüğü gibi kenarlarına metil gruplarının bağlanmasıyla oluşmuştur. Poliolefinler üç tür fiziksel konfigürasyona sahiptirler. Bunlar; izotaktik, sindiotaktik ve ataktiktir. Polipropilende sadece izotaktik ve ataktik konfigürasyon bulunur. İzotaktik PP de tüm metil grupları aynı tarafta bulunurlar ve kristalize olabilirler. Ataktik PP de ise metil grupları rastgele dizilmiştir ve kristalize olamazlar [8], [17].



Şekil 3.5 İzotaktik polipropilenin konfigürasyonu



Şekil 3.6 Sindiotaktik polipropilenin konfigürasyonu

Poilpropilenin kristallik derecesini arttırmak ve morfolojisini modifiye etmek için çekirdek ajanları kullanılır [17]. Bu ajanlar kristallenme derecesini ve kristallenme sıcaklığını artırarak enjeksiyon ile kalıplamada çevrim sayısını azaltırlar. Ayrıca çekme dayancı ve toklukta da artış sağlanır. Polipropilenin proses özellikleri Çizelge 3.5 ve çeşitli mekanik özellikleri ise Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.5 Polipropilenin proses özellikleri [8]

	PP Homopolimer	PP Kopolimer
Uygulama Sıcaklığı	180 – 260	180 – 220
Kurutma Sıcaklığı (°C)	80	80
Kalıplama Basıncı (ton/cm²)	230 – 450	230 – 450

Çizelge 3.6 Polipropilenin mekanik özellikleri [8]

	PP Homopolimer	PP Kopolimer
Yoğunluk (g/cm³)	0,90 – 0,91	0,90 – 0,91
Çekme Dayanımı (MPa)	35 – 40	20 – 35
Çekme Modülü (MPa)	1200 - 2000	1000 – 1500

3.2 Fiber Malzemeleri

Kompozit malzemelerde yükü taşıyan kısım fiber veya fillerlerdir. Sünek matris içerisinde yüksek dayanç ve modülü nedeniyle kompozit yapının iskeletini oluştururlar. Ayrıca kompozit üzerine gelen yükün tamamına yakın, büyük bir kısmını da taşırlar. Plastik matrisli kompozitlerde hatasız bir üretimle fiberlerin yükü taşıma oranı %92'nin üzerindedir. Örneğin tek eksenli çekme deneyinde, tam kopma anında yükün fiberler tarafından taşınan kısmı Eşitlik 3.1 ile bulunur [4].

$$\frac{P_f}{P_c} = \left(\frac{E_f}{E_c} \right) \cdot V_f \quad (3.1)$$

Eşitlikte P_f fiberler tarafından taşınan yük, P_c kompozit üzerine gelen toplam yük, E_f fiberlerin elastiklik modülü, E_c kompozitin elastiklik modülü ve V_f de fiber hacim oranıdır. Elastiklik modülü ve hacim oranı kavramları Bölüm 3.3' te detaylı olarak ele alınmıştır. Fiberlerin dokuda bulunuşu, geometrik oranları, dayancı doğrudan etkileyen birinci parametredir. Bunlar ileriki bölümde matematik eşitliklerle incelenecektir. En genel biçimiyle malzeme ayrımı yapmaksızın fiberler, sürekli ve süreksiz olarak iki ana grupta incelenirler. Sürekli fiberler, eş yönlü ve gelişigüzel dağılımlı olarak iki türde bulunurlar. Ayrıca, sürekli fiberler çeşitli atkı ve çözgü tipleriyle de farklı şekilde dokuma kumaşları imalatında kullanılırlar. Süreksiz fiberler, eş yönlü uyumlu ve düzlemsel gelişigüzel dağılımlı olarak imal edilirler. Kalın parçalar için kırık şeklindeki fiberler ise yapıda üç boyutlu, yani hacimsel olarak dağılırlar [4]. Plastik matrisli kompozitlerin yüksek dayançlı çelik, Alüminyum ve Titanyum alaşımları ile karşılaştırılması söz konusu olduğunda fiber malzemelerinin, kalsik mühendislik

metallerine göre yüksek dayançlı ve elastiklik modüllü olması gerekmektedir. Buradan hareketle plastik matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan fiber türleri; cam, karbon, bazalt ve organik (Aramid) türlerdir.

3.2.1 Cam Fiberler

Günümüzde cam elyafı üretimi gerekli hammaddelerin (Kum, Kaolen, Kireç Taşı, Kolemanit) birlikte karıştırılarak bir fırına beslenmesi ile başlar. Bu fırınlar, gaz veya elektrik enerjisi ile yaklaşık 1600°C'ye ısıtılır. Bu sıcaklıkta fırın içinde eriyen hammaddeler camlaşarak cam eriyiğini meydana getirir. Bu aşamada, cam eriyiği, akıtılmak üzere kanallara yönlendirilir. Bu kanalların ucunda bulunan ve elektrik enerjisi ile ısıtılan kovanlar, cam liflerini akıtmak için kullanılır. Her kovandan 10-24 mikron çapında binlerce lif üretilebilir. Kovan deliklerinden serbest akış ile akan cam eriyiği, mekanik olarak, yüksek hızda dönen bir mandrel üzerine sarılarak, sabit çaplı cam elyafı olarak üretilir. Lifler ayrıca, demetler halinde bir arada tutulabilmesi ve proses sırasında oluşabilecek aşınmalardan korunabilmesi için, bağlayıcı adı verilen bir kimyasal madde ile kaplanır. Bu bağlayıcı, cam elyafının daha sonraki proses işlemleri için gerekli olan temel özellikleri de sağlar. Bu şekilde üretilen ıslak cam lifleri, prosese sokulmadan önce 120-130°C sıcaklıkta, 10-15 saat süre ile hava fırınında kurutulur [15].

3.2.1.1 Cam Fiber Kompozisyonları

Kompozisyonlarına bağlı olarak, değişik cam elyafı cinsleri vardır. Bunlar içinde "E" camı elyafının en başta geldiği görülmektedir. Elektrik ve mekanik özellikleri ile maliyetinin iyi bir denge oluşturması sonucu, bu kalsiyum alüminosilikat bileşiminin, kullanılan toplam cam elyafı takviye malzemeleri içinde %90 pazar payına sahip olduğu görülmektedir. "E-CR"camı, "E" camının modifiye edilmiş şekli olup, asitlere karşı dayanım sağlamak amacı ile kompozisyonunda bor içermemektedir. "ECR" camı elyafı, genellikle kimyasal dayanım istenen tank ve boru imalatında kullanılmaktadır. Yüksek mekanik dayanım aranan ürünler için kullanılan cam elyafı cinsleri Amerika'da "S" camı; Avrupa'da ise "R" camı olarak nitelenmektedir. Kompozitin mukavemetini ve rijitliğini arttıran bu cins cam elyafı havacılık, uzay ve askeri alanlarda, yüksek teknik

performans gereksinimi nedeni ile kullanılmaktadır. Ayrıca, nakliye, spor ve dinlence alanlarında da bazı ürünler için kullanıldığı görülmektedir. Bunların dışında, mükemmel dielektrik özellikler taşıyan ve elektronik endüstrisinde sıkça kullanılan, “D” camı elyafı ve özellikle yüzey tüllerinde kullanılan kimyasal dayanımlı “C” camı elyafı da bulunmaktadır. Başlıca cam elyafı cinslerinin kompozisyonları (% olarak) Çizelge 3.7’de görülmektedir [15].

Çizelge 3.7 Cam elyafı türlerinin kimyasal kompozisyonları [15]

	A	C	E	R	S
SiO ₂	72.0	64.6	52.4	60.0	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	1.5	4.1	14.4	25.0	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	9.0	-
MgO	2.5	3.3	4.6	6.0	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	-	0.3
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	-	-
BaO	-	0.9	-	-	-

3.2.1.2 Cam Fiber Türleri

Cam elyafı takviye malzemeleri, devamlı ve kesikli olarak iki tipte üretilmektedir. Devamlı cam elyafı tipleri: Fitol, dokunmuş fitil, iplik, kumaş, çok katlı dokunmamış fitil ve devamlı demetli keçedir. Kesikli cam elyafı tipleri; kırılmış demetler, kırılmış demetten keçeler ve öğütölmüş liflerdir.

a) Fitol: Devamlı yapıya sahip bir cam elyafı takviye malzemesidir. Çok sayıda delik içeren kovanlardan akan cam liflerinin doğrudan doğruya sarılması ile “Direkt Sarma Fitol veya Tek Uçlu Fitol” olarak üretilebildiği gibi, daha az sayıda delik içeren kovanlardan üretilen cam elyafı demetlerin birbirine paralel olarak bükölmeden sarılması ile “Bileşik Fitol veya Çok Uçlu Fitol” olarak da üretilebilir. Fitol ürünleri, 10-24 mikron çapında liflerden oluşur ve genellikle 1000 metre uzunluğu 600, 1200, 2400 ve 4800 gram ağırlığında olacak şekilde üretilir. Kullanım yeri ve prosesine bağlı olarak, sertlik, lifler arasında eş gerilim, kayganlık ve kolay kırılabilme gibi farklı özellikler fitillere kazandırılabilir. Özel olarak üretilen ve “Spun Roving” adı verilen düğümlü fitilde ana doğrultuya dik yönde takviye sağlayan, ilmekler bulunmaktadır. Bunun

amacı; tek yönlü takviye edilmiş pultruzyon ürünleri gibi kompozitlerde, yanal mukavemeti arttırmaktır.

Genellikle “R” camı elyafından yapılmış fitillere en yaygın olarak epoksi reçine emdirilerek yapılan “Stratipreg veya Prepreg” ismi verilen bir diğer cam elyafı takviye malzemesi de elyaf sarma metodu ile yüksek mekanik dayanım aranan depo ve borularda otoklavda kalıplanmak üzere kullanılmaktadır.

b) Dokunmuş Fitol: Dokuma amacı ile üretilmiş fitillerin belirli bir düzen içinde dokunması ile yapılan cam elyafı takviye malzemesidir. El yatırması metodu ile yapılan kalıplamalarda daha yüksek mekanik dayanım sağlamak amacı ile kullanılır. Ayrıca, özel dokuma tipleri ile, fenolik reçine emdirilerek kesme taşlarının üretiminde de kullanılır.

c) Cam Elyafı iplik: Cam elyafı demetlerinin bükümlü hale getirilmesi ile elde edilen takviye çeşididir. Genellikle dokunmuş kumaş olarak, plastiklerin takviyesinde kullanılır.

d) Kumaş: Cam elyafı ipliklerinden dokunmuş kumaşlardır. Genellikle epoksi reçine takviyesinde kullanılır. Başlıca uygulamaları, baskılı devre üretimi, devre kesici tüpleri üretimi gibi elektrik araç gereç üretimidir.

e) Dokunmamış (non-woven) Fitol: Belirli yönlerde mukavemet sağlamak amacı ile tek kat veya çok kat olarak dokunmadan bir arada tutturulmuş takviye ürünleridir. Özellikle yüksek mekanik dayanım ve hassasiyet aranan havacılık ve uzay sektöründe kullanılır.

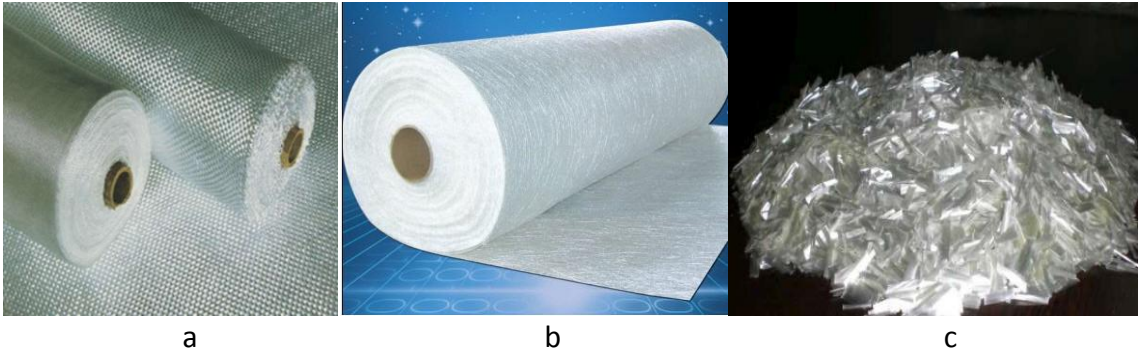
f) Devamlı Demetli Keçe: Kovandan akan liflerin, düzgün dağılımlı tabakalar oluşturacak şekilde yayılmasından oluşan cam elyafı takviye çeşididir. Bu şekilde yayılan lifler, ikinci bir bağlayıcı kullanılarak bir arada tutulur. Bağlayıcı cinsi ve miktarı, öngörülen uygulama alanına bağlıdır. Başlıca kullanım alanları; önceden şekillendirilerek (preform) veya baskılı devre plakası üretimleridir. Ayrıca köpük takviyesinde de kullanılır.

g) Kırpılmış Demetler: Cam elyafı demetlerinin 3-12 mm. uzunluğunda kırpılmış şeklindedir. Termoplastik reçinelerin ve termoset reçinelerin takviyelerinde kullanılır. Kullanım alanı ve takviye edilen reçine özelliklerine bağlı olarak, demet bütünlüğü, akma ve reçine uyum özelliklerine sahiptir.

h) Kırpılmış Demetten Keçeler: Bu cam elyafı takviye çeşidi, 50 mm. uzunluğunda kırpılmış cam elyafı demetlerinin, stirende çözünür bir bağlayıcı ile bir arada

tutulmasından oluşmaktadır. Kullanılan bağlayıcı miktarı, proses gereklerine ve bitmiş ürün özelliklerine bağımlı olarak %3-10 arasında değişmektedir. Kırpılmış demetten keçeler, açık kalıplama metodu ile yapılan kalıplamalarda ve çift film arasında devamlı veya kesikli levha kalıplamasında kullanılır.

i) Öğütülmüş Lifler: Öğütme işlemi sonucunda, uzunlukları 0.1-0.2 mm.'ye düşürülmüş cam elyafı takviye malzemesidir. Bu liflerin çapları, 10-17 mikron arasında değişir. Öğütülmüş liflerin başlıca kullanım alanı, termoplastik reçinelerin ve poliüretan reçinenin takviyesidir (RRIM). Kompozit'in, rijitlik, boyut stabilitesi ve darbe dayanımı gibi özelliklerini yükseltmek için öğütülmüş lif boyu çok kısa olduğundan, bu takviye malzemesi, diğer kompozitlerin takviyesinde genellikle kullanılmaz. Kompozitlerin takviyesinde ayrıca, devamlı veya kırpılmış demetten keçe gibi dokunmamış ürünlerle, dokunmuş kumaşların bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok katlı takviye malzemeleri de, dikilerek, iğnelenerek veya üç boyutlu preformlar halinde, özellikle reçine enjeksiyonu gibi kapalı kalıplama metodlarında kullanılmaktadır [5]. Şekil 3.7' de bazı cam fiber türleri resimle gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Bazı cam fiber türleri a) Dokuma, b) Keçe, c) Kırpık fiberler

3.2.2 Karbon Fiberler

Karbon lifi ilk defa karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu anlaşıldıktan sonra üretilmiştir. Cam elyafının metale göre sertliğinin çok düşük olmasından dolayı sertliğin 3-5 kat artırılması çok belirgin bir amaçtı. Karbon elyafları çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaf tam anlamıyla karbonlaşırlar ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Artık karbon elyafı da grafit elyafı da aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde

olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. Karbon fiber üreticilerinin devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyafının üretimi çok pahalı olduğu için ancak uçak sanayinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli uygulamalarında kullanılmaktadır [5], [24]. Karbon elyafı piyasada 2 biçimde bulunmaktadır:

1) Sürekli elyaf: Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve prepreg'lerde kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.

2) Kırpılmış elyaf: Genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorgunluk dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptirler [5].

Karbon elyafı genellikle ziftten veya PAN'den (Poliakrilonitril) elde edilir. Zift tabanlı karbon elyafları göreceli olarak daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Buna bağlı olarak yapısal uygulamalarda nadiren kullanılırlar. PAN tabanlı karbon elyafları kompozit malzemeleri daha sağlam ve daha hafif olmaları için sürekli geliştirilmektedir. PAN'ın karbon elyafına birbirini takip eden dört aşamada dönüştürülmektedir:

1. Oksidasyon: Bu aşamada elyaf hava ortamında 300°C'de ısıtılır. Bu işlem elyaftan hidrojenin ayrılmasını daha uçucu olan oksijenin eklenmesini sağlar. Ardından karbonizasyon aşaması için elyaflar kesilerek grafit teknelerine konur. Polimer, merdiven yapısından kararlı bir halka yapısına dönüşür. Bu işlem sırasında elyafın rengi beyazdan kahverengiye döner ve ardından siyah olur.

2. Karbonizasyon: Elyafların yanıcı olmayan atmosferde 3000°C'ye kadar ısıtılmasıyla liflerin 100% karbonlaşma sağlanması aşamasıdır. Karbonizasyon işleminde uygulanan sıcaklık üretilen elyafın sınıfını belirler.

3. Yüzey iyileştirmesi: karbonun yüzeyinin temizlenmesi ve elyafın kompozit malzemenin reçinesine daha iyi yapışabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılır.

4. Kaplama: Elyafın sonraki işlemlerde aşınmasını önlemek için yapılan nötr bir sonlandırma işlemidir. Elyaf reçine ile kaplanır. Genellikle bu kaplama işlemi için epoksi

kullanılır. Kompozit malzemede kullanılacak olan reçine ile elyaf arasında bir arayüzey görevi görür [5].

Karbon elyafının diğer tüm elyaflara göre en önemli avantajı yüksek modül değeridir. Karbon elyafı bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzemedir. Buna rağmen karbon elyafının bazı dezavantajları vardır [9]:

- Etkili bir bağlayıcı ajanın olmaması
- Yüksek sıcaklıkta oksitlenmeye hassas olması
- Fiyatının yüksek olması

Karbon takviyeli kompozit malzemelerin diğer alışlagelmiş mühendislik malzemelerine göre karşılaştırılması yapıldığında; 1020 imalat çeliğinden 5 kat daha dayançlı ve 5 kat daha hafifken, 6061 alüminyum alaşımından 7 kat daha dayançlı ve 1,5 kat daha hafif olduğu görülmektedir [9]. Karbon fiber destekli kompozit malzemelerin yorulma dayancı tüm metal malzemelerin yorulma dayancından, çatlak durdurucu etkisi nedeniyle daha yüksektir. Aynı zamanda karbon fiber uygun matris malzemesi ile birleştirildiğinde korozyon dayanımı mükemmel kompozit malzeme üretimi olasıdır. Belirli zift bazlı karbon fiberler bakırdan 3 kat daha iyi ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptirler. PAN ve zift bazlı karbon fiberlerin elektrik iletkenliği özelliğinden çeşitli bilgisayar parçalarında toplanan statik elektiriği boşaltmak amacıyla kullanılır. Bunlar sıcaklıkla erime ve yumuşama göstermediklerin, uçak frenleri, roket nozulları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılırlar. Karbon fiberlerin dayanımı oksitleyeci olmayan ortamlarda sıcaklıkla artar. Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9’da PAN ve zift bazlı karbon fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir. PAN bazlı fiberle karşılaştırıldığında zift bazlı fiberlerin daha geniş kristalin yapılar içermesi ve mikroyapı oryantasyonunun daha iyi olması nedeniyle daha üstün modüle sahip oldukları ve iyi elektriksel iletkenliği ve düşük termal genleşme katsayısına sahip görülmektedir. Bu avantajlar ile zift bazlı karbon fiberler uydu yapımında kullanılır.

Çizelge 3.8 PAN bazlı karbon fiberlerin mekanik özellikleri [9]

Özellikler	Ticari Tip	Havacılık Endüstrisinde Kullanılan Türler		
	Standart Modül	Standart Modül	Orta Modül	Yüksek Modül
Elastiklik modülü (GPa)	228	220-241	290-297	345-448
Çekme dayanımı (MPa)	380	3450–4830	3450–6200	3450-5520
Uzama (%)	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Elektriksel özdirenç ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	1650	1650	1450	900
Termal iletkenlik (W/m·K)	20	20	20	50-80
Termal genleşme katsayısı (10^{-6}K)	-0,4	-0,4	-0,55	-0,75
Yoğunluk (gr/cm^3)	1,8	1,8	1,8	1,9
Karbon oranı (%)	95	95	95	+99
Filament çapı (μm)	6-8	6-8	5-6	5-8
Üretici firmalar	Zoltek, Fortafil, SGL	BPAmoco, Hexcel, Mitsubishi Rayon, Toho, Toray, Tenax, Soficar, Formosa		

Karbon fiberler inorganik malzemeler olduklarından nem, atmosfer şartları, solventler ve oda sıcaklığındaki zayıf asitlerden etkilenmezler. Ancak yüksek sıcaklıklarda oksidasyon bir sorun teşkil eder. Düşük modüllü PAN, yüksek modüllü PAN ve zift bazlı karbon fiberlerin uzun çalışma süreleri için oksidasyon sıcaklıkları 350-450°C'dir. Empirüteler düşük sıcaklıklarda oksidasyonu başlatma eğiliminde olduklarından, oksidasyon direnci yüksek saflıktaki fiberler ile sağlanabilir [9].

Çizelge 3.9 Zift bazlı karbon fiberlerin mekanik özellikleri

Özellikler	Düşük modüllü	Yüksek modüllü	Çok yüksek modüllü
Elastiklik modülü (GPa)	170-241	380-620	690-965
Çekme dayanımı (MPa)	1380-3100	1900-2750	2410
Uzama (%)	0,9	0,5	0,4-0,27
Elektriksel özdirenç ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	1300	900	220-130
Termal iletkenlik (W/m·K)	–	–	400-1100
Termal genleşme katsayısı (10^{-6}K)	–	-0,9	-1,6
Yoğunluk (gr/cm^3)	1,9	2,0	2,2
Karbon oranı (%)	+97	+99	+99
Filament çapı (μm)	11	11	10
Üretici firmalar	BPAmoco, Mitsubishi Kasei		BPAmoco

Karbon fiberler de cam fiberler gibi sürekli fiberli, keçe, kumaş ve kırpık şeklinde imal edilirler. Söz konusu türlere göre görüntüler Şekil 3.8’ de verilmiştir.



a

b

c

Şekil 3.8 Karbon fiber türleri a) Sürekli fiber, b) Kırpık, c) Dokuma kumaş

3.2.3 Aramid Fiberler

Aramid kelimesi bir çeşit naylon olan aromatik poliamid maddesinden gelmektedir. Aramid elyafı piyasada daha çok ticari isimleri Kevlar (DuPont) ve Twaron (Akzo Nobel) ile bilinmektedir. Farklı uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için birçok farklı özelliklerde aramid elyafı üretilmektedir. Önemli özellikleri; yüksek çekme, darbe, aşınma, yorulma ve kimyasallara karşı yüksek dayanç olarak sıralanabilir. Ayrıca cam elyaflara göre de %35 daha hafiftir. UV dayançları henüz tam çözüme ulaştırılmamıştır. Zira bazı tür aramid elyafı ultraviyole ışınlar maruz kaldığında bozulma göstermektedir. Sürekli karanlıkta saklanmaları gerekmektedir. Genellikle polimer matrisler için takviye elemanı olarak kullanılan aramid elyafının bazı kullanım alanları:

- Balistik koruma uygulamaları: Askeri kasklar, kurşun geçirmez yelekler
- Koruyucu giysiler: Eldiven, motosiklet koruma giysileri, avcılık giysi ve aksesuarları
- Yelkenliler ve yatlar için yelken direği, tekne gövdesi
- Hava araçları gövde parçaları
- Endüstri ve otomotiv uygulamaları için kemer ve hortum
- Fiberoptik ve elektromekanik kablolar
- Debriyajlarda bulunan sürtünme balatalarında ve fren kampanalarıdır.

Uygulamada 3 çeşit aramid fiber mevcuttur:

- Düşük modüllü (Low Modulus, LM): Technora T200 (Teijin)
- Orta modüllü (Intermediate Modulus, IM): Twaron (Akzo)
- Yüksek Modüllü (High Modulus, HM): Kevlar (Dupont)

Yüksek modüle sahip aramid fiberlerden Kevlar 29 yüksek tokluk, Kevlar 49 yüksek elastiklik modülüne sahiptir. Havacılık ve uzay uygulamalarında yüksek elastiklik modülünün yanı sıra yüksek tokluk, darbe dayancı, iyi balistik özellikleri nedeniyle Kevlar 49 daha çok tercih edilmektedir. Ultra yüksek dayanım gerektiren durumlar için

de çok yüksek çekme dayanımına sahip Kevlar 149 mevcuttur. Yüksek modüllü aramid fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.10 Yüksek modüllü aramid fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Filament Çapı (μm)	Çekme Modülü ^(a) (GPa)	Çekme Dayancı ^(a) (MPa)	Uzama (%)	İplik Sayısı
Kevlar 29 (Yüksek tokluk)	1,44	12	83	3,6 - 2,8 ^(b)	4,0	134 - 10000
Kevlar 49 (Yüksek modül)	1,44	12	131	3,6 - 4,1	2,8	25 - 5000
Kevlar 149 (Ultra yüksek modül)	1,47	12	179	3,4	2,0	1000
(a) ASTM D 2343, impregnated strand. (b) ASTM D 885, unimpregnated strand.						

3.2.4 Bazalt Fiberler

Son yıllarda S-Camı ile Karbon fiberine alternatif olarak Bazalt fiberlerin kullanımı gündeme gelmiştir. Bazalt, ağırlıkça yaklaşık %52 silika (SiO₂) içeren, sert, siyah renkli volkanik kayalardır. Bazalt kayalar ince taneli çeşitli minerallerin karışımından oluşur. Genel olarak olivin, proksin ve plagioclase minerallerini içerirler. Bazalt kayalar ergiyik halde iken yüksek viskoziteye sahip olduğundan çok hızlı bir şekilde akabilir. Bu yüksek akış kabiliyeti düşük silika içeriğinden kaynaklanmaktadır. Bazalt fiberler volkanik bazalt kayaların başka bir ilave olmaksızın ergitilmesi ve fiber olarak çekilmesi ile üretilirler. Bazalt ve cam fiberlerin kimyasal kompozisyonları karşılaştırıldığında bazalt fiberlerin doğal olarak içerdiği minerallerin, çeşitli özelliklerin elde edilmesi için cam fiberlere çeşitli özellikler kazandırılmak için ilave edildiği görülmektedir. Al₂O₃, viskoziteyi arttırmak ve kimyasal dayanım sağlamak amacı ile ilave edilirken; kalsiyum, titanyum ve magnezyum oksitler korozyon ve neme karşı dayanım elde etmek için kullanılırlar. Bazalt içerisinde bulunan demir oksitler de bazalt fiberlere altın rengini vermektedir.

Bazalt fiberler ve özellik olarak en yakın S-Camı fiberlerinin kimyasal bileşimleri Çizelge 3. 11 'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.11 Bazalt ve S-Camı fiberlerinin kimyasal kompozisyonları [9]

Bileşim	Bazalt Fiber	S-Camı Fiber
SiO ₂	% 48 - 59	% 52 - 56
B ₂ O	< % 1	% 5,5 - 10
CaO	% 6 - 9	% 21 - 24
TiO ₂	% 0,8 - 2,3	% 0 - 1,5
Fe ₂ O ₃	% 7 - 12	< % 1
Al ₂ O ₃	% 15 - 18	% 12 - 14
MgO	% 3 - 5	% 0 - 5
NaO + K ₂ O	% 4 - 5	% 0 - 1

Sürekli bazalt ve cam fiberler benzer şekilde üretilirler. Cam fiber bazalt fiberlerin üretiminde kullanılan ekipmanlar birbirine benzerken sıcaklık ve viskozite parametreleri değişiklik gösterir. Bazalt fiberlerin üretiminde dışarıdan herhangi bir ilave malzemesine gerek duymaz. Bazalt kayalar önce kırılır ve yıkanır, kurutma işleminden sonra direkt olarak fırına beslenir. Ergimiş doğal bazalt hızla soğuyarak, kısmi kristalin yapıdan tamamen amorf yapıya dönüşür. Amorf katı son derece yüksek viskoziteli süper-soğumuş sıvı gibi davranır. Ergiyik bazalt üzerinde yüzlerce mikro delik bulunan platin bir burca beslenir ve bu deliklerden akışı sağlanarak filament olarak çekilir. Filament çapları delikler çapları ve bazaltın viskozitesi ile kontrol edilir. Üretilen filamentler su ile soğutulur ve katılaşması sağlanır. Elde edilen filament çapları 7-17 µm dir. Daha sonra kullanım amacına göre gereken apreleme yapılabilir. Bazalt fiberler, fiber çekme işleminden sonra sürekli fiber, kırpık, düz dokuma kumaş ve keçe vb. şekillerde piyasaya sürülürler. Bazalt fiberler kendisine en yakın özellik gösteren S-Camı fiberlerle karşılaştırılırlar. Mekanik ve ısı özellikler tek bir fiber için karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12 Tek bir bazalt ve S-Camı filamentin mekanik ve ısıl özelliklerinin karşılaştırılması [14]

	Bazalt fiber	S-Camı fiber
Çekme Dayancı (MPa)	4000 - 4300	3450 - 3800
Elastiklik Modülü (GPa)	84 - 87	72 - 76
Kullanım sıcaklığı (°C)	-260 - +560	-60 - +460

3.3 Kompozit Malzeme Mikromekaniği

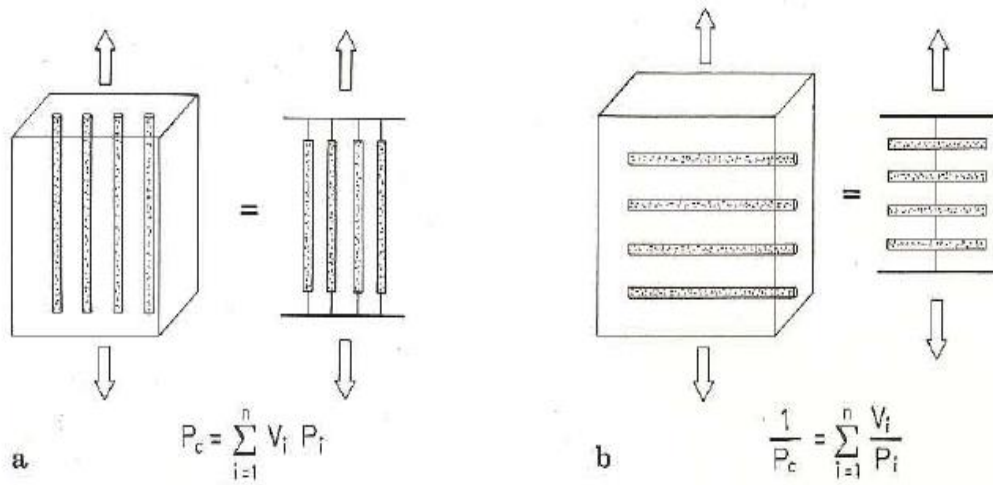
Kompozit malzeme kuramında; kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin özellikleri kullanılarak kompozit malzeme davranışının belirlenmesi, bu konunun matematik modelinin esasını oluşturmaktadır. Bileşenlerin dayanç, elastiklik modülü, uzama, sertlik, yoğunluk ve ısıl iletkenlik vb. gibi mekanik ve fiziksel özelliklerinin bilinmesiyle kompozitin özelliklerinin saptanması kompozit matematiğinin temel amacıdır [4].

Kompozit malzeme mikroskobik olarak heterojen olmakla birlikte makroskobik olarak homojen kabul edilebilir. Başka bir deyişle, kompozit olarak imal edilmiş bir eleman, bütünsel olarak ortalama bir özellik ile ifade edilir. İmal edilen bir kompozitin özellikleri deneysel olarak saptanabileceği gibi matematik eşitliklerle de bulunabilir. Hesaplama elde edilen değerler deney sonuçları ile karşılaştırılır. Matematik eşitlikleri kullanarak yapılan hesaplamalarda hatasız bir üretim yapıldığı ve fiber – matris arayüzeyinin sorunsuz yapıldığı kabul edilir. Matris içerisindeki fiberler ve konumları göz önüne alındığında **Kompozit Mikromekaniği**, tabaka yapılar, paneller vb. durumlarda ise **Kompozit Makromekaniği** başlığı altında incelenirler.

Şekil 3.8’de verilen hatasız üretilmiş düzgün yayılı ve eş yönlü sürekli fiberli bir kompozitte; fiberlere paralel (1) ve dik (2) yönündeki zorlamaların incelenmesi kompozit mikromekaniğinin temelini oluşturmaktadır. Diğer taraftan, kompozitlerin mekanik davranışları terimi kullanıldığında, esas olarak dayanç (mukavemet) ve elastiklik modülü anlaşılır. Doğal bir gelişim olarak kompozit malzemelerin mekanik özellikleri kendisini oluşturan bileşenlerin özellikleri ve dokuda bulundukları miktarları

(hacim oranları) ile doğrudan ilişkili olacağı açıktır. Şekil 3.9’ da 1 yönü ana destekleme doğrultusu olup, teoremin doğru uygulanabilmesi için aşağıdaki kabuller yapılır.

- Kompozit plaka başlangıçta gerilmemiş ve lineer elastik olup, makroskobik olarak homojen ve ortotropdur.
- Fiberler, homojen, lineer elastik, izotrop, dokuda düzgün yayılı dizilmiş olup matrisle mükemmel arayüzey bağı oluşturmuşlardır.
- Matris, homojen lineer elastik ve izotrop olup hatasız üretilmiştir [1].



Şekil 3.9 Fiberlere paralel (1) ve dik (2) yöndeki zorlamalar ve modelleri a) Voight, b) Resus

Matematik modellerde indis olarak c kompoziti, f fiberleri, m matrisi ifade etmektedir. (1) doğrultusunda zorlama yapıldığında elastik alanda gerinimler birbirine eşittir ($\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m$). Bu kısaca “Eşit Gerinim Koşulu = Isostrain Conditions” olarak bilinir. Elastiklik modülü;

$$E_1 = E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (3.2)$$

eşitliği ile belirlenir. Eşitlikte V_f ve V_m sırası ile, fiber ve matrisin hacim oranları olup,

$$\%V_f + \%V_m = \%100 \text{ veya } V_f + V_m = 1 \quad (3.3)$$

dir. Bu gösteriliştten hareketle,

$$E_1 = E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) \quad (3.4)$$

sonucu elde edilir ki, bu eşitlik aynı zamanda **Karışımlar Kuralı** olarak da bilinir. Kompozit bileşenleri yay olarak modellendiğinde bu paralel toplama kuralına “Voight Modeli” de denir. (3.4) eşitliği iyi bir yaklaşım ve hatasız bir üretimle dayanç ya da özelde çekme dayanıcı için;

$$\sigma_1 = \sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad (3.5)$$

şeklinde yazılır. Eşitlikteki σ çekme dayanıcıdır. Benzer şekilde (2) yönünde zorlama yapıldığında, elastik alanda gerilmeler birbirine eşit olup ($\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$) kısaca “Eşit Gerilme Koşulu = Isostress Conditions” olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda, kompozitin elastiklik modülü;

$$E_c = E_2 = \frac{E_f \cdot E_m}{E_f \cdot V_m + E_m \cdot V_f} \quad (3.6)$$

eşitliği ile bulunmaktadır. Bu ifadeye yay modellemesinden hareketle “Reuss” modeli de denir. (3.6) eşitliğinin pay ve paydası E_m ’ye bölünürse;

$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{1}{V_m + V_f \cdot \left(\frac{E_m}{E_f}\right)} \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilir. Böylece (E_2/E_m) oranının (E_m/E_f) ile değişimi Çizelge 3.13’de verildiği gibi incelenebilir. Sonuçta, dik yönde yapılan zorlamada elastiklik modülünün daha çok matrisin kontrolünde olduğu yargısına varılır.

Çizelge 3.13 Dik yönde zorlama yapıldığında (E_2 / E_m) oranının (E_m / E_f) ile değişimi

E_m / E_f	V_f							
	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	1.0
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1/10	1	1.22	1.56	1.82	2.17	3.57	5.26	10
1/100	1	1.25	1.66	1.98	2.46	4.80	9.17	100

Dik (2) yönündeki zorlamalara bir başka yaklaşım da Halpin – Tsai tarafından yapılmıştır. Halpin – Tsai geliştirdikleri çok amaçlı eşitlikle dik yöndeki elastik özellikleri bulmayı amaçlamışlardır. Genel anlamıyla;

$$\frac{M}{M_m} = \frac{1 + \xi \cdot \eta \cdot V_f}{1 - \eta \cdot V_f} \quad (3.8)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada;

$$\eta = \frac{(M_f/M_m) - 1}{(M_f/M_m) + \xi} \quad (3.9)$$

(3.8) ve (3.9) eşitliklerinde

$M = E_2, G_{12}$ ve v_{23} gibi dik yöndeki kompozit modülleri

$M_f = E_f, G_f$ ve v_f gibi fiber modülleri

$M_m = E_m, G_m$ ve v_m gibi fiber modülleri

dir. ξ bir katsayı olup, genel anlamda termoset plastik matrisli kompozitler için 0.2 alınmaktadır. Diğer taraftan, (3.4) eşitliği, matris dokusunda bulunan fiber dağılımı ve oryantasyonuna göre de modifiye edilerek aşağıdaki gibi yazılır.

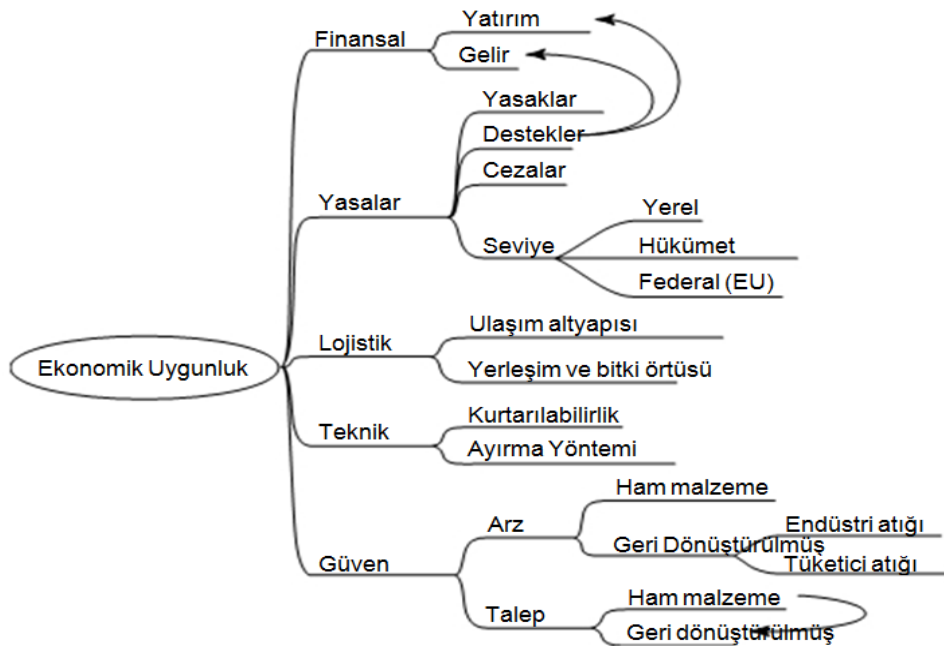
$$E_1 = E_c = \eta_0 \cdot \eta_l \cdot E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) \quad (3.10)$$

Eşitlikte η_0 fiber oryantasyon yani dizilim faktörü, η_l ise fiber boyu faktörüdür. Plastik matrisli kompozitlerde boyu 10 mm'den büyük fiberler için $\eta_l \cong 0.99$ alınır. η_0 yön faktörü ise Şekil 3.8'de gösterilen model üzerinde (1) yönünde zorlama yapıldığında;

$\eta_0 = 1.0$, (2) yönünde zorlama yapıldığında $\eta_0 = 0.0$ alınır. Düzlemsel gelişigüzel dağılımlı keçede $\eta_0 = 3/8$ ve dokuma kumaşta $\eta_0 = 1/2$ alınarak problem çözülür [4].

PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ

Bir malzemenin geri dönüştürülmeye uygun olup olmadığını etkileyen çeşitli etmenler vardır. Bu etmenlerin başında “Geri dönüştürülmüş ürünün pazarda alıcısı var mı?” ya da “Üretimi ekonomik açıdan uygun mu?” sorusudur. Bu soruları cevaplanmamış bir geri dönüşüm planı başarısızlığa uğrayacaktır. Geri dönüştürülmüş ürünü elde edebilmek için, gerekli toplama, ayrıştırma ve geri dönüştürme proseslerinin hepsi sırasıyla kolaylıkla yapılabilir. Ancak bu geri dönüştürülmüş hammaddenin yeni uygulamalarda yer bulamaması, yapılan tüm uğraşın boşa olduğunu gösterir [26].



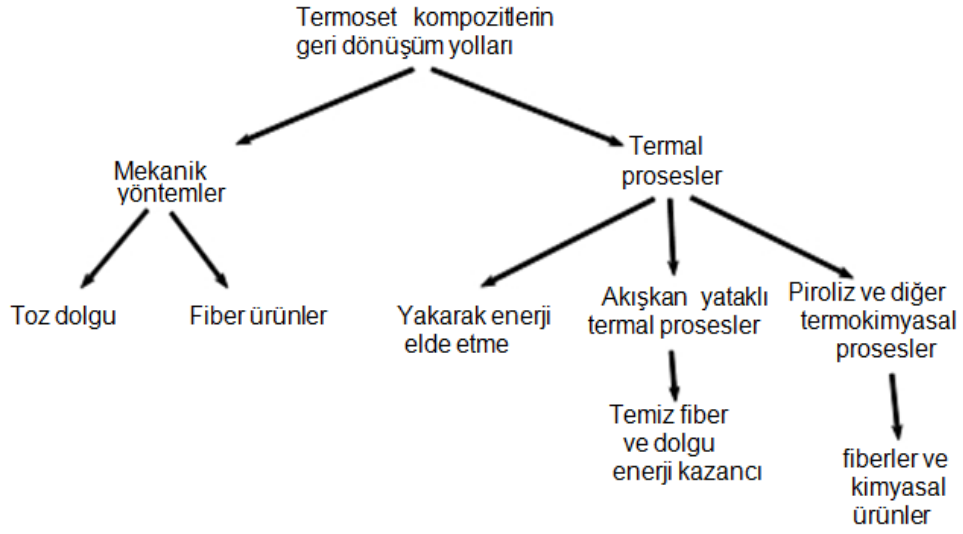
Şekil 4.1 Geri dönüşümün ekonomik modeli

Şekil 4.1’de geri dönüşümün ekonomik modeli gösterilmiştir. Burada sırasıyla önemli etkenler, finansal sorunlar, gerekli yasalar, lojistik altyapısı, uygun yöntem seçimi ve elde edilen ürünün yeniden kullanımda sorun oluşturmaması şeklinde sıralanabilir. Daha önce de sözü edildiği gibi kompozit malzemeler diğer malzeme türlerine göre gelişmiş bir performans sunar. Genellikle yüksek maliyetli olup, uzun ömür ve performans gerektiren mühendislik uygulamalarında kullanılırlar. Bu durum geri dönüşüm uygulamalarının diğer malzemelerden daha farklı tutulması gerektiğini göstermektedir [26].

4.1 Kompozitlerin Geri Dönüşümündeki Termal Yöntemler

Geri dönüşümün ana amacı malzemeleri geri dönüştürerek çevreye verilen zararlı etkiyi azaltmaktır. Genel olarak bir malzemeyi ekonomik olarak geri dönüştürerek kullanmak, o malzemenin hammaddeden üretim proseslerini geliştirmek ve maliyetini azaltmaya çalışmaktan daha mantıklıdır. Bir malzemeyi geri dönüştürmek hem ekonomik nedenlerden hem de çevresel etkiler göz önüne alındığında daha faydalıdır.

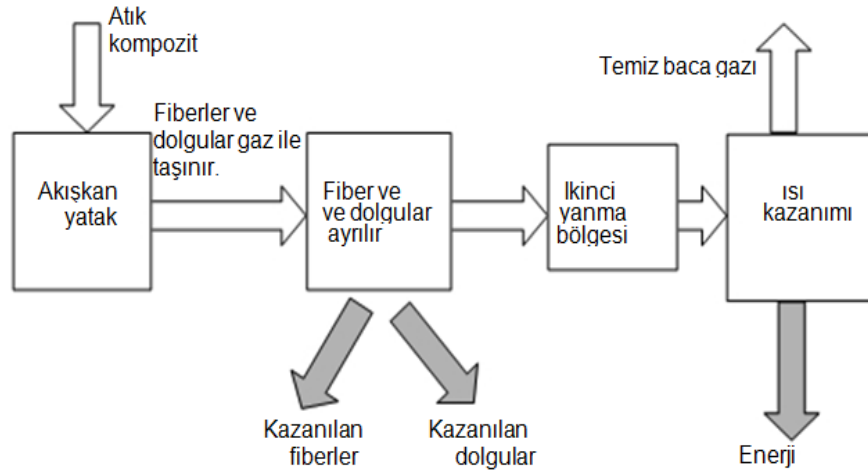
Termoplastik matrisli kompozitler doğrudan ergitme ve kalıplama metotlarıyla geri dönüştürülüp, yüksek değerli malzemeler haline getirilebilir. Ancak termoset matrisli kompozitlere ergitme işlemi uygulanamadığından geri dönüşüm olanakları kısıtlıdır. Bu nedenle termoset matrisli kompozitlerden geri dönüşüm sağlayabilmek için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Şekil 4.2’de termoset matrisli kompozitlerin bazı geri dönüşüm yöntemleri gösterilmiştir. Yöntemler en genel biçimiyle iki grupta incelenebilir. Bu yöntemler mekanik ve termal yöntemlerdir. Mekanik yöntemlerde kompozit parçalanarak, küçük parçacıklı (granül veya agromel) yarı mamül hammadde elde edilebilir. Termal yöntemlerde ise enerji yüklemesiyle malzemenin ayrıştırılması hedeflenmiştir. Bu ayrıştırma işlemleri yakarak enerji elde etme (çevreye duyarlı çalışmalar açısından istenmeyen yöntemdir), akışkan yatak kullanarak matris ve fiberi ayırma, piroliz ve diğer termokimyasal yöntemleri de kullanarak kompoziti ayrıştırma olarak sıralanabilir [26], [27].



Şekil 4.2 Termoset matrisli kompozitlerin geri dönüşüm yöntemleri

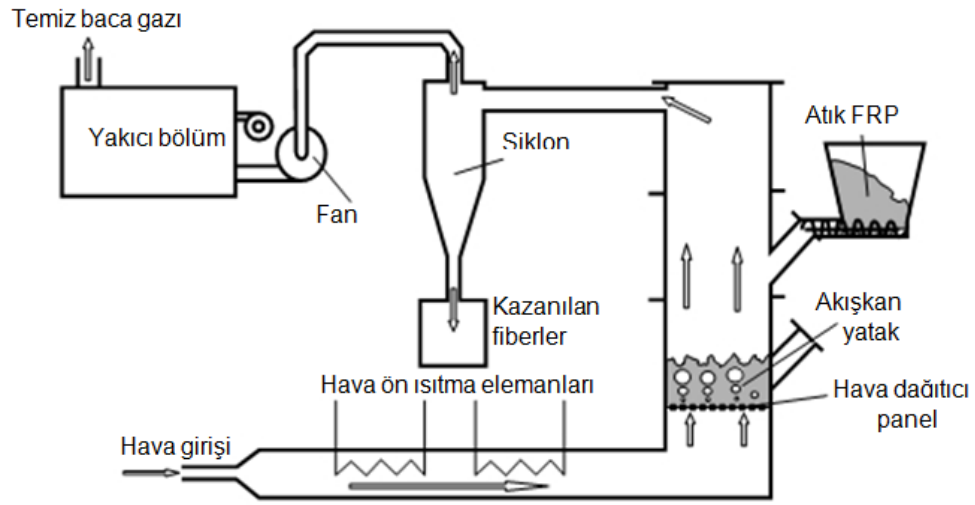
4.1.1 Kompozitlerin Akışkan Yataklı Geri Dönüşüm Prosesi

Akışkan yatak teknolojisi kullanımı çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Katı malzemeler için uygun ve önerilen bir yöntem olup, proses sırasında iyi bir karıştırma ve sıcaklık kontrolüne gereksinim vardır. En çok katı yakıtlardan enerji eldesi ve kimya sanayinde katı-gaz reaksiyonlarında kullanılır. Şekil 4.3’deki akış diyagramında görüldüğü gibi yapılan bir çalışma ile akışkan yataklı proses ile termoset kompozitlerin geri dönüşüm yöntemi daha da geliştirilmiştir. Bu yöntemde termoset matris oksidatif yöntemlerle ortadan kaldırılıp tekrar kullanıma uygun fiberler elde edilmeye çalışılır [28], [29].



Şekil 4.3 Akışkan yataklı geri dönüşüm prosesi akış diyagramı [24]

Şekil 4.3'deki akışkan yataklı geri dönüşüm prosesleri Şekil 4.4'te şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.4 Akışkan yatakta geri dönüşüm [28]

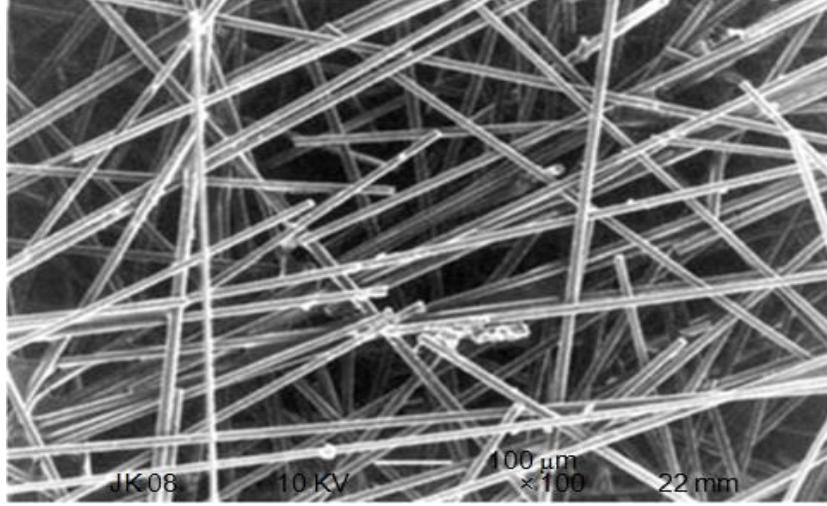
Geri dönüştürülen ürünlerin önemli bir kısmı fiberlerdir. Bunların kısa fiber veya kırık olarak doğrudan yeni proseslerde kullanılması amaçlanmaktadır [30]. Şekil 4.5'te akışkan yatakta geri dönüştürülmüş kırık karbon fiberler görülmektedir. Proses sırasında işlenen ürün havacılık sanayiinde kullanılan epoksi matris karbon fiberli plakalardır [30].



Şekil 4.5 Geri dönüştürülmüş karbon fiberler [19]

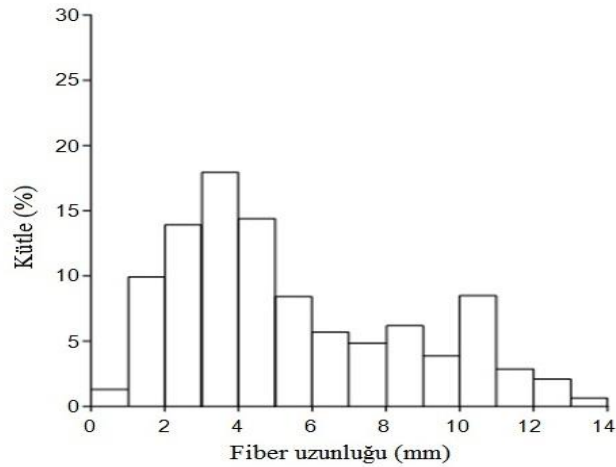
Daha yaygın kullanım alanı bulan vinil ester reçine E-Camı fiberli kompozitin geri dönüşümüyle elde edilen kırık camların SEM resimleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir [24].

Burada proses sonucu ortalama 35 – 50 mm boyunda elde edilen cam fiberlerin ne denli temiz yüzeye sahip olduğu gör÷lmektedir. Bu sonuç, yeniden kullanımda ilave bir işleme gerek olmadığını açıkça göstermektedir ki, maliyetlerin düşür÷lmesi açısından önemli bir veridir.



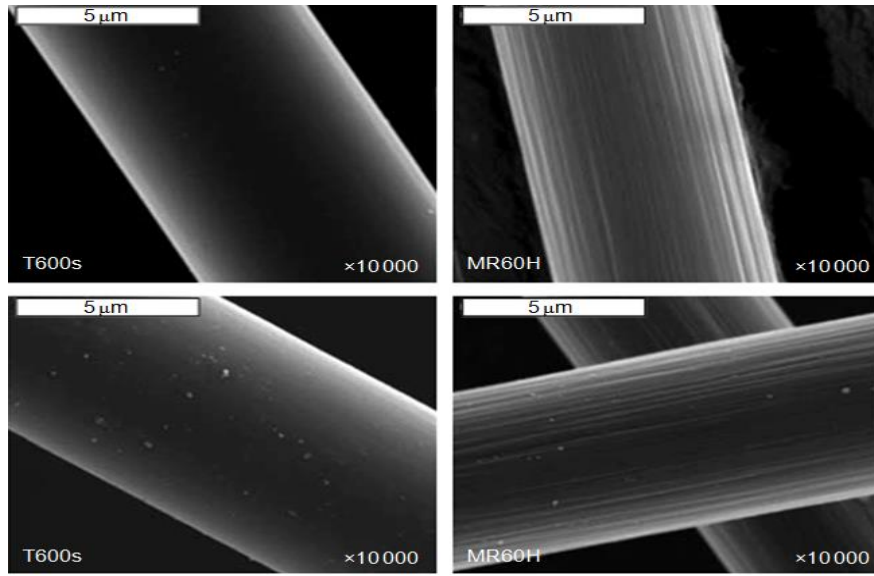
Şekil 4.6 Geri dönüştür÷lmüş cam fiberlerin SEM görüntüsü [24]

Otomotiv sanayiinde kaporta yapımında kullanılan SMC yöntemiyle üretilmiş ve hibrit kompozitlerin ilk basamağını oluşturan üç bileşenli bir kompozitin geri dönüştür÷lmüş sonucu fiber boyları üzerinde yapılmış çalışmanın sonuçları da Şekil 4.7’de gösterilmiştir [24].



Şekil 4.7 SMC yöntemiyle üretilmiş kompozit malzemeden elde edilen cam fiberlerin uzunluk dağılımı grafiğı [24]

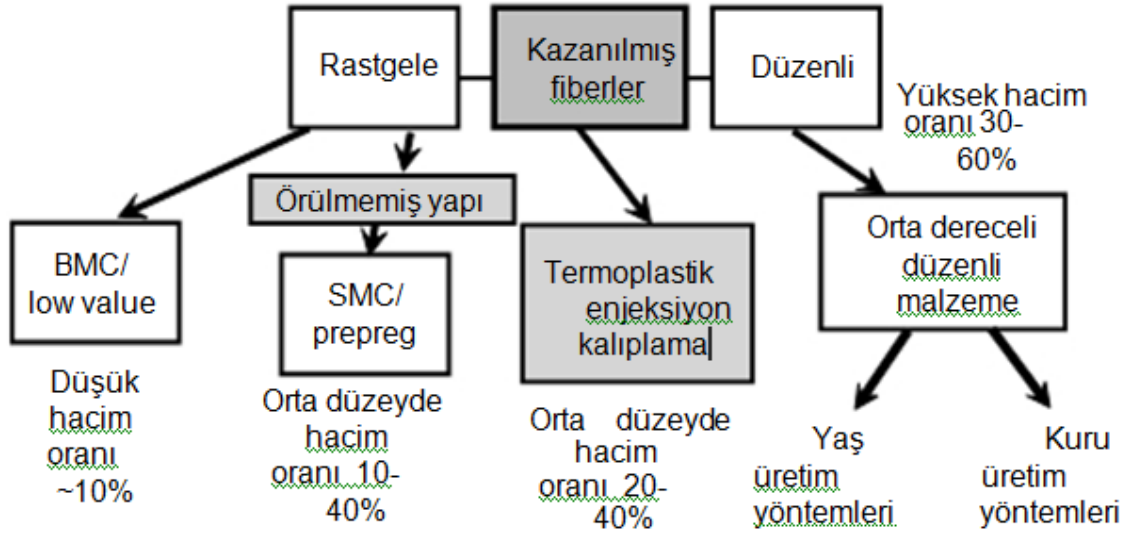
Burada matris izofitalik polyester reçine, fiber ise maksimum 14 – 15 mm boyunda olan E-Camıdır. Bu şekilde fiber boyu karakterizasyonu ile bir sonraki yeniden kullanım aşamasında dayanç hesaplamaları açısından büyük kolaylıklar vardır. Diğer taraftan karbon fiberli ve epoksi reçine matrisli bir kompozitin geri dönüştürülmesinden sonra elde edilen fiberler ve SEM görüntüleri Şekil 4.8’de verilmiştir. Resimlerden görüldüğü gibi cam fiberlere benzer biçimde geri dönüştürülmüş karbon fiberler çok az polimer kalıntısı ile temiz bir yüzeye sahiptirler.



Şekil 4.8 Geri dönüştürülmüş karbon fiberlerin SEM görüntüsü [19]

Geri dönüştürülmüş fiberlerin yapısı akışkan yataklı prostenen kabarcık halde birbirinden ayrı kısa cam ya da karbon fiberler elde edilebilir. Bu haliyle piyasada bulunan tüm cam ya da karbon fiber uygulamalarında kullanılabilirler [19].

Cam ve karbon fiberler genellikle sürekli fiber ve dokuma şeklinde üretilirler. Akışkan yataklı geri dönüşüm prosesinden elde edilen fiberler termoplastik ya da termoset matrisler içerisinde doğrudan takviye elemanı olarak kullanılabilirler. Şekil 4.9’da geri dönüşmüş fiberlerin geometrileri ve destek elemanı olarak nerelerde kullanılabilecekleri şematik şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Kazanılmış fiberlerin olası kullanım yerleri [25]

4.1.2 Kompozitlerin Geri Dönüşümünde Piroliz

Termal yöntemler atıkların bertaraf edilmesi için sıklıkla kullanılırlar. Bunların içinde atıkları ve çöpleri yakmak en geleneksel yöntemdir. Ancak 21. yüzyılda kontrolsüz atık yakma işlemleri çevre kirliliği ve karbondioksit emisyonu yüzünden tüm dünyada yasaklanmıştır. Son teknolojiyi kullanan atık yakma tesisleri bu atıklardan enerji verimi sağlarlar ve çevreyi kirletmezler. Polimer içindeki hidrokarbon ya da nitrürlü fazların oksijen ilgisi yüksektir. Bu yüzden oksijensiz ortamda uygulanan piroliz prosesi plastik matrisli kompozitler için daha uygun bir yöntemdir [19], [31], [32].

Piroliz dışarıdan bir etki göstermeyen bir atmosferde ısı yöntemleriyle malzemeleri kimyasal olarak bileşenlerine ayırma işlemidir. Farklı yöntemlerle üretilmiş plastik kompozit atıkları içerisinde birçok farklı polimer faz bulunabilir. Takviye elemanları genellikle inorganiktir ve elyaf ya da öğütülmüş parçalar olarak bulunur. Bazı özel durumlarda takviye elemanı olarak Kevlar gibi polimer malzemelerde kullanılabilir. Kompozitleri geri dönüştürmede piroliz iyi bir yöntemdir çünkü dönüştürülen matris elemanı tekrar kullanılabilir [32].

4.1.2.1 Piroliz Reaksiyonları

Polipropilen (PP) ve poliamidler (PA66, PA6, PA12, PA46) termoplastik matrisli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan matris maddeleridir. Polyesterler (polietilen tereftalat (PET), polibütilen tereftalat (PBT), polifenilen oksit (PPO)), polikarbonat (PC) ve termoplastik poliüretan (TPU) da matris olarak kullanılan diğer termoplastiklerdir. Bu polimerler ısıtıldıklarında sıvılaşır ve soğutulduklarında katılaşır ve tekrar tekrar ergitilebilirler [32], [33]. Bunlardan en yaygın kullanılan Polipropilen 10 °C/dak gibi yavaş hızlarda ısıtıldığında 400 °C civarlarında parçalanmaya başlar. 470 °C civarında da kütle kaybı en hızlıdır ve 500 °C ye gelindiğinde de tüm kütlesi buharlaşır. Bu da piroliz sonucunda hiç katı PP kalmadığı anlamına gelir. Dolayısıyla cam fiber ve mineral takviyeli PP kompozitlerin geri dönüşümü için piroliz iyi bir yöntemdir. Çok yüksek olmayan sıcaklıklarda ve fiberlerin yapısı bozulmadan, fiberlerin yüzeyi ve diğer takviye elemanları piroliz sayesinde temizlenmiş olur. [34]

Piroliz teknolojilerindeki en önemli faktör matris ve takviye elemanlarını aynı anda geri dönüştürebilmektir. Ancak her ikisini de yüksek kalitede elde edebilmek için oluşturulması gereken piroliz koşulları birbirleriyle çelişir. Bu durum uygulanacak yöntemin şekline göre çok iyi değerlendirilmelidir. Piroliz mekanizması polimer matrisli kompozitlerin geri dönüşümü için çok etkili olabilecek bir yöntemdir ancak endüstriyel ölçekte kullanımının yaygınlaşması gelecek bir zamanda mümkün olacaktır. Piroliz reaktörleri genellikle laboratuvar ölçekli modellenip üretilmektedir ya da pilot tesislerde bu işlemin kaliteli ve yüksek miktarda geri dönüşüm sağlayabilmesi için yapılan çalışmalarda kullanılmaktadır [35].

4.1.2.2 Polimer Matrisli Kompozitler için Piroliz Koşulları

Aynı anda matris elemanını ve takviye elemanlarını geri dönüştürebilmek için piroliz sıcaklığı iyi seçilmelidir [36]. Ayrıca piroliz ünitesini ısınma süresi ve malzemelerin piroliz reaktörünün içinde ne kadar süre bekleyeceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Katı plastik malzemelerde oluşacak kimyasal reaksiyonlar için yavaş ısıtma hızları tercih edilmelidir. Bazı durumlarda yüksek sıcaklıklara

çıkıldığında ağ yapısında kömürleşmeler görülebilir. Sonuç olarak yüksek ısıtma oranları plastik malzemenin hızlı parçalanmasına sebep olacaktır ve piroliz haznesinde kalacağı süreyi düşürecektir [37]. İlk piroliz reaksiyonlarının inert atmosferde gerçekleşmesine rağmen bunu takip eden reaksiyonlar reaktif atmosferde oluşacaktır. Açık atmosferde yapılan piroliz işleminde malzemeler yakılır, sadece enerji ve kömürleşmiş takviye elemanları elde edilir. Fiberlerin özelliklerini koruyabilmeleri için düşük sıcaklıklarda işlem yapılması gerektiği bulunmuştur. Düşük basınçlı atmosferde yapılan piroliz sonucu elde edilen takviye elemanlarının daha temiz olmasına olanak sağlar. Vakum altında, parçalanan moleküllerin difüzyon hızında artış görülmektedir ve dahası elde edilen ürünler reaksiyon bölgesinden hızlı uzaklaştırılır [38], [39].

4.1.2.3 Piroliz Ürünlerinin Çevreye Etkisi

Elektrik ve elektronik ürünlerinde kullanılan polimer kompozitlerde alev almayı engelleyici katkıları olabilir ve bu da onların geri dönüşüm proseslerini etkileyebilir. Bu durum uygulanacak piroliz işleminin sıcaklığını değiştirebileceği gibi kabarmayı alev geciktiricilere de dikkat edilmelidir. Alev geciktiricili polimer malzemelerin pirolizi sonucu oluşabilecek zararlı etkiler ile ilgili bazı çalışmalar yapılmaktadır [40].

Elektrik ve elektroniklerde kullanılan plastik kompozit atıkları 600°C civarında pirolize tabi tutulurlar. Bunların pirolizi sonucu oluşan yağda hidrojen halojenik gaz çıkışıyla beraber klor ve brom içeren bileşenlere rastlanmıştır. Ortaya çıkan katı atıkta yüksek miktarda metal ve halojen maddeler oluşmaktadır [41].

Her ne kadar termoset ve termoplastik matrisli kompozitlerin piroliz yöntemi ile geri dönüştürülmesinde farklılıklar olsa da, geri dönüştürülen malzemelerin kullanımında diğer yöntemlerden bir fark bulunmamaktadır. Termoset matrisli kompozitler piroliz işlemiyle geri dönüştürüldükten sonra direkt olarak kullanılamazlar. Termal bozunma reaksiyonları ve termoset matrisli kompozitlerin durumu polimerin kimyasal bileşenleri ve yapısına bağlıdır. Ergitilebilme yeteneğine sahip olmamaları pirolitik işlemlerin sonucunu etkileyen en önemli faktörlerdendir. Piroliz sıcaklığı depolimerizasyon işleminin hızlı gerçekleşmesi için

yüksek değerlerde tutulmalıdır ancak çok fazla sıcaklık değerlerine ulaşırsa da aromatisasyon ve karbonizasyon gözlemlenebilir. Kömürleşme miktarı piroliz reaksiyonları sonucu ortaya çıkan hidrojen atomlarının miktarına bağlıdır [37], [41].

4.2 Kompozit Malzemeleri Geri Dönüştürmede Mekanik Yöntemler

Bu bölümde plastik matrisli kompozitleri geri dönüştürmek için kullanılan mekanik yöntemler, bu yöntemlerin prensiplerini ve kullanılan donanımlar ele alınmıştır. Bu yöntemlerle en çok termoplastik matrisli kompozitlerin geri dönüşümü yapılmaktadır. Termoplastik matrisli kompozitlerin atığı fazla olup geri dönüşüm prosesleri görece olarak daha az maliyetlidir. Termoset matrisli kompozit malzemeler de mekanik yöntemlerle geri dönüştürülebilirler ancak yapıları gereği bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Mekanik yöntemler için atıkları; endüstriyel kaynaklı ve evsel kaynaklı olarak iki bölümde vermek gerekmektedir [39], [42].

Günümüzde birçok farklı tip ve kalitede termoplastik malzemeler bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan polimer türlerinin listesi Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelgede polimerlerin nerelerde amorf ya da yarı-kristal (semi-kristalin) yapıda olduğu da verilmiştir. Tüm termoplastik malzemeler mekanik yöntemlerle geri dönüştürülebilirler [43], [44].

Plastik matrisli hibrit kompozitlerin ikincil önemli destek elemanı da filler olarak da bilinen dolgulardır. Bunlar maliyeti düşürmenin yanında yanmazlık, kendi kendini söndürme, ısı ve elektrik izolatörlük istenilen yerlerde kullanılır. Dolgular inorganik ve organik esaslı parçacık ya da partikül olabilir. Örneğin PP ve PE de yaygın olarak kullanılan kalsit tozlarıdır. Kalsit tozları aynı zamanda termosetlerden polyeşter ve vinil ester reçinelerde de kullanılmaktadır. Örneğin ormancılığın yaygın olduğu bölgelerde odun talaşı kullanılarak da termoplastik matrisli kompozitler üretilmiştir. Bu dolgu maddeleri genelde enjeksiyon proseslerinde çift vida kullanılarak yapıya katılır. Geometrik formları küresel, boyutları mikron mertebesinde olduğundan mekanik kırmalarda boyut değıştirmediklerinden yeniden kullanımda sonuçları doğrudan etkilemezler [45], [46], [47].

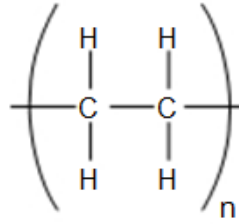
Çizelge 4.1 Polimerlerin kullanım alanları ve fiziksel özellikleri [13]

Polimer	Kısaltma	Hammadde	Mühendislik	Özel olarak	Yarı-kristalin	Amorf
Acrylonitrile-styrene-acrylonitrile	ASA		X			X
Acrylonitrile-butadiene-styrene	ABS		X			X
Acrylic	PMMA		X			X
Ethylene-vinyl acetate	EVA			X		X
Ethylene vinyl alcohol	EVOH			X	X	
Fluor plastics	PTFE			X	X	
Liquid crystal polymer	LCP			X	X	
Polyacetal/acetal	POM		X		X	
Polyamide/nylon	PA		X		X	
Polyamide-imide	PAI			X		X
Polybutylene	PB		X		X	
Polybutylene terephthalate	PBT		X		X	
Polyethylene terephthalate	PET		X		X	
Polycarbonate	PC		X			X
Polyethylene	PE	X			X	
Polyetheretherketone	PEEK			X	X	
Polyetherimide	PEI			X		X
Polyphenylene oxide	PPO			X	X	
Polyphenylene sulphide	PPS			X	X	
Polyphthalamide	PPA			X	X	
Polypropylene	PP	X			X	
Polystyrene	PS	X				X
Polysulphone	PSU		X			X
Polyurethane	PU		X		X	
Polyvinyl chloride	PVC	X			X	
Styrene-acrylonitrile	SAN		X			X

Bu konu içerisinde deneysel çalışmalarda da matris hammaddesi olarak kullanılan polietilen, başka bir deyimle polietilenin yapısı ve geri dönüşüm şekilleri mekanik geri dönüşüm yönteminden önce verilecektir.

4.2.1 Atık Polimerlerin Yapısı

Birçok polimer tipi olmasına rağmen bir de bu polimerlerin kendi içerisinde farklı türleri bulunmaktadır. PE ve PET günlük hayatta en çok kullanılan polimer çeşitleridir [48], [49]. Polietilenin kimyasal yapısı Şekil 4.10’da en genel biçimiyle gösterilmiştir. Polietilen ailesi içinde yüksek yoğunluklu PE (HDPE), düşük yoğunluklu PE (LDPE) ve doğrusal düşük yoğunluklu PE (LLDPE) gibi farklı tipler vardır. Ayrıca daha az kullanılan ultra yüksek molekül ağırlıklı PE (UHMWPE) ve orta yoğunluklu PE (MDPE) de bulunmaktadır.

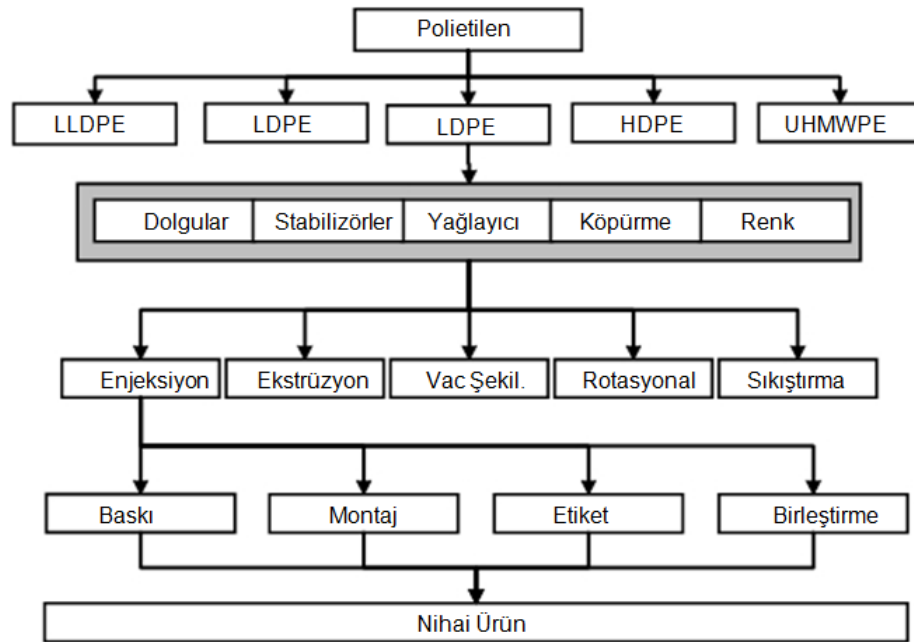


Şekil 4.10 Polietilen

Çizelge 4.2 Polietilenlerin kullanım yerleri [13]

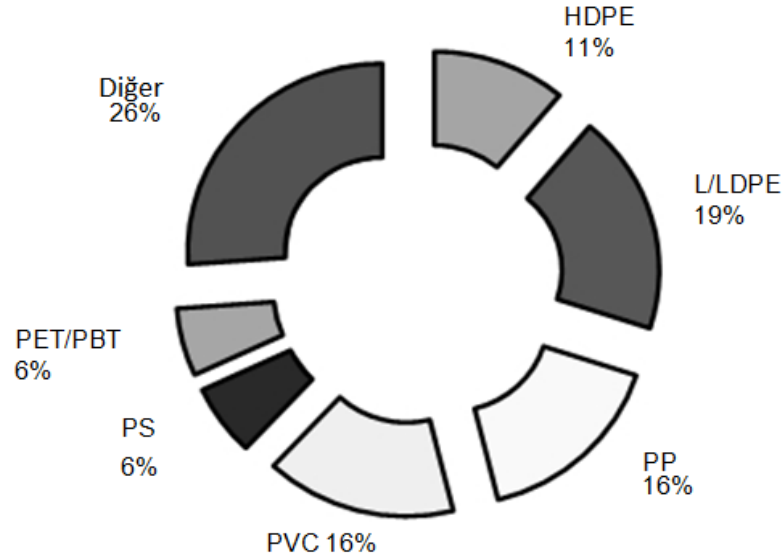
Polimer	Uygulama
HDPE	Şişeler, sandık, konteyner, gıda paketlenme
LDPE	Poşetler, gıda ambalajı
LLDPE	Dondurucu poşetleri, soğukta saklama kapları
UHMWPE	İmplantlar, dişler, kameralar, mil yatakları
MDPE	Otomobil parçaları

Bu durum beş farklı polimer tipi ortaya çıkarmaktadır. Her birinin performans özellikleri, fiziksel özellikleri ve maliyeti farklıdır. Çizelge 4.2’de bu beş farklı polietilen tipinin kullanım yerleri gösterilmiştir [13]. Bu polimerler fiberler ya da fillerlar ile desteklenir. Yaygın katkı maddeleri talk ya da cam fiberlerdir ve buna ek olarak renklendiriciler de yapı içerisinde bulunabilir. Ayrıca ısı ve ultraviyole ışık stabilizatörleri de son malzemenin özelliklerini değiştirmek için kullanılırlar. Enjeksiyon ile kalıplama, ekstrüzyon, vakum şekillendirme, sıkıştırma ile kalıplama gibi birçok polimer işleme yöntemleri vardır. Her polimer türü reolojik özelliklerine göre kalite ve özelliklerinde düşüş olmamak koşuluyla kendine uygun işleme yönteminde üretilir [50], [51]. Polimer malzemeler bu işlemlerden geçip ürüne dönüştükten sonra üstüne etiketleme veya baskı yoluyla başka tip malzemeler de eklenebilir. Bu da atığın yapısının daha da karmaşık hale gelmesini sağlar. Medikal ve ilaç sanayi atıkları dışındaki tüm diğer atıklar geri dönüşüm işlemine tabi tutulmak için toplanabilirler. Tıbbi ve ilaç atıkları tehlikeli atıklar olarak sınıflandırılır ve farklı yöntemlere tabi tutulurlar. Şekil 4.11’de genel anlamda polietilen malzemenin geçtiği işlemler sonucu oluşan nihai ürüne dönüşme aşaması verilmiştir [13].



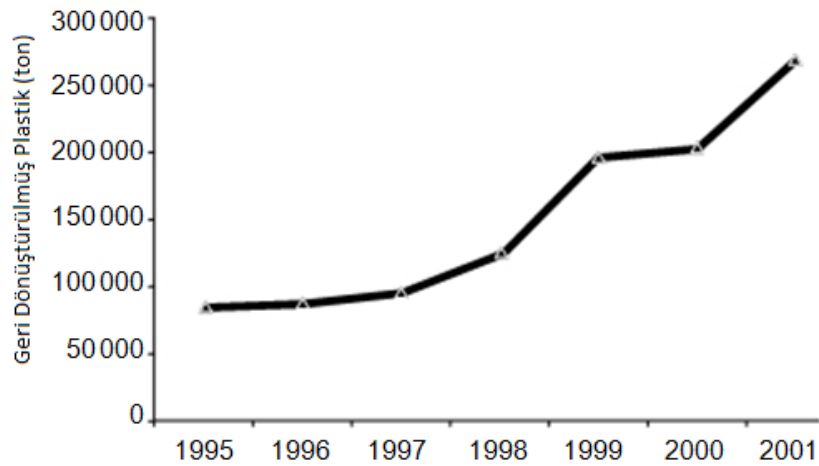
Şekil 4.11 Polietilen malzemenin nihai ürüne dönüşüm aşamaları

İngiltere’de tüm plastiklerin %22’si geri dönüştürülebilmektedir [52]. Bu oran yılda üretilen 5 milyon ton plastiğin, 1.1 milyon tonunun geri dönüştürülmek, yakılmak ya da biriktirilmek üzere toplanabildiğini gösterir. Şekil 4.12’deki grafik geri dönüştürülmek üzere toplanan atığın içindeki bileşenlerin oranını göstermektedir.



Şekil 4.12 Toplanan atıklardaki plastik maddelerin oranları [34]

Şekil 4.13’de ise bu konuda Avrupa’da yapılmış bir çalışmanın sonuçları verilmiştir. Buna göre Avrupa Birliği ülkelerinde 1995 yılında yaklaşık 100 000 ton/yıl polimer geri dönüşümü yapılırken, 2000’li yılların başında bu değer 300 000 ton/yıl’a ulaşmıştır [13].



Şekil 4.13 Polimer geri dönüşümündeki büyüme [13]

4.2.2 Atık Plastikleri Sınıflandırma

Geri dönüşüm açısından atıkları manüel ayırma yöntemleri günümüzde de oldukça önem taşımaktadır. Bu işlemin iyi organize edilmesi daha sonraki geri dönüşüm aşamalarında gösterilmesi gereken çabayı azaltmakta ve geri dönüştürülmüş ürünün kalitesini arttırmaktadır. Daha önce de sözü edildiği gibi çeşitli polimer türleri vardır ve bunların birbirinden göz ile ayırt edilmesi pratik anlamda olanaksızdır. Plastik geri dönüşüm sembolleri, el ile ayırma yöntemlerini kolaylaştırmak ve plastiklerin rahatça birbirinden ayrılabilmesi için geliştirilmiştir. En yaygın plastik geri dönüşüm sembolleri Şekil 4.14’te gösterilmiştir [53], [54].

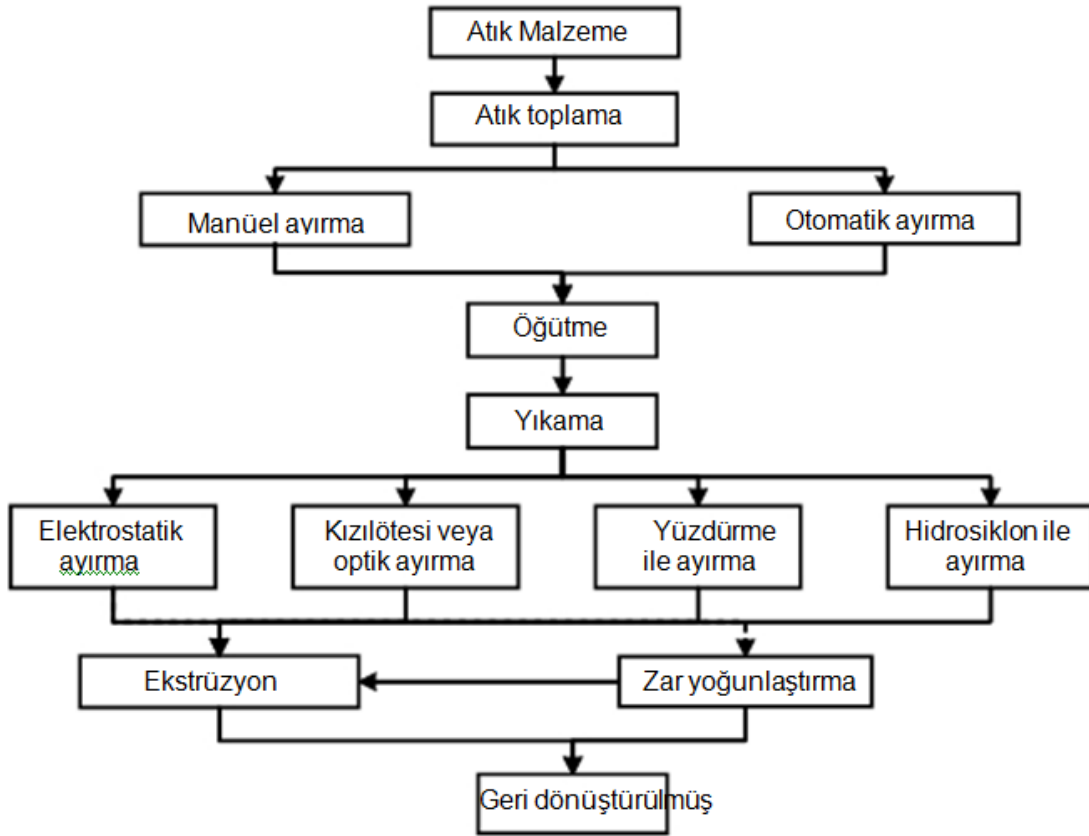
	PET	Polietilen tereftalat
	HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
	PVC	Polivinil klorür
	LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
	PP	Polipropilen
	PS	Polistiren
	OTHER	Yukandaki sınıflandırmaya girmeyen polimer malzemeler

Şekil 4.14 Geri dönüşüm sembolleri [15]

4.2.3 Plastik Atıkları Hazırlama (Ayrıştırma ve Prosese Uygun Hale Getirme)

Atık plastik kompozitler endüstri ya da evsel kaynaklardan toplandıktan sonra ayırma ve boyut küçültme işlemlerine tabi tutulurlar. İlk ayırma işlemi atık içindeki polimer ve diğer metal, seramik gibi malzemeleri birbirinden ayırmak için yapılır. Bir sonraki ayırma işlemine geçmeden önce atık kompozitler yoğunluklarına göre kontrol edilerek öğütme işlemine tabi tutulurlar. Bundan sonraki ayırma işleminde kompozit malzemeler birbirleriyle aynı malzemeden oluşan gruplara bölünür. Bu yöntemler yoğunluk farkı yöntemi, elektrostatik ayırma, spektroskopi olabilir. Atıklar kendi gruplarına bu yöntemler sayesinde ayrıldıklarında bir sonraki işlemler için hazırlanabilirler [55], [56], [57]. Yaygın olarak da parçalanmış malzemeler

ekstrüzyon ile birleştirilerek granül haline getirilir. Ekstrüzyon yöntemi birleştirme işlemi için en çok kullanılan yöntemdir. Tüm bu işlemlerden geçmiş atığa artık geri dönüştürülmüş denir. Geri dönüşümün akış şeması Şekil 4.15’de gösterilmiştir [29].



Şekil 4.15 Mekanik geri dönüşüm akış şeması [29]

4.2.3.1 Atık Toplama

Atık toplamadaki en önemli olgulardan biri atıkların ayrılmasında tüketicinin etkisidir. Her yerel yönetim kendi bölgesinde toplanan atıkların ayırma işleminden sorumludur. Bu yüzden her yönetim kendi şartlarını göz önüne alarak bir atık toplama politikası belirlemelidir.

4.2.3.2 Atık Malzemeleri Ayırma

Mekanik yöntemlerde atıkların toplanması ve bunların birbirinden ayrılması çok önemlidir. Atık malzemelerin ayırma işlemleri bu maddelerin arasındaki hiyerarşiye

göre yapılır. Bu aşamalı sistemde atıklar, seviyelerine göre A' dan D' ye kadar sınıflandırılmıştır. Bu sistemin yapısı Şekil 4.17'de gösterilmiştir [13].

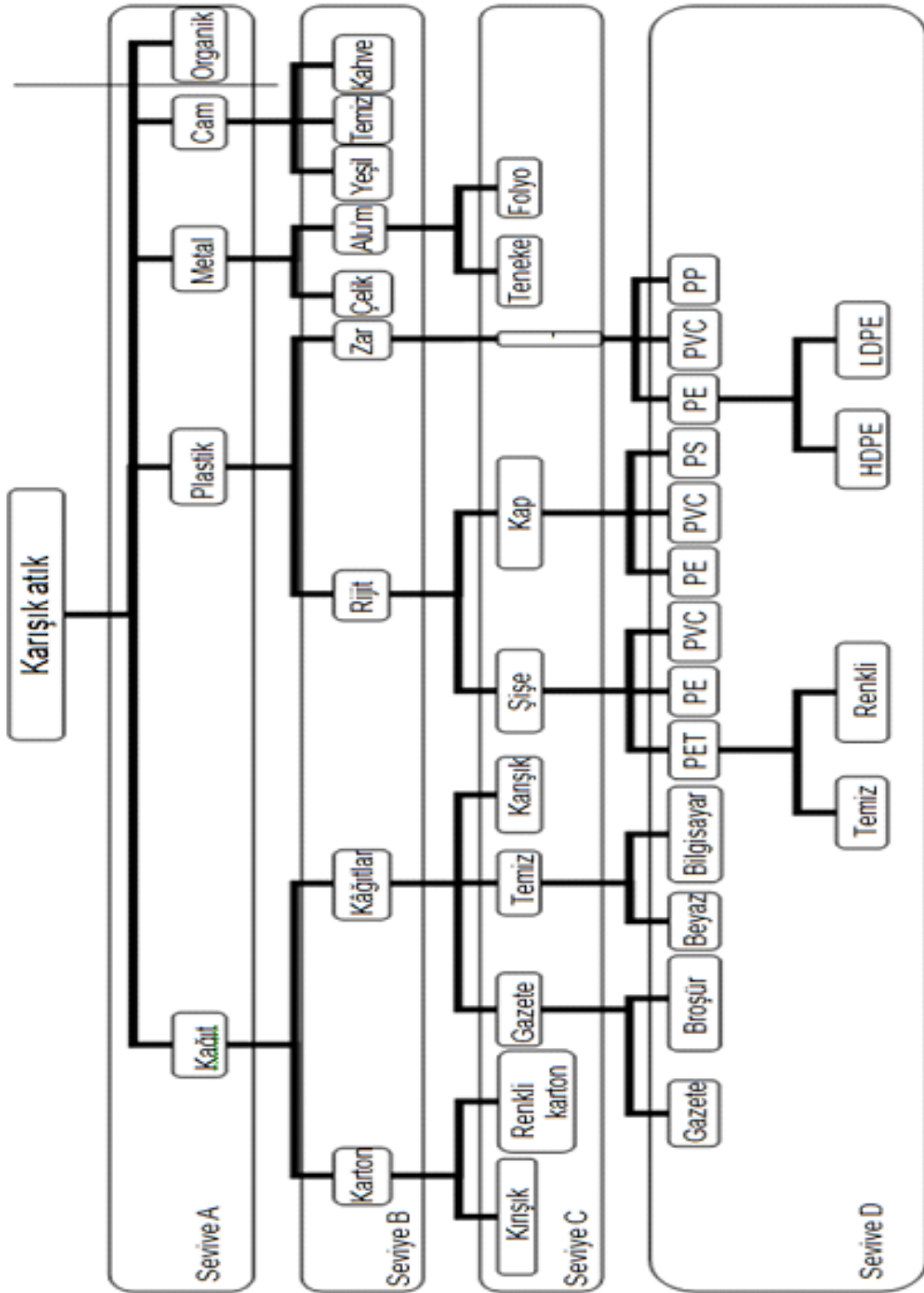
Bu diyagramda atık tipleri gösterilmiştir. A seviyesi ilk seviyedir ve burada atıklar en genel halleriyle sınıflandırılmışlardır. Bu seviyedeki ayırma işlemi tüketici ile en çok etkileşim içinde bulunandır. İkinci seviyede ilk seviyeden gelen atıklar göz ile ayrılacak sınıflandırma içerisine girmiştir. Buradaki ayırma işlemi atıkların kaynağında yapılabilir. Bir sonraki seviyede B seviyesindeki atıklar manüel ya da otomatik olarak yine görünüşlerine göre ayrılırlar. Son seviyede ise malzemenin ana maddesi bilenecek şekilde ayırma işlemi sonlandırılır.

a) El İle Ayırma

Atık işleme tesislerinde atıkları birbirinden ayırmak için birçok yol izlenir. Bunlardan ilki el ile müdahaledir. Çalışan insanların yardımıyla atıklar el ile ayrılırlar. Konveyör bantlarında atıklar operatörlerin önlerinden geçerler ve operatör uygun atıkları eliyle seçerek bir yerde biriktirir. Tesisin yapısına göre farklı operatörler farklı tip malzemeleri toplayabilirler. Bu tip bir tesiste % 95 verimli bir ayırma işlemi gerçekleştirilebilir. Bu tip bir işlem için düşük sermayeli bir yatırım yeterlidir. Şekil 4.16'da böyle bir tesis gösterilmiştir.



Şekil 4.16 El ile atık ayırma tesisinden bir görüntü [29]



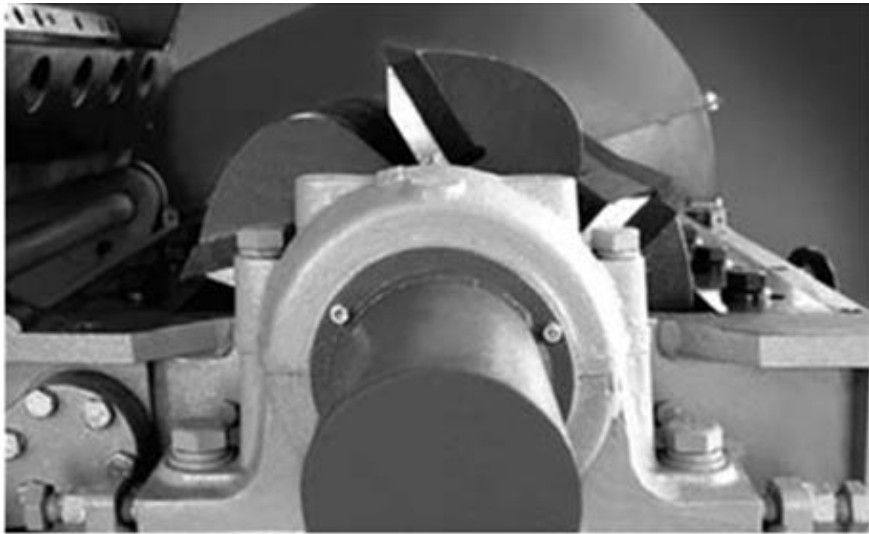
Şekil 4.17 Atık ayırma akış şeması [13]

b) Otomatik Ayırma

Manüel ayırmanın bir diğer alternatifi de makineler yardımıyla yapılan otomatik ayırma yöntemidir. Bu makineler yıllardır ticari olarak üretilmektedirler. Atığın fiziksel özelliklerinin yardımıyla uygun işlem tipi ve ayırma rotası belirlenir. Bu sistem yardımıyla ayırma yapma daha yüksek maliyetlidir ama ayrıştırılan atığın kalitesi genellikle düşük olur. Örneğin bir şişe ayırma tesisinde cam ve plastik atıklar bir bant üzerinde yürürler. Yüksek yoğunluğa sahip cam atıklar yer çekimi etkisiyle düşürülerek aşağıda toplanırlar. Düşük yoğunluğa sahip plastik şişeler bant üzerinde ilerlemeye devam eder. Bu bantların yanlarında bulunan klorür iyonu saptayan sensörler ile PVC atıklar başka bir yerde toplanabilirler. En son geriye kalan PET ve PE atıklar öğütülmek üzere gönderilirler [13], [58].

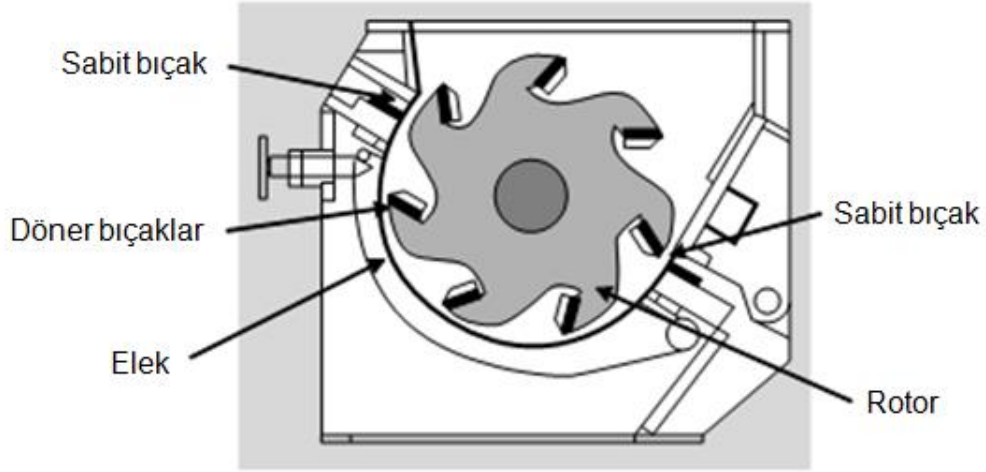
4.2.3.3 Boyut Küçültme ve Öğütme

Bu sürecin ilk aşamasında büyük boyutlu atıklar parçalanarak 25-50 mm boyutuna parçalanır. Parçalanmış ürünler daha sonra öğütülerek boyutları 3.2 - 9.5 mm olan partikül veya pul haline getirilir. Öğütme aşamasında malzemelerin üstünde bulunan kâğıt etiketler de böylelikle ayrıştırılır ve hava yardımıyla sınıflandırma yapılırken ayrı bir yere toplanır [59], [60]. Şekil 4.18’de boyut küçültmek için kullanılan bir öğütme bıçağı gösterilmiştir [29].



Şekil 4.18 Öğütücü bıçakları [29]

Öğütme işlemi dönen bir bıçakla atıkların parçalanma işlemidir. Buradaki en önemli konu, geç aşınan bıçakların seçimidir ki, genelde termoset malzemeler için yüksek hız çelikleri, termoplastik malzemeler için de yüksek hız çelikleri ve küçük ölçekli uygulamalarda da soğuk iş takım çelikleri seçilir. Bu tür makinalar hava ile soğutulurlar. Önemli olan plastiğin ısınmadan parçalanmasıdır. Şekil 4.19’da bir öğütücünün şematik resmi verilmiştir.



Şekil 4.19 Öğütücü şematik görüntüsü [29]

Öğütme işlemi sırasında fiberlerin boyları kısalır. Ayrıca daha sonra enjeksiyon ile kalıplama veya ekstrüzyon ile birleştirme gibi sonradan uygulanacak yöntemlerde de fiber boylarının kısalması söz konusudur. Geri dönüştürülmüş bu ürünler kullanılıp ömürlerini tamamladıktan sonra tekrar geri dönüştürülmek istenecektir. Böyle bir aşamada ürünün hangi yollardan geldiği konusunda herhangi bir bilgi olmayacaktır. Malzemeye geri dönüşüm prosesleri uygulandıkça fiber boyları daha da kısalacaktır. Fiberler kullanışsız hale gelene kadar kaç geri dönüşüm çevrimi uygulanabileceği konusunda çalışmalar yapılmaktadır [61], [62], [63].

4.2.3.4 Atık Yıkama

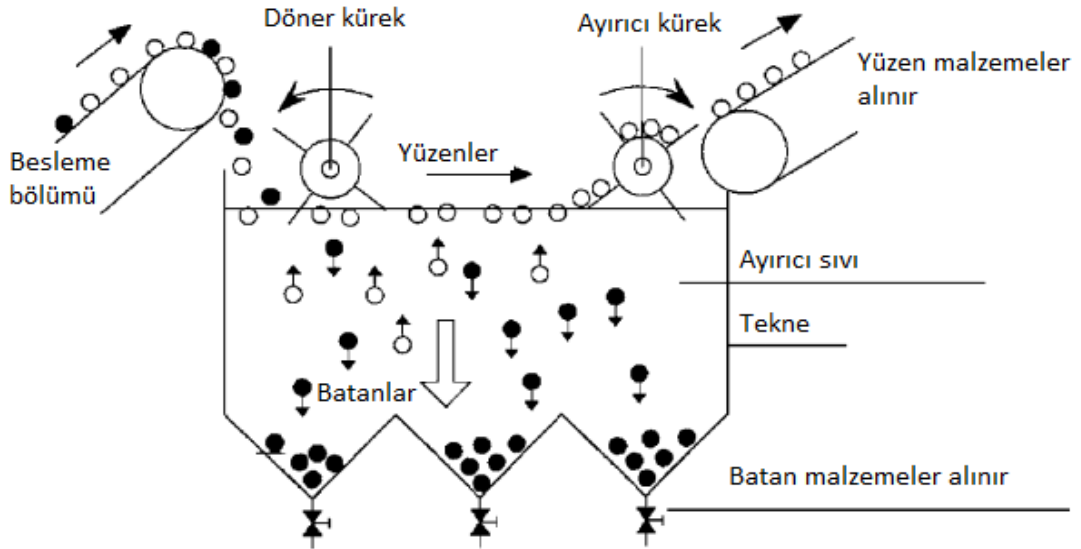
Atıklar bir yıkama tankına gönderilir ve üstlerindeki yapıştırıcı kalıntıları ve kirler temizlenir. Atıklar elenir ve kirlerinden tamamen ayrılır. Bu işlem sırasında kullanılan su tekrar kullanılabilir. Malzemeler iyice durulanır ve ikinci ayırma bölümüne geçerler.

4.2.3.5 Küçük Parçacıklı Plastik Atıkların Ayırıştırılması

Bu bölümde ayırma, öğütme ve yıkama işlemlerinden geçmiş plastik kompozit atıklarının ayırıştırılma metotları verilmiştir. Polimerlerin farklı özelliklerini kullanarak uygulanan birçok yöntem bulunmaktadır.

a) Yüzdürme ile Ayırma (Flotasyon)

Malzemeler içerisine az miktarda temizleyici ilave edilmiş su dolu bir tanka konur. Tankın bir ucundan diğer tarafına yüzdürülürler. Yüzme sırasında malzemelerin yoğunluklarına göre kimi malzemeler dibe çöker kimileri ise yüzeyde kalırlar. Ayırıştırmayı iyileştirmek için tankın içindeki su çalkalanır. Yoğunluğu 1.0 g/cm^3 ten düşük olan maddeler yüzeyde kalırken, bu seviyenin üstünde kalan yoğunluğa sahip maddeler de dibe çökerler. Bu yöntem kısaca flotasyon yöntemi olarak tanımlanır. Şekil 4.20’de flotasyon yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [29].



Şekil 4.20 Flotasyon işlemi [29]

Çizelge 4.3’te flotasyonla ayırıştırma işlemi uygulanan bazı polimerlerin yoğunlukları verilmiştir. Suyun yoğunluğundan yararlanılarak uygulanan yüzdürme işlemi sadece hafif olan poliolefin grubu malzemeleri ayırmak için etkili bir yöntemdir. Ancak suyun yoğunluğu, içerisine metanol eklenerek düşürülebileceği gibi, kalsiyum klorür eklenmesiyle de arttırılabilir. Çizelge 4.4’te sözü edilen ilaveler yapıldığında suyun yoğunluğundaki değişim gösterilmiştir [29].

Çizelge 4.3 Bazı polimer türlerinin yoğunlukları [29]

Polimer türü	Yoğunluk (g/cm ³)
PP	0.90 – 0.91
LDPE	0.90 – 0.92
HDPE	0.95 – 0.96
PS	1.05 – 1.13
PA 6 veya PA 66	1.05 – 1.15
PVC	1.39 – 1.40
PET	1.40

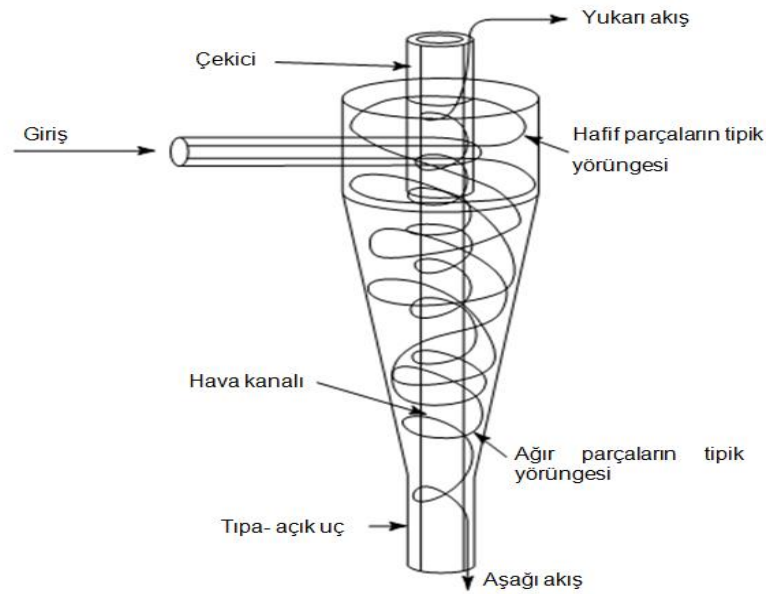
Çizelge 4.4 Bazı ilavelerle suyun yoğunluk değişimi, değerler 100 g suya katılan miktarları göstermektedir [29]

Metanol (g)	Yoğunluk (g/cm ³)	Kalsiyum klorür (g)	Yoğunluk (g/cm ³)
11	0.98	7.5	1.06
24	0.96	12	1.10
36	0.94	17	1.15
48	0.92	22	1.20
58	0.90	28	1.26
66	0.88	32	1.30
74	0.86	36	1.35
82	0.84	40	1.40

Sonuç olarak yüzdürme yöntemi eğer atık içerisinde iki farklı bileşen var ise kullanılması uygun bir yöntemdir. Suyun içerisine kalsiyum klorür eklenmesiyle iki farklı yüksek yoğunluğa sahip plastik kompozit malzemenin ayrıştırılması olasıdır. Ancak ikiden fazla bileşen içeren atıklar için bu yöntemin uygun olmadığı görülmüştür. Bu durumda da farklı yoğunluğa sahip yüzdürme tanklarını ardı ardına kullanarak ayrıştırma yapılabilir [64], [65], [66].

b) Hidrosiklon ile Ayırma

Hidrosiklon yöntemi kırma yani boyut küçültme işleminden sonra uygulanır. Geri dönüştürülecek atıklar önce su ile karıştırılıp Şekil 4.21’de görülen hidrosiklon içerisine gönderilirler. Atık ve su hidrosiklon ünitesinin içine girdikten sonra vorteks hareketi ile bir girdap oluşturulur. Bu girdap yerçekiminden birkaç kat daha kuvvetli bir merkezkaç kuvveti yaratır. Bu sayede ağır olan parçalar aşağı doğru, hafif olan parçalarda yukarı doğru hareket etmeye başlar. Merkezdeki bir hava kanalı yardımıyla girdaptan yukarı doğru çıkan hafif malzemeler emilerek çekilir. Ağır malzemeler ise çeperler boyunca aşağı doğru kayarlar. Aşağı kayan bu partiküller en sonunda hidrosiklon içinden çıkar ve düşerek aşağıda toplanır [33]. Bu yöntem sıralı halde yapılırsa ayırıştırma verimi ve arıklık miktarı yükselir. Hidrosiklon yöntemi de aynı yüzdürme yöntemi gibi yoğunluk farkından yararlanılarak yapıldığından, yönteminin ayırıştırma kabiliyeti yüzdürme ile karşılaştırıldığında daha iyidir.

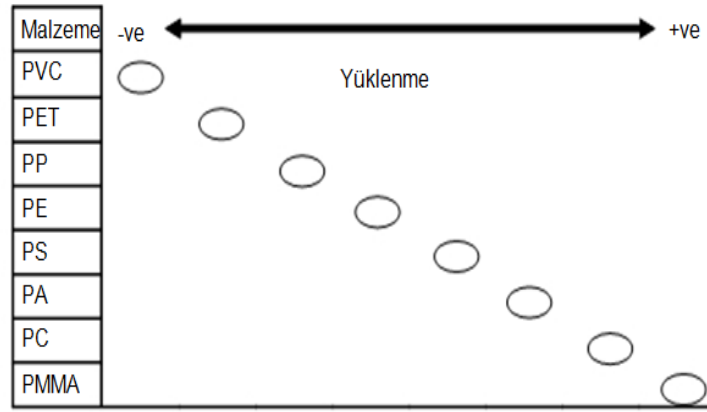


Şekil 4.21 Hidrosiklonun şematik görüntüsü [33]

Bu işlemde taşıyıcı araç yani su içine herhangi bir katkı yapılmadan atık malzemeler birbirinden ayrıştırılabilir. Bu sistemde %99’ a kadar ayırma verimi elde edilebilmektedir. Ancak bu yöntemde de birbirine yakın yoğunluğa sahip malzemelerin ayrıştırılması mümkün değildir [67], [68], [69].

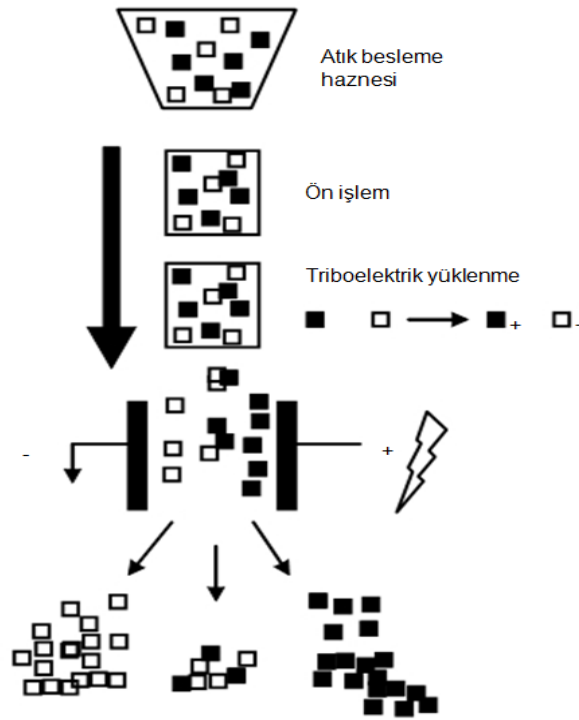
c) Elektrostatik Ayırma

Elektrostatik ayırma işlemi triboelektrik yüklenmesi prensiplerinden yararlanılarak yapılır [13]. Serbest düşüş ayırıcısı olarak da bilinen bu yöntemde farklı malzemelerin farklı iletkenliklerinden faydalanılır. Bu işlemde malzemelerin çok küçük partiküllerde olması ve farklı elektriksel özelliklere sahip olması gerekmektedir. Eğer iki tip malzeme birbirinden ayrılmak isteniyorsa başarılı sonuçlar alınabilir. Ayrıca bu yöntemde PE ve PP gibi birbirine yakın yoğunluğa sahip malzemelerin ayrılabilmesi de mümkündür. Bu yöntemle ayrılmak istenen malzemelerin temiz ve kuru olmaları gerekmektedir. Şekil 4.22’de farklı plastik türlerinin triboelektriksel özellikleri göreceli olarak gösterilmiştir [70], [71], [72].



Şekil 4.22 Triboelektriksel özellikler [13]

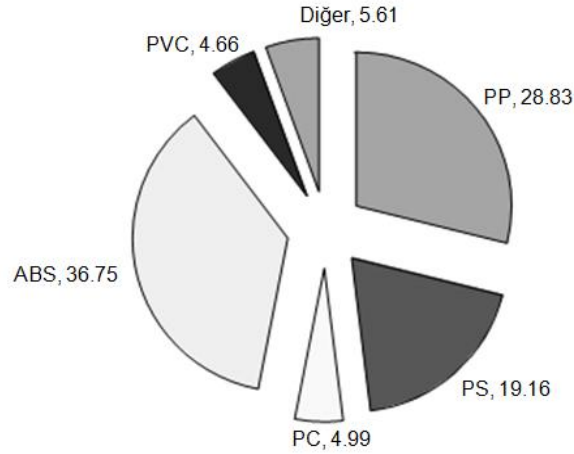
Sisteme, malzeme eş zamanlı ve sürtünme etkisiyle beslenir. Statik yüklenmenin yoğunluğu ve seçiciliği sıcaklık ve nem koşullarına göre değişebilir. Pozitif ya da negatif yüklenmiş parçacıklar aşağıya doğru düşerler ve bir elektrik alanına maruz kalırlar. Zıt yüklü parçacıkları burada zıt yönlerde giderek ayrılırlar. Elektrostatik ayırmada 120 kV potansiyelde ve 0.1 mA akım şiddetinde çalışılır. Elektrostatik ayırıcıların yükseklikleri ayrılmak istenen atığın cinsine göre birkaç metre olabilir. Saatte 3-5 ton ayrıştırılmış plastik alınabilir. Araştırmalar sonucu bu tekniğin tüketici sonrası ve benzer yoğunluktaki atıklarda başarılı olduğu görülmüştür. Aynı polimer malzemenin farklı renklendirilmiş atıkları da bu yöntemle ayrıştırılabilir. Yüksek ayırma verimi istendiğinde çoklu platformlar oluşturulabilir. Aynı zamanda diğer ayrıştırma yöntemleriyle beraber de kullanılabilir [73], [74]. Şekil 4.23’te elektrostatik ayrıştırma şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.23 Elektrostatik Ayırma [13]

d) NIR (Near Infrared) ve Optik Ayırma

Polimer atıkları ayırmada NIR yönteminde saniyede 1000 spektra analiz ederek polimerleri sınıflandıran yüksek performanslı bilgisayar kullanılır. Bu teknik Fraunhofer Institute for Chemical Technology’de geliştirilmiştir. Spektrometre polimerlerin elektromanyetik spektrumlarını ölçer ve farklı özellik gösteren atıklar birbirlerinden ayrılır. NIR dalga boyu 700-2500 nm arasındadır. Bu yöntemde çok karışık atıkları ayırmak zordur [13]. Sadece C-H, O-H, N-H ve C-O grubu olarak polimerleri sınıflandırır. Optik sistemler atığın rengine, saydamlığına ve şekline göre ayırma yapabilen ayırma sistemleridir. 10-150 mm boyutuna getirilmiş atık partikülleri bir operatör tarafından önceden değerlendirilir ve sınıflandırılır. Sensörlü bir kamera ile atıkların kırmızı, yeşil ve mavi renklerinde değerlendirme yaparak partikülleri sınıflandırır. Bu yöntemde ayırma veriminin yüksek olabilmesi için atık partiküllerinin görsel özelliklerinin birbirinden farklı olması gerekmektedir. Şekil 4.24’te NIR kullanılarak yapılan bir çalışmada plastik sınıflandırılma oranları verilmiştir [75], [76], [77].



Şekil 4.24 NIR kullanılarak yapılan bir çalışmada plastik sınıflandırılma oranları [13]

4.2.3.6 Atık Kompozit Partiküllerini Kullanılabilir Boyuta Getirme

Atık kompozitler toplanıp, boyutlarını küçültülüp, temizlenip ayrıştırıldıktan sonra en son proses edilebilir yapıya getirilir. Bu işlem sonrasında ya doğrudan üretim proseslerine sokulabilir veya doğrudan piyasaya sürülebilirler. Özelliklerini geliştirme işlemleri genellikle gerekli görülmez. Ancak bazı durumlarda malzemenin özelliklerini arttırmak için işlenmemiş hammadde eklenmesi veya katkı malzemeleri eklemek de gerekebilir. Bu durumda, bu aşamada ilaveler kolaylıkla yapılabilir. Daha sonra ekstrüzyonla kalıplanabilir, ya da ekstrüderle çekilebilir.

a) Yoğunlaştırma (Aglomerasyon)

Bu işlem $1.00-1.50 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğuna sahip zarsı ya da pulsu atıkların daha uygun yoğunluğa getirilmesi işlemidir. Zarsı ve pulsu yapıların yoğunluğunu artırmanın çeşitli yöntemleri vardır. Ancak tüm bu yöntemler, polimerin ergime sıcaklığının altında, sürtünmeden kaynaklanan ısı ile yapılır. İnce zarsı ve pulsu atıklar kapalı bir kalıp içerisinde yüksek devirde dönen bıçaklar yardımıyla, sürtünme enerjisinden de yararlanarak birbirleriyle topak haline gelirler. Bunlara plastik peletler de denir. Peletler, soğutmalı nozülünden çıkarken kesilirler. Kesme işlemi yüksek hızda dönen bıçaklar yardımıyla yapılır.

Bir başka yoğunlaştırma işlemi ise potalı aglomerasyon sistemi ile ekstrüzyon teknolojisinin birleştirilmesi ile gelişmiştir. Bu yöntem zarsı yapıdaki ince plastik

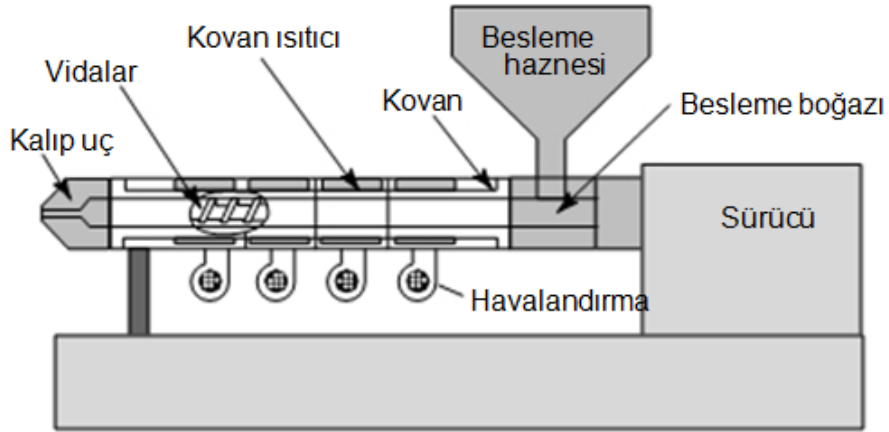
atıkları için ideal bir yöntemdir. Bu sistem Avusturyalı Erema firması tarafından tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu sistemde kesici ve yoğunlaştırıcı bulunur. Dikey silindirik yapının tabanında bıçaklar bulunur. Atık malzemeler yerçekimi ile üstten beslenir. Tabanda dönen bıçaklarla polimerler ısınır ve aglomerasyon işlemi gerçekleşir. Daha sonra malzeme direkt ekstrüzyona gönderilir. Katı kirlilikleri temizlemek için ekstrüzyon çıkışında bir filtre kullanılır. Şekil 4.25'te Erema'nın resmi görülmektedir [31].



Şekil 4.25 Erema düzeneği [31]

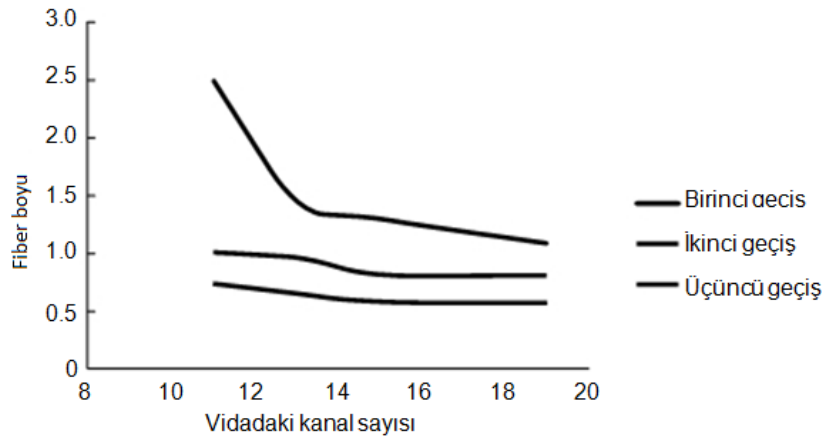
b) Ekstrüzyon ile Birleştirme

Ekstrüzyon, genelde granül, kırık ve iri boyutlu tozları birleştirmek için kullanılır. Termoplastiklerin ısı erkisi altında dönen bir helisel vidadan geçirilerek kalıplama işlemidir. Bu yöntemde bir besleyici hazne den çapı belirli vida ve kovan düzeneği beslenir. Besleme sırasında pigment boya, masterbach (renklendirici), antioksidan, dolgu maddesi veya fiber gibi ilaceler yaparak istenilen özellikteki malzeme üretilebilir. Ekstrüzyon işleminin birçok farklı uygulamaları vardır. Ekstrüzyonun kalitesi iç kısımdaki vidanın geometrisine ve işlem koşullarına bağlıdır. Şekil 4.26'da bu tür özelliklere sahip yatay enjeksiyon makinasının şematik görünümü verilmiştir. [30]



Şekil 4.26 Ekstrüzyon prosesi [30]

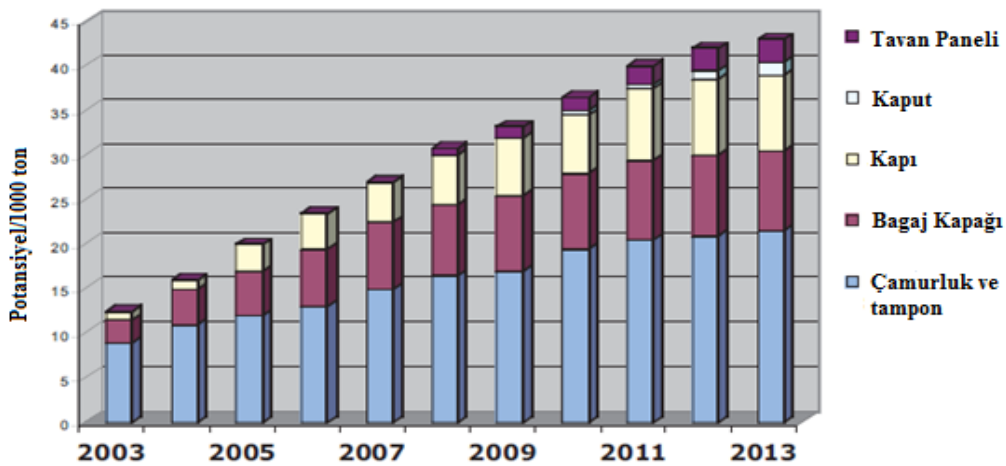
Şekil 4.27’da ise %30 cam fiber takviyeli polipropilen kompozit malzemenin 3 sefer ekstrüzyonu ile (3 kere geri dönüşüm) fiber boylarındaki azalma verilmiştir. Şekilde ilk başta ortalama 3,0 mm olan fiberlerin boylarında azalma ve vida adımının buna etkisi görülmektedir. [22]



Şekil 4.27 Ekstrüzyon sayısı ile fiber boyundaki azalış [22]

TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN OTOMOTİV UYGULAMALARI

Otomotiv endüstrisinde öncelikle binek otomobiller ve sırasıyla hafif ticari araçlar ve daha sonra da otobüs ve kamyonları iç kısımlarında plastik kullanımı 1980'lerden sonra yaygınlaşmıştır. Bunun yanında 2000'li yılların başından beri bazı makine elemanlarının, kaporta ve tampon gibi dış parçaların imalatında termoplastik matrisli kompozitlerin kullanımı yaygınlık kazanmıştır. Kullanımlar, iki ana başlık altında ele alınır. Birincisi doğrudan orijinal termoplastiklerin fiberler ile desteklenerek kullanımı, ikincisi ise geri dönüşmüş termoplastik matrisli kompozitlerin kullanımıdır. Bu ikinci kullanımda çevreye duyarlı konseptler ve enerji maliyetlerinin düşürülmesi konuları da ön plana çıkmıştır. Şekil 5.1'de 2005 yılında yayınlanan ve binek otolarında plastik kullanımını gösteren bir grafik verilmiştir [78].



Şekil 5.1 Binek araçlarında kullanılan kompozit malzemelerin dağılımı [78]

Bu şekle göre, 2003-2013 yılları arasında tampon ve çamurluklarda kullanılan plastiğin 1000 ton esas alınan aracın toplam kütlesine oranı başta olmak üzere bagaj kapağında kullanım da bariz bir şekilde artmaktadır. Bunun haricinde kapılarda kullanımı da 2003 yılında çok az iken 2013 yılında önemli derecede artış göstereceği tahmin edilmektedir. Ayrıca 2010 yılından sonra kaput kapağı ve üst kaput (kaporta) da kullanılması tahmin edilmektedir. Bu gelişimin nedeni, plastiklerin korozyon dayancının yüksek olmasının yanı sıra metale göre hafif olmasıdır. Ayrıca tasarımda da yüksek esneklik sağlamaktadır. Bunlara ek olarak daha düşük işletme maliyetine sahiptir. Ancak bu avantajların yanında plastik kullanımının bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar şöyle sıralanabilir [79], [80]:

- Yüzeyinin son işlem olarak düzgün ve parlatılmış imal edilmesi,
- İstenilen rengin kolaylıkla elde edilmesi,
- Dış etkilere karşı dayanç,
- Çarpma anındaki davranışı (özellikle düşük sıcaklıklarda),
- Daha kısa imalat süresi (alüminyum ve çeliğe göre),
- Geri dönüştürülebilir olması (termoplastikler tercih sebebidir)

Bu avantajlarının yanında, birleştirme yöntemlerinin uygun seçilmesi, uygun seçilmediği durumda da, özel önlemler alınması gerekliliği bir dezavantaj olarak verilebilir. Termosetlerde vida ve perçinleme kullanılırken termoplastik parçaların birleştirilmesi ısı kaynak işlemi ile gerçekleştirilmektedir [81], [82].

5.1 Termoplastiklerin Otomotiv Endüstrisindeki Önemi

Cam takviyeli plastiklerin bir basit türü, ilk kez 1982 yılında hava sürtünme katsayısını azaltmak, motor bölmesini kir vb. dış etkilere 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 40 000 tonun üzerine çıktığı görülmüştür [78].

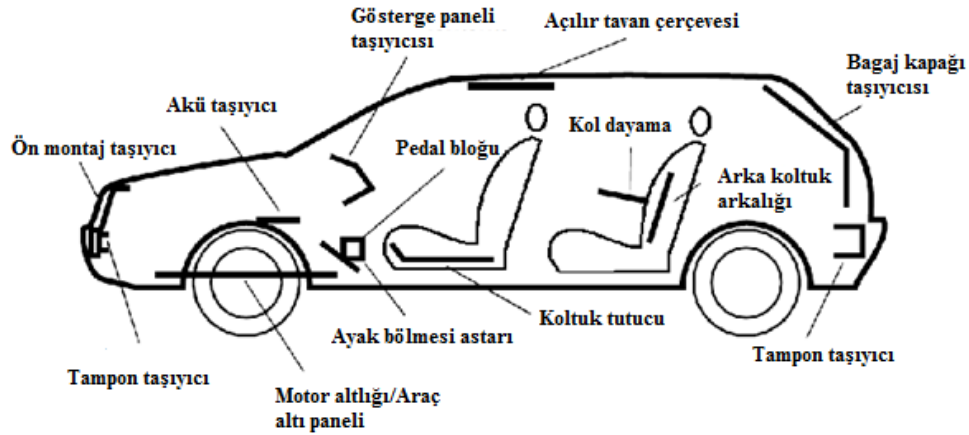
Cam takviyeli plastiklerin üretilmesi ve işlenmesindeki en büyük dezavantajı, yüksek basınç gerektirdiğinden, şu an için üretim maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Bunun yanı sıra cam takviyeli plastik yarı mamulün preste işlenmesi sırasında ek olarak malzemeyi matrisin ergime sıcaklığının üstüne ısıtmak gerekmektedir. Bu nedenle, 1990' lardan sonra uzun fiberli kompozit yerine kısa fiberli kompozitlerin kullanımına gidilmiştir [83], [84], [85], [86]. Bu tür kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri Çizelge 5.1'de, ticari adlarıyla birlikte gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 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

Yüksek enerji absorpsiyonu ve darbe direnci gibi mekanik özellikleri nedeniyle kısa fiberli kompozitler otomotiv sektöründe yaygın kullanım alanı bulmuştur [87]. Ortalama maksimum 150 °C' a kadar çalışma sıcaklığı bulunmasına rağmen, araç içi için -30 ile +110 °C sıcaklık aralığı otomotiv sektörü için yeterli görülmektedir. Polietilenin ise 100 °C civarlarına kadar kullanılabilindiğinden hareketle bu tür kompozitin yaygınlaşması kendiliğinden oluşmuştur. Bu tür kompozitler aynı zamanda 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 dayanıklılığa da sahiptir. Diğer taraftan, iyi akustik özelliklerinden dolayı da motor sesini izole etmede de kullanılır. Şekil 5.2'de ise Avrupa Birliğinde

Üretilen binek araçlarında termoplastik matrisli kompozitlerin kullanım yerleri Şematik olarak gösterilmiştir [78].



Şekil 5.2 Avrupa Birliğinde üretilen binek araçlarında termoplastik matrisli kompozitlerin kullanım yerleri [78]

5.2 Orjinal Termoplastik Matrisli Kompozit Kullanımı

Orijinal termoplastik matrisli kompozit kullanımı, motor parçaları ve tampon uygulamaları olarak iki Şekilde gelişmiştir. Örneğin, motor altı koruyucusu olarak sıcak kalıplama yöntemiyle imal edilmiş PP matris ve E-Camı dokumalı ve hacim oranı % 50 olan bir kompozit Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu parçanın maliyet analizleri yapıldığında daha önce üretilmiş Alüminyum döküm malzemeye göre % 20 daha ucuza geldiği belirlenmiştir [87], [88], [89].



Şekil 5.3 PP – E-Camından üretilmiş motor altı koruyucusu [78]

Şekil 5.4'te ise PE matrisli E-Camı fiberlerinden üretilmiş darbe emici tampon bağlantı parçası ve tampon gösterilmiştir. Günümüzde bu uygulamalar Madde 5.3'te verileceği gibi geri dönüşmüş kompozitlerden yapılmaktadır.



Şekil 5.4 PE matrisli E-Camı fiberlerinden üretilmiş darbe emici tampon bağlantı parçası ve BMW 3 serisi araçlarındaki uygulaması [78]

Diğer taraftan, 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 5.5'te iki farklı malzemeden üretilmiş yağ karterleri gösterilmiştir [90], [91], [92].



Şekil 5.5 Toyota binek otomobilleri için Alüminyum ve termoplastik kompozitten imal edilmiş yağ karterleri

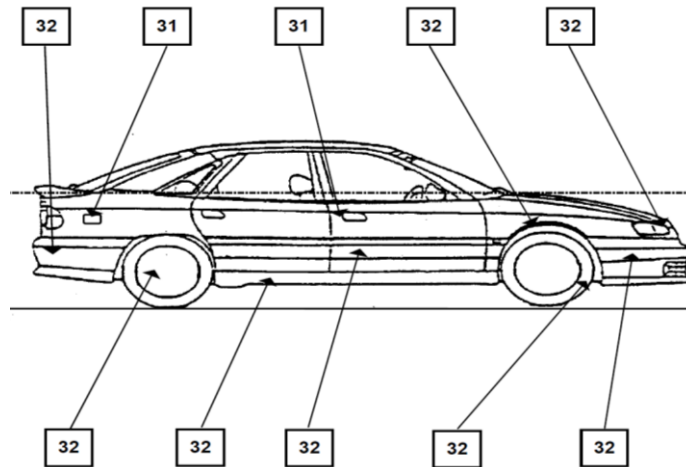


Şekil 5.6 Sırasıyla çelik, alüminyum alaşımı ve PP matrisli kompozitten üretilmiş yağ karterlerinin standart darbe (çarpma) deneyi sonuçları

Şekil 5.6’da ise Şekil 4.5’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.

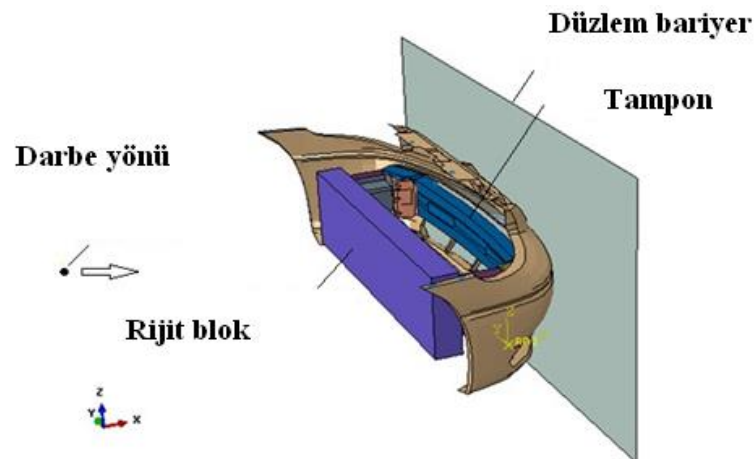
5.3 Geri Dönüşmüş Termoplastik Matrisli Kompozit Kullanımı

Bu konuda Avrupa Birliği ülkelerinden Fransa ve İtalya 2000’ li yılların başında öncü çalışmalar yaparak, tampon ve darbe emici elemanların yapımında geri dönüştürülmüş termoplastik matrisli kompozit kullanımını gerçekleştirmişlerdir. Genel olarak Renault



Şekil 5.7 Renault otomobillerinde darbe alanında kullanılan geri dönüşmüş termoplastik matrisli kompozitlerden yapılan parçalar. 32 nolu parçalar öncelikli darbeye maruz elemanlardır.

Benzer bir kullanım da FIAT firması tarafından tüm binek araçlarının tamponları için yapılmıştır. Bu konuda firma kendi darbe ve güvenlik standartlarını oluşturmuş, üniversite – sanayi işbirliği içerisinde de Ar-Ge çalışmalarını bitirmiştir [91].



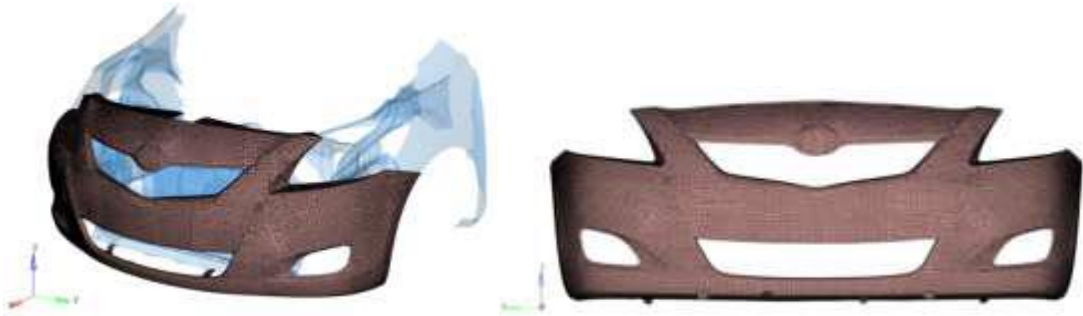
70

Benzer çalışmalar aynı yıllarda Japon otomobilleri için de yapılmıştır. Örneğin Honda firması otomobillerinde önce PP, sonra PE matrisli ve cam fiberli, geri dönüştürülmüş kompozit kullanımını başlatmıştır. Şekil 5.10'da bu otomobiller için imal edilmiş kompozit tampon gösterilmiştir [78].

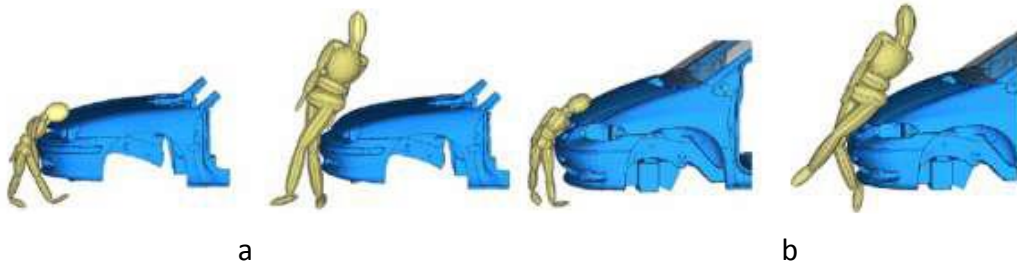


Şekil 5.10 Honda otomobillerinde kompozit ön tampon

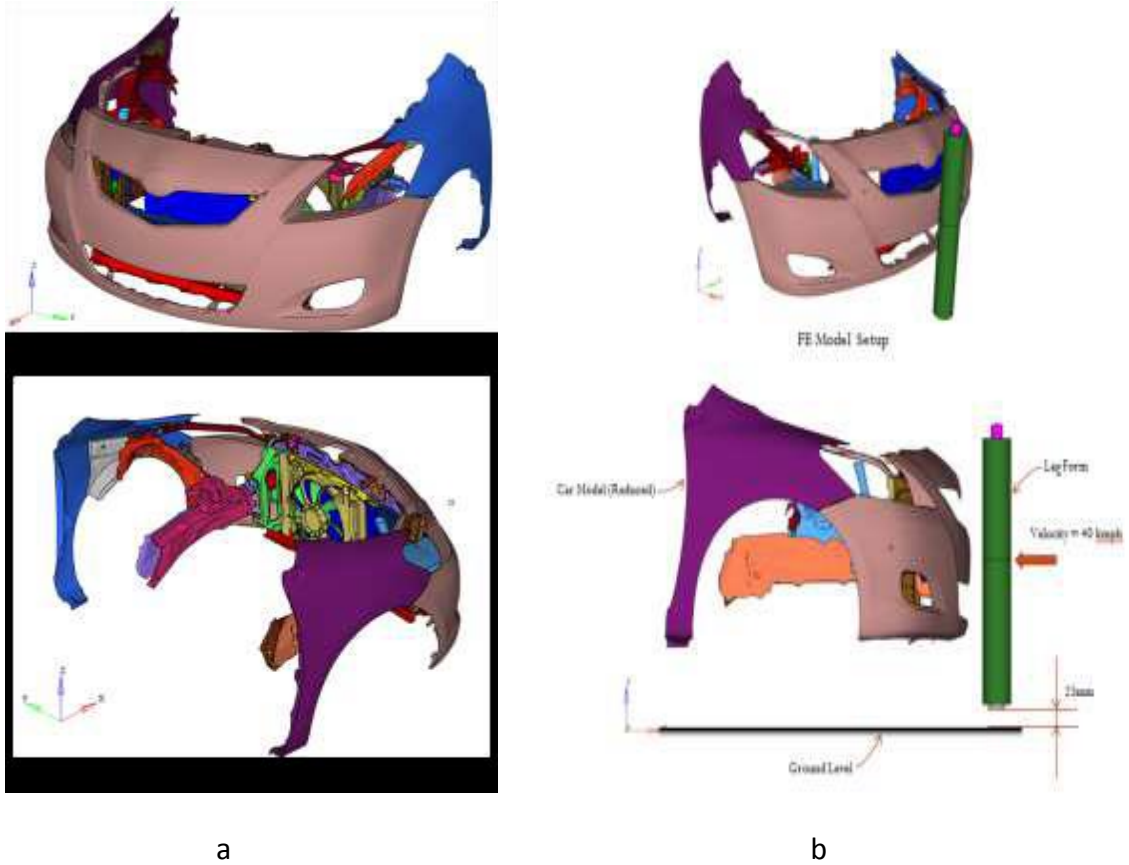
Şekil 5.11'de benzer şekilde Toyota firmasının Yaris modellerinde kullanılan geri dönüştürülmüş termoplastik matrisli kompozitlerin kullanımı ve insan ile çarpışma simülasyonu verilmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.11 Geri dönüştürülmüş Toyota Yaris tamponu



Şekil 5.12 a) Spor otomobil, b) Panelvanlarda önce 6 yaşında, sonra ise yetişkin bireylerde çarpışma modellemesi



Şekil 5.13 Toyota Yaris ön tamponu için a) sonlu elemanlar modellenmesi ve b) sonuçların çarpma testiyle doğrulanması

Diğer taraftan çarpışma modelleri sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak çözümlenmiş ve sonuçların deneysel çalışmalarla da doğrulanması yapılmıştır. Şekil 5.12’de sözü edilen çalışmalar gösterilmiştir. Tüm bu çalışmaların sayısal verileri, firma için gizlilik taşıdığından ve çalışmamızın da etik kurallar içinde gerçekleştirilmesi amaçlandığından, verilmemiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada poliolefin grubu termoplastiklerden polietilen (PE) matris malzemesi olarak, kırık (sürekli) E-Camı fiberler de takviye malzemesi olarak seçilmiştir. PE matris malzemesi Daelim firmasından granül halinde satın alınmıştır. Özellikleri ise; MFR değeri 0.080g/10dk (190°C/2.16kg), ergime sıcaklığı 190°C ve çekme dayanımı da 24.5 MPa dır. Bu katalog değerleri daha sonra yapılmış olan laboratuvar çalışması ile doğrulanmıştır. Örneğin, yapılan çekme deneyi sonucunda çekme dayancı 28.3 MPa olarak belirlenmiştir. Bu verilere dayanarak çalışma PE için 180°C olarak belirlenmiştir.

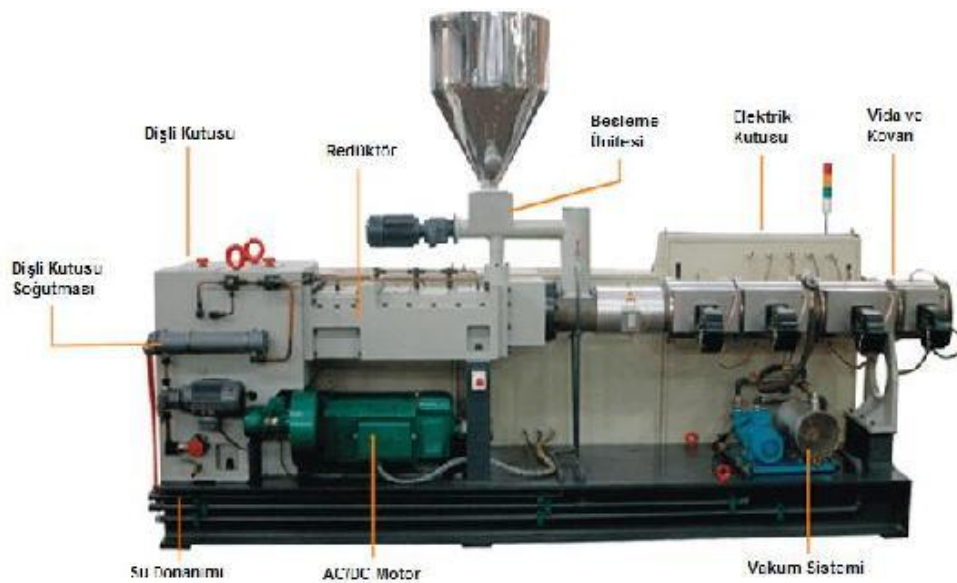
Takviye malzemesi olarak CamElyaf A.Ş.'den alınan E-camı fiberler seçilmiştir. Fiber boyu 3 mm, çapı 13 µm, demet ağırlığı 1200 tex (g/1000mm) olup ve yüzeyleri silanla kaplı olarak imal edilmiştir.

Fiberlerin yüzeylerindeki hidroksil grupları nedeniyle sahip oldukları hidrofilik (su seven) doğaları, hidrofobik (su sevmeyen) termoplastik matris ara yüzey oluşumunda ters etkide bulunmaktadır. Bunun sonucunda termoplastik matris fiberleri ıslatamamakta ve fiber/matris yapışması zayıf olmaktadır. Yapışmayı artırmak için reçine, yapıştırıcı veya takviye arası arayüzeye köprü olabilecek fonksiyonel grupları içeren bir bağlama elemanı ile fiberlerin işlenmesi gerekmektedir. Bu durum göz önünde alındığında, PE kompozitlerle cam fiberlerin ara yüzey sorununu ortadan kaldırmak için maleik anhidrit (MAH) aşılı PE'ler yapıştırıcı olarak kullanılmıştır. Kullanılan yapıştırıcı Y03 olarak kodlanmıştır. Maleik anhidrit, polietilenle aşılınmış

biçimde ayrıca bileşen olarak çift vidalı ekstrüderde yapıya katılmıştır. % 10 Maleik anhidrit içeren PE, saf PE ile uygun oranda karıştırılarak Maleik anhidrit oranı 0.96 – 1.00 olan, daha önceki çalışmalarda da YTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Kompozit Malzemeler laboratuvarında optimize edilen değerlerde kullanılmıştır. Bu çalışma esas olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada ortalama % 20 hacim oranında kırık fiberli granül şeklindeki orijinal kompozit hammadde üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu aşama her bir geri dönüşüm için dört kere (bir orijinal, dört çevrim olmak üzere toplam beş adet numune grubu) geri dönüşüm işlemi de yapılmıştır. İkinci aşamada granüllerden plakalar üretilmiştir. Üçüncü ve son aşamada ise mekanik ve fiziksel özellikler, yani karakterizasyon deneyleri yapılarak sonuçlar analitik olarak ifade edilmiştir.

6.2 Granül İmalatı

Bu amaçla, YTÜ Kompozit Malzemeler Laboratuvarı proje ortağı olan MİR Ar-Ge'nin laboratuvarlarında bulunan çift vidalı ekstrüderden yararlanılmıştır. Ekstrüderin katalog resmi Şekil 6.1' de verilmiştir. JYM firmasının Zhangjiagang markalı, JY-52, konik çift vidalı ekstrüderi kullanılmıştır. Çift vidanın koniklik oranı 16/32 mm, hatvesi 65 mm, ekstrüder kapasitesi 20 kg/saat, maksimum çekme hızı 15 m/dakika, motor gücü 55kW olmak üzere toplam kurulu gücü 80 kW'tır.



Şekil 6.1 Deneylerde kullanılan JY-52, konik çift vidalı ekstrüder resmi

Bu ekstrüder laboratuvar tipli olup, granüllerin istenilen oranda homojen karışımını yapmaktadır. Sonra ekstrüder kafasından çıkan dörtlü makarna şeklindeki ürünler su havuzundan geçirilip kesme kafasında kesilerek, granül haline getirilmektedir. Ekstrüderin kurulu ve çalışır vaziyetteki durumu Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

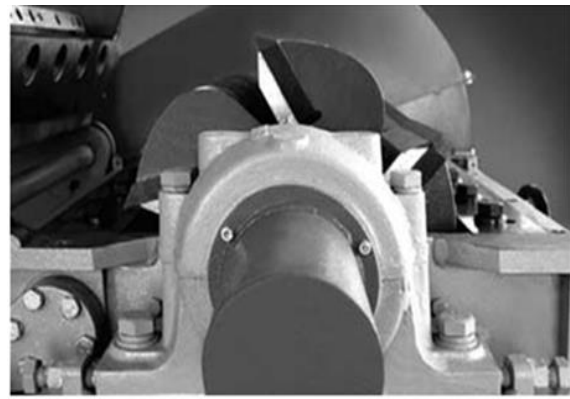


Şekil 6.2 Çift vidalı ekstrüderin çalışır haldeki panoramik görüntüsü

Kafadan kesmeye gelen dörtlü makarna ürünü görüntüsü ve kafadan kesme döner bıçakları Şekil 6.3’te gösterilmiştir.



a

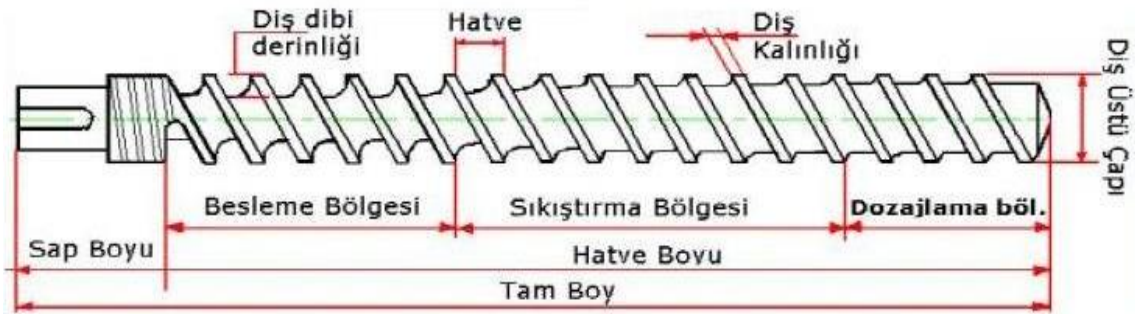


b

Şekil 6.3 a) Ekstrüder kafasından çıkan dörtlü makarna görüntüsü, b) Döner kafadan kesme bıçakları

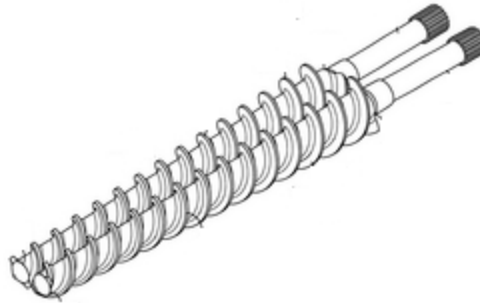
Vida çapının prosese etkisi ise, üç aşamada açıklanır. Birinci bölge, besleme hunisinden gelen granüllerin vidaya girdiği bölge olup, kısaca besleme bölgesi olarak tanımlanır. Vida hatvesine bağlı olarak ikinci bölge, ürünün sıkıştırıldığı bölge olup, kısaca sıkıştırma bölgesi olarak adlandırılır. Son kısım, yani kafaya veya kalıba yakın kısım, dozajlama bölgesi olup, enjeksiyonun (çalışmada makarna çıkışı) yapıldığı kısımdır. Çalışmada

kullanılan vida sert krom kaplı olup, etrafı yani kovan 25 kW gücündeki rezistanslarla ısıtılmaktadır. Şekil 6.4’ te vida ve bölgeleri gösterilmiştir [95].



Şekil 6.4 Ekstrüder vidasının şematik gösterilişi

Şekil 6.4’te gösterilen vidalar konik ve birbirlerine göre dönüşü ters çift vidalı şekilde imal de edilirler. Endüstride bu mühendislik plastiklerinin enjeksiyonu için net % 50 verim artışı sağlamak için kullanılır. Ayrıca, farklı komponentleri karıştırmak ve ürünü homojen renklendirmek için kullanılır. Laboratuar çalışmalarında ise dokuda bulunacak değişik fazların homojen dağılımı için tercih edilir. Burada da bu tercihten hareketle Şekil 6.5’ de, JY-52 modeli için 35 d/d ile dönen çift vida şekli verilmiştir [95].



Şekil 6.5 JY-52 modeli için 35 d/d ile dönen çift vida görünümü

6.3 Plakaların Hazırlanması

Şekil 6.2’deki ekstrüderden çıkan makarna numuneler Şekil 6.3 b’ deki kesme kafasında kesilerek çapı 1.5 – 1.8 mm, boyu 3.00 mm olan granül haline getirilmiştir. Buradan üretilen plaka ve deney parçaları “orijinal” numune olarak tanımlanmıştır. Daha sonra, buradan çıkan numune, kırıcıda kırıldıktan sonra, ekstrüderin besleme hunisinden tekrar beslenmiş ve yeni makarna kafadan kesilerek yine çapı 1.5 – 1.8 mm, boyu 3.00 mm olan granül haline getirilmiştir. Buna da kısaca “birinci geri dönüşüm” adı verilmiştir. Benzer işlem dört kere tekrarlanmış ve sırasıyla; “ikinci geri dönüşüm”,

“üçüncü geri dönüşüm” ve “dördüncü geri dönüşüm” granülleri elde edilmiştir. Elde edilen granüller Şekil 6.6 a)’da gösterilmiştir. Daha sonra kalınlığı 4 mm, eni ve boyu 300 x 300 mm olan kalıba Şekil 6.6 b)’de gösterildiği gibi konarak presleme aşamasına geçilmiştir. Şekil 6.6 c)’de görüldüğü gibi plaka numune elde edilmiştir. Deney parçasının elde edileceği nihai plakalar ise Şekil 6.6 d)’de görüldüğü gibi çıkarılmış ve numaralanmıştır.



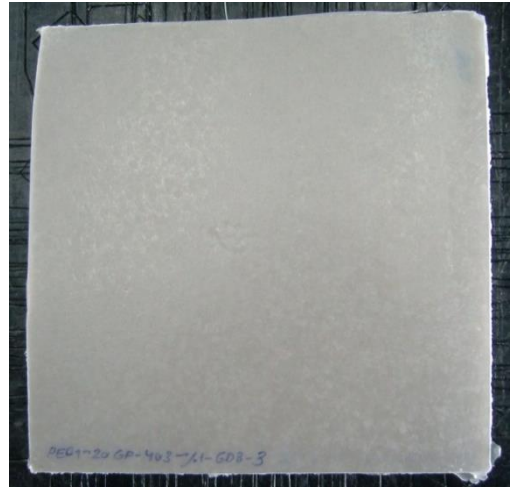
a



b



c

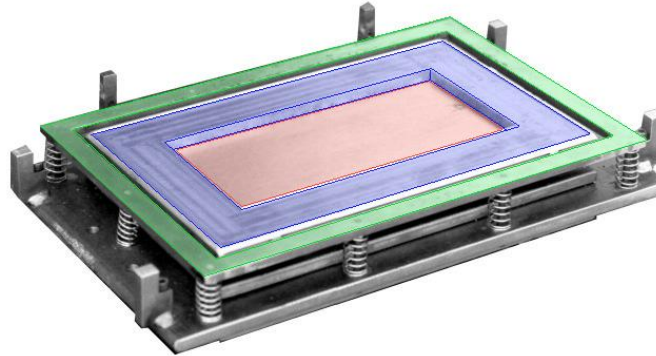


d

Şekil 6.6 a) Makarnadan kesme kafası yardımıyla kesilerek elde edilen granüller, b) Granüllerin kalıba alınması, c) Sıcak presleme, d) Nihai ürün olan deney plakalarının elde edilmesi

Şekil 6.6 c)’de sıcakta izostatik baskı yapan kalıbın sadece tutucu çerçevesi gösterilmiştir. Kalıbın detayı Şekil 6.7’de verildiği gibidir. Üst yüzeyi, presin serbest

yüzeyiyle temas ederek, doğrudan presleme yapacak şekilde, bu amaçla özel olarak tasarlanıp imal edilmiş ve YTÜ Kompozit Malzemeler Laboratuvarında kullanılmaktadır.



Şekil 6.7 İzotermal ve izostatik özelliklere sahip plaka basma kalıbı

Presleme, Şekil 6.8’de gösterilen izotermal ve izostatik preste yapılmıştır. Daha önceki yapılmış çalışmalar ve bu tez için yapılan ön çalışma sonuçları birleştirilerek; 100 barlık basınç altında 180 °C’ ta 3 dk. beklenerek numuneler preslenmiştir.



a



b

Şekil 6.8 Sıcak izostatik, iki fonksiyonlu pres, alt göz sıcakta presleme, üst göz plakaların deforme olmaması için soğukta bekleme gözleridir. a) Pres açık konumda, b) Pres kapalı konumda numune preslenirken

Sıcakta üç dakika preslenen numuneler kalıbıyla birlikte birinci göz olan sıcak gözden alınmış, ikinci göz olan soğuk göze konarak 3 dakika beklenmiştir. Soğukta, basınç altında beklemenin nedeni, daha sonra plakalarda olabilecek makro geometrik form hatalarını (çarpılma, bükülme, bombeleşme, ondüle oluşumu vb.) önlemek içindir. Bu

işlemler, bir orijinal, sırasıyla 1, 2, 3, 4 kez geri dönüştürülmüş plakalar için ayrı ayrı yapılmıştır. Ayrıca, her bir numune grubu için de üç adet plaka üretilmiştir.

6.4 Plakaların Kodlanması

Bu çalışma için YTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında yapılan projelerin sistematüğinden yararlanılarak yeni bir kodlama geliştirilmiştir. Kontrol grubu, yani orijinal numuneler için “ORJ”, basılan üç adet plaka için sırasıyla “P1, P2, P3” kodlamaları yapılmıştır. Geri dönüşümler için ise sırasıyla “GD1, GD2, GD3, GD4” gösterimine gidilmiştir. Bu sıralamadan sonra gelen “Ç” çekme deneyi numunelerini, “E” eğme deneyi numunelerini, “D” darbe deneyi numunelerini, “K_{İC}” kırılma tokluğu numunelerini ve “UV” UV deneyinde kullanılan numuneleri simgelemektedir. Örneğin, “ORJ – P1 – E1”: Orijinal birinci plakadan çıkartılan 1 nolu eğme deneyi numunesini, “GD4 – P3 – D3”: Dördüncü geri dönüşümün üçüncü plakasından çıkartılan 3 nolu darbe deneyi numunesini göstermektedir.

6.5 Yapılan Deneyler

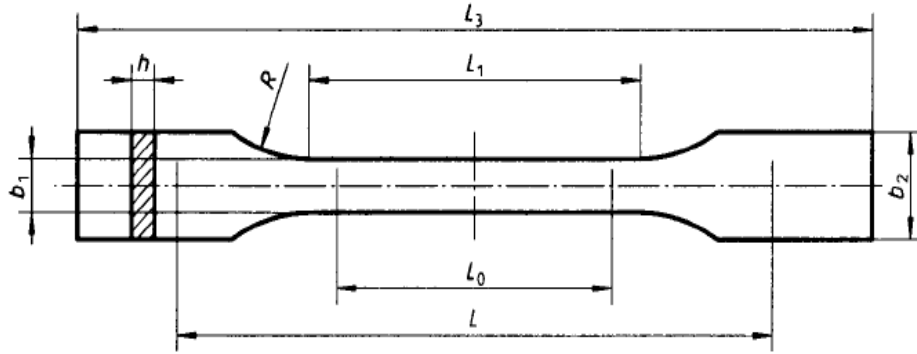
Uygulanan deneyler, mekanik ve fiziksel deneyler olarak iki grupta yapılmıştır. Mekanik deneyler; çekme, eğme, darbe ve kırılma tokluğu deneyleridir. Fiziksel deneyler; MFR ölçümü, DSC, yoğunluk ve kalsinasyon deneyleridir. Ayrıca mekanik teknolojik deneyler grubunda incelenen, ancak sonuçları mekanik deneyler grubunda değerlendirilen UV deneyleri de yapılmıştır.

6.5.1 Çekme Deneyi

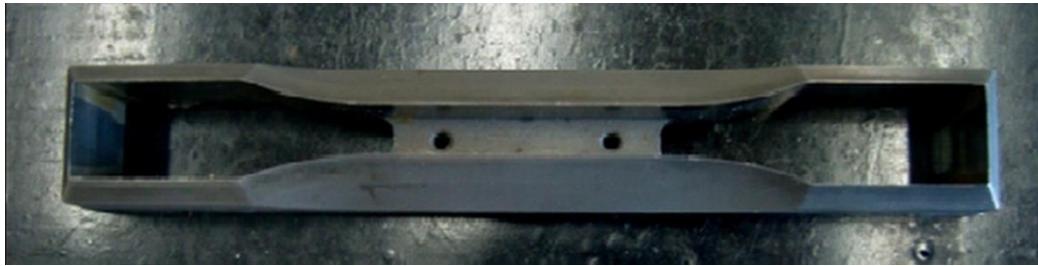
Çekme deneyi TS EN ISO 527-4’e göre hazırlanan deney numuneleri kullanılarak yapılmıştır [96]. Buna göre plaka numuneler için deney parçası boyutlandırılması, detayları Çizelge 6.1’de verildiği gibi yapılmıştır. Kaşık veya kemik numunesi olarak da tanımlanan bu numunelerin plakadan çıkartılması için standartta önerilen ve soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş numune kesme kalıpları kullanılmıştır. Şekil 6.9’da, Çizelge 6.1’de verilen boyutların resmi ve Şekil 6.10’da da kaşık numune için kullanılan kesme kalıbı gösterilmiştir. Numunelerin kalıpla kesme işlemi Şekil 6.8 b’de verilmiş presin soğuk çeneleri kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 6.1 TS EN ISO 527-4'e göre çekme deneyi parçası boyutları

Anlam	Sembol	Ölçü(mm)
Toplam uzunluk	L_3	≥ 150
Dar paralel kenarlı kısmın uzunluğu	L_1	$60 \pm 0,5$
Yarıçap	R	≥ 60
Uçlardaki genişlik	b_2	$20 \pm 0,2$
Dar kısmın genişliği	b_1	$10 \pm 0,2$
Kalınlık	h	2 – 10
Ölçme uzunluğu	L_0	$50 \pm 0,5$
Çeneler arasındaki başlangıç mesafesi	L	115 ± 1



Şekil 6.9 Kaşık şekilli çekme numunesi



Şekil 6.10 Numune kesme bıçağı

Şekil 6.10'daki kesme bıçağı kullanılarak elde edilen kaşık numuneler Şekil 6.11'de gösterilen ve YTÜ Kompozit Malzemeler Laboratuvarında bulunan universal çekme cihazı kullanılarak çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Standarda göre çekme hızı 5 mm/dak. olarak seçilmiş ve tüm deneyler boyunca da sabit tutulmuştur. Çekme cihazı

20 kN yük kapasiteli MARES marka, TST-SE-J-2T model üniversal bir makina olup, $\pm\% 1$ N hassasiyete sahip ve kalibreliedir. Bilgisayar kontrollü olan çekme cihazı mekanik olarak çalışmaktadır. Teste başlamadan önce test hızı, ön yük miktarı, ön yük hızı ve numune boyutları programa girilerek, gerekli hesaplamalar test programı tarafından bu veriler doğrultusunda otomatik olarak hesaplanmaktadır. Çekme cihazı ısı altındaki mekanik davranışların karakterize edilmesinin ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılmak üzere, 80°C'ye çıkabilen bir ısı kabinine sahiptir.



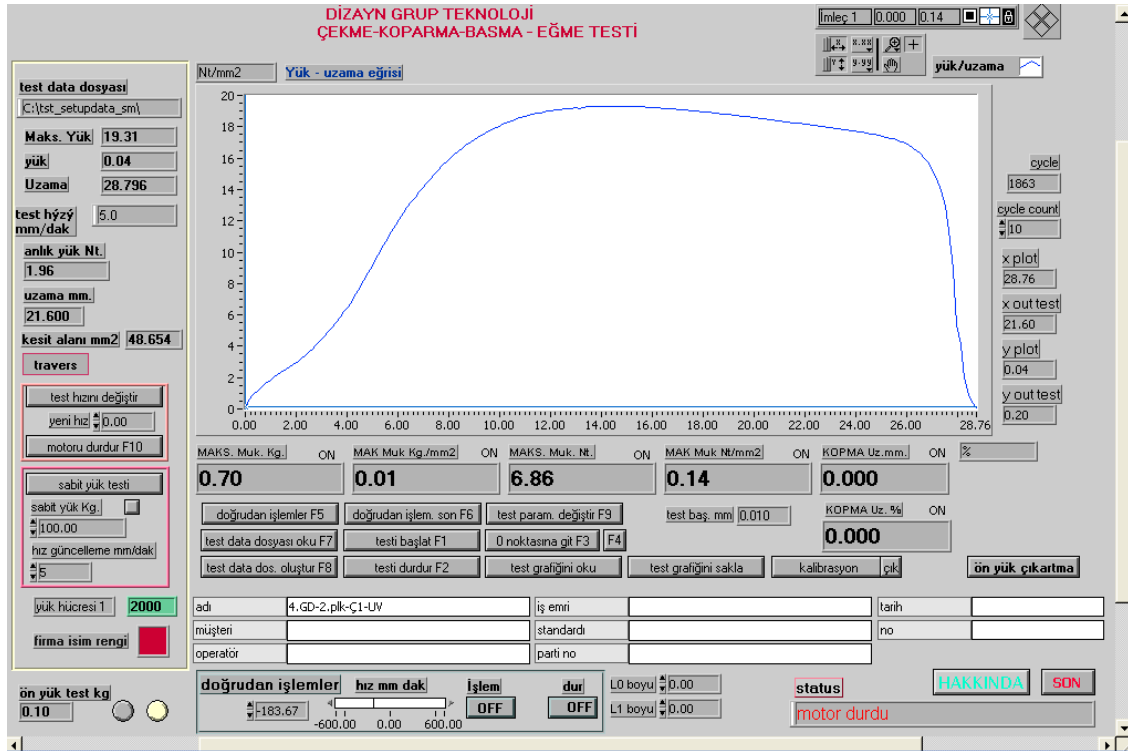
Şekil 6.11 MARES marka, TST-SE-J-2T model üniversal çekme makinası

Çekme makinası; çekme, basma, eğme için ayrı ayrı programlanmış ve bilgisayar yardımıyla masa üstünden kontrol edilebilen düzeneklidir. Deneyin bitiminde otomatik olarak çekme eğrisini çizmekte ve maksimum yükü, kopma anındaki yükü, % uzamayı ve çekme dayancını vermektedir. Çekme dayancını bulmak için,

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6.1)$$

eşitliği kullanılmıştır. Burada A (mm²), numunenin kesit alanı olup, dijital boyut ölçücüyle ölçülerek doğrudan programa giriş yapılır. F (N), maksimum deney yükünü göstermekte olup cihaz tarafından otomatik olarak saptanır. Diğer taraftan, hem çapraz başlık hareketiyle, hem de mekanik eksansometre kullanılarak uzama farkı ve kopma uzaması da otomatik olarak saptanır. Cihaz rezistanslı bir ısı kabinine sahip olup, 120°C'ye kadar sıcakta çekme deneyinde yapabilmektedir. Deney sonucu elde edilen Gerilme – Gerinim eğrisinin lineer elastik alanından da Elastiklik Modülü kolaylıkla

hesaplanabilmektedir. Böyle koşullarda kontrollü olarak gerçekleştirilmiş bir çekme deneyinin sonucu ekran görüntüsü olarak Şekil 6.12’de verilmiştir.

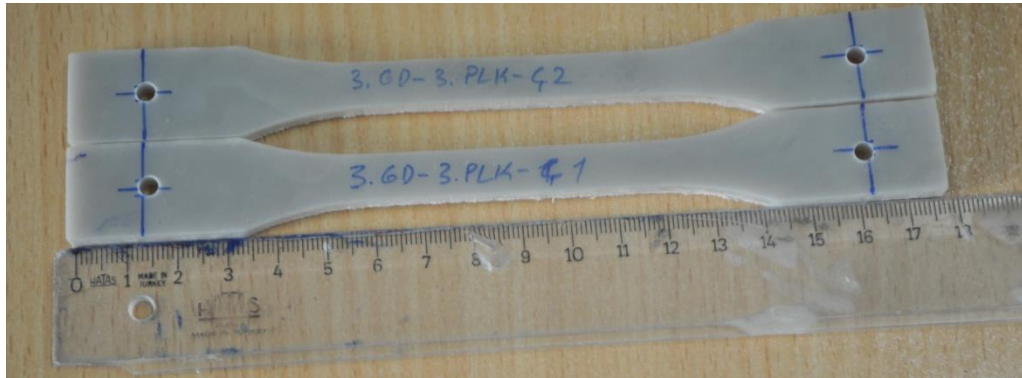


Şekil 6.12 Çekme deneyi sonucu elde edilen gerilme – gerinim eğrisi (GD4 – P2 – Ç1 – UV1 numunesi için)

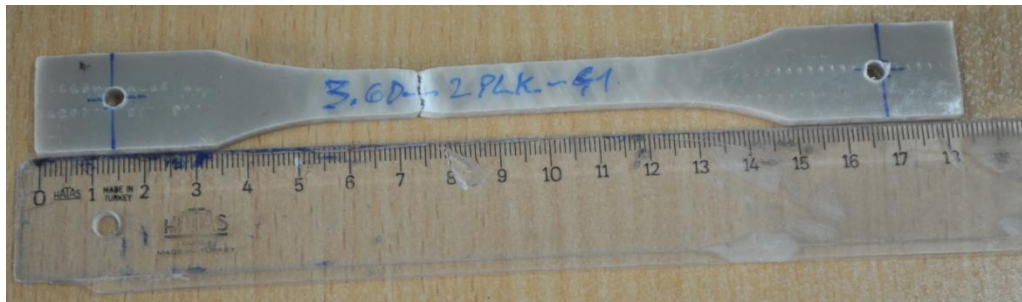
Kaşık numunelerin çekme çeneleri arasında kaymasını önlemek amacıyla TS EN ISO 527-4'e göre numunelerin çeneler arasında kalacak kısmı 3 mm çapında delinerek pim takılmıştır. Pim deliklerinin delinmesi işlemi Şekil 6.13'te gösterilmiştir. Bu şekilde hazırlanmış numunelerin deney öncesi ve sonrası resimleri, ise makro fotoğraflar olarak Şekil 6.14'te verilmiştir. Deneyin koşullara uygun yapılması, elde edilen eğrinin düzgünlüğü ve numunenin ortadan kopması ile açıklanır. Deney sırasındaki uzamalar mekanik eksansometre kullanılarak saptanmıştır. Eksansometre hareketi otomatik olarak PLC kontrollü ana kart girişinden doğrudan kontrol ünitesine bağlantı ile data girişi olartak okunmaktadır. Buna ait görüntü Şekil 6.15'te verilmiştir.



Şekil 6.13 Kaşık numunelerine pim deliklerinin delinmesi işlemi



a



b

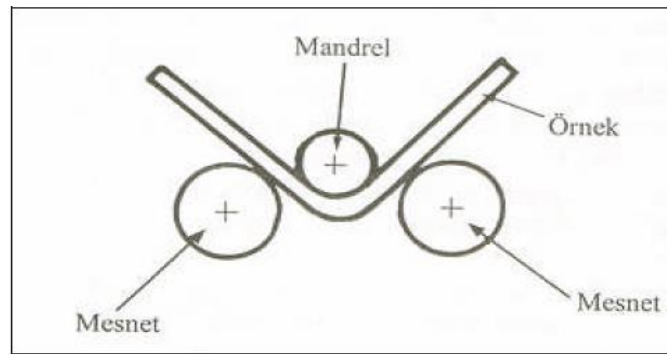
Şekil 6.14 Çekme numunelerin a) deney öncesi, b) deney sonrası resimleri



Şekil 6.15 Çekme deneyinde kullanılan mekanik eksansometre

6.5.2 Eğme Deneyi

Eğme deneyi TS EN ISO 14125 standardına göre üç noktalı eğme şeklinde yapılmıştır [97]. Üç noktalı eğme, silindirik iki adet mesnet üzerine yerleştirilen dairesel veya dikdörtgen kesitli numunelere çapraz başlıkla, yine silindirik bir mandrel tarafından eğme yükü uygulanmasıyla yapılır. Şekil 6.16'da üç noktalı eğme deneyinin temel ilkesi gösterilmiştir. Burada temel amaç, orta noktadan uygulanan eğme yüküne karşı deney parçası malzemesinin gösterdiği dayancın bulunmasıdır.



Şekil 6.16 Üç noktalı eğme deneyinin şematik gösterilişi

Deney, Madde 6.2.1'de anlatılmış olan universal MARES marka ve TST-SE-J-2T model bilgisayar kontrollü çekme cihazında eğme başlıkları kullanılarak standarda uygun biçimde, Şekil 6.17'de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir. Deneyde plaka numunelerinden kesilerek çıkarılmış 80 mm uzunluğunda ve 10 mm genişliğinde dikdörtgen kesitli numuneler kullanılmıştır. Numune boyutları Çizelge 6.2'de

gösterilmiştir. Deney sırasında mesnetler arası uzaklık 64 mm olarak ayarlanmıştır. Deney parçası boyutları doğrudan veri olarak girilmiş, sehim, yani orta noktadaki çökme (deplasman), çapraz başlık hareketleri şeklinde otomatik olarak kaydedilmiştir. Buna göre;

$$\sigma_{eğ} = \frac{M_e}{W} \quad (6.2)$$

eşitliği kullanılarak eğme dayancı hesaplanmıştır. Eşitlikte; $\sigma_{eğ}$ (MPa) eğme dayancı, M_e (N·m) maksimum eğme momenti ve W (mm³) eğilen kesitin mukavemet momentidir. M_e ve W , sırasıyla 6.3 ve 6.4 eşitlikleriyle bulunmuştur.

$$M_e = \frac{F \cdot l}{4} \quad (6.3)$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (6.4)$$

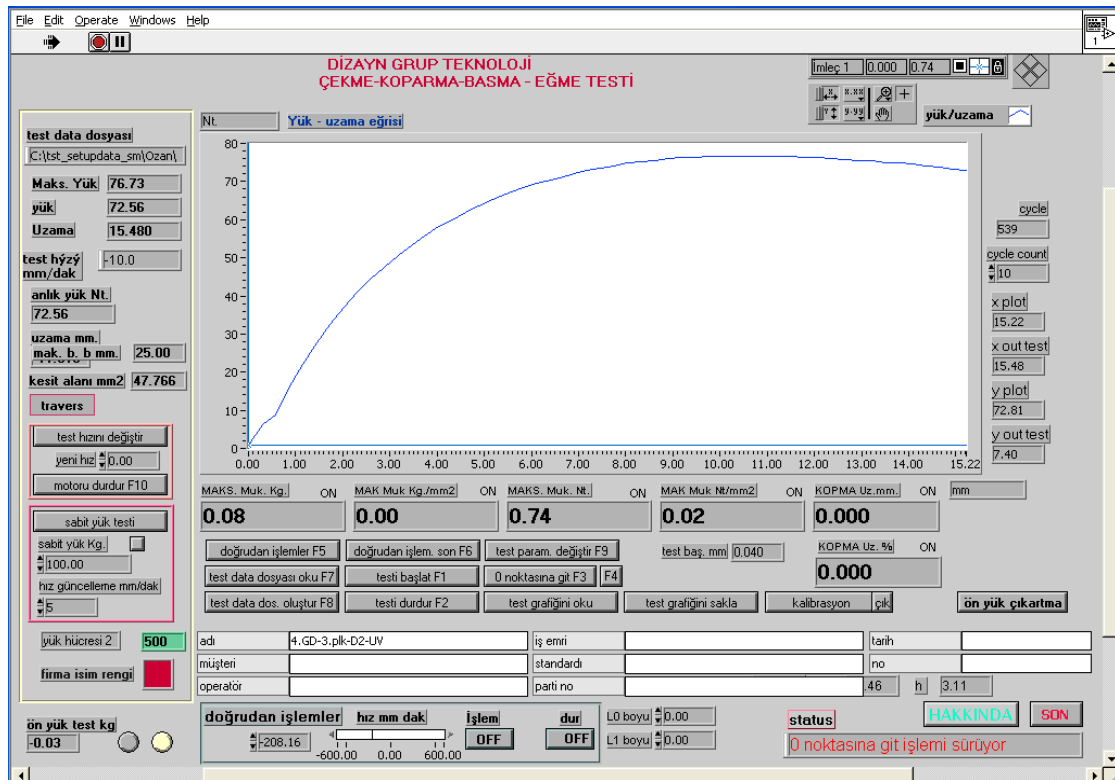
Eşitliklerde, F (N) maksimum yükü, l (mm) mesnetler arası uzaklığı, b (mm) numune genişliği ve h (mm) numune kalınlığını göstermektedir. Bu şekilde yapılmış bir deneyin kuvvet – sehim eğrisi Şekil 6.18’de verilmiştir.



Şekil 6.17 TS EN ISO 14125 standardına göre üç noktalı eğme deneyinin yapılışı

Çizelge 6.2 TS EN ISO 14125'e göre üç noktalı eğme numunesi boyutları

Malzeme	Uzunluk (mm) (l)	Mesnetler arası mesafe (mm) (L)	Genişlik (mm) (b)	Kalınlık (mm) (h)
Fiber destekli termoplastik	80	64	10	4
Toleranslar	- 0 +10	±1	±0,5	±0,2

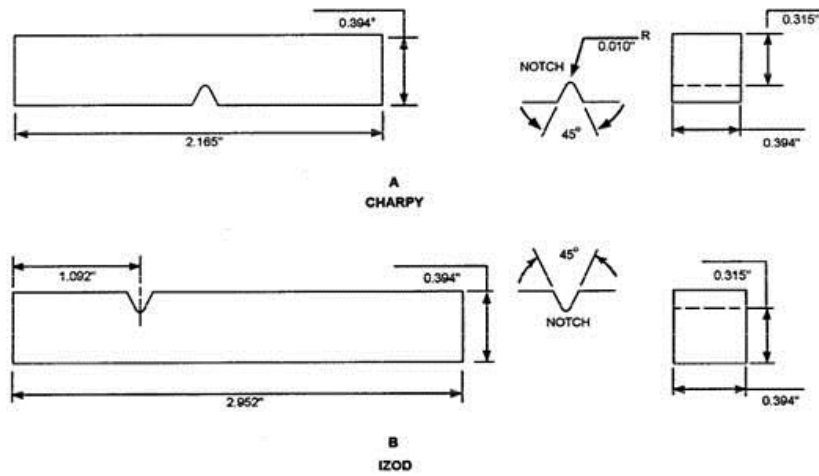


Şekil 6.18 Eğme deneyi sırasında elde edilen kuvvet – sehim eğrisi (GD4 – P3 – E2 – UV1 numunesi için)

6.5.3 Darbe Deneyi

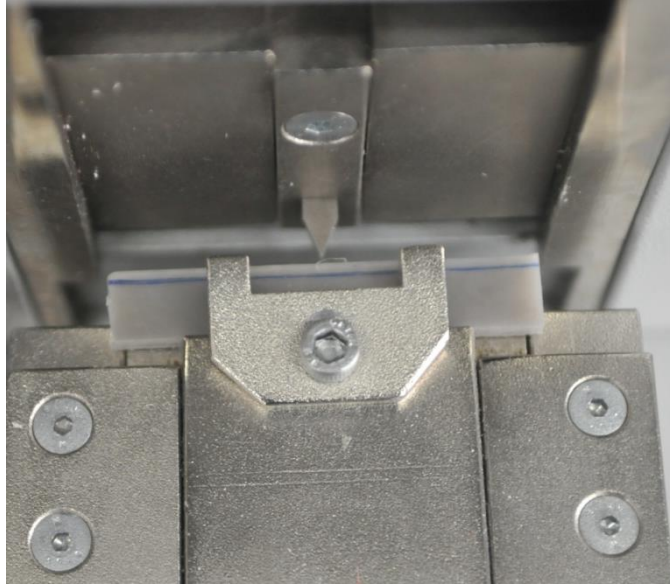
Darbe deneyi, en basit anlamda, malzemelerin tek darbeli yükleme altında kırılmaya karşı gösterdiği dayanç olarak tanımlanır. Başka bir deyimle, kırılma sırasında absorbe edilen iş veya enerjinin saptanması olarak da tanımlanır. En genel biçimiyle mühendislik malzemeleri, gevrek ve sünek malzemeler olarak iki grupta ele alındığında; gevrek malzemelerde hızlı kırılma oluşacağından doğrudan çentiksiz numuneler kullanılır ki, bu numunelerin kullanıldığı deneyler kısaca darbe deneyi olarak

tanımlanır. Diğer taraftan, sünek malzemelerde elastik-plastik kırılma etkisiyle çatlağın bir düzlem boyunca ilerlemesini sağlamak amacıyla, çentikli numuneler kullanılır. Böylesi çentikli numunelerin kullanıldığı deneylere de çentik darbe deneyi denir. Çentik darbe deneyleri başlıca iki yöntemle yapılır. Yaygın olarak kullanılan yöntem “Charpy” yöntemi olup, darbeyi oluşturan çekiç numuneye çentiğın arka orta noktasından vurur. Diğer yöntem ise, “Izod” yöntemi olup, çekiç, numuneye çentik tarafında ve uç noktadan darbe oluşturacak şekilde vurur. TS EN 148-1’e göre Charpy ve Izod numuneleri Şekil 6.19’da gösterilmiştir [98].

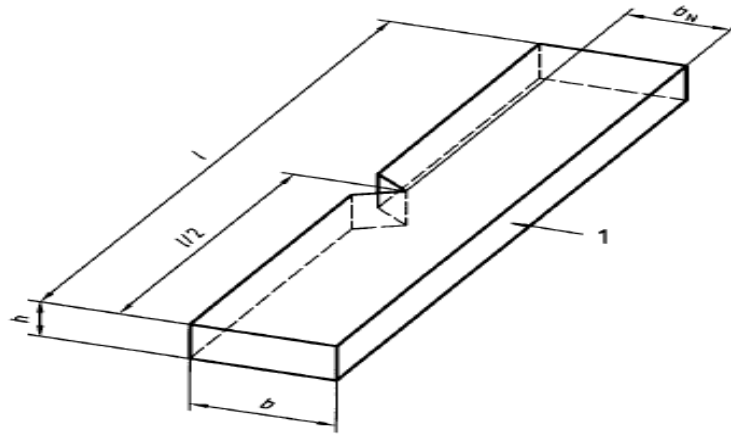


Şekil 6.19 TS EN 10045’e göre Charpy ve Izod numuneleri [98]

Plastikler ve termoplastik matrisli kompozit malzemeler sünek malzemeler grubunda yer aldığından darbe deneylerinde çentikli numuneler kullanılır. Buna göre, polimer matrisli kompozit numunelere uygulanan darbe deneyleri TS EN ISO 148-1 standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Numunelere 2 mm derinliğinde ve 45° açılı V çentikler, bu amaç için kullanılan çentik açma makinasında açılmıştır. Açma işlemi ucu 45° açılı olan şekilde HSS çeliğinden yapılmış, bir kesme bıçağıyla aşağı-yukarı hareketle ve çentik ucunda kalıcı deformasyon oluşturmada n açılmıştır. Bu amaçla, Şekil 6.20’de gösterilen Devotrans marka ve “CHARPY IMPACT TESTER DVT CD 1 I” modeli cihaz kullanılarak, TS EN ISO 148-3’e göre, Şekil 6.21’de boyutları verilen numuneler hazırlanmıştır [99]. Numunelerin çentikleri çentik açma makinasında çentikleri açıldıktan sonra standartlarda belirtilen şekilde darbenin çentik açılan tarafın arka tarafına gelecek şekilde cihaza yerleştirilip deneyleri yapılmıştır.

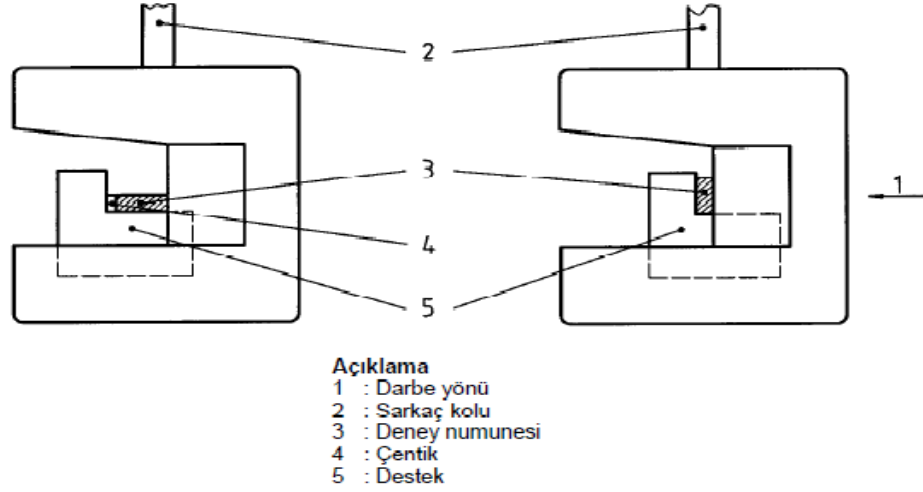


Şekil 6.20 V çentiğinin açılmasında kullanılan “CHARPY IMPACT TESTER DVT CD 1 I” modeli cihaz



Şekil 6.21 TS EN ISO 179-1'e göre hazırlanan çentik darbe numunesi

Deney numunesinin boyutları dijital kumpasla, 0.01 mm hassasiyetle ölçülerek kaydedilmiştir. Çentikli numunelerde genişlik, çentik dışında kalan genişlik dikkate alınarak ölçülmüş ve “ b_N ” (mm) değeri olarak, ayrıca numune kalınlığı “ h ” (mm) olarak belirlenmiştir. Numuneler deney makinasına Şekil 6.22’ de verilen biçimde yerleştirilmiş ve Şekil 6.23’de gösterilen Devotrans marka, “Charpy Impact Tester DVT CD C” model 5J kapasiteli darbe cihazı kullanılarak kırılmıştır.



Şekil 6.22 Darbe numunesinin yerleştirilmesi

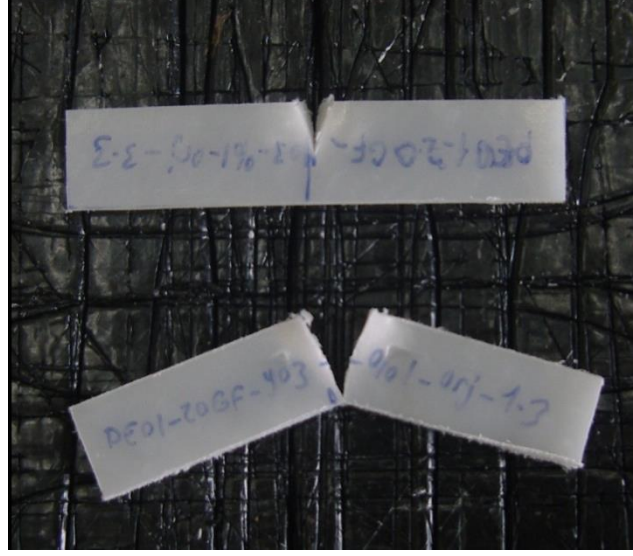


Şekil 6.23 Devotrans marka, “Charpy Impact Tester DVT CD C” model 5J kapasiteli darbe cihazı

Daha sonra darbe deneyleri yapılmış ve göstergedan numunenin absorbe ettiği enerji (E_c) değeri J (joule) cinsinden saptanmıştır. Elde edilen bu verilerle numunenin darbe dayancı (a_{cN}) TS EN ISO 179-1'e göre Eşitlik 6.5 kullanılarak kJ/m^2 cinsinden hesaplanmıştır.

$$a_{cN} = \frac{E_c \times 10^3}{h \times b_N} \quad (6.5)$$

Şekil 6.24'te ise bu şekilde hazırlanmış bir numunenin darbe deneyi öncesi ve sonrası görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.24 Darbe deneyi öncesi ve sonrası numune görüntüsü

6.5.4 Kalsinasyon Deneyi

Deneyde kullanılan numunelerin fiber hacim oranları, dumansız yakma, yani kalsinasyon deneyi ile saptanır. Polimer matrisli kompozit malzemelerin fiber hacim oranları TS 1177 EN ISO 1172'de tanımlanan kalsinasyon testi ile yapılmıştır. Standartta A metodu kullanılmıştır [100]. Bu metod, dolgu maddesinin olmaması koşullarında, fiberlerin ağırlık oranının saptanması için tanımlanmış bir yöntemdir. Bu metoda göre cam oranını saptamak için gerekli olan cihazlar; 0,1 mg doğrulukta tartabilen dijital terazi, içine deney numunesinin konulduğu silisyum dioksit veya porselenden yapılmış kroze, çeker ocak altına yerleştirilmiş ve seçilen sıcaklığı $\pm 20^{\circ}\text{C}$ yaklaşımla sabit tutabilen kül fırını, uygun bir kurutucu bulunduran desikatör ve sıcaklığı $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlanabilen havalandırılmalı kurutma etüvüdür. Laboratuarda deneylerin yapılmasında kullanılan kül fırını maksimum sıcaklığı 1200°C 'ye kadar çıkarılabilen, Protherm marka, "PLF 120/5" model fırındır. Şekil 6.25'te resmi gösterilen fırın, seramik bazlı yalıtım tabakasına sahip olup, fırının kapağı yukarı doğru açılarak kullanıcıyı sıcaklık etkisinden de koruyacak biçimde tasarlanmıştır.



Şekil 6.25 Protherm marka, “PLF 120/5” model kül fırını

Deneylerde kullanılan numuneler, çekme deneyi sonrasında kopan numunelerin hasar görmemiş kısımlarının kesilmesiyle elde edilmiştir. Önce krozelerin boş ağırlıkları hassas bir şekilde tartılarak (m_1) değeri saptanmıştır. Bir sonraki adımda kroze içerisine numuneler yerleştirilerek tekrar tartılıp elde edilen değer (m_2) olarak kaydedilmiştir. 650 °C sıcaklığa ısıtılmış olan kül fırınında 1 saat süre ile numuneler kalsine edilerek PE matrisi dumansız olarak yakılmıştır. Fırından çıkarılan krozeler tekrar tartılarak kalsinasyon sonrasında oluşan kütle kayıplı ağırlık (m_3) olarak kaydedilmiştir. Elde edilen verilerle deney parçalarındaki cam fiber ağırlık oranı Eşitlik 6.6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%M_{Cam\ Fiber} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 \quad (6.6)$$

Diğer taraftan, matrisin yoğunluğu ρ_m ve fiberin yoğunluğu ρ_f kullanılarak cam hacim oranına Eşitlik 6.7 kullanılarak geçiş yapılmıştır.

$$\%V_{Fiber} = \frac{\frac{m_f}{\rho_f}}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m}} \cdot 100 \quad (6.7)$$

Kalsinasyon deneyi sonrasında elde edilen görüntü makro resim olarak Şekil 6.26’da gösterilmiştir. Kalsinasyon deneyinin sonunda numuneler stereo ışık mikroskopunda incelenmiştir. Bu amaçla, Şekil 6.27’de gösterilen Nikon SMZ645 marka stereo ışık

mikroskobu kullanılmıştır. Stereo ışık mikroskobunun kullanılmasıyla fiber boyu ve morfolojisi saptanmıştır. Böylesi bir görüntü Şekil 6.28’de verilmiştir.



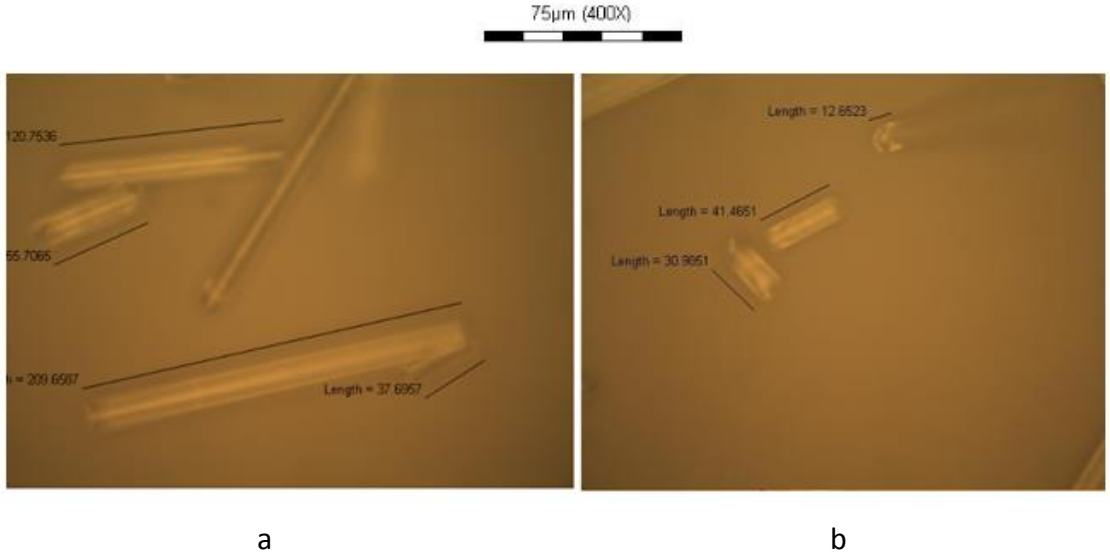
Şekil 6.26 Kalsinasyon testi sonrasında cam fiberlerin makro görüntüsü



Şekil 6.27 Nikon SMZ645 marka stereo ışık mikroskobu

6.5.5 Yoğunluk Deneyi

Yoğunluk deneyleri TS EN ISO 1183-1’e göre yapılmıştır [101]. Kalsinasyon deneyine benzer şekilde, çekme deneyinden arta kalan numuneler deneye tabi tutulmuştur. Bu amaçla, Şekil 6.29’da gösterilen 210 gram kapasiteli AND marka GR200 model hassas terazi ve yoğunluk kiti kullanılmıştır.



Şekil 6.28 Stereo mikroskop görüntüleri a) Orijinal numune, b) Dördüncü çevrim

LCD göstergeli hassas terazi 0,001 hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Cihaz ortamdaki sıcaklık değişikliklerinde kendiliğinden devreye giren otomatik kalibrasyon fonksiyonuna sahiptir. Deney numuneleri polimer matrisli kompozit oldukları için daldırma sıvısı olarak numunelerin batabileceği bir sıvı olarak etil alkol seçilmiştir. Kullanılan etil alkolün yoğunluğu deney öncesinde ortam sıcaklığına bağlı olarak bir kereye mahsus olmak üzere ölçülüp terazinin hafızasına kaydedilerek, deney süresince gerçekleşen ortam sıcaklığındaki değişimlere göre alkolün yoğunluk değişimi cihaz tarafından otomatik olarak ayarlanmıştır.



Şekil 6.29 AND marka GR200 model hassas terazi ve yoğunluk kiti

TS EN ISO 1183-1'e göre numunenlerin önce havadaki ağırlığı, sonra da bir daldırma sıvısı (etil alkol) içerisindeki ağırlığı ölçülmüştür. Yoğunluk değeri ise cihaz tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır. Yoğunluk deneyi sonucu elde edilen değerler ile karışımlar kuralından hesaplanan yoğunluk değerleri Eşitlik 6.8'deki formülde yerine konularak kompozit numunelerin boşluk hacmi (V_v) olarak hesaplanabilir.

$$V_v = \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t} \quad (6.8)$$

Formülde V_v , ρ_t , ρ_d sırasıyla boşluk hacmini, teorik yoğunluğu (hesaplanan yoğunluk) ve deneysel olarak ölçülen yoğunluğu ifade etmektedir.

6.5.6 MFR (Erime Akış Hızı) Deneyi

Erime Akış Hızı (MFR = Melt Flow Rate); erimiş plastiklerin şekillendirme yeteneğinin belirlenmesinde kullanılan bir yöntem olup, görece plastiklerin bir nozuldan akışlarını karşılaştırmak amacıyla kullanılan bir tür indekstir. Deneyin esası, belirli sıcaklıkta, sabit bir yük altında 10 dakikada akan plastik miktarının saptanmasıdır. Deneyler, TS EN ISO 1133-1 standardına uygun olarak 5 kg yük altında 190°C'de yapılmıştır [102]. Deney sonucu, SI birim sistemine göre, g/10 dak. birimiyle ifade edilir. Bu indekslemeye benzer bir gösteriliş de; MVR indeksi olup, hacim cinsinden cm³/10 dak. birimiyle tanımlanan erime hacim miktarıdır. Buna göre MVR, Eşitlik 6.9'da verildiği gibi hesaplanabilir.

$$MVR = \frac{MFR}{\rho} \quad (6.9)$$

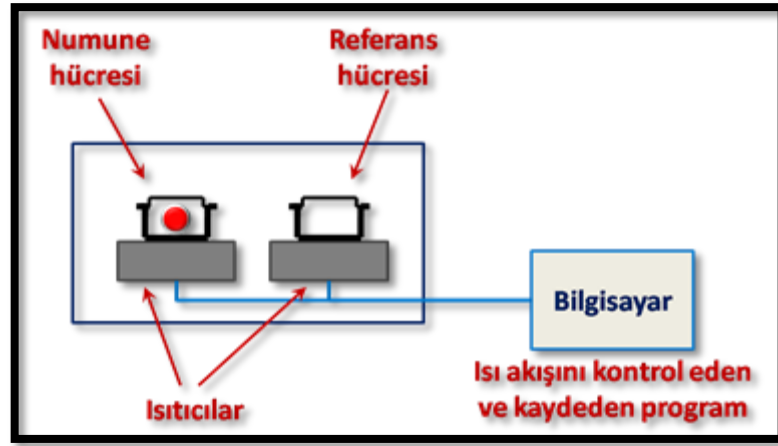
Böylece, erimiş durumdaki malzeme yoğunluğu, MVR değeriyle çarpılarak MFR değeri elde edilebilmektedir. MFR deneyinin temel prensibi, granül, toz ve pul formundaki termoplastik numunelerin ısıtılarak akışkan hale getirilmesi ve kapiler kalıp boyunca silindir içinden akmaya zorlanmasıdır. Şekil 6.30'da gösterilen Devotrans marka, "Melt Flow Indexer (MFI) DVT EA" model cihaz, deneylerde kullanılmıştır. Buna göre orijinal numune ve dört çevrimde elde edilen numunelerin 5 kg yük altında, 190°C'de ayrı ayrı MFR değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada amaç, geri dönüşüm prosesinin PE matris malzemesine olan etkisinin araştırılmasıdır. Böylelikle orijinal numuneye göre, artan çevrim sayısı, plastik matrisli kompozitin şekillendirilebilme özellikleri belirlenmiş olur.



Şekil 6.30 Devotrans marka, “Melt Flow Indexer (MFI) DVT EA” model cihaz

6.5.7 DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Deneyi

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) tekniği malzemelerin ısı analizi için kullanılan termoanalitik bir yöntemdir. Polimerlerin ısıtıldığında ne tür fiziksel değişimlere uğrayacağını saptamak amacıyla kullanılır. DSC tekniği DIN ISO 11357-1 standardına uygun şekilde yapılmış olup Şekil 6.31’de gösterildiği gibi biri referans, diğeri ise numunenin bulunduğu iki ısıtıcıdan, bu sistemi ısı kaybı olmadan tutan bir hücreden ve ısı akışını kontrol eden bilgisayardan oluşmaktadır [103]. DSC yönteminde test edilen numunenin ve referansın sıcaklığını arttırmak için gerekli olan ısı miktarı, sıcaklığın zamana bağlı fonksiyonu olarak ölçülür. Numune ve referans test boyunca aynı sıcaklıkta tutulmaya çalışılarak ve aynı hızda ısıtılarak, numunenin ve referansın üzerindeki ısı akışının hızı ölçülür ve karşılaştırılır. Aradaki fark, malzeme bileşimi, kristallik ve oksidasyon gibi özelliklerin tayininde kullanılır. Bu amaçla, Şekil 6.32’de gösterilen YTÜ Kompozit Malzemeler laboratuvarında bulunan Intertek marka, standart DSC cihazı kullanılmıştır. Cihaz, $-150^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$ sıcaklığı arasında, $\pm 0,2 \text{ K}$ hassasiyetinde ve $0.02-300 \text{ K/dak}$ ısıtma ve $0.02-50 \text{ K/dak}$ soğutma hızında çalışmaktadır.



Şekil 6.31 DSC düzeneğinin şematik yapısı



Şekil 6.32 Intertek marka standart DSC cihazı

6.5.8 Elek Analizi

Elek analizi, orijinal ve geri dönüştürülmüş kompozit numunelerdeki fiberlerin boyutlarının yüzdece ağırlık dağılımları hesaplamak amacıyla TS EN 933-10 standardına uygun olarak yapılmıştır [104]. Deney sonunda her elek üstünde kalan malzeme oranı, bütün deney numunesi ağırlığının yüzdesi olarak;

$$S_n = \frac{W_n}{W_0} \cdot 100 \quad (6.10)$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte; S_n = Herhangi bir (n) göz açıklığındaki elek üstünde kalan malzeme oranı (%), W_n = Göz açıklığı (n) olan elekte kalan malzeme ağırlığı (g),

W_0 = Deney numunesinin ağırlığı (g) dir. Bu amaçla, Şekil 6.33'te gösterilen, Loyka marka standart elek analizi cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.33 Loyka marka standart elek analizi cihazı

6.5.9 Kırılma Tokluğu (K_{1c}) Deneyi

En genel biçimiyle kırılma; malzemelerin çeşitli yüklemeler etkisi ile en az iki ve daha fazla parçaya ayrılması olarak tanımlanır. Kırılma mekaniği ise kırılmanın bir alt başlığı olup, malzeme dokusunda bulunan çatlakların; çatlak ucu gerilme alanlarını inceleyen bir bilim dalıdır. Kırılma sorununa yapılan yaklaşımların kökeni, çatlak ucu ve çevresindeki gerilme alanlarının analizini konu alan “Kırılma Mekaniği” oluşturmaktadır. Kırılma ise, kırılma mekaniğini de içeren, kararlı ve kararsız çatlak ilerlemelerinin koşullarını inceleyen daha geniş bir bilim dalıdır. Bu bilgiler ışığında, Kırılma; en genel haliyle malzemelerin gerilme altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması olarak tanımlanabilir ve malzemelerin dayanım özelliklerini kontrol etmektedir [93]. Kırılma, malzemenin kırılış biçimine göre;

- a) Gevrek Kırılma
- b) Sünek Kırılma
- c) Sürünme Kırılması
- d) Yorulma Kırılması

olarak gruplanabildiği gibi, tane sınırlarından veya taneleri keserek ilerleyen çatlak sonucu oluşma tipine göre aşağıdaki şekilde ele alınabilir:

a) Taneler Arası Kırılma

b) Taneleri Keserek Kırılması.

Kırılma olaylarının sağlıklı bir şekilde izlenmesi ve doğru sonuca varılmasında olayı yakından etkileyen birinci derecede üç önemli etken şu şekilde sıralanabilir:

- Kırılma tokluğu ya da gerilim şiddet faktörü
- Çatlak uzunluğu (Çatlak boyu)
- Uygulanan gerilme (ya da akma gerilmesi)

Bunların yanında ikinci derecede önemli olan etkenler ise,

- Sıcaklık
- Biçim değiştirme veya yükleme hızı
- Gerilme konsantrasyonları (Gerilme yığılmaları) dır.

Bu etkenlere göre kırılma mekaniğinin en önemli yönü, gerilme altındaki malzemelerde çatlak ve gerilme yığılmalarını arttırıcı etkenleri göz önüne alarak kırılma problemlerini incelemesidir. Kırılma mekaniği yaklaşımları, çatlak ucundaki gerilim şiddet faktörü, çatlak boyu ve uygulanan gerilmeye dayanarak malzeme güvenilirliği açısından somut bir değerlendirme sağlar. Bu nedenle kırılma mekaniği, kırılmanın karakteri bakımından ya da olaya yaklaşım yönünden iki kısımda incelenebilir:

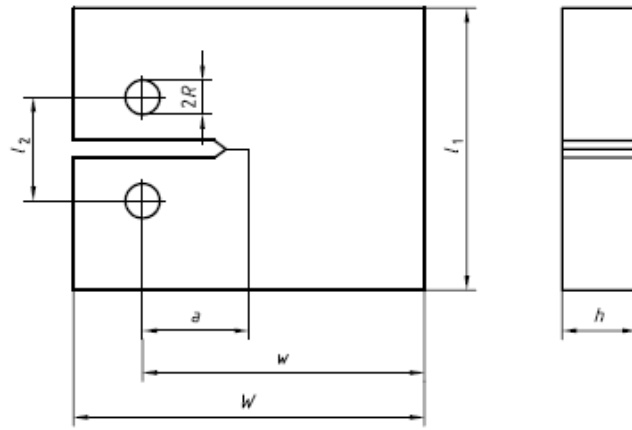
a) Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEFM)

b) Elastik - Plastik Kırılma Mekaniği (EPFM)

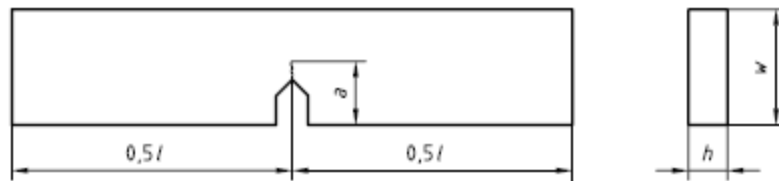
Lineer elastik kırılma mekaniği kırılma olayını, malzemenin kalıcı biçim değişikliği oluşturmaksızın kırılma durumu için, çatlak gerilme dağılımlarını, çatlak ve çatlak etkisi yapabilecek kusurların boyut, şekil ve yönünü esas olarak incelemektedir. Lineer elastik kırılma mekaniğinin önemli parametresi Kırılma Tokluğu (K_{1C}) dir. Kırılma sırasında çatlak ucunda plastik deformasyonlar oluşuyorsa, bu durumda, elastik-plastik kırılma

mekaniği yaklaşımları kullanılır. Bu yaklaşımların önemli parametreleri; Çatlak Oluşum Değeri (COD) ve J-İntegraldir [93].

Plastiklerin ve plastik matrisli kompozitlerin kırılma tokluğunun hesaplanmasında, BS ISO 13586 “Plastics—Determination of fracture toughness (G_{1C} and K_{1C})—Linear elastic fracture mechanics (LEFM) approach” standardı kullanılmaktadır [105]. Bu deneyin yapılmasında, kullanılan ve atıf yapılmış standart ise, BS ISO 17281 “Plastics - Determination of fracture toughness (G_{1C} and K_{1C}) at moderately high loading rates (1 m/s)” dır [106]. ISO 13586’ya göre, Şekil 6.34’te gösterilen bütünsel (compact, CT) ve Şekil 6.35’te verilmiş olan tek kenarından çentik açılmış üç noktalı eğme numunesi (single-edge-notch bending, SENB) kullanılmaktadır.



Şekil 6.34 ISO 13586’ya göre bütünsel (compact, CT) deney numunesi



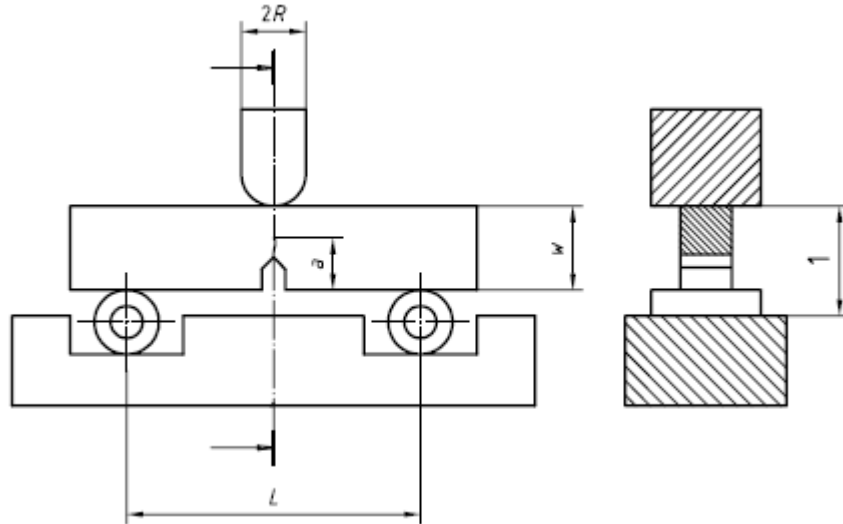
Şekil 6.35 ISO 13586’ya göre tek kenarından çentik açılmış üç noktalı eğme (single-edge-notch bending, SENB) deney numunesi

Deneylerde, SENB numuneleri kullanılmıştır. Madde 6.5.3’te verilen prosedür uyarınca, numuneler plakadan, Şekil 6.36’da gösterilen DEWALT marka döner diskli testere ve elmas kesme diski ile, susuz olarak çıkarılmıştır. Daha sonra, Şekil 6.20’de gösterilen çentik açma cihazı ile ISO 13586 standardına göre hazırlanmış özel bıçak yardımıyla

çentikler açılmıştır. Daha sonra numuneler Şekil 6.37’de gösterildiği gibi üç noktalı eğme deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 6.36 DEWALT marka döner diskli testere ve elmas kesme diski



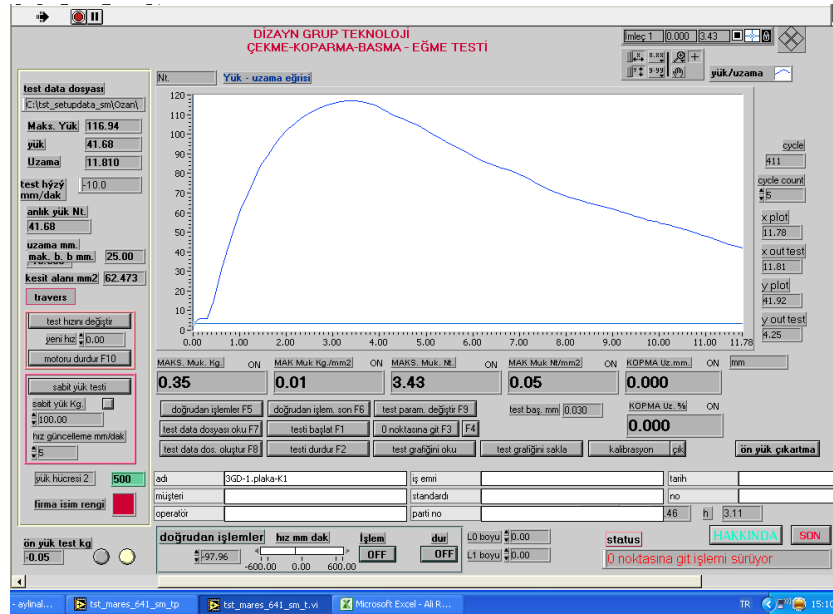
Şekil 6.37 ISO 13586’ya göre Kırılma Tokluğu deneyinin yapılışı

Kırılma tokluğu değeri (K_Q), 6.11 eşitliği yardımıyla bulunur;

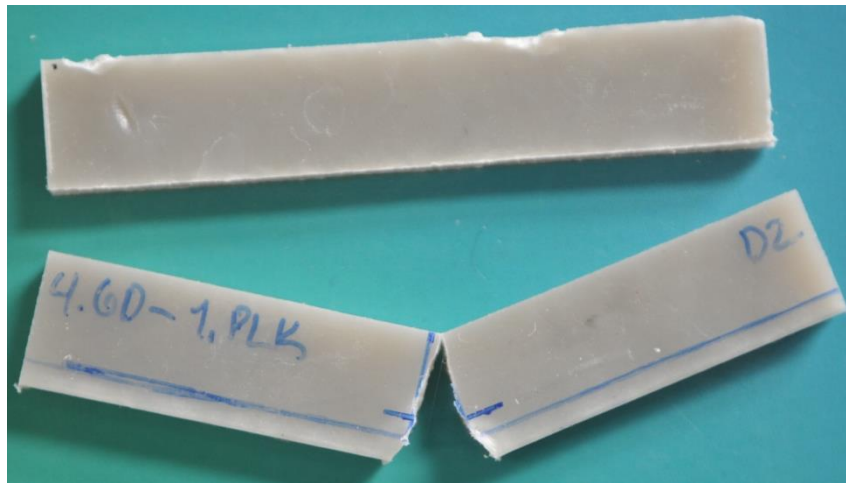
$$K_Q = f(a/w) \cdot \frac{F_Q}{h \cdot \sqrt{w}} \quad (6.11)$$

Burada; a (mm) çatlak uzunluğunu, w (mm) deney numunesinin genişliğini, F_Q (N) çatlağın ilerlemesi için uygulanan yük değerini, h (mm) ise kalınlıktır. $f(a/w)$ değeri ise, çatlak uzunluğu (a) değerine bağlı olarak bulunan, numuneni geometrik faktörüdür. Geometrik faktörün değeri ise, yine aynı standardın tablolarında sayısal olarak verilmiştir. F_Q maksimum yükün %5 eksiği ile çizilen eğimli doğrunun Şekil 6.38’de bir örneği verilen yük-çatlak ağız açılımı eğrisinden otomatik olarak saptanmıştır. $f(a/w)$

değeri seçilen numune boyutlarına göre, $\alpha=0.55$ değerine karşılık gelen 12.57 olarak kullanılmıştır. Şekil 6.39’da K_{1C} deneyi uygulanmış bir numune gösterilmiştir.



Şekil 6.38 Kırılma tokluğu deneyleri için elde edilen karakteristik yük-çatlak ağzı açılımı eğrisi (GD3-P1-K1C)

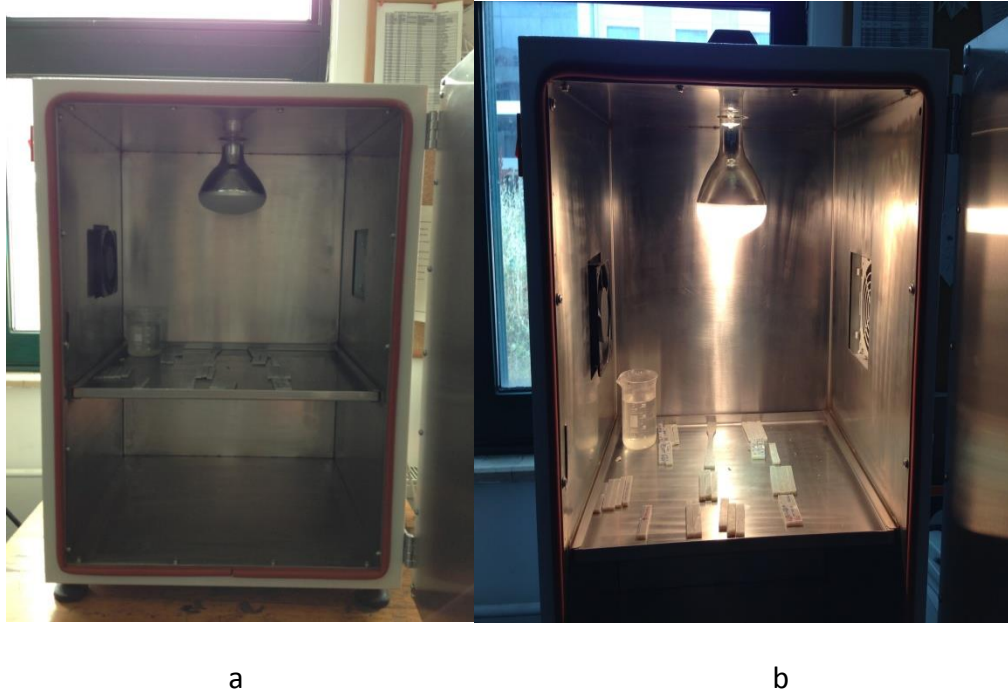


Şekil 6.39 K_{1C} deneyi uygulanmış bir numune

6.5.10 UV Deneyleri

UV deneyleri, TS EN ISO 4892-1 “Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources — Part 1: General guidance” standardına göre [107], ISO 4892-3 “Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources — Part 3: Fluorescent UV lamps” [108] standardı uyarınca, UVA 340 Osram lamba kullanılarak yapılmıştır. UVA 340 ampulleri 320-360 nm dalga boyunda olup, $28.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ parlaklık üretebilen ve bu

amaçla da plastiklerin UV deneylerinde kullanılmaktadır. Söz konusu standarda uygun (70 x 130 x 90) dış boyutlarında, yüzeyleri cam yünü izolasyonlu, havalandırmalı ve sıcaklık ve nem kontrollü UV kabini resmi Şekil 6.40'ta gösterilmiştir. Bu kabin, YTÜ Kompozit Malzemeler laboratuvarında daha önceki çalışmalarda tasarlanmış ve imal edilmiştir.



Şekil 6.40 Deneylerde kullanılan standart UV kabini a) Kapalı, b) Açık konumda

Numuneler, ISO 4892-3'e göre, lamba tipi (UVA-340) altında, $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'ta 8 saatlik ışıma ve $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'ta 4 saatlik yoğunlaştırmadan oluşan çevrimlerle, 480 saat süreyle deneye tâbi tutulmuştur. Bu deneylerde, mekanik özelliklerin değişiminin incelenmesi, başka bir deyimle, UV ışınının geri dönüşüm üzerine etkisinin saptanması amaçlanmıştır. Standarttan hareketle $8+4=12$ saat, bir deney periyodu esas alınarak Çizelge 6.3 oluşturulmuş; bunların içerisinde 1, 8, 16 ve 40. periyotlar seçilerek deney yapılmıştır. Her bir periyot için çekme, eğme, darbe ve K_{1C} deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 6.3 UV deneyleri için seçilmiş periyotlar

Periyot	0	1	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
Süre (saat)	Orj.	12	48	96	144	192	240	288	336	384	432	480

6.5.11 SEM Görüntüleri

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri dokuda fiber dağılımlarını, fiber geometrisini, fiber-matris arayüzeyini ve matrisin kırılırken gösterdiği davranışı belirlemek amacıyla kullanılır. Bu amaçla, darbe numunelerinin kırılmış kesitlerinden görüntü alınmıştır. Görüntüler, Şekil 6.41’de verilen, KOÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Elektron ve Işın Mikroskobisi laboratuvarında bulunan JEOL 6060 marka Tarama Elektron Mikroskobu kullanılarak alınmıştır. Cihazın özellikleri; yüksek voltaj ayırım gücü ((SEI) 3.5 nm (30 kV, WD = 6 mm)), büyültme: 25 – 100.000 X, çalışma mesafesi: 10 – 45mm dir. Görüntü alma sırasında ivmelendirme voltajı 9kV olarak sabit seçilmiştir.



Şekil 6.41 JEOL 6060 marka Tarama Elektron Mikroskobu (SEM)

Görüntü almadan önce kırık yüzeyler altınla kaplanmıştır. Kaplama işlemi yine aynı laboratuvarında bulunan ve Şekil 6.42’de gösterilen BAL-TECH Sputter düzeneği kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6.42 BAL-TECH Sputter düzeneği

DENEY SONUÇLARI (BULGULAR)

Deney sonuçları; plakaların hazırlanması, numunelerin çıkarılması ve kodlanmasından sonra Madde 6.5'te verilen sıra içerisinde mekanik ve fiziksel deneyler olarak yapılmıştır. Bu bölümde deney sonuçları, çizelgeler ve bunlardan elde edilen diyagramlar şeklinde verilmiştir. Ayrıca SEM görüntüleri de her bir numune türü için kırık yüzey resimleri şeklinde gösterilmiştir.

7.1 Çekme Deneyi Sonuçları

Bu aşamada, diğer deneylere de esas olacak imalat koşulları belirlenmiştir. Şekil 6.8'de gösterilen YTÜ Kompozit laboratuvarında mevcut presin çalışma sıcaklığı daha önce yapılmış PP matrisli çalışmalar ve bu deney için yapılan ön çalışmalardan hareketle 180°C olarak seçilmiştir. Aynı verilerden hareketle, üç ayrı plaka sırasıyla 3.0, 2.5 ve 2.0 dakika presleme süreleri seçilerek plaka imalatı için optimizasyona gidilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 7.1'de verilmiştir. Bu çizelgede;

- ORJ-P1-Ç1 – Ç3: 180°C'de 3.0 dakika,
- ORJ-P2-Ç1 – Ç3: 180°C'de 2.5 dakika,
- ORJ-P3-Ç1 – Ç3: 180°C'de 2.0 dakika

imalat koşullarını simgelemektedir. P1, P2, P3 plaka numaralarını; Ç1, Ç2, Ç3 ise bu plakalardan çıkarılan çekme numunelerini göstermektedir. Buradan elde edilen sonuçlardan hareketle, 180°C'de 3.0 dakika presleme koşulu tüm deneyler için sabit seçilmiştir.

Çizelge 7.1 Çekme deneyi kullanılarak optimum imalat koşullarının belirlenmesi

Numune	b ₁ (mm)	h (mm)	L ₀ (mm)	L _K (mm)	F _{max} (N)	R _m (MPa)	E (GPa)	δ (%)
ORJ-P1-Ç1	9.73	4.41	50	54.91	958.16	22.33	0.365	9.82
ORJ-P1-Ç2	9.84	4.14	50	53.89	950.19	23.32	0.374	7.78
ORJ-P1-Ç3	9.82	4.42	50	52.99	935.15	21.55	0.366	5.98
ORJ-P2-Ç1	9.78	3.92	50	52.95	828.48	21.61	0.334	5.90
ORJ-P2-Ç2	9.83	4.20	50	53.46	847.19	20.52	0.319	6.92
ORJ-P2-Ç3	9.84	3.92	50	52.78	818.05	21.20	0.339	5.56
ORJ-P3-Ç1	9.86	3.87	50	53.45	789.50	20.69	0.291	6.90
ORJ-P3-Ç2	9.84	4.23	50	54.15	890.35	21.39	0.317	8.30
ORJ-P3-Ç3	9.78	4.68	50	54.22	943.33	20.61	0.302	8.44

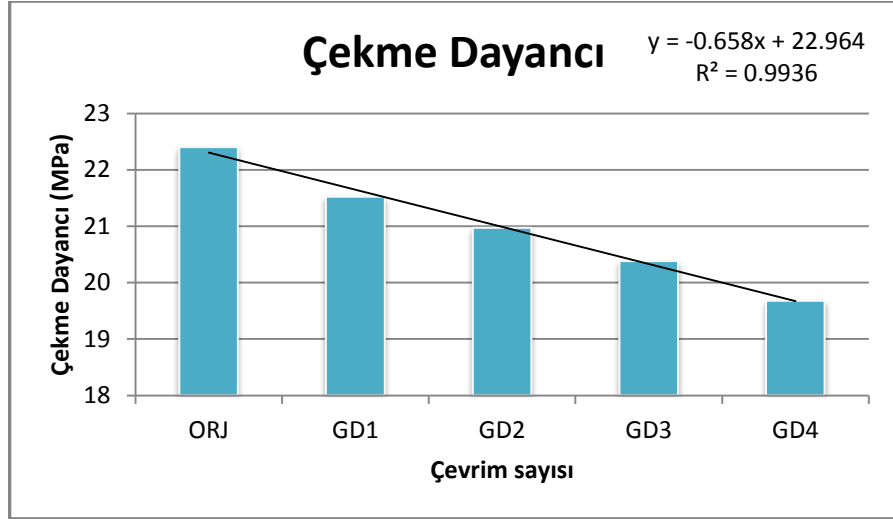
Çizelge 7.1’de görüleceği gibi üç plaka için de belirgin farklar görülmemiştir. Ancak, kopma şekilleri ve az da olsa değerlerin ortalamalarından hareketle; ORJ-P1-Ç1 – Ç3: 180°C’de 3.0 dakika koşulu sabit seçilmiştir. Buna göre, orijinal numune için, çekme dayancı 22.40 MPa, elastiklik modülü 0.368 GPa, kopma uzaması 3.86 ortalama değerler olarak bulunmuştur. Buna göre, dört geri dönüşüm için, üç deney sonucu Çizelge 7.2’de verilmiştir. Çizelge 7.2’nin ortalamaları Çizelge 7.3’te gösterilmiştir. Buna göre, çekme dayancı ve elastiklik modülünde azalma gözlenirken; kopma uzamasında artışlar elde edilmiştir. Bu da plastik matrisli kompozitlerin malzeme davranış özelliğinin doğal sonucudur. Değişimlerin analitik ifadesi çekme dayancı için Şekil 7.1, elastiklik modülü için Şekil 7.2, kopma uzaması için Şekil 7.3’te gösterilmiştir. Deney sonuçları, 1 nolu plakaların sonuçları olarak üç deneyin ortalamaları olarak verilmesine karşın; aslında, 9 adet numunenin sapan sonuçlarının elenmesiyle elde edilmiştir. Buna göre, güvenilirlik, çekme deneyi için $R^2=0.996$, elastiklik modülü için $R^2=0.985$ ve kopma uzaması için $R^2=0.948$ elde edilmiştir ki, bu da, deney sonuçlarının güvenilir olduğunu, azalış ve artışların anlamlı bütün olduğunu göstermektedir.

Çizelge 7.2 Dört geri dönüşüm için çekme deneyi sonuçları

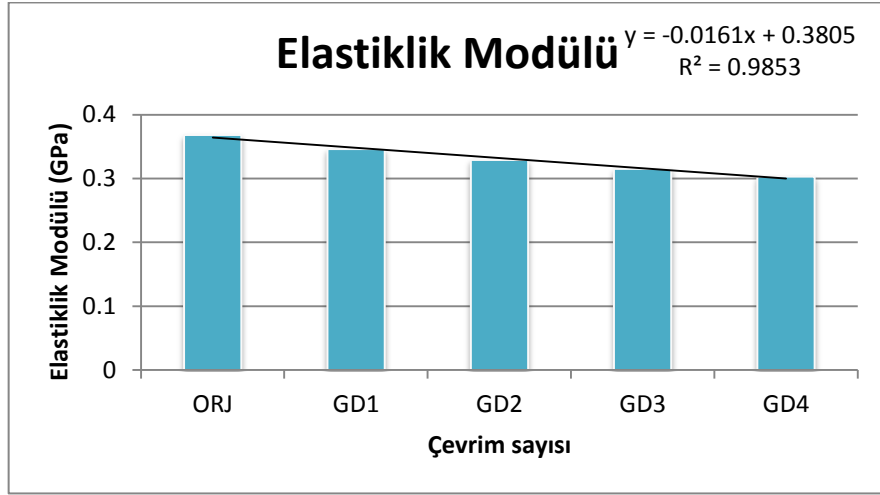
Numune	b_1 (mm)	h (mm)	L_0 (mm)	L_K (mm)	F_{max} (N)	R_m (MPa)	E (GPa)	δ (%)
GD1-P1-Ç1	9.85	4.85	50	55.15	1025.85	21.46	0.347	10.30
GD1-P1-Ç2	9.83	4.75	50	54.28	1008.26	21.59	0.335	8.56
GD1-P1-Ç3	9.82	4.78	50	54.85	1010.69	21.53	0.356	9.70
GD2-P1-Ç1	9.75	4.73	50	55.05	920.01	21.30	0.321	10.10
GD2-P1-Ç2	9.73	5.01	50	55.25	980.80	20.12	0.320	10.50
GD2-P1-Ç3	9.88	5.15	50	54.92	1092.95	21.48	0.345	9.84
GD3-P1-Ç1	9.84	4.95	50	55.52	998.47	20.50	0.313	11.04
GD3-P1-Ç2	9.83	5.05	50	55.46	995.83	20.06	0.317	10.92
GD3-P1-Ç3	9.80	4.76	50	55.55	959.95	20.58	0.315	11.10
GD3-P1-Ç1	9.80	4.77	50	55.72	955.01	20.43	0.313	11.44
GD3-P1-Ç2	9.87	4.83	50	55.54	933.10	19.57	0.304	11.08
GD3-P1-Ç3	9.78	5.03	50	55.98	936.07	19.03	0.291	11.96

Çizelge 7.3 Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'nin ortalama sonuçları

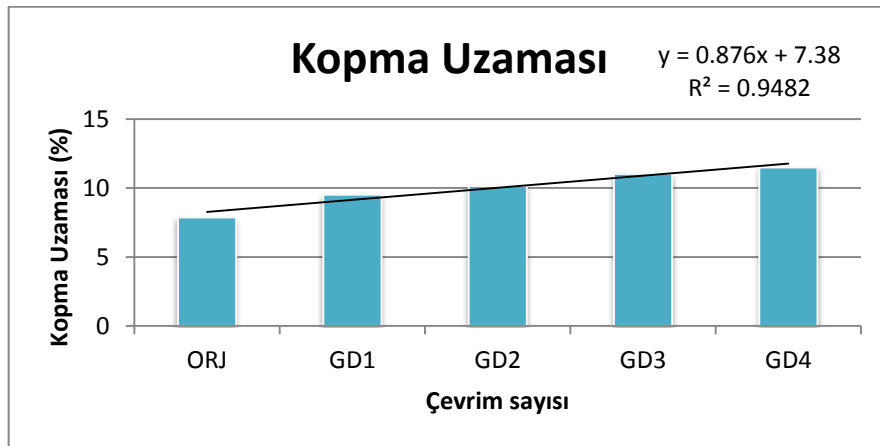
Numune	R_m (MPa)	E (GPa)	δ (%)
ORJ-Ç	22.40	0.368	7.86
GD1-Ç	21.52	0.346	9.52
GD2-Ç	20.97	0.329	10.15
GD3-Ç	20.38	0.315	11.02
GD4-Ç	19.68	0.303	11.49



Şekil 7.1 Çekme Dayancı – Çevrim sayısı grafiği



Şekil 7.2 Elastiklik Modülü – Çevrim sayısı grafiği



Şekil 7.3 Kopma Uzaması – Çevrim sayısı grafiği

7.2 Eğme Deneyi Sonuçları

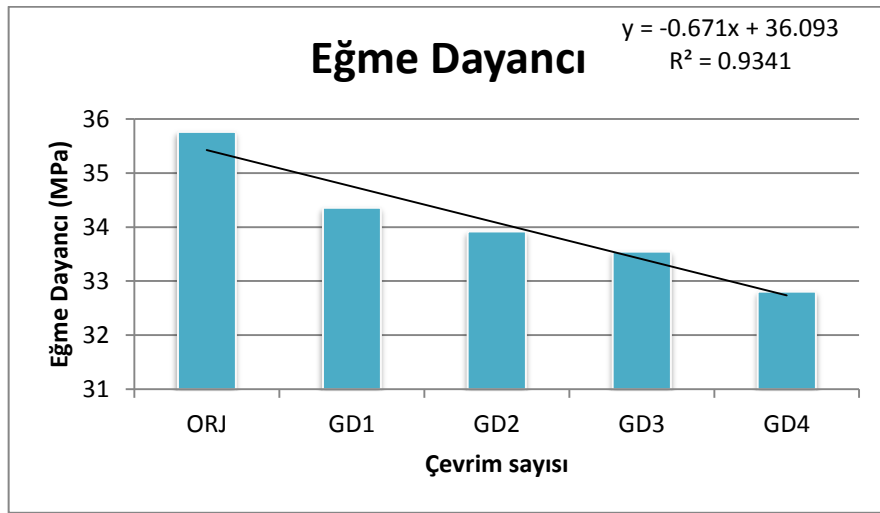
Eğme deneyi, Madde 6.5.2 esasları uyarınca yapılmış, deney sonuçları Çizelge 7.4'te ve bu sonuçların ortalamaları da Çizelge 7.5'te verilmiştir. Çizelge 7.5'ten yararlanılarak deney sonuçlarının analitik gösterilimi eğme dayancı için Şekil 7.4, sehim Şekil 7.5'te çizilmiştir. Her iki şekilde görüldüğü gibi deney sonuçları güvenli ve artış ve azalışları anlamlıdır. Güvenilirlik katsayısı eğme dayancı için $R^2=0.934$ ve sehim için $R^2=0.996$ elde edilmiştir.

Çizelge 7.4 Eğme deneyi sonuçları

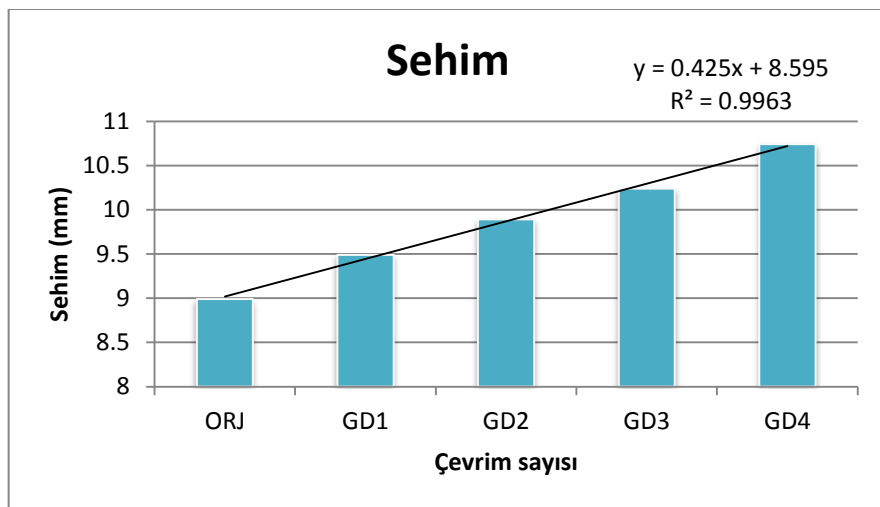
Numune	b (mm)	h (mm)	l (mm)	F_{max} (N)	$\sigma_{eğ}$ (MPa)	f (mm)
ORJ-P1-E1	9.92	5.06	64	95.61	36.14	8.75
ORJ-P1-E2	10.33	4.99	64	93.89	35.04	9.25
ORJ-P1-E3	9.7	5.28	64	101.74	36.11	8.97
GD1-P1-E1	9.86	4.98	64	91.44	35.90	9.63
GD1-P1-E2	9.94	4.62	64	75.26	34.05	9.51
GD1-P1-E3	9.96	4.42	64	67.17	33.14	9.32
GD2-P1-E1	10.09	5.58	64	110.5	33.72	10.02
GD2-P1-E2	10.91	5.04	64	96.59	33.46	9.93
GD2-P1-E3	10.65	4.60	64	81.14	34.57	9.72
GD3-P1-E1	10.05	4.68	64	76.49	33.36	10.18
GD3-P1-E2	10.26	4.78	64	82.62	33.83	10.31
GD3-P1-E3	10.91	5.04	64	96.59	33.46	10.24
GD3-P1-E1	10.18	5.14	64	91.69	32.73	10.65
GD3-P1-Ç2	9.73	4.69	64	72.07	32.33	10.81
GD3-P1-Ç3	11.91	4.72	64	89.48	32.37	10.75

Çizelge 7.5 Eğme deneyinin (Çizelge 7.4) ortalama sonuçları

Numune	$\sigma_{eğ}$ (MPa)	f (mm)
ORJ-E	35.76	8.99
GD1-E	34.36	9.49
GD2-E	33.92	9.89
GD3-E	33.55	10.24
GD4-E	32.81	10.74



Şekil 7.4 Eğme Dayancı – Çevrim sayısı grafiği



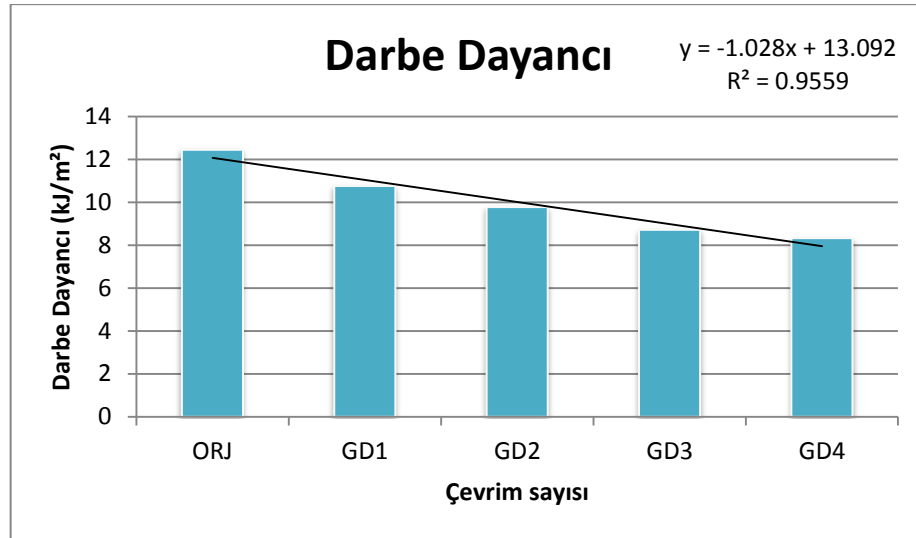
Şekil 7.5 Sehim – Çevrim sayısı grafiği

7.3 Darbe Deneyi Sonuçları

Darbe deneyi, Madde 6.5.3 esasları uyarınca yapılmış, deney sonuçları Çizelge 7.6’da ortalamaları ile birlikte verilmiştir. Çizelge 7.6’dan yararlanılarak deney sonuçları Şekil 7.6’da grafik olarak gösterilmiştir. Bu grafiğin sonuçları, yani darbe dayancındaki azalışlar kendi içerisinde anlamlı bütün oluşturarak sonuçların güvenli olduğu, $R^2=0.956$ değerinden görülmektedir.

Çizelge 7.6 Darbe deneyi sonuçları ve ortalamaları

Numune	b_N (mm)	h (mm)	L (mm)	E_c (J)	a_{cu} (kJ/m ²)	Ortalama a_{cu} (kJ/m ²)
ORJ-P1-D1	10.39	4.48	62	0.60	12.89	12.45
ORJ-P1-D2	11.78	4.26	62	0.57	11.36	
ORJ-P1-D3	10.67	3.79	62	0.53	13.11	
GD1-P1-D1	11.52	4.85	62	0.60	10.74	10.76
GD1-P1-D2	11.95	3.83	62	0.50	10.92	
GD1-P1-D3	11.21	4.62	62	0.55	10.62	
GD2-P1-D1	11.22	5.12	62	0.55	9.57	9.78
GD2-P1-D2	11.49	5.25	62	0.60	9.95	
GD2-P1-D3	10.90	4.86	62	0.52	9.82	
GD3-P1-D1	11.12	4.53	62	0.45	8.93	8.72
GD3-P1-D2	10.91	5.16	62	0.50	8.88	
GD3-P1-D3	10.97	5.13	62	0.47	8.35	
GD3-P1-D1	10.83	4.84	62	0.44	8.39	8.33
GD3-P1-D2	12.03	4.85	62	0.48	8.23	
GD3-P1-D3	11.21	4.48	62	0.42	8.36	



Şekil 7.6 Darbe Dayancı – Çevrim sayısı grafiği

7.4 Kalsinasyon Deneyi (Cam Hacim Oranı) Sonuçları

Eğme deneyi, Madde 6.5.4 esasları uyarınca yapılmış, deney sonuçları Çizelge 7.7’de ortalamaları ile birlikte verilmiştir. Bu Çizelge, ağırlık oranlarından elde edilen sonuçların, yoğunluklar kullanılarak hacim oranına çevrilmesiyle elde edilmiştir. Çift vidalı ekstrüderde cam hacim oranı %10 olacak şekilde karışım yapılmıştır. Kalsinasyon deneyi sonuçlarında da çevrim sayısına bağlı kalmaksızın cam hacim oranının değişmediği görülmüştür.

Çizelge 7.7 Kalsinasyon deneyi sonuçları

Numune	P1-KAL1	P1-KAL2	P1-KAL3	Ortalama (%V _f)
ORJ	10.34	9.84	10.53	10.24
GD1	9.71	11.13	10.74	10.53
GD2	9.13	10.71	11.24	10.36
GD3	10.44	10.52	9.55	10.17
GD4	9.92	11.43	10.48	10.51

7.5 Yoğunluk Deneyi Sonuçları

Yoğunluk deneyi, Madde 6.5.5 esasları uyarınca yapılmış, deney sonuçları Çizelge 7.8’de ortalamaları ile birlikte verilmiştir. Deneylerde kullanılan kompozitin teorik yoğunluğu 1.109 Mg/m³ olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarının ortalamaları da bunlara çok yakın değerler olarak saptanmıştır.

Çizelge 7.8 Yoğunluk deneyi sonuçları

Numune	P1-Y1	P1-Y2	P1-Y3	Ortalama (Mg/m ³)
ORJ	1.109	1.110	1.101	1.107
GD1	1.103	1.095	1.110	1.103
GD2	1.106	1.111	0.995	1.071
GD3	1.105	1.106	1.099	1.103
GD4	1.097	1.099	1.112	1.103

7.6 MFR (Erime Akış Hızı) Deneyi Sonuçları

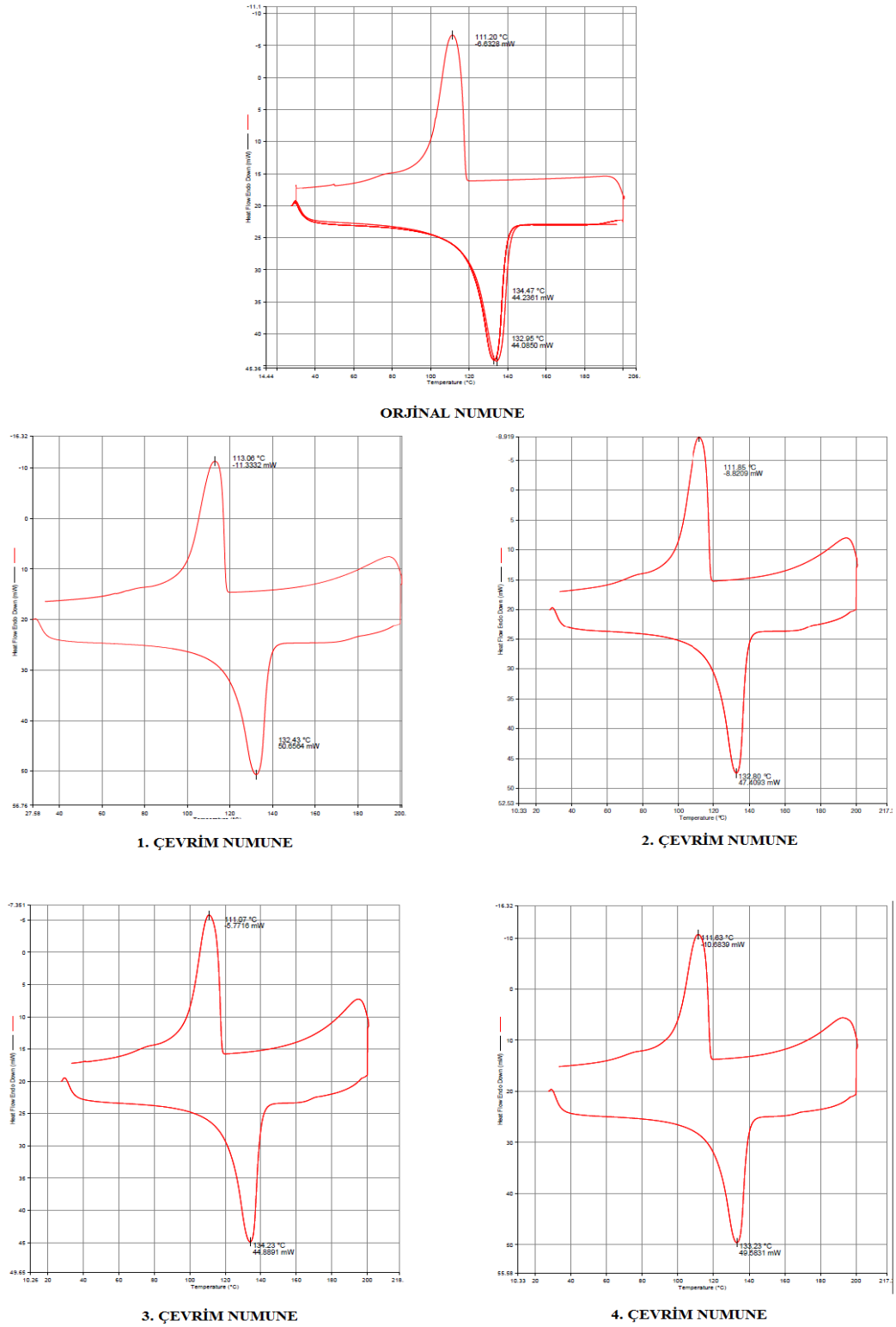
Erime akış hızı deneyleri Madde 6.5.6 esasları uyarınca yapılmış, deney sonuçları Çizelge 7.9’da verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, geri dönüşüm sayısının artmasıyla, cam hacim oranının sabit kalması koşulunda matrisin akıcılığının arttığını görülmektedir.

Çizelge 7.9 MFR (Erime Akış Hızı) deneyi sonuçları

Numune	P1-MFR1	P1-MFR2	P1-MFR3	Ortalama g/10 dak. (190°C, 5 kg)
ORJ	0.349	0.355	0.351	0.352
GD1	0.368	0.364	0.363	0.365
GD2	0.396	0.404	0.402	0.401
GD3	0.404	0.408	0.406	0.406
GD4	0.417	0.425	0.424	0.422

7.7 DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri) Deneyi Sonuçları

Diferansiyel taramalı kalorimetri deneyi sonuçları Madde 6.5.7 esasları uyarınca yapılmış, deney sonuçları Şekil 7.7’de verilmiştir.



Şekil 7.7 DSC sonuçları

Şekil 7.7'deki DSC sonuçlarından yararlanılarak numunelerin erime sıcaklıkları Çizelge 7.10'da ortalama değerler olarak verilmiştir. Şekil ve Çizelgeden çevrim sayısına bağlı olarak numunenin erime sıcaklıklarının değişmediği görülmektedir.

Çizelge 7.10 DSC deneyi sonucunda saptanan ergime sıcaklıkları

Numune	Erime Sıcaklığı (°C)
ORJ	133.12
GD1	132.80
GD2	132.95
GD3	133.01
GD4	132.82

7.8 Elek Analizi Deneyi Sonuçları

Elek analizi deneyi Madde 6.5.8 esasları uyarınca yapılmış, deney sonuçları Çizelge 7.11'de orijinal, sırasıyla Çizelge 7.12, 7.13, 7.14, 7.15'te GD1, GD2, GD3 ve GD4 için verilmiştir. Konu ile ilgili standarda göre, fiber boyu doğrudan ölçülmemiş, her bir çevrime karşılık gelen kümülatif sınıflandırma bir indeks olarak ifade edilmiştir. Sonuçlar, indeks değişiminin grafiği olarak Şekil 7.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.11 Orijinal numuneler için elek analizi verileri

Elek Çapı (mm)	Fiber sınıf ağırlığı (gr)	gr (%)	Kümülatif elek üstü gr (%)	Kümülatif elek altı gr (%)
0,25	0,1265	3,918713794	3,918713794	96,08128621
-0,25+0,125	1,8052	55,92143986	59,84015365	40,15984635
-0,125+0,1	0,3916	12,13097488	71,97112853	28,02887147
-0,1+0,045	0,7966	24,67705461	96,64818314	3,351816858
-0,045+0,032	0,1046	3,240296149	99,88847929	0,111520709
TAVA	0,0036	0,111520709	100	0
TOPLAM	3,2281	100		
Ortalama tane boyutu		0,103971129		

Çizelge 7.12 GD1 numuneleri için elek analizi verileri

Elek Çapı (mm)	Fiber sınıf ağırlığı (gr)	gr (%)	Kümülatif elek üstü gr (%)	Kümülatif elek altı gr (%)
0,25	0,0325	1,453813465	1,453813465	98,54618654
-0,25+0,125	1,1434	51,14739432	52,60120778	47,39879222
-0,125+0,1	0,0559	2,500559159	55,10176694	44,89823306
-0,1+0,045	0,7808	34,92730933	90,02907627	9,970923731
-0,045+0,032	0,1693	7,573249832	97,6023261	2,397673898
TAVA	0,0536	2,397673898	100	0
TOPLAM	2,2355	100		
Ortalama tane boyutu		0,088210065		

Çizelge 7.13 GD2 numuneleri için elek analizi verileri

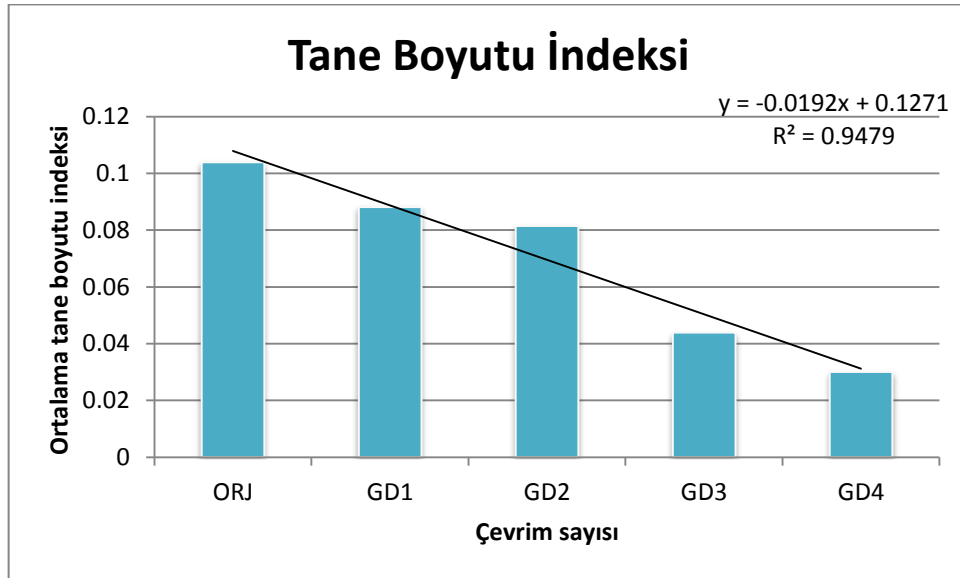
Elek Çapı (mm)	Fiber sınıf ağırlığı (gr)	gr (%)	Kümülatif elek üstü gr (%)	Kümülatif elek altı gr (%)
0,25	0,0547	1,988512433	1,988512433	98,01148757
-0,25+0,125	0,9412	34,21550095	36,20401338	63,79598662
-0,125+0,1	0,3415	12,41457031	48,61858368	51,38141632
-0,1+0,045	1,1586	42,11865639	90,73724008	9,262759924
-0,045+0,032	0,209	7,597789734	98,33502981	1,66497019
TAVA	0,0458	1,66497019	100	0
TOPLAM	2,7508	100		
Ortalama tane boyutu		0,081539916		

Çizelge 7.14 GD3 numuneleri için elek analizi verileri

Elek Çapı (mm)	Fiber sınıf ağırlığı (gr)	gr (%)	Kümülatif elek üstü gr (%)	Kümülatif elek altı gr (%)
0,25	0,0124	0,538755648	0,538755648	99,46124435
-0,25+0,125	0,0745	3,236878693	3,775634341	96,22436566
-0,125+0,1	0,1344	5,839416058	9,6150504	90,3849496
-0,1+0,045	1,2501	54,31438999	63,92944039	36,07055961
-0,045+0,032	0,5946	25,83420229	89,76364268	10,23635732
TAVA	0,2356	10,23635732	100	0
TOPLAM	2,3016	100		
Ortalama tane boyutu		0,043940824		

Çizelge 7.15 GD4 numuneleri için elek analizi verileri

Elek Çapı (mm)	Fiber sınıf ağırlığı (gr)	gr (%)	Kümülatif elek üstü gr (%)	Kümülatif elek altı gr (%)
0,25	0,006	0,210925965	0,210925965	99,78907404
-0,25+0,125	0,0172	0,604654433	0,815580398	99,1844196
-0,125+0,1	0,005	0,175771637	0,991352035	99,00864796
-0,1+0,045	0,9643	33,89931801	34,89067004	65,10932996
-0,045+0,032	1,1896	41,81958799	76,71025803	23,28974197
TAVA	0,6625	23,28974197	100	0
TOPLAM	2,8446	100		
Ortalama tane boyutu		0,030095866		



Şekil 7.8 Ortalama tane boyutu indeksinin çevrim sayısı ile değişimi

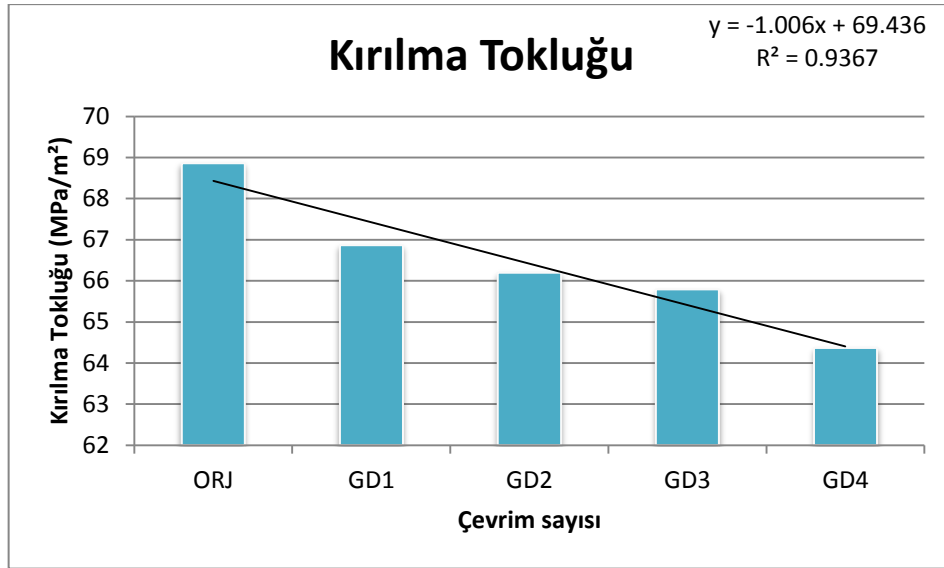
7.9 Kırılma Tokluğu (K_{1C}) Deneyi Sonuçları

Kırılma tokluğu (K_{1C}) deneyi Madde 6.5.8 esasları uyarınca yapılmış, deney sonuçları Çizelge 7.16'da verilmiştir. Çizelge 7.16'nın sonuçları Şekil 7.9'da grafik olarak gösterilmiştir. Kırılma tokluğu deneyinin amacı malzemelerin kırılmaya karşı dayançlarını saptamaktır. Çalışmanın bu kısmında ISO 13586 standardında verilen prosedür uyarınca kırılma tokluğu olarak sadece K_{1C} değeri hesaplanmıştır. Bu çalışmada kırılma tokluğu deneyi ve ikincil parametrelerin detayının saptanması amaçlanmadığından, deneyler sırasında açığa çıkan kritik enerji miktarı (G_{1C}) ayrıca hesaplanmamıştır. Diğer taraftan, deneyler sırasında standart uyarınca, Şekil 6.38'de

bir örneği verilen ve deney sırasında elde edilen eğrilerde $F_{\max}/F_Q \leq 1.10$ koşulu sağlandığından, sonuçlar geçerli olup, kendi aralarında da anlamlı bütün oluşturmuşlardır.

Çizelge 7.16 Orijinal ve dört geri dönüşüm için kırılma tokluğu deneyi sonuçları

Numune	h (mm)	a (mm)	W (mm)	$F_{\max}$ (N)	F_Q (N)	K_Q (MPa·m ^{1/2})	K_Q (MPa·m ^{1/2})
ORJ-P1-K1	5.08	12.65	12.74	110.32	110.31	65.02	68.86
ORJ-P1-K2	4.45	13.1	12.79	129.93	118.12	78.10	
ORJ-P1-K3	4.37	12.92	12.94	102.96	93.60	63.46	
GD1-P1-K1	4.32	12.91	12.78	105.66	96.05	65.91	66.87
GD1-P1-K2	4.28	12.91	12.87	106.15	96.50	66.83	
GD1-P1-K3	4.01	13.04	13.01	101.53	92.30	67.88	
GD2-P1-K1	4.28	13.05	12.94	103.21	93.83	64.63	66.20
GD2-P1-K2	5.72	12.92	13.05	145.37	132.15	68.45	
GD2-P1-K3	4.82	12.75	13.12	116.45	105.86	65.51	
GD3-P1-K1	4.74	13.18	13.75	118.94	108.13	66.92	65.79
GD3-P1-K2	5.02	13.06	12.99	124.29	112.99	66.33	
GD3-P1-K3	5.57	13.32	13.02	134.64	122.40	64.12	
GD3-P1-K1	4.66	13.06	12.98	106.64	96.95	61.31	64.37
GD3-P1-K2	5.12	13.55	13.09	122.57	111.43	62.97	
GD3-P1-K3	4.88	13.5	13.07	127.48	115.89	68.84	



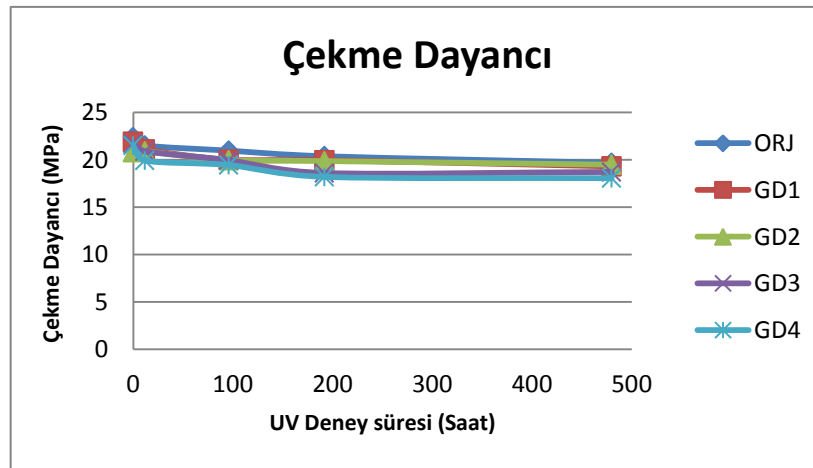
Şekil 7.9 Kırılma tokluğunun çevrim sayısı ile değişimi

7.10 UV Deneyi Sonuçları

Kırılma tokluğu (K_{1C}) deneyi Madde 6.5.10 esasları uyarınca yapılmıştır. Deneyler, UV etkisine maruz kalmadan oluşan kontrol grubu ve sırasıyla 12, 96, 192 ve 480 saat UV etkisi altındaki numunelere uygulanmıştır. Amaç UV etkisinin mekanik özelliklere etkisinin saptanması olduğundan sadece çekme, eğme, darbe ve kırılma tokluğu deneyleri yapılmıştır. Deneyler, çekme için Madde 7.1, eğme için Madde 7.2, darbe için Madde 7.3 ve kırılma tokluğu için Madde 7.9'daki prosedür kullanılarak detaylı biçimde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, Çizelge ve bu çizelge sonuçlarını ifade eden diyagramlarla elde edilmiştir. Konunun bu kısmında söz konusu verilerden hareketle, sadece ortalama değer olarak karşılaştırmalı çizelgeler verilmiştir. Çekme deneyi için, dayancın UV'ye maruz bırakılma sürelerinin ortalama değerleri Çizelge 7.17'de verilmiş ve sonuçlar Şekil 7.10'da grafik şeklinde gösterilmiştir. Benzer şekilde eğme dayancı verileri Çizelge 7.18 ve Şekil 7.11 ile, darbe dayancı verileri Çizelge 7.19 ve Şekil 7.12 ile ve kırılma tokluğu verileri Çizelge 7.20 ve Şekil 7.13 ile belirtilmiştir. Buradan görünen değerlere göre, sonuçların değerlendirmesi bölümünde detaylı olarak açıklandığı gibi, endüstriyel anlamda 480 saat UV ışınına maruz numunelerin mekanik özelliklerinin değişmediği bulgusuna varılmıştır. Ayrıca bu değişmezlik kırık yüzey incelemesinde SEM fotoğrafları alınarak da kanıtlanmıştır. Bu şekilde bir numuneye ait kırık yüzey resimleri Şekil 7.14'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.17 Çekme dayancının UV süreçleriyle değişiminin ortalama değerleri

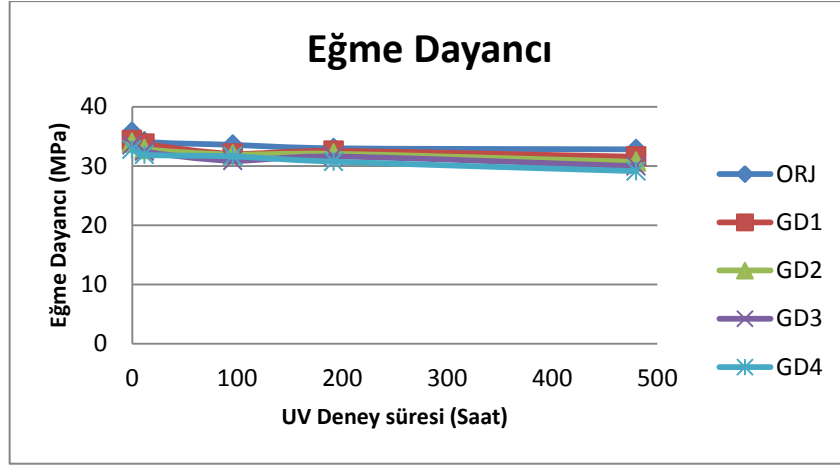
Numune	Çekme Dayancı (MPa)				
	0 Saat	12 Saat	96 Saat	192 Saat	480 Saat
ORJ-P1-UV	20.40	21.90	20.80	20.70	21.51
GD1-P1-UV	21.52	21.11	20.90	20.90	19.92
GD2-P1-UV	20.97	20.02	19.97	19.95	19.45
GD3-P1-UV	20.38	19.96	19.87	18.61	18.20
GD4-P1-UV	19.68	19.31	19.49	18.72	18.06



Şekil 7.10 Çekme dayancının UV süreciyle değişim grafiği

Çizelge 7.18 Eğme dayancının UV süreçleriyle değişiminin ortalama değerleri

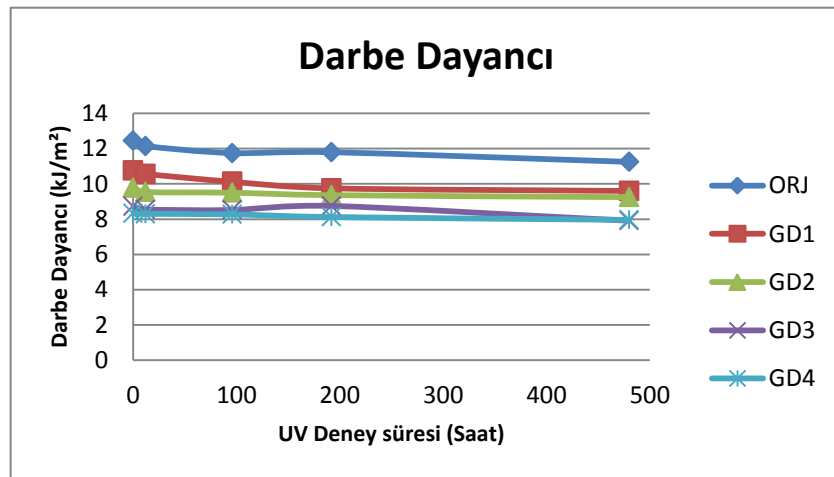
Numune	Eğme Dayancı (MPa)				
	0 Saat	12 Saat	96 Saat	192 Saat	480 Saat
ORJ-P1-UV	35.76	34.14	33.59	33.01	32.83
GD1-P1-UV	34.36	33.75	32.07	32.56	31.58
GD2-P1-UV	33.92	32.86	31.95	32.08	30.73
GD3-P1-UV	33.55	32.45	30.90		29.99
GD4-P1-UV	32.81	31.91	31.63	30.75	29.14



Şekil 7.11 Eğme dayancının UV süreciyle değişim grafiği

Çizelge 7.19 Darbe dayancının UV süreçleriyle değişiminin ortalama değerleri

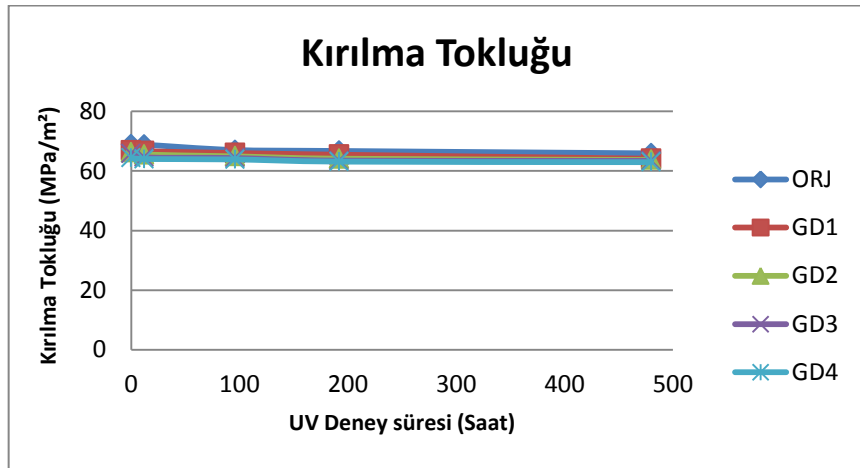
Numune	Darbe Dayancı (kJ/m ²)				
	0 Saat	12 Saat	96 Saat	192 Saat	480 Saat
ORJ-P1-UV	12.45	12.15	11.75	11.80	11.25
GD1-P1-UV	10.76	10.57	10.12	9.75	9.60
GD2-P1-UV	9.78	9.54	9.50	9.36	9.25
GD3-P1-UV	8.72	8.55	8.52	8.75	7.91
GD4-P1-UV	8.33	8.30	8.27	8.12	7.96



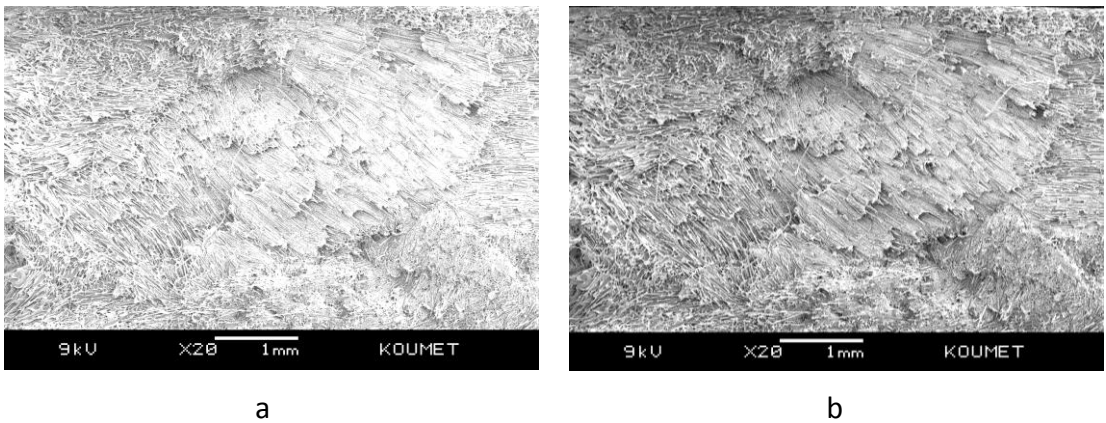
Şekil 7.12 Darbe dayancının UV süreciyle değişim grafiği

Çizelge 7.20 Kırılma tokluğunun UV süreçleriyle değişiminin ortalama değerleri

Numune	Kırılma Tokluğu (MPa/m ²)				
	0 Saat	12 Saat	96 Saat	192 Saat	480 Saat
ORJ-P1-UV	68.86	68.83	67.03	66.72	65.92
GD1-P1-UV	66.87	66.63	66.33	65.46	64.13
GD2-P1-UV	66.20	65.51	64.92	64.63	63.71
GD3-P1-UV	65.79	64.57	64.35	63.48	63.42
GD4-P1-UV	64.37	64.02	63.88	63.15	62.96



Şekil 7.13 Kırılma Tokluğunun UV süreciyle değişim grafiği



Şekil 7.14 ORJ-P1 numunesi için a) 0 ve b) 192 saat sonucu kırık yüzey görüntüleri

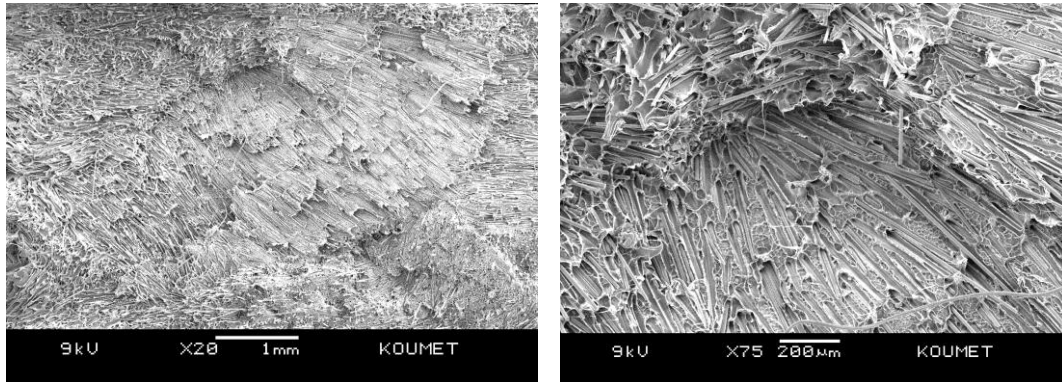
Diğer taraftan orijinal numune ile dördüncü geri dönüştürülmüş numunenin 480 saat sonundaki resimleri incelendiğinde herhangi bir renk değişiminin oluşmadığı da saptanmıştır. Görüntüler Şekil 7.15'te makro fotoğraflar olarak gösterilmiştir.



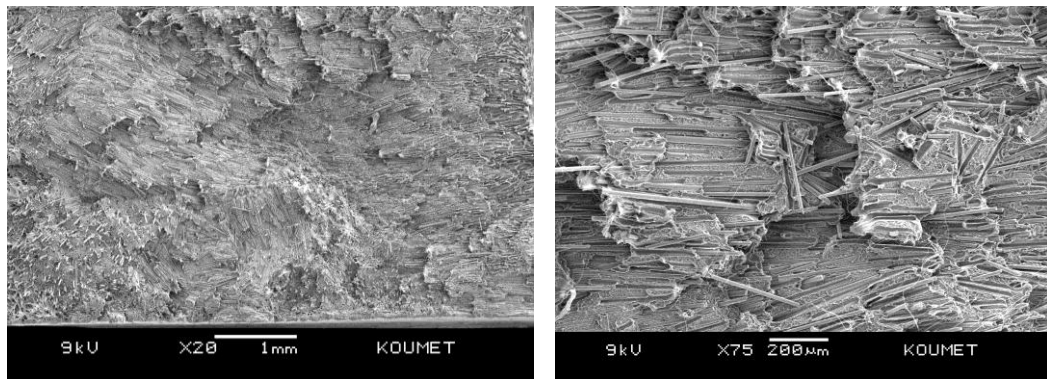
Şekil 7.15 Orijinal ve GD4 numunelerinin a) 0 ve b) 480 saat sonundaki durumları

7.11 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri

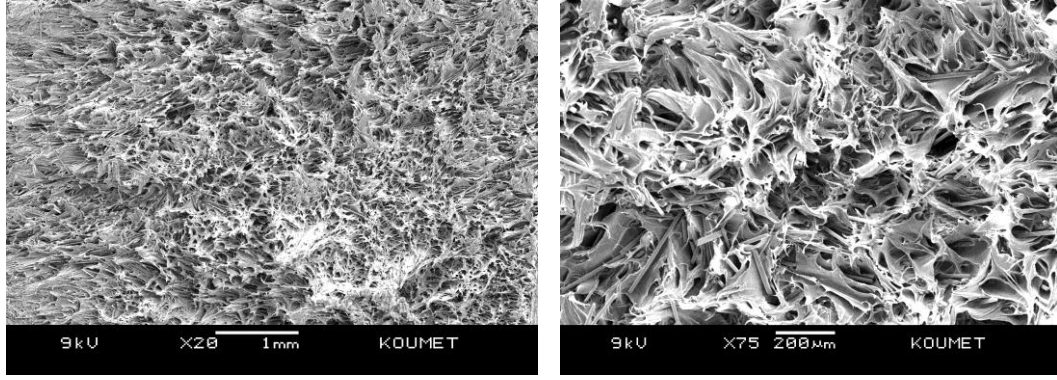
Taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları Madde 6.5.11 esaslarına göre 20 ve 75 büyütmelerde, ORJ ve sırasıyla GD1, GD2, GD3 ve GD4 numuneleri için alınmıştır. Kırık yüzey fotoğrafları sırasıyla ORJ için Şekil 7.16, GD1 için Şekil 7.17, GD2 için Şekil 7.18, GD3 için Şekil 7.19 ve GD4 için Şekil 7.20'da gösterilmiştir.



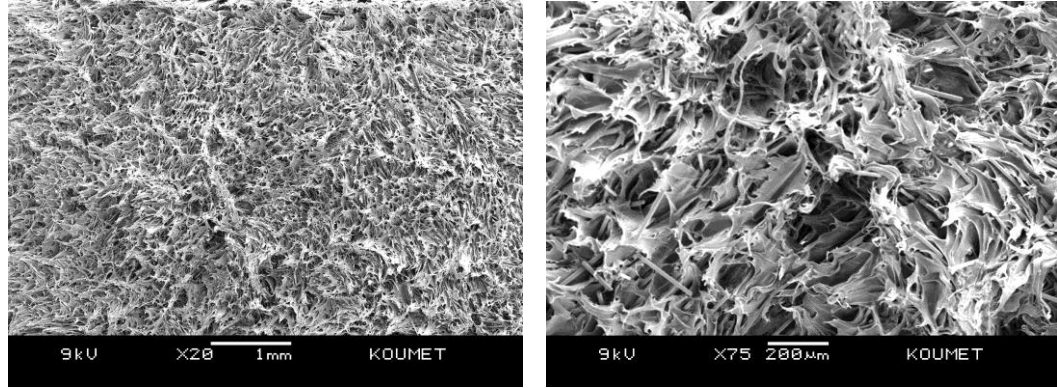
Şekil 7.16 ORJ numunesi için 20 ve 75 büyütmede alınan kırık yüzey görüntüleri



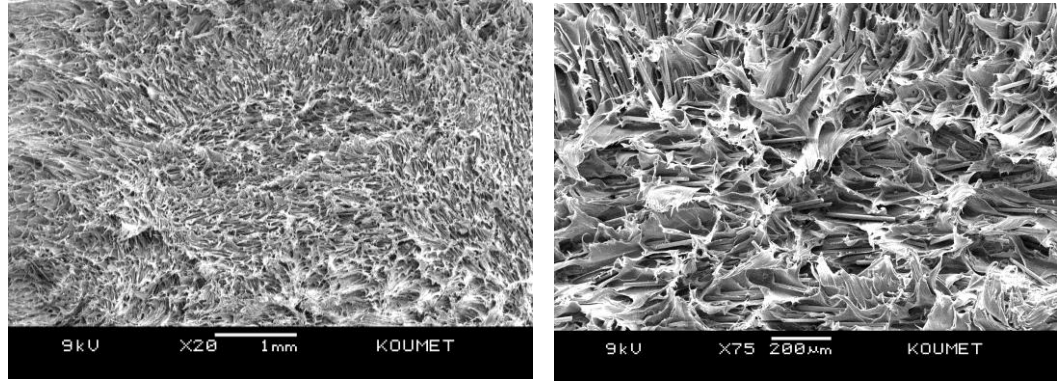
Şekil 7.17 GD1 numunesi için 20 ve 75 büyütmede alınan kırık yüzey görüntüleri



Şekil 7.18 GD2 numunesi için 20 ve 75 büyütmede alınan kırık yüzey görüntüleri



Şekil 7.19 GD3 numunesi için 20 ve 75 büyütmede alınan kırık yüzey görüntüleri



Şekil 7.20 GD4 numunesi için 20 ve 75 büyütmede alınan kırık yüzey görüntüleri

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bölüm 7’de elde edilen sonuçlar bu bölümde değerlendirilmiş, uygulamaya yönelik yorumlar yapılmış ve önerilerde bulunulmuştur. Bu prosedürden hareketle sonuçlar aşağıdaki maddelerle ifade edilmiştir.

1. Çalışmalarda %1 oranında MAH içeren YYPE matris ve %20 kırık E-Camı içeren termoplastik matrisli kompozit kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu sabit hacim oranı içindir. Çalışmanın genişletilmesi amacıyla birinci değişken olarak MAH oranının değiştirilmesi birinci seçenek olarak kendini göstermektedir. İkinci değişken, birinci değişkene bağlı olsun veya olmasın, cam hacim oranının arttırılmasıdır. Deneyler boyunca, imalatın gerek ekstrüder aşamasında, gerekse sıcak izostatik preste numunenin preslenmesi aşamalarında %20 hacim oranı özenle sabit tutulmuştur. Sözü edilen yöntemler için cam hacim oranı aralığı %10-30 seçilerek daha kapsamlı bir çalışmaya yönelinebilir. Benzer şekilde, MAH oranı da %0.5-2.0 aralığında seçilerek içerik genişletilebilir. Ancak, deneyde seçilen koşullar daha önceleri yapılmış ön çalışmaların optimizasyonu sonucu elde edildiğinden, sonuçlar otomotiv uygulamaları için geçerli değerlerdedir.
2. Çalışma, iki aşamalı olarak yapılmıştır. Birinci aşamada hacim oranı değişmeksizin dört adet geri dönüşüm çevrimleri oluşturulmuştur. Bu aşamada karışımın homojen hazırlanması amacıyla proses koşulları optimize edilmiş ve deneyler boyunca sabit tutulmuş, çift vidalı ekstrüder kullanılmıştır. İkinci aşamada karakterizasyon deneyleri için sıcak izostatik preste numunelerin elde

edileceği plakalar, yine optimizasyon sonucu elde edilen sabit koşullarda basılmıştır. Daha kapsamlı bir çalışma için söz konusu koşullardan biri veya birkaçının değişken olarak değiştirildiği deneylere gereksinim duyulacağı açıktır.

3. Tüm deneyler en son güncel versiyonu seçilen ISO EN standartlarına göre yapılmıştır. Dolayısıyla sonuçların öncelikle ulusal, ikinci aşamada uluslararası (Avrupa Birliği) platformda geçerliliği vardır. Böylece, bu çalışmadan hareketle daha sonra yapılacak çalışmalar için proje oluşturma ve alma zemini hazırlanmıştır.
4. Çekme deneyinde, çekme dayancı ve elastiklik modülünde çevrim sayısına bağlı olarak azalma görülmesine karşın; kopma uzamasında artış görülmüştür. Bu beklenen bir sonuçtur. Çekme dayancı birinci çevrimde %4 azalma göstermiş, daha sonra ise ortalama %3 azalma ile sonuçlardaki düşüş devam etmiştir. Benzer şekilde elastiklik modülü birinci çevrimde %6 azalma göstermiş, daha sonra ise %4.0-4.5 azalma göstererek deneyler devam etmiştir. Kopma uzaması ise ilk aşamada %17, daha sonra ise ortalama %6 artışla değişim göstermiştir. Bu verilerden hareketle değişimlerin doğrusal (lineer) olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, rneğin daha fazla deney yapmaksızın, olası sekizinci geri dönüşüm (GD8) için değerler ekstrapolasyonla kolayca hesaplanabilir. Değişimler ayrıca eğimi sabit $y=mx+n$ birinci dereceden eşitlikler şeklinde de elde edilmiştir. Değişim sonuçları kendi aralarında istatistiksel açıdan anlamlı bir bütün oluşturmakta ve güvenilirliği $R^2>0.92$ olduğundan, iyi bir yaklaşımla %100'e yakın güvenli kabul edilmektedir.
5. Eğme deneyinde, çevrim sayısına bağlı olarak eğme dayancında azalışlar gözlenirken; sehimde artışlar saptanmıştır. Orijinal numuneden birinci geri dönüşüme azalış %3.5 iken, diğer geri dönüşümler için ortalama %2 dolayındadır. Sehimdeki artış ise ilk aşamada %5 ve daha sonraki çevrim sayılarında ise ortalama %4 düzeyindedir. Eğme dayancındaki azalışa karşın; sehimdeki artış böyle si malzemeler için beklenen değerler olup, tüm deneylerde $R^2>0.92$ olduğundan, iyi bir yaklaşımla %100'e yakın güvenli sonuçlar elde edilmiştir.

6. Mekanik deneylerin sonuncusu olan darbe deneyinde ise, çekme ve eğmeye benzer sonuçlar elde edilmiştir. Çevrim sayısı arttıkça darbe dayancının azaldığı gözlenmiştir. Orijinal numuneden birinci çevrime geçildiğinde %13, diğer çevrimlerde ise ortalama %9 azalma elde edilmiştir. Buradaki deneylerde de $R^2 > 0.92$ olduğundan, sonuçlar güvenlidir.
7. Madde 4, 5 ve 6'daki değişimlerin görece ilk aşamada daha büyük olmasının nedeni, önemli fiber kırılmalarının (fiber boyundaki kısalma) ilk aşamada daha belirgin olmasından kaynaklanmaktadır. Daha sonraki aşamalarda fiber boyları çevrimle orantılı olarak benzer miktarlarda azalmıştır. Diğer taraftan, kırık yüzey görüntüleri incelendiğinde, matris içerisinde fiberlerin çevrim sayısının artmasıyla daha homojen olarak dağıldığı da görülmektedir. Bu gözlem, değişimi destekler niteliktedir.
8. Kalsinasyon ve yoğunluk deneyleri birbirlerini tamamlar özelliktedir. Kalsinasyon sonucu fiber boylarındaki azalma (l/d oranı) izlenirken, yoğunluğun tüm proses boyunca sabit cam hacim oranından dolayı değişmediği gözlenmiştir. Bu gözlem, proses koşullarının iyi sağlandığı ve deney sırasında herhangi bir malzeme kaybının olmadığı sonucunu kanıtlamaktadır.
9. MFR deneyinde geri dönüşüm sayısının artmasıyla, cam hacim oranının sabit kalması koşulunda matrisin akıcılığının arttığını görülmektedir. Böylece, geri dönüşüm sayısı arttıkça, plastik matrisin daha kolay şekillendirilebileceği söylenebilir. Ancak, akıcılığın artması, molekül zincirindeki bağ kuvvetlerinin azaldığı anlamına geldiğinden, dayançta düşüşlerin görüleceği açıktır. MFR değerlerindeki ortalama azalma %4.0-4.4 arasındadır. Madde 4 ve Madde 5 incelendiğinde çekme ve eğme dayancındaki azalışın %4.0-5.0 olduğu görülmektedir ki, bu da deney sonuçları arasındaki uyum ya da anlamlı bütünü kanıtlamaktadır.
10. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) tekniği malzemelerin ısı analizi için kullanılan termoanalitik bir yöntemdir. Numune ve referans, test boyunca aynı sıcaklıkta tutulmaya çalışılarak ve aynı hızda ısıtılarak, numunenin ve referansın üzerindeki ısı akışının hızı ölçülür ve karşılaştırılır. Aradaki fark, malzeme

bileşimi, kristallik ve oksidasyon gibi özelliklerin tayininde kullanılır. Buradan hareketle orijinal ve 4 çevrime uğramış numunelerin eğrileri birbirlerine benzer çıkmış ve ergime sıcaklığı ortalama 133°C olarak saptanmıştır. Bu sonuçlardan, geri dönüşüm sayısının ergime sıcaklığını değiştirmedeği ve uygulamada aynı proses koşullarında imalat yapılabileceği verilerine erişilmiştir. Eğer benzer çalışmalar daha fazla çevrim için yapılsa, yine benzer sonuçlara ulaşılabilecektir. Dolayısıyla geri dönüşmüş numunelerin işleme sıcaklıkları proses esnasında doğrudan şekillendirmeye etken değildir sonucuna varılır.

11. Elek analizi çalışması, çevrim sayısına bağlı olarak fiber boyunun değişimi için bilgisayar yardımıyla bir modellemenin kullanılması programı şu an için sağlanamadığından, bir fikir vermek amacıyla yapılmıştır. Analiz sonucu ortalama tane boyutu indeksinin orijinal numunede 0.10'dan GD4'te 0.03'e azaldığı saptanmıştır. Böylece çevrim sayısı ile birlikte fiber boyunun da azaldığı görülmüştür. Bu, çalışma için beklenen bir sonuçtur. Fiber boy faktörü, genelde 10 mm, çapı 10-15 µm olan cam fiberlerde 5 mm'den küçük boylarda doğrudan mekanik özellikleri etkin biçimde etkilemediğinden, yukarıda verilen değişimler izlenmiştir. Eğer daha fazla çevrim yapılsaydı, fiber boyunun daha fazla kısılma olasılığının düşeceği görülebilirdi.
12. Kırılma tokluğu doğrudan endüstriyel uygulaması olmamasına karşın numunelerin kırılmaya karşı davranışlarını belirleyen en önemli parametredir. Buradan, kırılma tokluğundaki değişimin, orijinal numuneden başlayarak %2 oranında azaldığı şeklinde görülmüştür. Bu değişim matematik olarak bir değer ifade etmesine rağmen, endüstriyel uygulamalar için gözardı edilebilecek değerlerde olduğundan, geri dönüşmüş numunelerin orijinale yakın sonuçlarla kullanılabileceği sonucuna varılır.
13. UV deneyi standartlara uygun koşullarda maksimum 480 saat için yapılmıştır. Bu numunelere mekanik deneylerden çekme, eğme, darbe ve kırılma tokluğu deneyleri orijinal ve dört geri dönüşmüş numuneler için uygulanmıştır. Deneyler sonucu mühendislik anlamda gözle görülür, belirgin bir değişimin olmadığı analitik olarak görülmüştür. Ayrıca numunelerin renginin değişmediği ve kırık yüzey görüntülerinden kırılma davranışlarının da değişmediği saptanmıştır. Bu

verilerden hareketle geri dönüşmüş numunelerde UV ışınlarının PE matris özelliklerini doğrudan değiştirmedeği görülmüştür. Böylece, sürekli UV ışınına maruz otomotiv parçalarında, geri dönüşmüş numunenin kullanımı açısından önemli verilere ulaşılmıştır.

14. SEM resimleri her çevrim sayısı için 20 ve 75 büyütme ölçeklerinde, kırık yüzey görüntüleri olarak alınmıştır. Buradan, çevrim sayısı arttıkça PE matrisin daha akıcı olarak, görece olarak daha sünek davrandığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar, MFR değerleriyle paralellik göstermektedir. Başka bir deyişle, çevrim sayısı arttıkça PE matriste, kopmaların daha sünek biçimde gerçekleştiği söylenebilir.
15. Avrupa Birliği otomotiv üreticileri kendine özgü şartnameler oluşturmuşlardır. Söz konusu değerler, çalışma sırasında elde edilmiş, ancak kullanım açısından ticari bilgi olması nedeniyle, kullanım izni alınamamıştır. Bu sonuç gayet doğaldır. Yapılan çalışmalarda, mekanik değerlerin, özellikle de çekme dayancı, eğme dayancı ve darbe dayancının şartnamedeki değerleri sağladığı görülmüştür. Ancak dördüncü çevrimde kritik değerlere, yani minimum değerler elde edildiğinden, daha sonraki çalışmalar için bir sakınca olduğu da saptanmıştır.
16. Bu çalışmanın bir amacı da hibrit geri dönüşüm için ön koşulların araştırılmasıdır. Örneğin üçüncü geri dönüşüme yedinci geri dönüşümün ilavesiyle değerlerin arttırılması üzerinde çalışılması gerekli ilginç konulardan biri olacaktır. Böylece çevreyi hiç kirletmeden, minimum enerji maliyetleriyle üretim yapılabilecektir. Şu an için çok detaylı bir çalışma yapılmamasına karşın, geri dönüşümle enerji maliyetlerinde %5-7 azalma (tasarruf) sağlanacağı saptanmıştır. Yöntemin seri hale getirilmesi (örneğin PLC kontrollü ekstrüder kullanımı) ve imalat koşullarının optimizasyonu ile (çalışma sıcaklığı, basıncı ve bekleme süresi) bu değerlerin daha da azaltılacağı kolayca görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Kaw, A.K., (2005). Mechanics of Composite Materials, Second Edition, Taylor&Francis Group, Florida.
- [2] Jones, R.M., (1999). Mechanics of Composite Materials, Second Edition, Taylor&Francis Group, Virginia.
- [3] Ashton, J.E., Halpin, J. C. ve Petit, P. H., (1969). Primer on Composite Material: Analysis, Technomic Publishing Co., Inc., Westport.
- [4] Tsai, S.W. ve Hahn, H. T., (1980). Introduction to Composite Materials, Technomic Publishing Co., Inc., Westport.
- [5] Strong, A.B., (1989). Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, , Society of Manufacturing Engineers Dearborn, Miami.
- [6] Bower, M.V., (2000). Composite Materials, Technomic Publishing Co., Inc., Alabama.
- [7] Goodman, S.H., (1998). Handbook of Thermoset Plastics, Second Edition, Raytheon System Company, California.
- [8] S. T. Peters, (1998). Handbook of Composites, Second Edition, Process Research, Mountain View, California.
- [9] Agarwal, B.D., Broutman, L.J. ve Chandrashekhara, K., (2006). Analysis and Performance of Fiber Composites, Third Edition, Wiley, New Jersey.
- [10] Reyne, M., (2006). Composite Solutions Thermosets And Thermoplastics, JEC Publications, Paris.
- [11] Jongsung, S., Cheolwoo, P. ve Young, M.D., (2005). "Characteristics Of Basalt Fiber As A Strengthening Material For Concrete Structures", Composites: Part B: Engineering, 36: 504-512.
- [12] Sidney, H.A., (1974). Introduction to Pyhsical Metallurgy, Second Edition, Mc Graw-Hill Book Co., New York.
- [13] Goodship, V., (2010). Management Recycling and Reuse of Waste Composites, Woodhead Publishing in Materials, Birmingham.

- [14] Bunsell, A.R. ve Renard, J., (2005). Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials, Taylor & Francis, Paris.
- [15] Murphy, J., (1998). The Reinforced Plastics Handbook, Elsevier, New York.
- [16] Davé, R.S. ve Loos, A.C., (2000). Processing of Composites, Hanser Publishers, Munich.
- [17] Harper, C., (2004). Handbook of Plastics, Elastomers and Composites, Fourth Edition, McGraw-Hill, Ohio.
- [18] Witten, E., (2008), "The Composites Market in Europe: Market Developments, Challenges, and Opportunities", AVK (Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe), Online Report (<http://www.eucia.org/publications/news>), 3 Mart 2012.
- [19] Allred, R.E., Gosau, J.M. ve Shoemaker, J.M., (2002). "Recycling Process for Carbon/ Epoxy Composites", Composites: Part B: Engineering, 36: 53-68.
- [20] Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D.J., Kuiper, P. ve de Wit, H., (2011). "Recycling of Composite Materials", Chemical Engineering and Processing, 1-16.
- [21] Wei, B., Cao, H. ve Song, S., (2010). "Environmental Resistance And Mechanical Performance Of Basalt And Glass Fibers", Materials Science and Engineering, A 527: 4708–4715
- [22] Brydson, J.A., (1999). Plastic Materials, Seventh Edition, Butterworth-Heinemann, London.
- [23] Adams, D.F., (2000). Comprehensive Composite Materials Volume 5: Test Methods, Nondestructive Evaluation, and Smart Materials, Test Methods for Mechanical Properties, Elsevier, Michigan.
- [24] Jiang, G., Wong, K.H., Pickering, S.J., Rudd, C.D. ve Walker, G. J., (2005). "Study of a Fluidised Bed Process for Recycling Carbon Fibre from Polymer Composites", Proceedings of 7th World Congress of Chemical Engineering, 10-14 July 2005, Glasgow.
- [25] Pickering, S.J., Kelly, R.M., Kennerley, J.R., Rudd C.D. ve Fenwick, N.J., (1999). "A Fluidised Bed Process for the Recovery of Glass Fibres from Scrap Thermoset Composites", Composites Science and Technology, 60: 509-523.
- [26] Schulte, K., Meyer, L.O. ve Grove-Nielsen, E., (2007). "Optimisation of a Pyrolysis Process for Recycling of CFRPs", 16th International Conference on Composite Materials, 8-13 July 2007, Kyoto.
- [27] Scheirs, J. ve Kaminsky, W., (2006). "Overview of Commercial Pyrolysis Processes for Waste Plastics", Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics, Wiley, Chichester, 383-433.
- [28] Burat, F., Güney, A. ve Kangal, M.O., (2009). "Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method", Waste Management, 29: 1807-1813.

- [29] Rhyner, R.C., Schwartz, L.J., Wenger, R.G. ve Kohrell M.G., (1995). Waste Management and Resource Recovery, Lewis Publishers, Washington D.C.
- [30] Chung, C., (2010). Extrusion of Polymers: Theory and Practice, Second Edition, Hanser Verlag, Berlin.
- [31] Erema online, Erema T System, www.erema.at/en, 14 Kasım 2012.
- [32] Ehrig, R. J., (1993). Plastics Recycling, Carl Hanser Verlag, Munich.
- [33] Gent, M.R., Menendez, M., Toraño, J., Isidro, D. ve Torno S., (2008). "Cylinder cyclone (LARCODEMS) density media separation of plastic wastes", Waste Management, 29: 1819-1827.
- [34] Baillie, C., (2004). Green Composites: Polymer Composites and the Environment, Woodhead Publishing, Cambridge.
- [35] Kutz, M., (2011). Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials-PDL Handbooks, Elsevier Inc., Oxford.
- [36] Otheguy, M.E., Gibson, A.G., Robinson, M., Findon, E., Cripps, B., Mendoza, A. O. ve Castro, M.T.A., "Recycling Of End-Of-Life Thermoplastic Composite Boats", <http://www.ncl.ac.uk/newrail/assets/docs/Otheguyetal-Recyclingofend-of-lifethermoplasticcompositeboats.pdf>, 3 Ağustos 2012.
- [37] Rubinstein, M. ve Colby, R.H., (2003). Polymer Physics, First Edition, Oxford University Press, New York.
- [38] Ávila, A.F. ve Duarte, M.V., (2003). "A mechanical analysis on recycled PET/HDPE composites", Polymer Degredation and Stability, 80: 373-382.
- [39] Bernasconi, A., Rossin, D. ve Armanni, C., (2007). "Analysis of the effect of mechanical recycling upon tensile strength of a short glass fibre reinforced polyamide 6,6", Engineering Fracture Mechanics, 74: 627-641.
- [40] Jansson, A., Möller, K. ve Gevert, T., (2003). "Degradation of post-consumer polypropylene materials exposed to simulated recycling—mechanical properties", Polymer Degredation and Stability, 82: 37-46.
- [41] Steenkamer, D.A. ve Sullivan, J.L., (1998). "On the recyclability of a cyclic thermoplastic composite material", Composites Part B, 29: 745-752.
- [42] Zhang, J.M. ve Peijs, T., (2010). "Self-reinforced poly(ethylene terephthalate) composites by hot consolidation of Bi-component PET yarns", Composites Part A, 41: 964-972.
- [43] Alcock, B., Cabrera, N.O., Barkoula, N.M., Spoelstra, A.B., Loos, J. ve Peijs, T., (2007). "The mechanical properties of woven tape all-polypropylene composites", Composites Part A, 38: 147-161.
- [44] Ha, K.H. ve Kim, M.S., (2012). "Application to refrigerator plastics by mechanical recycling from polypropylene in waste-appliances", Materials and Design, 34: 252-257.

- [45] Tachwali, Y., Al-Assaf, Y. ve Al-Ali, A.R., (2007). "Automatic multistage classification system for plastic bottles recycling", *Resources, Conservation and Recycling*, 52: 266-285.
- [46] Arostegui, A., Sarriomandia, M., Aurrekoetxea, J. ve Urrutibeascoa, I., (2006). "Effect of dissolution-based recycling on the degradation and the mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer", *Polymer Degradation and Stability*, 91: 2768-2774.
- [47] Le Duigou, A., Pillin, I., Bourmaud, A., Davies, P. ve Baley, C., (2008). "Effect of recycling on mechanical behaviour of biocompostable flax/poly(L-lactide) composites", *Composites Part A*, 39: 1471-1478.
- [48] Ravi, V., (2011). "Evaluating overall quality of recycling of e-waste from end-of-life computers", *Journal of Cleaner Production*, 1-7.
- [49] Reuter, M.A., van Schaik, A., Ignatenko, O. ve de Haan, G.J., (2006). "Fundamental limits for the recycling of end-of-life vehicles", *Minerals Engineering*, 19: 433-449.
- [50] Bourmaud, A. ve Baley, C., (2007). "Investigations on the recycling of hemp and sisal fibre reinforced polypropylene composites", *Polymer Degradation and Stability*, 92: 1034-1045.
- [51] Feih, S., Boiocchi, E., Mathys, G., Mathys, Z., Gibson, A.G. ve Mouritz, A.P., (2011). "Mechanical properties of thermally-treated and recycled glass fibres", *Composites Part B*, 42: 350-358.
- [52] Cui, J. ve Forrsberg, E., (2003). "Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review", *Journal of Hazardous Materials*, B99: 243-263.
- [53] Tóth, K., Czvikovszky, T. ve Abd-Elhamid, M., (2004). "Radiation-assisted PET recycling using glass fiber reinforcement and reactive additives", *Radiation Physics and Chemistry*, 69: 143-147.
- [54] Pimenta, S. ve Pinho, S.H., (2011). "Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook", *Waste Management*, 31: 378-392.
- [55] Lin, Y.H., Tseng, C.C., Wei, T.T. ve Hsu, C.T., (2011). "Recycling of dual hazardous wastes in a catalytic fluidizing process", *Catalysis Today*, 174: 37-45.
- [56] Bourmaud, A. ve Baley, C., (2009). "Rigidity analysis of polypropylene/vegetal fibre composites after recycling", *Polymer Degradation and Stability*, 94: 297-305.
- [57] Bertin, S. ve Robin, J.J., (2002). "Study and characterization of virgin and recycled LDPE/PP blends", *European Polymer Journal*, 38: 2255-2264.
- [58] Yoshida, T., Ishiaku, U.S., Okumura, H., Baba, S. ve Hamada, H., (2006). "The effect of molecular weight on the interfacial properties of GF/PP injection molded composites", *Composites Part A*, 37: 2300-2306.

- [59] Drozdov, A.D., Al-Mulla, A. ve Gupta, R.K., (2004). "The effect of recycling on the time-dependent behavior of polycarbonate reinforced with short glass fibers", *Composites Science and Technology*, 64: 129-144.
- [60] McCrum, N.G., Buckley, C.P. ve Bucknall, C.B., (1997). *Principles of Polymer Engineering*, Second Edition, Oxford Science Publications, New York.
- [61] Rempes, P., (2003). "Composite recycling and disposal, An environmental R&D issue", *Boeing Environmental Technotes*, 8: 1-4.
- [62] Arbelaiz, A., Fernandez, B., Ramos, J.A., Retegi, A., Llano-Ponte, R. ve Mondragon, I., (2005). "Mechanical Properties of Short Flax Fibre Bundle/Polypropylene Composites: Influence of Matrix/Fibre Modification, Fibre Content, Water Uptake and Recycling", *Composites Science and Technology*, 65: 1582-1592.
- [63] Avcı, A., Ekrem, M. ve Erkendirci, Ö.F., (2007). "Cam Kumaş Takviyeli Termoplastik Kompozitlerde Kırılma Davranışlarının İncelenmesi", 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı, 7-9 Kasım 2007, Konya.
- [64] Filho, A. ve Marconcini, J.M., (2007). "Selection Criteria for Recycled Polyolefins from Urban Wastes by Using TG Analysis", *Materials Research*, 10: 341-345.
- [65] DPT Plastik Ürünleri Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Raporu, (2001). Beş Yıllık Kalkınma Planı, Yayın No: 8, Ankara.
- [66] Toldy, A., Bodzay, B. ve Tierean, M., (2009). "Recycling of Mixed Polyolefin Wastes", *Environmental Engineering and Management Journal*, 8: 967-971.
- [67] Tukker, A., Groot, H., Simons, L. ve Wiegersma, S., (1999). "Chemical Recycling of Plastic Waste", TNO Institute of Strategy Technology and Policy Final Report, Delft.
- [68] Martinez Sanz, A.V., Lopez Martinez, J., Ferrandiz Bou, S. ve Romero Colomer, V., (2010). "Use Of Recycled in Thermoplastic Matrix Composites Reinforced Materials in Marine Environment: Characterization and Processing", *Fascicle of Management and Technological Engineering*, 9: 133-139.
- [69] Bodzay, B., Toldy, A., Fejős, M., Madi, K., Ronkay, F. ve Marosi, G., (2010). "Fire Retardancy and Reinforcement of Plastic Waste Originating from Different Industrial Sources", 14th European Conference on Composite Materials, 7-10 June 2010, Budapest.
- [70] Steenkamer, D.A. ve Sullivan, J.L., (1998). "On the Recyclability of a Cyclic Thermoplastic Composite Material", *Elsevier, Composites Part B*: 745-752.
- [71] Nwabunma, D. ve Kyu, T., (2008), *Polyolefin Composites*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- [72] Achillas, D.S., Antonakou, E., Roupakias, C., Megalokonomos, P. ve Lappas, A., (2008). "Recycling Techniques of Polyolefins from Plastic Wastes", *Global Nest Journal*, 10: 114-122.

- [73] Rosato, D.V., (2011). *Plastics End Use Applications*, Springer Science+Business Media, New York.
- [74] Kidee, P., Naidu, R. ve Wong, M.H., (2013). "Electronic waste management approaches: An overview", *Waste Management*, 1-14.
- [75] Bliznakov, E.D., White, C.C. ve Shaw, M.T., (2000). "Mechanical Properties of Blends of HDPE and Recycled Urea-Formaldehyde Resin", *Journal of Applied Polymer Science*, 77: 3220-3227.
- [76] Di Maio, F., (2011). "The W2Plastics Project: Exploring the Limits of Polymers Separation", *Environmental (Bio) Technologies*, 5-8 September 2010, Gdansk.
- [77] La Mantia, F.P., (1996). *Recycling of PVC and Mixed Plastic Waste*, ChemTec Publishing, Ontario.
- [78] Belingardi, G., Koricho, E.G. ve Martorana, B., (2011). "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.
- [79] Mark, H.F., (2003). *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, Third Edition, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [80] Karian, H.G., (2003). *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites*, Second Edition, CRC Press, Philadelphia.
- [81] Beer, H.R., (1999). "Longevity and Ecology of Polyolefin Roof Membranes", *Fourth International Symposium on Roofing Technology*, 17-19 September 1999, Gaithersburg.
- [82] Baci, I.L., Crivelli Visconti, I., Langella, A., Luprano, V. ve Teti, R., (2006). "Quality Evaluation of Thermoplastic Composite Material Single-Lap Joints", *Elsevier*, 258-263.
- [83] Yaşar, İ. ve Arslan, F., (2000). "Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozitlerde Elyaf Hacim Oranı ve Elyaf Doğrultusunun Tribolojik Özelliklere Etkisi", *Tübitak*, 24: 181-191 .
- [84] Çetinel, H., (2000). "Polietilen ve Polipropilenin Mekanik Özelliklerinin İncelemesi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2: 79-87.
- [85] Beg, M.D.H. ve Pickering, K.L., (2008). "Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. Part I: Effects on physical and mechanical properties", *Composites Part A*, 39: 1091-1100.
- [86] Beg, M.D.H. ve Pickering, K.L., (2008). "Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. Part II: Hygrothermal ageing and its effects", *Composites Part A*, 39: 1565-1571.
- [87] Scheirs, J. ve Kaminsky, W., (2006). *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [88] Adhikary, K.B., Pang, S. ve Staiger, M.P., (2007). "Dimensional Stability and Mechanical Behavior of Wood-Plastic Composites Based on Recycled and Virgin High Density Polyethylene", *Composites Part B*, 39: 807-815.

- [89] Biron, M., (2007). Thermoplastics and Thermoplastic Composites, Elsevier Ltd., Oxford.
- [90] Beg, M.D.H., Pickering, K.L., Ahmed, I. ve Hassan, Z., (2009). "Recycling of Thermoplastic Composites: Quality and Durability", International Conference on Mechanical Engineering, 26-28 December 2009, Dhaka.
- [91] Ahmed, S. ve Patil, G., (2013). "Bumper Shape Optimization for Pedestrian Safety", International Journal of Engineering Research and Applications, 3: 1724-1732.
- [92] Ferraõ, P. ve Amaral, J., (2006). "Assessing the economics of auto recycling activities in relation to European Union Directive on end of life vehicles", Technological Forecasting & Social Change, 73: 277-289.
- [93] Anderson, T.L., (2005). Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications, Third Edition, Taylor & Francis Group, Washington D.C.
- [94] Najafi, S.K., (2013). "Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review", Waste Management, 1-8.
- [95] Valente, M., Sarasini, F., Marra, F., Tirillo, J. ve Pulci G., (2011). "Hybrid recycled glass fiber/wood flour thermoplastic composites: Manufacturing and mechanical characterization", Composites Part A, 42: 649-657.
- [96] TS EN ISO 527-4, (2007). Plâstikler – Çekme Özelliklerinin Tayini – Bölüm 4: İzotropik VE Ortotropik Elyaf Takviyeli Plâstik Kompozitler İçin Deney Şartları, TSE, Ankara.
- [97] TS EN ISO 14125, (1999). Plastik Kompozitler – Elyaf Takviyeli – Eğilme Özelliklerinin Tayini, TSE, Ankara.
- [98] TS EN ISO 148-1, (2010). Metalik malzemeler-Charpy vurma deneyi- Bölüm 1: Deney metodu, TSE, Ankara.
- [99] TS EN ISO 148-3, (2010). Metalik malzemeler-Charpy vurma deneyi-Bölüm 3: Vurmanın dolaylı olarak değerlendirilmesi için v çentik deney parçalarının hazırlanması ve nitelendirilmesi, TSE, Ankara.
- [100] TS 1177 EN ISO 1172, (2004). Tekstil - Cam Takviyeli Plâstikler – Prepregler, Kalıplama Hamurları ve Lâminatlar – Tekstil - Cam ve Mineral Dolgu Muhtevasının Tayini – Kalsinasyon Metotları, TSE, Ankara.
- [101] TS EN ISO 1183-1, (2006). Plâstikler - Gözeneksiz Plâstikler – Yoğunluk Tayin Metotları - Bölüm 1: Daldırma Metodu, Sıvı Piknometre Metodu ve Titrasyon Metodu, TSE, Ankara.
- [102] TS EN ISO 1133-1, (2011). Plâstikler - Erimiş termoplâstiklerin kütsel akış hızının (MFR) ve hacimsel akış hızının (MVR) tayini - Bölüm 1: Standard yöntem, TSE, Ankara.
- [103] DIN EN ISO 11357-1, (1997). Plastics – Differential scanning calorimetry (DSC) Part 1:General principles, DIN, Berlin.

- [104] TS EN 933-10, (2010). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 10: İnce malzeme tayini - İnce dolgu malzemelerinin tane büyüklüğüne göre sınıflandırılması (hava jetiyle eleme), TSE, Ankara.
- [105] BS ISO 13586, (2000). Plastics — Determination of fracture toughness (G_{1C} and K_{1C}) — Linear elastic fracture mechanics (LEFM) approach, BSI, London.
- [106] BS ISO 17281, (2002). Plastics Determination of fracture toughness (G_{1C} and K_{1C}) at moderately high loading rates (1 m/s), BSI, London.
- [107] TS EN ISO 4892-1, (2006). Plastikler-Laboratuvar ışık kaynaklarına maruz bırakma metotları-Bölüm 1: Genel kılavuz, TSE, Ankara.
- [108] TS EN ISO 4892-3, (2006). Plastikler-Laboratuvar ışın kaynaklarına maruz bırakma metotları-Bölüm 3: Floresan UV lambaları, TSE, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ali Rıfat ÜNAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 09.08.1988, Fatih
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca
E-posta : alirifatunal@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2011
Lise	Fen Bilimleri	Mustafa Saffet Anadolu Lisesi	2006

YAYINLARI

Bildiri

1. Determination of the Effects of Recycling on Polyolefine Matrix Composites