ATIK VE SAF YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN (HDPE) POLİMER KARIŞIMLARINDAN ÜRETİLEN MONOFİLAMENT VE BİKOMPONENT FİLAMENTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Oumayma REZGUI

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK VE SAF YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN (HDPE) POLİMER KARIŞIMLARINDAN ÜRETİLEN MONOFİLAMENT VE BİKOMPONENT FİLAMENTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Oumayma REZGUI
0009-0007-3814-6741

Doç. Dr. Fatih SÜVARİ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ATIK VE SAF YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN (HDPE) POLİMER KARIŞIMLARINDAN ÜRETİLEN MONOFİLAMENT VE BİKOMPONENT FİLAMENTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Oumayma REZGUI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih SÜVARİ

Bu tez, artan çevre kirliliği ve atık yönetimi sorunlarına odaklanarak, polietilen atıklarının geri dönüşüm potansiyelini araştırmaktadır. Özellikle yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) atıklarının yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Çalışma, atık ve saf HDPE polimer karışımlarından üretilen monofilament ve bikomponent filamentlerin mekanik özelliklerini incelemektedir. Ekstrüzyon işlemleri kullanılarak iki tür filament üretilmiştir: monofilamentler ve merkez-dış yapıda bikomponent filamentler. Monofilamentler, atık ve saf HDPE karışımından tek bir filament olarak üretilirken, bikomponent filamentler merkez kısımda atık HDPE, dış kısımda ise saf HDPE bulundurmaktadır. Üretilen filamentlerin mekanik özellikleri çekme ve kopma testleri, DSC, MFR gibi analiz yöntemleri ile incelenmiştir. Sonuçlar, ekstrüder hızının filamentlerin kalınlığını etkilediğini ve daha yüksek hızların filament üretimini artırdığını göstermiştir. Atık ve saf HDPE karışımından üretilen monofilamentler, %100 atık HDPE'den üretilenlere göre daha yüksek çekme mukavemeti sağlamıştır. Ancak, saf-atık karışımında kristalizasyon düşüşü tespit edilmiştir. Bunu önlemek için, bikomponent teknolojisi ile merkezde atık HDPE, dış kısımda ise saf HDPE kullanılan filamentler üretilmiştir. Bu bikomponent filamentler, %100 atık HDPE'den üretilen monofilamentlere kıyasla çekme mukavemetini %67'den fazla arttırmıştır. Bulgular, HDPE atıklarının etkin yönetimine ve sürdürülebilir malzeme geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu araştırma, atık HDPE'nin tekstil endüstrisine kazandırılmasına dair önemli katkılar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Geri Dönüştürülmüş HDPE, Saf HDPE, Monofilament, Bikomponent Filament, Mekanik Özellikler, Sürdürülebilirlik, Polietilen geri dönüşümü.
2024, xv + 72 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MONOFILAMENT AND BICOMPONENT FILAMENTS PRODUCED FROM WASTE AND VIRGIN HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE) POLYMER MIXTURES

Oumayma REZGUI

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Textile Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih SÜVARİ

This thesis focuses on the issues of increasing environmental pollution and waste management, particularly investigating the recycling potential of polyethylene waste. The management of high-density polyethylene (HDPE) waste is of great importance for environmental sustainability. The study examines the mechanical properties of monofilament and bicomponent filaments produced from mixtures of waste and virgin HDPE polymers. Using extrusion processes, two types of filaments were produced: monofilaments and core-sheath structured bicomponent filaments. Monofilaments were produced as single filaments from a mixture of waste and virgin HDPE, while bicomponent filaments comprised waste HDPE in the core and virgin HDPE on the sheath layer. The mechanical properties of the produced filaments were analyzed using tensile and breaking tests, DSC, and MFR methods. The results showed that the extrusion speed affected the thickness of the filaments and that higher speeds increased filament production. Monofilaments produced from waste and virgin HDPE mixtures exhibited higher tensile strength compared to those made from 100% waste HDPE. However, a decrease in crystallization was observed in the virgin-waste mixture. To address this, filaments with a core of waste HDPE and a sheath layer of virgin HDPE were produced using bicomponent technology. These bicomponent filaments increased tensile strength by more than 67% compared to monofilaments produced from 100% waste HDPE. The findings contribute to the effective management of HDPE waste and the development of sustainable materials. This research provides significant contributions to the incorporation of waste HDPE into the textile industry.

Keywords: Recycled HDPE, Pure HDPE, Monofilament, Bicomponent Filament, Mechanical Properties, Sustainability, Polyethylene recycling.
2024, xv + 72 pages.

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanmasında katkı sağlayan tüm kişi ve kurumlara teşekkür ederim. Özellikle, çalışma süresince bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan danışman hocam Doç. Dr. Fatih Süvari'ye şükranlarımı sunarım.

Her zaman yanımda olan ve bana inanan sevgili aileme tüm sevgimi sunuyorum. Yıllardır uzakta olmama rağmen, onların güveni, şefkati ve sevgisi beni her gün güçlendiriyor ve doğru yolda ilerlememi sağlıyor. Bugün olduğum kişi olmamda büyük katkıları olduğu için kendilerine bir minnet duyuyorum.

Moral ve motivasyon kaynağım olan arkadaşlarıma ve bu süreçte bana inanan tüm sevdiklerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bizi terk eden SALAH BABA'nın anısına.

Oumayma REZGUI
25/06/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 1
2.1. Polimer Filamentlere Giriş ve Geri Dönüşümü 3
2.2. Polietilen Lifleri (PE) Hakkında Genel Bilgiler ve Özellikleri 4
2.2.1. Polietilen Lifleri (PE) 4
2.2.2. Farklı Polietilen Polimer Türleri 4
2.3. Polietilen Geri Dönüşümü 10
2.4. Monofilament ve Bikomponent Bileşenli Filament Üretimi 13
2.4.1. Monofilament Üretimi 13
2.4.2. Bikomponenet Liflerin Üretimi 14
3. MATERYAL ve YÖNTEM 20
3.1. Materyal 20
3.2. Üretim Yöntemi 21
3.3. Monofilamet ve Bikomponent Filamentlerin karakterizasyonu 23
3.3.1. Filament Numarasının Belirlenmesi 23
3.3.2. Mukavemet ve Uzama Testleri 23
3.3.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testi 24
3.3.4. MFR Testi 25
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 26
4.1. Monofilament Yapıların İncelenmesi 26
4.1.1. Atık HDPE ve Saf HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Numarasına Ekstrüder Hızının Etkisi 26
4.1.2. Atık HDPE ve Saf HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Kopma Yükü ve Mukavemet Sonuçları 28
4.1.3. %100 Atık, %50 Atık / %50 Saf ve %100 Saf HDPE'den Üretilmiş Monofilamentlerin Mukavemetlerinin İncelenmesi 32
4.2. Bikomponent Liflerin İncelenmesi 41
4.2.1. Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Merkez-Dış (Core-Sheath) Bikomponent Filamentlerin İncelenmesi 41
4.2.2. Atık HDPE (dış) ve Saf HDPE (merkez) Polimerinden Üretilen Merkez-Dış (Core-Sheath) Bikomponent Liflerin İncelenmesi 54
4.3. Tüm Filamentlerin Kıyaslanması 62
4.4. Bikomponent Filamentlerde Atık Oranı Arttıkça Mukavemetteki Değişimin İncelenmesi 64
5. SONUÇ 67
KAYNAKÇA 69
ÖZGEÇMİŞ 72

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
°C	Santigrat
CH2	Metilen
CH3	Metil grup
C	Karbon
dak	Dakika
mm	Milimetre
dev	devir
mg	Miligram
cm	Santimetre
kg	Kilogram
R^2	Regresyon katsayısı
g	Gram
s	Saniye
α	Anlamlılık seviyesi
J	Joule
K	Kristalizasyon derecesi

Kısaltmalar	**Açıklama**
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
PE	Polietilen
PETKİM	Petkim Petrokimya Holding A.Ş.
ISO	Uluslararası Standart Organizasyonu
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
BUTEKOM	Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi
MFR	Eriyik Akışkanlığı Hızı
ANOVA	Varyans Analizi
LSD	En Az Anlamlı Fark

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Polietilenin kimyasal gösterimi ……..……..……..	4
Şekil 2.2.	Rüzgâr kırıcı gölgelik ağının uygulamaları ..…….…….	7
Şekil 2.3.	HDPE yüzme havuzu örtüsü örneği …..…….	8
Şekil 2.4.	HDPE balık ağı örneği ……..…….…….…….……..	9
Şekil 2.5.	Üç boyutlu baskılı modeller ……..…….……	10
Şekil 2.6.	Atık balık ağları ……..…….……	13
Şekil 2.7.	Eriyikten çekim yöntemi…….…….……....	18
Şekil 2.8.	Elektro çekim yöntemi …….…….…….	19
Şekil 3.1.	Atık HDPE granüller …….……	20
Şekil 3.2.	Sentetik iplik üretim makinesi ……..…..	21
Şekil 3.3.	Uzunluk ölçümlerinin yapıldığı çıkrık cihazı …….	23
Şekil 3.4.	Shimadzu AG-X Plus mukavemet test cihazı ……...…….	24
Şekil 4.1.	Ekstrüder Hızına Bağlı Filament Numarası Değişimi …..…..……	27
Şekil 4.2.	HDPE atıkları ve saf HDPE karışımından üretilen monofilamentlerin kopma yükü değerleri……..……	28
Şekil 4.3.	HDPE atıkları ve saf HDPE karışımından üretilen monofilamentlerin LSD testi soncu ……..	29
Şekil 4.4.	HDPE atıkları ve saf HDPE karışımından üretilen monofilamentlerin mukavemet testi sonucu …….....……	30
Şekil 4.5.	HDPE atıkları ve saf HDPE karışımından üretilen monofilamentlerin mukavetmetinin LSD testi sonucu …….…	32
Şekil 4.6.	%100 atıktan, %50 atık - %50 saf HDPE'den ve %100 saf HDPE'den üretilen monofilamentlerin kopma yükünü grafiği…….....	33
Şekil 4.7.	%100 atıktan, %50 atık - %50 saf HDPE'den ve %100 saf hdpe'den üretilen monofilamentlerin kopma yükünün LSD testi sonucu ……	34
Şekil 4.8.	%100 atıktan, %50 atık / %50 saf HDPE'den ve %100 saf HDPE'den üretilen monofilamentlerin mukavemetinin testi soncu …….....	35
Şekil 4.9.	%100 atıktan, %50 atık - %50 saf HDPE'den ve %100 saf HDPE'den üretilen monofilamentlerin mukavemetinin LSD testi sonucu……...	36
Şekil 4.10.	%100 atık hdpe monofilament DSC testi sonucu (sıcaklık-ısı akış grafiği)…….	38
Şekil 4.11.	%50 atık - %50 saf karışım HDPE monofilament DSC testi sonucu (sıcaklık-ısı akış grafiği) ……...…….	38
Şekil 4.12.	%100 saf HDPE monofilament DSC testi sonucu (sıcaklık-ısı akış grafiği) …….……...	39
Şekil 4.13.	Nozülden hemen sonra iç içe bikomponent filament …….	41
Şekil 4.14.	Ekstrüder hızına bağlı atık HDPE (merkez) ve saf HDPE (dış) polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin numara değişimi ..…	42
Şekil 4.15.	HDPE atıkları (merkez) ve saf HDPE (dış) polimerinden üretilen bikomponent filament kopma yükü değerleri ……	44
Şekil 4.16.	Atık HDPE (merkez) ve saf HDPE (dış) polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin kopmayükünün LSD testi sonucu …….…..	45
Şekil 4.17.	Atık HDPE (merkez) ve saf HDPE (dış) polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin mukavemet testi sonucu …….	46

Şekil 4.18. Atık HDPE (merkez) ve saf HDPE (dış) polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin mukavemetlerinin LSD testi sonucu ……. 47
Şekil 4.19. Atık HDPE (merkez) ve saf HDPE (dış) polimerinden üretilen bikomponent filamentler ile %50 saf HDPE ve %50 atık HDPE karışımından üretilen monofilamentlerin mukavemetler…… 48
Şekil 4.20. Mukavemetin karşılaştırılması LSD testi soncu …..……..…. 49
Şekil 4.21. Merkez atık - dış saf (%50 - %50) bikomponent HDPE DSC testi sonucu (sıcaklık-ısı akış grafiği) ……...…. 50
Şekil 4.22. %50 atık - %50 saf karışım HDPE monofilament DSC testi sonucu (sıcaklık-ısı akış grafiği) ……...… 51
Şekil 4.23. %100 atık, %50 atık - %50 saf, %100 saf HDPE'den üretilmiş monofilamentlerin ve %50 atık - %50 saf bikomponent filamentin mukavemetlerinin karşılaştırılması …….…….. 53
Şekil 4.24. Mukavemetin karşılaştırılması LSD testi soncu (%100 atık, %50 atık - %50 saf, (%50 - %50) bikomponent %100 saf HDPE) ……..…….. 54
Şekil 4.25. Ekstrüder hızına bağlı atık HDPE (dış) ve saf HDPE (merkez) polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin numara değişimi….. 55
Şekil 4.26. HDPE atıkları (dış) ve saf HDPE (iç) polimerinden üretilen bikomponent filament kopma yükü değerleri…..…….. 56
Şekil 4.27. Atık HDPE (dış) ve saf HDPE (merkez) polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin kopmayükünün LSD testi sonucu ……... 57
Şekil 4.28. HDPE atıkları (dış) ve saf HDPE (iç) polimerinden üretilen bikomponent filament mukavemet testi sonucu ……. 58
Şekil 4.29. HDPE atıkları (dış) ve saf HDPE (iç) polimerinden üretilen bikomponent filament mukavemetin LSD testi soncu ……... 59
Şekil 4.30. Atık HDPE (dış) ve saf HDPE (merkez) polimerinden üretilen bikomponent filamentler ile %50 saf HDPE ve %50 atık HDPE karışımından üretilen monofilamentlerin mukavemetleri ……..….. 60
Şekil 4.31. Mukavemetin karşılaştırılması LSD testi soncu ……..... 61
Şekil 4.32. Tüm filamentlerin mukavemetlerinin karşılaştırılması …….…. 62
Şekil 4.33. Tüm filamentlerin mukavemetin karşılaştırılması LSD testi soncu..... 63
Şekil 4.34. Atık HDPE (merkez) miktarına bağlı olarak mukavemetteki değişim... 64
Şekil 4.35. Saf HDPE (merkez) miktarına bağlı olarak mukavemetteki değişim…. 65

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	HDPE'nin çeşitli özellikleri ……..……	6
Çizelge 2.2.	Bikomponent liflerin yapıları.…….……..….	15
Çizelge 3.1.	Bikomponent filament üretim parametleri…….....	22
Çizelge 4.1.	Farklı ekstrüder hızlarındaki filament numaraları (%50 saf HDPE ve %50 atık HDPE karışımı) ……..…….	26
Çizelge 4.2.	HDPE atıkları ve saf HDPE karışımından üretilen monofilamentlerin kopma yükünün ANOVA testi soncu ……..…….	29
Çizelge 4.3.	HDPE atıkları ve saf HDPE karışımından üretilen monofilamentlerin mukavemet testi soncu …….……..…….	30
Çizelge 4.4.	HDPE atıkları ve saf HDPE karışımından üretilen monofilament-lerin mukavemetinin ANOVA testi soncu ……	31
Çizelge 4.5.	%100 atıktan, %50 atık - %50 saf HDPE'den ve %100 saf HDPE'den üretilen monofilamentlerin kopma yükünün ANOVA testi soncu…..	33
Çizelge 4.6.	%100 atıktan, %50 atık - %50 saf HDPE'den ve %100 saf HDPE'den üretilen monofilamentlerin mukavemet testi soncu….....	35
Çizelge 4.7.	%100 atıktan, %50 atık - %50 saf HDPE'den ve %100 saf HDPE' den üretilen monofilamentlerin mukavemetinin ANOVA testi soncu.	36
Çizelge 4.8.	Filamentlerin DSC testi sonucundaki termal değerleri ……..….	40
Çizelge 4.9.	Eriyik akışkanlığı hızı (MFR) testi, astm d1238: 2013 metod b……..	41
Çizelge 4.10.	Farklı ekstrüder hızlarında üretilen bikomponent filamentlerin numaraları (atık HDPE (merkez) ve saf HDPE (dış) polimerinden üretilen bikomponent filament)……..…..	42
Çizelge 4.11.	Atık HDPE (merkez) ve saf HDPE (dış) polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin kopma yükünün ANOVA testi sonucu….	45
Çizelge 4.12.	Atık HDPE (merkez) ve saf HDPE (dış) polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin mukavemet testi sonuçları…….	46
Çizelge 4.13.	Atık HDPE (merkez) ve saf HDPE (dış) polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin mukavemetlerinin ANOVA testi sonucu..	47
Çizelge 4.14.	Mukavemetin karşılaştırılması ANOVE testi soncu ……...	49
Çizelge 4.15.	Filamentlerin DSC testi sonucundaki termal değerleri ……...	51
Çizelge 4.16.	Mukavemetin karşılaştırılması ANOVA testi sonucu…….....	53
Çizelge 4.17.	Farklı ekstrüder hızlarındaki filament numaraları (HDPE atıkları (dış) ve saf HDPE (merkez) polimerinden üretilen bikomponent filament) ……..	55
Çizelge 4.18.	Atık HDPE (dış) ve saf HDPE (merkez) polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin kopma yükünün ANOVA testi sonucu	57
Çizelge 4.19.	Atık HDPE (dış) ve saf HDPE (merkez) polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin mukavemet testi sonucu ……...	58
Çizelge 4.20.	HDPE atıkları (dış) ve saf HDPE (iç) polimerinden üretilen bikomponent filament mukavemetin ANOVA testi soncu ……..	59
Çizelge 4.21.	Mukavemetin karşılaştırılması ANOVA testi soncu ……..……	61
Çizelge 4.22.	Tüm filamentlerin mukavemet değerlerinin ANOVA testi soncu …..	63

1. GİRİŞ

Son yıllarda, artan sanayileşme ve kentleşme ile birlikte çevre kirliliği önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu durum, hem doğal kaynakların hızla tükenmesine hem de atık yönetimi sorunlarının büyümesine yol açmıştır. Buna paralel olarak, çevre bilincinin artması ve sürdürülebilir uygulamalara duyulan ilgi, geri dönüşüm ve malzemelerin yeniden kullanımı konusunu gündeme getirmiştir. Özellikle plastik atıklarının yönetimi, bu süreçte kritik bir rol oynamaktadır.

Bu bağlamda, polietilen, özellikle yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), dayanıklılığı, kimyasal direnci ve çok yönlülüğü ile bilinen en yaygın plastiklerden biridir. Polietilenin geniş kullanımı ve doğal ortamlarda yavaş bozunması, plastik kirliliğine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bu durum, polietilen atıklarının bertarafı ve yönetimini önemli çevresel zorluklar haline getirmiştir.

Bu tez, atık ve saf HDPE polimer karışımlarından üretilen monofilament ve bikomponent filamentlerin mekanik özelliklerini araştırarak bu soruna çözüm aramaktadır. Çalışmanın amacı, atık HDPE'nin üretime dahil edilmesinin filamentlerin mekanik performansını nasıl etkilediğini belirlemektir.

Bu kapsamda, ekstrüzyon işlemleri kullanılarak iki tür filament üretilmiştir: monofilamentler ve merkez-dış (core-sheath) yapıda bikomponent filamentler. Monofilamentler, atık ve saf HDPE karışımından tek bir filament olarak üretilmiştir. Bikomponent filamentler ise iki farklı polimerin düzede biraraya getirilmesi ile üretilmiştir; bu filamentlerin iç kısmında atık HDPE, dış kısmında ise saf HDPE bulunmaktadır. Bu yöntemle, merkez-dış kesite sahip filamentler elde edilmiştir. Üretilen filamentlerin mekanik özellikleri, çekme ve kopma testleri, DSC, MFR gibi analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Tez, polimer filamentlerin geri dönüşümüne giriş yaparak başlamaktadır ve bu alanda literatürde mevcut olan çalışmalara genel bir bakış sunmaktadır. Ardından, kullanılan malzemeler ve üretim süreçleri detaylandırılmakta, deneysel sonuçlar sunularak monofilamentler ve bikomponent filamentlerin özellikleri karşılaştırılmaktadır. Son bölümde ise çalışmadan elde edilen temel sonuçlar verilmiştir.

Bu araştırma, atık HDPE'nin filament üretiminde saf HDPE ile karışım ve bikomponent formunda kullanılma potansiyelini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu şekilde, polietilen atıklarının yönetimi ve geri dönüşümü için etkili bir yöntem sunulması hedeflenmektedir. Bu çalışmanın, hem mevcut atık yönetimi sorunlarına çözüm bulunmasına hem de atık malzemenin tekstil endüstrisine kazandırılmasına katkı koyacağı öngörülmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Polimer Filamentlere Giriş ve Geri Dönüşümü

İnsanlar tarih boyunca yiyeceklerini saklamak için başlangıçta toprak ve tahtadan yapılmış kaplar kullanmışlardır. Ancak, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte insanlar daha dayanıklı ve çeşitli kaplar üretmek için diğer kimyasal malzemeleri kullanmaya başlamışlardır. (Kayan & Küçük, 2020**).** Bu gelişmeler sonucunda, plastik kaplar gibi çeşitli avantajlara sahip olan modern kaplar, geleneksel ürünlerin yerini almıştır. Esnek şekil alma yeteneği, düşük maliyet, hafiflik ve dayanıklılık gibi özellikler sayesinde polimer kaplar, insanların vazgeçilmez tercihi haline gelmiştir (Harizi & Mefti, 2015). Polimer, birçok alt birimin birleşiminden oluşan büyük bir molekül veya makromoleküldür. Yunanca'da "polimer" terimi "birçok parça" anlamına gelir. Polimerler, doğal olarak oluşan bir biyopolimer olan DNA ipliğinden, dünya genelinde plastik olarak kullanılan polipropilene kadar her yerde bulunabilir. Polimerler bitkilerde ve hayvanlarda doğal olarak bulunabilir (doğal polimerler) veya insan yapımı olabilir (sentetik polimerler). Farklı polimerler, benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptirler ve bu özellikleri nedeniyle günlük hayatta geniş bir kullanım alanı bulurlar (Byjus, 2024)

Ancak, polimerlerin pratik ve olumlu yönlerinin yanı sıra çevre için negatif ve zararlı yönleri de bulunmaktadır. Polimer, plastik olarak da bilinen madde, bu kirliliğin negatif etkileri sadece insanları değil, aynı zamanda diğer tüm canlıları ve çevrenin tüm unsurlarını da etkiler. Bilinen en yaygın zararları ise plastik sindirilememesi, uzun süre doğada kalması ve canlılarda çeşitli sağlık sorunlarına neden olmasıdır (Kayan & Küçük, 2020)**.**

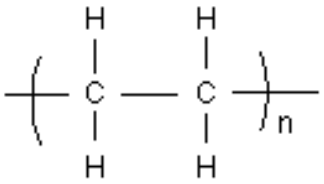
Bu nedenle, polimerlerin ciddi zararlı etkilerini azaltmak ve çevremizi gelecek nesiller için yeniden canlandırmaya çalışmak için düşünmenin ve çalışmanın zamanı gelmiştir. Halkın, bilim adamlarının ve akademisyenlerin üzerinde düşündüğü ve tartıştığı olası çarelerden biri de polimerlerin geri dönüştürülmesidir (Francis, 2017).

2.2. Polietilen Lifleri (PE) Hakkında Genel Bilgiler ve Özellikleri

2.2.1. Polietilen Lifleri (PE)

PE, tüm polimerler arasında en basit temel yapıya sahip olduğundan en çok üretilen plastik malzemedir. Diğer polimerlere göre literatürde büyük ilgi görmüştür. PE'nin ana çekici özellikleri, düşük maliyetinin yanı sıra geniş bir frekans aralığında çok iyi elektrik yalıtım özellikleri, çok iyi kimyasal direnç, işleme kolaylığı, dayanıklılık, esneklik ve bazı derecelerde ince filmlerde şeffaflıktır (Vidakis, Petousis & Maniadi, 2021).

PE, adı gereği etilenin bir polimeri olarak tanımlanmasına rağmen, $(CH_2)n$ formülüne sahip lineer polimerler ayrıca kondensasyon reaksiyonlarıyla da hazırlanmıştır. Örneğin, Von Pechmann (1898), diazometanın eterli bir çözeltisinden beyaz bir madde üretmiştir. Bamberger ve Tschirner (1900), benzer bir ürünü analiz etmiş, onun $(CH_2)n$ formülüne sahip olduğunu bulmuş ve ona "polymethylene" adını vermişlerdir (Ronca, 2017).
Şekil 2.1'de polietilenin kimyasal gösterimi göstermektedir ("INRS" , 2017)



Şekil 2.1. Polietilenin Kimyasal Gösterimi ("INRS" , 2017)

2.2.2. Farklı Polietilen Polimer Türleri

1950'lerin ortalarına kadar, ticari PE'nin tamamı yüksek basınçlı işlemlerle üretiliyordu. Bu işlemler, PE düşük yoğunluklu olarak sınıflandırılan, orta derecede dallanmış malzemeler verir. Ancak, bazı metal bileşiklerinin, Cr (Phillips katalizörü) veya Ti (Ziegler-Natta) bazlı, etilenin polimerizasyonunu daha az aşırı koşullarda katalize edebildiğinin keşfi, PE'nin çok çeşitli özelliklere sahip farklı yapıların kontrollü sentezine olanak tanımıştır (Ronca, 2017).
Polietilen, çoğunlukla yoğunluğuna ve dallanma derecesine dayalı olarak birkaç farklı kategoriye ayrılır (Azeem, 2023).

- Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE)
- Ultra düşük molekül ağırlıklı polietilen (ULMWPE veya PE-WAX)
- Yüksek molekül ağırlıklı polietilen (HMWPE)
- Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)
- Yüksek yoğunluklu çapraz bağlı polietilen (HDXLPE)
- Çapraz bağlı polietilen (PEX veya XLPE)
- Orta yoğunluklu polietilen (MDPE)
- Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE)
- Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)
- Çok düşük yoğunluklu polietilen (VLDPE)

- **Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)**

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), petrolden elde edilen bir polietilen termoplastiğidir ve yoğunluğu 0.941 g/cm^3 civarındadır. Moleküler yapısı az dallanmalı olduğu için ara moleküler kuvvetler ve gerilme direnci daha yüksektir. HDPE, krom/silika katalizörleri, Ziegler-Natta katalizörleri veya metallocene katalizörleri kullanılarak üretilebilir. Düşük yoğunluklu polietilene göre, HDPE dört kat daha güçlüdür. Üstün dayanıklılığa, yüksek kimyasal dirence ve belirli bir esnekliğe sahiptir. Süt şişeleri, deterjan şişeleri, margarin kapları, çöp konteynerleri, su boruları gibi ürün ve ambalajlarda kullanılan HDPE, oyuncak üretiminin üçte birinden fazlasını oluşturur (Azeem, 2023).

- **Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Özellikleri**

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), yoğun moleküler yapısı sayesinde artırılmış güç, sertlik ve çeşitli çevresel etkenlere karşı daha yüksek direnç sunar. Bu malzeme, dayanıklılık ve sağlamlık gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Aşağıdaki tablo (Çizelge 2.1) , HDPE'nin çeşitli özelliklerini tanımlamaktadır (Azeem, 2023).

Çizelge 2.1. HDPE'nin Çeşitli Özellikleri

Erime Noktası:	Yaklaşık 135°C
Kristal Yapısı:	Yüksek derecede kristal. Ana zincirde 200 karbon atomu başına 1 yan zincirden daha az içerir, bu da düzenli paketleme ve yüksek kristallilik ile sonuçlanan uzun lineer zincirler oluşturur
Esneklik:	Yüksek kristallilik nedeniyle LDPE'den daha serttir.
Güç:	Polimer zincirlerinin düzenli paketlenmesi sonucu güçlüdür.
Şeffaflık:	Daha kristalli olduğu için LDPE'den daha az şeffaftır.
Sıcaklık Dayanımı:	100-110 °C
Yoğunluk:	0.94-0.97 g/cm³. LDPE'den daha yüksek yoğunluk.
Kimyasal Özellikler:	Kimyasal olarak inerttir.
Kopma Anındaki Çekme Uzaması (%):	653
Moleküler Ağırlık:	90.000
Çekme Mukavemeti (MPa):	12.4

- **HDPE'nin Uygulama Alanları**

HDPE, şişirme kalıplama, enjeksiyon kalıplama, film malzemesi, boru, monofilament ve örgü gibi çeşitli uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Şişirme kalıplama ürünlerinde, HDPE genellikle endüstriyel variller, ilaç şişeleri, makine yağı bidonları ve kozmetik şişeleri üretiminde tercih edilir. Enjeksiyon kalıplama ürünlerinde ise HDPE, tepsi ve şişe kapakları yapımında kullanılır. Film malzemelerinde HDPE, alışveriş torbaları, çöp torbaları, giysi torbaları ve tek kullanımlık eldivenler için yaygın olarak kullanılır. Boru uygulamalarında ise HDPE, su temini ve drenaj boruları, gaz boruları, ısıtma boruları, ev tipi su tasarruflu sulama sistemleri ve diğer alanlarda kullanılır (Chen & Zewei, 2021).

Tekstilin tarımsal uygulamlarında, bu filamentler su geçirmez kumaşlar ve yırtılmaya dayanaklı ağların üretiminde kullanılır. İnşaat sektöründe ise gölgelik ağlar, güneş kırıcılar, stor perdeler, güvenlik ağları ve rüzgâr kırıcı duvarlar gibi ürünlerin üretiminde kullanılarak binaları ve sakinlerini korur. Havuz örtüleri de HDPE filamentlerinden yapılmakta olup, UV direnci ve kolay temizlenebilirlik sağlar.

Balıkçılık sektöründe ise sağlam ve dayanıklı balık ağları üretiminde kullanılır. Ayrıca, darbeye ve aşınmaya dayanıklı ipler ve sicimler üretmek için de kullanılmaktadır. HDPE filamentleri, kaplamalı plastik ürünlerde güçlendirici olarak kullanılarak, bu ürünlerin dayanıklılığını ve ömrünü artırır ("HDPE Monofilament Yarns, Net Fabrics - Manufactures&Suppliers - Ideal" , 2021).

Rüzgâr kırıcı ve gölgelik ağlar, UV dayanıklı yüksek kaliteli polietilen (HDPE) malzemeden üretilir. Genellikle tarımda, seralar için plastik ağ olarak kullanılır ve ışık yansıtma ve iletim avantajları sağlayarak serbest hava akışına olanak tanır ve rüzgâr hızını azaltarak mahsulleri korur. Ayrıca, kuş ve dolu saldırılarına karşı mahsulleri korumak için kuş ağı veya dolu ağı olarak da kullanılabilir. Rüzgâr ağının rengi beyaz, mavi, siyah veya isteğe bağlı başka bir renk olabilir. Yüksek mukavemeti sayesinde bitkileri, sebzeleri kuvvetli rüzgarlardan korur ("Tuohua Plastic", 2022).

Şekil 2.2'de, bazı rüzgâr kırıcı ve gölgelik ağların uygulamaları gösterilmiştir ("Tuohua Plastic", 2022).



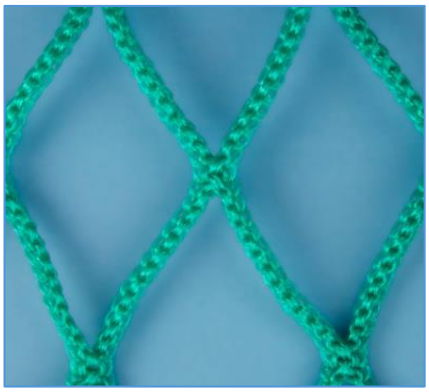
Şekil 2.2. Rüzgâr Kırıcı ve Gölgelik Ağların Uygulamaları ("Tuohua Plastic", 2022).

HDPE havuz örtüsü (Şekil 2.3), havuzların korunmasında çok iyi performans gösterir. Yer üstü veya zemin içi havuzlar için kullanılmakta olup, şişme havuzların tabanını kaplamak veya zemin içi havuzların suyunu dökülen yapraklar ve diğer kirleticilerden korumak için idealdir. Genellikle, HDPE havuz brandasının maksimum ağırlığı 250 gram/m^2 olabilir; dayanıklı yapısıyla, dış mekân kullanımlarına ve çevresel etkenlere karşı yaklaşık 2 yıl boyunca direnç gösterir, ardından yenilenmesi gereklidir ("Quelle bâche pour piscine ? " , t.y.).



Şekil 2.3. HDPE Yüzme Havuzu Örtüsü Örneği

Dayanıklılıkları nedeniyle, balık ağı üreticileri ve balıkçılar, HDPE (Yüksek Yoğunluklu Polietilen) ağları tercih etmektedir. Bu ağ, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, stabilize edilmiş ve UV'ye dayanıklı hale getirilmiş yüksek yoğunluklu HDPE iplikten yapılmıştır. Bu, ağın aşınmalara ve deniz yırtıcılarının ısırıklarına karşı olağanüstü dirençle dayanmasını sağlar ("Polyethylene Net" , t.y.).



Şekil 2.4. HDPE Balık Ağı Örneği (“Polyethylene Net” , t.y.)

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) liflerinin geliştirilmesi amacıyla polihedral oligomerik silseskvioksanlar (POSS) ile zenginleştirilmesi üzerine bir araştırma yapılmıştır. Bu araştırma, UV ışınımı altında liflerin özelliklerini iyileştirmeyi hedeflemiştir. Çalışma kapsamında, HDPE ile farklı konsantrasyonlarda POSS karıştırılmış ve lif ekstrüzyonu yoluyla kompozit lifler oluşturulmuştur. Bu lifler, uzun süreli güneş ışığına maruz kalmayı simüle etmek amacıyla UV ışınımına tabi tutulmuştur. Liflerin karakterizasyonu, mekanik testler ile dayanıklılık ve uzama değerlendirmesi, DSC ve TGA kullanılarak termal stabilite analizi ve SEM ile lif yüzeyinin ve POSS dağılımının morfolojik analizi ile gerçekleştirilmiştir. Kimyasal değişiklikler ise FTIR ve XPS kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, POSS eklenmesinin HDPE liflerinin UV direncini ve termal stabilitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. En iyi mekanik performans için optimal POSS konsantrasyonları belirlenmiştir. Bu iyileşme, POSS'un UV emici olarak işlev görmesi, HDPE'nin bozunma hızını azaltması ve bu kompozit lifleri dış mekân tekstil uygulamaları, jeotekstiller ve otomotiv bileşenleri gibi alanlar için daha uygun hale getirmesiyle ilişkilendirilmiştir (Biçer, Kodal & Özkoç, 2023).

Sürdürülebilir ve ileri düzeydeki üretim malzemeleri için 3D baskıya uygun yeni bir kompozit filament geliştirilmiştir. Bu filament, polimerle modifiye edilmiş selüloz nanofibriller (CNF) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kullanılarak üretilmiştir. CNF'lerin ekstraksiyonu, HDPE ile uyumluluğu artırmak için bir polimer ile modifiye edilmesi ve ardından modifiye edilmiş CNF'lerin HDPE ile karıştırılması suretiyle kompozit malzemenin üretilmesini içermektedir. Bu malzeme daha sonra ekstrüzyon

yoluyla 3D baskıya uygun bir filament haline getirilmiştir. Elde edilen filament, nanoselülozların güçlendirme etkisi nedeniyle HDPE'ye kıyasla gelişmiş mekanik özellikler sergilemektedir. HDPE, CNF-PSA/HDPE ve ahşap filamentler bir satranç piyonu basmak için kullanılmıştır. Ahşap numune referans olacak şekilde basılmıştır. Şekil 2.5'te, aynı baskı parametrelerini kullanarak üretilen piyonların temsilî bir görüntüsüdür. 3D baskı sırasında filament, yüksek kaliteli yüzey kaplamasıyla iyi katman yapışması sağlar ve daha fazla dayanıklılığa sahip karmaşık şekillerin oluşturulmasına olanak tanır. Sonuç olarak, bu kompozit malzemenin biyobozunurluk, mekanik sağlamlık ve çevre dostuluğunu dengeleyerek çeşitli uygulamalar için potansiyelini göstermektedir (Dalloul, Mietner & Navarro, 2022).



Şekil 2.5. Üç Boyutlu Baskılı Modeller: Sol Piyon İçin Kullanılan Filament Woodfill, Sağ Piyon İçin HDPE ve Orta Piyon İçin CNF-PSA/HDPE Kompozitidir (Dalloul, Mietner & Navarro, 2022).

2.3. Polietilen Geri Dönüşümü

Polietilen (PE), etilenin polimerizasyonuyla üretilen ve dünyada en yaygın kullanılan plastiklerden biri olan malzemedir. Gıda ambalajları ve alışveriş poşetlerinden deterjan şişelerine ve otomobil yakıt tanklarına kadar çeşitli ürünlerde kullanılmaktadır. Bu nedenle, Polietilenin (PE) geri dönüşümü, kullanılmış PE ürünlerini yeni uygulamalar için değerli malzemelere dönüştürerek atık miktarını azaltmak, kaynakları korumak ve sürdürülebilirliği teşvik etmek açısından önemli bir rol oynamaktadır. PE'nin geri

dönüştürülmesiyle, atıkların minimize edildiği ve kaynakların gelecek nesiller için korunduğu daha sürdürülebilir ve döngüsel bir ekonomi oluşturulabilir. Bu bölümde, geri dönüştürülmüş polietilenin çeşitli uygulamaları sunulacaktır.

PE ürünleri tasnif edilir, eritilir ve yeni PE granüllerine dönüştürülür, ardından yeni plastik ürünler olan, atık yönetim kutuları, borular, alışveriş poşetleri ve içecek şişeleri gibi ürünler için yeni PE ile birleştirilir (Francis, 2017).

Polietilen (PE) atıklarının ve yan ürünlerinin asfalt bağlayıcıların modifikasyonunda kullanımına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, geleneksel asfalta PE pelletleri ve parçaları (bir üretim yan ürünü) eklemişler ve elde edilen bağlayıcı özellikleri çeşitli analitik teknikler kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, atık PE'nin eklenmesinin olumlu etkilerini göstermiştir, ancak yüksek sıcaklıkta depolama stabilitesi konusunda sorunlar yaşanmıştır. Bununla birlikte, PE içeren karışık bağlayıcıların düşük sıcaklık modülü, polimer modifiye ticari bağlayıcılarla karşılaştırılabilir düzeydedir. Bu da asfalt performansını artırmak için maliyeti düşük bir alternatif olarak PE atıklarının kullanılabileceğini göstermektedir (Kakar ve diğerleri, 2021).

Başka bir araştırmada, atık plastikten üretilen HDPE filamentlerin pamuk ipliği ile birleştirmesi sonucu elde edilen hibrit ipliklerin, hem saf plastikten üretilen hibrit iplikler kadar güçlü olduğu, hem de normal pamuk ipliğinden daha dayanıklı olduğu bulunmuştur. Hibrit iplik oluşturma işlemi, atık plastikten üretilen filamentleri yüksek mukavemetli hibrit ipliğin değerli bir bileşeni haline getirmiştir. Bu bulgu, atık plastiklerin değerlendirilmesi ve daha sürdürülebilir tekstil üretimi için bir yol sunmaktadır. Atık HDPE plastiklerin, bu yöntemle güçlü ve dayanıklı ipliklere dönüştürülerek tekstil sektöründe kullanılabilir hale gelebileceği berlirtilmiştir (Suvari & Gurvardar, 2024).

Geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilenin (HDPE) füzyon filament imalatı (FFF) ile 3D baskı filament malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. HDPE atıkları toz haline getirilip filamentler ekstrüde edilmiş ve mekanik testlere tabi

tutulmuştur. İlk beş geri dönüşüm döngüsünde HDPE'nin mekanik özellikleri iyileşmiş, ancak altıncı döngüden sonra azalmıştır. HDPE'nin sürdürülebilir katkı üretiminde geri dönüştürülebilir ve kaliteli 3D baskı parçaları üretiminde kullanılabilir olduğunu göstermektedir (Cho ve diğerleri, 2000).

Geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) lifleri betonda kullanılarak, betonun dayanımını artırmak amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, farklı miktarda geri dönüştürülmüş HDPE lifleri ile hazırlanan beton örneklerinin hazırlanmasını ve ardından mekanik özellikleri, çekme ve kopma yükünü, ayrıca korozyon direnci ile ilgili elektrokimyasal özelliklerinin test edilmesini içerir. Sonuçlar, HDPE liflerinin eklenmesiyle çekme ve kopma yükünün artmasına rağmen, yüksek lif konsantrasyonlarında sıkışma direncinin hafif bir şekilde azaldığını göstermiştir. Bu durum, liflerin beton matrisini bozduğu için beklenebilir. Elektrokimyasal testler göstermiştir ki, liflerin su ve iyon geçişini azaltması sayesinde, çelik güçlendirmelerin korunmasına bu lifler önemli katkı koymuştur. Taramalı elektron mikroskopisi, liflerin beton matrisine iyi bir bağlantı oluşturarak mekanik özelliklerin geliştirilmesine yardımcı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, HDPE liflerinin varlığı, kırıkların yayılmasını azaltır ve betonun dayanımını artırmıştır. Bu çalışma, HDPE liflerinin geri dönüştürülmüş olarak kullanılarak, betonun mekanik ve elektrokimyasal performansını önemli ölçüde artırdığını ve böylece yapıların dayanımını artırmaya yardımcı olduğunu ve çevre koruma çabalarına katkıda bulunduğunu göstermiştir. Bu yöntem, sadece beton yapıların uzun ömürlülüğünü artırmakla kalmaz, aynı zamanda çevre koruma çabalarına da destek sağlamaktadır (Flores Nicolás ve diğerleri, 2024).

Uluslararası Circular Ocean projesi kapsamında ve Kuzey Periferik ve Arktik (NPA) bölgesindeki deniz plastik atıklarının azaltılmasına odaklanarak, balık ağları atıklarından türetilen liflerin teknik özelliklerini inceleyen ve bunların inşaat ve kompozit malzemelerde yeniden kullanım potansiyelini değerlendiren bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Balık ağı atıkları, ağırlıklı olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve naylondan oluşmaktadır (Şekil 2.6). Temizleme, parçalama ve yeniden şekillendirme teknikleriyle işlenmiştir. Mekanik testlerden, özellikle çekme direnci, Young modülü ve kopma uzaması değerlerinde, geri dönüştürülmüş liflerin önemli

ölçüde direnç ve esnekliklerini koruduğunu, ancak yeni liflere kıyasla sertlik ve uzama kapasitesinde hafif azalmalar gösterdiğini ortaya koymuştur. Dayanıklılık değerlendirmeleri, UV ışınlarına ve tuzlu suya maruz kalmanın liflerin özelliklerini hafifçe bozduğunu göstermiştir. Bu çalışma, liflerin pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğunu ve bu durumun lifler ile çimento matrisi arasında zayıf bir yapışmaya neden olabileceğini ortaya koymuştur. Kullanılmış balık ağı lifleri, yeni liflere kıyasla çekme direncinde %20 oranında bir azalma gösterirken, Young modülü neredeyse değişmemiştir. Young modülü, çimento esaslı malzemelerde takviye olarak kullanılan diğer liflere kıyasla düşük iken, çekme direnci diğer liflerle iyi bir uyum göstermiştir (Bertelsen & Ottosen, 2016).



Şekil 2.6. Atık Balık Ağları (Bertelsen & Ottosen, 2016).

2.4. Monofilament ve Bikomponent Bileşenli Filament Üretimi

2.4.1. Monofilament Üretimi

Monofilament, cipslerin eritilmesi ve çekilmesi yoluyla oluşturulan tek bir filamentten meydana gelir ve çeşitli kalınlıklarda oluşturulmak üzere küçük deliklerden geçirilir. Monofilament iplikler, yüksek dayanıklılık, uzun ömür, esneklik gibi özellikleriyle tanınır. Bu iplikler, polyester, polipropilen, poliamid, fluoropolimerler ve TPE gibi farklı polimerlerden yapılabilmektedir. Monofilament iplikler, balıkçılık hatları, 3D baskı filamentleri, çim biçme teli, diş fırçası kılları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca, balıkçılık, tekstil, fırça yapımı, tıp, baskı, spor, otomotiv ve havacılık gibi çeşitli endüstrilerde de kullanım alanı bulmaktadır. Otomotiv ve havacılık

sektörlerinde, kimyasal açıdan agresif ve aşındırıcı ortamlardan boru, hortum ve demet tellerini korumak için örgülü yapılar olarak da kullanılmaktadırlar. Monofilament iplikler, kullanım amaçlarına bağlı olarak farklı boyut ve renklerde bulunmaktadır (Hagewood, 2014).

2.4.2. Bikomponenet Liflerin Üretimi

2.4.2.1. Bikomponent Lifler Hakkında Genel Bilgiler

Bikomponent liflerin oluşturulmasının ana hedeflerinden biri, yün lifi benzeri bir yapı ve kendi kendine kıvrılma etkisi elde etmektir (Gupta & George, 1975). Yan yana konumlandırılmış bikomponent viskoz lifler ilk kez 1937'de patente tabi tutulmuştur. İlk ticari bikomponent lif, DuPont tarafından 1960'ların başlarında üretilen "Cantrese" adını taşıyordu. Bu lif, yan yana konumlandırılmış farklı iki poliamid polimerinden yapılmıştı ve iç giyimde kullanılmak üzere tasarlanmıştı.1970'lerde, özellikle Asya ve Japonya'da birçok farklı türde bikomponent lif üretilmeye başlandı. Bu lifler, daha karmaşık ve pahalı üretim kurulumları kullandı. Ayrıca 1970'lerde Monsanto, Monvel adı verilen kendi kendine kıvrılan bir poliamid monofilament lif geliştirdi, bu da bikomponent benzeri bir lifin erken bir örneğiydi. (Zhu, Meng, Yan & Chen, 2021**).**

Bugün, farklı polimer bileşenlerinin kombinasyonuyla sağlanan benzersiz özelliklerinden faydalanarak, bikomponent lifler tıp, enerji ve giyim alanlar gibi çeşitli uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır **(**Wang & Gong, 2006; Zhang, Tu, Peijs & Bastiaansen, 2017).

Bikomponent lifler, aynı lif içinde bir araya getirilen iki farklı polimerden yapılmış özelleşmiş filamentlerdir. Bu lifler, her bir polimer bileşeninin istenilen özelliklerinden faydalanmayı amaçlayarak tasarlanmıştır ve monokomponent liflerle elde edilemeyen benzersiz bir özellik kombinasyonu sunarlar (Rahman Khan, 2021).

Bikomponent liflerin benzersiz yapısal özellikleri, farklı polimerlerin özelliklerini birleştirerek lif seviyesinde ürün iyileştirmelerinin sağlanmasına olanak tanır (Plotz, 2020).

Polimer karışımında, farklı polimerler genellikle malzeme boyunca karıştırılır ve rastgele dağıtılır. Bu, her bir polimerin belirgin özelliklerinin kaybına yol açabilir. Buna karşılık, bikomponent lifler, lif boyunca iki ayrı polimerin bulunduğu şekilde tasarlanmıştır. Bu, her polimerin benzersiz özelliklerini korumasına olanak tanır ve belirli uygulamalar için faydalı olabilir. Örneğin, bir polimer dayanıklılık ve mukavemet sağlayabilirken, diğer polimer yalıtım veya alev geciktirici özellikler sunabilir (Prahsarn, Klinsukhon, Roungpaisan & Srisawat, 2013).

Farklı polimer bileşenleri çeşitli kesit yapılarında düzenlenebilir. Kesit şekline göre genellikle üç kategoriye ayrılabilirler: yan yana tip, iç içe tipi ve matris tipi vb. (Çelen & Ulcay, 2019)

Şekilleri Çizelge 2.2 'de gösterilmiştir (Zhu, Meng, Yan & Chen, 2021).

Çizelge 2.2. Bikomponent Liflerin Yapıları

Kesit Şekli Dağılımı		**Kesit Görünümü**
Yan yana		
Iç içe		
Matris Fibril	Deniz Ada	
	Dilimli Pasta	

- **Yan Yana Yapı**

Yan yana lifler, farklı büzülme veya viskoziteye sahip iki polimerden yapılan ve lifin ekseni boyunca bitişik durumda dağıtılan bikomponent liflerdir. Yan yana bikomponent lifler, ilk kez iki farklı özellikteki polimeri birleştirerek yünün kıvrılmış ve kabarık yapısını taklit etmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu lifler, kesit şekil farkları, modül değişimleri, büzülme farklılıkları, kalınlık farklıları ve polimer bileşimi farkları gibi

faktörlerden dolayı kalıcı üç boyutlu kıvrılma üretebilirler. İki bileşen arasındaki asimetrik dağılım ve büzülme farkları, kırışık liflerin oluşturulmasına olanak tanır ve bu da kumaşlarda hacim, ısı tutma ve yumuşaklık sağlar. Ancak, işleme sırasında ayrışmayı önlemek ve yapışmayı sürdürmek için iki bileşen arasındaki uyumluluğun sağlanması son derece önemlidir (Wang ve diğerleri, 2020).

- **İç İçe Yapı**

İç içe kesit yapısı, bikomponent liflerde yaygın bir yapıdır. İç polimeri istenilen fiziksel özelliklere katkıda bulunurken dış polimeri filamentlere belirli işlevsellikler kazandırır (Naeimirad ve diğerleri, 2018).

İç içe yöntemi, istenen çekme dayanımını sağlayan iç polimer üzerine geniş bir termoplastik polimer yelpazesinin uygulanmasına izin verdiği için, lif ve tekstil özelliklerini korurken çeşitli yüzey işlevselliklerine olanak tanır (Hufenus ve diğerleri, 2020).

İç içe yapılı bikomponent liflerde, iç ile dış arasındaki temel bağlantı yapışkan değil, mekaniktir ve işleme sırasında ayrılmanın önlenmesi için iki bileşen arasındaki arayüze dayanır. Iç içe yapısı belirli bir amaca yönelik olarak tasarlanmıştır: dış, parlaklık, termal yapışma ve boyanabilirlik gibi yüzey özelliklerini sağlarken, genellikle ekonomik ve yüksek mukavemetli bir malzemeden yapılan iç, mekanik özellikleri arttırır ve üretim maliyetlerini düşürür (Zhu, Meng, Yan & Chen, 2021).

- **Matris**

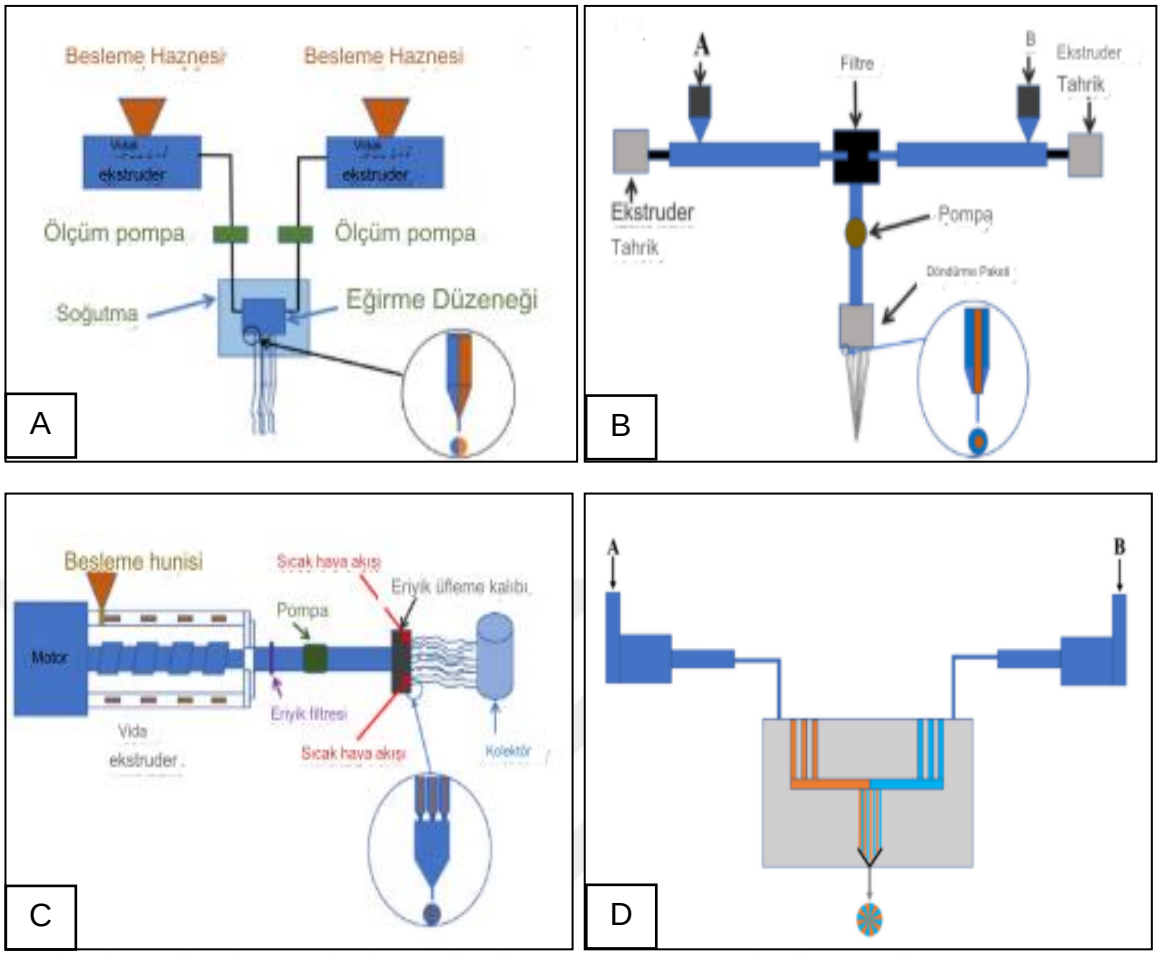
Matris bikomponent lifler, deniz Adalar ve dilimli pasta olmak üzere iki tür içerir. Deniz ada lifleri, bir polimerin "deniz" içinde dağıtılmış polimer "adaları"na sahip olan ve filament ve kesik elyaf formlarında bulunan ultra konjuge lifler olarak da bilinir. Dilimli-pasta lifleri ise, benzer viskozitelerdeki iki uyumsuz polimerden oluşur, ayrı ayrı ekstrüde edilir ve segmentli-pasta kesiti oluşturacak şekilde birlikte dışarı atılır. Her iki tür ses emici malzemelerde ve deri uygulamalarında kullanılmak üzere mikroliflere ayrılabilir. Ayrıca, deniz ada liflerinin ada bileşenlerinin çözülmesi gözenekli boş lifler oluştururken, deniz bileşenlerinin genişletilmesi kumaşın ısı koruma özelliklerini artırır (Guo, Huang & Jing, 2014).

2.4.2.2. Bikomponent Liflerin Hazırlanması

Bikomponent liflerin hazırlanması, iki farklı polimeri tek bir lifte birleştirmek için tasarlanmış çeşitli özel eğirme tekniklerini içerir ve her biri lifin genel performansını ve işlevselliğini artıran benzersiz özellikler kazandırır. İstenen kesit şekline bağlı olarak, jel eğirme (Gel Spinning) ve eriyik üfleme gibi bikomponent lif hazırlama yöntemleri bulunmaktadır, ancak en yaygın yöntemler eriyikten çekim ve elektro lif çekimi yöntemidir (Zhu, Meng, Yan & Chen, 2021).

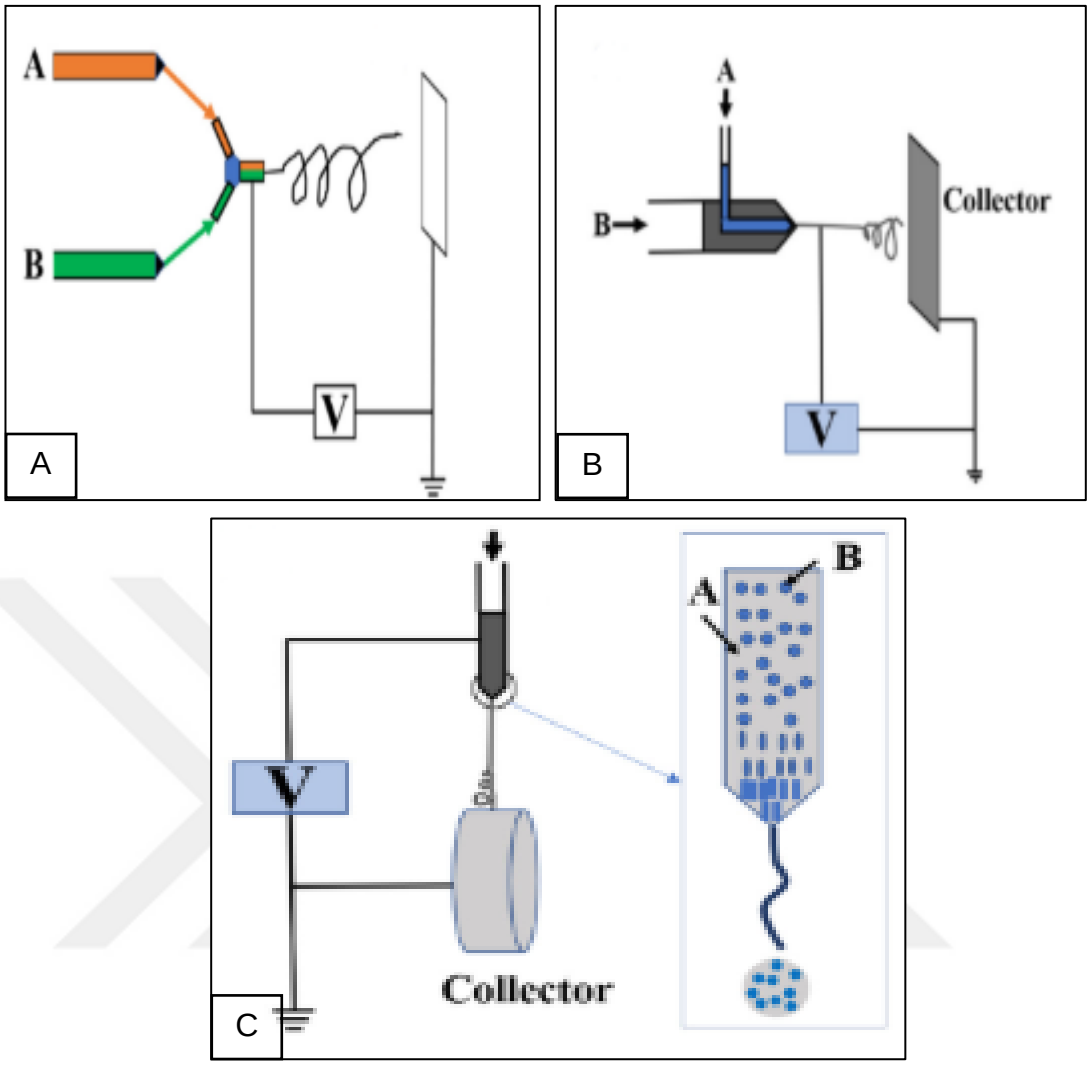
Eriyikten çekim, ticari sentetik liflerin üretiminde en yaygın kullanılan yöntem olup, bikomponent eğirme yoluyla lif morfolojisini çeşitlendirmeye yönelik belirgin bir eğilim göstermektedir. Bikomponent lifler, tek bir düzeden farklı kimyasal veya fiziksel özelliklere sahip iki veya daha fazla polimerin ekstrüzyonu ile oluşturulur. Bu, liflerin davranışını ve performansını etkileyen, karışmamış bileşenlerin dinamik bir arayüze sahip olmasını sağlar. Bu lifler, her iki polimerin de bozulmadan yüksek sıcaklık ve kesme gerilimine dayanmasını gerektiren standart eriyik çekme işlemlerine tabi tutulur. Polimerler, yüksek eriyik mukavemetine, dar bir moleküler ağırlık dağılımına ve gerilim altında düzgün şekilde yönlenebilecek yeterli zincir hareketliliğine sahip olmalıdır. Farklı polimerlerin başarılı bir şekilde ko-ekstrüzyonu, spin paketi ve düze tasarımının dikkatli bir şekilde yapılmasını gerektirir, ayrıca dengeli işleme sıcaklıkları ve viskoziteleri ile bileşenler arasındaki kontrollü yapışma da sağlanmalıdır (Hufenus ve diğerleri, 2020).

Aşağıdaki şekil (Şekil 2.7), eriyikten çekim yöntemiyle hazırlanan farklı kesit yapılarını göstermektedir (Zhu, Meng, Yan & Chen, 2021).



Şekil 2.7. Eriyikten Çekim Yöntemi, A) Yan Yana Yapı; B) İç İçe Yapı; C) Deniz Ada Yapı; D) Dilimli Pasta

Elektro lif çekimi paralel ve konjuge elektro eğirme gibi teknikler kullanarak bikomponent lifler üretmek için önemli bir yöntemdir. Paralel elektro eğirmede, yan yana düze yüzeyde ayrı bileşenlere sahip lifler oluşturur ve bu, liflerin işlevselliğini artırır (Yang ve diğerleri, 2020). Konjuge elektro eğirme ise farklı çözeltileri karıştırarak floresans ve iletkenlik gibi birleşik özelliklere sahip lifler üretir. Yüksek kaliteli nanolifler üretmek için eş eksenli konfigürasyonlar gibi farklı düzenekler kullanılır ve bu lifler fotokataliz, antibakteriyel tedaviler ve sensörler gibi uygulamalarda kullanılır. Şekil 2.8'te gösterildiği gibi, eş eksenli konfigürasyonların seçimi, bikomponent lif için gereken kesit yapısına bağlıdır. Bu yöntem, liflerin benzersiz yapılar ve belirli uygulamalar için geliştirilmiş performans sergilemesini sağlar (Zhu, Meng, Yan & Chen, 2021).



Şekil 2.8. Elektro Çekim Yöntemi, A) Yan Yana Yapı; B) İç İçe Yapı; C) Deniz Ada Yapı

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada, saf HDPE polimeri olarak PETKİM'in S0464 Yüksek Yoğunluklu Polietilen granülleri kullanılmıştır. Firma kataloğuna göre bu polimer, yiyecek kapları, orta boy su ve yağ bidonları, orta boy kaplar, mutfak eşyaları ve monofilament üretimi için uygundur.

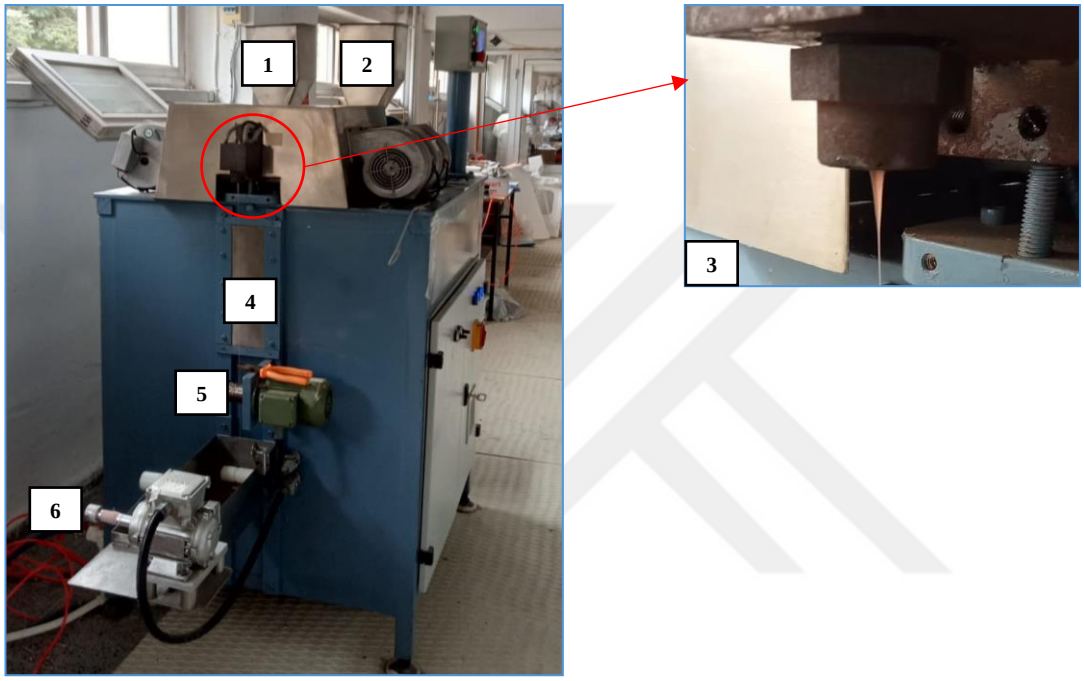
Şişe kapakları genellikle dayanıklılığı ve çok yönlü kullanımı ile bilinen HDPE polimeri kullanılarak üretilir. Şişe kapakları üzerindeki "2" kodlama numarası, malzemenin HDPE olduğunu net bir şekilde belirtir. Ne yazık ki, birçok su şişesi kapağı çevresel atık olarak atılmakta ve kirliliğe neden olmaktadır. Ancak bu çalışmada, terk edilmiş kapakları toplayarak ve bunları filament üretiminde yeniden kullanarak bu soruna katkı koymaya yönelik sürdürülebilir bir adım atılmıştır. Çevreden plastik atıkları topladıktan sonra, “2” kodlu şişe kapakları filament üretimi için özel olarak seçilmiştir. Bu titiz seçim süreci, üretilen filamentlerin HDPE polimerinden yapılmasını garanti etmektedir. Atık plastikler başlangıçta 2 ila 4 milimetre arasında değişen küçük granüller halinde kesilmiştir. Hazırlanan atık HDPE granülleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Daha sonra, atık malzemeden herhangi bir olası kirleticileri uzaklaştırmak için yıkanmıştır. Ardından, atık plastik granülleri kurutularak kalan suyun buharlaştırılmasıyla malzeme filament üretimi için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.1. Atık HDPE Granüller

3.2. Üretim Yöntemi

Bikomponent filament üretimi için, Bursa Uludağ Üniversitesi (BUÜ) Tekstil Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan, Aysa Makina tarafından üretilmiş laboratuvar tipi sentetik iplik üretim makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.2). Bu makine, araştırma ve geliştirme uygulamaları için özel olarak tasarlanmış olup, küçük miktarlarda filamentin doğru ve kontrollü bir şekilde üretilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.2. Sentetik Iplik Üretim Makinesi: 1) Dış Extrüder ; 2) İç Extrüder ; 3) Düze Başlığı ; 4) Soğtma Ünitesi; 5) Çekim Silindiri; 6) Sarım Silindiri

Granüller ekstrüzyon haznesine yerleştirildikten sonra, ekstrüzyondan düzeye kadar uzanan beş ayrı ısıtma bölgesi çalıştırılmıştır. Bu bölgeler, gereken sıcaklıklarda ayrı ayrı ısıtılabilir. Isıtma bölgeleri, filament üretim sürecinde kritik bir rol oynar. Her bölgenin bağımsız olarak düzenlenebilmesi, malzemenin uygun sıcaklığa ulaşmasını sağlar, bu da istenilen özelliklere sahip filament üretimi için esastır. Ekstrüzyon sıcaklığının seçimi, filamentin kalitesi, dayanıklılığı ve işlenebilirliği gibi çeşitli yönleri etkileyen önemli bir karardır. Literatürdeki bilgiler göz önüne alınarak HDPE filament üretimi için uygun kabul edilen sabit 210°C ekstrüzyon sıcaklığı tüm ısıtma bölgeleri için seçilmiştir (Kolanjikombil, 2018).

Malzeme eridikten sonra, bikomponent filament oluşturmak amacıyla düzeden ekstrüde edilebilir. Polimer filament, düzeyi geçtikten sonra yüksek bir sıcaklıkta kalır ve şeklini sabitlemek ve katılaştırmak için hızlı bir soğutma gerektirir. Soğutma sistemi, filament üzerine kontrollü bir şekilde hava üfleyerek, hızlı bir soğutma sağlar. Bu süreç, filamentin kalitesinin sürekli olmasını ve sonraki kullanımlar için hazır hale gelmesini sağladığı için önemlidir. Aynı zamanda, kabarcıklar veya deformasyonlar gibi kusurların oluşmasını önlemeye yardımcı olmaktadır.

Son olarak, elde edilen filament, bir çekme silindiri kullanılarak özenle sarım silindirine sarılmış ve daha sonraki işlemler için hazırlanmıştır. Bu işlem, filamentin düzgün bir şekilde sarılmasını sağlayarak, sonraki aşamalarda kullanılabilirliğini ve kalitesini korur. Monofilament üretimi için üç farklı ekstrüder hızı (2, 2,5 ve 3 devir/dakika) kullanılmıştır. Her bir hızda, farklı yüzde oranlarında polimer içeren monofilamentler üretilmiştir: %100 atık HDPE, %100 saf HDPE ve %50 atık HDPE ile %50 saf HDPE karışımı.

Ayrıca, bikomponent filamentlerin üretimi, atık ve saf HDPE'nin merkez ve dış bölmeleri arasındaki dağılımı değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bu çeşitliliği, filamentin nihai özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı ekstrüder hızları ile birleştirilmiştir.

Üretilen farklı bikomponent filament örnekleri, ekstrüder hızı konfigürasyonlarını detaylı olarak içeren Çizelge 3.1 'de açıklanmıştır.

Çizelge 3.1. Bikomponent Filament Üretim Parametleri

Filament Kesiti	**HDPE**		**Merkez Ekstrüder Motor Hızı (Dev/Dak)**	**Dış Ekstrüder Motor Hızı (Dev/Dak)**
	Merkez	**Dış**		
Kullanılan Polimer	Atık HDPE	Saf HDPE	1	1
			1,25	1,25
			1,5	1,5
	Saf HDPE	Atık HDPE	1	1
			1,25	1,25
			1,5	1,5

3.3. Monofilamet ve Bikomponent Filamentlerin karakterizasyonu

3.3.1. Filament Numarasının Belirlenmesi

Filament numarasının tespiti sürecinde, filamentin uzunluğu ve ağırlığının doğru bir şekilde ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. Filament uzunluğu, Şekil 3.3'te gösterilen çıkrık cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Aynı şekilde, filament ağırlığının ölçülmesi de filament numarasının belirlenmesi için gereklidir. Bu amaçla, hassas tartım cihazı kullanılmaktadır. Filament ağırlıkları, üç ondalık basamağa kadar ölçüm yapabilen METTLER PJ300 hassas terazisi ile ölçülmüştür. Filament numaraları, 1.000 metrenin gram cinsinden ağırlığını ifade eden "tex" numaralandırma sistemi kullanılarak hesaplanmıştır.

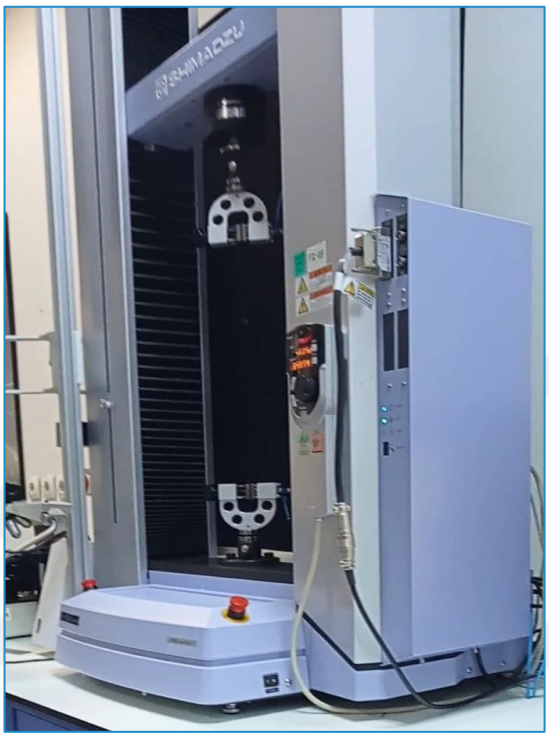


Şekil 3.3. Uzunluk Ölçümlerinin Yapıldığı Çıkrık Cihazı

3.3.2. Mukavemet ve Uzama Testleri

Mukavemet testi, malzemenin uygulanan kuvvet altında kopma noktasını ölçerken, uzama testi malzemenin çekme kuvveti altında ne kadar gerilebileceğini gösterir. Filamentlerin kopma mukavemeti testleri, ISO 2062:2009 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu testler, Shimadzu AG-X plus mukavemet test makinesi kullanılarak yapılmıştır. Numune boyutları, filamentlerin yüksek uzama özelliklerine uyum sağlamak amacıyla 100 mm olarak ayarlanmıştır. Standart gereği test hızı 250

mm/dakika olarak belirlenmiştir. Shimadzu AG-X plus test cihazı, çeşitli malzemelerin mekanik testlerinde endüstride yaygın ve güvenilir bir şekilde kullanılmaktadır. Kullanılan test cihazı Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Shimadzu AG-X Plus Mukavemet Test Cihazı

3.3.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testi

Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC), malzemelerin termal özelliklerini incelemek için kullanılan bir termal analiz tekniğidir (Awad, El Gamasy, Abd El Wahab & Abdellatif, 2019). DSC ile elde edilen temel parametreler arasında erime pik sıcaklığı, erime entalpisi, kristalizasyon pik sıcaklığı ve kristalizasyon entalpisi bulunmaktadır. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) testleri, Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi (BUTEKOM) test merkezinde, TS EN ISO 11357-3:2018 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde 10 °C/dak ısıtma hızı ile 200 °C'ye kadar ısıtma yapılmıştır. Test sırasında azot gazı kullanılmıştır. Hem monofilamentlere hem de bikomponent filament numunelerine DSC analizi yapılmıştır.

3.3.4. MFR Testi

MFR (Melt Flow Rate) testi, termoplastik malzemelerin akışkanlık özelliklerini değerlendirmek için kullanılan önemli bir test yöntemidir. Bu test, malzemenin belirli bir sıcaklık ve basınç altında eriyik haldeki akış hızını ölçerek, malzemenin işlenebilirlik ve işleme koşullarına uygunluğunu belirler. MFR testi, özellikle plastik endüstrisinde, hammadde seçiminden proses optimizasyonuna kadar pek çok aşamada kritik bilgiler sunar (“Melt Flow Testing”, t.y.).

Moleküler yapının daha detaylı bir analizini yapabilmek amacıyla atık, saf ve karışım HDPE polimerine MFR testleri uygulanmıştır. Eriyik akışkanlık hızı (MFR) testleri, ASTM D1238:20 standardına uygun olarak Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi (BUTEKOM) ve Bursa Teknik Üniversitesi test merkezinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, 300 saniyelik ön ısıtma süresi, 190 °C test sıcaklığı ve 2,16 kg test ağırlığı altında yapılmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Monofilament Yapıların İncelenmesi

4.1.1. Atık HDPE ve Saf HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Numarasına Ekstrüder Hızının Etkisi

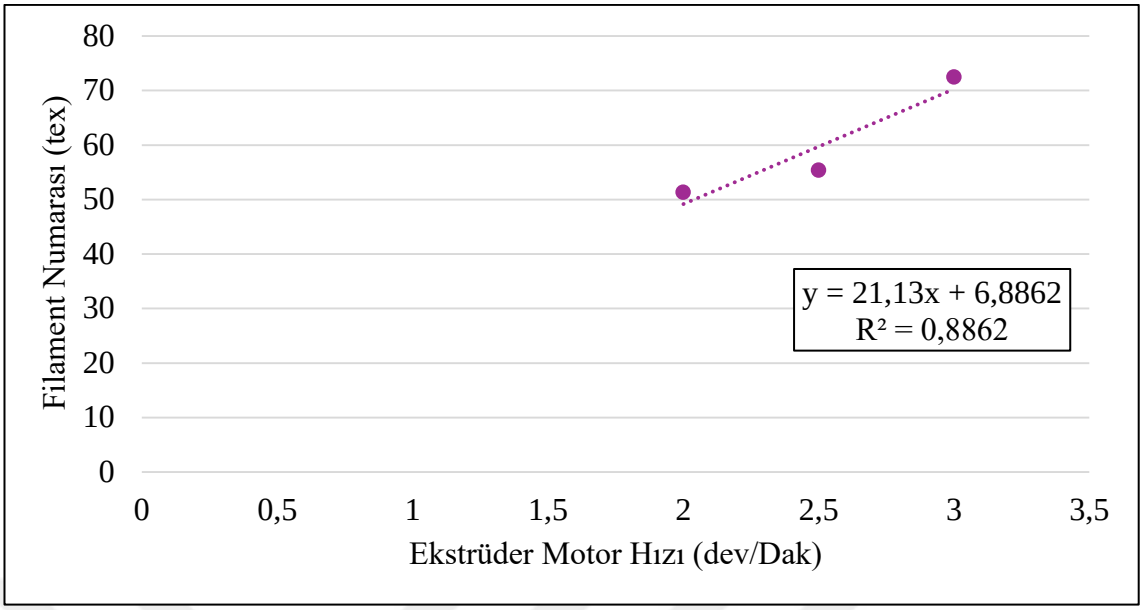
Ekstrüder hızının üretilen filament numarasına etkisini analiz etmek için bir çalışma yapılmıştır. Monofilamentler, %50 saf HDPE ve %50 atık HDPE karışımı kullanılarak üretilmiştir. Çalışma, 2, 2,5 ve 3 dev/dak olmak üzere üç farklı ekstrüzyon hızında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.1'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı Ekstrüder Hızlarındaki Filament Numaraları (%50 saf HDPE ve %50 atık HDPE karışımı)

Ekstrüder Motor Hızı (dev/dak)	**Filament Numarası (tex)**
2	51,33
2,5	55,34
3	72,46

Çizelge 4.1'te görüldüğü gibi, ekstrüzyon hızının artması üretilen filament numarasını doğrudan etkilemektedir. Bu sonuçlar, ekstrüzyon hızının artırılmasının filament numarasını artırmada etkili bir yol olabileceğini göstermektedir.

Filament sayısı ile ekstrüder hızı arasındaki korelasyonu incelemek için bu iki değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi gösteren bir grafik çizilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Ekstrüder Hızına Bağlı Filament Numarası Değişimi (%50 Saf HDPE ve %50 Atık HDPE Karışımı)

Elde edilen regresyon doğrusu denklemi şu şekildedir:

$$\boldsymbol{y = 21,16x + 6,8862} \tag{4.1}$$

Regresyon katsayısı R^2=0,8862 olarak bulunmuştur, bu da ekstrüder hızı ile üretilen filament sayısı arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Denklemde x ekstrüder hızını (dev/dak) ve y filament numarasını (tex) temsil etmektedir. Bu formül, istenilen filament kalınlığına göre sentetik iplik üretim makinesinin ekstrüder hızlarını belirlemeye yardımcı olabilir.

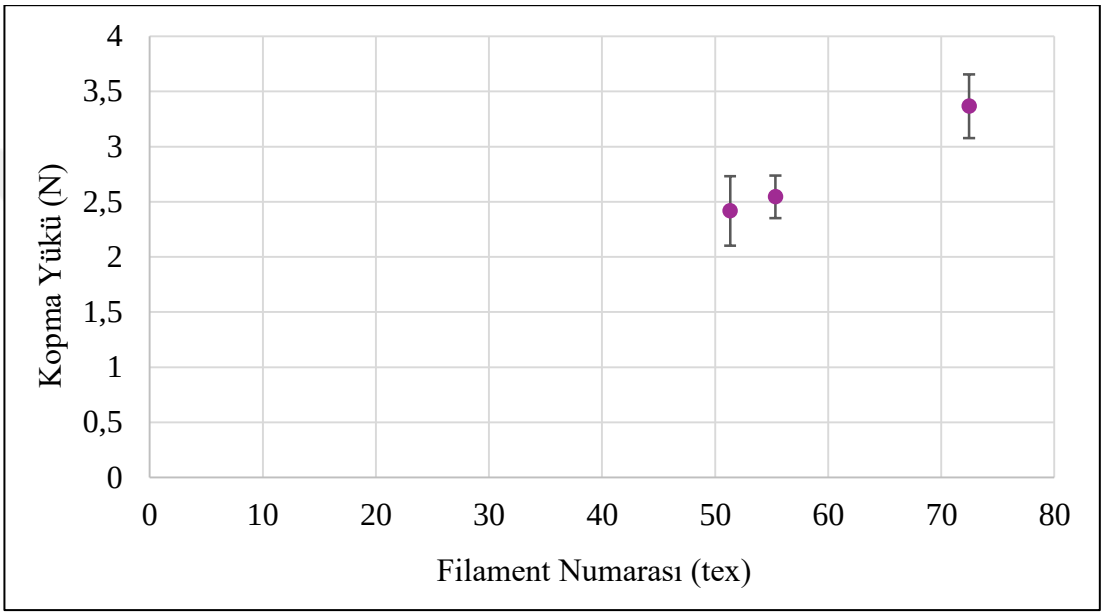
Elde edilen sonuçlar, ekstrüder hızının üretilen filament sayısında önemli bir etkiye sahip olduğunu doğrulamaktadır. Regresyon denklemi, pozitif doğrusal bir ilişki göstermekte olup, ekstrüzyon hızının artırılmasının filament numarasını artırdığını göstermektedir. R^2 değeri 0,8862 olan bu sonuç, ekstrüder hızının filament sayısı etkileyen önemli bir faktör olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Çünkü ekstrüder hızının artmasıyla, düzeye beslenen erimiş polimer miktarı kütlesel olarak artar, dolayısıyla da düzeden çekilen filamentin birim uzunluğunun ağırlığı (filament numarası) artar.

Ancak, bu hızların filamentlerin diğer özellikleri, örneğin kopma yükü ve mukavemet üzerindeki etkilerini değerlendirmek için ek çalışmalar yapılması gerekmektedir.

4.1.2. Atık HDPE ve Saf HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Kopma Yükü ve Mukavemet Sonuçları

- **Kopma Yükü Sonuçları**

HDPE atık ve saf karışımından üretilen monofilamentlerin kopma kuvveti üzerine yapılan çalışmada, filament numarasının artmasıyla kopma kuvvetinde bir artış gözlemlenmiştir (şekil 4.2).



Şekil 4.2. HDPE Atıkları ve Saf HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Kopma Yükü değerleri

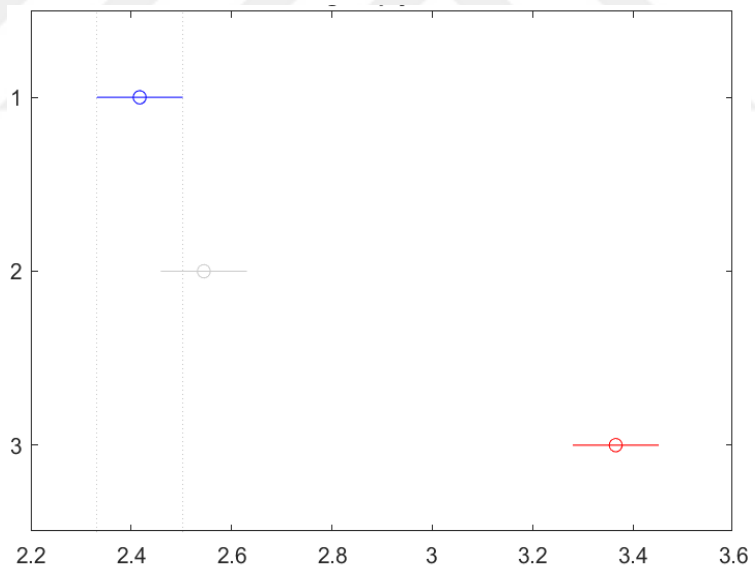
Elde edilen sonuçlar, filament numarasındaki artışla birlikte kopma yükünde genel bir artış eğilimi olduğunu göstermektedir. Ancak, bu eğilim belirgin olmasına rağmen, bazı bireysel değerler arasındaki farklar her zaman istatistiksel olarak anlamlı değildir. Bu anlamlılık eksikliği, iki ana faktörden kaynaklanmaktadır: yüksek standart sapma ve bireysel değerlerin yakınlığı. Değerlerin birbirine yakın olması, sonuçların doğal olarak birbirine yakın çıkmasına yol açmaktadır; bu da daha ince farkların tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu gözlemi istatistiksel olarak doğrulamak amacıyla ANOVA ve LSD testleri $\alpha = 0.05$ için uygulanmıştır.

Ortalamaların birbirinden farklı olup olmadığını anlamak için ANOVA testi yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki Çizelge 4.2'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.2. HDPE Atıkları ve Saf HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Kopma Yükünün ANOVA Testi Soncu

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F	p Değeri
Gruplar Arası	10,5989	2	5,29947	72,17	2,40E-16
Gruplar İçi (Hatalar)	4,1855	57	0,07343		
Toplam	14,7844	59			

Tablodaki yüksek F değeri ve düşük p değeri kopma yükü sonuçlarında anlamlı farklar olduğunu göstermektedir. Ardından da her bir grubun birbiriyle kıyaslanması için LSD testi yapılmıştır. LSD testi sonuçları şekli 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. HDPE Atıkları ve Saf HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin LSD Testi Soncu

Şekil 4.3'te y ekseninde 1 rakamıyla temsil edilen 51,33 tex monofilament ile 2 rakamıyla temsil edilen 55,34 tex monofilament arasında kompa yükü sonuçlarında istatistiki olarak bir fark çıkmamıştır. Sonuç olarak, bazı bireysel karşılaştırmalar (51.33 tex ve 55.34 tex) anlamlı olmasa da genel istatistiksel analiz, filament numarasındaki

artışın kopma yükünde bir artış eğilimi olduğunu doğrulamaktadır. Bu eğilim, grafiklerin görsel gözlemleriyle (Şekil 4.2) de uyumludur ve filament numarasındaki artışın incelenen monofilamentlerin kopma yükünü artırdığına işaret etmektedir.

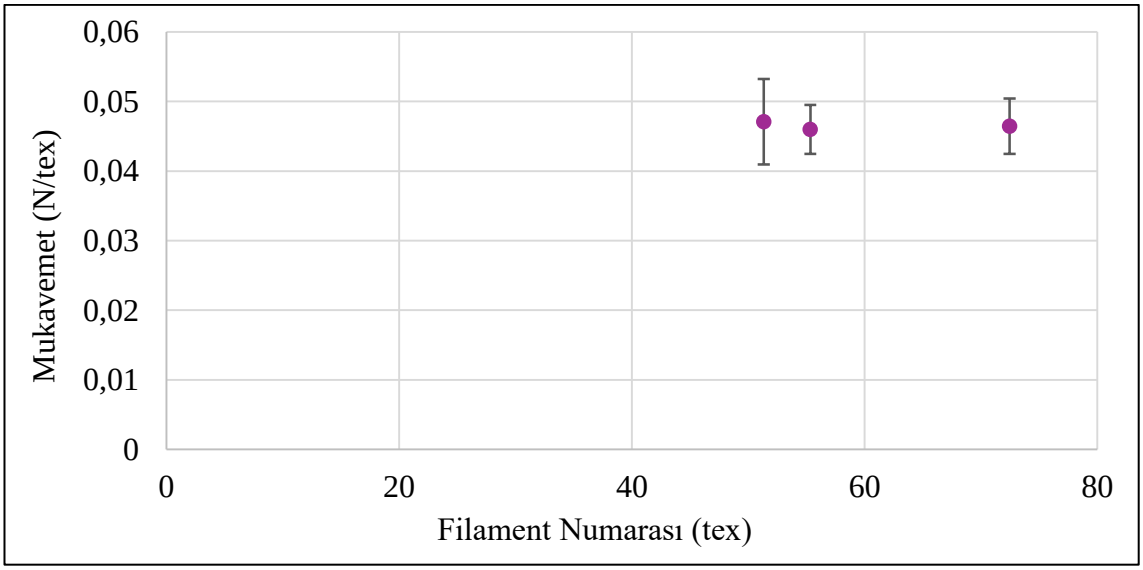
- **Mukavemet incelenmesi**

Bu bölümde, kütlece %50 oranlarında karıştırılan saf HDPE ve geri dönüştürülmüş HDPE polimerlerinden üretilen monofilamentlerin mukavemet testlerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Buradaki amaç, aynı koşullar altında üretilen %50 saf %50 atık HDPE monofilamentlerin kalınlıklarından bağımsız olarak çekmeye karşı dirençlerini değerlendirmektir.

Çekme testlerinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda (çizelge 4.3) sunulmaktadır.

Çizelge 4.3. HDPE Atıkları ve Saf HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Mukavemet Testi Soncu

Numune Numarası (tex)	Mukavemet (N/tex)	
	Oratalama	Standart Sapma
51,33	0,0471	0,0061
55,34	0,0460	0,0035
72,46	0,0464	0,0040



Şekil 4.4. HDPE Atıkları ve Saf HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Mukavemet Testi Sonucu

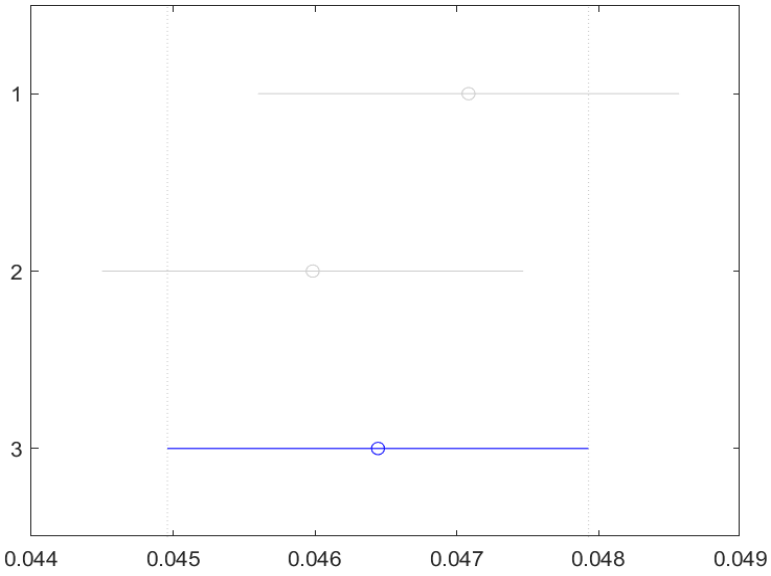
Sonuçlar, monofilamentlerin çekme dayanımının nispeten sabit olduğunu (Şekil 4.4), ancak bazı varyasyonlar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ölçülen değerler birbirine yakın olup, tüm numuneler aynı koşullar altında, aynı temel malzemeler kullanılarak üretildiği için bu durum beklenmektedir. Çünkü aynı ipliği ürettiğimiz için, polimerlerimiz aynı olduğundan, kalın veya ince olmasına bakılmaksızın mukavemetinin aynı olması gerekmektedir. Üretim koşullarımız, sıcaklığımız ve çekim hızımız aynı olduğundan mukavemetin yakın olması beklenmektedir.

Sonuçların benzerliğini doğrulamak için, çekme dayanımı verilerine ANOVA testi (α=0.05) uygulanmıştır. ANOVA testinin sonuçları çizelge 4.4'te sunulmaktadır.

Çizelge 4.4. HDPE Atıkları ve Saf HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Mukavemetinin ANOVA Testi Soncu

Değişimin Kaynağı	**Kareler Toplamı**	**Serbestlik Derecesi**	**Kareler Ort.**	**F**	**p Değeri**
Gruplar Arası	0,00001	2	6,0860E-06	0,28	0,7591
Gruplar İçi (Hatalar)	0,00125	57	2,1973E-05		
Toplam	0,00126	59			

p değeri (0,7591) anlamlılık düzeyinden (0,05) çok daha büyük olduğundan, mukavemet sonuçları arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. Grup ortalamalarını karşılaştırmak için LSD testi de uygulanmıştır. Bu test sonucu da, ortalamalar arasında önemli bir fark olmadığını şekil 4.5'te göstermektedir. Beklendiği gibi, istatistiki olarak da mukavemet sonuçları arasında fark bulunmamıştır.

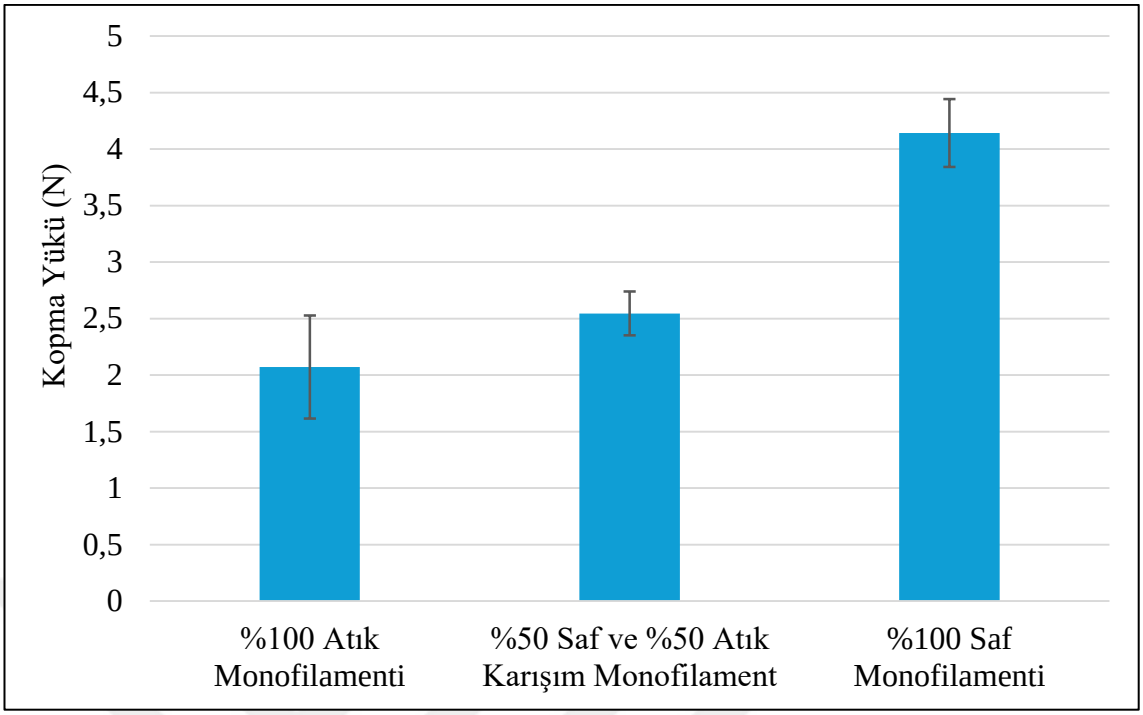


Şekil 4.5. HDPE Atıkları ve Saf HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Mukavetmetinin LSD Testi Sonucu

4.1.3. %100 Atık, %50 Atık / %50 Saf ve %100 Saf HDPE'den Üretilmiş Monofilamentlerin Mukavemetlerinin İncelenmesi

Bu bölümde, %100 atıktan, %50 atık - %50 saf ve %100 saf HDPE'den üretilen monofilamentlerin kopma yükü ve mukavemetini incelenmiştir. Üretim, ekstrüder hızının 2,5 dev/dak olduğu sabit bir hızda gerçekleştirilmiştir. Bu sabit hız, değişkenleri minimize ederek sadece malzeme kompozisyonunun kopma mukavemeti üzerindeki etkisine odaklanılmasını sağlamaktadır.

%100 atıktan, %50 atık - %50 saf HDPE'den ve %100 saf HDPE'den üretilen monofilamentlerin kopma yükü grafiği (Şekil 4.6) incelendiğinde, HDPE'nin saflık oranı arttıkça kopma yükü değerinde önemli bir artış gözlemlenmektedir. %100 saf HDPE'den üretilen filamentler, %100 atıktan ve %50 atık - %50 saf HDPE'den üretilen filamentlere kıyasla çok daha yüksek kopma yükü değeri göstermektedir. Bu eğilim, HDPE'nin saflığının monofilamentlerin mekanik direnci üzerinde büyük bir etkisi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.6. %100 Atıktan, %50 Atık - %50 Saf HDPE'den ve %100 Saf HDPE'den Üretilen Monofilamentlerin Kopma Yükü Grafiği

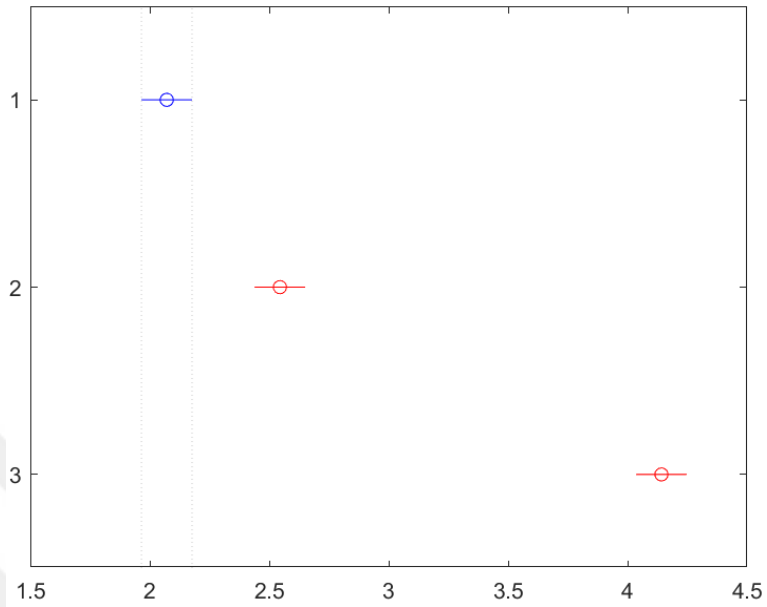
Tüm kopma yükü sonuçları için birbirinden bağımsız grup verileri arasında istatistiki olarak bir fark olup olmadığını anlamak için α=0,05 anlamlılık seviyesi için varyans analizi (ANOVA) F-testi uygulanmıştır. Testin sonuçları, gruplar arasındaki farkın anlamlı olduğunu (Çizelge 4.5), yani HDPE kompozisyonundaki değişimin kopma yükünü üzerinde önemli bir etkisi olduğunu doğrulamaktadır.

Çizelge 4.5. %100 Atıktan, %50 Atık - %50 Saf HDPE'den ve %100 Saf HDPE'den Üretilen Monofilamentlerin Kopma Yükünün ANOVA Testi Soncu.

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F	p Değeri
Gruplar Arası	47,0818	2	23,5409	210.83	4,59E-27
Gruplar İçi (Hatalar)	6,3647	57	0,1117		
Toplam	53,4465	59			

Daha sonra bireysel gruplar arasında doğrudan karşılaştırmalar yapan LSD (en az anlamlı fark) testi uygulanmıştır (α =0.05). Her grup çifti arasında istatistiksel olarak

anlamlı farklar olduğunu göstermektedir (Şekil 4.7), bu da HDPE saflık oranının artmasıyla kopma yükünde önemli bir artış olduğunu güçlendirmektedir.



Şekil 4.7. %100 Atıktan, %50 Atık - %50 Saf HDPE'den ve %100 Saf HDPE'den Üretilen Monofilamentlerin Kopma Yükünün LSD Testi Sonucu

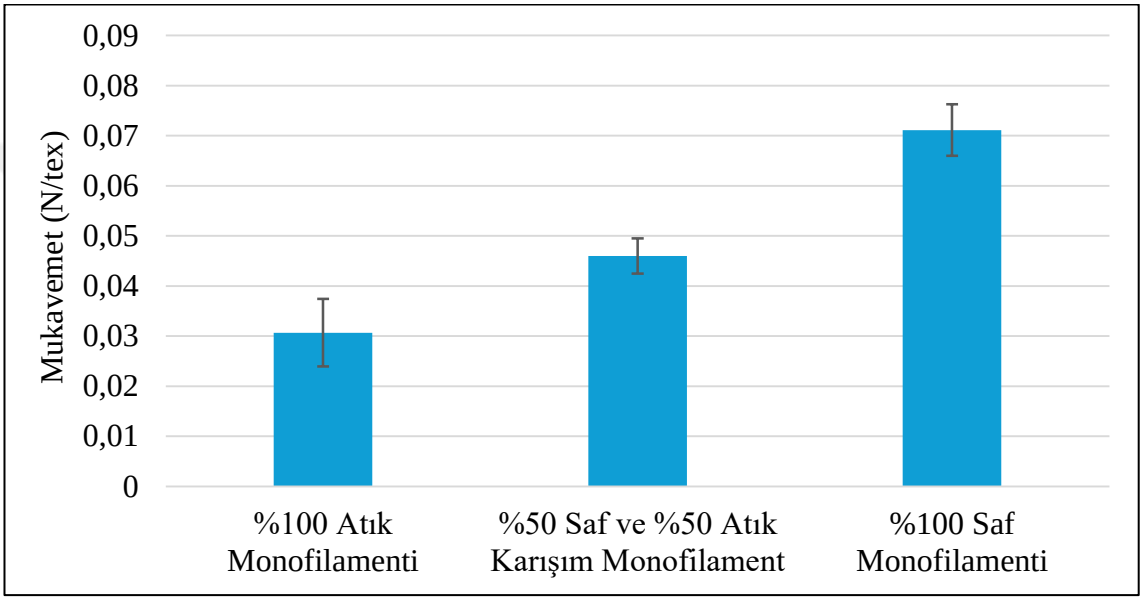
Sonuç olarak monofilamentte artan saf polimer miktarı ile kopma yükü artmaktadır. Ancak burada filamentler aynı extrüder hızında üretilse de filament numaralarında farklılıklar vardır. Bu sebeple daha uygun bir kıyas için mukavemete bakmak gerekli olabilir.

Bu bölümde, %100 geri dönüştürülmüş HDPE, %50 geri dönüştürülmüş HDPE - %50 saf HDPE ve %100 saf HDPE monofilamentlerin mukavemetlerinini karşılaştırarak, polimerin saflığının mekanik özelliklere etkisini değerlendirmektir.

Çekme testlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6'da sunulmaktadır.

Çizelge 4. 6. %100 Atıktan, %50 Atık - %50 Saf HDPE'den ve %100 Saf HDPE'den Üretilen Monofilamentlerin Mukavemet Testi Soncu

Monofilament	Mukavemet (N/tex)	
	Oratalama	Standart Sapma
%100 atık HDPE	0,0307	0,0067
%50 atık- %50 saf HDPE	0,0460	0,0035
%100 saf HDPE	0,0711	0,0051



Şekil 4.8. %100 Atıktan, %50 Atık / %50 Saf HDPE'den ve %100 Saf HDPE'den Üretilen Monofilamentlerin Mukavemetinin Testi Soncu

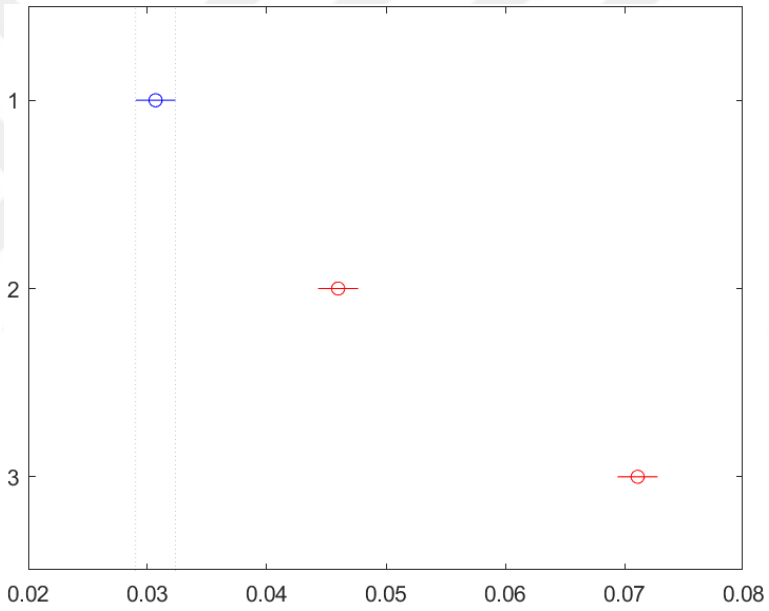
Sonuçlar, Şekil 4.8'de gözterildiği gibi, saf HDPE miktarının artmasıyla birlikte mukavemetin de arttığını göstermektedir. %100 geri dönüştürülmüş HDPE monofilamentlerin mukavemeti, %50 atık ve %50 saf HDPE kompozisyonuna sahip monofilamentlere göre daha düşüktür. En yüksek mukavemeti ise %100 saf HDPE monofilamentlerde gözlemlenmiştir.

Sonuçların istatistiksel anlamlılığını değerlendirmek için ANOVA testi (α =0.05) uygulanmıştır. ANOVA testinin sonuçları, kompozisyonlar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğunu çizelge 4.7'de göstermiştir.

Çizelge 4.7. %100 Atıktan, %50 Atık - %50 Saf HDPE'den ve %100 Saf HDPE'den Üretilen Monofilamentlerin Mukavemetinin ANOVA Testi Soncu

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F	p Değeri
Gruplar Arası	0,01666	2	0,00833	296,66	7,39E-31
Gruplar İçi (Hatalar)	0,0016	57	0,00003		
Toplam	0,01827	59			

LSD testi de uygulanmış ve beklenildiği gibi, mukavemet sonuçları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğu bulunmuştur (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. %100 Atıktan, %50 Atık - %50 Saf HDPE'den ve %100 Saf HDPE'den Üretilen Monofilamentlerin Mukavemetinin LSD Testi Sonucu

Sonuç olarak, %100 atık HDPE'den üretilen monofilamentlerin mukavemeti, saf HDPE içeriği arttıkça artmaktadır. %100 saf HDPE monofilamentler en yüksek mukavemeti sahipken, %100 atık HDPE monofilamentler en düşük mukavemeti sahiptir. İstatistiksel analizler (ANOVA ve LSD) bu sonuçları desteklemekte olup, farklı HDPE kompozisyonları arasında anlamlı farklar olduğunu göstermektedir.

Saf polimer ilavesi ile artan mukavemetin sebebini araştırmak için %100 atık, %50 atık - %50 saf ve %100 saf HDPE polimerinden üretilen filamentlere DSC testi yapılmıştır. Yapılan DSC testin sonuçları aşağıda grafiklerde verilmiştir. DSC testleri neticesinde bulunan önemli ısıl değerler Çizelge 4.8'de verilmiştir. Test edilen tüm numunelerin 1. Isıtma erime pik noktası değerleri birbirine oldukça yakındır. 128-130 °C aralığında elde edilen bu pik noktası değerleri literatürdeki HDPE erime sıcaklığı değerleri ile uyumludur (Gürvardar, 2023).

%100 Atık HDPE Monofilament için Erime Pik Noktası: 1. ısıtmada 128,64 °C, 2. ısıtmada 130,13 °C. Erime Enerjisi: 1. ısıtmada 174,6 J/g, 2. ısıtmada 188,0 J/g. %100 atık HDPE'nin en yüksek erime enerjisine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, atık HDPE'nin erimek için daha fazla enerji gerektirdiğini ve daha yüksek bir kristalizasyon derecesine sahip olabileceğini göstermektedir. Erime pik noktası değerleri, literatürde belirtilen HDPE erime sıcaklıkları ile uyumludur.

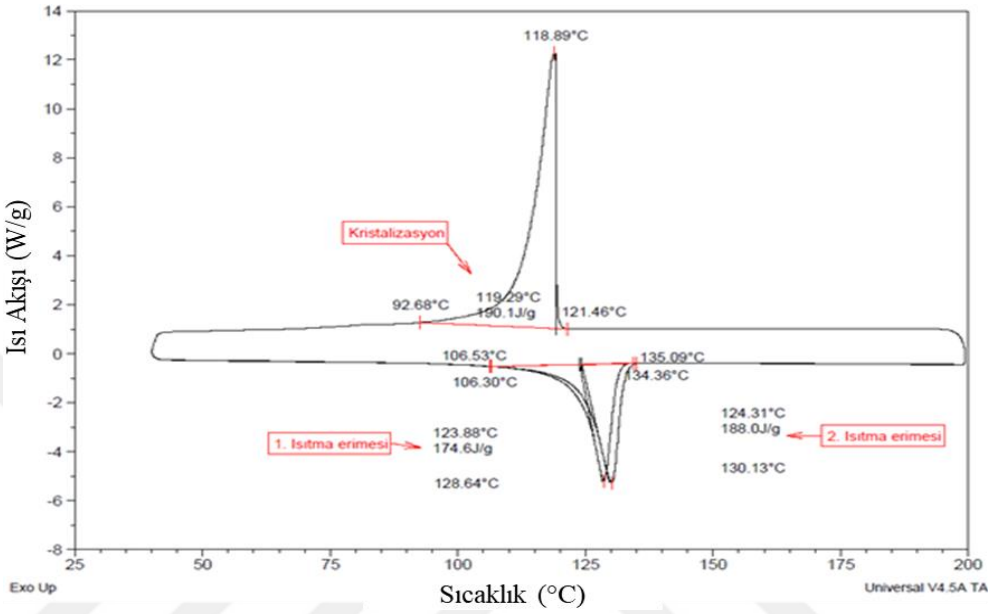
%50 Atık + %50 Saf HDPE Monofilament için Kristalizasyon Pik Noktası: 111,78 °C, Kristalizasyon Enerjisi: 171,28 J/g. Karışım HDPE'nin kristalizasyon enerjisi, diğer iki gruptan daha düşüktür. Bu, karışımın daha düzensiz bir kristal yapıya sahip olabileceğini ve bu nedenle daha düşük bir mukavemet sergileyebileceğini göstermektedir.

%100 Saf HDPE Monofilament için Kristalizasyon Pik Noktası: 119,74 °C, Kristalizasyon Enerjisi: 181,2 J/g. %100 saf HDPE'nin kristalizasyon enerjisi, atık HDPE'den düşük, ancak karışım HDPE'den yüksektir. Bu, saf HDPE'nin nispeten yüksek bir kristalizasyon derecesine sahip olduğunu gösterir, bu da malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirir.

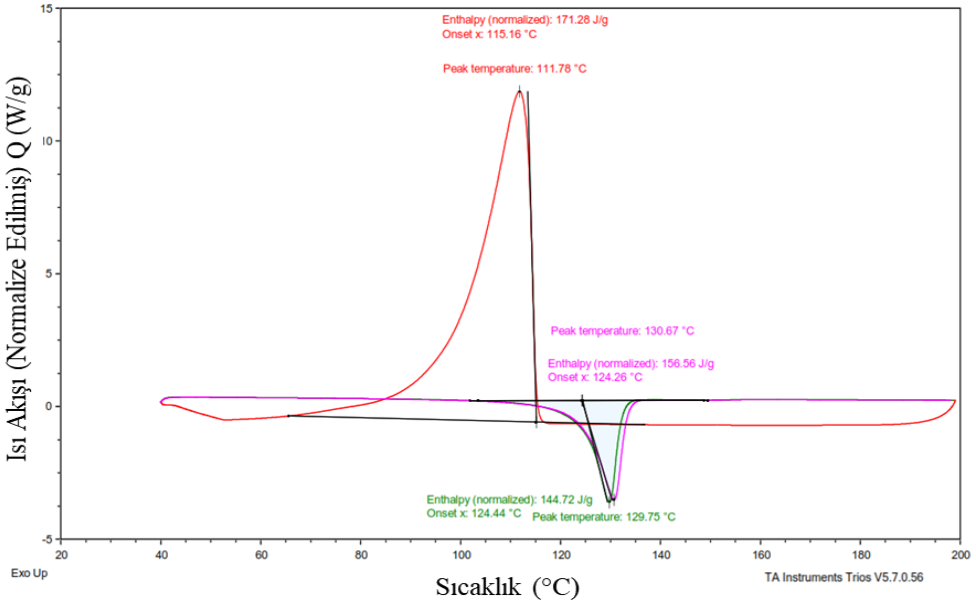
Özet olarak %100 atık polimerden, %100 saf polimere geçişte az da olsa erime sıcaklığında artış dikkat çekmektedir. DSC sonuçlarında dikkat çeken önemli farklılık, filamentlerin erimeye maruz kaldığı 1. Isıtma erime enerjisinde görülmektedir. Atık HDPE için 1. ısıtma erime enerjisi en yüksek ölçülmüştür. Çizelge 1'e göre, erime esnasında birim kütle başına en fazla ısı enerjisi atık HDPE filamenti, en az ısı enerjisi

ise %50 atık granül + %50 saf cips karışımından üretilen HDPE filamenti için verilmiştir. O da verilen enerji miktarı filamentin kristalizasyonu ile ilişkilidir.

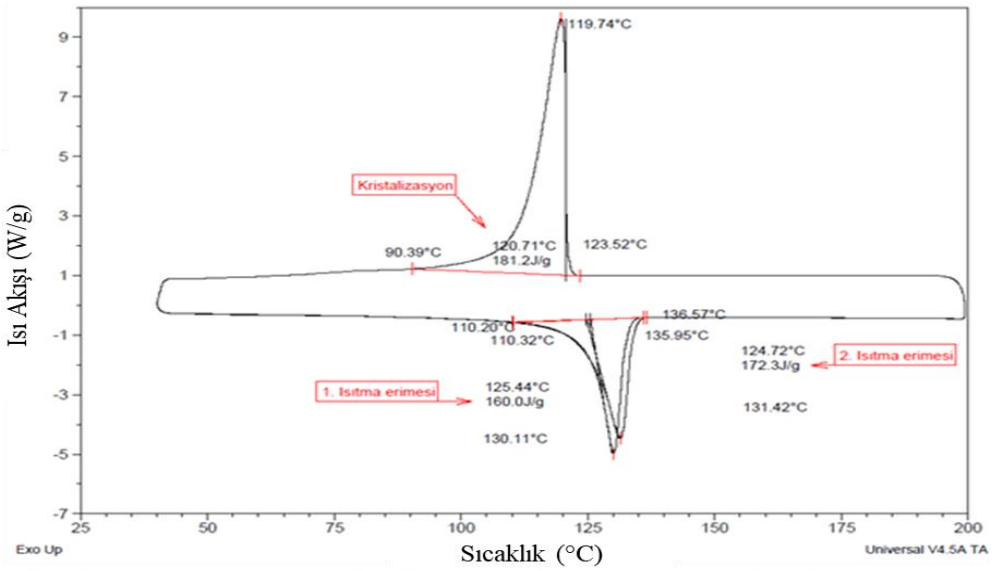
Yapılan DSC testin sonuçları aşağıda grafiklerde verilmiştir (Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12).



Şekil 4.10. %100 Atık HDPE Monofilament DSC Testi Sonucu (Sıcaklık-Isı Akış Grafiği)



Şekil 4.11. %50 Atık - %50 Saf Karışım HDPE Monofilament DSC Testi Sonucu (Sıcaklık-Isı Akış Grafiği)



Şekil 4.12. %100 Saf HDPE Monofilament DSC Testi Sonucu (Sıcaklık-Isı Akış Grafiği)

Çizelge 4.8'deki 1. ısıtma enerjisi değerleri, %100 kristalin HDPE polimerini eritmek için gereken teorik ısı enerji değerleri ile oranlanarak, bu çalışmada üretilen filamentlerin kristalizasyon derecesi hesaplanabilir. Bu hesaplama için Denklem 4.2 kullanılabilir (Suvari, 2024).

$$\boldsymbol{K = \frac{\Delta H\ erime}{\Delta H\ lit}} \tag{4.2}$$

Denklem 4.2'de *K*: kristalizasyon derecesi,

ΔH erime: Ölçülen erime entalpisi,

ΔH lit: Tümüyle kristalin malzemenin referans erime entalpisidir (" NETZSCH GmbH" , 2023). %100 kristalin PE polimerinin erime entalpi değeri literatürde 293 J/g olarak verilmiştir (Blaine, 2002).

Denkleme dayanarak atık HDPE filamentinin kristalizasyonu %59,6, saf HDPE filamentinin kristalizasyonu %54,6 olarak hesaplanmıştır. %50 saf cips ve %50 atık granül karışımından üretilen HDPE filamentin kristalizasyonu ise %49,4 bulunmuştur. Atık HDPE filamentin düşük kopma mukavemeti değerleri dikkate alındığında, atık HDPE filamentinin yüksek kristalizasyonu pek beklenmeyebilir. Çünkü kristalizasyon derecesi arttıkça, üretilen malzeme daha sert ve daha güçlü hale gelir, ancak aynı

zamanda daha kırılgan hale gelir (“NETZSCH GmbH” , 2023). Bununla birlikte, kristalizasyon derecesinin yanı sıra yapısal birimlerin boyutu ve moleküler yönelim de özellikleri etkiler (“ NETZSCH GmbH” , 2023).

Atık ve saf HDPE karışımından üretilen monofilamentin kristalizasyonu, saf ve atık HDPE filamentlerinin kristalizasyon değerlerinden daha düşük çıkmaktadır. Filamentlerin tüm üretim parametreleri aynı olmasına rağmen, kristalizasyondaki bu farklılık kullanılan HDPE polimerlerinin iç yapılarıyla ilişkilidir. Atık ve saf HDPE polimerlerinin farklı kaynaklardan temin edilmesi nedeniyle moleküler yapı farklılıkları olduğu düşünülmektedir. Atık ve saf polimer karışımının moleküler dağılımı daha geniş ve daha heterojen olabilir. Muhtemel moleküler yapı farklılıkları (molekül zinciri uzunluğu farklılıkları), kristalizasyon sürecini etkilemiş ve kristalizasyon derecesini azaltmış olabilir. Moleküler yapı hakkında daha ileri bir analiz için üç monofilament için de MFR testleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.8. Filamentlerin DSC Testi Sonucundaki Termal Değerleri

	Birim	**%100 Atık Filament**	**%50 Atık + %50 Saf Monofilament**	**%100 Saf Filament**
1. Isıtma Erime Pik Noktası	°C	128,64	129,75	130,11
1. Isıtma Erime Enerjisi	J/g	174,6	144,72	160,0
2. Isıtma Erime Pik Noktası	°C	130,13	130,67	131,42
2. Isıtma Erime Enerjisi	J/g	188,0	156,56	172,3
Kristalizasyon Pik Noktası	°C	118,89	111,78	119,74
Kristalizasyon Enerjisi	J/g	190,1	171,28	181,2

Yapısal birimlerin boyutu ve moleküler yönelim, kristalizasyon derecesi malzemenin özelliklerini etkiler (“NETZSCH GmbH” , 2023). Saf HDPE filamentlerin atık filamentlere göre moleküler zincirlerinin uzunluğu önemli ölçüde daha yüksek mukavemetle ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Karışım polimerden elde edilen monofilamentin kristalizasyonu, atık HDPE'den daha düşük olmasına rağmen, saf polimerin etkisiyle mukavemeti atık filamente göre daha yüksek çıkmıştır. MFR test sonuçları, karışım malzemenin MFR değerinin atık

malzemeye göre önemli ölçüde daha düşük olduğunu göstermektedir, bu da uzun molekül zincirlerine sahip saf HDPE polimerinin etkisi olarak düşünülmektedir.

Çizelge 4.9. Eriyik Akışkanlığı Hızı (MFR) Testi, ASTM D1238: 2013 Metod B

	%100 Atık Granül	**%50 Atık Granül + %50 Saf Cips**	**%100 Saf Cips**
Test Sıcaklığı (°C)	190	190	190
Test Kütlesi (Kg)	2,16	2,16	2,16
Eriyik Akışkanlığı Hızı (g/10dk)	6,33	1,83	0,333

4.2. Bikomponent Liflerin İncelenmesi

4.2.1. Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Merkez-Dış (Core-Sheath) Bikomponent Filamentlerin İncelenmesi

Merkez-dış bikomponent filamentin üretim sürecinde, merkez malzemesi olarak atık HDPE polimeri kullanılırken, dış malzemesi olarak ise saf HDPE kullanılmıştır. Düze çıkışından hemen sonra merkez-dış bikomponent filamentin görüntüsü Şekil 4.13'te sunulmaktadır. Toplanan plastik atıkların çoğunluğu mavi renkte olduğundan, bikomponent filamentin merkezi Şekil 4.13'te mavi olarak görünmektedir.



Şekil 4.13. Düzeden Hemen Sonra Merkez-Dış Bikomponent Filamentin Görünümü

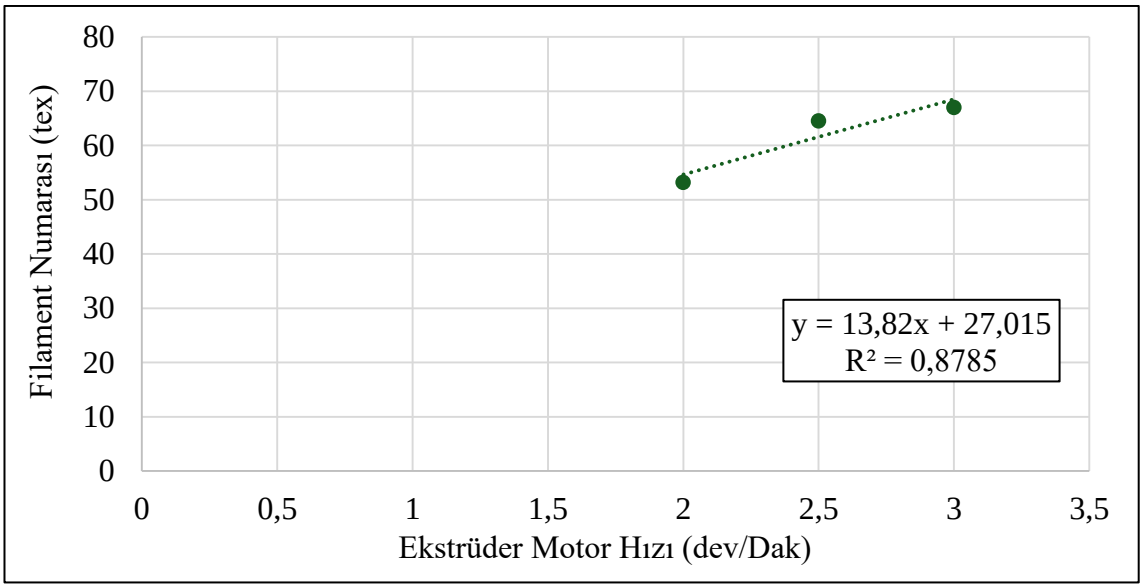
4.2.1.1. Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Numarasına Ekstrüder Hızının Etkisi

Bu bölümde, atık HDPE ve saf HDPE polimerinden üretilen bikomponent filamentlerin numarasına ekstrüder hızının etkisi incelenmektedir.

Atık HDPE (merkez) ve saf HDPE polimeri (dış) kullanılarak üretilen bikomponent filamentlerin numarasına ekstrüder hızının etkisini analiz etmek için farklı ekstrüder hızlarında bikomponent lifler üretilmiştir. Ekstrüder hızları ve elde edilen sonuçlar Çizlege 4.10'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.10. Farklı Ekstrüder Hızlarında Üretilen Bikomponent Filamentlerin Numaraları (Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filament)

Ekstrüder Motor Hızı (dev/dak)		Filament Numarası (tex)
İç	Dış	
1	1	53,17
1,25	1,25	64,53
1,5	1,5	66,99



Şekil 4.14. Ekstrüder Hızına Bağlı Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Numara Değişimi

Farklı ekstrüder hızlarında üretilen bikomponent filamentlerin numara değerleri Şekil 4.14'te verilmiştir. Elde edilen regresyon denklemi şu şekildedir:

$$\boldsymbol{y = 13,82x + 27,015} \quad (4.3)$$

4.3 denkleminde, x ekstrüderin merkez hız ve dış hız toplamını (dev/dak), y ise bikomponent filament numarasını (tex) temsil etmektedir.

Regresyon analizi sonucunda elde edilen regresyon katsayısı R^2=0,8785 olarak bulunmuştur, bu da ekstrüderin merkez + dış hızı ile, üretilen bikomponent filament numarası arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, ekstrüder hızı ile bikomponent filament numarası arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ekstrüder hızının artması, bikomponent filament numarasında artışa neden olmaktadır, bu da regresyon denklemi ve yüksek regresyon katsayısı tarafından desteklenmektedir.

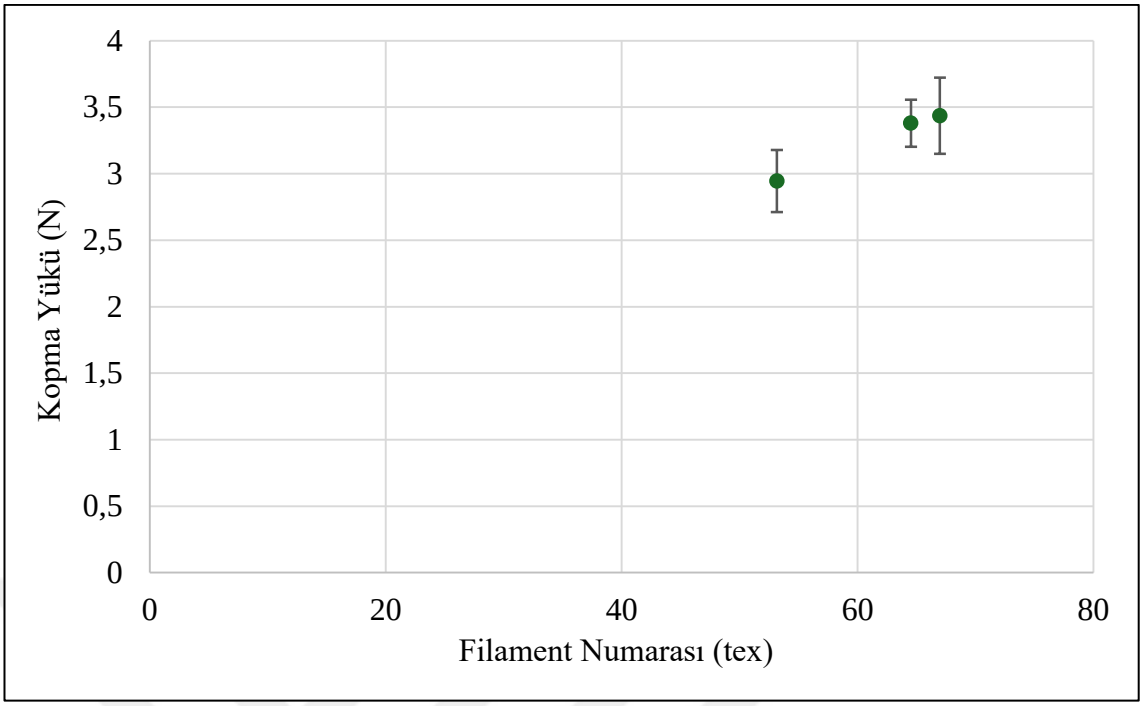
Ekstrüder hızındaki artış, polimer malzemenin düzeye daha fazla basılmasını sağlayarak bikomponent filamentlerin çapının artmasına katkıda bulunmaktadır. Diğer bir deyişle, ekstrüder hızındaki artış, bikomponent filamentlerin kalınlığının artmasına neden olmaktadır.

4.2.1.2. Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Kopma Yükü ve Mukavemet Sonuçları

- **Kopma Yükü Sonuçları**

Bu kısımda, HDPE atıklarından (merkez kısım) ve saf HDPE polimerinden (dış kısım) üretilen bikomponent filamentlerin kopma yükü incelenmiştir.

Çizelge 4.10'da üretim parametreleri verilen merkez-dış kesite sahip bikomponent filamentlerin kopma yükü sonuçları Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. HDPE Atıkları (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filament Kopma Yükü Değerleri

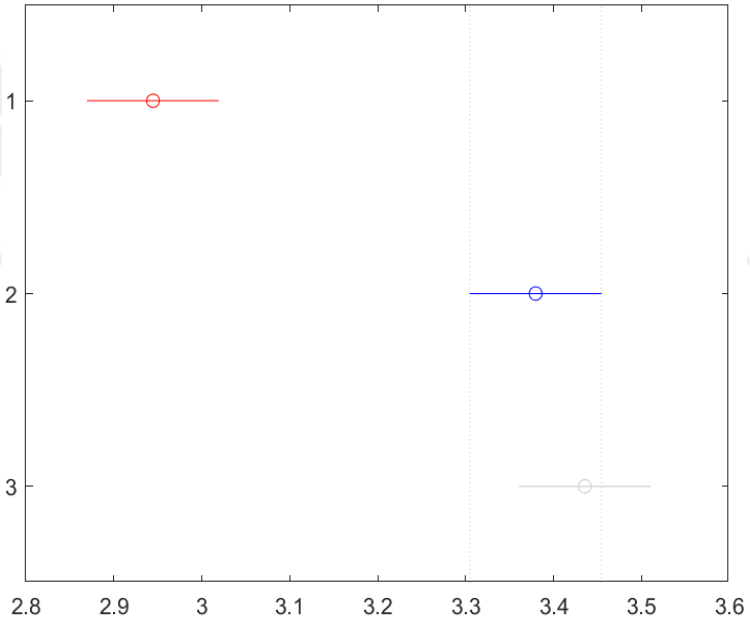
Şekil 4.15'te numara arttıkça kopma yükünde bir artış eğilimi göstermektedir. Bu, üretim hızının artmasıyla birlikte filamentlerin kalınlaşması ve kopma yükünde iyileşmeye işaret etmektedir. Özellikle, numara 66,99 tex ile en yüksek kopma yükü değeri olan 3,44 N elde edilmiştir, bu da daha yüksek üretim hızlarının kopma yükünü artırabileceğini göstermektedir.

ANOVA testi sonuçları, farklı hızlarda üretilen filamentler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğunu göstermektedir. Bu, üretim hızının filamentlerin kopma mukavemeti üzerinde önemli bir etkisi olduğunu doğrulamaktadır. LSD testi neticesinde her ne kadar 64,53 ve 66,99 tex bikomponent filamentlerin kopma yükü değerleri istatistiki olarak aynı çıksa da, numara artışı ile kopma yükünde bir artış trendi olduğu söylenebilir.

Bu testlerin istatistiksel sonuçları aşağıdaki gibi açıklanmaktadır.

Çizelge 4.11. Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Kopma Yükünün ANOVA Testi Sonucu

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F	p Değeri
Gruplar Arası	2,89142	2	1,44571	25,85	1,02E-08
Gruplar İçi (Hatalar)	3,18792	57	0,05593		
Toplam	6,07934	59			



Şekil 4.16. Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin KopmaYükünün LSD Testi Sonucu

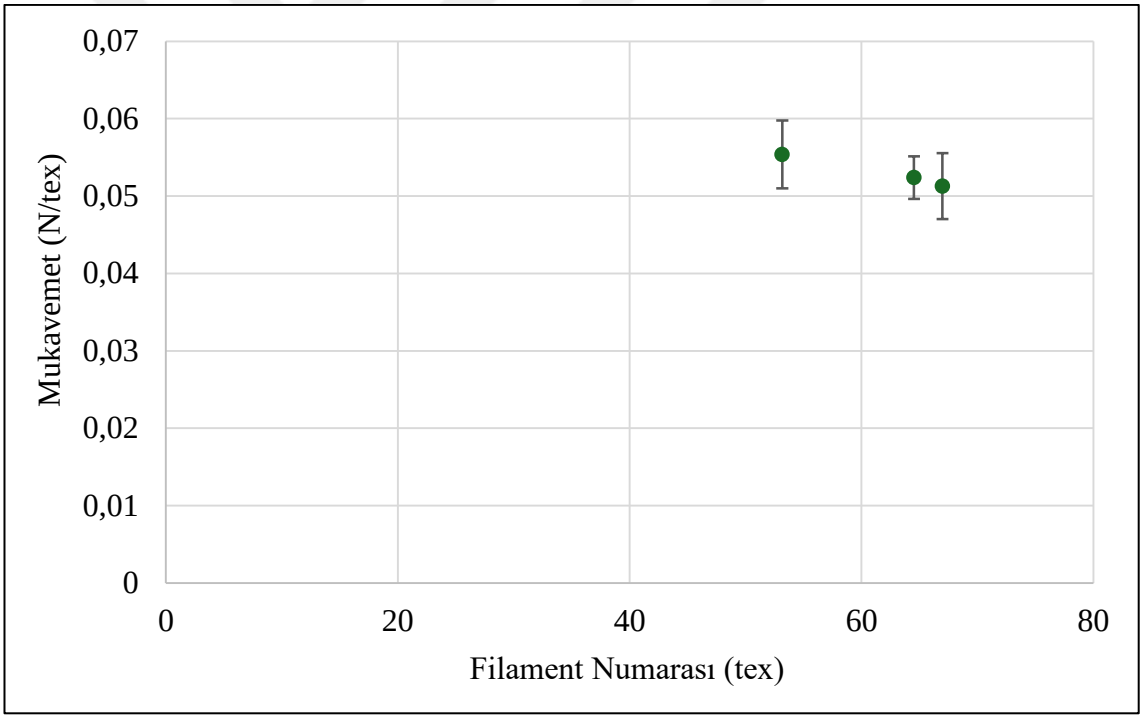
Sonuç olarak, HDPE atıkları ve saf HDPE'den üretilen bikomponent filamentlerin kopma yükü çalışmasında, üretim hızının artmasıyla kopma yükünde belirgin bir artış eğilimi gözlemlenmiştir.

- **Mukavemet İncelenmesi**

Bu bölümde, merkez kısmı atık HDPE ve dış kısmı saf HDPE'den oluşan bikomponent filamentlerin mukavemet sonuçları sunulmaktadır. Mukavemet sonuçları, aşağıdaki Çizelge 4.12'de özetlenmiştir.

Çizelge 4. 12. Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Mukavemet Testi Sonuçları

Numara (tex)	Mukavemet (N/tex)	
	Ortalaması	Standart sapma
53,17	0,0554	0,0044
64,53	0,0524	0,0027
66,99	0,0513	0,0043



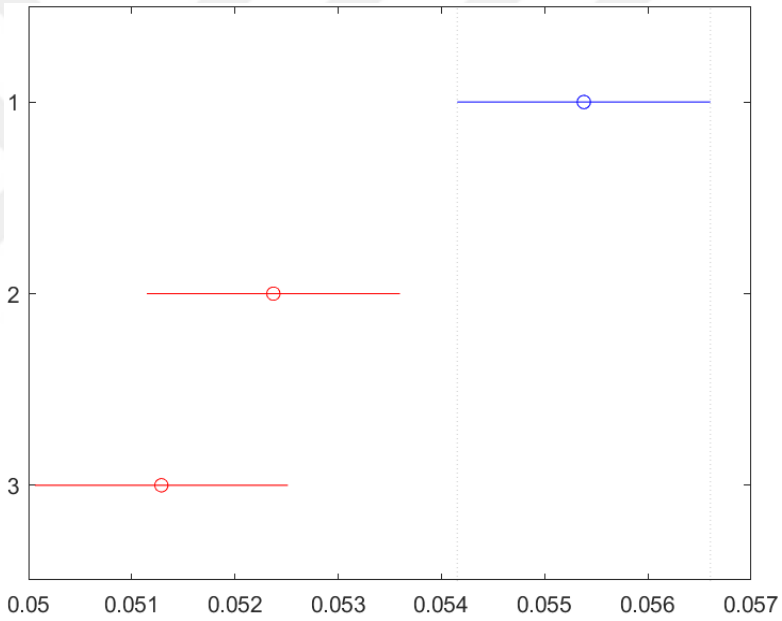
Şekil 4.17. Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Mukavemet Testi Sonucu

Beklendiği gibi, mukavemet değerlerinin Şekil 4.17'de birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak, ilk numunenin mukavemeti diğer iki numuneye göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Son iki numunenin mukavemet değerleri ise birbirine çok yakındır.

Daha ileri bir analiz için mukavemet sonuçlarına ANOVA F testi ve ardından LSD testi ($\alpha = 0,05$) uygulanmıştır.

Çizelge 4.13. Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Mukavemetlerinin ANOVA Testi Sonucu

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F	p Değeri
Gruplar Arası	0,00018	2	8,99E-05	5,99	0,0043
Gruplar İçi (Hatalar)	0,00086	57	1,50E-05		
Toplam	0,00103	59			

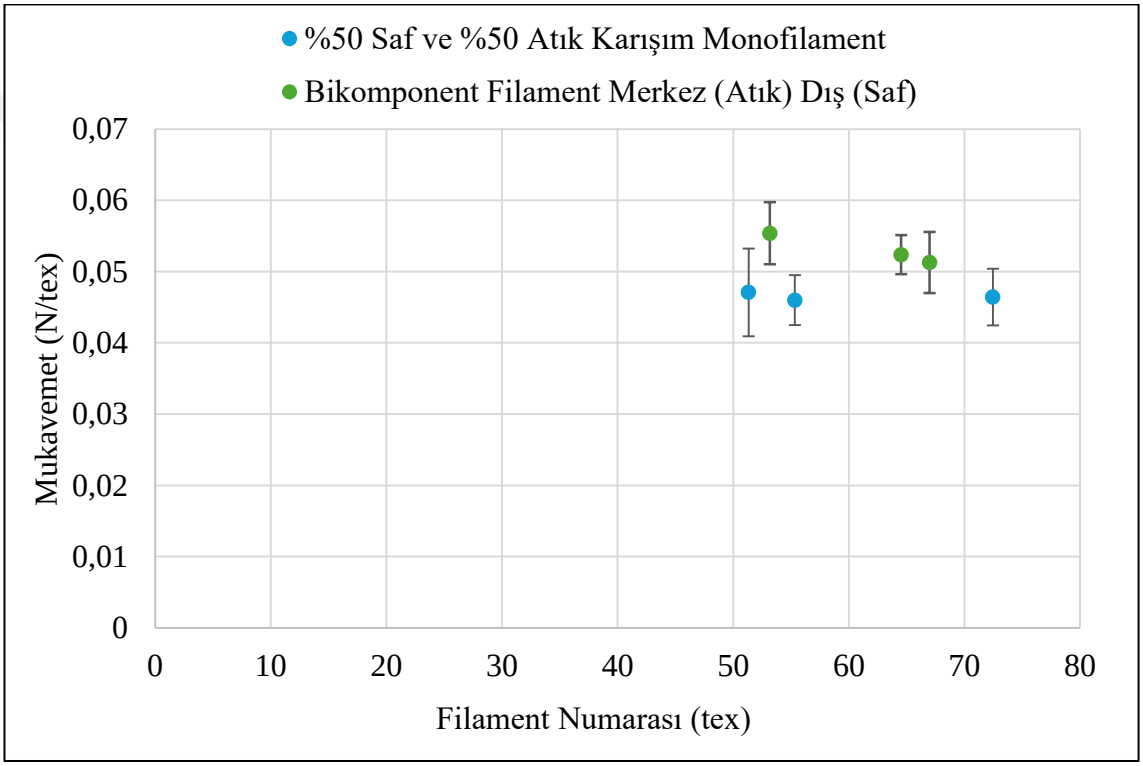


Şekil 4.18. Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Mukavemetlerinin LSD Testi Sonucu

Elde edilen sonuçlara göre, bikomponent filamentlerin, atık HDPE (merkez) ve saf HDPE (dış) kullanılarak üretilmesi, mukavemet açısından oldukça benzer sonuçlar vermektedir. İstatistiksel analizler (ANOVA ve LSD) de bu bulguyu desteklemekte ve ilk değer istatistiki olarak biraz yüksek çıksa da son iki değerin neredeyse aynı olması, beklenen eşit mukavemetin büyük ölçüde gerçekleştiğini (Çizelge 4.13 ve Şekil 4.18) göstermektedir.

4.2.1.3. %50 Atık - %50 Saf HDPE Karışım Monofilament ile Atık HDPE (merkez) ve Saf HDPE (dış) Bikomponent Filamentin Mukavemet Karşılaştırması

Bu bölümde, %50 saf HDPE ve %50 atık HDPE polimerinin karıştırılması ile üretilen monofilamentler ile merkez kısmı atık HDPE ve dış kısmı saf HDPE'den üretilen bikomponent filamentlerin mukavemetlerinin karşılaştırılması sunulmaktadır (Şekil 4.19).



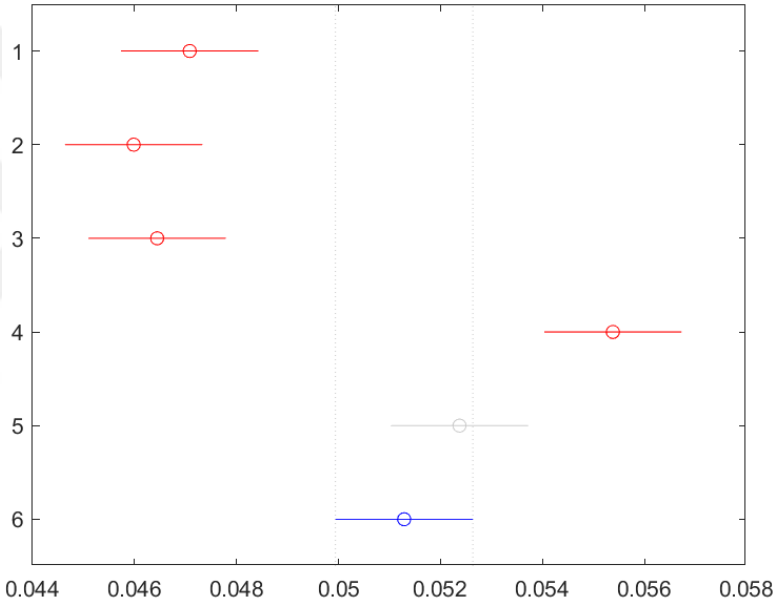
Şekil 4.19. Atık HDPE (Merkez) ve Saf HDPE (Dış) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentler ile %50 Saf HDPE ve %50 Atık HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Mukavemetleri

%50 saf HDPE ve %50 atık HDPE karışımından üretilen monofilamentler, yaklaşık 0,0465 N/tex ortalama mukavemet ve 0,0035 ile 0,0061 N/tex arasında değişen standart sapmalar göstermektedir. Bikomponent filamentler ise, ortalama 0,0530 N/tex mukavemet göstermektedir. Dolaysıyla, iç kısmı atık HDPE ve dış kısmı saf HDPE'den oluşan bikomponent filamentler, %50 saf HDPE ve %50 atık HDPE karışımından üretilen monofilamentlere göre daha yüksek mukavemete sahip olduğu görülmektedir.

ANOVA F testi ve ardından LSD testi (α = 0,05), gruplar arası mukavemet farklarının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını değerlendirmek için gereklidir.

Çizelge 4.14. Mukavemetin Karşılaştırılması ANOVA Testi Soncu

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F	p Değeri
Gruplar Arası	0,00146	5	0,00029	15,83	8,0665E-12
Gruplar İçi (Hatalar)	0,00211	114	0,00002		
Toplam	0,00357	119			

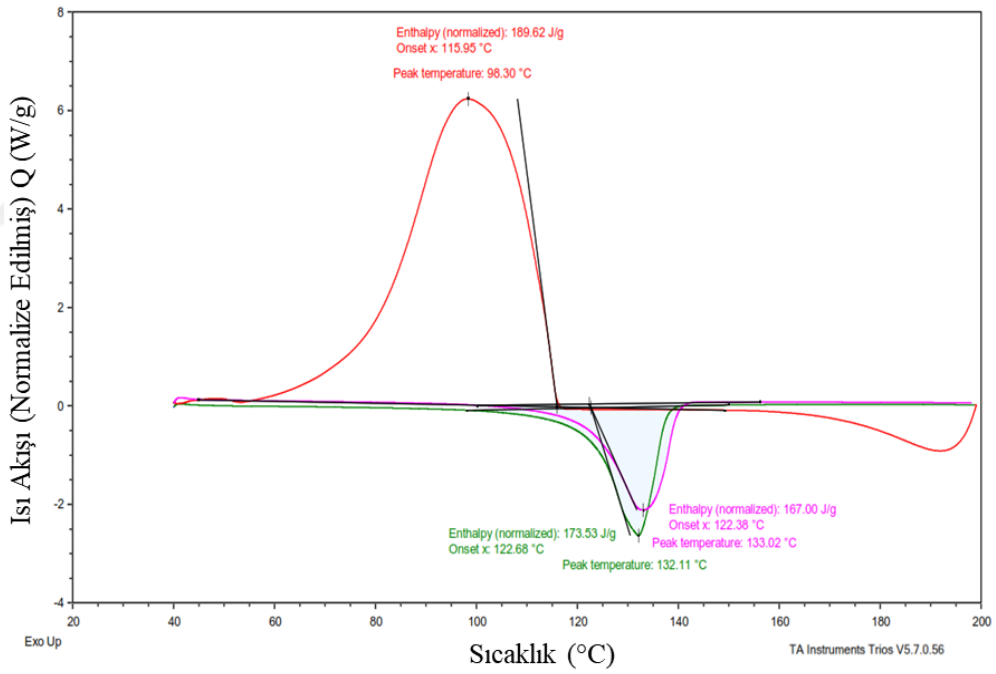


Şekil 4.20. Mukavemetin Karşılaştırılması LSD Testi Soncu

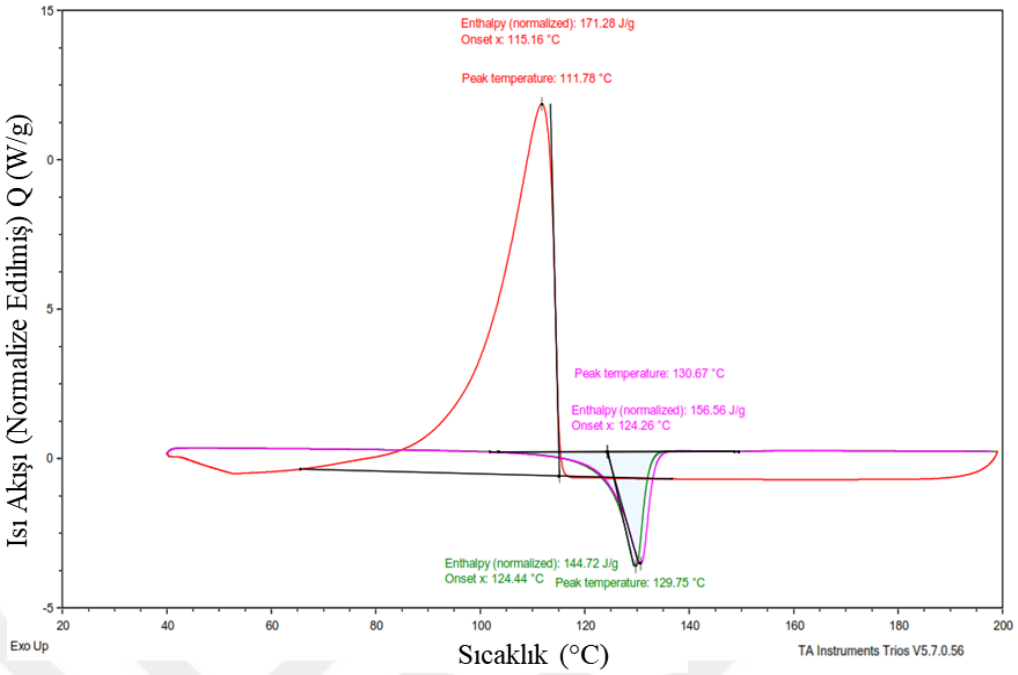
%50 saf HDPE ve %50 atık HDPE karışımından üretilen filamentlerin kabul edilebilir bir mukavemeti sergilediğini, ancak merkez kısmı atık HDPE ve dış kısmı saf HDPE'den oluşan bikomponent filamentlerin daha yüksek mukavemete sahip olduğu görülmektedir. İstatistiksel analizlere göre, bikomponent filament ve monofilament sonuçları arasında belirgin bir farklılık olduğu tespit edilmiştir. (Şekil 4.20'de 1,2 ve 3 numaralı değerler karışımdan üretilen monofilamenti, 4, 5 ve 6 numaralı değerler bikomponent filamenti temsil etmektedir.

DCS sonuçları aşağadaki tabloda (Çizelge 4.15) sunulmaktadır. Soğutma döngüsünde (kristalizasyon davranışı), monofilamentin kristalizasyon pik sıcaklığı 111,78°C ve kristalizasyon entalpisi 171,28 J/g iken, bikomponent filamentin kristalizasyon pik sıcaklığı 98,30°C ve kristalizasyon entalpisi 189,62 J/g'dir. Bikomponent filament, monofilament ile karşılaştırıldığında daha yüksek erime pik sıcaklıklarına ve entalpilerine sahiptir. Bu durum, bikomponent filamentin daha yüksek bir kristallilik derecesine veya daha güçlü moleküler arası etkileşimlere sahip olduğunu gösterir, bu da malzemenin erimesi için daha fazla enerji gerektirdiği anlamına gelir. Daha yüksek erime sıcaklıkları, bikomponent filamentin daha termal olarak stabil bir malzeme olduğunu gösterir.

Şekil 4.21 ve şekil 4.22'de yapılan DSC testin sonuçları verilmiştir



Şekil 4.21. Merkez Atık - Dış Saf (%50 - %50) Bikomponent HDPE DSC Testi Sonucu (Sıcaklık-Isı Akış Grafiği)



Şekil 4.22. %50 Atık - %50 Saf Karışım HDPE Monofilament DSC Testi Sonucu (Sıcaklık-Isı Akış Grafiği)

Çizelge 4.15. Filamentlerin DSC Testi Sonucundaki Termal Değerleri

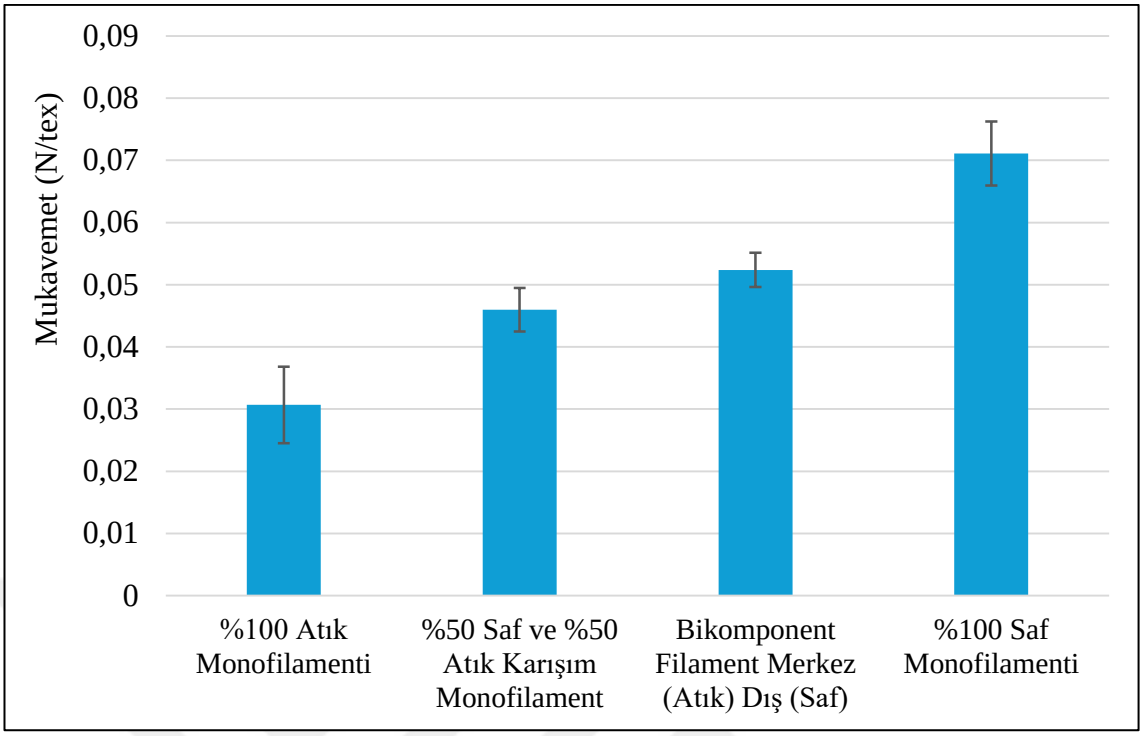
	Birim	%50 Atık + %50 Saf Monofilament	%50 Atık (Merkez) + %50 Saf (Dış) Bikomponent Filament
1. Isıtma Erime Pik Noktası	°C	129,75	132,11
1. Isıtma Erime Enerjisi	J/g	144,72	173,53
2. Isıtma Erime Pik Noktası	°C	130,67	133,02
2. Isıtma Erime Enerjisi	J/g	156,56	167,00
Kristalizasyon Pik Noktası	°C	111,78	98,30
Kristalizasyon Enerjisi	J/g	171,28	189,62

Monofilament ve bikomponent filament arasındaki DSC sonuçlarındaki farklılıklar, yapısal farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Merkez-dış yapısına sahip bikomponent filament, daha yüksek kristalizasyon sağlamaktadır.

DSC analizi, bikomponent filamentin genellikle monofilamente göre üstün termal özellikler sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu, daha yüksek erime sıcaklıkları ve entalpileri ile daha yüksek kristalizasyon entalpilerinden anlaşılmaktadır. Bu özellikler, bikomponent filamentin daha düzenli bir kristalin yapıya sahip olduğunu, bu da daha iyi mekanik ve termal stabiliteye yol açabileceğini göstermektedir. Atık HDPE ve saf HDPE kullanılarak yapılan bikomponent yapı, genel malzeme özelliklerini iyileştirmek için faydalı bir yaklaşım olabilir ve bu da daha yüksek performans gerektiren uygulamalar için daha uygun olabilir.

4.2.1.4. %100 Atık, %50 Atık - %50 Saf, %100 Saf HDPE'den Üretilmiş Monofilamentlerin ve %50 Atık - %50 Saf Bikomponent Filamentin Mukavemetlerinin İncelenmesi

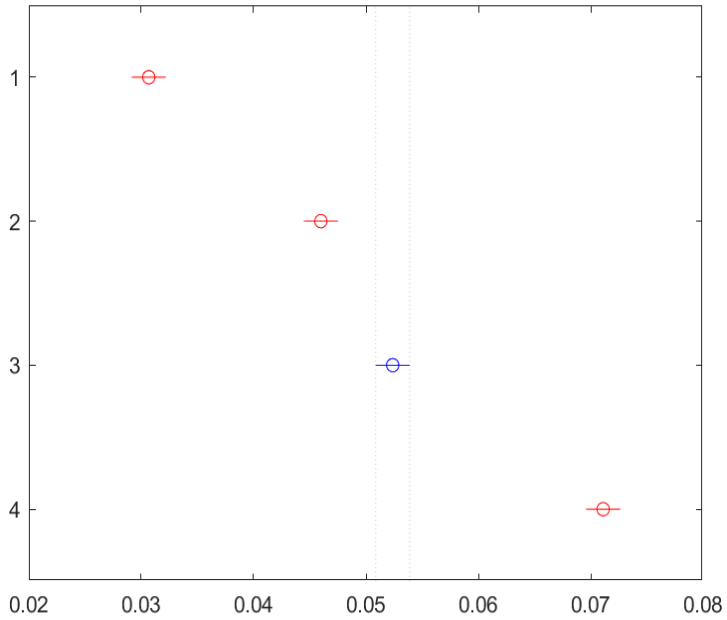
Bu kısımda, farklı HDPE kompozisyonlarından üretilen monofilamentlerin ve merkez kısmı atık HDPE ve dış kısmı saf HDPE'den oluşan bikomponent filamentlerin mukavemetleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.23). Filamentler 2,5 dev/dak ekstrüder hızında üretilmiştir. Önceki sonuçlara göre, %100 atık HDPE'den üretilen monofilamentlerin ortalama mukavemeti 0,031 N/tex, %50 atık HDPE - %50 saf HDPE karışımından oluşan monofilamentlerin ortalama mukavemeti 0,046 N/tex ve %100 saf HDPE'den üretilen monofilamentlerin ortalama mukavemeti 0,071 N/tex olarak hesaplanmıştır. Aynı çalışma kapsamında üretilen bikomponent filamentlerin ortalama mukavemeti ise 0,052 N/tex olarak bulunmuştur. Sonuçların istatistiki analizi için, ANOVA F-testi ve ardından LSD testi uygulanmıştır (α =0.05). İstatistiki analiz sonuçları Çizelge 4.16 ve Şekil 4.24'te verilmiştir



Şekil 4.23. %100 Atık, %50 Atık - %50 Saf, %100 Saf HDPE'den Üretilmiş Monofilamentlerin ve %50 Atık - %50 Saf Bikomponent Filamentin Mukavemetlerinin Karşılaştırılması

Çizelge 4.16. Mukavemetin Karşılaştırılması ANOVA Testi Sonucu

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F	p Değeri
Gruplar Arası	0,01681	3	0,0056	244,12	6,42E-39
Gruplar İçi (Hatalar)	0,00174	76	0,00002		
Toplam	0,01856	79			



Şekil 4.24. Mukavemetin Karşılaştırılması LSD Testi Soncu (%100 Atık, %50 Atık - %50 Saf, (%50 - %50) Bikomponent %100 Saf HDPE).

Bu veriler ışığında, saf HDPE yüzdesinin artmasıyla mukavemetin arttığı bir kez daha görülmektedir. İstatistiksel analizlerin, bikomponent filamentin performansının HDPE atık ve saf HDPE karışımından üretilen monofilamentin performansından istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde daha iyi olduğunu gösterdiğini belirtmek uygun olacaktır. En yüksek mukavemet değerini içinde atık bulundurmaması sebebiyle %100 saf HDPE'den üretilen monofilament göstermiştir.

4.2.2. Atık HDPE (dış) ve Saf HDPE (merkez) Polimerinden Üretilen Merkez-Dış (Core-Sheath) Bikomponent Liflerin İncelenmesi

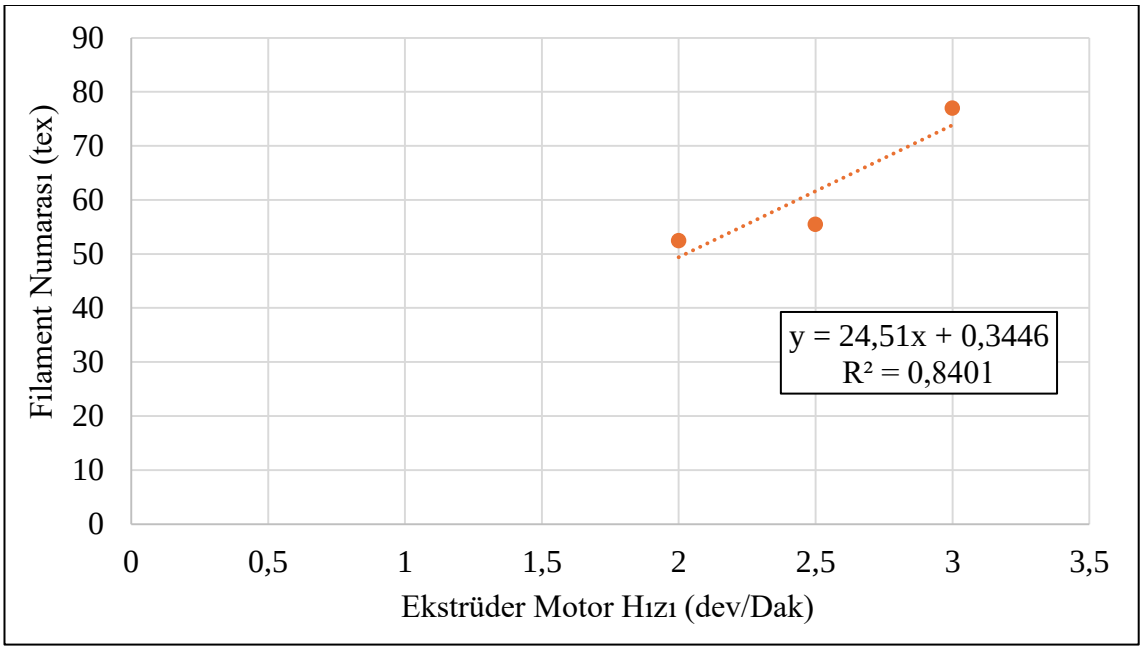
4.2.2.1. Atık HDPE (dış) ve Saf HDPE (merkez) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Numarasına Ekstrüder Hızının Etkisi

Atık HDPE (dış) ve saf HDPE polimeri (merkez) kullanılarak üretilen bikomponent filamentlerin numarasına, ekstrüder hızının etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.17'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.17. Farklı Ekstrüder Hızlarındaki Filament Numaraları (HDPE Atıkları (dış) ve Saf HDPE (merkez) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filament)

Ekstrüder Motor Hızı (dev/dak)		Filament Numarası (tex)
İç	Dış	
1	1	52,45
1,25	1,25	55,45
1,5	1,5	76,96

Çizelge 4.17'de görülebileceği gibi, ekstrüder hızının artmasıyla birlikte üretilen bikomponent filamentlerin numarasında artış gözlenmektedir. Ekstrüder hızının bikomponent filamentlerin numarasına etkisini daha net açıklayan sonuçlar Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Ekstrüder Hızına Bağlı Atık HDPE (dış) ve Saf HDPE (merkez) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Numara Değişimi

Regresyon analizi için yapılan incelemede, aşağıdaki regresyon denklemi elde edilmiştir:

$$y = 24,51x + 0,3446 \quad \textbf{(4.4)}$$

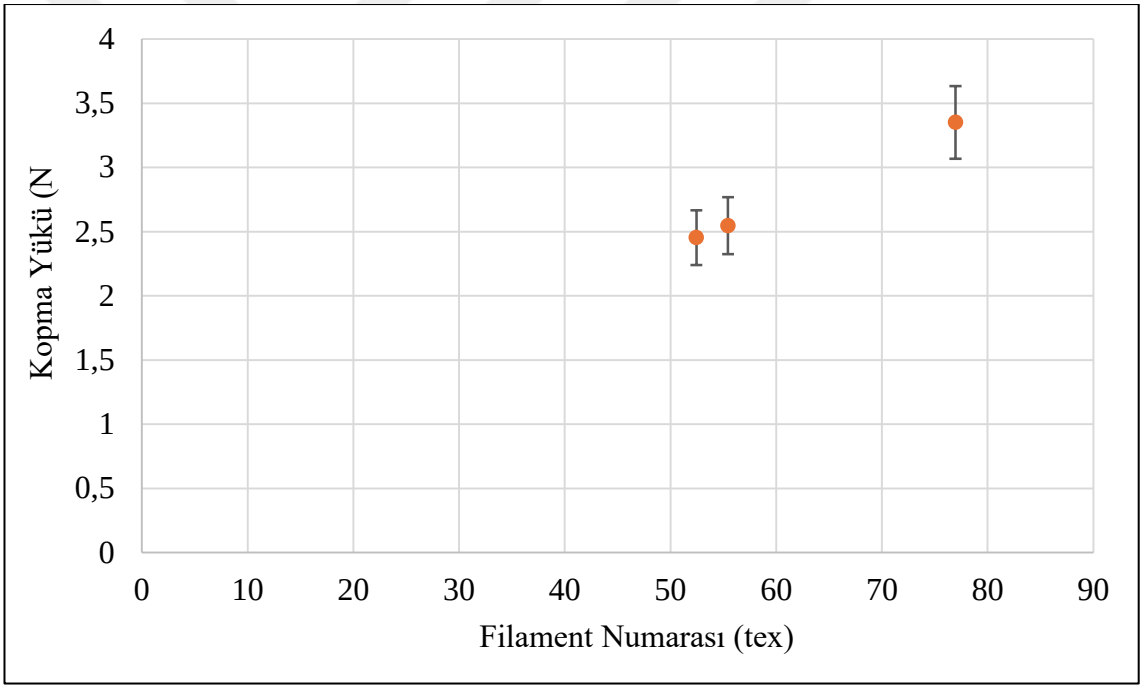
Regresyon katsayısı R^2 =0,8401 olarak hesaplanmıştır.

Bu denklem, ekstrüder hızı ile bikomponent filamentlerin numarası arasında pozitif doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir, bu da üretim sürecinde hızın önemli bir etkisi olduğunu teyit etmektedir.

4.2.2.2. Atık HDPE (dış) ve Saf HDPE (merkez) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Kopma Yükü ve Mukavemet Sonuçları

- **Kopma Yükü Sonuçları**

Bikomponent filamentler, üç farklı extrüder hızında üretilmiştir, HDPE atıkları (dış) ve saf HDPE polimeri (merkez) kullanılarak üretilen bikomponent filamentlerin kopma yükü değerleri Şekil 4.26'te verilmiştir.



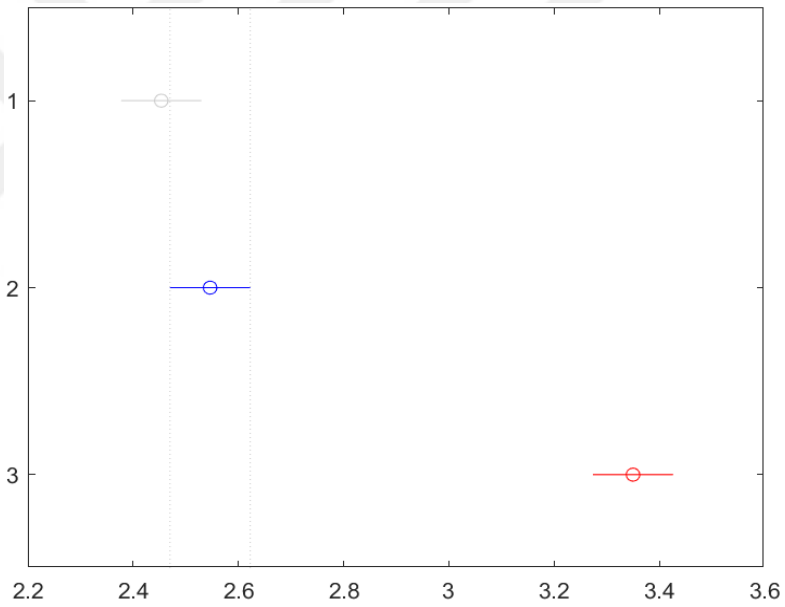
Şekil 4.26. HDPE Atıkları (dış) ve Saf HDPE (merkez) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filament Kopma Yükü değerleri

Şekil 4.25 filament numarası arttıkça kopma yükünün arttığını göstermektedir. Farklı numaraya sahip bikopomponent filamentlerin kopma yükü farklılıklarını değerlendirmek için ANOVA ve LSD testleri (α =0.05) uygulanmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.18 ve Şekil 4.27'da verilmiştir.

Çizelge 4.18. Atık HDPE (dış) ve Saf HDPE (merkez) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Kopma Yükünün ANOVA Testi Sonucu

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F	p Değeri
Gruplar Arası	9,7201	2	4,86006	83,87	1,05E-17
Gruplar İçi (Hatalar)	3,3032	57	0,05795		
Toplam	13,0233	59			

ANOVA ve ardından LSD testi neticesinde her ne kadar 52,45 ve 55,45 tex bikomponent filamentlerin kopma yükü değerleri istatistiki olarak aynı çıksa da, filament numarası artışı ile kopma yükünde bir artış trendi olduğu söylenebilir.



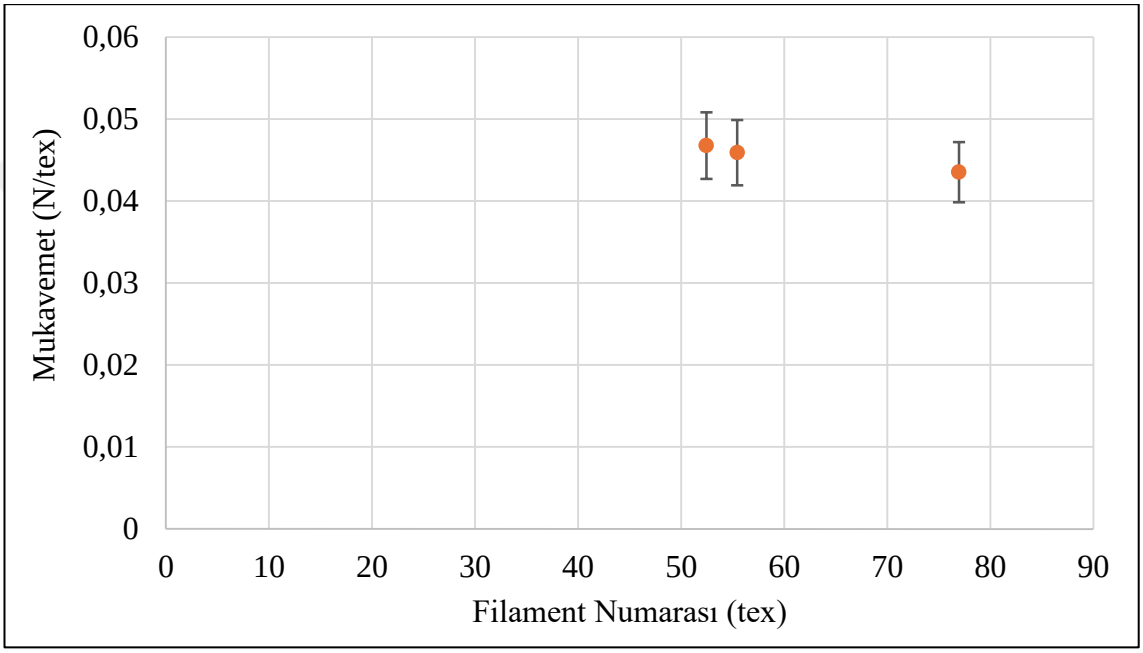
Şekil 4.27. Atık HDPE (dış) ve Saf HDPE (merkez) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin KopmaYükünün LSD testi Sonucu

- **Mukavemet incelenmesi**

Bu bölümde, merkez kısmı saf HDPE ve dış kısmı atık HDPE polimerinden oluşan bikomponent filamentlerin mukavemet testlerinden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Mukavemet testlerinden elde edilen sonuçlar, Çizelge 4.19'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.19. Atık HDPE (dış) ve Saf HDPE (merkez) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentlerin Mukavemet Testi Sonucu

Numara (tex)	Mukavemet (N/tex)	
	Ortalaması	Standart Sapma
52,45	0,0468	0,0041
55,45	0,0459	0,0040
76,96	0,0435	0,0037

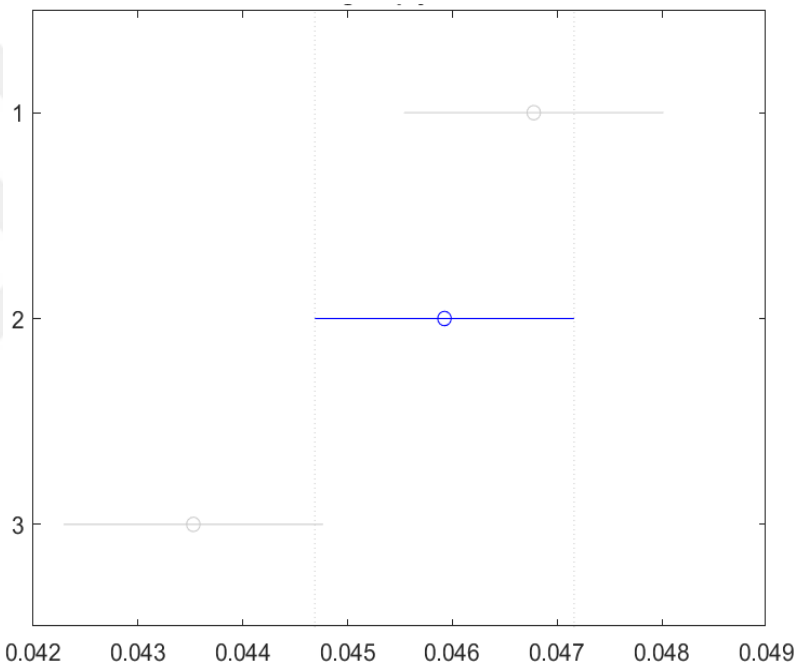


Şekil 4.28. HDPE Atıkları (dış) ve Saf HDPE (iç) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filament Mukavemet Testi Sonucu

Beklendiği gibi, mukavemet değerlerinin Şekil 4.28'de birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak, ilk iki numunenin mukavemeti diğer son numuneye göre biraz daha yüksek çıkmıştır. İlk iki numunenin mukavemet değerleri ise birbirine çok yakındır. Bu nedenle istatistiksel analiz için ANOVA F testi ve ardından LSD testi (α = 0,05) yapılması gerekmektedir.

Çizelge 4.20. HDPE Atıkları (dış) ve Saf HDPE (iç) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filament Mukavemetin ANOVA Testi Soncu.

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F	p Değeri
Gruplar Arası	0,00011	2	5,68E-05	3,72	0,0304
Gruplar İçi (Hatalar)	0,00087	57	1,53E-05		
Toplam	0,00098	59			

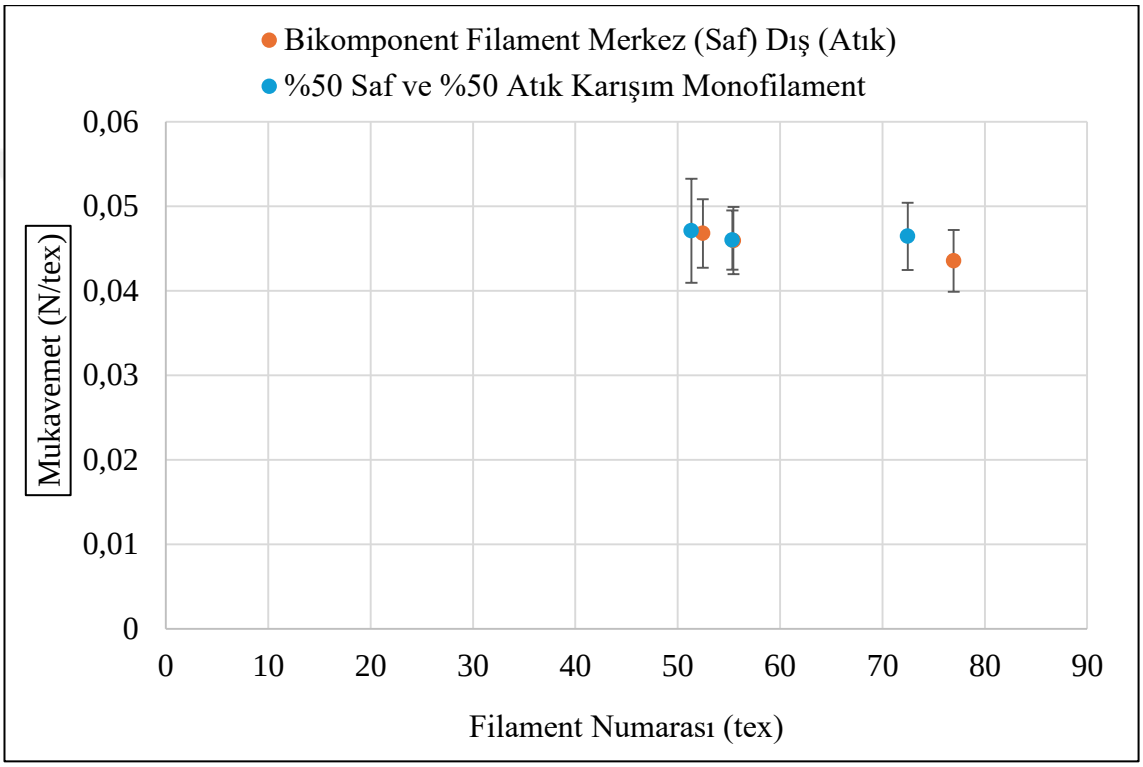


Şekil 4.29. HDPE Atıkları (dış) ve Saf HDPE (iç) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filament Mukavemetin LSD Testi Soncu

Elde edilen sonuçlara göre, bikomponent filamentlerin, atık HDPE (dış) ve saf HDPE (merkez) kullanılarak üretilmesi, mukavemet açısından oldukça benzer sonuçlar vermektedir. İstatistiksel analizler (ANOVA ve LSD) de bu bulguyu desteklemekte ve beklenen eşit mukavemetin büyük ölçüde gerçekleştiğini (Çizelge 4.20 ve Şekil 4.29) göstermektedir.

4.2.2.3. %50 Atık - %50 Saf HDPE Karışım Monofilament ile Atık HDPE (dış) ve Saf HDPE (merkez) Bikomponent Filamentin Mukavemet Karşılaştırması

Bu bölümde, %50 saf HDPE ve %50 atık HDPE polimerinin karıştırılması ile üretilen monofilamentler ile dış kısmı atık HDPE ve merkez kısmı saf HDPE'den üretilen bikomponent filamentlerin mukavemetlerinin karşılaştırılması şekil 4.30'de sunulmaktadır.



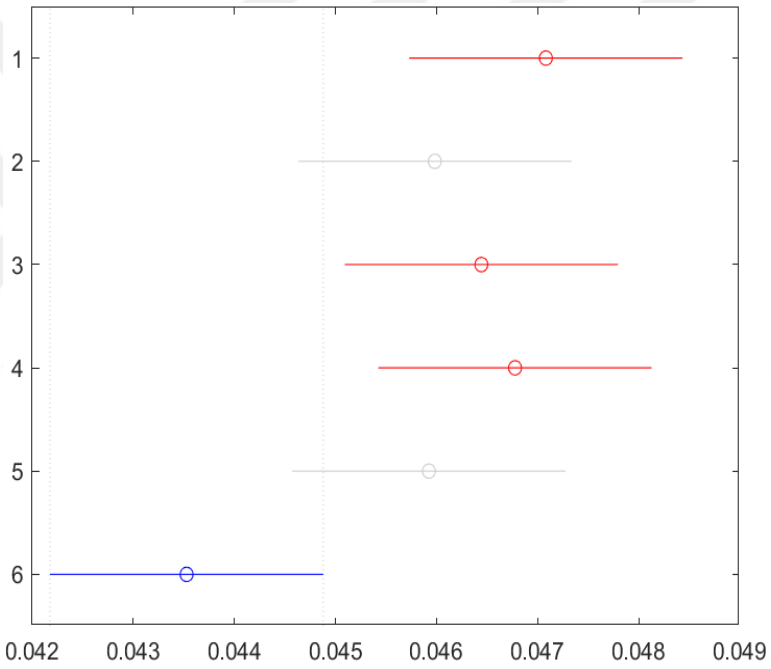
Şekil 4.30. Atık HDPE (Dış) ve Saf HDPE (Merkez) Polimerinden Üretilen Bikomponent Filamentler ile %50 Saf HDPE ve %50 Atık HDPE Karışımından Üretilen Monofilamentlerin Mukavemetleri

%50 saf HDPE ve %50 atık HDPE karışımından üretilen monofilamentler, yaklaşık 0,0465 N/tex ortalama mukavemet ve 0,0035 ile 0,0061 N/tex arasında değişen standart sapmalar göstermektedir. Bikomponent filamentler ise, ortalama 0.0454 N/tex mukavemet göstermektedir. Dolaysıyla, iç kısmı saf HDPE ve dış kısmı atık HDPE'den oluşan bikomponent filamentler, %50 saf HDPE ve %50 atık HDPE'den oluşan filamentlere göre yakın mukavemet değerleri göstermektedir. Bu sonucu doğrulamak

amacıyla ANOVA F testi ve ardından LSD testi (α = 0,05), gruplar arası mukavemet farklarının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını değerlendirmek için gereklidir.

Çizelge 4.21. Mukavemetin Karşılaştırılması ANOVA Testi Soncu

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F	p Değeri
Gruplar Arası	0,00016	5	3,23E-05	1,73	0,1322
Gruplar İçi (Hatalar)	0,00212	114	1,86E-05		
Toplam	0,00228	119			

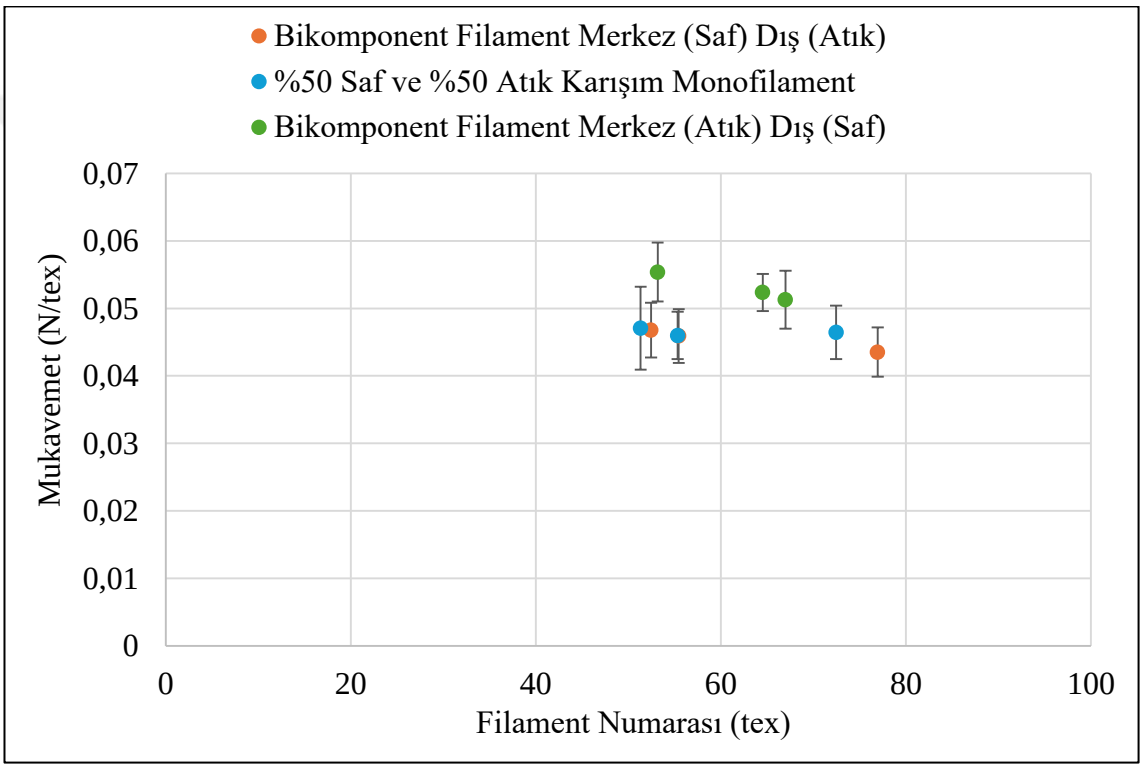


Şekil 4.31. Mukavemetin Karşılaştırılması LSD Testi Soncu

Gerçekleştirilen istatistiki hesaplamalar neticesinde p-değeri 0,1322 bulunmuştur. Bu değer anlamlılık düzeyi olan 0,05'ten büyüktür. Bu, gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı anlamına gelir. Başka bir deyişle, 6 farklı filament arasında mukavemet açısından anlamlı bir fark yoktur.

4.3.Tüm Filamentlerin Kıyaslanması

Çalışmanın bu kısmında atık ve saf HDPE karıştırılarak üretilen monofilamentler, merkez kısmında atık HDPE dış kısmında saf HDPE kullanılan bikomponent filamentler ve merkez kısmında saf HDPE dış kısmında atık HDPE kullanılan bikomponent filamentlerin çekme mukavemeti değerleri kıyaslanmıştır. Netice olarak üretilen tüm filamentlerde %50 atık HDPE ve %50 saf HDPE kullanılmıştır. Çekme mukavemeti sonuçları Şekil 4.32'de toplu olarak verilmiştir.



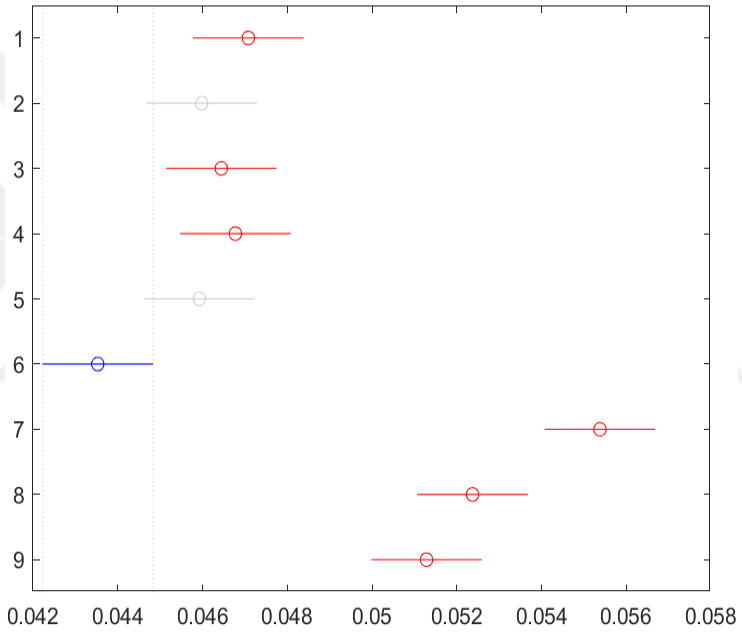
Şekil 4.32. Tüm Filamentlerin Mukavemetlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.31 incelendiğinde, %50 saf HDPE ve %50 atık HDPE karışımından üretilen monofilamentlerin mukavemet değerlerinin 0,0464 N/tex ile 0,0471 N/tex arasında küçük değişiklikler gösterdiğini ortaya koymaktadır. Dış kısmı atık HDPE ve merkez kısmı saf HDPE olan bikomponent filamentlerin mukavemeti ise 0,0435 N/tex ile 0,0468 N/tex arasında değişmektedir. Merkez kısmı atık HDPE ve dış kısmı saf HDPE olan bikomponent filamentler, 0,0513 N/tex ile 0,0554 N/tex arasında değişen daha yüksek bir mukavemet göstermektedir. Bu sonuç, bu konfigürasyonun mukavemet açısından daha iyi performans gösterdiğini belirtmektedir. Tüm mukavemet sonuçlarına

uygulanan ANOVA ve LSD testleri sonuçları (α =0.05) Çizelge 4.22 ve Şekil 4.33'de verilmiştir.

Çizelge 4.22. Tüm Filamentlerin Mukavemet Değerlerinin ANOVA Testi Soncu

Değişimin Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ort.	F	p Değeri
Gruplar Arası	0,00233	8	0,00029	16,75	3,25E-18
Gruplar İçi (Hatalar)	0,00298	171	0,00002		
Toplam	0,00531	179			



Şekil 4.33. Tüm Filamentlerin Mukavemetin Karşılaştırılması LSD Testi Soncu

İstatistiki sonuçlar, merkez kısmı atık HDPE ve dış kısmı saf HDPE olan bikomponent filamentlerin mukavemet açısından en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Monofilamentler ve dış kısmı atık HDPE merkez kısmı saf HDPE olan bikomponent filamentler daha düşük mukavemet göstermektedir.

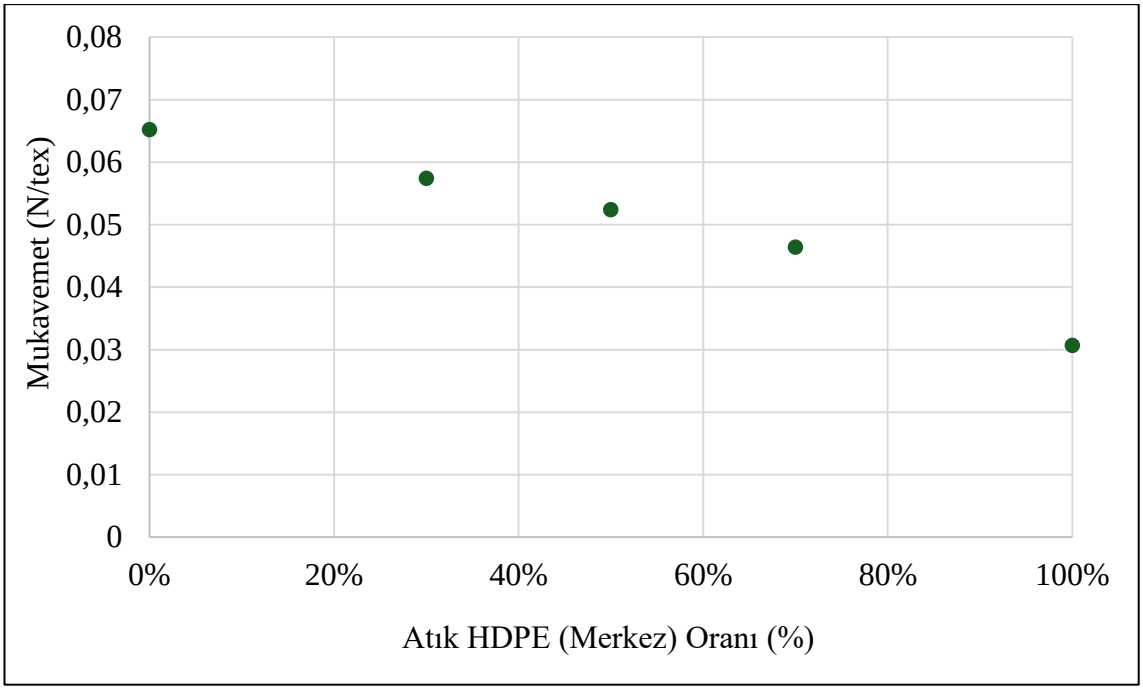
Sonuç olarak, yüksek mukavemet değerleri elde etmek için, dış kısmı saf HDPE olan ve merkez kısmı atık HDPE'den oluşan bir konfigürasyon kullanmak en iyisidir. Bu strateji, geri dönüştürülmüş malzemelerin entegrasyonunu sağlayarak mekanik performansı artırır ve daha sürdürülebilir bir üretime katkıda bulunur.

4.4. Bikomponent Filamentlerde Atık Oranı Arttıkça Mukavemetteki Değişimin İncelenmesi

Bu bölümünde, bikomponent filamentlerin merkez bileşenindeki miktar değişikliklerine bağlı olarak mukavemetteki değişimleri incelemek amacıyla bir analiz gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, merkez bileşendeki atık HDPE polimer oranının artmasıyla üretilen bikomponent filamentlerin mukavamet testi sonuçları Şekil 4.34'te sunulmuştur. Beklendiği gibi, iç bileşende daha yüksek oranda atık polimer olduğunda, bikomponent filamentin mukavemeti azalmaktadır. Buna karşılık, dış kısmında daha yüksek oranda saf polimer olduğunda mukavemet artışı gözlenmektedir.

Bu nedenle, merkez kısmında atık HDPE içeren bikomponent filamentler, uygulama yerinin belirli dayanım gereksinimlerine bağlı olarak kullanılabilir. Bu yaklaşım, daha yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda atık malzemelerin belirli bir ölçüde kullanılmasına olanak sağlar.

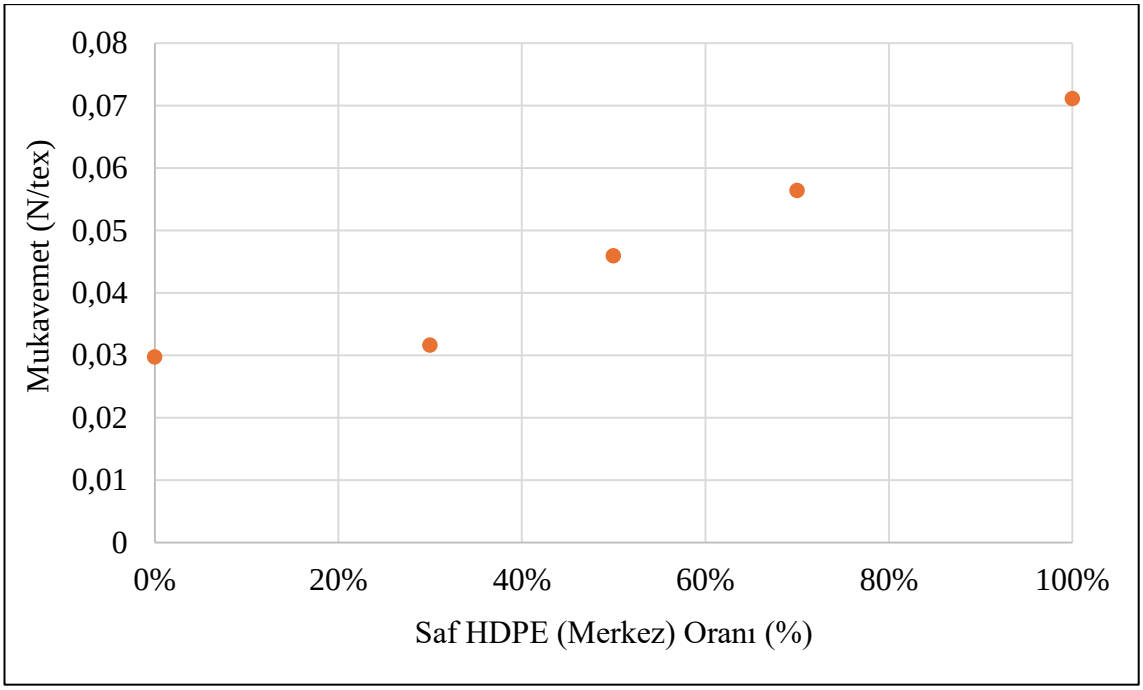


Şekil 4.34. Atık HDPE (Merkez) Miktarına Bağlı Olarak Mukavemetteki Değişim

İkinci aşamada, merkez bileşendeki saf HDPE polimer oranını artırarak üretilen bikomponent filamentlerin mukavemet test sonuçları incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.35'te sunulmaktadır.

Bulgular net bir eğilimi ortaya koymaktadır; merkez kısımda saf HDPE oranının artmasıyla, bikomponent filamentin mukavemetinde belirgin bir artış gözlenmektedir. Saf HDPE oranının %0'dan %100'e çıkmasıyla mukavemetin kademeli olarak arttığı gözlenmektedir.

Bu sonuçlar, filamentin mekanik özelliklerini belirlemede, filament bileşenlerinin miktarının önemini vurgulamaktadır. Buna göre, çeşitli uygulamalarda belirli mukavemet gereksinimlerini karşılamak için filament kompozisyonu ayarlanabilir. Bu da bikomponent filamentlerin hem saf hem de atık malzemeleri etkili bir şekilde kullanma esnekliğini ve potansiyelini vurgulamaktadır.



Şekil 4.35. Saf HDPE (Merkez) Miktarına Bağlı Olarak Mukavemetteki Değişim

Bu bulgular, merkez ve dış kısmın içeriğinin, bikomponent filamentlerin mukavemetine doğrudan etki ettiğini ve en uygun mukavemet gereksinimlerini karşılamak için kompozisyonun dikkatlice ayarlanması gerektiğini göstermektedir. Dolayısıyla, bu

çalışma, atık ve saf HDPE'nin dengeli bir şekilde kullanıldığı bikomponent filamentlerin, çeşitli uygulamalarda mukavemet gereksinimlerini karşılamak için uygun bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışma, atık ve saf HDPE polimer karışımından üretilen monofilamentlerin ve yine atık ve saf HDPE polimerinin kullanıldığı merkez-dış yapıdaki bikomponent filamentlerin mekanik özelliklerini inceleyerek, atık HDPE'nin filament üretiminde kullanılabilirliğini incelemiştir.

Deneysel sonuçlar, ekstrüder hızının, hem monofilament hem de merkez-dış yapıdaki bikomponent filamentlerin kalınlığını (numarasını) doğrudan etkilediğini ve daha yüksek hızların filament üretimini artırdığını ortaya koymuştur. İstatistiksel analizler, daha yüksek filament numarası ile kopma kuvvetinde önemli iyileşmeler olduğunu göstermiş ve istenen çekme direncine ulaşmada üretim parametrelerinin önemini vurgulamıştır.

Yapılan incelemede atık ve saf HDPE polimer karışımından üretilen monofilament, %100 atık HDPE'den üretilen monofilamente göre çekme mukavemetinde önemli bir iyileşme sağlamıştır. Fakat gerçekleştirilen içyapı incelemesinde, saf-atık karışımdan üretilen HDPE filamentte kristalizasyon düşüşü tespit edilmiştir. Atık ve saf HDPE karışımı kristalizasyonda düşüşe sebep olduğundan, bu hammaddeleri karıştırmadan ayrı ayrı, aynı filamentte bulunmasına olanak veren bikomponent teknolojisyle merkez-dış kesitte filamentler üretilmiştir. Merkez kısımda atık HDPE, dış kısımda ise saf HDPE kullanılması durumunda çekme mukavemetinde, saf-atık HDPE karışımından üretilen HDPE monofilamente göre iyileşme tespit edilmiştir. Bunun artan kristalizasyon sebebiyle olduğu düşünülmektedir.

Merkezde atık HDPE, dış kısımda saf HDPE kullanılarak üretilen bikomponent filamentler, %100 atık HDPE'den yapılan monofilamentlere kıyasla çekme mukavemetini %67'den fazla artırdığı belirlenmiştir. Ancak, merkez bileşenindeki atık polimer oranı arttıkça bikomponent filamentlerin mukavemeti azalmış, dış kısmındaki saf polimer oranı arttıkça mukavemet artmıştır. Bu bulgular, HDPE atıklarının etkin bir şekilde yönetilmesine ve sürdürülebilir malzemelerin geliştirilmesine yönelik önemli bilgiler sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu araştırma atık HDPE'nin kullanım potansiyelini vurgulamakta ve plastik kirliliği gibi küresel sorunların çözümüne yönelik bir adım olarak değerlendirilmektedir. Atık HDPE'nin bu şekilde değerlendirilmesi hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de endüstriyel süreçlerde daha sürdürülebilir malzemelerin kullanımına katkıda bulunabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

Awad, A. H., El Gamasy, R., Abd El Wahab, A., & Abdellatif, M. H. (2019). Mechanical and Physical Properties of PP and HDPE. *Eng. Sci*, 4(2), 34.

Azeem, A. (2023). High-Density Polyethylene (HDPE). *National Textile University*, Faisalabad, Pakistan.

Bertelsen, I. M. G., & Ottosen, L. M. (2016). Engineering properties of fibres from waste fishing nets. *In International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering* (pp. 7-16). Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.

Biçer, E., Kodal, M., & Özkoç, G. (2023). Processing and Characterization of UV Irradiated HDPE/POSS Fibers. *Nanomaterials*, 13(24), 3131.

Blaine, R. L. (2002). Thermal applications note. *Polymer Heats of Fusion.*

Byjus. (2024, Nisan 26). Polimerler - sınıflandırma, türler, kullanımlar, özellikler ve polimerizasyon. Erişim adresi: https://byjus.com/jee/polymers/

Chen, L., & Zewei, L. (2021). Polyethylene: Properties, production and applications. *In 2021 3rd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST)* (pp. 1191-96). Guangzhou, China: IEEE.

Cho, H. H., Kim, K. H., Kang, Y. A., Ito, H., & Kikutani, T. (2000). Fine structure and physical properties of polyethylene/poly(ethylene terephthalate) bicomponent fibers in high-speed spinning. I. Polyethylene sheath/poly(ethylene terephthalate) core fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 77(10), 2254-66. doi: 10.1002/1097-4628(20000906)77:10<2254::AID-APP19>3.0.CO;2-M

Çelen, R., & Ulcay, Y. (2019). Bikomponent lifler. *Tekstil ve Mühendis,* 26(114), 177-87. doi: 10.7216/1300759920192611407

Dalloul, F., Mietner, J. B., & Navarro, J. R. (2022). Production and 3D printing of a nanocellulose-based composite filament composed of polymer-modified cellulose nanofibrils and high-density polyethylene (HDPE) for the fabrication of 3D complex shapes. *Fibers*, 10(10), 91.

Flores Nicolás, A., Menchaca Campos, E. C., Flores Nicolás, M., Martínez González, J. J., González Noriega, O. A., & Uruchurtu Chavarín, J. (2024). Influence of Recycled High-Density Polyethylene Fibers on the Mechanical and Electrochemical Properties of Reinforced Concrete. *Fibers,* 12(3), 24.

Francis, R. (2017). Recycling of Polymers. *School of Chemical Sciences*, Mahatma Gandhi University, Hindistan.

Guo, N. K., Huang, X., & Jing, L. X. (2014). Application research of high-strength needled filter bag with sea-island superfine fiber. *Advanced Materials Research*, 1004-1005, 553-56. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1004-1005.553

Gupta, B. S., & George, W. (1975). A theory of self-crimping bicomponent filaments. *Textile research journal*, 45(4), 338-349.

Gürvardar, H. (2023). Atık yüksek yoğunluklu polietilen plastiklerden filament üretimi, hibrit iplik oluşturulması ve ipliklerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Master Thesis*, Bursa Uludağ Üniversitesi.

Hagewood, J. (2014). Technologies for the manufacture of synthetic polymer fibers. *In Advances in Filament Yarn Spinning of Textiles and Polymers* (pp. 48-71). Elsevier.

Harizi, I., & Mefti, A. (2015). Le recyclage des polymères. *Ulusal Politeknik Okulu*, Kimya Mühendisliği Bölümü, Cezayir.

HDPE monofilament yarns, Net Fabrics - Manufactures&Suppliers - Ideal. (2021, December 30). Erişim adresi: https://idealagrotextiles.com/hdpe-monofilament-yarns/

Hufenus, R., Yan, Y., Dauner, M., Yao, D., & Kikutani, T. (2020). Bicomponent fibers. *In Handbook of Fibrous Materials* (pp. 281-313). Eds. J. Hu, B. Kumar, & J. Lu. Wiley.

Kakar, M. R., Mikhailenko, P., Piao, Z., Bueno, M., & Poulikakos, L. (2021). Analysis of waste polyethylene (PE) and its by-products in asphalt binder. *Construction and Building Materials,* 280, 122492.

Kayan, A., & Küçük, A. (2020). Plastik kirliliğin çevresel zararları ve çözüm önerileri. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi,* 22(2), 403-427.

Kolanjikombil, M. (2018). Encyclopaedic Dictionary of Textile Terms. *Woodhead publishing India Pvt.* Limited.

Melt Flow Testing. (t.y.). British Plastics Federation (BPF). Erişim adresi: https://www.bpf.co.uk/plastipedia/testing/Melt_Flow_Testing.aspx

Naeimirad, M., Zadhoush, A., Kotek, R., Esmaeely Neisiany, R., Nouri Khorasani, S., & Ramakrishna, S. (2018). Recent advances in core/shell bicomponent fibers and nanofibers: A review. *Journal of Applied Polymer Science,* 135(21), 46265. doi: 10.1002/app.46265

NETZSCH Analyzing & Testing. (t.y.). Crystallinity / Degree of Crystallinity. Erişim adresi: https://analyzing-testing.netzsch.com/en/training-know /how/glossary/crystallinity-degree-of-crystallinity

Plotz, C. (2020, May 7). Bicomponent fiber – get more than 2x. *International Fiber Journal | Fibers, Filaments & Processing Solutions.* Erişim adresi: https://www.fiberjournal.com/bicomponent-fiber-get-more-than-2x/

Polietilen (PE) - Plastikler, Risk ve Termal Analiz Veritabanı. (2017, Ekim). *INRS.* Erişim adresi: https:// www.inrs.fr /publications/bdd/ plastiques/polymere.html? refINRS= PLASTIQUES_polymere_13

Polyethylene net, Aquaculture CITTADINI. (t.y.). Erişim adresi: https://www.cittadini.eu/en/products/aquaculture/polyethylene-knotless-net

Prahsarn, C., Klinsukhon, W., Roungpaisan, N., & Srisawat, N. (2013). Self-crimped bicomponent fibers containing polypropylene/ethylene octene copolymer. *Materials Letters,* 91, 232-34. doi: 10.1016/j.matlet.2012.09.106

Quelle bâche pour piscine ? (t.y.). BACHES DIRECT: le N°1 Bâches de Protection. Erişim adresi: https://www.baches-direct.com/fr/pg/blog/quelle-bache-pour-piscine#:~:text=La%20bâche%20pour%20piscine%20PEHD,feuilles%20mortes%20et%20autres%20salissures.

Rahman Khan, Hasan. M. (2021). A review study on bicomponent (bico) fibre/ filament. *Journal of Textile Science & Fashion Technology,* 8(2). doi: 10.33552/JTSFT.2021.08.000681

Ronca, S. (2017). Polyethylene. *In Brydson's Plastics Materials* (pp. 247-78). Elsevier.

Suvari, F., Gurvardar, H. (2024) Revitalizing high-density polyethylene (HDPE) waste: from environmental collection to high-strength hybrid yarns. *Polym. Bull.* doi: 10.1007/s00289-024-05367-x

Tuohua Plastic. (2022, March 11). Durable HDPE Windbreak Shade Net & Heavy-duty nets. *Direct Factory.* Erişim adresi: https://www.shade-nets.com/products/agricultural-net/windbreak-shade-net.

Vidakis, N., Petousis, M., & Maniadi, A. (2021). Sustainable additive manufacturing: Mechanical response of high-density polyethylene over multiple recycling processes. *Recycling*, 6(1), 4. doi: 10.3390/recycling6010004

Wang, H., Wang, X., Fan, T., Zhou, R., Li, J., Long, Y., Zhuang, X., & Cheng, B. (2020). Fabrication of electrospun sulfonated poly(ether sulfone) nanofibers with amino modified SiO2 nanosphere for optimization of nanochannels in proton exchange membrane. *Solid State Ionics*, 349, 115300. doi: 10.1016/j.ssi.2020.115300

Wang, X. Y., & Gong, R. H. (2006). Thermally bonded nonwoven filters composed of bi-component polypropylene/polyester fiber. *II. Relationships between fabric area density, air permeability, and pore size distribution. Journal of applied polymer science*, 102(3), 2264-2275.

Yang, X., Wang, J., Guo, H., Liu, L., Xu, W., & Duan, G. (2020). Structural design toward functional materials by electrospinning: A review. *E-Polymers*, 20(1), 682-712. doi: 10.1515/epoly-2020-0068

Zhang, Z., Tu, W., Peijs, T., & Bastiaansen, C. W. (2017). Fabrication and properties of poly (tetrafluoroethylene) nanofibres via sea-island spinning. *Polymer*, *109*, 321-331.

Zhu, S., Meng, X., Yan, X., & Chen, S. (2021). Evidence for bicomponent fibers: A review. *E-Polymers*, 21(1), 636-53. doi: 10.1515/epoly-2021-0067.