



TEKSTİL VE MÜHENDİS
(Journal of Textiles and Engineer)



<http://www.tekstilvemuhendis.org.tr>

Bikomponent ve Karışım Hdpe/Ldpe Filamentlerin Üretimi ve 3B Yazıcılarda Kullanımı

Bicomponent and Blended Hdpe/Ldpe Filament Production and Usage in 3D Printers

Oğuzhan USLU^{1,3}, Yakup AYKUT^{1,2*}

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, Türkiye

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

³Bursalı Tekstil San ve Tic. A.Ş., Demirtaş Organize Sanayi Bölgesi, Çiğdem 1 Sk, No.14, Bursa, Türkiye

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online):1 Nisan 2021 (1 April 2021)

Bu makaleye atıf yapmak için (To cite this article):

Oğuzhan USLU, Yakup AYKUT (2021): Bikomponent ve Karışım Hdpe/Ldpe Filamentlerin Üretimi ve 3B Yazıcılarda Kullanımı, Tekstil ve Mühendis, 28: 121, 2-15.

For online version of the article: <https://doi.org/10.7216/1300759920212812101>

Arastırma Makalesi / Research Article

BİKOMPONENT VE KARIŞIM HDPE/LDPE FİLAMENTLERİN ÜRETİMİ VE 3B YAZICILARDA KULLANIMI

Oğuzhan USLU^{1,3} 
Yakup AYKUT^{1,2*} 

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, Türkiye

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

³Bursalı Tekstil San ve Tic. A.Ş., Demirtaş Organize Sanayi Bölgesi, Çiğdem 1 Sk, No.14, Bursa, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 06.05.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 08.01.2021

ÖZET: Termoplastik polimerlerin geridönüşümü ve eritilerek yeniden şekillendirilebilmesi kolay olduğu için üç boyutlu (3B) yazıcılarda kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Termoplastik polimerik yapılar önce eriyikten çekim yöntemi ile istenen özelliklerde filament formuna getirilip daha sonra bu filamentlerin 3B yazıcılarda kullanılmasıyla 3B yapılar elde edilmektedir. Bu çalışmada, termoplastik polimerler olan düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)'den farklı oranlarda saf, karışım ve bikomponent filamentler eriyikten çekim yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen filamentlerin kimyasal, mikroyapısal, termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Filamentlerin 3B yazıcılarda kullanılabilirliğini gözlemlemek için üretilen filamentlerden 3B yazıcıda numuneler üretilmiştir. Üretilen filamentlerden bikomponent yapıda olan LDPE/HDPE filamentinin kullanılan 3B yazıcı için en uygun filament olduğu tespit edilmiştir. Bu filamentten 3B balpeteği yapı üretilip, yapının basma mukavemeti özelliği PLA filamentinden üretilen balpeteği yapı ile kıyaslanması suretiyle incelenmiştir. LDPE/HDPE bikomponent filamentten üretilen balpeteği yapının basma mukavemeti özelliği piyasada yaygın kullanılan PLA'nın değerlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir ve PLA gibi termoplastik karakterde olan bu filament yapısının PLA'ya alternatif olarak 3B yazıcılarda kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: 3B yazıcı, bikomponent filament, polietilen, termoplastik, 3B balpeteği

BICOMPONENT AND BLENDED HDPE/LDPE FILAMENT PRODUCTION AND USAGE IN 3D PRINTERS

ABSTRACT: Thermoplastic polymer have been used in 3D printing technologies since the objects produced via 3D methods by using thermoplastic materials can be recycled and reformed easily. In order to use a thermoplastic material in the 3D technologies, the thermoplastic polymers are spun into fiber structures and then 3D objects are produced from these fibers. In this regard, low density polyethylene (LDPE) and high density polyethylene (HDPE) were melt spun into fiber with various construction including neat, blend and bicomponent forms. Chemical, microstructural, thermal and mechanical properties of the produced fibers were investigated. 3D printable properties of the prepared fibers were observed by using them in the 3D printer. It was observed that bicomponent LDPE/HDPE fibers were the most suitable fiber to produce 3D sample in the lab scale 3D printer. 3D honeycomb structure was produced from this fiber and its compression strength property was investigated by comparing the same size of the PLA honeycomb structure. Compression strength test result of the honeycomb sample produced from LDPE/HDPE bicomponent fiber was close to compression strength test result of the PLA honeycomb sample. The results revealed that LDPE/HDPE bicomponent fibers could be an alternative to PLA fiber in 3D printing technologies.

Keywords: 3D printing, bicomponent fiber, polyethylene, thermoplastic, 3D honeycomb

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: aykut@uludag.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.7216/1300759920212812101> www.tekstilmuhendis.org.tr

1. GİRİŞ

Üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojisi polimer, seramik, metal, kompozit malzemeler ve bu malzemelerin çeşitli kombinasyonları olmak üzere farklı türdeki malzemelerin 3B tasarlanan yapıların üretilebildiği yeni bir teknolojidir. 3B yazıcı teknolojisi başta biyomedikal olmak üzere ulaşım, enerji, inşaat ve mücevhercilik gibi çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Örneğin; araştırmacılar vücut organları ile aynı boyut ve fonksiyonellikte olan 3B yapıları canlı dokular kullanılarak 3B yazıcı teknolojisi ile üretmeyi amaçlamaktadırlar [1]. Otomobil, hava ve uzay aracı parçaları gibi detaylı yapısal tasarım gerektiren spesifik parçaların üretimi bu teknoloji ile üretilebilir [2, 3]. Mühendislik tasarımı gerektiren enerji üretim ve depolama da kullanılan malzemelerin üretimi 3B yazıcı teknolojisi ile üretilmiştir [4, 5]. Campton ve Lewis 3B yazıcı yöntemi ile dörtgen, altıgen ve üçgen gözenekli 3B balpeteği yapıları silisyum karbür teller ve karbon filamentleri ile doldurulmuş epoksi kullanarak üretmişlerdir [6]. Çalışmada karbon filament-lerin yazıcının üretim yönü doğrultusunda yüksek derecede oryante olduğu ve üretilen 3B kompozit yapıya fevkalade mekanik özellik kazandırdığını belirtmişlerdir.

Kullanılan termoplastik malzemelerin mekanik performans özellikleri, standart kullanılan mühendislik malzemelerine kıyasla daha azdır. Blok ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada 3B yazıcılar için kompozit hammaddeler araştırılmıştır [7]. Çalışmada mukavemet ve sertlik arttırılmak için karbon fiberler termoplastik matrisin içine dahil edilmiştir. 3B yazıcı kullanılarak kompozit malzemelerle mekanik performans özellikleri güçlendirilmiş termoplastikler kıyaslandığında, termoplastiklerde önemli artışlar sağlandığı gözlemlenmiştir [7]. Sang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada polilaktik asit, polikaprolakton ve bazalt elyaflarından oluşan farklı hücresel formlarda 3B kompozit yapıları incelenmiştir [8]. 3B yazıcı ile üretilmiş örneklerin mekanik, termal ve viskoelastik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada hücresel forma bağlı olarak 3B yapının enerji absorblama karakteristiklerine göre farklılaştığı belirtilmiştir. Bu yapıların birim hücre tasarımı dairesel, altıgen ve petek yapılar olarak incelenmiştir.

Termoplastik malzemelerden öncelikle filament elde edilmesi ve bu filamentlerin yazıcıdaki sıcak düzeye sürekli beslenmesi suretiyle 3B şekilli yapılar üretilebilmektedir. Nanoparçacıklar ve ilaçlar gibi çeşitli fonksiyonel materyaller filament üretimi esnasında ekstrüdere beslenmesi ve bu filamentlerin 3B yazıcılarda kullanılması suretiyle istenilen fonksiyonel özellikler 3B yapılara aktarılabilir. Polimer esaslı 3B balpeteği yapılar Yeong ve arkadaşları tarafından üretilip bu yapıların şekillerini tekrar geri kazanma özellikleri uygulanan basma kuvveti ve bu kuvvetin kaldırılması ile incelenmiştir [9]. PLA ve ABS 3B yazıcı teknolojilerinde yaygın kullanılan termoplastik malzemelerdir [10].

Termoplastik bir polimer olan polietilen, karbon ve hidrojen atomlarının bir araya gelerek oluşturduğu malzemedir [11]. Diğer taraftan LDPE HDPE'e kıyasla dallı yapıya sahiptir [11]. Literatürde polietilen esaslı 3B yapılar üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur. Geri dönüşümden elde edilmiş HDPE'den eriyikten çekim yöntemi ile 3B yazıcılarda kullanılmak üzere filament üretilmiştir [10]. Çalışmada üretilen filamentlerin mekanik özellikleri 3B yapılarda yaygın kullanılan diğer termoplastik malzemeler olan ABS ve PLA ile kıyaslanmıştır, HDPE filamentler için elde edilen sonuçların PLA sonuçları ile uyumlu olduğu için HDPE'nin 3B yazıcılarda kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Kreiger ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 3B yazıcılar için yüksek yoğunluklu polietilenlerin filament formuna dönüştürülmesi ve üretilen ürünün yaşam döngüsü analizi yapılmıştır [12]. Çalışmada ürünler geri dönüşümlü olarak seçilerek katma değerli ürünler incelenmiştir. Peng ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada LDPE veya HDPE'inde bulunduğu bikomponent (core-shell) filamentler üreterek 3B yazıcılarda kullanmışlardır [13]. HDPE'e kıyasla LDPE'nin düşük kristalleşmesiyle üretilen mamülün boyutsal stabilitesinin artışı gözlemlenmiştir. LDPE ve HDPE'nin düşük maliyeti ile birlikte kompozit yapılara uygulanabilirliğinin yüksek olduğu belirtilmiş, üretilen mamüllerin darbe dayanımlarının arttırıldığı vurgulanmıştır.

Geride dönüşümle elde edilmiş HDPE filamentler 3B yazıcılarda kullanılmış [10], LDPE ve HDPE'in diğer polimerlerle birlikte filament formuna getirilip 3B yazıcılarda kullanımı literatürde yayınlanmasına rağmen [13], yalnızca bu iki polimerin kullanımı ile elde edilen karışım ve bikomponent filamentlerin 3B yazıcılarda kullanımı ve parça üretimi üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır. Piyasada HDPE ve LDPE'den üretilmiş birçok ürün bulunduğundan bu ürünler geridönüşümle farklı formlarda filament formuna getirilip PLA'ya alternatif olarak 3B yazıcılarda kullanılabilir. Bu çalışmada, farklı yapılarda saf, karışım ve bikomponent LDPE ve HDPE filamentler eriyikten çekim yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen filamentlerin kimyasal analizleri ATR-FTIR spektroskopisi ile, kristal ve mikro yapı analizleri DSC metodu ile, termal stabilite testleri TGA ile, mekanik özellikleri ise gerilme-uzama grafikleri ile incelenmiştir. Filamentlerin enine kesitleri optik mikroskop ile analiz edilmiştir. Üretilen filamentlerin 3B yazıcılarda kullanılabilirliği incelenmiştir. Uygun filament tespit edilerek bu filament ile (LDPE/HDPE) 3B balpeteği üretilip yapısını basma mukavemeti PLA balpeteği yapısı ile kıyaslanmak suretiyle incelenmiştir. Dali yapıdaki ve düşük gerilme mukavemetine sahip LDPE polimeri ile daha düzgün ve paketlenmiş yapıya sahip HDPE polimer karışımı ile mekanik özellikleri geliştirilmiş balpeteği yapılar elde edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Kullanılan polimerler

Çalışmada Petkim Petrokimya Holding A.Ş. tarafından üretilen S 0464 yüksek Yoğunluklu Polietilen ve G 08-21T yüksek yoğunluklu polietilen kullanılmıştır.

2.2. HDPE / LDPE bikomponent ve karışım filamentlerinin eriyikten çekim yöntemi ile üretimi

Bikomponent filamentlerin üretimi Aysa Makine Seri No: 12 (Menşei; Türkiye) eriyikten çekim pilot üretim makinesinde

gerçekleştirilmiştir. Ekstrüder vida çapının (D) 25 mm ve uzunluğu (L) 40 cm'dir. Eriyikten çekim esnasında uygulanan ekstrüder sıcaklıkları ve yapıdaki polimer oranları Tablo 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7'de verilmiştir. Ekstrüder sıcaklıkları polimerlerin erime ve degradasyon sıcaklıkları arasındaki bir sıcaklıktan seçilmiştir. Polimerler düzeden çıktıktan sonra monofilament formunda 3B yazıcılarda kullanılmak üzere direk soğutulmuş bobine sarılmıştır. Pilot üretim makinesindeki ayarlar ve malzeme oranları numunelerin 3B yazıcıya beslenebilecek rijitlikte ve kalınlıkta olabilmesi için seçilmiştir.

Tablo 1. Numune A'nın filament üretim parametreleri

Sarım Motoru Hızı	3		Ekstrüder Isıtıcı Sıcaklıkları				
Çekim Motoru Hızı	-		1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)		2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)		
Ekstrüder Debileri/Hızları			Isı Ana Değeri		Isı Ana Değeri		
1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)	30	Hz	130		130		
	75	RPM	Soğuma Aralığı		Soğuma Aralığı		
2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)	2,75	Hz	-		1		
	0	RPM	1. Bölge		185	1. Bölge	-
Dış Düzede Kullanılan Hammadde			2. Bölge		190	2. Bölge	-
%100 LDPE			3. Bölge		195	3. Bölge	-
İç Düzede Kullanılan Hammadde			Mamül Çıkışı/Düze Isıtıcı Sıcaklıkları				
İç Düze Boş Bırakıldı			4. Bölge	205	5. Bölge	205	

Tablo 2. Numune B'nin filament üretim parametreleri

Sarım Motoru Hızı	3		Ekstrüder Isıtıcı Sıcaklıkları				
Çekim Motoru Hızı	-		1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)		2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)		
Ekstrüder Debileri/Hızları			Isı Ana Değeri		Isı Ana Değeri		
1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)	30	Hz	130		130		
	75	RPM	Soğuma Aralığı		Soğuma Aralığı		
2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)	2,75	Hz	-		1		
	0	RPM	1. Bölge		200	1. Bölge	-
Dış Düzede Kullanılan Hammadde			2. Bölge		200	2. Bölge	-
%100 LDPE			3. Bölge		200	3. Bölge	-
İç Düzede Kullanılan Hammadde			Mamül Çıkışı/Düze Isıtıcı Sıcaklıkları				
İç Düze Boş Bırakıldı			4. Bölge	215	5. Bölge	215	

Tablo 3. Numune C'nin filament üretim parametreleri

Sarım Motoru Hızı	3		Ekstrüder Isıtıcı Sıcaklıkları				
Çekim Motoru Hızı	-		1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)		2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)		
Ekstrüder Debileri/Hızları			Isı Ana Değeri		Isı Ana Değeri		
1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)	25	Hz	130		130		
	62	RPM	Soğuma Aralığı		Soğuma Aralığı		
2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)	25	Hz	-		1		
	62	RPM	1. Bölge		190	1. Bölge	190
Dış Düzede Kullanılan Hammadde			2. Bölge		195	2. Bölge	195
%100 LDPE			3. Bölge		205	3. Bölge	205
İç Düzede Kullanılan Hammadde			Mamül Çıkışı/Düze Isıtıcı Sıcaklıkları				
%100 LDPE			4. Bölge	210	5. Bölge	210	

Tablo 4. Numune D'nin filament üretim parametreleri

Sarım Motoru Hızı	3		Ekstrüder Isıtıcı Sıcaklıkları			
Çekim Motoru Hızı	-		1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)		2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)	
Ekstrüder Debileri/Hızları						
1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)	25	Hz	Isı Ana Değeri		Isı Ana Değeri	
	62	RPM	130		130	
2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)	25	Hz	Soğuma Aralığı		Soğuma Aralığı	
	62	RPM	-		1	
Dış Düzede Kullanılan Hammadde			1. Bölge	190	1. Bölge	190
%100 LDPE			2. Bölge	195	2. Bölge	195
			3. Bölge	205	3. Bölge	205
İç Düzede Kullanılan Hammadde			Mamül Çıkışı/Düze Isıtıcı Sıcaklıkları			
%60 LDPE, %40 HDPE			4. Bölge	210	5. Bölge	210

Tablo 5. Numune E'nin filament üretim parametreleri

Sarım Motoru Hızı	3		Ekstrüder Isıtıcı Sıcaklıkları			
Çekim Motoru Hızı	-		1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)		2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)	
Ekstrüder Debileri/Hızları						
1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)	25	Hz	Isı Ana Değeri		Isı Ana Değeri	
	62	RPM	130		130	
2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)	25	Hz	Soğuma Aralığı		Soğuma Aralığı	
	62	RPM	-		1	
Dış Düzede Kullanılan Hammadde			1. Bölge	190	1. Bölge	190
%60 LDPE, %40 HDPE			2. Bölge	195	2. Bölge	195
			3. Bölge	205	3. Bölge	205
İç Düzede Kullanılan Hammadde			Mamül Çıkışı/Düze Isıtıcı Sıcaklıkları			
%60 LDPE, %40 HDPE			4. Bölge	210	5. Bölge	210

Tablo 6. Numune F'nin filament üretim parametreleri

Sarım Motoru Hızı	3		Ekstrüder Isıtıcı Sıcaklıkları			
Çekim Motoru Hızı	-		1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)		2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)	
Ekstrüder Debileri/Hızları						
1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)	25	Hz	Isı Ana Değeri		Isı Ana Değeri	
	62	RPM	130		130	
2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)	25	Hz	Soğuma Aralığı		Soğuma Aralığı	
	62	RPM	-		1	
Dış Düzede Kullanılan Hammadde			1. Bölge	190	1. Bölge	190
%40 LDPE, %60 HDPE			2. Bölge	195	2. Bölge	195
			3. Bölge	205	3. Bölge	205
İç Düzede Kullanılan Hammadde			Mamül Çıkışı/Düze Isıtıcı Sıcaklıkları			
%40 LDPE, %60 HDPE			4. Bölge	210	5. Bölge	210

Tablo 7. Numune G'nin filament üretim parametreleri

Sarım Motoru Hızı	3,2		Ekstrüder Isıtıcı Sıcaklıkları			
Çekim Motoru Hızı	-		1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)		2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)	
Ekstrüder Debileri/Hızları						
1. Ekstrüder (Dış Düzeye Giden)	25	Hz	Isı Ana Değeri		Isı Ana Değeri	
	62	RPM	130		130	
2. Ekstrüder (İç Düzeye Giden)	25	Hz	Soğuma Aralığı		Soğuma Aralığı	
	62	RPM	-		1	
Dış Düzede Kullanılan Hammadde			1. Bölge	200	1. Bölge	200
%100 HDPE			2. Bölge	205	2. Bölge	205
			3. Bölge	210	3. Bölge	210
İç Düzede Kullanılan Hammadde			Mamül Çıkışı/Düze Isıtıcı Sıcaklıkları			
%100 HDPE			4. Bölge	215	5. Bölge	215

Farklı yapılarda ve oranlarda granül formunda hazırlanarak üretilen LDPE, HDPE ve LDPE/HDPE filamentlerin enine kesitlerinin şematik gösterimi Şekil 1’de sunulmuştur. İki ekstrüderli beslemenin yapıldığı eriyikten çekim ünitesinde Şekil 1a’daki numune için (N-a) filamentin dış kısmına besleme yapan ekstrüderden LDPE beslenirken filamentin iç kısmına besleme yapan ekstrüderden polimer beslemesi yapılmamış, bu numunenin üretim parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Şekil 1b’deki numune için (N-b) de aynı şekilde dış kısma LDPE beslenirken içe polimer beslemesi yapılmamış olup bu numunenin üretim parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 1c’deki numune için (N-c) filamentin hem iç hem dışına besleme yapan ekstrüderlerden LDPE beslenmiş olup bu numunenin üretim parametreleri Tablo 3’de verilmiştir. Şekil 1d’deki numune için (N-d) filamentin dış kısmına besleme yapan ekstrüderden LDPE, filamentin iç kısmına besleme yapan ekstrüderden 3/2 oranında LDPE/HDPE beslemesi yapılmıştır ve bu numunenin üretim parametreleri Çizelge Tablo 4’de verilmiştir. Polimer karışımı granül formunda ayarlanarak ekstrüdere besleme yapılmıştır. Şekil 1e’deki numune için (N-e) filamentin dış ve iç kısmına besleme yapan ekstrüderlerin her ikisinde 3/2 oranında LDPE/HDPE beslemesi yapılmış ve bu numunenin üretim parametreleri Tablo 5’te verilmiştir. Şekil 1f’deki numune için (N-f) filamentin dış ve iç kısmına besleme yapan ekstrüderlerin her ikisinde 2/3 oranında LDPE/HDPE beslemesi yapılmış olup bu numunenin üretim parametreleri Tablo 6’da verilmiştir. Şekil 1g’deki numune için (N-g) filamentin hem iç hem dışına besleme yapan ekstrüderlerden HDPE beslemesi yapılmıştır. Bu numunenin üretim parametreleri ise Tablo 7’de verilmiştir. Numunelerin dış ve iç düzelerine beslenen hammaddelerin kıyaslaması Tablo 8’de verilmiştir.

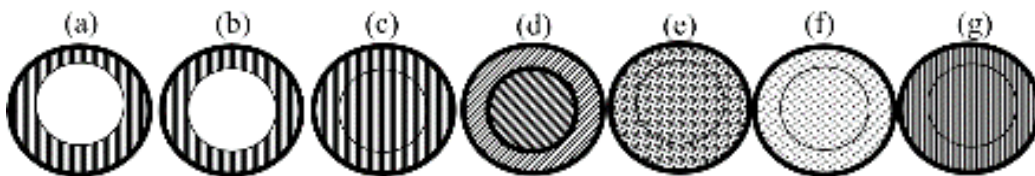
2.3. 3B yazıcı ile bikomponent polietilen filamentlerden 3B balpeteği yapıların üretimi

2.3.1. Polietilen bikomponent filamentlerden 3B parçaların üretildiği yazıcı

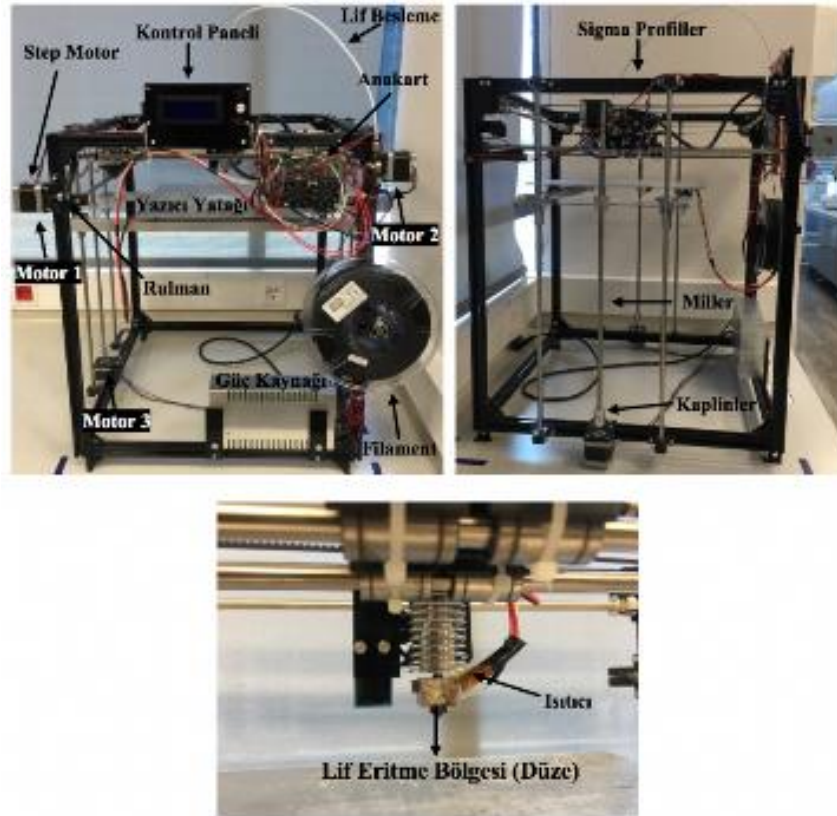
Üretilen filamentler kullanılarak 3B parça üretimi Şekil 2’de görüntüleri bulunan Bursalı Tekstil San. ve Tic. A.Ş. Ar-Ge Merkezi Laboratuvarlarındaki 260 * 260 * 350 mm baskı ebatı, otomatik dengeleme ile çift Z motorlu, çift soğutucu fanlı, nozul besleme çapı 1,75 mm, nozul çıkışı çapı 0,4 mm, nozul çapı max. 250°C, tabla sıcaklığı max. 100°C özel üretim (Menşei; Çin) olan 3B yazıcıda üretilmiştir. 3B yazıcının parça ve malzemelerini incelediğimizde sigma profiller yazıcıların iskeletini oluşturmaktadır. Yazıcı üzerinde bulunan step motorlar ve motorların kafalarındaki rulmanların yardımıyla düze, yazıcı yatağı ve filament hareketi sağlanmaktadır. Yazıcı yatağının aşağı ve yukarı yönde hareketini sağlayan kafasında kaplinlerin bulunduğu step motorlar mevcuttur. Düzenin x ve y düzleminde hareketi için step motorlara bağlı kayış ve kasnaklar mevcuttur. 3B yazıcıda filament, eritme bölgesine (düze) beslenerek bu bölgede eritilip yazıcı yatağı üzerinde katılma sağlanarak 3B üretim yapılmaktadır. Yazıcıda beş adet motor bulunmaktadır. Motor 1 ve yardımcı diğer motor ile birlikte ileri geri hareket yaparak filament eritme bölgesini yatağın üzerinde konumlandırmaktadır. Motor 2 ise filament eritme bölgesine filament beslemesi yapmaktadır. Motor 3 yatay olarak tam karşısında diğer bir motor ile birlikte, birlikte aynı anda çalışarak yatağın aşağı yukarı hareketini gerçekleştirip 3B parçaların üretimi sağlanır.

Tablo 8. Numunelerin dış ve iç düzelerine beslenen hammaddelerin kıyaslaması

Numune	Dış Düzede Kullanılan Hammadde	İç Düzede Kullanılan Hammadde
(a)	%100 LDPE	İç Düze Boş Bırakıldı
(b)	%100 LDPE	İç Düze Boş Bırakıldı
(c)	%100 LDPE	%100 LDPE
(d)	%100 LDPE	%60 LDPE, %40 HDPE
(e)	%60 LDPE, %40 HDPE	%60 LDPE, %40 HDPE
(f)	%40 LDPE, %60 HDPE	%40 LDPE, %60 HDPE
(g)	%100 HDPE	%100 HDPE



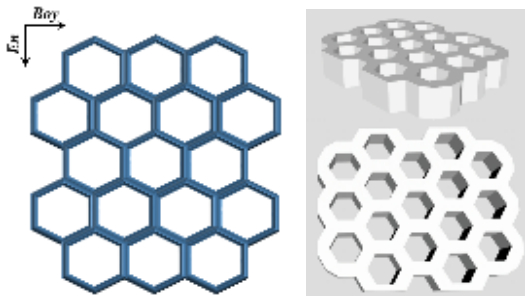
Şekil 1. Eriyikten çekimde üretilen numunelerin iç-dış bileşenlerinin şematik gösterimi: (a) N-a, (b) N-b, (c) N-c, (d) N-d, (e) N-e, (f) N-f, ve (g) N-g



Şekil 2. LDPE/HDPE filamentlerin kullanıldığı ve balpeteği 3B yapıların üretildiği yazıcı

2.3.2. Üretilmesi planlanan 3B balpeteği yapılar

17 hücreden oluşan ve üretilmesi planlanan balpeteği yapının enini ve boyunu belirten şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir. 3B yazıcıda üretilen cisimlerin katı modelleri ve tasarımları SolidWorks Premium Programıyla (Menşei; Amerika Birleşik Devletleri) tasarlanmıştır. Şekil 3'te tasarımı yapılan 3B balpeteği yapı görülmektedir. SolidWorks programında katı modelleme ve tasarımı yapılan parçalar Repetier programı ile nesnelerin dilimlenmesi ve gcode'a dönüştürülmesi için kullanılmıştır. Çalışmada LDPE/HDPE bikomponent filament olan N-d numunesinden (dış: LDPE, iç: 3/2 LDPE/HDPE) balpeteği parça üretilmiştir. Üretimde 3B yazıcıda besleme hızı 50 mm/dk, düze sıcaklığı 230 °C ve yatak sıcaklığı 80 °C olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3. 3B yazıcı ile üretilen balpeteği yapıların en ve boylarının şematik gösterimi ve SolidWorks Premium programıyla tasarlanmış şekli

2.4. Üretilen filamentlerin ve 3B balpeteği yapıların karakterizasyon yöntemleri

2.4.1. Termal analizler

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) testleri 20-200°C aralığında 10°C/dk hız ile Perkin Elmer DSC4000 (Menşei; Almanya) cihazında çalışılmıştır. Filamentlerin termogravimetrik analizleri (TGA) 25-700°C sıcaklık aralığında TA SDTQ 600 (Menşei; Amerika Birleşik Devletleri) cihazında yapılmıştır. TGA analizleri esnasında cihaza 600°C'ye kadar azot gazı sonra-sında ise oksijen gazı beslenerek analizler gerçekleştirilmiştir.

2.4.2. Kimyasal analizler

Filamentlerin kimyasal analizleri ATR-FT-IR Spektroskopisi ile 450-4 000 cm⁻¹ aralığında Perkin Elmer Spectrum Two FTIR (Menşei; Almanya) cihazında yapılmıştır.

2.4.3. Gerilme-uzama testleri

Filamentlerin gerilme-uzama testleri 20 ± 2 sıcaklıkta, % 65 ± 4 bağıl nem (TS EN ISO 139 Standartına uygun) kondisyon şartlarında, çeneler arası mesafe 50 mm ve 1 000 mm/dk hızda (ISO 2062 Standartındaki hıza ve çeneler arası mesafeyi değiştirerek) 5 000 N yük hücresiyle Shimadzu AG-X HS (Menşei; Japonya) model cihazında çalışılmıştır.

2.4.4. Filamentlerin çapları

Üretilen filamentlerin çapları Electronic Dıgital Calıper marka dijital sürmeli kumpas ile mm bazında ölçülmüştür.

2.4.5. Mikroskop inceleme

Üretilen filamentlerin enine kesitleri ZEISS Axioscope (Menşei; Almanya) mikroskobunda 500x'de incelenmiştir.

2.4.6. Basma testleri

Üretilen bal peteği yapılar boyuna yönde alt düzlem sabit, yük hücresi bağlı olan üst düzlemi hareketli olan iki yüzey arasına yerleştirilerek basma testleri yapılmıştır. Basma testleri 2,99 mm/dk test hızıyla 25 000 N yük hücresiyle UTEST Marka (0-250 kN toleranslı) (Menşei; Türkiye) cihazında çalışılmıştır. Basma testlerinin yapıldığı esnada numunenin nasıl konumlandırıldığı Şekil 4'de verilmiştir.



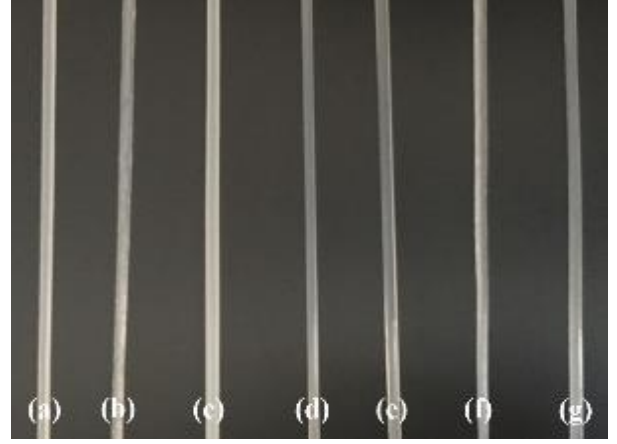
Şekil 4. Basma mukavemeti testi esnasında numunenin konumlandırılması

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

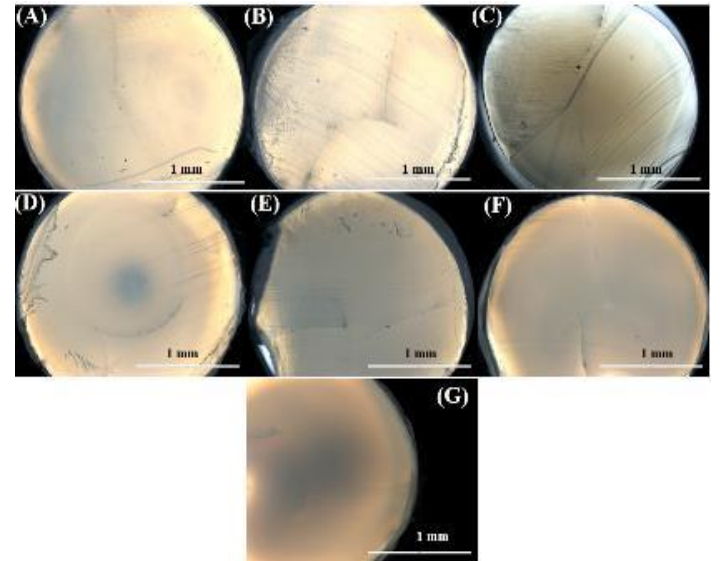
LDPE ve HDPE polimerleri kullanılarak eriyikten çekim pilot üretim makinesinde 0,85-0,90 m/dk üretim hızıyla farklı karışım oranlarında ve yapılarda monofilament filamentler olarak üretilmiştir. Üniform bir şekilde üretilen filamentlerin görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir. Polimer eriyiği düzeden çıktıktan sonra soğutulup bobinlere sarılmasında standart bir hız uygulanmadığı için üretilen filamentlerin çap dağılımı çok geniştir. Üretilen filamentlerin ölçülen çapları 1,1-2,5 mm arasında değişmektedir. Filamentlerin 3B yazıcılarda kullanılmak üzere üretildiği ve germe-çekme işlemine tabi tutulmadığı için tekstil yapılarında kullanılan filamentlerle kıyaslandığında filament çapları oldukça yüksektir.

Üretilen her numune grubundaki filamentlerden çapları birbirine yakın olan filamentler seçilip filamentlerin enine kesit görüntüleri optik mikroskopta alınarak Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6 A, B'de filamentler üretimleri esnasında filamentler içi boşluk olacak şekilde tasarlanıp filamentin içine besleme yapan ekstrüdere polimer beslenmemesine rağmen dış ekstrüderden beslenen LDPE

eriyiği düze çıkışı oluşan damlacık formundan dolayı filamentin merkezine doğru hareket etmiş ve içi boşluklu filament yapısının oluşumunu engellemiştir.



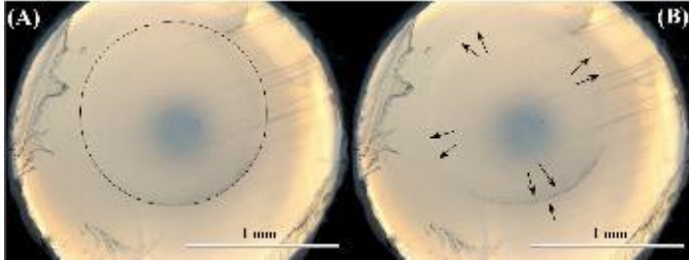
Şekil 5. Eriyikten çekim yöntemi ile üretilen farklı kombinasyonlardaki LDPE/HDPE filamentlerin boyuna yönde görüntüleri: (a) N-a, (b) N-b, (c) N-c, (d) N-d, (e) N-e, (f) N-f, ve (g) N-g



Şekil 6. Eriyikten çekim yöntemi ile üretilen farklı kombinasyonlardaki LDPE/HDPE filamentlerin enine kesitlerinin mikroskop görüntüleri: (A) N-a, (B) N-b, (C) N-c, (D) N-d, (E) N-e, (F) N-f, ve (G) N-g

Şekil 6C'de filamentler üretimleri esnasında hem dış hemde iç ekstrüderden LDPE beslendiği için filamentin enine kesitinde herhangi bir farklılık gözlemlenmemiştir. Diğer taraftan Şekil 6D'de filamentin dış kısmına besleme yapan ekstrüderden sadece LDPE beslenirken iç kısmına besleme yapan ekstrüderden 3/2 oranında LDPE/HDPE beslenmiştir ve elde edilen filamentin bikomponent yapısı mikroskop resminde açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 6E'de dış ve iç kısmına besleme yapan ekstrüderden 3/2 oranında LDPE/HDPE beslenirken Şekil 6F'deki numunede dış ve iç kısmına besleme yapan ekstrüderden 2/3 oranında LDPE/HDPE beslenmiştir. Her iki durumda da elde

edilen filamentlerde içi ve dış kısımdaki polimerler karışım ve aynı tip yapı olup bikomponent filament yapısının oluşumu gözlemlenmemiştir. Şekil 6G’de ise filamentin dış ve iç kısmına besleme yapan ekstrüderden sadece HDPE beslemesi yapıldığı filamentin enine kesit görüntüsünde homojen bir yapının oluştuğu görülmektedir.

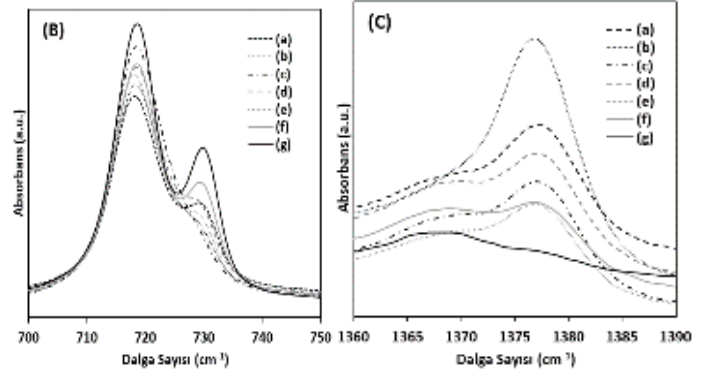
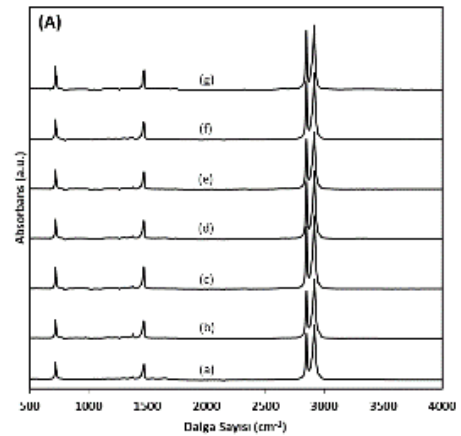


Şekil 7. Eriyikten çekim yöntemi ile üretilen LDPE/HDPE (S: LDPE, C:LDPE(%60)+HDPE(%40)) filamentin enine kesitinin mikroskop görüntüleri (N-d numunesi)

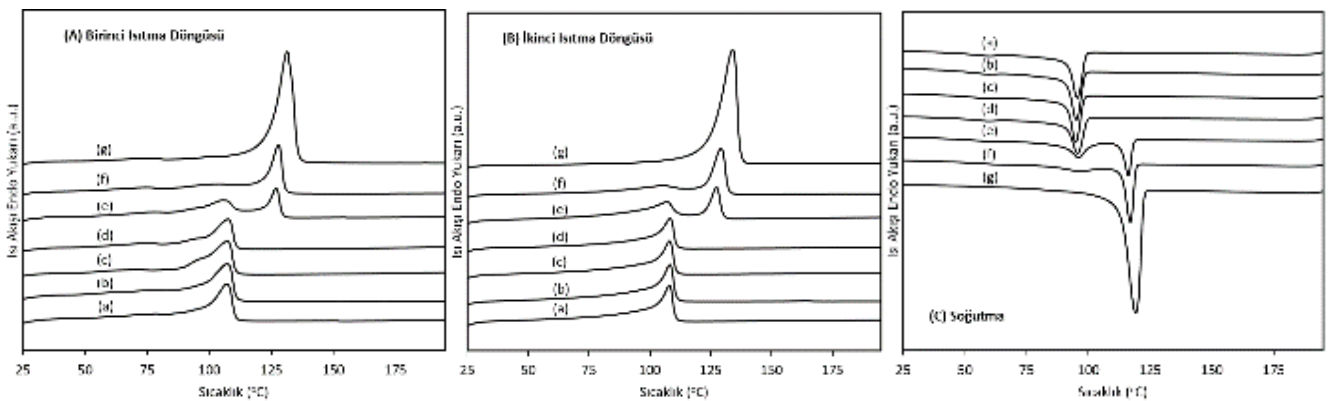
Yapılan çalışmada filamentin dış kısmına sadece LDPE iç kısmına ise 3/2 oranında LDPE/HDPE beslendiğinde elde edilen bikomponent filament yapısının büyütülmüş mikroskobik yapısı Şekil 7’de verilmiştir. Bikomponent yapıdaki ara yüzey siyah çember (Şekil 7A) ve ok işaretleri (Şekil 7B) ile belirtildiği gibi açık bir şekilde görülmektedir.

Üretilen farklı yapıdaki LDPE/HDPE filamentlerin ATR-FTIR spektralleri Şekil 8’de verilmiştir. İlk önce 500-2000 cm^{-1} aralığındaki geniş olarak spektral grafikler Şekil 8A’da, belirli dalga sayılarına odaklanılmış grafikler ise 700-750 cm^{-1} aralığı Şekil 8B ve 1360-1390 cm^{-1} aralığı Şekil 8C’de verilmiştir. 2850 cm^{-1} ve 2920 cm^{-1} daki güçlü absorpsiyon bantları LDPE ve HDPE’deki CH_2 ünitelerinde simetrik ve asimetrik gerilmelere tekabül etmektedir [14]. Yıldırım ve arkadaşları polietilen yapılarında $-\text{CH}_3$ gruplarına tekabül eden pik’in yaklaşık 1378 cm^{-1} ’de olması gerektiğini belirtmişlerdir [15]. Dallanmış yapıdaki LDPE zincirlerinin $-\text{CH}_3$ gruplarındaki simetrik deformasyonlar yaklaşık olarak 1377 cm^{-1} de görülmektedir [16], Şekil 8C’de görüldüğü gibi LDPE in filament yapısında varlığında bu pikin

şiddeti dramatik bir şekilde artmaktadır. Amorf fazlar içerisindeki $-\text{CH}_2-$ gruplarının sallanma (rocking) hareketleri 719 cm^{-1} de ve kristalin fazlardaki $-\text{CH}_2-$ gruplarının sallanma (rocking) hareketleri ise 729 cm^{-1} de görülmektedir [14]. 729 cm^{-1} deki pikin şiddeti LDPE filamentleri olan “a, b, ve c” numunelerinde HDPE numunesi olan “g” ye kıyasla dramatik bir şekilde azalmaktadır. Ayrıca, pik şiddetlerindeki 729/719 oranı LDPE numunelerinde HDPE numunesine kıyasla daha düşüktür. 1465 ve 1471 cm^{-1} deki pikler amorf ve kristalin fazlardaki C-H eğilme (bending) titreşimlerine tekabül etmektedir [14].



Şekil 8. Eriyikten çekimde üretilen LDPE/HDPE filamentlerin ATR-FTIR spektralleri: (A) N-a, (b) N-b, (c) N-c, (d) N-d, (e) N-e, (f) N-f, ve (g) N-g



Şekil 9. Eriyikten çekimde üretilen LDPE/HDPE filamentlerin DSC grafikleri: (a) N-a, (b) N-b, (c) N-c, (d) N-d, (e) N-e, (f) N-f, ve (g) N-g

Üretilen HDPE ve LDPE karışım polimer filamentlerin erime sıcaklıkları DSC yöntemi ile bir defa eritilip (Şekil 9A) soğutulduktan sonra ikinci defa da eritmek (Şekil 9B) suretiyle incelenmiştir. Polimerlerin kristalizasyon sıcaklıkları eritilen filamentlerin soğutulması ile DSC yöntemi ile incelenmiştir (Şekil 9C). Tüm numunelerin DSC analiz sonuçları erime ve kristalizasyon sıcaklıkları Tablo 9'da verilmiştir. HDPE den üretilen filamentlerde erime ve soğutma eğrilerinde tek erime ve kristalizasyon pikleri gözlemlenmiştir (Şekil 9g).

Şekil 9 e ve f'de görüldüğü üzere, LDPE ve HDPE ekstrüder de granüller formda rasgele karıştırılmış olduğundan, molekül zincirleri moleküler boyuta homojen olarak karışmamış, LDPE ve HDPE polimerlerinin geçiş sıcaklıkları ayrı ayrı DSC grafiğinde gözlemlenmiştir. Hangi polimerin karışımdaki miktarı artırılmışsa o polimerin erime ve kristallenme sıcaklığına tekabül eden pikin şiddetinde artış görülmektedir (Şekil 9 e ve f).

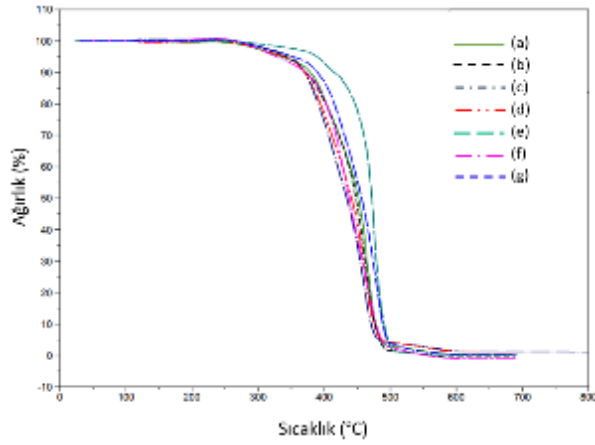
İçeriğinde sadece LDPE ve HDPE bulunan filamentlerin erime sıcaklıkları 107 ve 131 °C civarında gözlemlenmiştir. DSC ölçümleri ile tespit edilen geçiş sıcaklık değerleri literatürde LDPE ve HDPE için rapor edilen erime ve kristalizasyon sıcaklıkları sonuçlarla örtüşmektedir [17, 18]. 190 ve 200 °C'lerde çekime uğramış saf LDPE filamentlerinde erime sıcaklığı yaklaşık 107 °C'de tespit edilmiştir (Şekil 9A a, b). İkinci ısıtma döngüsünde erime sıcaklığının yaklaşık 1°C artmıştır. HDPE ve LDPE karışım olduğu yapılar (Şekil 9A ve 9B e, f numuneleri) LDPE dallı yapısının HDPE in düzgün bir şekilde kristallenmesine engel olduğu için HDPE in erime sıcaklığı ve bu pikin şiddeti azalmıştır [18]. HDPE filamentlerin erime sıcaklığı 131,54 °C de tespit edilmiştir (Şekil 9A g). HDPE in erime sıcaklığı LDPE/HDPE karışım filamentlerde azalması DSC ölçümlerinde hem ilk ısıtmada (Şekil 9A e, f) hem de ikinci ısıtmada (Şekil 9B e,f) görülmektedir.

Şekil 9C'de çalışmada üretilen tüm filamentlerin kristalizasyon sıcaklıklarını göstermek üzere 200 °C ye kadar ısıtılmış filamentlerin 25 °C ye kadar olan soğutulma DSC eğrileri gösterilmektedir. LDPE'in molekül yapısı dallanmış olduğundan dolayı HDPE'in kristallenmesi LDPE'e göre daha kolaydır [19]. Bu bağlamda çekim sıcaklığına bağlı olarak tespit edilen kristalizasyon sıcaklıkları HDPE için 119,08 °C ve LDPE için 94,81-96,47 °C civarındadır. Ekstrüderde moleküller zincirleri arasında homojen bir karışım sağlanamadığı için yapıda iki çeşit polimerde kaynaklanan fazda ayrı ayrı mevcut olup DSC eğrilerinde her bir polimerin erime ve kristallenme sıcaklıkları ayrı ayrı tespit edilebilmiştir. LDPE ve HDPE in karışım yapılması HDPE in kristalizasyon sıcaklığına LDPE den daha fazla etki etmiştir. HDPE in kristalizasyon sıcaklıkları "e" ve "f" numuneleri için 116,10 ve 117,01 °C'de tespit edilmiştir. Şekil 9'de "d" numunesinde filamentin dış kısmı LDPE'den oluşurken filamentin iç kısmında %40 oranında HDPE olmasında rağmen HDPE'in karakteristik erime ve kristallenme pikleri gözlemlenmemiştir.

Saf HDPE, LDPE ve karışım LDPE / HDPE filamentlerin termogravimetrik analizleri 25 ile 700 °C sıcaklık aralığında azot gazı atmosferinde (600 °C den sonra ortama hava gazıda katılmıştır) yapılmış, elde edilen grafikler Şekil 10'da sunulmuştur. Dekompozisyon genel olarak 300-500 °C aralığında gerçekleşmiştir, bu polimerlerin sıcaklığa bağlı olarak bozunmasından dolayı açığa çıkardıkları uçucu gazların uzaklaştırılmasından kaynaklanmaktadır. Termal bozunma sıcaklığı HDPE'in yapıda bulunması ile birlikte daha yüksek sıcaklık değerlerine kaymıştır. Test sonrasında hemen hemen bütün numuneler yanarak sistemden uzaklaşmıştır ve herhangi bir numune kalıntısına rastlanmamıştır.

Tablo 9. LDPE/HDPE filamentlerin DSC ölçümlerinde gözlemlenen erime ve kristalizasyon sıcaklıkları

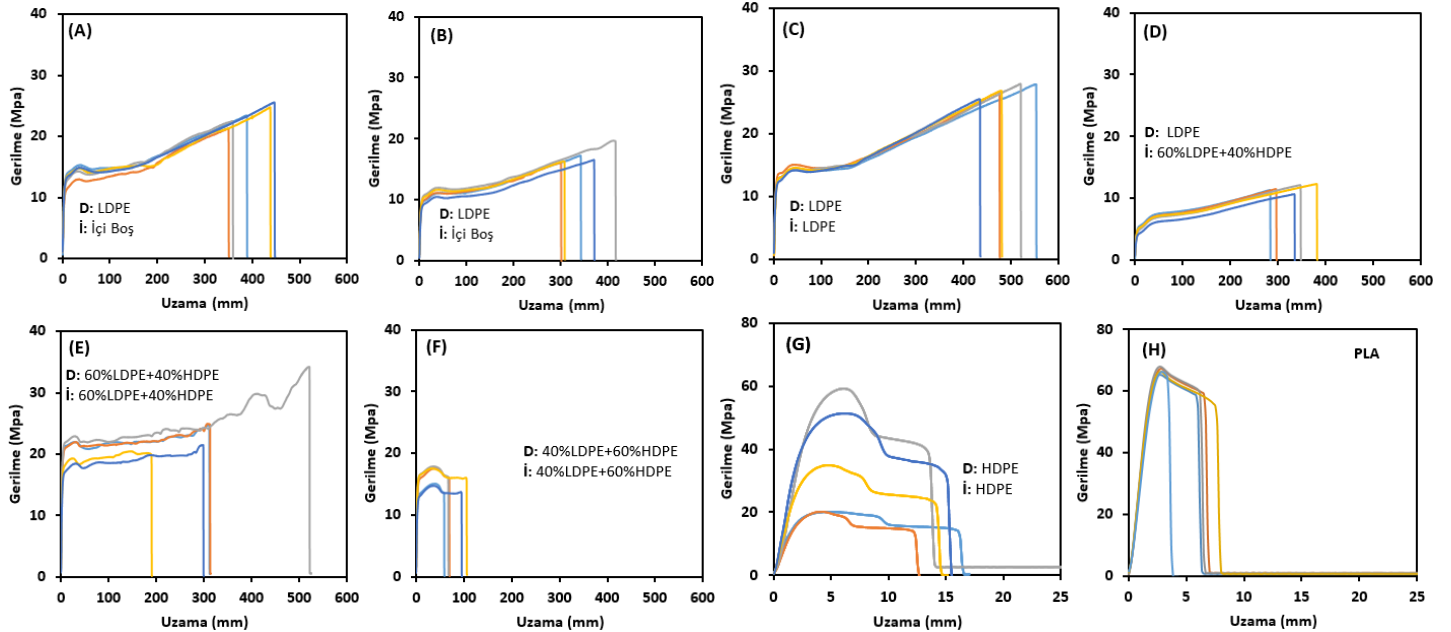
Numune	Filamentin dış kısmına beslenen polimer	Filamentin iç kısmına beslenen polimer	İlk Isıtma - Erime sıcaklığı (°C)	İkinci Isıtma - Erime sıcaklığı (°C)	Soğutma-Kristalizasyon Sıcaklığı (°C)
(a)	LDPE	İçi Boş	107.47	107.95	96.47
(b)	LDPE	İçi Boş	107.47	108.30	95.30
(c)	LDPE	LDPE	107.61	108.13	94.81
(d)	LDPE	LDPE(%60) HDPE(%40)	107.75	108.31	95.59
(e)	LDPE(%60) HDPE(%40)	LDPE(%60) HDPE(%40)	106.27 127.06	107.18 127.31	96.03 116.10
(f)	LDPE(%40) HDPE(%60)	LDPE(%40) HDPE(%60)	102.71 122.87	105.71 129.27	95.83 117.01
(g)	HDPE	HDPE	131.54	134.06	119.08



Şekil 10. Eriyikten çekimde üretilen LDPE/HDPE filamentlerin TGA grafikleri: (a) N-a, (b) N-b, (c) N-c, (d) N-d, (e) N-e, (f) N-f, ve (g) N-g

Tablo 10. Eriyikten çekimle üretilen LDPE/HDPE filamentlerinin çap ölçümleri

Numune Adı	Numune A	Numune B	Numune C	Numune D	Numune E	Numune F	Numune G
1. Ölçüm	1,60 mm	1,50 mm	1,00 mm	1,20 mm	1,00 mm	1,90 mm	2,50 mm
2. Ölçüm	1,50 mm	1,80 mm	0,80 mm	1,80 mm	1,10 mm	1,30 mm	1,90 mm
3. Ölçüm	1,10 mm	1,90 mm	1,30 mm	1,90 mm	1,00 mm	2,00 mm	1,30 mm
4. Ölçüm	1,20 mm	2,00 mm	2,00 mm	2,10 mm	1,20 mm	2,00 mm	1,50 mm
5. Ölçüm	1,30 mm	2,20 mm	1,50 mm	1,30 mm	1,60 mm	1,60 mm	1,70 mm
6. Ölçüm	1,30 mm	1,70 mm	1,50 mm	1,80 mm	1,70 mm	1,50 mm	2,00 mm
7. Ölçüm	1,50 mm	1,10 mm	1,70 mm	1,60 mm	2,40 mm	1,30 mm	1,90 mm
8. Ölçüm	2,20 mm	1,70 mm	2,20 mm	1,40 mm	1,90 mm	1,40 mm	0,90 mm
9. Ölçüm	1,10 mm	1,70 mm	1,40 mm	1,50 mm	1,30 mm	1,10 mm	1,90 mm
10. Ölçüm	1,90 mm	1,70 mm	1,70 mm	1,70 mm	1,80 mm	2,50 mm	2,50 mm
Ortalama	1,47 mm	1,73 mm	1,51 mm	1,63 mm	1,50 mm	1,66 mm	1,81 mm

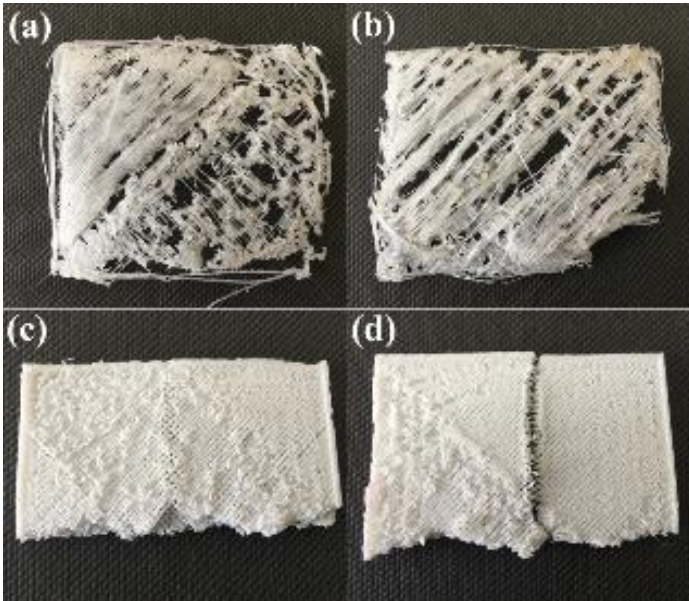


Şekil 11. Eriyikten çekimde üretilen LDPE/HDPE filamentlerin gerilme-uzama grafikleri: (A) N-a, (B) N-b, (C) N-c, (D) N-d, (E) N-e, (F) N-f, ve (G) N-g. (H) PLA filamentinin gerilme-uzama grafikleri

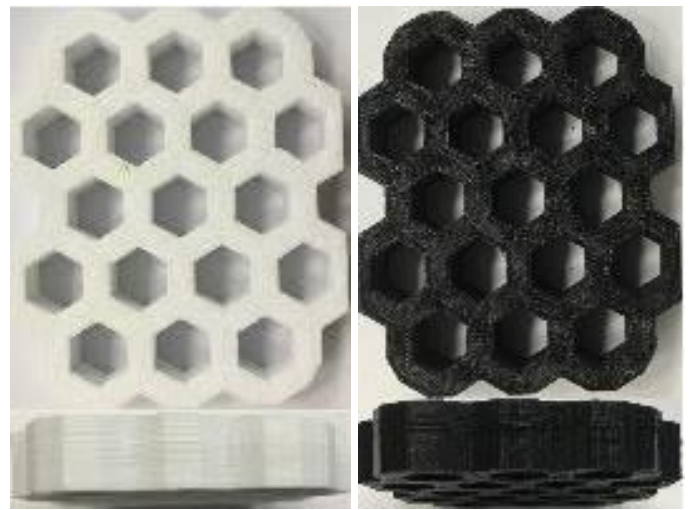
Her filament grubu numunesi için beşer tane gerilme-uzama testi yapılmıştır ve grafikler Şekil 11'de sunulmuştur. Her numune grubu için kopma anındaki kuvvetler beş numunenin ortalaması alınmak suretiyle belirlenmiştir. Kopma mukavemetleri "a", "b", "c", "d", "e", "f" ve "g" numuneler beş testin ortalaması olan 17.13, 13.00, 18.61, 8.51, 21.43, 15.17, 20.76 ve 1.32 Mpa olarak hesaplanmıştır. "f" ve "g" numunelerinden elde edilen grafiklerde bu değerler kopma mukavemeti değil de en yüksek kuvvet değerine tekabül eden akma noktası değerleri alınmıştır. Buda filament yapısındaki HDPE'in mekanik testteki baskın etkisinden kaynaklanmaktadır. Grafiklerden görüldüğü üzere her grubun kendi içerisinde gerilme-uzama eğrileri şekil olarak beş numune içinde birbirine benzemesine rağmen eğrilerin maksimum ve minimum değerleri arasındaki farklar fazladır, bunun nedeni test edilen filament numunelerinin çaplarının farklılığından kaynaklanmaktadır. Tablo 10'da her bir filament numunesinin on farklı bölgesinden alınan çap ölçümleri verilmektedir. PLA filamentleri daha lineer bir yapıya sahip olup ölçülen filament çapı yaklaşık 1,74 mm civarındadır. HDPE miktarının fazla olduğu veya filamentin sadece HDPE olduğu numunelerde maksimum kuvvet değeri LDPE baskın numunelere kıyasla daha büyüktür. Ayrıca kıyaslama amacı ile endüstriyel ve 3B parça yapımına uygun bir PLA filamentini kullanılarak ta 3B yazıcı ile balpeteği yapı üretilecek ve kendi ürettiğimiz LDPE/HDPE filamentlerden üretilecek olan balpeteği yapı ile kıyaslanacaktır. Bu kapsamda kullanılacak olan PLA filamentine ait gerilme-uzama test grafikleri Şekil 11H'da sunulmuştur. Yapılan beş ölçümün ortalaması olarak PLA filamentinin stresin ortalaması 1.32 Mpa olarak bulunmuştur. PLA filamentlerinin kopma anındaki uzaması üretilen LDPE, HDPE ve LDPE/HDPE filamentlere kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Üretilen her filament numune grubu ile 3B parçaların üretimi üzerine ön çalışma yapılmıştır. Sadece LDPE içeren N-a, N-b ve N-c filament numuneleri kullanılarak 3B yazıcı ile parçaların üretimi denenmiş fakat yapıların oluşturulması başılamamıştır. LDPE 3B yazıcının filamentin beslenip eritildiği düzenin tıkanmasına neden olduğu ve eriyiği şekil oluşum yatağına temas ettikten sonra yüzeyde kalmayıp hareketli olan düzenin etkisi ile sakız gibi uzadığı için 3B yapıların üretimi gerçekleştirilememiştir. Diğer taraftan N-f de HDPE miktarının fazla olması, N-g ise tamamen HDPE den oluşuyor olması sebebi ile bu çalışmada kullanılan 3B yazıcıdaki düze çıkışında eriyik sağlanamamıştır ve bu numunelerden 3B parçalar üretilememiştir. Diğer taraftan literatürde HDPE filamentlerden 3B yazıcılarda parça üretimi üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur [20], fakat bu çalışmada kullanılan 3B yazıcıya bağlı olarak kendi ürettiğimiz HDPE filamentlerden 3B parçalar üretilememiştir. Yapısında 3/2 oranında LDPE/HDPE olan N-e numunesinden kısmi olarak parça üretilmiştir, fakat Şekil 12 a, b'de görüldüğü gibi düzgün bir 3B yapı üretilmemiştir. Diğer taraftan bikomponent filament yapısına sahip olan N-d numunesinden düzgün 3B yapı elde edilebilmiştir (Şekil 12 c, d). Bu yüzden üretilmesi planlanan balpeteği yapı N-d filament numunesi kullanılarak üretilmiştir.

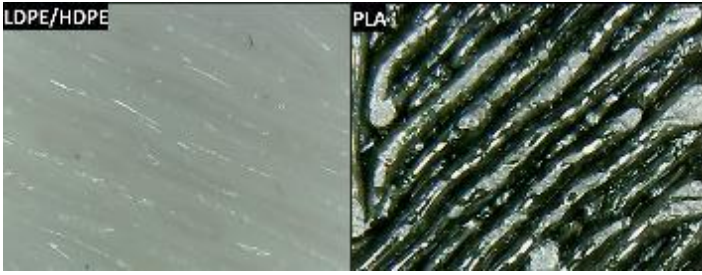
LDPE/HDPE bikomponent filament yapısından oluşan N-d numunesinden elde edilen balpeteği yapı ve bu yapı ile kıyaslamak için piyasada 3B yazıcılarda yaygın kullanılan PLA filamentinden de aynı ölçülerde balpeteği yapı üretilmiştir (Şekil 13). Üretilen her iki balpeteği yapının enleri 91,6 mm, boyları 76,2 mm ve kalınlık ise 15 mm olarak ölçülmüştür. Altıgen yapıların iç taraftan ölçülen düz duvarları (kenarları) arası mesafe ise 12,5 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 12. 3B yazıcı ile balpeteği üretim denemelerinin görüntüleri: (a) N-e, BH=10, NS=237, YS=82; (b) N-e, BH=10, NS=237, YS=70; (c) N-d, BH=10, NS=237, YS=74; ve (d) N-d, BH=50, NS=230, YS=80



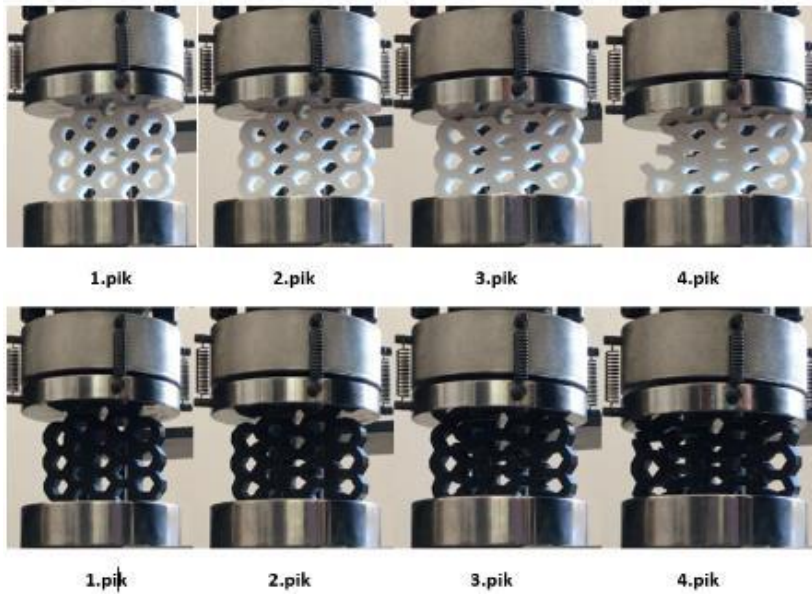
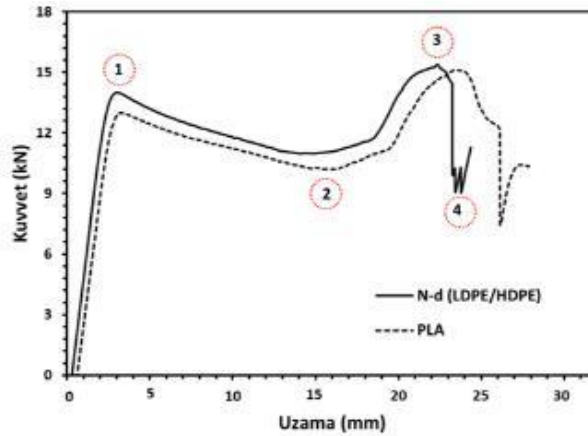
Şekil 13. N-d (LDPE / HDPE) ve PLA filamentleri kullanılarak 3B yazıcı ile üretilen balpeteği yapı. Beyaz olan numune: N-d (LDPE / HDPE), ve siyah olan numune: PLA



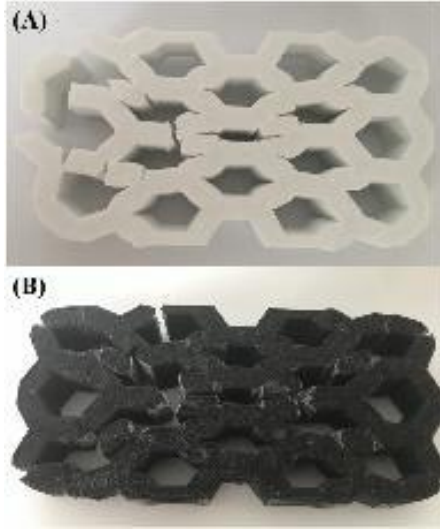
Şekil 14. N-d (LDPE / HDPE) ve PLA filamentlerden üretilen 3B balpeteklerinin büyütülmüş yüzey görüntüleri.

Şekil 14'da LDPE/HDPE bikomponent ve PLA filamentlerden üretilen 3B üretilen balpeteği yapılarının yüzeyleri yakınlştırılarak incelenmiştir. 3B yazıcıda üretim esnasında filamentleri eriterek besleme yapan hareketli düze doğrultusunda yönlennmeye bağılı olarak pürüzlü bir yüzeyin oluştuğı her iki numunede de görülmektedir. Pürüzlü yüzeyin PLA'dan elde edilen numunede daha belirgin olduğı görülmektedir.

LDPE/HDPE bikomponent (N-d) ve PLA filamentlerden üretilen 3B balpeteği yapılarına uygulanan basma mukavemeti test grafikleri ve bu grafikteki pik noktalarna tekabül eden numunelerin görüntüleri Şekil 15'de verilmiştir. Basma mukavemeti testi esnasında testin başlangıcından itibaren yükleme devam ederken 1.pik noktasında LDPE/HDPE numunesinde 13,97 kN'da PLA numunesinde ise 12,99 kN'da ani burkulma ile deformasyon meydana gelmiştir. Burkulma sonucu deformasyon sonrası 2.pik noktasına kadar yükleme devam ederken kuvvet değeri düşmüş, bu noktadan sonra 3.pik noktasında LDPE/HDPE numunesinde 15,32 kN'da PLA numunesinde ise 15,10 kN'da maksimuma ulaşacak şekilde yükleme ile birlikte tekrar kuvvet değeri artmaya devam etmiştir. 3. bölgenin sonunda maksimum kuvvet değerine ulaşmış ve yapı tekrardan belirtilen bölgelerde burkulmaya maruz kalmış ve ikinci kez ani deformasyon gerçekleşmiştir. Buda kuvvet değerinin düşmesine neden olmuş 4.pik noktasında numunelerde kırılmalar meydana gelmiş ve deney sonlandırılmıştır.



Şekil 15. N-d (LDPE / HDPE) ve PLA filamentlerden üretilen 3B balpeteği yapılarının basma mukavemeti test grafikleri ve pik noktalarındaki görüntüleri.



Şekil 16. (A) N-d (LDPE / HDPE) ve (B) PLA filamentlerden üretilen 3B balpeteği yapıların basma mukavemeti test sonrası görüntüleri

Basma mukavemet testleri sonrasında balpeteği numunelerinin görüntüleri alınarak (Şekil 16) analiz edilmiştir. LDPE/HDPE balpeteği numunesine kıyasla PLA numunesinde kırılma bölgesi daha fazladır. Her iki numunede'de merkeze yakın bölgelerdeki balpeteklerinde gerçekleşen şekil değişikliği daha fazladır buda başlangıçta 1.pik pozisyonuna kadar olan yüklemde sol ve sağ taraftaki dikey sıralı balpetekleri basının sağlandığı düzlemlerle temas etmezken 2.pik pozisyonundan sonra dış kısımdaki balpetekleride yüzeyle temas emesinden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden Şekil 15'de her iki numune içinde 3.pik noktasında gerçekleşen burkulma anındaki kuvvet değerleri 1. Pik noktasındakilerden daha yüksektir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada granül formdaki LDPE ve HDPE'den eriyikten çekim yöntemi ile sade, karışım ve bikomponent formlarda filamentler üretilmiştir. Filamentlerin optik mikroskopla kesit görüntü analizlerinin yanı sıra kimyasal, kristal ve mikroyapı, termal stabilite ve mekanik analizleri yapılmıştır. Üretilen filamentlerden 3B yazıcı ile üretim denemeleri yapılmış, bikomponent formdaki LDPE/HDPE filamentinin mevcut 3B yazıcı için en uygun filament olduğu tespit edilmiştir. LDPE/HDPE filamentinden balpeteği formda 3B parça üretilerek basma mukavemeti testine tabi tutulmuştur. 3B yazıcılarda yaygın olarak kullanılan PLA filamentleri ile de aynı boyutlarda balpeteği yapı üretilip basma mukavemeti analizi yapılmıştır. LDPE/HDPE ve PLA numunelerinin basma mukavemeti davranışları benzer özellikler gösterdiği ve değerlerin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak LDPE/HDPE bikomponent filamentleri PLA filamentleri gibi termoplastik karakteristikte olması ve üretilen 3B balpeteği yapının basma mukavemet karakteristikle-rinin benzer olması LDPE/HDPE bikomponent filamentlerin 3B yazıcılarda PLA filamentlerine alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Yapılan çalışma Oğuzhan Uslu'nun Bursa Uludağ Üniversitesi (BUU) Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yapmış olduğu Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir. Mamüllerimin 3B üretiminde 3B yazıcı, Bilgisayar Destekli Tasarım SolidWorks Programını kullanımına sunan destek ve yardımlarından dolayı Bursalı Tekstil San. ve Tic. A.Ş.'ye, bikomponent Filament Üretim Ünitesi için BUU BAP birimine, ve bu ünitenin temininden dolayı proje yürütücüsü sayın Prof. Dr. Yusuf ULCA'Y'a, basma testleri için yardımda bulunan Araş. Gör. Oğuz TUNCEL'e, DSC ve ATR-FTIR testlerinde için İstanbul Teknik Üniversitesi akademisyenleri Doç. Dr. Umut Kıvanç ŞAHİN ve Araş. Gör. Elçin EMEKDAR'a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Zhang, Y. S., Yue, K., Aleman, J., Mollazadeh-Moghaddam, K., Bakht, S. M., Yang, J., Jia, W., Dell'Erba, V., Assawes, P., Shin, S. R., Dokmeci, M. R., Oklu, R., Khademhosseini, A., (2017), *3D Bioprinting for Tissue and Organ Fabrication*. Annals of Biomedical Engineering, 45, 148-163.
- Bak, D., (2003), *Rapid prototyping or rapid production 3D printing processes move industry towards the latter*. Assembly Automation., 23, 340-345.
- Murr, L.E., (2016), *Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication*. Journal of Materials Science and Technology, 32, 987-995.
- Sun, K., Wei, T. S., Ahn, B. Y., Seo, J. Y., Dillon, S.J., Lewis, J.A., (2013), *3D printing of interdigitated Li-ion microbattery architectures*, Advanced Materials, 25, 4539-4543.
- Vak, D., Hwang, K., Faulks, A., Jung, Y. S., Clark, N., Kim, D. Y., Wilson, G. J., Watkins, S. E., (2015), *3D printer based slot-die coater as a lab-to-fab translation tool for solution-processed solar cells*. Advanced Energy Materials, 5, 1401539-1401547.
- Compton, B. G., Lewis, J. A., (2014), *3D-printing of lightweight cellular composites*. Advanced Materials, 26, 5930-5935.
- Blok, L. G., Longana, M. L., Yu, H., Woods, B. K. S., (2018), *An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites*. Additive Manufacturing, 22, 176-186.
- Sang, L., Han, S., Peng, X., Jian, X., Wang, J., (2019), *Development of 3D-printed basalt fiber reinforced thermoplastic honeycombs with enhanced compressive mechanical properties*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 125, 105518.
- Yap, Y.L., Yeong, W.Y., (2015), *Shape recovery effect of 3D printed polymeric honeycomb: This paper studies the elastic behaviour of different honeycomb structures produced by PolyJet technology*. Virtual and Physical Prototyping, 10, 91-99.
- Hamod, H., (2015), *Suitability of recycled HDPE for 3D printing filament*, Thesis, Arcada University of Applied Science, Finland.
- Gabriel, L.H., (2015), *History and Physical Chemistry of HDPE*, https://plasticpipe.org/pdf/chapter-1_history_physical_chemistry_hdpe.pdf
- Kreiger, M.A., Mulder, M.L., Glover, A.G., Pearce, J.M., (2014), *Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament*, Journal of Cleaner Production, 70, 90-96.

13. Peng, F., Jiang, H., Woods, A., Joo, P., Amis, E. J., Zacharia, N. S., Vogt, B. D., (2019), *3D Printing with Core-Shell Filaments Containing High or Low Density Polyethylene Shells*, ACS Applied Polymer Materials, 1, 275–285
14. Da Silva D.J, Wiebeck H., (2018), *CARS-PLS regression and ATR-FTIR spectroscopy for eco-friendly and fast composition analyses of LDPE/HDPE blends*, Journal of Polymer Research, 25, 112.
15. Yıldırım, K., Özçağatay, U., Köstem, A.M., Güçer, Ş, (2009), *Polietilen Tipinin Belirlenmesinde Analitik Metot. 12. Tekstil Teknolojisi ve Kimyasındaki Son Geliştirmeler Sempozyumu*, 06 – 09 Mayıs 2009, KMO, Bursa, Turkey.
16. Gulmine, J. V., Janissek, P. R., Heise, H. M., Akcelrud, L. (2002), *Polyethylene characterization by FTIR*, Polymer Testing, 21, 557–563.
17. Shahi, P., Behraves, A. H., Haghtalab, A., Rizvi, G., Goharpei, F., (2017), *An experimental study on foaming of linear low-density polyethylene/high-density polyethylene blends*, Journal of Cellular Plastics, 53, 83-105.
18. Munaro, M., Akcelrud, L., (2008), *Correlations between composition and crystallinity of LDPE/HDPE blends*, Journal of Polymer Research, 15, 83-88.
19. Lin, Y., Du, W., Tu, D., Zhong, W., Du, Q., (2005), *Space charge distribution and crystalline structure in low density polyethylene (LDPE) blended with high density polyethylene (HDPE)*, Polymer International, 54, 465–470.
20. Schirmeister, C. G., Hees, T., Licht, E. H., Mülhaupt, R., (2019), *3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication. Additive Manufacturing*, 28, 152–159.