



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLEN POLİETİLEN
MALZEMELERİN ÇOK KATMANLI ESNEK
AMBALAJ UYGULAMALARINDA
KULLANIMI VE AMBALAJ
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

MUHAMMED ÇAĞRI KILIÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Polimer Bilimi ve
Teknolojisi Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Burcu OKTAY

İSTANBUL, 2025



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



GERİ DÖNÜŞTÜRÜLEN POLİETİLEN
MALZEMELERİN ÇOK KATMANLI ESNEK
AMBALAJ UYGULAMALARINDA
KULLANIMI VE AMBALAJ
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI

MUHAMMED ÇAĞRI KILIÇ

(526621013)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Polimer Bilimi ve
Teknolojisi Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Burcu OKTAY

İSTANBUL, 2025



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Muhammed Çağrı Kılıç'ın “geri dönüştürülen polietilen malzemelerin çok katmanlı esnek ambalaj uygulamalarında kullanımı ve ambalaj özelliklerine etkisinin araştırılması” başlıklı tez çalışması 28.04.2025 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. ADI SOYADI (Danışman)

Marmara Üniversitesi (İMZA)

Prof. Dr. ADI SOYADI (Üye)

Marmara Üniversitesi (İMZA)

Doç. Dr. ADI SOYADI (Üye)

Üniversitesi (İMZA)

İçindekiler Tablosu

ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
SEMBOLLER.....	v
KISALTMALAR	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ.....	x
BÖLÜM 1- GİRİŞ	1
1.1 Polimer Terimi ve Genel Yapısı.....	2
1.2 Polietilen Genel Özellikleri ve Türleri.....	4
1.2.1 Alçak Yoğunluklu Polietilen (LDPE)	7
1.2.2 Lineer Alçak Yoğunluklu Polietilen (LLDPE).....	8
1.2.3 Orta Yoğunluklu Polietilen (MDPE)	9
1.2.4 Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)	9
1.3 Polietilenin Esnek Ambalaj Uygulamalarındaki Yeri.....	10
1.4 Çok Katmanlı Esnek Ambalaj Film Üretim Yöntemleri.....	11
1.4.1 Ko-Ekstrüzyon Yöntemi	12
1.4.2 Laminasyon Yöntemi.....	12
1.4.3 Ekstrüzyon ile Kaplama ve Ekstrüzyon Laminasyonu	12
1.4.4 Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	13
1.5 Polietilen Esnek Ambalajlarının Geri Dönüştürülmesi.....	13
BÖLÜM 2. MATERYAL ve YÖNTEM	16
2.1. Kullanılan Malzemeler ve Kompozisyonları	16
2.1.1 Numune Üretimi	16
2.1.2 Numune Kompozisyonları.....	17
2.1.3 SAF Polietilen Malzemelerin karakteristik özellikleri	20

2.1.4 PCR (Post Consumer Recycled) PE.....	22
2.1.5 PIR (Post Industrial Recycled) PE.....	23
2.2 PIR Granüllerinin Hazırlanması.....	23
2.3 Numunelere Uygulanan Testler	26
BÖLÜM 3. Sonuçlar ve Tartışma	32
3.1 PCR ve PIR Polietilenlerin Ambalaj filmlerine etkisi.....	32
3.2 Parlaklık Testi	32
3.3 Çekme Mukavemeti	34
3.4 Kopma Mukavemeti.....	38
3.5 Çekme Uzaması	41
3.6 Kopma Uzaması.....	44
3.7 Elastisite Modülü	48
3.8 Kaynak Kopma Mukavemeti	52
3.9 Sürtünme Katsayısı (C.O.F).....	54
3.10 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)	56
3.11 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR).....	59
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	62
4.1. Sonuçlar.....	62
4.2. Öneriler.....	64

ÖZET

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLEN POLİETİLEN MALZEMELERİN ÇOK KATMANLI ESNEK AMBALAJ UYGULAMALARINDA KULLANIMI VE AMBALAJ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Plastik ambalaj sektöründe sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Artan çevresel kaygılar, plastik atık yönetimi politikaları ve düzenleyici standartlar, geri dönüştürülmüş plastiklerin ambalaj uygulamalarında daha yaygın hale gelmesini teşvik etmektedir. Ancak, geri dönüştürülmüş polietilenin çok katmanlı esnek ambalaj filmlerinde kullanımı, malzemenin mekanik, optik ve bariyer özellikleri üzerinde çeşitli etkiler yaratmaktadır. Bu çalışmanın amacı, geri dönüştürülmüş polietilen içeriğinin ambalaj filmlerinin performansı üzerindeki etkilerini anlamak ve sürdürülebilir ambalaj çözümlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktır.

Bu kapsamda, belirli oranlarda üretim sonrası geri kazanılmış (PIR) ve tüketim sonrası geri dönüştürülmüş (PCR) polietilen içeren çok katmanlı esnek ambalaj filmleri üretilmiş ve saf polietilen içeren referans film ile karşılaştırılmıştır. Hazırlanan numuneler, mekanik, optik ve işlenebilirlik özellikleri açısından detaylı testlere tabi tutulmuştur. Yapılan analizler sonucunda, geri dönüştürülmüş içeriğin artmasıyla birlikte mekanik özelliklerde zayıflamalar gözlemlenirken, yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve bunun sürtünme katsayısı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen bulgular, geri dönüştürülmüş polietilenin esnek ambalaj uygulamalarında belirli sınırlar içinde kullanımının mümkün olduğunu, ancak malzeme bileşiminin ve üretim parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Sürdürülebilir ambalaj üretiminin yaygınlaştırılması ve döngüsel ekonomiye katkı sağlanması açısından, geri dönüştürülmüş polimerlerin işlenebilirlik ve performans açısından daha iyi değerlendirilebilmesi için ileri mühendislik çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma, plastik geri dönüşümünün esnek ambalaj uygulamalarında kullanılabilirliğini değerlendirerek, bu alandaki uygulamaların geliştirilmesine olanak sağlayacak teknik ve bilimsel verileri sunmayı amaçlamaktadır.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE USE OF RECYCLED POLYETHYLENE PACKAGING MATERIALS IN MULTI-LAYER FLEXIBLE PACKAGING APPLICATIONS AND THEIR EFFECTS ON PACKAGING PROPERTIES

The use of recycled materials in the plastic packaging industry is becoming increasingly important in line with sustainability and circular economy goals. Growing environmental concerns, plastic waste management policies, and regulatory standards are driving the widespread adoption of recycled plastics in packaging applications. However, incorporating recycled polyethylene into multilayer flexible packaging films affects the material's mechanical, optical, and barrier properties in various ways. This study aims to investigate the impact of recycled polyethylene content on the performance of packaging films and contribute to the development of sustainable packaging solutions.

For this purpose, multilayer flexible packaging films containing specific ratios of post-industrial recycled (PIR) and post-consumer recycled (PCR) polyethylene were produced and compared with reference films made from virgin polyethylene. The prepared samples were subjected to detailed tests to evaluate their mechanical, optical, barrier, and processability properties. The analyses revealed that increasing the recycled content led to a decline in mechanical properties, while surface roughness increased, affecting the coefficient of friction. In terms of barrier properties, oxygen permeability increased with higher recycled content, whereas no significant change was observed in water vapor permeability.

The findings indicate that recycled polyethylene can be used in flexible packaging applications within certain limits, but material composition and production parameters must be optimized. To promote sustainable packaging production and contribute to the circular economy, advanced engineering solutions are needed to better assess the processability and performance of recycled polymers. This study provides a scientific foundation for the efficient use of plastic recycling in the flexible packaging sector, serving as a guide for both industry and academia.

SEMBOLLER

T_g : Camsı Geçiş Sıcaklığı

cc: Santimetre Küp

h : Kalınlık

L_0 : Ölçme Uzunluğu

L: Çeneler Arasındaki Başlangıç Mesafesi

ℓ : Toplam Uzunluk

$^{\circ}\text{C}$: Santigrat Derece

d: Yoğunluk

dak: Dakika

dev: Devir

F: Kuvvet

μ : Mikron

gr: Gram

J: Joule

kJ: Kilojoule

kg: Kilogram

m: Metre

m^2 : Metrekare

m^3 : Metreküp

cm: Santimetre

cm^2 : Santimetrekare

cm^3 : Santimetreküp

MPa: Megapaskal

mm: Milimetre

mm^2 : Milimetrekare

μm : Mikrometre

ηm : Nanometre

N: Newton

Nm: Newton Metre

sn: Saniye

L: Boy



D: ap

rpm: Dakikadaki Devir Sayısı

kV: Kilovolt

Bar: Basınç

t: Toplam Süre (saniye)

kPa: Kilo Paslal

mg: Miligram

T_m : Erime Sıcaklığı

T_c : Kristalizasyon Sıcaklığı

Pa: Paskal

P_{max} : Maksimum Kuvvet

A_0 : Yüzey Alanı

Φ : Derişim Miktarı

ΔH : Entalpi

%X: Kristalizasyon Derecesi

%T: Geçirgenlik



KISALTMALAR

ASTM: American Society For Testing and Materials

ISO: International Organization for Standardization

C: Karbon

CH₃: Metil

CH₂ : Metilen

CH: Hidrokarbon

FTIR: Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektrometresi

AYPE: Alçak Yoğunluklu Polietilen

YYPE: Yüksek Yoğunluklu Polietilen

LDPE: Low Density Polyethylene

LLDPE: Lineer Low Density Polyethylene

MDPE: Medium Density Polyethylene

HDPE: High Density Polyethylene

DSC: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre

Maks: Maksimum

Min: Minimum

O: Oksijen

PP: Polipropilen

MD: Machine Direction

CD: Cross Direction

PIR: Post-Industrial Recycled

PCR: Post-Consumer Recycled

PE: Polietilen

EVOH: Etilen Vinil Alkol

PET: Polietilen Teraftalat

WVTR: Su Buharı Geçirgenlik Hızı

OTR: Oksijen Geçirgenlik Hızı

GU: Parlaklık Birimi

COF: Sürtünme Katsayısı

Std Spm: Standart Sapma

Ort: Ortalama

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1 Doğrusal, Dallanmış ve Ağ yapılı polimer zinciri gösterimi	3
Şekil 1. 2 Isı tepkilerine göre polimerlerin sınıflandırılması [1]	3
Şekil 1. 3 Polietilenin yapısı [6]	5
Şekil 1. 4 Yoğunluklarına göre Polietilen dallanmaları gösterimi.....	6
Şekil 1. 5 AYPE Dallanma Yapısı.....	7
Şekil 1. 6 Linear Alçak Yoğunluklu Polietilen Dallanma Yapısı.....	8
Şekil 1. 7 Polietilen Kullanılarak Üretilmiş Film Ruloları.....	10
Şekil 1. 8 Polietilen Film kullanılarak üretilmiş Çocuk Bezi Torbası Görüntüsü	11
Şekil 1. 9 Blown Film Ekstrüzyon şeması [10]	13
Şekil 2. 1 Blown Ekstrüder.....	18
Şekil 2. 2 PCR Ravapura C70 Granül haldeki görüntüsü	22
Şekil 2. 3 Üretim firesinden elde edilmiş PIR (PE).....	23
Şekil 2. 4 PE atıklarının öğütülmesi	24
Şekil 2. 5 Öğütülme sonrası görüntü.....	25
Şekil 2. 6 Kovan görüntüsü	25
Şekil 2. 7 Granül kurutma bölümü	26
Şekil 2. 8 Parlaklık ölçüm cihazı	27
Şekil 2. 9 Uzama – Kopma Test Cihazı.....	28
Şekil 2. 10 Numune Hazırlama ölçüleri [15].....	28
Şekil 2. 11 Kaynak kuvveti cihazı	29
Şekil 2. 12 C.O.F test cihazı.....	30
Şekil 3. 1 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Parlaklık Değerleri Grafiği.....	34
Şekil 3. 2 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Çekme Mukavemet Grafiği.....	35
Şekil 3. 3 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Çekme Mukavemet Grafiği.....	37
Şekil 3. 4 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Kopma Mukavemet Grafiği.....	40
Şekil 3. 5 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Kopma Mukavemet Grafiği.....	40
Şekil 3. 6 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Çekme Uzaması Grafiği.....	42
Şekil 3. 7 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Çekme Uzaması Grafiği.....	44

Şekil 3. 8 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Kopma Uzaması Grafiği.....	46
Şekil 3. 9 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Kopma Uzaması Grafiği.....	47
Şekil 3. 10 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Elastisite Modül Grafiği	49
Şekil 3. 11 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Elastisite Modül Grafiği	50
Şekil 3. 12 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Gerilim/Gerinim Grafiği.....	51
Şekil 3. 13 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Gerilim/Gerinim Grafiği.....	51
Şekil 3. 14 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Kaynak Kopma Mukavemeti.....	54
Şekil 3. 15 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin C.O.F Katsayıları	55
Şekil 3. 16 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin DSC Grafiği.....	58
Şekil 3. 17 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin FTIR Görüntüleri	60



TABLO LİSTESİ

Tablo 1. 1 Yoğunluklarına göre Polietilen sınıflandırılmaları[6]	6
Tablo 2. 1 Test Numune İçerikleri.....	17
Tablo 2. 2 Numune 1 Kompozisyonu	18
Tablo 2. 3 Numune 2 Kompozisyonu	18
Tablo 2. 4 Numune 3 Kompozisyonu	19
Tablo 2. 5 Numune 4 Kompozisyonu	19
Tablo 2. 6 Numune 5 Kompozisyonu	19
Tablo 2. 7 Numune 6 Kompozisyonu	20
Tablo 2. 8 Numune 7 Kompozisyonu	20
Tablo 2. 9 PE Malzemelerin Ticari Sınıfı	21
Tablo 2. 10 312 E malzemesinin karakteristik özellikleri.....	21
Tablo 2. 11 2018 MB malzemesinin karakteristik özellikleri	21
Tablo 2. 12 Ravapura C70 karakteristik özellikleri	23
Tablo 3. 1 Geri Dönüştürülmüş PE içeren Filmlerin Parlaklık değerleri.....	33
Tablo 3. 2 Geri Dönüştürülmüş PE içeren Filmlerin boyuna çekme mukavemetleri	35
Tablo 3. 3 Geri Dönüştürülmüş PE içeren Filmlerin Enine Çekme Mukavemetleri	36
Tablo 3. 4 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Kopma Mukavemeti.....	38
Tablo 3. 5 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Kopma Mukavemeti	39
Tablo 3. 6 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Çekme Uzaması	42
Tablo 3. 7 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Çekme Uzaması.....	43
Tablo 3. 8 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Kopma Uzaması	45
Tablo 3. 9 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Kopma Uzaması	47
Tablo 3. 10 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Elastisite Modülü	48
Tablo 3. 11 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Elastisite Modülü	49
Tablo 3. 12 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Kaynak Kopma Mukavemeti.....	53
Tablo 3. 13 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin C.O.F katsayıları.....	55
Tablo 3. 14 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin T_c , ΔH ve %X Değerleri.....	58

BÖLÜM 1- GİRİŞ

Plastik malzemeler, modern ambalaj endüstrisinde hafiflik, dayanıklılık ve işlenebilirlik gibi özellikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, plastik tüketiminin küresel ölçekte hızla artması, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli sorunları da beraberinde getirmiştir. Özellikle tek kullanımlık plastiklerin doğada uzun süre bozunmadan kalması ve geri dönüşüm süreçlerinin yeterince verimli olmaması, plastik atık yönetimini kritik bir konu haline getirmiştir. Bu durum, plastik ambalaj üreticilerini daha sürdürülebilir malzeme çözümleri arayışına yönlendirmiştir. Son yıllarda, geri dönüştürülmüş polietilen (rPE) içeren malzemelerin ambalaj sektöründe kullanımına yönelik çalışmalar hız kazanmış ve hem post-endüstriyel (PIR) hem de post-tüketici (PCR) kaynaklı geri dönüştürülmüş hammaddelerin üretim süreçlerine entegrasyonu üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Ancak, bu tür malzemelerin geleneksel saf polietilen (virgin PE) ile kıyaslandığında mekanik, fiziksel ve görsel özellikler açısından nasıl bir performans sergilediği ve nihai ambalaj ürünlerinin kalitesine nasıl etki ettiği konuları hala detaylı bir şekilde araştırılmaya devam etmektedir.

Geri dönüştürülmüş polietilenin kullanımına yönelik en büyük endişelerden biri, malzemenin saflık düzeyinin ve işlenebilirlik özelliklerinin değişkenlik göstermesidir. Geri dönüşüm sürecinden geçen polimerler, orijinal polimer zincirlerinde meydana gelen yapısal bozulmalar, kontaminasyon seviyeleri ve yeniden işleme sırasında karşılaşılan termal ve mekanik gerilmeler nedeniyle saf polietilene kıyasla farklı özellikler gösterebilir. Bu değişimler, çok katmanlı esnek ambalaj uygulamalarında kullanılan filmler için önemli bir tasarım kriteri haline gelmiştir. Özellikle bebek bezi torbası gibi hem dayanıklılık hem de görsellik açısından belirli standartları sağlaması gereken ambalajlarda, geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının avantajları ve olası dezavantajlarının detaylı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, % 15, % 35 ve % 50 oranlarında Post-Industrial Recycled (PIR) ve Post-Consumer Recycled (PCR) polietilen içeren toplam altı farklı film ve geri dönüştürülmüş PE içermeyen bir referans film olmak üzere yedi farklı beyaz film şişirme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen filmler, ambalajlarda kullanım potansiyellerini değerlendirmek amacıyla mekanik, fiziksel ve görsel özellikler açısından testlere tabi tutulmuş ve kıyaslanmıştır. Çalışmanın bulguları, geri dönüştürülmüş PE oranının film özellikleri üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde ortaya koyarak, sürdürülebilir ambalaj üretimine yönelik önemli veriler sunmaktadır.

1.1 Polimer Terimi ve Genel Yapısı

Polimerler, birçok küçük molekülün (monomerin) kovalent bağlarla birbirine bağlanarak oluşturduğu yüksek molekül ağırlıklı makromoleküllerdir. Monomerler, belirli sıcaklık, basınç ve uygun katalizörler gibi koşullar altında polimerizasyon tepkimesine girerek uzun zincirli polimer yapıları oluştururlar. Örnek olarak, etilen monomerleri polimerleşme tepkimesi ile polietilen (PE) yapısına dönüşerek, günlük yaşamda yaygın olarak kullanılan esnek ve dayanıklı bir plastik malzeme haline gelir. Polimerlerin temel yapısı, küçük moleküllerin ardışık şekilde bağlanmasıyla uzun zincir benzeri bir yapı oluşturmaya dayanır. Bu nedenle "polimer zinciri", "makromolekül" ve "polimer molekülü" terimleri eş anlamlı olarak kullanılmaktadır.

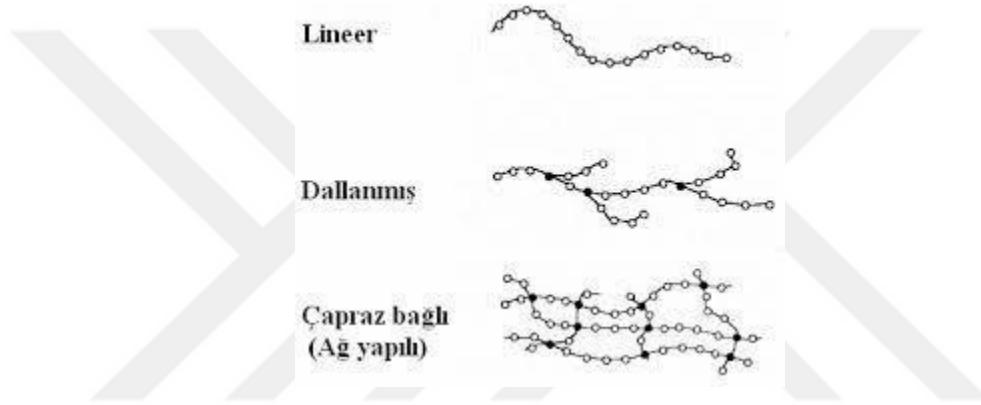
Polimerlerin kimyasal yapıları, moleküler dizilimleri ve zincir uzunlukları, onların fiziksel ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Polietilen örneğinde olduğu gibi, polimer zincirleri doğrusal, dallanmış veya çapraz bağlı yapılar gösterebilir. Polimer moleküllerinde karbon atomları kovalent bağlarla birbirine bağlanarak zincirler oluşturur ve sp^3 hibritleşmesi nedeniyle bu bağlar üç boyutlu bir düzen içerisinde belirli açılarla yerleşir. Tipik bir polietilen makromolekülü binlerce atom içerebilir ve zincir uzunluğu mikrometre boyutlarına ulaşabilir. Bu özellikleri sayesinde polimerler, düşük yoğunluklu ve esnek yapılardan yüksek mukavemetli ve sert malzemelere kadar geniş bir yelpazede kullanılabilir.

Polimerler, yüksek molekül ağırlıkları ve kendine özgü zincir yapıları sayesinde diğer kimyasal bileşiklerden farklı özellikler sergiler. Mekanik dayanım, termal stabilite, esneklik ve kimyasal direnç gibi faktörler, polimerlerin uygulama alanlarını belirleyen temel unsurlardır. Yapılarındaki farklılıklara bağlı olarak polimerler, amorf veya kristal yapıda olabilir. Kristal yapı gösteren polimerlerde zincirler düzenli bir şekilde istiflenirken, amorf polimerlerde zincirler düzensiz bir şekilde dağılmıştır. Ayrıca, polimerlerin zincir morfolojisi ve çapraz bağ yoğunluğu, onların işlenebilirliğini ve kullanım alanlarını belirleyen en önemli parametrelerden biridir.

Polimerlerin farklı türleri arasında termoplastikler, elastomerler ve termosetler yer almaktadır. Termoplastikler, belirli sıcaklık aralıklarında yumuşayarak yeniden şekillendirilebilen polimerlerdir. Dallanmış veya doğrusal zincir yapısına sahip olabilirler ve genellikle geri dönüştürülebilir özellik gösterirler. Elastomerler, düşük oranda çapraz bağlı polimerler olup,

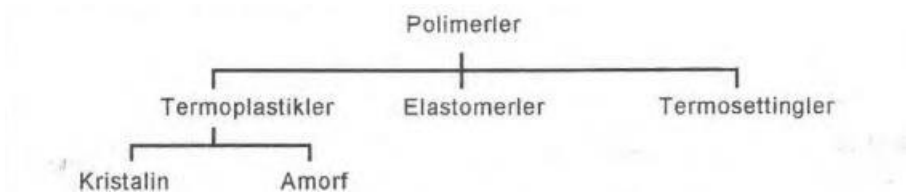
yüksek elastikiyetleri ile bilinirler ve gerildiğinde orijinal şekillerine geri dönebilirler. Termoset polimerler ise yoğun çapraz bağ içeren sert yapılar olup, yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır ve bir kez sertleştikten sonra yeniden eritilemezler.

Polimerlerin özellikleri, moleküler yapılarındaki düzenlemelere, zincir uzunluklarına ve çapraz bağ yoğunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. Günümüzde, polimer bilimindeki ilerlemeler sayesinde geri dönüştürülmüş polimerlerin kullanımı artmış ve sürdürülebilir ambalaj malzemeleri gibi çevre dostu uygulamalarda daha yaygın hale gelmiştir. Polimer malzemelerin işlevselliğini artırmak ve yeni nesil uygulamalar için optimize etmek amacıyla yapılan araştırmalar, bu alandaki gelişmeleri hızlandırmaya devam etmektedir. [1].



Şekil 1. 1 Doğrusal, Dallanmış ve Ağ yapılı polimer zinciri gösterimi

Polimerlerin ısıya gösterdikleri tepkilere göre sınıflandırılması şekil 1. 2 de gösterilmiştir.



Şekil 1. 2 Isı tepkilerine göre polimerlerin sınıflandırılması [1]

Polimerler, yapılarına ve işlenebilirlik özelliklerine göre genel olarak termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Bu sınıflandırma, polimerlerin üretim, kullanım ve geri dönüşüm potansiyelleri üzerinde doğrudan belirleyici rol oynar.

Termoplastikler, belirli sıcaklıkların üzerinde yumuşayarak şekillendirilebilen ve soğutulduğunda tekrar katılaştıran lineer veya hafif dallanmış yapıya sahip polimerlerdir. Bu özellikleri, onların yeniden işlenebilir ve geri dönüştürülebilir olmalarını sağlar. Ancak, tekrar

eden termomekanik işlem döngüleri sırasında zincir kırılması, oksidatif bozunma veya moleküler ağırlık düşüşü gibi sorunlar gözlemlenebilir. Bu durum, çekme mukavemeti, uzama, darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerde düşüşe yol açabilir.[2] En yaygın kullanılan termoplastikler arasında polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS) ve polivinil klorür (PVC) yer almaktadır.

Termoset polimerler, üretim sürecinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlarla kalıcı çapraz bağlar oluşturan ve bir kez sertleştikten sonra tekrar yumuşamayan malzemelerdir. Bu ağ yapısı, onları yüksek sıcaklık ve kimyasal ortamlara karşı dayanıklı hale getirirken, geri dönüşüm süreçlerini sınırlayıcı hale getirir. Ancak son yıllarda geliştirilen dinamik kovalent bağlar içeren yeni nesil termosetler, belirli koşullar altında yeniden işlenebilir hale gelmektedir. Özellikle Schiff bazı, ester, disülfid gibi tersinir bağlara sahip termosetlerde kapalı döngü geri dönüşüm olanaklı hale gelmiştir [3]

Elastomerler, yüksek elastikiyet ve şekil hafızasına sahip polimerler olup, uygulanan gerilme sonucu uzayıp şekil değiştirebilmekte ve gerilme kaldırıldığında eski formlarına geri dönebilmektedir. Bu özellik, elastomerlerin uzun ve düzenli olmayan makromoleküler zincir yapısından ve düşük cam geçiş sıcaklıklarından kaynaklanmaktadır. Özellikle doğal kauçuk (NR), stiren-bütadien kauçuğu (SBR), nitril bütadien kauçuğu (NBR) ve etilen-propilen-dien monomer (EPDM) gibi elastomerler, otomotivden tıbbi cihazlara kadar pek çok sektörde kullanılmaktadır. Bu malzemeler, vulkanizasyon yoluyla çapraz bağlanarak termoset özellik kazanırlar ve bu sayede yüksek sıcaklıklarda dahi elastikiyetlerini korurlar. [4]

Polimerlerin türüne bağlı olarak gösterdiği bu farklı davranışlar, geri dönüşüm stratejilerinin de her bir polimer grubu için özelleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla, malzeme mühendisliği ve çevresel etki açısından, işleme, performans ve döngüsellik kriterleri birlikte değerlendirilmeli, buna uygun çözümler geliştirilmeye devam edilmelidir.

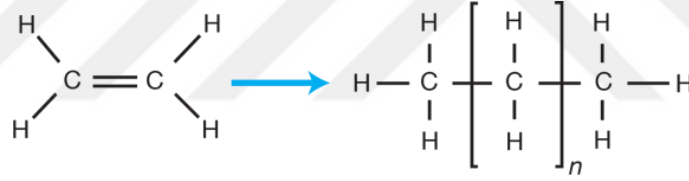
1.2 Polietilen Genel Özellikleri ve Türleri

Polietilenin laboratuvar ortamında ilk defa üretimi, Hans von Pechmann tarafından gerçekleştirilmiştir (1898). Laboratuvar çalışmaları sırasında diazometan ısıtılarak yürütülen deneyde, beyaz, mumsu bir bozunma ürünü elde etmiştir. Bu bilinmeyen malzeme üzerinde yapılan analizler, bileşiğin sadece karbon ve hidrojenden oluşan uzun zincirli bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur. Von Pechmann'ın meslektaşları Eugene Bamberger ve Friedrich

Tschirner, malzemeyi daha detaylı inceleyerek tekrarlayan CH₂ birimlerinden oluştuğunu belirlemiş ve bu yeni bileşiği "polimetilen" olarak adlandırmışlardır.

Polimetilen kavramı, teorik olarak polimer zincirinde farklı sayıda karbon atomu içerebilecek bir yapıyı ifade etse de, günümüzde bilinen polietilen (PE), yalnızca CH₂-CH₂ tekrar birimlerinden oluşmaktadır. Bu teknik farklılığa rağmen, Von Pechmann ve meslektaşlarının çalışmaları, polietilenin bilimsel literatürde belgelenmiş ilk keşfi olarak kabul edilmektedir.[5]

Polietilen, en basit haliyle, karbon atomlarının kovalent bağlarla birbirine bağlandığı uzun zincirli bir yapıya sahiptir. Her bir karbon atomuna hidrojen atomları bağlanır ve zincirin uçları metil grupları ile sonlanır. Polietilenin genel kimyasal formülü C_{2n}H_{4n+2} olup, burada n, polimerleşme derecesini ifade etmektedir. Polietilenler, moleküler ağırlıkları 1.400 ile 3.500.000 arasında değişen zincir uzunluklarına sahip olabilir. Zincir yapısındaki farklılıklar, alkil gruplarından asit ester fonksiyonel gruplarına kadar değişen dallanmalar ve vinil grubu gibi yapısal kusurlarla ortaya çıkmaktadır. Daha az kusura sahip zincirler, daha yüksek kristalliniteye sahiptir.



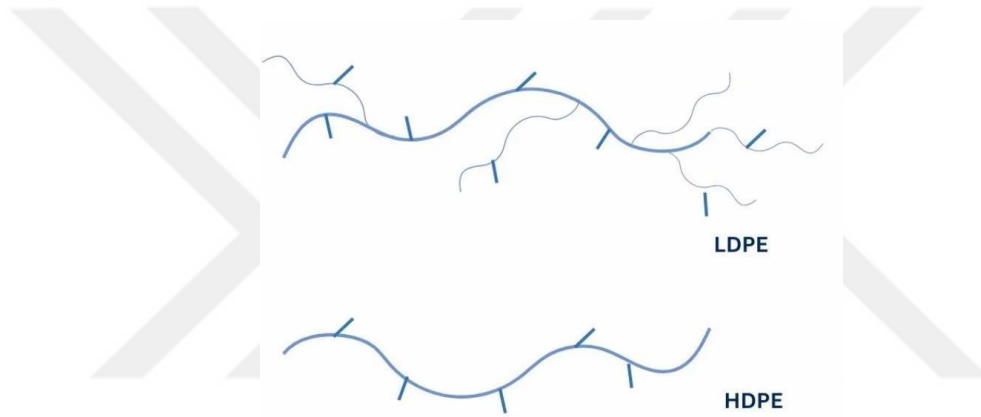
Şekil 1. 3 Polietilenin yapısı [6]

Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yoğunluğu 0,91-0,93 g/cm³ arasında değişen, yüksek oranda yan dallara sahip bir polimerdir. Bu dallanmalar, moleküllerin sıkı paketlenmesini engelleyerek daha düşük yoğunluk ve kristalliniteye neden olur. LDPE, esnek bir yapıya sahiptir ve kopmaya karşı oldukça dayanıklıdır. Şişirme ve döküm film, torba, ambalaj malzemeleri, oyuncaklar ve plastik şişeler gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. LDPE, serbest radikal polimerizasyonu ile yüksek basınç (103–345 MPa) ve yüksek sıcaklık (200–350°C) altında üretilmektedir. Polimerizasyon sürecinde oksijen veya diğer serbest radikal başlatıcılar kullanılır.

LDPE'nin yapısında dallanma miktarı arttıkça polimerin yoğunluğu azalır. Buna karşılık, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), 0,94-0,97 g/cm³ yoğunluk aralığında olup, daha az

dallanma içerdiği için yüksek kristalliniteye sahiptir. HDPE'nin bu yapısı, ona sert, opak ve yüksek mukavemetli bir karakter kazandırır. Depolama tankları, borular, rijit ambalaj malzemeleri ve darbe dayanımı gerektiren ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. HDPE, Ziegler-Natta katalizörleri gibi özel katalizörler kullanılarak düşük basınçlı polimerizasyon yöntemiyle üretilir.

Polietilenler, hem kristalin hem de amorf bölgeler içermektedir. Kristallinite derecesi arttıkça polimerin yoğunluğu da artmakta, ancak yan zincir dallanmaları kristalliniteyi azaltmaktadır. Polimer zincirlerinin uzaması ve büyümesi, etilen moleküllerinin serbest radikaller aracılığıyla yüksek basınç altında bir araya gelmesiyle gerçekleşir. Polimerizasyon sürecinin sonunda, zincir büyümesi çeşitli mekanizmalarla sonlanır ve nihai ürün ortaya çıkar.[7]



Şekil 1. 4 Yoğunluklarına göre Polietilen dallanmaları gösterimi

Tablo 1. 1 Yoğunluklarına göre Polietilen sınıflandırılmaları[6]

Polimer Adı	Kısaltması	Yoğunluk (g/cm ³)
Düşük yoğunluklu polietilen	LDPE	0,915-0,925
Yüksek yoğunluklu polietilen	HDPE	0,940-0,965
Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen	LLDPE	0,915-0,940
Orta yüksek yoğunluklu polietilen	MDPE	0,925-0,940
Yüksek molekül ağırlıklı polietilen	HDPE	0,940-0,962

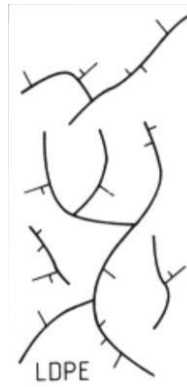
1.2.1 Alçak Yoğunluklu Polietilen (LDPE)

Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), serbest radikal polimerizasyon yöntemiyle üretilen, yüksek dallanma yapısına sahip bir termoplastiktir. Üretiminde yüksek basınç (103.000–344.000 kPa) ve sıcaklık (125–250 °C) kullanılır ve bu koşullar altında etilen, hem reaktif gaz hem de çözücü olarak görev yapar. Bu üretim tekniği, polimer zincirlerinde rastgele dallanmaların oluşmasına neden olur. Bu nedenle LDPE, düşük kristallilik ve yoğunluk (yaklaşık 0.91–0.93 g/cm³) gibi özellikler sergiler.

Yüksek dallanma oranı, LDPE'nin mekanik özelliklerini etkiler; bu malzeme nispeten düşük çekme mukavemeti ve yüksek uzama oranlarına sahiptir. Ayrıca düşük erime sıcaklığı (yaklaşık 105 °C), kolay işlenebilirlik sağlar. Yüksek esneklik ve düşük yoğunluk özellikleri sayesinde, özellikle esnek ambalaj filmleri, taşıma torbaları ve kaplama uygulamaları gibi birçok ambalaj alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

LDPE'nin gaz bariyer özelliği zayıf olmasına rağmen, su buharı geçirgenliğine karşı iyi bir direnç göstermesi onu nem hassasiyeti yüksek ürünlerin ambalajında tercih edilen bir malzeme yapar. Bununla birlikte, düşük yüzey enerjisi nedeniyle baskı ve yapıştırıcı uygulamalarında yüzey işleme (örneğin korona veya alev işlemi) gerektirir.[8]

LDPE'nin kimyasal yapısı, Şekil 1.5'te sunulmuş olup, malzemenin temel özelliklerini ve moleküler düzenini ortaya koymaktadır.



Şekil 1. 5 AYPE Dallanma Yapısı

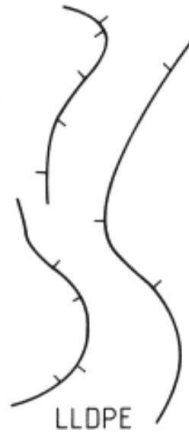
1.2.2 Lineer Alçak Yoğunluklu Polietilen (LLDPE)

Lineer Düşük Yoğunluklu Polietilen (LLDPE), polietilen türlerinden biri olup, doğrusal yapısı ve kısa zincir dallanmaları ile dikkat çeker. İlk olarak 1960'larda geliştirilen bu malzeme, Ziegler-Natta veya metallocene katalizörleri kullanılarak üretilen etilen ve 1-alkenlerin kopolimerizasyonu ile elde edilir.

LLDPE, geleneksel Düşük Yoğunluklu Polietilen'e (LDPE) kıyasla daha yüksek mekanik dayanım ve darbe direnci sunar. Yapısındaki düşük seviyeli dallanmalar nedeniyle daha sıkı paketlenmiş bir moleküler yapı gösterir ve bu sayede yüksek çekme mukavemeti, delinme direnci ve yırtılma dayanımı sağlar. LDPE'den farklı olarak, LLDPE yüksek basınçlı polimerizasyon yerine düşük basınçlı katalizör sistemleriyle sentezlenir, bu da üretim sürecinde enerji verimliliğini artırır.

Bu polimer, esnekliği, iyi işlenebilirliği ve yüksek darbe direnci nedeniyle özellikle film üretimi, gıda ambalajları, plastik torbalar, streç filmler, boru sistemleri ve kablo kaplamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle ambalaj sektöründe, yüksek dayanıklılığı ve delinmeye karşı direnci sayesinde tercih edilmektedir. Şekil 1.6 da Doğrusal alçak yoğunluklu polietilen dallanma yapısı görülmektedir.

LLDPE'nin avantajları arasında düşük sıcaklıklarda esnekliğini koruması, iyi optik özellikler sergilemesi ve yüksek kimyasal dirence sahip olması bulunur. Ancak, LDPE'ye kıyasla işlenebilirliği daha zordur ve yüksek sıcaklıklarda şekil stabilitesi daha düşüktür. Metallocene bazlı LLDPE türleri, daha dar moleküler ağırlık dağılımı ve gelişmiş mekanik özellikler sunarak ambalaj sektöründeki uygulamaları için önemli bir seçenek haline gelmiştir.[6]



Şekil 1. 6 Lineer Alçak Yoğunluklu Polietilen Dallanma Yapısı

1.2.3 Orta Yoğunluklu Polietilen (MDPE)

Medium-Density Polyethylene (MDPE), genellikle düşük yoğunluklu polietilene (LDPE) kıyasla daha fazla mukavemet veya sertlik gerektiren uygulamalarda tercih edilir. MDPE, LDPE'ye göre daha az ve daha kısa yan dallara sahiptir. Bu nedenle, MDPE'nin yoğunluğu genellikle $0,925 \text{ g/cm}^3$ ile $0,940 \text{ g/cm}^3$ arasında değişirken, kristallenme oranı ise %55 ile %75 arasında değişmektedir.

LDPE'ye kıyasla daha sert olan MDPE, 0.69 ila 0.90 GPa arasında değişen bir eğilme modülüne ve 52 ila 56 arasında bir Shore D sertlik değerine sahiptir. MDPE'nin, çevresel gerilme çatlamasına karşı direnci (ESCR) LDPE'ye göre oldukça iyidir ve genellikle %10 Igepal çözeltisinde 1000 saat veya daha uzun süre dayanabilmektedir.

Genellikle enjeksiyon kalıplama için formüle edilen MDPE'nin eriyik indeksi 1 ile 20 arasında değişebilir. LDPE'ye kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda kalıplanabilen MDPE, tamamen yoğunlaşarak yüzey kusurlarını en aza indirir ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ile kıyaslandığında daha düşük gözeneklilik gösterir. Rotasyonel kalıplama yöntemiyle üretilen MDPE parçalar ise genellikle mat bir yüzeye sahiptir. [9]

1.2.4 Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), doğrusal polietilen veya düşük basınçlı polietilen olarak da adlandırılan, çok katmanlı esnek ambalaj uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir polimerdir. HDPE'nin tercih edilmesinin temel sebeplerinden biri, çevresel gerilme çatlamasına karşı gösterdiği yüksek dirençtir. Bu özelliği sayesinde, özellikle mekanik gerilmeye maruz kalan ambalaj malzemelerinde uzun ömürlü performans sağlamaktadır. HDPE, %10 Igepal çözeltisinde 1000 saatten fazla dayanabilme kapasitesine sahip olup, geniş bir sıcaklık aralığında yüksek sertlik ve mukavemet sergilemektedir. Malzemenin eğilme modülü 0.93 ila 1.52 GPa arasında değişirken, Shore D sertlik değeri 60 ila 66 arasında ölçülmektedir.

HDPE, lineer bir polimer yapısına sahip olmasına rağmen, kısa zincirli bazı dallanmalar içermektedir. Ancak, zincir yapısındaki yüksek hareketlilik ve doğrusal yapı nedeniyle, teorik olarak %75 ila %90 arasında kristallenme oranına ulaşabilmektedir. HDPE'nin kristal yapısı büyük oranda sferulitik karakterde olup, oluşan kristalitlerin çapı genellikle 50 mikron veya daha büyük ölçülmektedir. Bu kristallerin boyutu görünür ışığın dalga boyundan (0.4 ila 0.7 mikron) daha büyük olduğu için, HDPE tipik olarak yarı saydam ve opak bir görünüme sahiptir. Kristal faz, amorf faza göre daha düzenli ve sıkı bir paketlenme sergilediğinden, HDPE'nin

yoğunluğu genellikle $0,960 \text{ g/cm}^3$ seviyesinde ölçülmektedir. Bu değer, teorik olarak mümkün olan 1 g/cm^3 seviyesine yaklaşmakta olup, malzemenin yoğunluk ve kristallenme dengesi açısından stabil bir yapı sunduğunu göstermektedir.[9]

1.3 Polietilenin Esnek Ambalaj Uygulamalarındaki Yeri

Polietilen (PE), esnek ambalaj sektöründe yaygın olarak kullanılan bir polimer olup, farklı yoğunluk seviyelerine sahip türleri mevcuttur. Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), bu grupta en esnek ve işlenebilir olanlardan biridir. Dallanmış yapısı nedeniyle düşük kristallenme oranına sahip olan LDPE, yüksek darbe dayanımı, iyi optik özellikler ve düşük erime noktası gibi avantajlar sunar. Bu özellikleri sayesinde özellikle termal yapışma gerektiren ambalajlarda, gıda paketlenme filmlerinde, taşıma torbalarında ve büzüşmeli (shrink) filmlerde tercih edilmektedir.

LDPE'nin en büyük avantajlarından biri, yüksek işlenebilirliği ve ısı ile kaynak olabilme özelliğidir. Düşük yoğunluklu ve amorf yapısı, onu çok katmanlı esnek ambalaj yapılarında iç katman olarak ideal bir malzeme haline getirmektedir. Ayrıca, düşük viskozitesi sayesinde ekstrüzyon kaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek uzama kabiliyeti ve esneklik sağlayan yapısı, mekanik dayanıklılığın artırılmasına katkı sunmaktadır.



Şekil 1. 7 Polietilen Kullanılarak Üretilmiş Film Ruloları

LDPE bazlı filmler genellikle düşük sıcaklıklarda sızdırmazlık sağlayarak hızlı paketlenme hatlarında avantaj oluşturur. Hafif ve esnek bir malzeme olması nedeniyle laminasyon veya ko-

ekstrüzyon teknikleri ile diğer polimerlerle birleştirilerek çok katmanlı esnek ambalaj yapılarında kullanılmaktadır. Ancak gaz ve nem bariyer özellikleri yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve etilen vinil alkol (EVOH) gibi polimerlere kıyasla daha zayıf olduğundan, genellikle bariyer malzemeleriyle birlikte kullanılmaktadır.



Şekil 1. 81 Polietilen Film kullanılarak üretilmiş Çocuk Bezi Torbası Görüntüsü

LDPE, esnek ambalaj uygulamalarında dayanıklılığı, kolay işlenebilirliği ve termal yapışma özellikleri sayesinde önemli bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Ancak, gaz ve aroma bariyeri sağlama konusunda sınırlı özelliklere sahip olması nedeniyle, genellikle çok katmanlı yapılar içinde tamamlayıcı bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Bu malzemenin yeni işleme teknikleri ve modifikasyon yöntemleri ile daha fonksiyonel hale getirilmesi, sürdürülebilir ambalaj çözümlerinde kullanım alanlarının genişletilmesini sağlayacaktır. [10]

1.4 Çok Katmanlı Esnek Ambalaj Film Üretim Yöntemleri

Çok katmanlı esnek ambalaj filmleri, farklı polimer türlerinin bir araya getirilerek oluşturduğu yapılar olup, bariyer özellikleri, mekanik dayanıklılık ve işlenebilirlik açısından çeşitli avantajlar sunar. Bu filmler, birden fazla katmanın belirli fonksiyonları yerine getirmesi için tasarlanır ve genellikle ko-ekstrüzyon veya laminasyon teknikleri kullanılarak üretilir. Üretim

yönteminin seçimi, hedeflenen uygulamaya ve malzeme özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. [10].

1.4.1 Ko-Ekstrüzyon Yöntemi

Ko-ekstrüzyon, farklı polimerlerin eriyik halinde birleştirilerek çok katmanlı bir yapı oluşturulmasını sağlayan bir üretim tekniğidir. Bu yöntemde, her bir polimer katmanı belirli bir işlevi yerine getirmek üzere seçilir. Örneğin, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) esneklik ve yapışma özellikleri sunarken, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) mukavemet ve kimyasal direnç sağlar. Gaz bariyeri gerektiren ambalajlarda ise etilen-vinil alkol (EVOH) veya poliamid (PA) gibi malzemeler tercih edilir.

Ko-ekstrüzyon sistemleri genellikle besleme bloğu (feedblock) ve çok katmanlı kalıplar (multicavity dies) gibi ekipmanlarla çalışır. İki temel ko-ekstrüzyon yöntemi vardır:

Blown Film (Şişirme Film) Ekstrüzyonu: Eritilmiş polimer, halkasal bir kalıptan geçirilerek hava yardımıyla genişletilir ve bir film oluşturulur. Esnek ambalaj üretiminde yaygın olarak kullanılan bu yöntem, polimerin iki yönde gerilerek mukavemetinin artırılmasını sağlar.

Cast Film (Döküm Film) Ekstrüzyonu: Eritilmiş polimer, düz bir kalıptan geçirilerek soğutulmuş bir çelik silindir üzerine dökülür ve hızlıca soğutulur. Daha düzgün yüzey kalitesi sunan bu yöntem, özellikle yüksek şeffaflık ve baskı kalitesi gerektiren ambalaj uygulamalarında kullanılır. [10].

1.4.2 Laminasyon Yöntemi

Laminasyon, farklı polimer katmanlarının yapıştırıcılar, sıcaklık veya basınç yardımıyla birleştirilmesi esasına dayanır. Termal laminasyon veya solvent bazlı laminasyon teknikleri kullanılarak üretilen çok katmanlı filmler, özellikle yüksek bariyer özellikleri sağlamak amacıyla tercih edilir. Bu yöntemde, katmanlar ayrı ayrı üretilir ve daha sonra lamine edilir.

Laminasyonun avantajları arasında farklı malzemelerin kombinasyonuna izin vermesi, yüksek optik kalite sunması ve bariyer özelliklerinin artırılması bulunmaktadır. Ancak, ko-ekstrüzyona kıyasla daha fazla işlem gerektirdiği için üretim süreci daha uzun olabilir. [10].

1.4.3 Ekstrüzyon ile Kaplama ve Ekstrüzyon Laminasyonu

Ekstrüzyon ile kaplama ve Ekstrüzyon Laminasyonu, bir substrat üzerine ince bir polimer katmanı kaplamak amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, genellikle kağıt, alüminyum

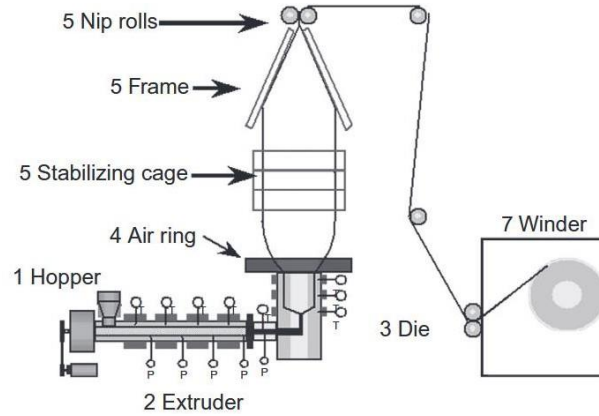
folyo veya plastik filmlerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Kaplama sırasında, eriyik polimer ince bir tabaka halinde substratın yüzeyine uygulanır ve hızlıca soğutulularak stabil hale getirilir. [10].

Bu yöntemin temel avantajları arasında daha düşük malzeme tüketimi, iyi mekanik dayanım ve çeşitli substratlarla uyumluluk bulunur. Özellikle gıda ambalajlarında nem ve yağ bariyeri sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılır. [10].

1.4.4 Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Ko-ekstrüzyon ve laminasyon teknikleri arasında seçim yaparken, maliyet, üretim hızı, malzeme uyumluluğu ve son ürün özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Ko-ekstrüzyon, yüksek üretim hızları ve katmanlar arası güçlü bağlanma avantajı sağlarken, laminasyon, farklı malzemeleri birleştirme esnekliği sunar. Ekstrüzyon kaplama ise daha ince ve homojen kaplamalar elde etmek için tercih edilir.

Sonuç olarak, çok katmanlı esnek ambalaj filmlerinin üretiminde malzeme seçimi ve işleme teknikleri, nihai ürünün performansını belirleyen en önemli faktörlerdir. Gelişen üretim teknolojileri ve polimer modifikasyon yöntemleri, bu sistemlerin daha fonksiyonel ve sürdürülebilir ambalaj çözümlerine uyarlanmasını sağlamaktadır.[10].



Şekil 1. 92 Blown Film Ekstrüzyon şeması [10]

1.5 Polietilen Esnek Ambalajlarının Geri Dönüştürülmesi

Polietilen esnek ambalajların geri dönüştürülmesi, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de hammadde kullanımının optimize edilmesi açısından önemli bir konudur. Avrupa'da plastik

tüketimi her geçen yıl artarken, geri dönüşüm süreçlerinin etkinliği konusunda çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Polietilen, düşük yoğunluklu (LDPE) ve yüksek yoğunluklu (HDPE) formlarıyla esnek ambalaj üretiminde yaygın olarak kullanılan bir polimerdir. Ancak, tüketici sonrası plastik atıkların yalnızca küçük bir kısmı mekanik veya kimyasal geri dönüşüm yoluyla geri kazanılabilmekte, büyük bir bölümü enerji geri kazanımı amacıyla yakılmakta ya da atık sahalarına yönlendirilmektedir.

Mekanik geri dönüşüm, polimerlerin fiziksel işlemlerle yeniden hammadde haline getirilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu süreç; öğütme, yıkama, ayırma, kurutma, yeniden granülasyon ve bileşik hale getirme gibi aşamalardan oluşmaktadır. Mekanik geri dönüşümün en büyük kısıtlarından biri, farklı polimer türlerinin genellikle birbirleriyle tam uyumlu olmamasıdır. Bu durum, geri dönüştürülen polimerlerin mekanik özelliklerinin saf hammaddelere kıyasla daha düşük olmasına yol açmaktadır. Örneğin, polietilen ve polipropilen karışımları, mekanik geri dönüşüm sırasında ayrıştırılmadığında, malzemenin mukavemeti ve işlenebilirliği olumsuz etkilenebilmektedir. [11].

Kimyasal geri dönüşüm, polimerlerin moleküler yapısının bozulmasını sağlayarak yeni petrokimyasallar veya polimer hammaddeleri üretmeyi amaçlayan daha ileri bir yöntemdir. Ancak, bu yöntemin yüksek maliyetleri ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğinin sınırlı olması nedeniyle, polietilen bazlı ambalaj atıklarının geri dönüşümünde henüz yaygın olarak tercih edilmemektedir.

Polietilen ambalajların geri dönüşüm süreçlerindeki en büyük zorluklardan biri de malzeme saflığının korunmasıdır. Tüketici sonrası plastik atıkların bileşiminde solvent kalıntıları, katkı maddeleri ve diğer plastik türleri gibi kirleticiler bulunabilmekte ve bu durum geri dönüştürülen polimerlerin kalitesini düşürebilmektedir. Bu nedenle, polietilen bazlı ambalajların geri dönüşüm sürecini daha verimli hale getirmek için çeşitli iyileştirme stratejileri geliştirilmektedir. Bunlar arasında polimer karışımlarını homojen hale getirmek için uyumlulaştırıcıların kullanımı, stabilizatör ve güçlendirici katkıların eklenmesi gibi yöntemler yer almaktadır.

Geri dönüştürülmüş polietilenin endüstriyel kullanımı, malzeme özelliklerinin detaylı olarak analiz edilmesine ve belirli kalite standartlarının sağlanmasına bağlıdır. Yapılan araştırmalar, geri dönüştürülen polietilenin saf malzemelerle belirli oranlarda harmanlanarak

kullanılabileceğini ve mekanik özelliklerin belirli limitler içinde korunabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, geri dönüşüm süreçlerinin daha geniş çapta benimsenmesi için üreticilerin ikincil hammaddelerin saflığı ve işlenebilirliği konusunda daha fazla bilgiye erişmesi gerekmektedir. Geri dönüştürülmüş polimerlerin üretim süreçlerine entegrasyonu, yalnızca plastik atık miktarının azaltılmasına katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda dögüsel ekonomi hedeflerine ulaşılması açısından da kritik bir rol oynayacaktır. [12]



BÖLÜM 2. MATERYAL ve YÖNTEM

Deneyisel çalışma kapsamında, biri atık polietilen içermeyen saf PE referans filmi olmak üzere toplam yedi farklı çok katmanlı film yapısı üretilmiştir. Geri dönüştürülmüş içeriğe sahip filmler, Post-Industrial Recycled (PIR) ve Post-Consumer Recycled (PCR) olmak üzere iki farklı geri dönüşüm kaynağından elde edilen polietilen malzemeleri içermektedir. PIR içeren filmler, üretim süreçlerinden kaynaklanan endüstriyel atıklardan elde edilen geri dönüştürülmüş PE ile hazırlanmış olup, %15, %35 ve %50 oranlarında geri dönüştürülmüş içerik içerecek şekilde formüle edilmiştir. Benzer şekilde, PCR içeren filmler, tüketici sonrası atıklardan geri kazanılan PE bazlı malzemeler kullanılarak aynı oranlarda (%15, %35 ve %50) üretilmiştir.

2.1. Kullanılan Malzemeler ve Kompozisyonları

2.1.1 Numune Üretimi

Bu çalışmada, çok katmanlı esnek ambalaj filmlerinin üretimi için şişirme (blown film) ekstrüzyon yöntemi kullanılmıştır. Üretilen filmler, toplamda 45 mikron kalınlığa sahip olacak şekilde tasarlanmış ve yedi farklı formülasyon ile üretilmiştir. Numunelerin üretiminde saf polietilen (PE) ile farklı oranlarda geri dönüştürülmüş polietilen içeren formülasyonlar kullanılmıştır.

Numunelerin oluşturulmasında, geri dönüştürülmüş polietilen iki farklı kaynaktan elde edilmiştir:

Post-Industrial Recycled (PIR) PE: Endüstriyel üretim süreçlerinden kaynaklanan geri dönüştürülmüş polietilen.

Post-Consumer Recycled (PCR) PE: Tüketici sonrası atıklardan elde edilen geri dönüştürülmüş polietilen.

Tablo 2. 1 Test Numune İçerikleri

Film numune No:	Geri Dönüştürülmüş Malzeme Türü	Ağırlıkça Geri Dönüştürülmüş Malzeme Oranı %
Numune 1	Yok	% 0
Numune 2	PIR	% 15
Numune 3	PIR	% 35
Numune 4	PIR	% 50
Numune 5	PCR	% 15
Numune 6	PCR	% 35
Numune 7	PCR	% 50

2.1.2 Numune Kompozisyonları

Numuneler, 45 mikron kalınlığında, üç katmanlı beyaz film yapısında olacak şekilde Kiefel marka şişirme ekstrüder kullanılarak üretilmiştir. Şişirme (blown film) ekstrüzyon yöntemi ile gerçekleştirilen üretimde, polimer hammadde eritilip ekstrüzyon kafasından geçirilmiş, hava ile genişletilerek film formu oluşturulmuş ve kontrollü şekilde soğutulmuştur. Üç katmanlı yapının her biri belirli mekanik ve optik özellikleri sağlamak üzere tasarlanmış olup, yedi farklı formülasyon hazırlanmıştır. Saf PE referans filmi, PIR içeren filmler (% 15, % 35, % 50) ve PCR içeren filmler (% 15, % 35, % 50) olmak üzere toplam yedi farklı numune üretilmiş ve homojen kalınlık kontrolü sağlanarak çok katmanlı yapıların geri dönüştürülmüş malzeme içeriğine bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir.



Şekil 2. 1 Blown Ekstrüder

2.1.2.1 Referans Numune (Saf Polietilen) Kompozisyonu

Tablo 2. 2 Numune 1 Kompozisyonu

Ekstruder (A) %25	Ekstrüder (B) %50	Ekstrüder (C) %25
1/ LDPE 1/ LLDPE	%3 White Masterbatch 1/ LDPE	1/ LDPE 1/ LLDPE

2.1.2.2 Ağırlıkça %15 PIR içeren Numune Kompozisyonu

Tablo 2. 3 Numune 2 Kompozisyonu

Ekstruder (A) %25	Ekstrüder (B) %50	Ekstrüder (C) %25
1/ LDPE 1/ LLDPE	%3 White Masterbatch 7/ LDPE 3/ PIR (PE)	1/ LDPE 1/ LLDPE

2.1.2.3 Ağırlıkça %35 PIR içeren Numune Kompozisyonu

Tablo 2. 4 Numune 3 Kompozisyonu

Ekstruder (A) %25	Ekstruder (B) %50	Ekstruder (C) %25
1/ LDPE 1/ LLDPE	%3 White Masterbatch 3/ LDPE 7/ PIR (PE)	1/ LDPE 1/ LLDPE

2.1.2.4 Ağırlıkça %50 PIR içeren Numune Kompozisyonu

Tablo 2. 5 Numune 4 Kompozisyonu

Ekstruder (A) %25	Ekstruder (B) %50	Ekstruder (C) %25
1/ LDPE 1/ LLDPE	%3 White Masterbatch 1/ PIR (PE)	1/ LDPE 1/ LLDPE

2.1.2.5 Ağırlıkça %15 PCR içeren Numune Kompozisyonu

Tablo 2. 6 Numune 5 Kompozisyonu

Ekstruder (A) %25	Ekstruder (B) %50	Ekstruder (C) %25
1/ LDPE 1/ LLDPE	%3 White Masterbatch 4,3/ PCR (PE) 5,7/ LDPE	1/ LDPE 1/ LLDPE

2.1.2.6 Ağırlıkça %35 PCR içeren Numune Kompozisyonu

Tablo 2. 7 Numune 6 Kompozisyonu

Ekstruder (A) %25	Ekstruder (B) %50	Ekstruder (C) %25
1/ LDPE 1/ LLDPE	%3 White Masterbatch 1/ PCR	1/ LDPE 1/ LLDPE

2.1.2.7 Ağırlıkça %50 PCR içeren Numune Kompozisyonu

Tablo 2. 8 Numune 7 Kompozisyonu

Ekstruder (A) %15	Ekstruder (B) %70	Ekstruder (C) %15
1/ LDPE 1/ LLDPE	%3 White Masterbatch 1/ PCR	1/ LDPE 1/ LLDPE

Bu numune reçeteleri doğrultusunda üretilen çok katmanlı filmler, geri dönüştürülmüş polietilenin farklı oranlardaki etkilerini değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Numune reçeteleri tasarlanırken geri dönüştürülmüş hammadde kullanımını sadece ekstruderin orta vidası ile sınırlandırılmış, bunun numuneler üzerindeki doğal sonuçları da testler yolu ile gözlemlenip değerlendirilmiştir. Üretim sürecinde tüm formülasyonlar için homojen kalınlık ve katman dağılımı sağlanmış olup, elde edilen numuneler karakterizasyon testlerine tabi tutulmuştur.

2.1.3 SAF Polietilen Malzemelerin karakteristik özellikleri

Çok katmanlı filmlerin üretimlerinde Dow ve Exxonmobil firmalarına ait LDPE ve LLDPE malzemeler kullanılmıştır. Liste Tablo 2.9 da verilmiştir . Tablo 2.10 ve 2.11 de malzemelerin karakteristik özellikleri listelenmiştir.

Tablo 2. 9 PE Malzemelerin Ticari Sınıfı

Hammadde	Ticari sınıfı
LDPE	312 E
LLDPE	2108 MB

Tablo 2. 10 312 E malzemesinin karakteristik özellikleri

ÖZELLİKLER	DEĞER	BİRİM	METOT
Yoğunluk	0,924	g/cm ³	ASTM D792
Ergime Akış İndeksi	0,75	g/10dak	ASTM D1238
Çekme Dayanımı	25	MPa	ASTM D882
Secant Modülü	175	MPa	ASTM D882
Kopma Uzaması	570	%	ASTM D882
Yırtılma Kuvveti	350	g	ASTM D1922
Ekstrüzyon İşleme Sıcaklığı	160-195	°C	-
Parlaklık (45°, 50.0 µm Blown Film)	58	-	ASTM D2457
Puşluluk (50 µm Blown Film)	9,2	%	ASTM D1003
Delinme Kuvveti (50 µm Blown Film)	50	N	Dow Method

Katkı içeriği: Antiblock: 900 ppm Slip: 385 ppm

Tablo 2. 11 2018 MB malzemesinin karakteristik özellikleri

ÖZELLİKLER	DEĞER	BİRİM	METOT
Yoğunluk	0,918	g/cm ³	ASTM D792
Ergime Akış İndeksi	2	g/10dak	ASTM D1238
Çekme Dayanımı	49,9	MPa	ASTM D882
Secant Modülü	177	MPa	ASTM D882
Kopma Uzaması	560	%	ASTM D882
Yırtılma Kuvveti	330	g	ASTM D1922
Ekstrüzyon İşleme Sıcaklığı	170-200	°C	-
Parlaklık (45°, 50.0 µm Blown Film)	20	-	ASTM D2457
Puşluluk (50 µm Blown Film)	14	%	ASTM D1003
Delinme Kuvveti (50 µm Blown Film)	35	N	Dow Method

2.1.4 PCR (Post Consumer Recycled) PE

PCR içeren filmlerin üretiminde, tüketici sonrası geri dönüştürülmüş (Post-Consumer Recycled - PCR) polietilen kullanılmış olup, bu çalışmada Ravapura C70 ticari sınıfı tercih edilmiştir. Ravapura, Ravago'nun sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamak amacıyla geliştirdiği, yüksek kaliteli ve sertifikalı PCR içeriğine sahip geri dönüştürülmüş bileşiklerden oluşan bir ürün grubudur. Bu malzemeler, geri dönüştürülmüş polimerlerin özenle seçilmesi ve işlenmesiyle elde edilerek, işlenebilirlik, mekanik performans ve estetik görünüm açısından tutarlı bir kalite sunar.

Ravago, 1961 yılında Raf Van Gorp tarafından kurulmuş olup, plastik geri dönüşümü ve formülasyon teknolojileri alanında öncü çalışmalar gerçekleştirmiştir. Şirketin plastik bileşikler konusundaki uzmanlığı sayesinde, geri dönüştürülmüş ve birincil polimerlerin uygun kombinasyonlarıyla yüksek performanslı Ravapura ürünleri geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, çalışmada kullanılan Ravapura C70'in, PCR/Saf PE oranı 70/30 olup, sürdürülebilirlikten ödün vermeden geri dönüştürülmüş polietilenin mekanik ve işleme özelliklerini optimize etmek için özel olarak formüle edilmiştir.

Ravapura C70'in temel fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2. 12 de verilmiştir.[13]



Şekil 2. 2 PCR Ravapura C70 Granül haldeki görüntüsü

Tablo 2. 12 Ravapura C70 karakteristik özellikleri

ÖZELLİKLER	DEĞER	BİRİM	METOT
Yoğunluk	0,923	g/cm ³	ISO 1133
MFI	0,7	g/10dak	ISO 1183
Kül Miktarı	<1	%	ISO 3451
Çekme Kuvveti	22/24	MPa	ISO 527-3
Kopma Uzaması	500	MPa	ISO 527-3
Dart Drop	140	g	ISO 7765-1
Elmendorf Dayanımı	250	g	ISO 6383-2

2.1.5 PIR (Post Industrial Recycled) PE

Üretim süreçlerinde oluşan plastik atıkların yeniden işlenmesi, malzeme verimliliğini artırırken çevresel sürdürülebilirliğe de katkı sağlar. Üretim içi geri dönüşüm (Post-Industrial Recycled, PIR) malzemeleri, yeni üretim süreçlerine dahil edilerek hammadde tüketimi azaltılabilir. Bu çalışmada, saf PE filminin üretimi sırasında oluşan atıklardan PIR elde edilmiş ve bu geri kazanılmış malzeme, %25 LDPE ve %75 LLDPE içeriğiyle yeni filmler üretmek için kullanılmıştır. PIR içeren filmin mekanik ve optik özelliklere etkisini değerlendirmek amacıyla çok katmanlı esnek ambalaj filmleri üretilmiş ve karakterize edilmiştir.



Şekil 2. 3 Üretim firesinden elde edilmiş PIR (PE)

2.2 PIR Granüllerinin Hazırlanması

Plastik üretim süreçlerinde kaçınılmaz olarak ortaya çıkan fireler, kenar kesim atıkları ve hatalı bobinler, geri kazanım yoluyla yeniden değerlendirilebilir. Bu çalışmada, saf PE filmlerinin üretimi sırasında oluşan atıklar ayrıştırılmış ve tekrar işlenmek üzere geri dönüşüm sürecine dahil edilmiştir. Geri dönüşüm işlemi, tek vidalı ekstruder kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

İlk aşamada, üretim hattından toplanan film atıkları, işlem öncesinde fiziksel olarak daha küçük parçalara ayrılmak üzere ön öğütme işlemine tabi tutulmuştur. 100-105°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen bu işlem, malzemenin homojenliğini artırarak ekstrüzyon sürecinin daha verimli ilerlemesini sağlamıştır. Ardından, ön işleme tabi tutulan parçacıklar, yedi farklı ısıtma bölgesine sahip ekstrudere beslenmiş ve burada 120-200°C sıcaklık aralığında, 240 rpm vida hızıyla eritilmiştir.



Şekil 2. 4 PE atıklarının öğütülmesi

Eriyik hale getirilen malzeme, ekstruder çıkışında ince kanallardan geçirilerek spagetti formunda dışarı alınmış ve kesici bıçaklar yardımıyla granüllere dönüştürülmüştür. Elde edilen

granüller, 24°C sıcaklıktaki su banyosunda hızlı bir şekilde soğutulmuş, ardından titreşimli eleklerden geçirilerek belirli bir boyut aralığında sınıflandırılmıştır. Son aşamada, kurutucu



Şekil 2. 5 Öğütülme sonrası görüntü

ünitelerde nemi giderilen granüller, 25 kg'lık torbalara doldurularak depolanmış ve sonraki üretim süreçlerinde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir.

Bu yöntemle geri kazanılan PIR malzemesi, %25 LDPE ve %75 LLDPE oranlarında formüle edilerek yeni çok katmanlı esnek ambalaj filmlerinin üretiminde kullanılmıştır. Bu süreç, hem üretim verimliliğini artırmak hem de sürdürülebilir malzeme yönetimini desteklemek açısından önemli bir uygulamadır.



Şekil 2. 6 Kovan görüntüsü

Besleme işleminin ardından, ekstrudere girişten önce kırılmış filmler, daha küçük boyutlara getirilerek işlenebilirliğin artırılması amacıyla Erema makinesinin ön öğütücü ünitesinde 104°C sıcaklıkta ön işleme tabi tutulmuştur. Bu aşamada atık filmler homojen bir şekilde karıştırılarak daha küçük parçalara ayrılmıştır. Şekil 2.4'te, atık filmlerin parçalanarak küçültüldüğü süreç gösterilmektedir. Şekil 2.6 ise ekstruderin kovasının dış görünümünü sunmaktadır.



Şekil 2. 7 Granül kurutma bölümü

2.3 Numunelere Uygulanan Testler

2.3.1 Parlaklık Oranı

Parlaklık testi, ASTM D2457 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve numunelerin yüzey özelliklerini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Parlaklık, hem opak hem de şeffaf filmlerin yüzeyinden yansıyan ışığın ölçülmesiyle belirlenir. Ölçüm işlemi, toplam dört farklı aydınlatma açısı (20°, 45°, 60° ve 75°) ile gerçekleştirilebilmekte olup, kullanılan açılar filmin parlaklık derecesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yüksek parlaklığa sahip filmler için 20°, daha mat ve opak filmler için ise 75° açısı tercih edilmektedir.

Test sırasında, numuneler kırışıklık oluşmayacak şekilde düz bir yüzeye serilmiş ve 60° ölçüm açısı kullanılarak parlaklık değerleri belirlenmiştir. Test cihazı, numune yüzeyine belirlenen

açıda ışık göndererek yansıyan miktarı ölçmüş ve sonuçlar parlaklık birimi olan GU (Gloss Unit – Parlaklık birimi) cinsinden kaydedilmiştir. Bu yöntem, esnek ambalaj filmlerinin optik performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan standart bir test prosedürüdür.[14]



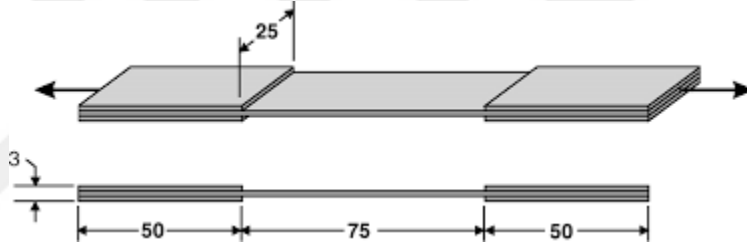
Şekil 2. 8 Parlaklık ölçüm cihazı

2.3.2 Çekme Testi

Plastik malzemelerin mekanik davranışlarını değerlendirmek için en yaygın kullanılan testlerden biridir ve esnek ambalaj filmlerinin mekanik dayanımını belirlemek amacıyla uygulanmıştır. Test, ISO 527 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş olup, Zwick marka ZwickiLine modeline göre, numuneler 25 mm x 150 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Çekme testinde, malzeme 500 mm/dak hızında bir gerilime maruz bırakılmış ve başlangıç pozisyonu 50 mm olarak ayarlanmıştır. Test sırasında, numuneler test cihazının çenelerine bağlanarak belirlenen ön yük (0,1 N) altında sabitlenmiş ve oda sıcaklığında kontrollü bir şekilde çekme kuvvetine maruz bırakılmıştır. Gerilim altında numunenin mekanik özellikleri kaydedilerek, malzemenin kopma noktası, elastikiyet modülü ve maksimum uzama gibi parametreler değerlendirilmiştir. Bu yöntem, esnek ambalaj filmlerinin mekanik performansını belirlemek için yaygın olarak kullanılan standart bir test prosedürüdür.



Şekil 2. 9 Uzama – Kopma Test Cihazı



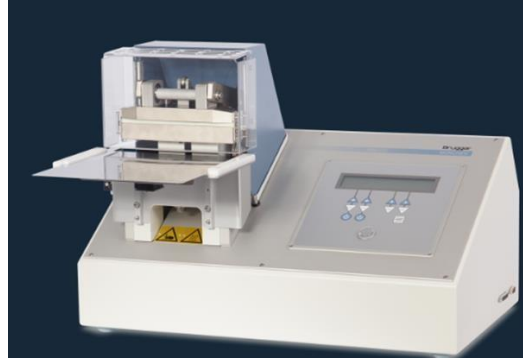
Şekil 2. 10 Numune Hazırlama ölçüleri [15]

2.3.3 Kaynak Kuvveti Testi

Isı ile birbirine kaynak edilmiş malzemelerin birbirinden ayrılması için gereken kuvvetin belirlenmesi amacıyla uygulanmış olup, ASTM F88 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test, Zwick marka ZwickyLine kaynak kuvveti test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Numuneler, 25,4 mm x 76 mm boyutlarında kesilerek cihaza yerleştirilmiştir.

Bu test yöntemi, malzemeler üzerinde ölçülen kuvvetin yalnızca kaynak mukavemetine değil, aynı zamanda bükülme bileşenine de bağlı olabileceğini dikkate alır. Bu nedenle, çekme yönüne göre farklı açılarda test yapılmasını sağlayan çeşitli fişürler ve teknikler geliştirilmiştir. Test sürecinde, Teknik A yöntemi kullanılarak numuneler Brugger test cihazının çenelerine sabitlenmiş ve 300 mm/dak hızında çekme uygulanmıştır. Malzemeler, ısı ile 10° aralıklarla (105° - 155°C) kaynak edilerek hazırlanmış ve test sırasında uzama ve kopma

değerleri kaydedilmiştir. Bu yöntem, esnek ambalaj filmlerinin kaynak mukavemetini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan standart bir test prosedürüdür.[17]



Şekil 2. 11 Kaynak kuvveti cihazı

2.3.4 Sürtünme Katsayısı (C.O.F)

C.O.F (Sürtünme Katsayısı) testi, esnek ambalaj filmlerinin kendi yüzeyleri veya farklı yüzeyler üzerinde kayma davranışlarını belirlemek amacıyla uygulanmış olup, ASTM D1894 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test, Zwick marka ZwickiLine COF test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Numuneler, 130 mm x 250 mm boyutlarında kesilmiş ve test sürecine uygun hale getirilmiştir.

Test sırasında, numuneler sabit bir zeminde yer alan oynar aparata yerleştirilmiş ve iç/iç olacak şekilde 1,96 N kuvvet altında ölçüm yapılmıştır. Test, 150 mm/dak hızında gerçekleştirilmiş ve sürtünme katsayısı değerleri kayıt edilmiştir. Bu yöntem, esnek ambalaj filmlerinin kayma ve

sürtünme özelliklerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan standart bir test prosedürüdür.[18]



Şekil 2. 12 C.O.F test cihazı

2.3.5 Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri, polimerlerin ısıl davranışlarını belirlemede kullanılan bir termoanalitik tekniktir. Bu yöntem, bir numunenin kontrollü sıcaklık artışı altında gösterdiği ısı akışı (entalpi değişimi) tepkisini ölçerek; camsı geçiş sıcaklığı (T_g), erime başlangıç ve tepe sıcaklıkları (T_m) ile erime entalpisi (ΔH) gibi parametreleri belirler. Bu çalışmada Marmara Üniversitesi bünyesinde bulunan Perkin Elmer 4000 kullanılmıştır. Elde edilen termogramlar, farklı polimerlerin karakteristik termal geçişlerini gösterir ve böylece polimer türleri tanımlanabilir. DSC yöntemi, özellikle çok katmanlı yapılar veya polimer karışımlarında birden fazla erime pikini ortaya koyarak, karışım oranlarının hesaplanmasına ve yapıdaki tüm polimer fazlarının tespitine olanak tanır. DSC termogramındaki erime entalpisi (ΔH), numune kitlesi ile orantılı olduğundan, aşağıdaki denklem ile kristallilik derecesi de hesaplanabilir:

$$\% \text{kristallilik} = \frac{\Delta H_{\text{örnek}}}{\Delta H_{\text{teorik}}} \times 100$$

Bu çalışmada kullanılan DSC cihazı ile ısıtma-soğutma çevrimleri uygulanmış, ısıtma eğrisi üzerinden T_g ve T_m değerleri belirlenmiştir. Analizler sırasında, uygun sıcaklık aralıkları FT-IR ön taramasına göre belirlenmiş, maksimum sıcaklıklar polimerin bozunma sıcaklığına ulaşmayacak şekilde optimize edilmiştir.[19]

DSC analizinden elde edilen erime entalpisi (ΔH_m) verileri, polimerlerin kristallik derecelerini hesaplamak amacıyla kullanılmıştır. Bu hesaplamalarda referans olarak, %100 kristalliğe sahip düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) için kabul edilen teorik erime entalpisi değeri olan 293 J/g esas alınmıştır.[20]

2.3.6 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi (FTIR)

Polimer esaslı numunelerin kimyasal yapı analizleri için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi (FTIR) yöntemi kullanılmıştır. FTIR, bir molekülün farklı dalga boylarındaki kızılötesi ışığı absorplama karakteristiklerini ölçerek, kimyasal bağ yapılarını ve fonksiyonel grupları niteliksel olarak tanımlar. Ölçümler ATR (Attenuated Total Reflectance) modunda, spektral aralık olarak 4000–400 cm^{-1} aralığında gerçekleştirilmiştir. ATR yöntemi ile örnekler yüzeye doğrudan temas ettirilerek ön hazırlık gerektirmeden analiz edilmiştir; bu yöntem özellikle çok katmanlı polimer filmler gibi düzgün yüzeyli katılar için uygundur.

FTIR cihazında, interferogramların Fourier dönüşümü ile absorpsiyon spektrumları elde edilmiştir. FTIR spektroskopisinin temel prensibi, kızılötesi ışığın belirli frekanstaki fotonlarının molekül titreşim modları ile rezonansa girerek absorplanmasıdır. Bu rezonanslar, molekül içindeki bağ türüne (örn. C–H, C=O, O–H), bağın kuvvetine ve atom kütlelerine göre değişiklik göstermektedir. Enerji ve dalga sayısı ilişkisi $E = h \cdot c \cdot v$ denklemi ile tanımlanır; burada v dalga sayısıdır ve spektrumda cm^{-1} cinsinden ifade edilir.[21]

Kullanılan ATR kristali elmas (diamond) tabanlı olup, geniş pH aralığı ve yüksek sertliği sayesinde özellikle polimer ve kompozit malzemelerin temas yüzeyinde bozulma olmadan tekrarlanabilir ölçüm yapılmasına olanak tanımıştır. Cihazda kullanılan dedektör, gelen kızılötesi ışını elektrik sinyaline çevirerek absorpsiyon şiddetini sayısallaştırmaktadır. Böylece spektrumun x-ekseni dalga sayısı (cm^{-1}), y-ekseni ise absorpsiyon (AU) olarak elde edilmiştir.

Bu yöntemle elde edilen spektrumlar, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde numunelerin kimyasal yapılarının karşılaştırmalı analizi amacıyla kullanılacaktır. Özellikle polietilenin karakteristik bantlarının belirlenmesinde FTIR, niteliksel doğrulama açısından temel araçlardan biri olarak tercih edilmiştir.

BÖLÜM 3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1 PCR ve PIR Polietilenlerin Ambalaj filmlerine etkisi

Bu bölümde, farklı oranlarda PCR ve PIR içeren polietilen malzemelerle üretilen çok katmanlı esnek ambalaj filmlerinin mekanik, optik ve bariyer özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının film performansına olan etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve sürdürülebilir ambalaj çözümleri açısından sonuçlar tartışılmıştır.

3.2 Parlaklık Testi

Parlaklık testi, film yüzeylerinin ışığı ne ölçüde yansıttığını ölçmek amacıyla gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Gloss Unit (GU) cinsinden değerlendirilmiştir. Parlak yüzeyler yüksek GU değerleri gösterirken, daha pürüzlü ve mat yüzeylerde bu değerler daha düşüktür. Ölçümler 60° ışık açısıyla yapılmıştır.

Bu çalışmada referans olarak kullanılan saf PE film için parlaklık değeri 67,30 GU olarak ölçülmüştür. Geri dönüştürülmüş içeriğe sahip filmlerde ise bu değerde önemli bir azalma gözlemlenmemiştir. Özellikle %15 ve %35 oranında PCR içeren filmler, sırasıyla 67,20 GU ve 67,35 GU ile referans filme çok yakın değerler sergilemiştir. %50 PCR içeren filmde ise 65,10 GU ile küçük bir azalma kaydedilmiştir. PIR içeren filmler de benzer şekilde 64–66 GU aralığında değerler göstermiştir.

Bu sonuçlar, literatürde geri dönüştürülmüş içeriklerin parlaklık değerlerini düşürdüğüne dair sıkça bildirilen bulgularla tam olarak örtüşmemektedir. Örneğin, Soto ve arkadaşları, geri dönüştürülmüş PE içeren filmlerin saf PE'ye kıyasla daha düşük parlaklık değerleri gösterdiğini ve bunun yüzeydeki heterojen dağılımdan kaynaklandığını belirtmiştir.[22] Benzer şekilde, Barros ve arkadaşları (2019) da çok katmanlı LDPE/EVOH filmlerinde geri dönüştürülmüş EVOH içeriğinin artmasıyla parlaklıkta düşüş ve puslulukta artış gözlemlenmiştir. Bu durum, geri dönüştürülmüş yapıların yüzey düzgünlüğünü bozması ve ışığın dağınık yansımaya yol açmasıyla açıklanmıştır.[23]

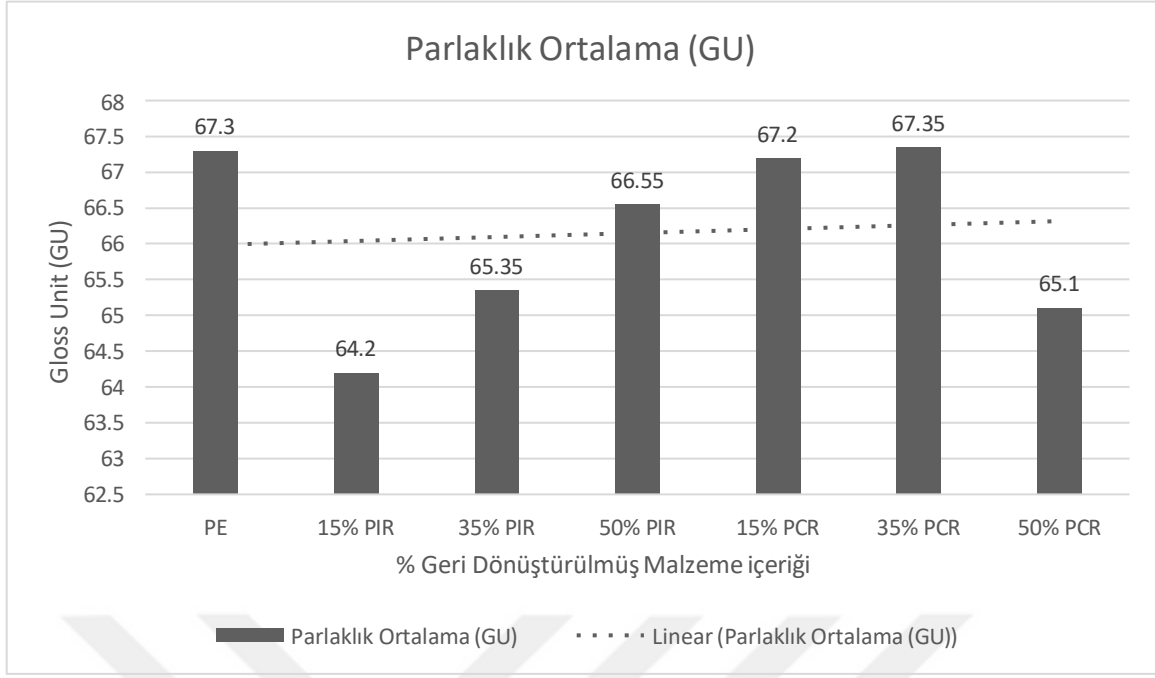
Buna karşın bu çalışmada, geri dönüştürülmüş PE içeriği çok katmanlı filmlerin yalnızca orta katmanına beslenmiş, dış yüzeylerde ise saf PE kullanılmıştır. Bu üretim yöntemi sayesinde yüzeyin optik özellikleri büyük ölçüde korunmuştur. Bu strateji, geri dönüştürülmüş içerik kullanımının ambalaj uygulamalarında estetik performansı bozmadan sürdürülebilirlik katkısı sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, çok katmanlı yapının bu şekilde optimize edilmesi, endüstriyel üretim açısından uygulanabilir ve verimli bir çözüm sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu bulgular geri dönüştürülmüş malzemelerin kontrollü kullanımıyla optik performansta kayda değer bir kayıp olmaksızın sürdürülebilir film üretiminin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3. 1 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Parlaklık Değerleri

	Parlaklık (GU) 60°		
	Test Sayısı		
Numuneler	1	2	Ortalama
PE	67,10	67,50	67,30
15% PIR	63,70	64,70	64,20
35% PIR	65,40	65,30	65,35
50% PIR	66,60	66,50	66,55
15% PCR	67,30	67,10	67,20
35% PCR	67,40	67,30	67,35
50% PCR	64,90	65,30	65,10

Bu sonuçlar, geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının optik özellikler üzerindeki etkisini anlamak açısından önemli olup, geri dönüştürülmüş içeriğin belirli oranlarda optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Çalışmada elde edilen parlaklık değerleri ile diğer optik parametreler arasındaki ilişkiler, daha detaylı analizler ile değerlendirilebilir.



Şekil 3. 1 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Parlaklık Değerleri Grafiği

3.3 Çekme Mukavemeti

Filmlerin boyuna ve enine yöndeki mekanik davranışlarını değerlendirmek amacıyla çekme testleri gerçekleştirilmiş ve çekme mukavemeti (σ) değerleri MPa cinsinden hesaplanmıştır.

$$1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Çekme mukavemeti } (\sigma) = \text{Maksimum kuvvet (Pmax)} / \text{Başlangıç kesit alanı (A}_0\text{)}$$

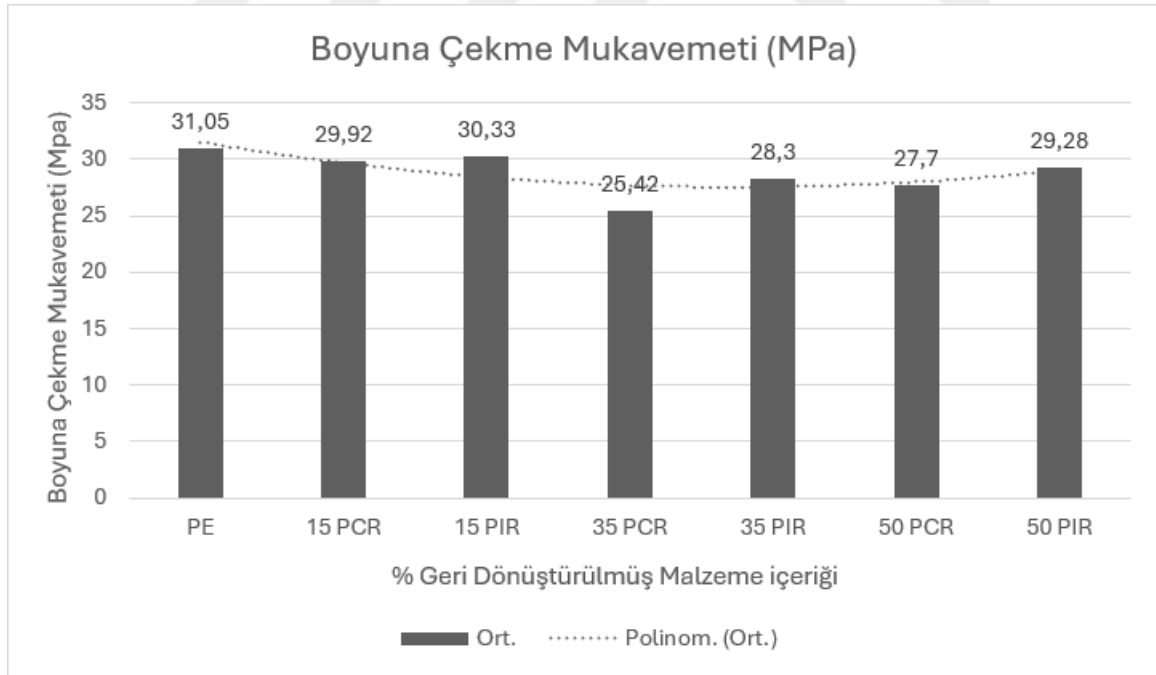
Saf PE numunesi 31,05 MPa ile referans değer olarak kabul edilmiştir. Geri dönüştürülmüş içerik eklendikçe, mukavemet değerlerinde katkı türü ve oranına bağlı olarak farklı yönlü değişimler gözlemlenmiştir.

PCR katkılı filmlerde, çekme mukavemeti genel olarak düşme eğilimi göstermiştir. %15 PCR içeriğiyle mukavemet 29,92 MPa'ya düşerken, %35 PCR'de 25,42 MPa ile en düşük değere ulaşılmış; ancak %50 PCR içeriğinde bu değer 27,70 MPa'ya yükselmiştir. Bu durum, PCR içeriğinin artışına bağlı olarak polimer zincirlerinin daha fazla zarar gördüğü, ancak %50 seviyesinde test sapmaları olduğu veya üretim dalgalanmaları nedeniyle kısmi bir toparlanma yaşandığı şeklinde yorumlanabilir.

PIR katkılı filmlerde ise farklı bir eğilim gözlemlenmiştir. %15 PIR ile 30,33 MPa'ya yakın yüksek bir değer korunurken, %35 PIR'de 28,30 MPa'ya düşülmüş; %50 PIR'de ise 29,28 MPa'ya tekrar yükselmiştir. Bu eğilim, PIR katkılı yapıların daha homojen ve düşük bozulma eğilimli olduğuna işaret etmektedir. PIR, üretimden kaynaklı olarak daha stabil zincir yapısına sahip olduğundan, mekanik özelliklerde PCR'ye kıyasla daha az bozulmaya neden olmuştur.

Tablo 3. 2 Geri Dönüştürülmüş PE içeren Filmlerin boyuna çekme mukavemetleri

Numuneler	(Boyuna) Çekme Mukavemeti (MPa)						
	Test					Ort.	Std. Spm.
	1.	2.	3.	4.	5.		
PE	32.30	29.66	31.08	31.50	30.71	31.05	0.98
15 PCR	30.50	30.58	29.85	29.09	29.57	29.92	0.63
15 PIR	30,72	29,16	30,11	32,57	29,11	30,33	1,42
35 PCR	27.31	25.08	24.19	25.05	25.46	25.42	1.15
35 PIR	29.24	26.86	29.69	27.84	27.88	28.30	1.15
50 PCR	26.50	29.90	26.33	27.05	28.71	27.70	1.34
50 PIR	28.36	32.47	26.46	30.10	29.03	29.28	2.11



Şekil 3. 2 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Çekme Mukavemet Grafiği

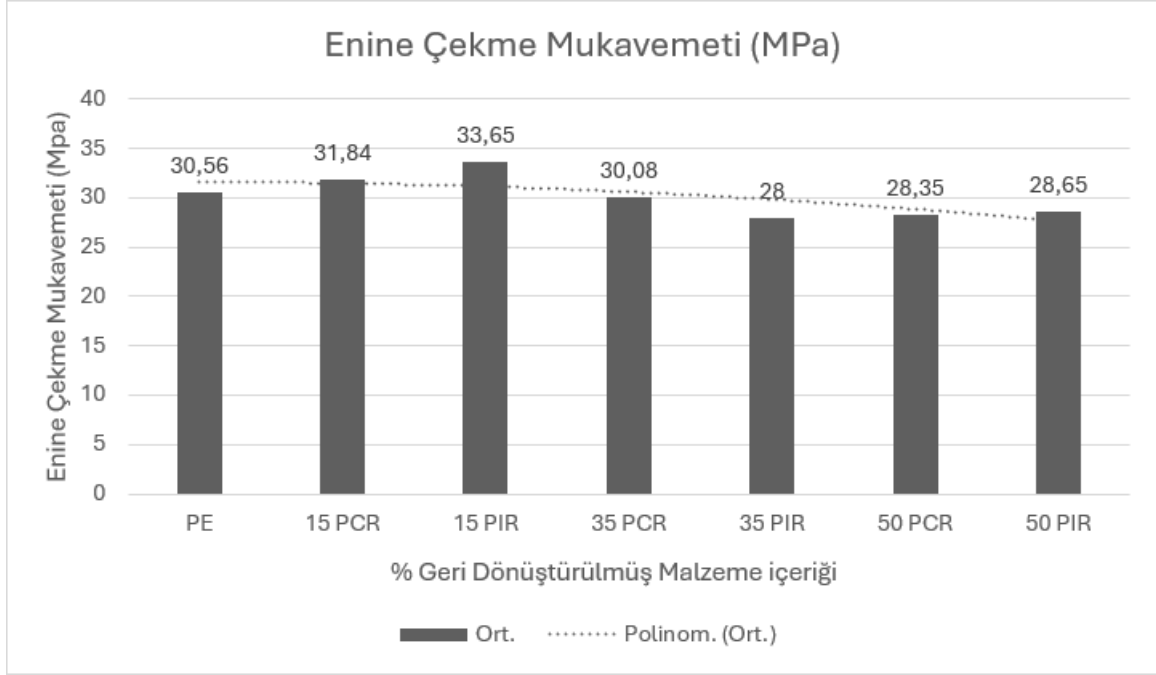
Bu bulgular, literatürdeki araştırmalarla da paralellik göstermektedir. Reis ve arkadaşları (2013) çalışmasında, farklı gerinim hızlarında test edilen post-consumer geri dönüştürülmüş HDPE malzemelerinde, özellikle düşük hızlarda daha yüksek deformasyon kabiliyeti gözlenirken, artan hızlarla birlikte çekme dayanımı artmış fakat gevrekleşme de artmıştır. Bu durum, polimer zincir yapısının ve test koşullarının çekme mukavemeti üzerindeki belirleyici etkisini vurgular. Geri dönüştürülmüş malzemenin çekme dayanımındaki düşüşün, zincir kırılmaları ve mikroboşluk oluşumu ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir.[24]

Czarnecka-Komorowska ve arkadaşları (2018) tarafından yapılan bir çalışmada ise, post-consumer kaynaklı LDPE ve LLDPE regranulatlarının belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen filmlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Özellikle %50 rLDPE ve %50 rLLDPE içeren karışımlarda, saf malzemelere kıyasla çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerlerinde anlamlı artışlar gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, bu iyileşmenin temel nedenlerinden biri olarak karışımların kristallenme derecesindeki artışı göstermiştir. DSC analizlerinden elde edilen sonuçlar da bu yorumu desteklemekte olup, geri dönüştürülmüş içeriklerin uygun kombinasyonlarla kullanılması halinde mekanik performansın optimize edilebileceğini ve yüksek kaliteli film üretiminin mümkün olabileceğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, geri dönüştürülmüş polietilen bazlı malzemelerin belirli uygulamalar için sürdürülebilir ve işlevsel bir alternatif sunabileceğini göstermektedir. [25]

Tablo 3. 3 Geri Dönüştürülmüş PE içeren Filmlerin Enine Çekme Mukavemetleri

Numuneler	(Enine) Çekme Mukavemeti (MPa)						
	Test					Ort.	Std. Spm.
	1.	2.	3.	4.	5.		
PE	34.90	26.88	29.43	29.43	32.18	30.56	2.74
15 PCR	30.03	28.56	33.91	33.40	33.28	31.84	2.14
15 PIR	33.96	32.87	33.49	34.51	33.44	33.65	0.55
35 PCR	31.84	29.94	29.74	30.25	28.61	30.08	1.04
35 PIR	28.18	28.18	28.17	29.12	26.35	28.00	0.90
50 PCR	27.77	29.84	30.32	25.60	28.22	28.35	1.67
50 PIR	28.68	28.97	27.77	28.73	29.08	28.65	0.46

Enine çekme mukavemeti değerleri değerlendirildiğinde, saf PE filmi 30,56 MPa ile referans olarak alınmıştır. PIR katkılı filmlerde en yüksek değer 33,65 MPa ile % 15 PIR içeriğinde elde edilmiştir ve bu değer saf PE'nin üzerinde kalmıştır.



Şekil 3. 3 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Çekme Mukavemet Grafığı

PCR katkılı filmler için ise %15 PCR içeriği 31,84 MPa ile en yüksek değeri sunarken, artan oranlarla birlikte düşüş eğilimi görülmüştür (%35 PCR: 30,08 MPa; %50 PCR: 28,35 MPa). Bu sonuçlar, boyuna yönde olduğu gibi enine yönde de PIR katkısının mekanik performansa etkisinin PCR'ye kıyasla daha sınırlı ve kontrollü olduğunu göstermektedir.

Cecon vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada da, farklı yoğunluklardaki PE karışımlarına eklenen PCR içeriğinin artışıyla çekme mukavemetinde belirgin bir azalma gözlemlendiği belirtilmiştir. Çalışmada, PCR miktarının artmasının polimer matrisindeki bozulmaları artırarak malzemenin bütünlüğünü ve dayanımını düşürdüğü vurgulanmıştır. Bu bulgular, mevcut deneysel sonuçlarla uyumlu olup, geri dönüştürülmüş içeriğin optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.[26]

Bu çalışmada elde edilen deneysel verilere göre, PIR içeriği % 15–50 aralığında kullanıldığında, çekme mukavemetinde önemli bir bozulma gözlemlenmemiştir ve hatta bazı oranlarda değerlerin saf PE'ye yakın veya üzerinde seyrettiği görülmüştür. Bu durum, özellikle % 15–50 PIR katkısının boyuna çekme mukavemeti açısından optimum kullanım aralığı olabileceğini

göstermektedir. PCR katkısında ise %15 oranı kabul edilebilir mekanik performans sunarken, %35 ve üzeri katkılarda çekme dayanımındaki kayıplar belirginleşmiştir. Bu nedenle, PCR katkısında optimum oranın %15'ten yüksek olmaması gerektiği değerlendirilmektedir. Ancak farklı uygulamalarda bu eşikler, fonksiyonel gerekliliklere göre yeniden yorumlanabilir.

3.4 Kopma Mukavemeti

Esnek ambalaj filmlerinin belirli bir gerilim seviyesine ulaştığında kırılma gösterdiği nokta kopma mukavemeti olarak tanımlanır ve malzemenin son dayanım kapasitesi hakkında bilgi verir. Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş polietilen içeren çok katmanlı esnek filmlerin makine yönünde (boyuna) ve enine yönde kopma mukavemeti özellikleri değerlendirilmiş ve tüm sonuçlar megapaskal (MPa) cinsinden ifade edilmiştir. Yapılan testlerde saf PE içeren referans film, her iki yönde de en yüksek kopma mukavemeti değerini göstermiştir. Geri dönüştürülmüş içerik eklendikçe, kopma mukavemeti değerlerinde katkı türüne ve oranına bağlı olarak farklı oranlarda azalma gözlemlenmiştir.

Tablo 3. 4 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Kopma Mukavemeti

Numuneler	(Boyuna) Kopma Mukavemeti (MPa)						
	Test					Ort.	Std. Spm.
	1.	2.	3.	4.	5.		
PE	31.72	29.66	31.08	31.50	30.71	30.93	0.73
15 PCR	30.50	30.58	29.85	27.81	29.57	29.66	1.00
15 PIR	31.06	29.31	30.37	33.14	29.25	30.63	1.43
35 PCR	30.66	26.90	26.86	27.84	27.43	27.94	1.41
35 PIR	31.16	29.38	32.89	28.80	30.76	30.60	1.44
50 PCR	29.40	32.83	29.33	29.69	31.71	30.59	1.42
50 PIR	29.36	33.47	27.11	31.10	30.03	30.21	2.09

Boyuna kopma mukavemeti açısından, referans PE filmi 30,93 MPa ortalama değeri ile temel alınmıştır. %15 PCR içeriğinde bu değer 29,66 MPa olarak ölçülmüş, %35 PCR'de 27,94 MPa'ya düşmüş ve %50 PCR katkısında 30,59 MPa'ya yükselmiştir. PIR katkılı filmler için %15 PIR içeriğinde 38,63 MPa ile beklenenin üzerinde bir dayanım elde edilmiş, %35 PIR'da bu değer 32,60 MPa'ya, %50 PIR'da ise 32,21 MPa'ya düşmüştür. PCR katkılı filmlerde kopma

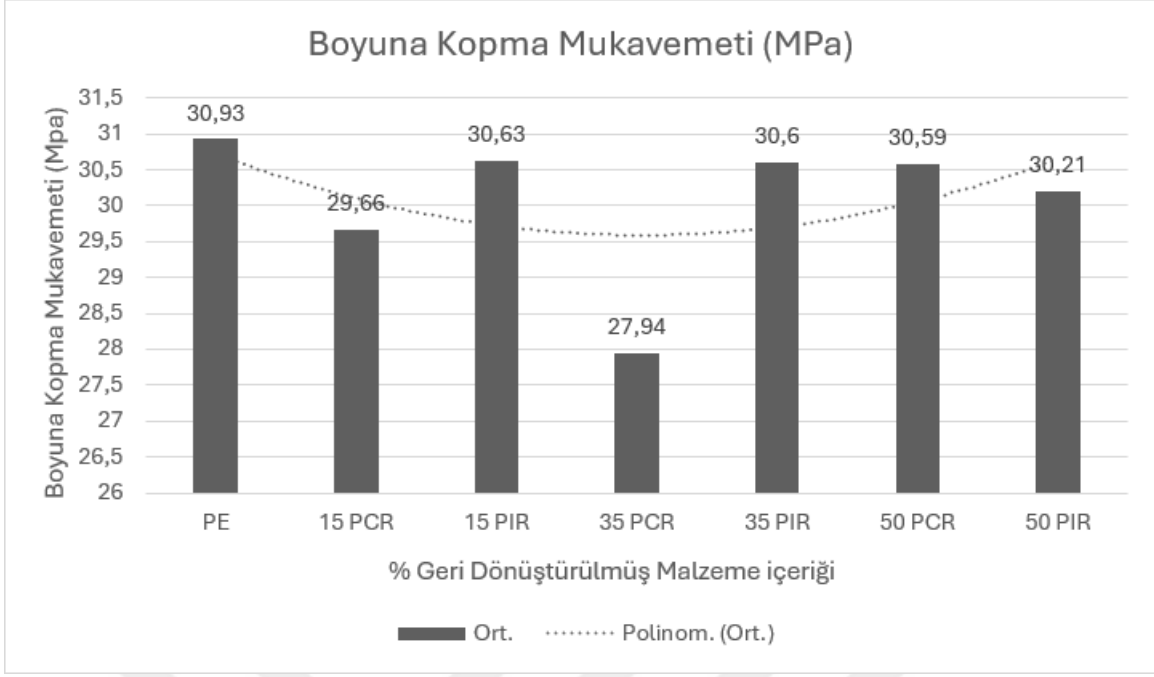
mukavemeti daha düzensiz bir dağılım göstermiş olup, polimer zincirlerinin bozulması ve amorf bölgelerdeki yapısal uyumsuzlukların bu düşüşte etkili olduğu düşünülmektedir. PIR katkısında ise daha homojen ve kontrollü bir yapı sayesinde kopma dayanımı daha istikrarlı şekilde korunmuştur.

Tablo 3. 5 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Kopma Mukavemeti

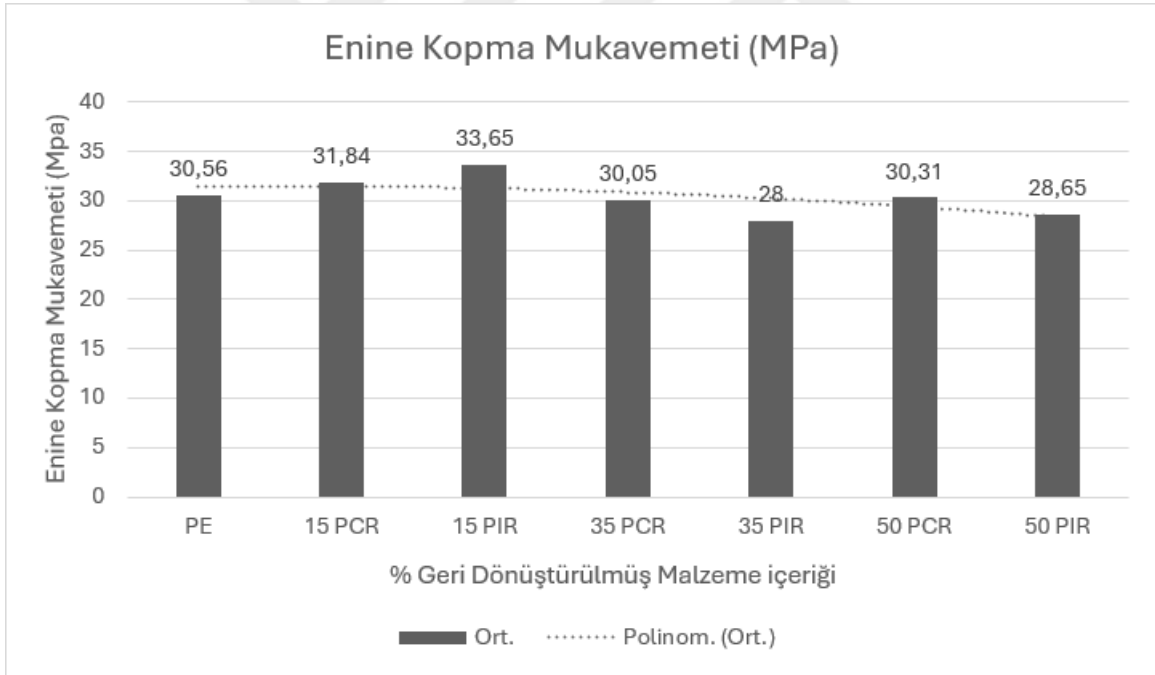
Numuneler	(Enine) Kopma Mukavemeti (MPa)						
	Test					Ort.	Std. Spm.
	1.	2.	3.	4.	5.		
PE	34.90	26.88	29.43	29.43	32.18	30.56	2.74
15 PCR	30.03	28.56	33.91	33.40	33.28	31.84	2.14
15 PIR	33.96	32.87	33.49	34.51	33.44	33.65	0.55
35 PCR	31.84	29.79	29.74	30.25	28.61	30.05	1.05
35 PIR	28.18	28.18	28.17	29.12	26.35	28.00	0.90
50 PCR	29.77	31.84	32.32	27.42	30.22	30.31	1.73
50 PIR	28.68	28.97	27.77	28.73	29.08	28.65	0.46

Enine kopma mukavemeti yönünden ise referans PE filmi 30,56 MPa değerine sahiptir. %15 PIR içeriğinde bu değer 33,65 MPa'ya yükselerek dikkat çekici bir performans göstermiş, %35 ve %50 PIR katkılarında sırasıyla 28,00 MPa ve 28,65 MPa seviyelerine düşmüştür. PCR katkılı filmlerde ise %15 PCR ile 31,84 MPa değeri elde edilmiş, %35 PCR ile bu değer 30,05 MPa, %50 PCR ile 30,31 MPa olmuştur. Bu bulgular, PIR katkısının enine yönde de daha stabil ve dirençli bir yapı sağladığını göstermektedir.

Kopma mukavemeti test sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, PCR katkısı ile üretilen filmlerde polimer zincirlerinin yapısal bütünlüğünün daha fazla bozulduğu, iç gerilimlerin daha yoğun olduğu ve bu durumun kopma dayanımını olumsuz etkilediği söylenebilir. PIR katkısında ise üretimden kaynaklanan daha homojen yapı ve düşük safsızlık oranı sayesinde, özellikle %15–35 katkı oranlarında referans malzemeye yakın veya daha iyi performans gösterildiği görülmüştür.



Şekil 3. 4 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Kopma Mukavemet Grafiği



Şekil 3. 5 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Kopma Mukavemet Grafiği

Konuk A. (2024) tarafından yürütülen bir çalışmada ise, mekanik geri dönüşümle elde edilen granüller kullanılarak üretilen PE filmlerin, bazı durumlarda granülsüz filmlere kıyasla daha iyi kopma mukavemeti gösterdiği belirtilmiştir. Bu durumun, geri kazanılmış granüllerin içerisinde yer alan HDPE veya mLLDPE gibi yüksek dirençli polimer fazlarından kaynaklandığı ifade

edilmiştir. Aynı çalışmada, granüllerin film üretiminde tekrar kullanılmasının, hem çevresel hem de performans açısından olumlu etkiler sunduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgu, çalışmamızdaki PIR katkılarının olumlu etkileri ile tutarlıdır.[27]

Benzer bulgulara Tesfaw ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan çalışmada da rastlanmıştır. Bu çalışmada, farklı oranlarda karıştırılan saf ve geri dönüştürülmüş HDPE karışımlarının çekme testleri gerçekleştirilmiş ve kopma uzaması değerleri analiz edilmiştir. %100 saf HDPE içeren numune ortalama 25,13 mm uzama gösterirken, %100 geri dönüştürülmüş HDPE içeren numunede bu değer yalnızca 9,76 mm olarak ölçülmüştür. Geri dönüştürülmüş içerik oranı arttıkça kopma uzamasında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Ara çalışmalarda, %30 oranına kadar olan geri dönüşüm katkısının kopma uzamasında göreceli olarak daha sınırlı bir azalma yarattığı, ancak bu oranın üzerine çıktığında mekanik özelliklerdeki bozulmanın hızlandığı ifade edilmiştir. Bu durum, geri dönüştürülmüş HDPE'nin daha düşük moleküler ağırlıkta zincirler içermesi, önceki kullanım öyküsünden kaynaklı iç gerilimler taşıması ve bağ yapılarındaki zayıflıkla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, malzeme içinde tutulan nemin bağ bölgelerinde mikroskobik boşluklar oluşturarak kopma davranışını zayıflattığı da vurgulanmıştır. Bu sonuçlar, geri dönüştürülmüş polietilen içeriğinin kopma uzamasına olan etkisinin oranla doğrudan ilişkili olduğunu ve kritik eşiğin %30 seviyesi civarında başladığını göstermektedir. [28]

Tüm bu değerlendirmeler, kopma mukavemetinin yalnızca geri dönüştürülmüş içerik oranı ile değil, aynı zamanda içerik türü, üretim koşulları ve polimer zinciri yapısı ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Optimum performans için katkı oranlarının dikkatle belirlenmesi ve kullanılan geri dönüştürülmüş hammaddenin karakteristiğinin iyi analiz edilmesi gereklidir.

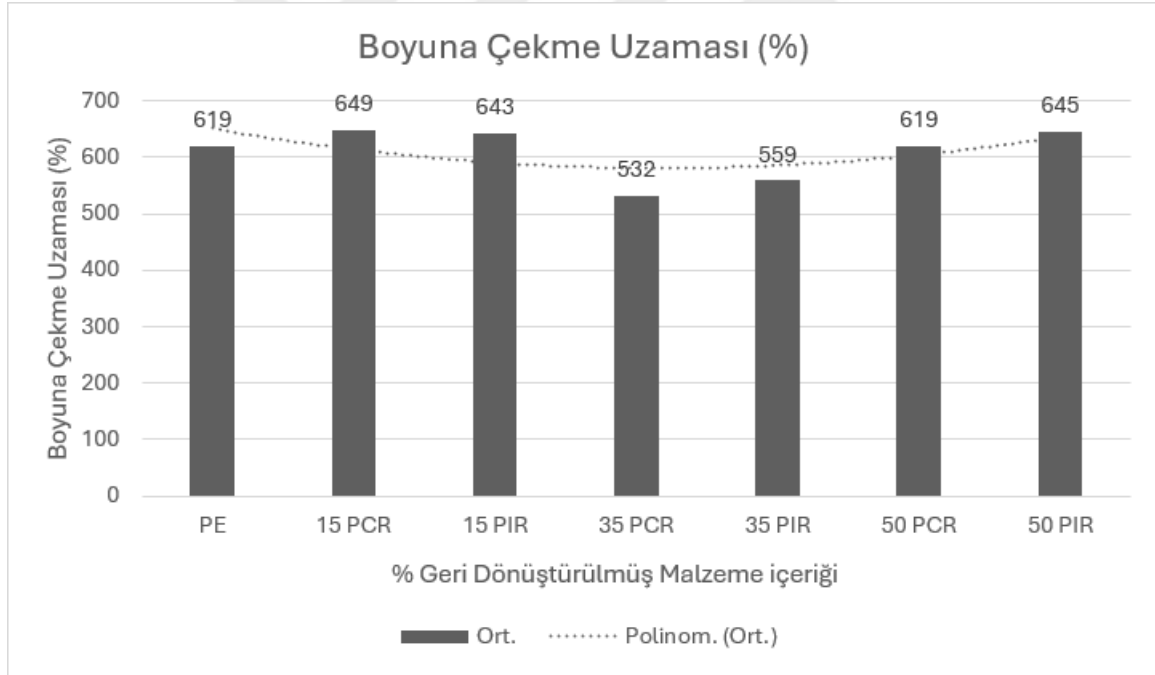
3.5 Çekme Uzaması

Boyuna çekme uzaması açısından, saf PE filmi 619 % ile referans değeri oluşturmuştur. %15 PCR içeren film 649 % ile referansın üzerinde bir değer sunarken, %35 PCR ile 532 %'ye düşmüş ve %50 PCR'de yeniden 619 % ile referans seviyesine yaklaşmıştır. Bu durum, bazı PCR katkılarının zincir yapısını düzensizleştirerek esnekliği azalttığını, ancak yüksek oranda PCR katkısında zincirlerin yeniden hizalanması veya mLLDPE içeriği gibi faktörlerle

toparlanma yaşanabileceğini göstermektedir. PIR katkıli filmlerde ise daha tutarlı bir yapı gözlemlenmiştir.

Tablo 3. 6 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Çekme Uzaması

Numuneler	(Boyuna) Çekme Uzaması (%)						
	Test					Ort.	Std. Spm.
	1.	2.	3.	4.	5.		
PE	670	569	581	626	650	619	39.06
15 PCR	656	651	650	645	645	649	4.23
15 PIR	660	637	634	672	614	643	20.49
35 PCR	571	510	509	532	536	532	22.44
35 PIR	588	529	584	540	554	559	23.63
50 PCR	670	569	581	626	650	619	39.06
50 PIR	629	699	577	670	648	645	41.21



Şekil 3. 6 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Çekme Uzaması Grafiği

%15 PIR'de 643 %, %35 PIR'de 559 %, %50 PIR'de 645 % elde edilmiştir. Özellikle %15 ve %50 PIR katkıli filmler, referans PE'ye yakın uzama göstermiştir. Bu durum, PIR katkısının daha homojen bir dağılıma sahip olması nedeniyle esneklik açısından daha az bozulmaya yol

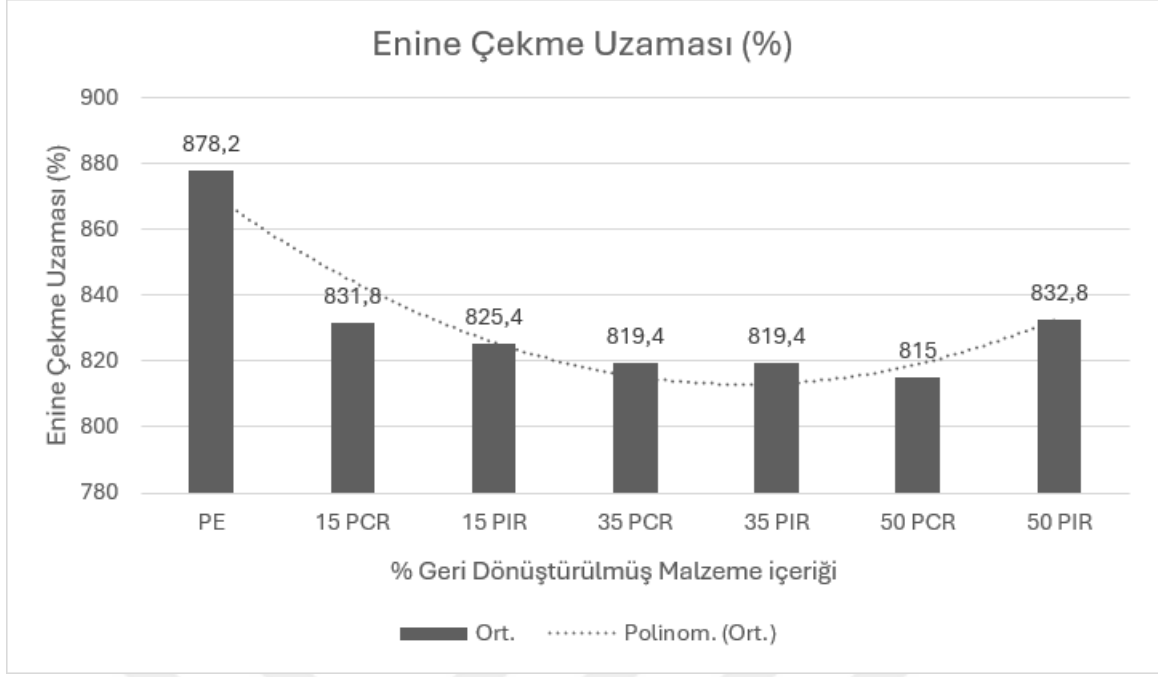
açlığını göstermektedir. Bununla birlikte, %15 PCR örneğinde olduğu gibi çok düşük standart sapma (4,23 %) değerleri, yapısal tutarlılığı ve ölçüm güvenilirliğini desteklemektedir.

Enine çekme uzamasında ise saf PE 878,2 % ile en yüksek uzama değerini göstermiştir. Geri dönüştürülmüş içerik eklenmesiyle birlikte uzama değerlerinde bir miktar düşüş yaşansa da, bu düşüş boyuna yöne kıyasla daha sınırlı kalmıştır. %15 PCR içeriğiyle 831,8 % elde edilirken, %15 PIR 825,4 %, %35 PCR ve %35 PIR ise 819,4 % ile çok benzer değerler vermiştir. %50 PCR içeriğinde uzama 815 % olarak ölçülmüş, %50 PIR içeriği ise 832,8 % ile yeniden yükselmiştir. Özellikle %50 PIR içeren filmin düşük standart sapma değeri (9,95 %) dikkat çekicidir; bu durum, hem homojen yapı hem de tutarlı performans açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

Tablo 3. 7 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Çekme Uzaması

Numuneler	(Enine) Çekme Uzaması (%)						
	Test					Ort.	Std. Spm.
	1.	2.	3.	4.	5.		
PE	952	789	854	882	914	878.2	55.29
15 PCR	796	774	891	858	840	831.8	42.14
15 PIR	866	815	821	817	808	825.4	20.73
35 PCR	867	814	806	833	777	819.4	29.86
35 PIR	823	839	824	840	771	819.4	25.24
50 PCR	820	839	845	754	817	815.0	32.33
50 PIR	841	848	822	827	826	832.8	9.95

Enine çekme uzaması değerlerinin boyuna değerlere göre genel olarak daha yüksek çıkması, üretim yöntemiyle de ilişkilidir. Bu çalışmada incelenen çok katmanlı PE filmler blown film ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş olduğundan, bu üretim tekniğinde kullanılan şişirme oranı (blow-up ratio), film balonunun enine yönde daha fazla oryantasyon kazanmasına neden olmaktadır. Bu durum, polimer zincirlerinin enine yönde uzama kabiliyetini artırarak enine yönde daha yüksek çekme uzaması değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu fark, hem yapısal hem de işlem yönelimli bir etkidir ve geri dönüştürülmüş içerik katkısından bağımsız olarak sistematik olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 3. 7 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Çekme Uzaması Grafiği

Nitekim Cuesta (2023) tarafından yapılan endüstriyel ölçekli bir çalışmada, şişirme oranının (BUR) enine yönde (TD) polimer zincirlerinin yönelimine doğrudan etki ettiği ve bu sayede çekme uzaması ile çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerin arttığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada, BUR ile TD yönünde ölçülen çekme uzaması arasında yüksek korelasyon ($R^2 > 0.90$) elde edilmiştir. Bu bulgular, enine yöndeki uzamanın blown film üretim tekniği kaynaklı olarak boyuna yönden yüksek olmasını desteklemektedir.[29]

Genel olarak değerlendirildiğinde, hem boyuna hem de enine yönlerde PIR katkılı filmlerin, PCR katkılı filmlere kıyasla daha kararlı uzama davranışı sergilediği, ve özellikle %15–50 aralığında kullanıldığında çekme uzaması performansını önemli ölçüde koruduğu gözlemlenmiştir. PCR katkısında ise özellikle orta seviyelerdeki katkı oranlarında uzama davranışında dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu bulgular, PIR katkısının esnek ambalaj filmlerinde geri dönüştürülmüş içeriğin performans açısından optimize edilmesine olanak tanıyan daha güvenilir bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

3.6 Kopma Uzaması

Kopma uzaması, polimer malzemelerin sünekliğini değerlendirmek amacıyla kullanılan önemli bir mekanik parametredir ve yüzde cinsinden ifade edilir. Süneklik azaldıkça kopma uzaması

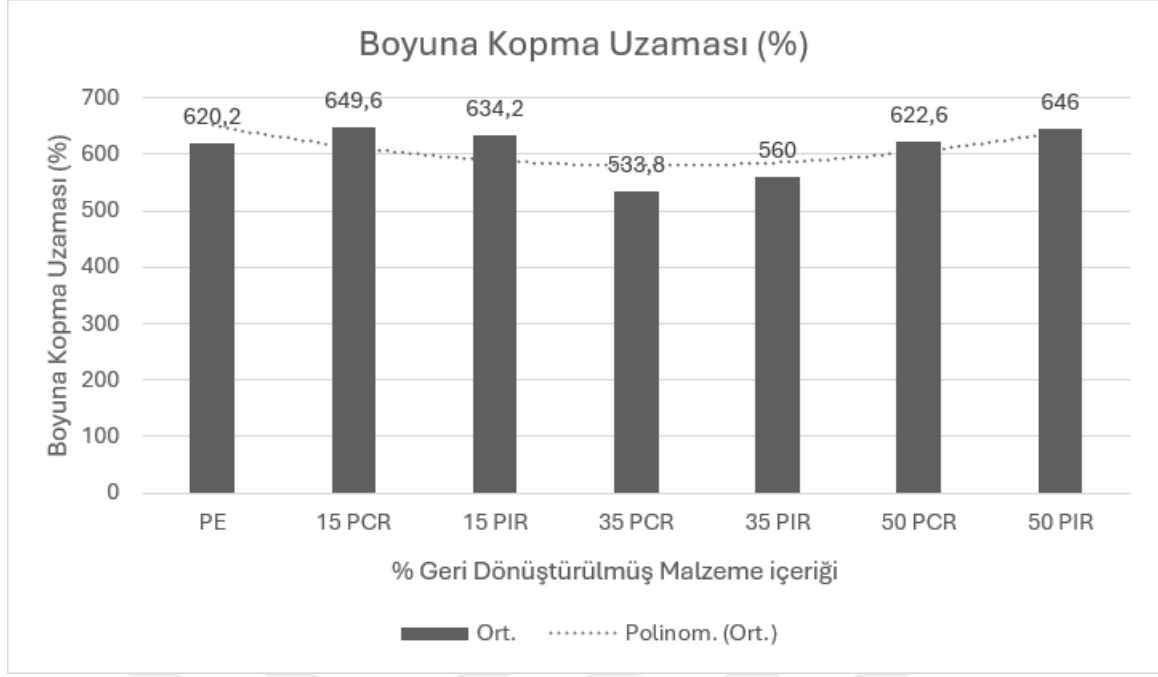
değeri düşer; dolayısıyla bu parametre, özellikle geri dönüştürülmüş polimer içeriğinin malzeme davranışına etkilerini değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir.

Yapılan testler sonucunda elde edilen ortalama değerler incelendiğinde, hem boyuna (MD) hem de enine (TD) yönlerde kopma uzaması değerlerinin, saf PE'ye kıyasla geri dönüştürülmüş içerik (PCR ve PIR) oranı arttıkça azaldığı görülmüştür. Bu durum, geri dönüştürülmüş malzemenin film yapısına getirdiği morfolojik değişikliklerin ve potansiyel faz ayrımlarının sünekliği olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir.

Saf PE numunesi %620,2 ortalama boyuna kopma uzaması ile en yüksek değeri göstermiştir. PIR içeriğinin %15, %35 ve %50 seviyelerinde kullanılmasıyla bu değer sırasıyla %634,2, %560,0 ve %646,0 olarak ölçülmüştür. Özellikle %35 PIR içeriğinde belirgin bir azalma dikkat çekmektedir. PCR içeriği arttıkça ise kopma uzaması %649,6 (15%), %533,8 (35%) ve %622,6 (50%) olarak kaydedilmiştir. Standart sapma değerleri, bazı formülasyonlarda daha homojen yapıya işaret ederken (%15 PCR: 4,4), özellikle %50 PIR gibi varyantlarda dağılımın genişliği artmıştır (44,6).

Tablo 3. 8 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Kopma Uzaması

Numuneler	(Boyuna) Kopma Uzaması (%)						
	Test					Ort.	Std. Spm.
1.	2.	3.	4.	5.			
PE	674	569	581	626	651	620.2	42.1
15 PCR	656	651	650	646	645	649.6	4.4
15 PIR	651	627	625	663	605	634.2	22.4
35 PCR	572	512	512	536	537	533.8	25.2
35 PIR	590	531	584	541	554	560.0	24.2
50 PCR	599	657	601	617	639	622.6	22.5
50 PIR	630	699	581	671	649	646.0	44.6



Şekil 3. 8 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Kopma Uzaması Grafiği

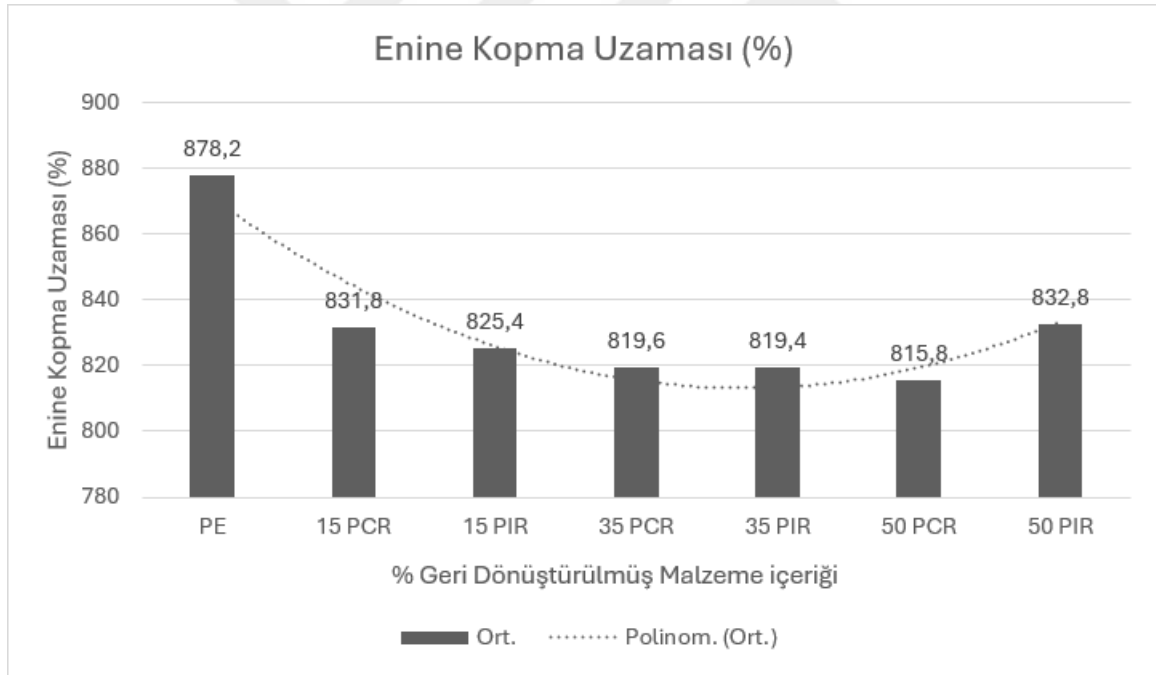
Enine yönde ise PE numunesi %878,2 ile en yüksek ortalama göstermiştir. PIR içeriğiyle birlikte değerler %825,4 (15%), %819,4 (35%) ve %832,8 (50%) şeklinde kaydedilmiştir. PCR katkısı ile ölçülen değerler ise %831,8 (15%), %819,6 (35%) ve %815,8 (50%)'dir. Genel eğilim, enine yönde kopma uzamasında da geri dönüştürülmüş içeriğin artışıyla birlikte düşüş yönündedir. Ancak PIR içeriğinde %50 seviyesinde ölçülen 832,8 değeri ile nispeten stabil bir yapı korunmuştur. Bu durum, PIR'ın daha homojen yapıda ve daha az bozunmuş zincirler içermesiyle açıklanabilir.

Boyuna ve enine yönlerdeki ortalama kopma uzaması değerlerinin birbirinden oldukça farklı olması, daha önce de bahsedildiği üzere kullanılan blown film ekstrüzyon yöntemine bağlanabilir. Bu yöntemle üretilen filmlerde, şişirme oranının TD (enine) yönünde daha yüksek olması, enine yönde daha fazla zincir oryantasyonu ve dolayısıyla daha yüksek uzama değerleri ile sonuçlanır. Benzer şekilde, Drozdov ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, geri dönüştürülmüş HDPE'nin kısa süreli çekme testlerinde saf HDPE'ye göre yaklaşık %25 daha düşük kopma uzaması sergilediği rapor edilmiştir. Bu durum, malzemenin sünekliğinde belirgin bir azalmaya işaret ederken, dikkat çekici olarak iki malzemenin de uzun vadeli sürünme (creep) koşullarında benzer ömür performansı gösterdiği ve 50 yıl hizmet ömrüne sahip olabilecekleri sonucuna varılmıştır. Bu bulgu, geri dönüştürülmüş içerik kullanımının

kısa vadeli mekanik zayıflıklara rağmen, belirli uygulamalarda uzun vadeli kullanılabilirliğini göstermektedir.[30]

Tablo 3. 9 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Kopma Uzaması

Numuneler	(Enine) Kopma Uzaması (%)						
	Test					Ort.	Std. Spm.
	1.	2.	3.	4.	5.		
PE	952	789	854	882	914	878.2	61.8
15 PCR	796	774	891	858	840	831.8	47.1
15 PIR	866	815	821	817	808	825.4	23.2
35 PCR	867	815	806	833	777	819.6	33.3
35 PIR	823	839	824	840	771	819.4	28.2
50 PCR	820	839	845	758	817	815.8	33.3
50 PIR	841	848	822	827	826	832.8	10.0



Şekil 3. 9 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Kopma Uzaması Grafiği

Genel olarak, PCR içeriği arttıkça kopma uzamasındaki düşüş daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, PCR kaynaklı polimerlerin daha fazla bozulmuş zincir yapıları içermesi ve yapısal uyumsuzlukların daha fazla olmasıyla açıklanabilir. PIR içerikli filmler ise daha stabil davranışlar sergilemiş, süneklik üzerindeki etkisi PCR'a göre daha sınırlı olmuştur.

3.7 Elastisite Modülü

Filmin taşıyabileceği maksimum yük miktarı, malzemenin rijitlik ve tokluk özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu mekanik dayanım, elastisite modülü (Young modülü) ile tanımlanır. Elastisite modülü, bir malzemenin uygulanan gerilim karşısında ne derece deformasyona uğradığını gösteren temel bir parametre olup, değer arttıkça malzeme daha rijit, düştükçe ise daha elastik ve kırılğan hale gelmektedir.

Bu çalışma kapsamında, elastisite modülü hem makine yönü (boyuna – MD) hem de enine (TD) yönde yapılan çekme testleri ile belirlenmiştir. Tüm testler, beşer tekrar ölçümüyle yapılmış ve ortalama değerler hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, saf PE içeren referans numuneler en yüksek elastisite modülü değerlerini gösterirken, geri dönüştürülmüş içeriğe sahip numunelerde bu değerlerde sistematik bir azalma gözlenmiştir.

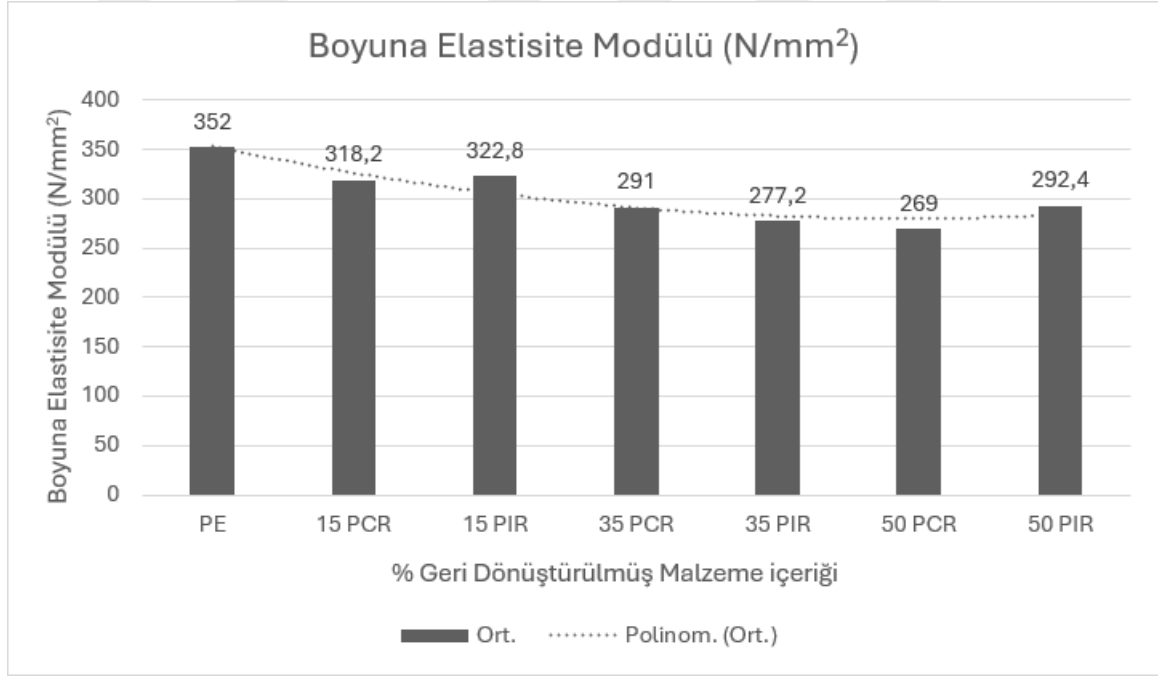
Tablo 3. 10 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Elastisite Modülü

Numuneler	(Boyuna) Elastisite Modülü					Ort.	Std. Spm.
	Test						
	1.	2.	3.	4.	5.		
PE	370	356	365	335	334	352.0	16.7
15 PCR	320	331	318	306	316	318.2	9.0
15 PIR	333	331	301	324	325	322.8	12.8
35 PCR	303	290	282	291	289	291.0	7.6
35 PIR	277	282	285	275	267	277.2	6.9
50 PCR	272	262	268	268	275	269.0	4.9
50 PIR	302	295	289	289	287	292.4	6.1

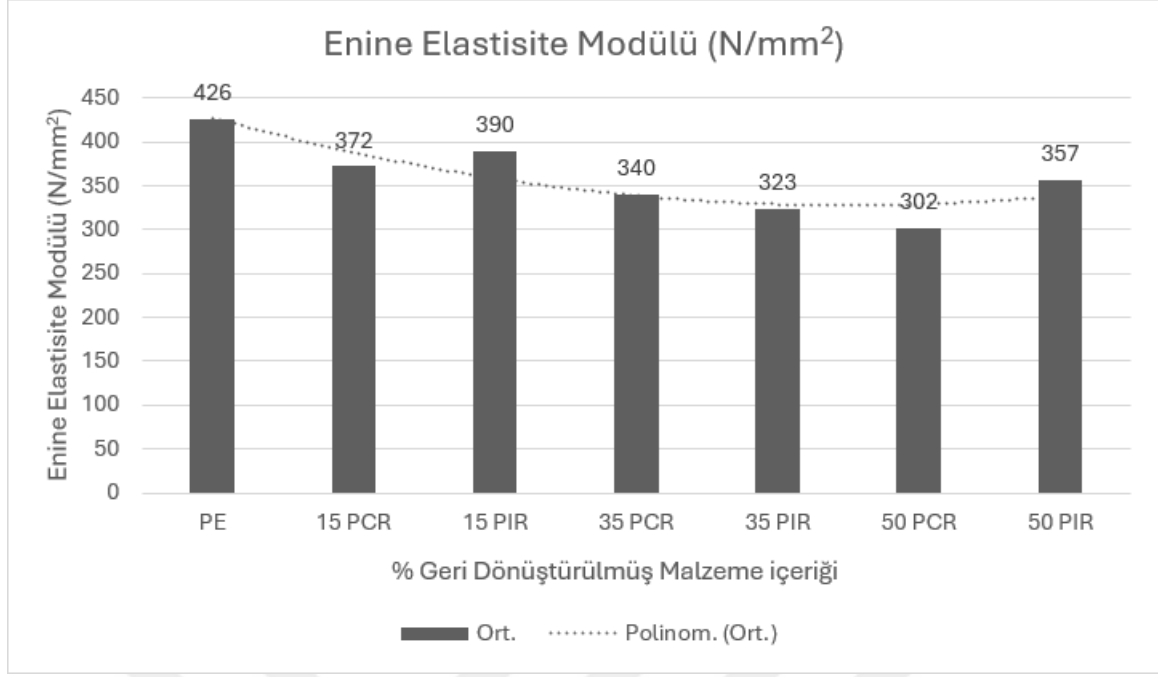
Boyuna yönde yapılan çekme testlerinde, PE numunesi 352,0 MPa ortalama elastisite modülüne sahipken, %15 PIR içeriği bu değeri 322,8 MPa'ya düşürmüştür. %35 PIR içeriği ile bu değer 277,2 MPa, %50 PIR içeriği ile ise 292,4 MPa olarak ölçülmüştür. PIR içeriklerinde dalgalı bir seyir izlenmiş, ancak genel eğilim düşüş yönünde olmuştur. PCR içeriğinde ise daha belirgin bir azalma izlenmiş, % 15 PCR içeriğinde 318,2 MPa olan modül değeri, %35 ve %50 katkılarda sırasıyla 291,0 MPa ve 269,0 MPa seviyelerine kadar düşmüştür. Bu durum, PCR katkısının elastisite modülü üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. 11 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Elastisite Modülü

Numuneler	(Enine) Elastisite Modülü						
	Test					Ort.	Std. Spm.
	1.	2.	3.	4.	5.		
PE	461	440	424	400	407	426	24.8
15 PCR	386	350	364	382	380	372	15.1
15 PIR	379	380	405	402	388	390	12.2
35 PCR	348	309	337	344	364	340	20.2
35 PIR	318	321	321	333	323	323	5.8
50 PCR	274	320	324	305	287	302	21.4
50 PIR	354	337	369	348	377	357	16.1



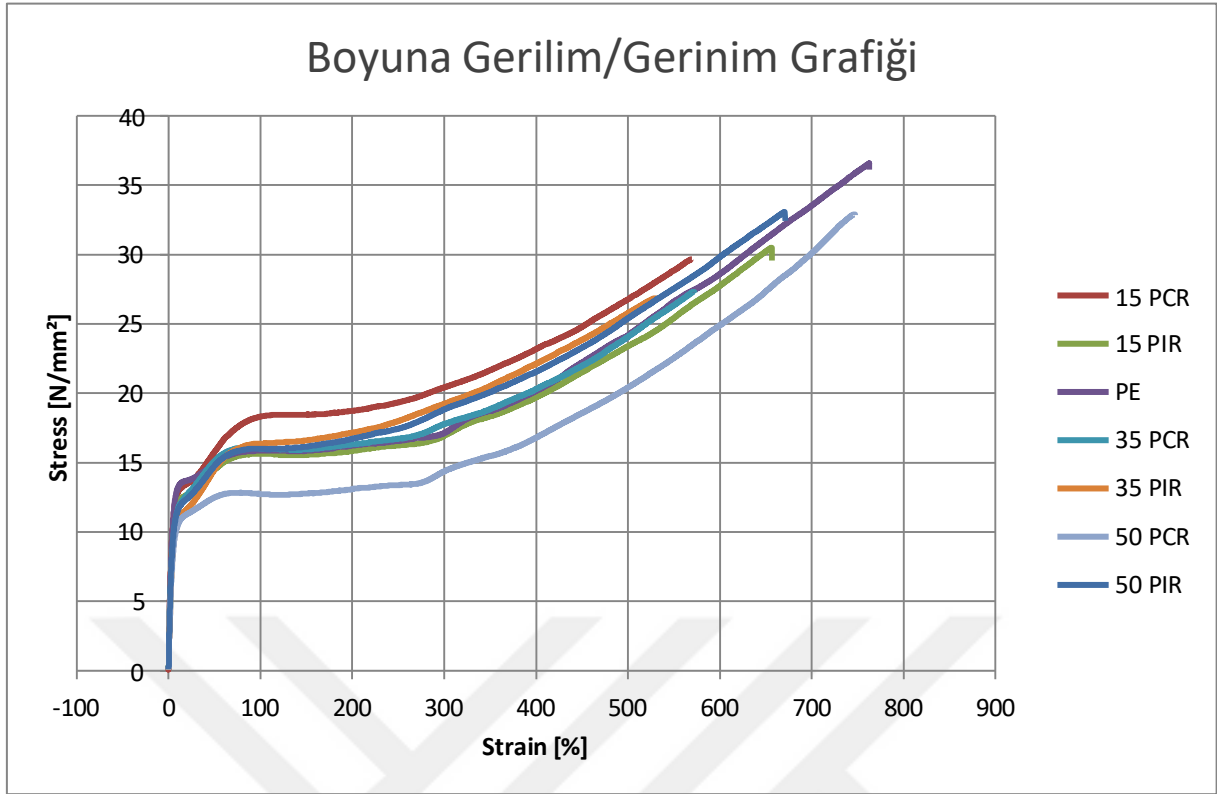
Şekil 3. 10 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Elastisite Modül Grafiği



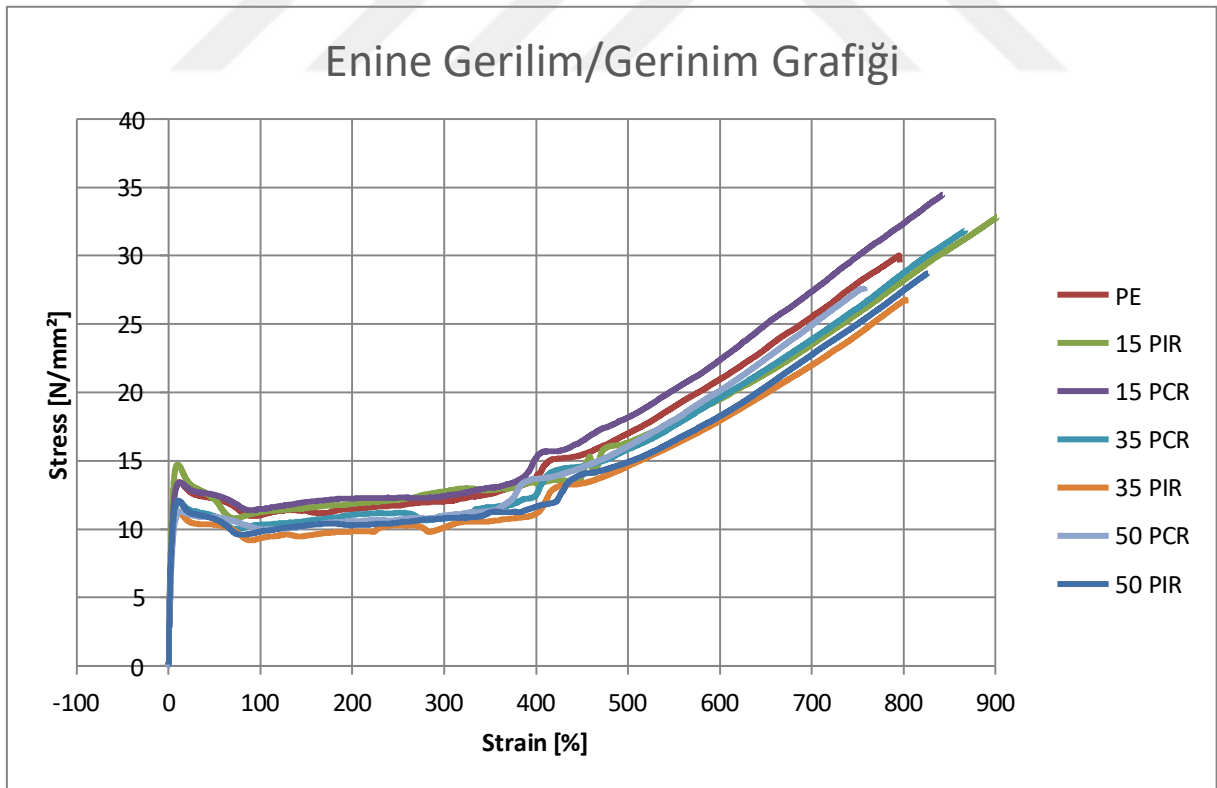
Şekil 3. 11 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Enine Elastisite Modül Grafiği

Boyuna ve enine yönlerdeki gerilim-gerinim grafiklerinin elastik bölge analizleri, bu numerik sonuçları desteklemektedir. Elastik bölgedeki eğimlerin, özellikle PE ve düşük oranlı PIR içeren numunelerde daha dik olduğu, geri dönüştürülmüş içeriğin artmasıyla bu eğimlerin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu, modül değerlerinin neden azaldığını açıkça göstermektedir. Enine yönde yapılan test sonuçlarında da benzer bir eğilim mevcuttur. PE referans numunesi 426,0 MPa ortalama elastisite modülüne sahipken, %15 PIR katkısı bu değeri 390,8 MPa'ya düşürmüştür. %35 ve %50 PIR içeriğinde değerler sırasıyla 323,2 MPa ve 357,0 MPa olmuştur. PCR içerikli filmlerde ise %15, %35 ve %50 katkılarla elde edilen modül değerleri sırasıyla 372,4 MPa, 340,4 MPa ve 302,0 MPa olarak belirlenmiştir.

Orzan ve arkadaşları (2021), post-industrial (PIR) ve post-consumer (PCR) içerikli PC-ABS malzemelerde yaptıkları çalışmada, geri dönüştürülmüş içerik oranının artmasıyla birlikte elastisite modülünde belirgin bir değişkenlik ve azalma gözlemlenmiştir. Bu durumun, özellikle PCR gruplarında moleküler ağırlık düşüşü ve mikroyapısal kusurlar (örneğin gözenekler, aglomerasyonlar) nedeniyle olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, Young modülü üzerindeki bu değişkenliğin, performans öngörülebilirliği açısından dikkatle ele alınması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmada, PIR numuneler prime numunelere yakın sonuçlar verirken, PCR numunelerde hem ortalama hem de varyans açısından daha ciddi sapmalar tespit edilmiştir.[31]



Şekil 3. 12 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Gerilim/Gerinim Grafiği



Şekil 3. 13 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Boyuna Gerilim/Gerinim Grafiği

Bu bulgular, çalışmamızda elde edilen elastisite modülündeki düşüş eğilimi ile uyum göstermektedir ve özellikle PCR içeriklerinin yapısal bütünlüğe etkisi konusunda literatür desteği sağlamaktadır.

Genel olarak, gerek ortalama elastisite modülü değerleri gerekse grafiksel analizler, hem PIR hem de PCR katkısının malzemenin rijitliğini azalttığını ortaya koymaktadır. Ancak bu etki PIR içerikte daha sınırlı kalmakta; PCR katkısında ise daha belirgin bir rijitlik kaybı gözlenmektedir. Bu durumun sebebi yapısal olarak PIR'ın daha homojen ve düşük bozunmuşlukta olmasından kaynaklı olabilir.

3.8 Kaynak Kopma Mukavemeti

Filmin kaynak bölgesinde uygulanan kuvvetin birim alana oranı (N/mm^2) cinsinden ifade edilir. Bir filmin yüksek kaynak kopma mukavemeti göstermesi, malzemenin adezyon kuvvetinin güçlü olduğunu ve sağlam bir kaynak bağlantısı oluşturduğunu gösterir. Bu durum, ambalajın mekanik dayanıklılığı ve bütünlüğü açısından önemli bir performans kriteridir.

Deney sonuçlarına göre, geri dönüştürülmüş içeriğin (PCR ve PIR) artması, kaynak kopma mukavemeti üzerinde belirgin bir düşüşe neden olmuştur. Kaynak kopma mukavemeti 105, 115, 125, 135, 145 ve 155°C sıcaklıklarında ölçülmüş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Saf PE numunesi, 105°C'de 21,53 N/mm^2 , 115°C'de 20,82 N/mm^2 , 125°C'de 21,33 N/mm^2 , 135°C'de 20,42 N/mm^2 , 145°C'de 19,82 N/mm^2 ve 155°C'de 15,60 N/mm^2 değerlerine sahiptir. PIR içeriği arttıkça kaynak kopma mukavemeti düşüş göstermiştir. %15 PIR içeren numunede kaynak kopma mukavemeti %0,7, %0,5, %4,3, %4,7, %2,5 ve %7,4 oranlarında düşüş göstermiştir. %35 PIR içeren numunede bu düşüş oranları %12,8, %7,3, %5,7, %3,5, %3,8 ve %7,7 olarak kaydedilmiştir. %50 PIR içeren numunede, kaynak kopma mukavemeti %13,7, %7,7, %6,5, %5,9, %5,6 ve %11,4 oranlarında azalmıştır.

PCR içeriği arttıkça kaynak kopma mukavemeti değerlerinde daha belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. %15 PCR içeren numunede bu düşüş oranları %1,3, %2,6, %4,5, %2,5, %2,8 ve %0,6 olarak hesaplanmıştır. %35 PCR içeren numunede bu değerler %20,3, %7,1, %5,4, %4,9, %2,9 ve %4,2 olarak belirlenmiştir. %50 PCR içeren numunede kaynak kopma mukavemeti %20,7, %17,2, %13,3, %12,3, %11,7 ve %7,1 oranlarında düşüş göstermiştir. Bu sonuçlar, geri dönüştürülmüş içeriğin artmasıyla birlikte malzemenin kaynak bölgesindeki adezyon kuvvetinin azaldığını ve polimer zincirlerinin birbirine tutunma kapasitesinin

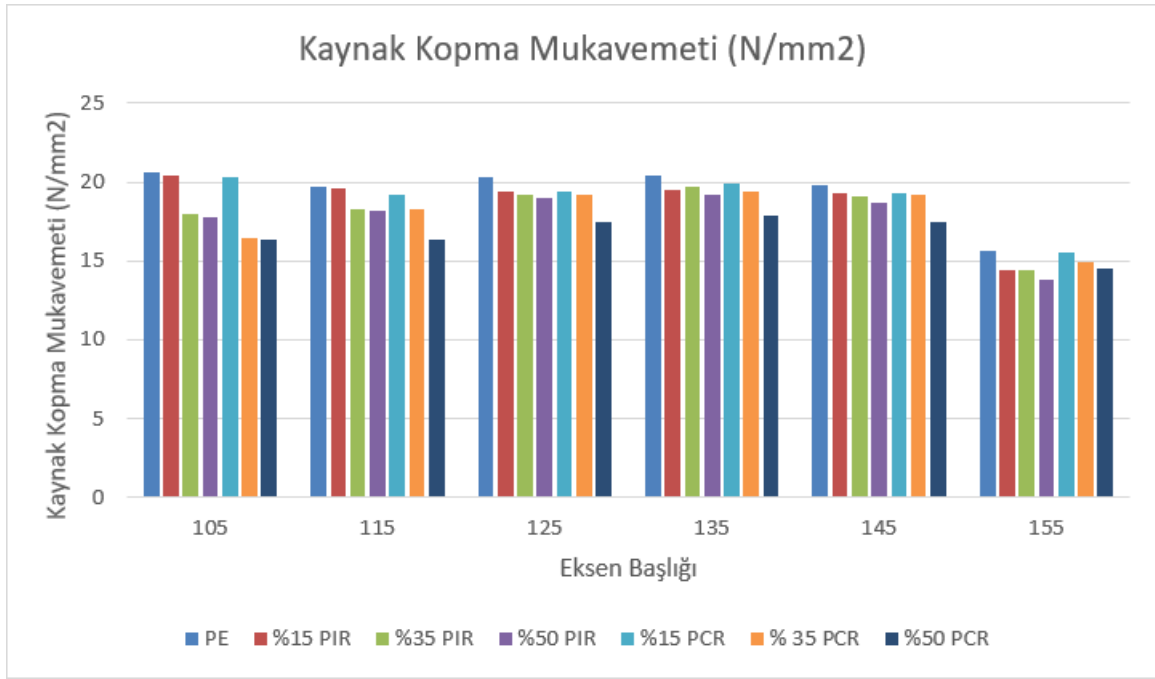
düşüğünü göstermektedir. Özellikle yüksek oranlarda PCR içeren filmler, daha düşük kaynak mukavemeti sergileyerek daha kırılğan bir yapı oluşturmuştur.

Kaynak kopma mukavemeti, esnek ambalaj filmlerinden üretilen torbaların mekanik dayanımı açısından kritik bir parametredir. Geri dönüştürülmüş içeriğin artması, torba kaynak mukavemetini düşüreceği için torbaların taşıma kapasitesini ve yırtılma direncini olumsuz etkileyebilir. Düşük sıcaklıklarda (105°C - 125°C) yapılan kaynak işlemlerinde, PIR içeriği çok fazla değişiklik göstermese de PCR içeriği kaynak bölgesindeki bağlanma kuvvetini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu durum, düşük sıcaklık kaynak işlemleri ile üretilen torbaların daha az sağlam olmasına neden olabilir. 135°C - 145°C sıcaklıklarında, PIR ve PCR içeren filmler daha iyi performans göstermiş olsa da, saf PE'ye kıyasla önemli bir düşüş gözlemlenmiştir. 155°C'de, özellikle yüksek oranda geri dönüştürülmüş içeriğe sahip filmler kaynak noktasında deformasyona uğrayarak mekanik özelliklerini kaybetmiştir. Bu da yüksek sıcaklıkta yapılan kaynak işlemlerinde malzemenin formunu koruyamayabileceğini ve torba üretiminde tercih edilmemesi gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş içeriğin artışı ile kaynak mukavemetindeki azalma, torbaların taşıma kapasitesinin düşmesine ve dikiş/kaynak noktalarından yırtılma riskinin artmasına neden olabilir. Bu nedenle, torba üretiminde belirli bir oranın üzerinde geri dönüştürülmüş içerik kullanımının optimize edilmesi gerekmektedir.

Tablo 3. 12 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Kaynak Kopma Mukavemeti

Kaynak Kopma Mukavemeti (N/mm²)							
Sıcaklık (°C)	PE	%15 PIR	%35 PIR	%50 PIR	%15 PCR	% 35 PCR	%50 PCR
105	21,53	20,43	17,94	17,77	20,30	16,4	16,3
115	20,82	19,60	18,28	18,20	19,20	18,30	16,3
125	21,33	19,42	19,15	18,98	19,38	19,20	17,5
135	20,42	19,45	19,70	19,21	19,90	19,43	17,9
145	19,82	19,33	19,06	18,70	19,27	19,24	17,5
155	15,6	14,45	14,40	13,82	15,5	14,94	14,5



Şekil 3. 14 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin Kaynak Kopma Mukavemeti

3.9 Sürtünme Katsayısı (C.O.F)

Yapılan dinamik sürtünme katsayısı (COF) testlerinde, en düşük iç/iç temas değerinin saf PE filmde ölçüldüğü görülmüştür. PE numunesi için bu değer 0,19'dur. Geri dönüştürülmüş içerik arttıkça COF değerlerinde genel bir artış eğilimi gözlenmiştir. Ancak bu çalışmada, geri dönüştürülmüş malzeme yalnızca filmin orta katmanında (core layer) kullanılmıştır. Bu durum, COF değerlerine etkisinin doğrudan yüzey özelliklerinden değil, film genel yapısının ve iç gerilimlerinin değişmesinden kaynaklandığını düşündürmektedir.

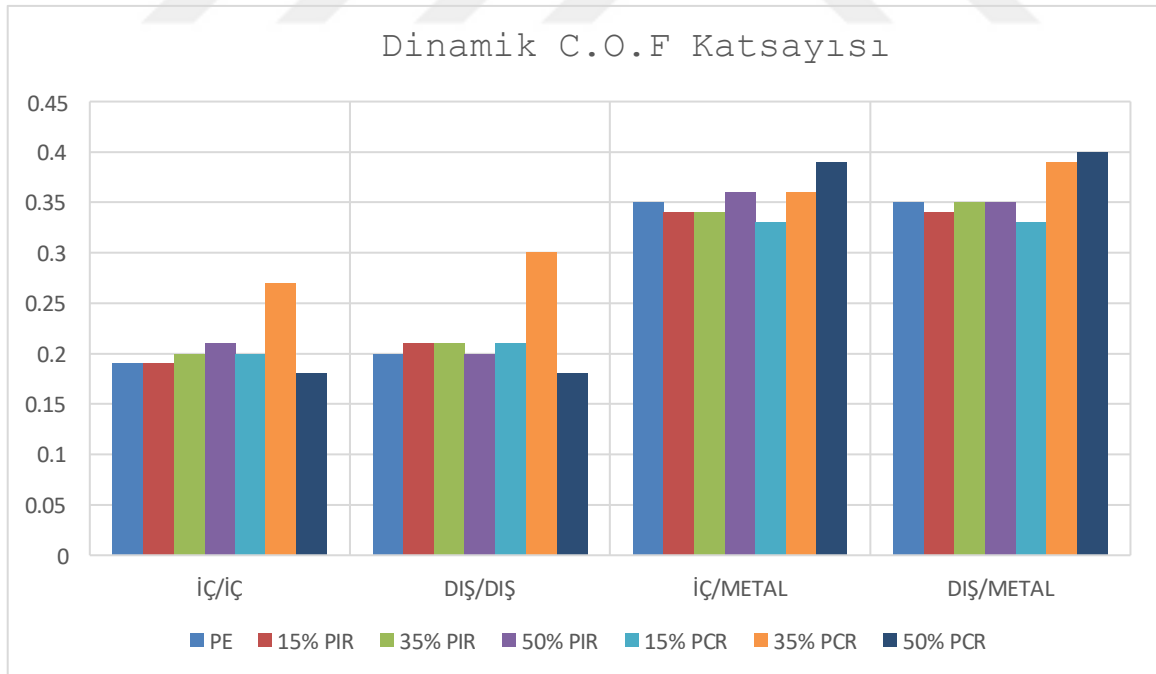
İç/iç temas sürtünme katsayısı, PE dış yüzeye sahip numunelerde dahi geri dönüştürülmüş içerik oranı arttıkça kısmen yükselmiştir. Bu durum, orta katmanda yer alan geri dönüştürülmüş polimerin film kalınlığı boyunca yaydığı içsel yapı etkisi ile açıklanabilir. Özellikle %50 PCR içeren filmlerde iç/iç COF değeri 0,27'ye kadar çıkmış ve PE'ye göre %42,1 artış göstermiştir. Bu artış, yüzey pürüzlülüğünden çok, çekme davranışı sonrası oluşan mikroskobik deformasyonlar ve gerginlikler ile ilişkilendirilebilir.

Dış/metal ve iç/metal temaslarında, COF değerleri tüm numunelerde görece yüksek çıkmıştır (0,33–0,40 aralığında). Bu da dış katman PE olsa dahi, filmin genel rijitliği ve çekme sonrası geri yaylanma davranışının, metal yüzeye olan temasın sürtünme tepkisini artırdığını

göstermektedir. Özellikle %50 PIR içeren filmde dış/metal COF değeri 0,40'a ulaşmıştır. Bu, sadece dış katmanın değil, film içi katman uyumsuzluğunun da sürtünme davranışına etkisi olduğunu gösterir.

Tablo 3. 13 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin C.O.F katsayıları

Gruplar	Sürtünme Katsayısı (Dinamik)			
	İÇ/İÇ	DIŞ/DIŞ	İÇ/METAL	DIŞ/METAL
	1,96 N			
Ortalama				
PE	0.19	0.2	0.35	0.35
15 PCR	0.19	0.21	0.34	0.34
15 PIR	0.2	0.21	0.34	0.35
35 PCR	0.21	0.2	0.36	0.35
35 PIR	0.2	0.21	0.33	0.33
50 PCR	0.27	0.3	0.36	0.39
50 PIR	0.18	0.18	0.39	0.4



Şekil 3. 15 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin C.O.F Katsayıları

PIR katkılı filmlerde, COF değerlerinde daha dengeli bir seyir izlenmiştir. Bunun nedeni, PIR malzemesinin üretim sürecinden daha kontrollü gelmesi ve karışıma daha homojen dağılması olabilir. Orta katmandaki PIR katkısının dış katmana sınırlı etkisi olduğu, ancak yine de film genel performansına katkıda bulunduğu söylenebilir.

Barros ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan çalışmada da, geri dönüştürülmüş PE malzemelerin çok katmanlı ambalaj yapılarında sadece orta katmanda kullanılması ile hem güvenlik hem de performans açısından dengeli bir çözüm elde edilebileceği gösterilmiştir. Araştırmada, dış katmanlarda saf (virgin) PE, iç katmanda ise post-consumer PE (R1 ve R2) kullanılarak üretilen üç katmanlı filmlerde, dış yüzeyin geri dönüştürülmüş içerikten etkilenmediği ve bu yapının işlenebilirlik açısından avantaj sunduğu belirtilmiştir. Bu yapı sayesinde, geri dönüştürülmüş katmanın oluşturabileceği yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal migrasyon riski minimize edilebilmiş, ayrıca işlevsel bariyer etkisi sağlanarak ambalaj güvenliği korunmuştur. Bu sonuçlar, tez kapsamında geri dönüştürülmüş malzemenin yalnızca orta katmanda kullanılması yönündeki tercih ile doğrudan örtüşmekte ve bu yaklaşımın hem teknik hem de çevresel açıdan uygulanabilirliğini desteklemektedir.[23]

Bu durum, yüzeyin fiziksel yapısının yanı sıra, film içindeki katmanlar arası gerilim dağılımı, işlenebilirlik ve deformasyon altında davranış gibi parametrelerin de COF değerleri üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, geri dönüştürülmüş malzemenin sadece yüzeyde değil, iç yapıda nerede kullanıldığına da sürtünme özellikleri açısından kritik bir faktör olduğu ortaya çıkmaktadır.

3.10 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) analizi, polimerik malzemelerin termal özelliklerini değerlendirmek ve kristallik oranını belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, saf polietilen (PE) ile çeşitli oranlarda geri dönüştürülmüş içerik (PCR ve PIR) içeren çok katmanlı film numunelerinin kristalizasyon davranışı değerlendirilmiştir. Analizler, Erime sıcaklığı (T_m) ve erime entalpisi (ΔH) üzerinden yürütülmüş, kristalinite yüzdesi (%Xc) hesaplamalarında %100 kristalin PE için kabul edilen teorik ΔH değeri olan 293 J/g referans alınmıştır.

Test sonuçlarına göre, saf PE numunesi 119,49 °C kristal erime sıcaklığı ve 125,68 J/g kristal erime entalpi değeriyle en yüksek kristalinite oranını (%42,9) göstermiştir. Bu değer, saf yapılı polietilenin düzenli moleküler yapısına bağlı olarak yüksek kristalizasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Geri dönüştürülmüş içerik oranı arttıkça kristalinite değerlerinde genel bir düşüş eğilimi gözlemlenmiştir.

PCR katkılı filmler için %15, %35 ve %50 içeriklerde kristalinite oranları sırasıyla %40,3, %37,8 ve %38,8 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, PCR katkısının kristalinite üzerinde sınırlı ama istikrarlı bir azalma etkisi yarattığını göstermektedir.

Buna karşılık, PIR içeriği ile üretilen filmlerde kristalinite oranındaki düşüş daha belirgindir. %15 PIR katkılı filmde %30,0, %35 PIR'da %26,4 ve %50 PIR'da %31,5 kristalinite oranı elde edilmiştir. Bu durum, PIR malzemelerinin zincir uzunluğunda, düzenliliğinde veya katkı kalitesinde daha fazla varyasyon barındırabileceğine işaret etmektedir.

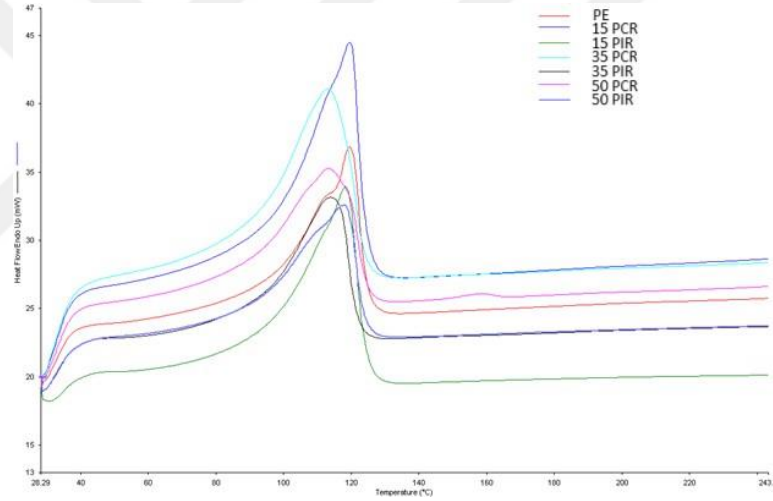
Ayrıca erime sıcaklıklarındaki farklılıklar da dikkat çekicidir. PCR katkılı filmlerde T_m değerleri saf PE'ye kıyasla yaklaşık 6 °C daha düşük çıkarken, PIR katkılı numunelerde bu düşüş daha sınırlıdır. Özellikle %50 PIR katkılı filmde T_m 117,89 °C olarak ölçülmüş, bu da katkı oranına rağmen belirli bir kristallenme düzenini koruyabildiğini göstermektedir.

Bu bulgular, geri dönüştürülmüş içeriklerin polietilen matrisindeki kristal yapıyı ne ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Kristalinite oranlarındaki azalma, özellikle mekanik özelliklerin ve bariyer performansının düşmesine neden olabilir. Bu nedenle, çok katmanlı yapılar içerisinde geri dönüştürülmüş içeriğin optimize edilerek kullanılması, hem performans hem de sürdürülebilirlik açısından kritik önem taşımaktadır.

Teste alınmış numunelerin zirve erime noktaları T_m , Entalpi ısı ΔH ve kristallik yüzdesi %X Değerleri Tablo 3. 14 gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 3. 16 da ise Perkin Elmer cihazından elde edilmiş grafiklerin birlikte gösterimine ulaşılabilir.

Tablo 3. 14 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin T_m , ΔH ve %X Değerleri

	T_m (°C)	ΔH (J/g)	%X
PE	119.49	125.68	42.9
15 PCR	119.70	117.94	40.3
15 PIR	118.20	87.85	30.0
35 PCR	113.09	110.67	37.8
35 PIR	113.87	77.27	26.4
50 PCR	113.18	113.75	38.8
50 PIR	117.89	92.21	31.5



Şekil 3. 16 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin DSC Grafiği

Cecon ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan bir çalışmada da, çok katmanlı ambalaj filmlerinden STRAP (solvent targeted recovery and precipitation) yöntemiyle geri kazanılan polimerlerin termal özellikleri değerlendirilmiştir. DSC analizlerinde, geri kazanılan PE numunelerinin kristalinite oranlarının, kullanılan reçinelerin karışım oranlarına ve çözücü kalıntılarına bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirtilmiştir. Özellikle antisolvent ile çöktürme yöntemi kullanılan numunelerde, kristalinite oranlarının soğutma ile çöktürülenlere kıyasla yaklaşık %10 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, bazı katkıların (örneğin EVA) amorf yapıyı artırarak kristal yapıyı bozduğu şeklinde yorumlanmıştır. Ayrıca, çözücü

kalıntılarının kristaliniteyi düşürdüğü ancak yeterli kurutma işlemi ile bu etkinin geri kazanılabileceği belirtilmiştir. Bu bulgular, geri dönüştürülmüş PE içeriğinin kristalin yapıya etkisini anlamak açısından önemli ipuçları sunmakta ve çalışmamızda gözlemlenen kristalinite azalmasıyla paralellik göstermektedir. [32]

3.11 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) analizi, polimer yapılarının karakterizasyonunda kullanılan temel bir yöntemdir. Bu çalışmada, saf PE ve geri dönüştürülmüş içerikli (PCR ve PIR) çok katmanlı film numuneleri FTIR ile incelenmiş ve fonksiyonel grup değişimleri değerlendirilmiştir.

Tüm spektrumlarda, tipik PE bantları gözlemlenmiştir:

2914 cm^{-1} ve 2848 cm^{-1} : Alifatik $-\text{CH}_2-$ asimetrik ve simetrik gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir.

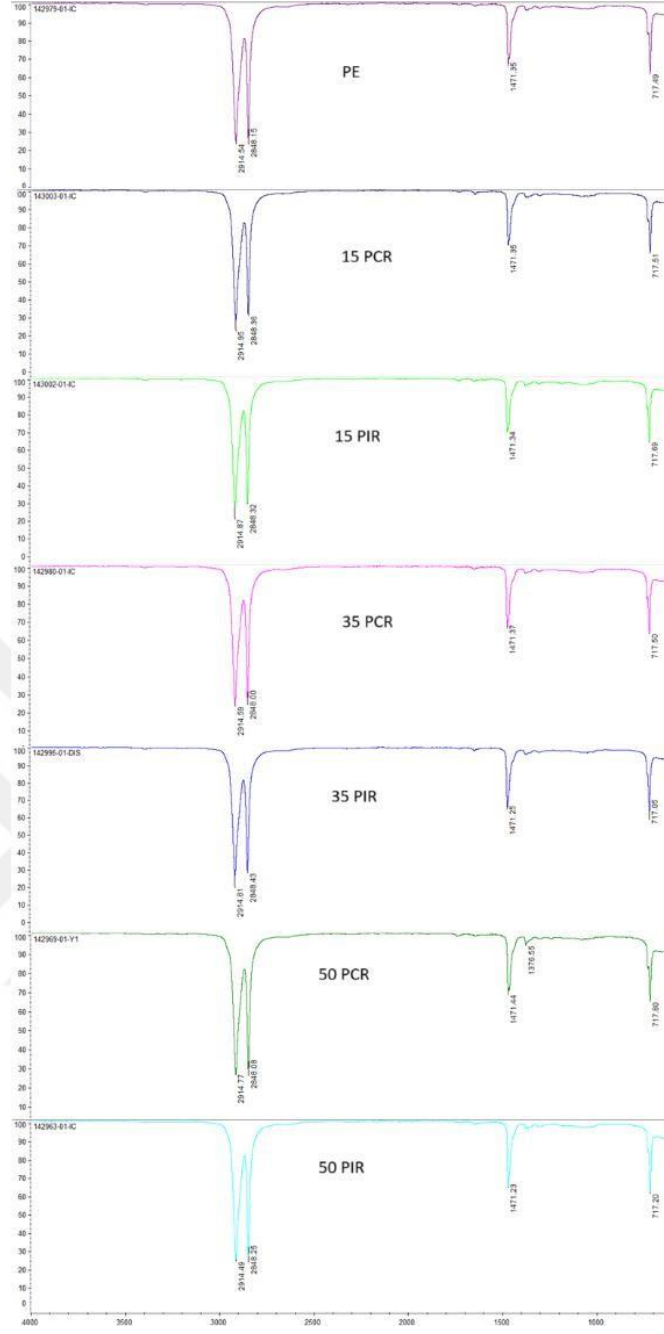
1463 cm^{-1} ve 719 cm^{-1} : Sırasıyla $-\text{CH}_2-$ bükülme (scissoring) ve dışa doğru bükülme (rocking) titreşimlerini temsil etmektedir.

Bu bantlar, tüm numunelerde mevcut olup, PE'nin temel yapısının korunduğunu göstermektedir.

Geri dönüştürülmüş içerikli numunelerde (özellikle PCR içeren gruplarda), bazı küçük spektral varyasyonlar dikkat çekmektedir:

15 PCR ve 35 PCR numunelerinde, 1463 cm^{-1} bölgesinde banta göre hafif genişleme veya omuzlanma görülmekte olup bu durum, katkılı veya bozunmuş PE fraksiyonlarının varlığına işaret edebilir.

PIR katkılı numunelerde ise PE'ye benzer ve daha net bant yapıları gözlemlenmiştir; bu da PIR içeriğinin daha homojen ve az bozunmuş yapıda olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. 17 Geri Dönüştürülmüş PE İçeren Filmlerin FTIR Görüntüleri

Ayrıca bazı spektrumlarında, özellikle 50 PCR ve 35 PIR gibi yüksek geri dönüştürülmüş içerikli numunelerde, $1710\text{--}1730\text{ cm}^{-1}$ aralığında zayıf bir absorpsiyon bandı dikkat çekmektedir. Bu bant, ester karbonil ($\text{C}=\text{O}$) gruplarına karşılık gelebilir ve geri dönüştürülmüş malzemelerde oksidatif bozunmanın bir göstergesi olabilir. Ancak bu bant çok zayıf olduğundan, polimer yapısında büyük bir kimyasal değişiklik olmadığını göstermektedir.

Küçükdoğan ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan çalışmada, kağıt üretim atıkları ile takviye edilmiş YYPE kompozitlerinde FTIR analizi gerçekleştirilmiş ve katkı maddelerine ait karakteristik bantlar açıkça gözlemlenmiştir. Çalışmada, kalsit varlığına işaret eden 1410, 870 ve 710 cm^{-1} ; selülozun C–O gerilme titreşimine ait 1030 cm^{-1} ; ve selülozun O–H gruplarına karşılık gelen geniş absorpsiyon bandı ise 3500–3200 cm^{-1} aralığında tespit edilmiştir. Bu bantlar, katkı içeren PE yapılarında FTIR ile yüzey ya da yapısal analiz yapıldığında, katkı kalıntıları ya da bozunma ürünleri gibi yeni bantların da ortaya çıkabileceğini göstermektedir. Bu bulgu, çalışmamızda özellikle PCR katkılı numunelerde gözlemlenen zayıf ek bantların, dışsal katkı ya da bozunma kaynaklı olabileceğini desteklemektedir.[33]

Çalışmada geri dönüştürülmüş PE içeriği yalnızca film yapısının orta katmanında kullanılmıştır. Buna rağmen, bazı FTIR spektrumlarında zayıf ek bantların gözlemlenmiş olması, orta katmanda yer alan geri dönüştürülmüş malzemenin yüzeye doğrudan temas etmesi de, tüm film yapısındaki moleküler düzeni etkileyebileceğini göstermektedir. Özellikle katmanlar arası polimer uyumu, gerginlik aktarımı ve termal geçişin bu tür spektral değişimlere yol açabileceği düşünülmektedir. Bu durum, FTIR analizinde görülen küçük sapmaların, yüzey kontaminasyonu yerine içyapısal etkilerden kaynaklanabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, FTIR analizi, hem saf PE hem de geri dönüştürülmüş içerikli filmlerin temel kimyasal yapılarında önemli bir bozulma olmadığını göstermektedir. Ancak bazı spektral sapmalar, özellikle PCR katkılı numunelerde gözlemlenen yapısal varyasyonlara ve olası katkı kalıntılarına işaret etmektedir. PIR içeriği daha homojen yapıya sahip olduğundan, PE'ye daha yakın ve düzenli spektrumlar sergilemiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, çok katmanlı esnek ambalaj filmleri üretiminde farklı oranlarda post-consumer (PCR) ve post-industrial (PIR) polietilen malzeme içeriği kullanılarak elde edilen yapıların optik, mekanik, termal ve kimyasal özellikleri sistematik şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, geri dönüştürülmüş içeriklerin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde ortaya koyarken, geri dönüşümün sürdürülebilir ambalaj üretimine katkı potansiyelini de göstermiştir.

Optik özellikler bakımından, parlaklık değerleri PIR ve PCR katkılarına rağmen büyük oranda korunmuş; bu durumun, geri dönüştürülmüş malzemenin yalnızca orta katmanda kullanılması ve dış katmanların saf PE ile oluşturulması sayesinde mümkün olduğu değerlendirilmiştir. Bu üretim stratejisi, ambalaj yüzey estetiğinin sürdürülebilirlikten ödün vermeden sağlanabileceğini göstermektedir.

Mekanik test sonuçlarında ise, özellikle PIR içeriğinin %15–50 aralığında kullanılması durumunda çekme ve kopma mukavemetinde ciddi bir performans kaybı yaşanmadığı, hatta bazı oranlarda saf PE'ye benzer ya da daha yüksek değerlere ulaşıldığı görülmüştür. PCR katkılı filmlerde ise yüksek oranlarda çekme ve uzama davranışlarında daha fazla bozulma kaydedilmiş, ancak %15 katkı oranı birçok özellik açısından kabul edilebilir sınırdadır.

Kopma ve çekme uzaması testlerinde en dikkat çekici bulgu, PIR içeriği ile üretilen filmlerde daha istikrarlı ve homojen bir uzama davranışının gözlemlenmiş olmasıdır. Bu durum, PIR'ın üretimden kaynaklı daha kararlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, blown film üretim yöntemine bağlı olarak enine yönde daha yüksek uzama değerlerinin elde edilmesi, şişirme oranının polimer zinciri yönelimi üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

Elastisite modülü analizleri, hem boyuna hem de enine yönlerde geri dönüştürülmüş içerik arttıkça rijitlikte azalma olduğunu göstermiştir. Bu azalma, PCR katkılı filmlerde daha belirgin olurken, PIR katkısında daha sınırlı kalmıştır. Bu durum, PCR malzemelerin daha fazla yapısal kusur ve moleküler dağınıklık içerdiğini göstermektedir.

DSC analizleri, geri dönüştürülmüş içerik arttıkça kristalinite oranlarında düşüş olduğunu ortaya koymuş; PIR içeriği ile elde edilen filmlerde bu düşüş daha belirgin olmuştur. Kristalizasyon sıcaklıklarındaki düşüş ve entalpi değerlerindeki değişimler, özellikle zincir yapısındaki bozulmalara ve katkı kaynaklı amorf fazların artışına işaret etmiştir.

FTIR analizleri, PE'nin temel kimyasal yapısının büyük ölçüde korunduğunu ancak bazı PCR katkı numunelerde düşük yoğunluklu absorpsiyon bantlarının ortaya çıktığını göstermiştir. Bu durum, katkı maddeleri veya yapısal bozulmaların spektrumlara yansıdığını göstermektedir. Önemli bir bulgu da şudur ki: Geri dönüştürülmüş malzemenin sadece orta katmanda yer alması, spektrumlara yansıyan etkileri sıfırlamamış; bu da orta katmanın dahi film genelindeki moleküler düzeni etkileyebileceğini göstermektedir.

Sürtünme katsayısı sonuçlarında ise dış katmanın saf PE olmasına rağmen, özellikle yüksek PCR içeriklerinde COF değerlerinde artış kaydedilmiştir. Bu durum, yüzey değil içyapı kaynaklı deformasyonların ve iç gerilimlerin yüzeye etkisini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, geri dönüştürülmüş PE malzemelerin çok katmanlı film yapılarında yalnızca orta katmana entegre edilerek kullanılmasının, hem optik hem de mekanik performans üzerinde önemli kazanımlar sağladığını ve geri dönüşümün işlevsel ambalaj performansı ile uyumlu hale getirilebileceğini ortaya koymuştur. PIR içeriklerinin daha kontrollü ve homojen bir yapıya sahip olması sayesinde, malzeme özelliklerinin sürdürülebilir şekilde korunabildiği görülmüştür. Bu bağlamda, ileriye dönük çalışmalarda farklı katkı sistemleri ve çok katmanlı yapıların mühendislik tasarımlarıyla desteklenerek, geri dönüşümün daha da yaygınlaştırılabileceği değerlendirilmektedir.

Bu sonuçlar, elde edilen çok katmanlı filmlerin çeşitli ambalaj uygulamalarındaki potansiyel performanslarını değerlendirmek açısından da önemli ipuçları sunmaktadır. Örneğin, bebek bezi torbası gibi yumuşak, taşıma dayanımı gerektiren ambalajlarda, kopma ve kaynak mukavemeti gibi parametreler kritik rol oynamaktadır. Çalışmada elde edilen veriler, özellikle %15–35 aralığında PIR katkısı içeren filmlerin bu tür uygulamalarda yüksek performans gösterebileceğini, dayanım ve esneklik açısından yeterli olabileceğini ortaya koymuştur.

Stand-up pouch gibi dik durması gereken, formunu koruması ve aynı zamanda sızdırmazlık sağlaması beklenen yapılar için elastisite modülü, kaynak mukavemeti ve COF değerleri önem

arz etmektedir. PIR katkılı filmlerin bu tür uygulamalarda daha dengeli rijitlik ve sürtünme performansı gösterdiği, ayrıca kaynak bölgesinde daha az deformasyon eğilimi sunduğu gözlemlenmiştir. Bu da PIR katkılı orta katman yapısının stand-up pouch üretiminde işlenebilirliği artırabileceğini göstermektedir.

Genel gıda ve gıda dışı ambalaj uygulamalarında ise optik görünüm, temas güvenliği ve fiziksel dayanıklılık gibi çoklu kriterler bir arada önem taşımaktadır. Orta katmana yerleştirilen geri dönüştürülmüş PE'nin optik özelliklere etkisinin sınırlı olması sayesinde, dış yüzeyde parlaklık ve düzgünlük korunabilmekte, bu da tüketici algısı açısından olumlu bir durum yaratmaktadır. Gıda dışı ambalajlarda ise COF değerlerinin ayarlanabilirliği, paketlenme makinesi verimliliği açısından avantaj sağlayabilir.

Dolayısıyla, bu çalışmada geliştirilen çok katmanlı film yapıları, geri dönüştürülmüş malzemelerin yalnızca çevresel katkı değil, aynı zamanda ambalaj mühendisliği açısından performansa dayalı bir çözüm olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir.

4.2. Öneriler

Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda, ileriye dönük araştırmalar ve uygulama geliştirmeleri için aşağıdaki alanlara odaklanılması önerilmektedir:

Geri dönüştürülmüş içerik optimizasyonu: PIR ve PCR içeriğinin belirli oranların üzerine çıktığında bazı mekanik ve optik özelliklerde bozulma eğilimleri gözlemlenmiştir. Bu nedenle, özellikle PCR katkılı filmlerde %15 üzerindeki kullanım oranları detaylı biçimde optimize edilmelidir. Uygulamaya özel olarak, işlevsel sınır değerler belirlenmeli ve performans kaybı yaşanmadan maksimum geri dönüştürülmüş içerik oranı tanımlanmalıdır.

Yüzey modifikasyonu ve katkı malzemeleri kullanımı: Orta katmana entegre edilen geri dönüştürülmüş PE'nin dahi film yüzey özelliklerine etki ettiği gözlemlenmiştir. Bu etki, COF değerlerindeki artış ve parlaklıktaki azalma ile açıklanabilir. Bu tür değişimlerin önüne geçebilmek için, yüzey modifikasyon teknikleri (örneğin korona, plazma, lak uygulamaları) ve uygun katkı maddeleriyle yüzey düzgünlüğü ve kayganlık artırılabilir.

Kaynak mukavemeti ve işlenebilirlik geliştirmeleri: Geri dönüştürülmüş içeriğin kaynak bölgelerinde bağlanma kuvvetini azalttığı belirlenmiştir. Bu durum, ambalajların taşıma ve kullanım performansı açısından risk oluşturabilir. Farklı kaynak sıcaklıkları, basınç

parametreleri ve kaynak ajanları ile işlenebilirlik testleri genişletilmeli ve kaynak kalitesi optimize edilmelidir.

Geri dönüştürülmüş malzeme kalitesinin iyileştirilmesi: PCR kaynaklı içeriklerde daha fazla dalgalanma ve yapısal bozulma tespit edilmiştir. Bu bağlamda, geri dönüşüm proseslerinin kalitesi yükseltilmeli; özellikle ayırma, temizleme ve filtrasyon adımları geliştirilmeli; ayrıca prime kaliteye daha yakın özelliklerde geri dönüştürülmüş hammaddeler elde edilmeye çalışılmalıdır.

Uygulama bazlı değerlendirme ve ürün uygunluğu: Elde edilen çok katmanlı filmlerin farklı ambalaj türleri (örneğin bebek bezi torbaları, stand-up pouch'lar, gıda ve gıda dışı ambalajlar) için uygunluğu, ürün bazında performans testleriyle değerlendirilmelidir. Bu kapsamda, işlenebilirlik, darbe dayanımı, sızdırmazlık ve raf ömrü gibi parametreler göz önünde bulundurularak uygulama rehberleri oluşturulmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1]. Saçak, M., (1998), Polimer Kimyasına Giriş, Ankara, sayfa 3-4
- [2] Lamtai, A., Elkoun, S., Robert, M., Mighri, F., & Diez, C. (2023). *Mechanical Recycling of Thermoplastics: A Review of Key Issues*. *Waste*, 1(4), 860–883.
- [3] Zhang, Y., Li, J., Chen, H., et al. (2022). *Closed-loop chemical recycling of thermosetting polymers and their applications: a review*. *Green Chemistry*, 24(10), 3980–4001.
- [4] Fazli, A., & Rodrigue, D. (2020). Waste Rubber Recycling: A Review on the Evolution and Properties of Thermoplastic Elastomers. *Materials*, 13(3), 782.
- [5]. Keleş M.K., (2018) Sanayi kaynaklı düşük yoğunluklu polietilen (ldpe) shrink filmi ambalaj atıklarından ve akrilik elyaf teleflerinden elektrospinning yöntemiyle membran üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye, 5-6
- [6]. Mark A. Spalding & Ananda M. Chatterjee, (2018) Handbook of Industrial Polyethylene and Technology, 1st Edition., Scrivener Publishing LLC, (3-24)
- [7]. Özkan, A.N. (2024) Providing conductive properties to polyolefins; Examining their thermal and mechanical properties, Doktora Tezi, Manisa Celal Bayar University Graduate school of natural and applied science institute, Manisa, Türkiye, 3-10
- [8]. Riley Arthur, (2012), Basics of polymer chemistry for packaging materials, Packaging technology. Woodhead Publishing, sayfa 262-277
- [9]. Crawford, R. J., & Throne, J. L. (2003). Rotational Molding Polymers. Rotational Molding Technology, 1st Edition., William Andrew, 23-24.
- [10]. Butler, T. I., & Morris, B. A. (2016). PE-Based Multilayer Film Structures. Multilayer Flexible Packaging, 2nd Edition., 205–310
- [11]. L. Delva, L. Cardon, K. Ragaert, (2014), On the Effect of Injection Moulding Blends of Post-consumer Mixed Polyolefines with Virgin Polyethylene, in: I Visa (Ed.), Sustainable Energy in the Built Environment - Steps Towards nZEB Springer Proceedings in Energy, Springer International Publishing, pp. 473–481.

- [12]. Cecon, V. S., Da Silva, P. F., Vorst, K. L., Curtzwiler, G. W., (2021), The effect of post-consumer recycled polyethylene (PCRPE) on the properties of polyethylene blends of different densities. *Polymer Degradation and Stability*, 190 (109627).
- [13]. https://rme.ravagomanufacturing.com/sites/default/files/RME_Ravapura_10_22_0.pdf, Erişim: 2025
- [14]. ASTM, D2457, (1997). Standard Test Method for Specular Gloss of Plastic Films and Solid Plastics. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [15]. ISO 527-1 (2012). Plastics—Determination of tensile properties—Part 1: General principles. International Organization of Standardization: Geneva, Switzerland.
- [16]. Hosseinabadi, F., Zebarjad, S. M., & Mazinani, M. (2011). Investigation on perforation mechanism of medium density polyethylene. In *Materials Science Forum* (Vol. 675, Trans Tech Publications Ltd, sayfa 387-390).
- [17]. ASTM F88/F88M-15, (2015), Standard test method for seal strength of flexible barrier materials.
- [18]. Dawidowicz, A. L., Nowakowski, P., Typek, R., & Dybowski, M. P. (2019). Effect of food packaging material on some physicochemical properties of polyacrylate varnish layers. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100370
- [19]. Lynch, J. M., Corniuk, R. N., Brignac, K. C., Jung, M. R., Sellona, K., Marchiani, J., & Weatherford, W. (2024). Differential scanning calorimetry (DSC): An important tool for polymer identification and characterization of plastic marine debris. *Environmental Pollution*, 346, 123607.
- [20]. Poh, L., Wu, Q., Chen, Y., & Narimissa, E. (2022). Characterization of industrial low-density polyethylene: A thermal, dynamic mechanical, and rheological investigation. *Rheologica Acta*, 61(10), 701–720. <https://doi.org/10.1007/s00397-022-01360-1>
- [21]. Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy* (2nd ed.). CRC Press. 25-33, 130-147.
- [22]. Soto, J. M., Blázquez, G., Calero, M., Quesada, L., Godoy, V., & Martín-Lara, M. Á. (2018). A real case study of mechanical recycling as an alternative for managing polyethylene

plastic film presented in mixed municipal solid waste. *Journal of Cleaner Production*, 203, 777-787.

[23]. Barros, C., Carneiro, O. S., & Machado, A. V. (2024). From multilayer LDPE/EVOH flexible film scraps to new multilayer films. *Polymer*, 314, (127695).

[24]. Reis, J. M. L., Pacheco, L. J., & da Costa Mattos, H. S. (2013). *Tensile behavior of post-consumer recycled high-density polyethylene at different strain rates*. *Polymer Testing*, 32(2), 338–342. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.11.007>

[25]. Czarnecka-Komorowska, D., Wiszumirska, K., & Garbacz, T. (2018). *Films LDPE/LLDPE made from post-consumer plastics: Processing, structure, mechanical properties*. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 12(3), 134–142. <https://doi.org/10.12913/22998624/92205>

[26]. Cecon, V. S., Galland, G. B., & Mauler, R. S. (2021). Dataset of the properties of polyethylene (PE) blends of different densities mixed with post-consumer recycled polyethylene (PCRPE). *Data in Brief*, 36, (107134)

[27]. Konuk, A., Kara, A., Efe Çiğdem, B., Arkon, E., Özmen, İ., & Yıldırım, Ö. L. (2024). *Mekanik Geri Dönüştürme Yöntemi ile Elde Edilen Granüllerin Polietilen Film Üretiminde Tekrar Kullanılması ve Kalitesinin Değerlendirilmesi*. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 7(1), 36–48.

[28]. Tesfaw, S., Bogale, T. M., & Fatoba, O. (2022). *Evaluation of tensile and flexural strength properties of virgin and recycled high-density polyethylene (HDPE) for pipe fitting application*. *Materials Today: Proceedings*, 62, 3103–3113. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.385>

[29]. Cuesta, F., Camacho, A. M., & Rubio, E. M. (2023). *Influence of the main blown film extrusion process parameters on the mechanical properties of a high-density polyethylene hexene copolymer and linear low-density polyethylene butene copolymer blend used for plastic bags*. *Applied Sciences*, 13(22), 12164. <https://doi.org/10.3390/app132212164>

[30]. Drozdov, A. D., Høj Jermin, R., & de Claville Christiansen, J. (2023). *Lifetime Predictions for High-Density Polyethylene under Creep: Experiments and Modeling*. *Polymers*, 15(2), 334. <https://doi.org/10.3390/polym15020334>

- [31]. Orzan, E., Janewithayapun, R., Gutkin, R., Lo Re, G., & Kallio, K. (2021). *Thermo-mechanical variability of post-industrial and post-consumer recycle PC-ABS*. *Polymer Testing*, 99, 107216. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107216>,
- [32]. Cecon, V. S., Curtzwiler, G. W., & Vorst, K. L. (2022). A Study on Recycled Polymers Recovered from Multilayer Plastic Packaging Films by Solvent-Targeted Recovery and Precipitation (STRAP). *Macromolecular Materials and Engineering*, 307(11), 2200346. <https://doi.org/10.1002/mame.202200346>
- [33]. K uc kdoğan, N., Halis, S., S t c , M., Sarıkanat, M., Seki, Y., & Sever, K. (2017). Kağıt  retim atığı katkılı yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi M hendislik Bilimleri Dergisi*, 23(8), 949–953. <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.27790>