

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

PLA ve GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PET FİLAMENLERİNİN 3D FDM BASKIDA BOYUTSAL DOĞRULUK ve GERİÇEKİLME PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF DIMENSIONAL ACCURACY AND
RETRACTION PERFORMANCE OF PLA AND
RECYCLED PET FILAMENTS in 3D FDM PRINTING

Yazarlar (Authors): Elif AKTEPE , Şükriye AKTEPE 



Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aktepe E., Aktepe Ş., "Pla ve Geri Dönüştürülmüş Pet Filamentlerinin 3D FDM Baskıda Boyutsal Doğruluk Ve Geriçekilme Performansının Karşılaştırılması" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 114-123, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1400467

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

PLA ve GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PET FİLAMENTLERİNİN 3D FDM BASKIDA BOYUTSAL DOĞRULUK ve GERİÇEKİLME PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

Elif AKTEPE^a , Şükriye AKTEPE^b 

^aAfyon Kocatepe Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, TÜRKİYE
^bAfyon Kocatepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sanat ve Tasarım Anabilim Dalı, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: sukriyeaktepe@gmail.com

(Geliş/Received: 05.12.23; Düzeltme/Revised: 26.01.24; Kabul/Accepted: 05.04.24)

ÖZ

Bu çalışmada, PLA filament ve PET su şişelerinin geri dönüştürülmesiyle elde edilen PET filamentin boyutsal doğruluğu ve geri çekilme performansı, 3D FDM (Fused Deposition Modeling) yazıcı kullanılarak üretilen test objeleri üzerinde değerlendirilmiştir. Çalışma, geri dönüştürülmüş PET filamentin kullanılabilirliğini ve teknik performansını belirlemeyi hedeflemektedir. Araştırmada farklı baskı hızları ile PLA filament ve geri dönüştürülmüş PET filament kullanılarak baskı işlemleri gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu yazıcı ile farklı hızlarda (30-40-50 mm/s) üretilen test objelerinin boyutsal doğruluğu için ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler, filamentin yapısal tutarlılığını ve basılan nesnelerin boyutsal hassasiyetini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Geri çekilme performansı için de aynı baskı hızları kullanılarak hem PLA filament hem de geri dönüştürülmüş PET filament ile baskılar alınmıştır. Araştırmanın sonuçları, geri dönüştürülmüş PET filamentin 3 boyutlu FDM tipi yazıcılarda nasıl performans gösterdiğini ortaya koyarak, sürdürülebilir üretim sürecine katkıda bulunabilir.

Anahtar Kelimeler: 3 Boyutlu Yazıcı, Geri Dönüştürülmüş PET Filament, Boyutsal Doğruluk, Geri Çekilme Performansı

COMPARISON OF DIMENSIONAL ACCURACY AND RETRACTION PERFORMANCE OF PLA AND RECYCLED PET FILAMENTS in 3D FDM PRINTING

ABSTRACT

In this study, the dimensional accuracy and retraction performance of PET filament obtained through the recycling of PLA filament and PET water bottles were evaluated on test objects produced using a 3D FDM (Fused Deposition Modeling) printer. The aim of the study is to determine the usability and technical performance of recycled PET filament. Printing processes were carried out using different printing speeds with both PLA filament and recycled PET filament in the research. Measurements were taken for the dimensional accuracy of test objects produced at different speeds (30-40-50 mm/s) using a 3D printer. These measurements were conducted to assess the structural consistency of the filament and the dimensional precision of printed objects. Retraction performance was also evaluated by printing with both PLA filament and recycled PET filament at the same printing speeds. The results of the research can contribute to sustainable production processes by revealing how recycled PET filament performs in 3D FDM-type printers.

Keywords: 3D Printer, Recycled PET Filament, Dimensional Accuracy, Retraction Performance.

1. GİRİŞ

3 boyutlu yazıcı teknolojileri 1980'lerden bu yana hızla ilerlemiş ve ilerlemeye devam etmektedir. Endüstriyel ve prototip amaçlarıyla kullanılan bu teknolojiler, teknolojik ilerlemelerle birlikte daha erişilebilir ve uygun fiyatlı hale gelmiştir. Bu gelişme, 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından benimsenmesini ve çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır [1]. 3 boyutlu yazdırma veya eklemeli üretim, bilgisayar destekli program (CAD) kullanılarak 3 boyutlu yazıcıda baskısı alınabilen modellerin bilgisayar ortamında oluşturulduğu bir süreçtir. Bu teknolojiler ile tasarımcılar, istedikleri nesneyi dijital olarak tasarlayabilir ve bu tasarımı 3 boyutlu bir model haline getirebilirler [2]. Farklı çalışma prensiplerinde 3 boyutlu yazıcılar mevcuttur. Yaygın olarak erimiş biriktirme modellemesi (FDM) kullanılmaktadır [3]. FDM yazdırma yöntemi, 3 boyutlu yazıcılarda kullanılan bir üretim sürecidir. Bu süreç, 3 boyutlu bir nesnenin fiziksel modelini oluşturmak için bir CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımını kullanmasıyla başlamaktadır. Tasarımcı, tasarımın girdilerini kullanarak CAD modelini oluşturmaktadır. Sonrasında CAD modeli 3 boyutlu yazıcıların okuyabileceği bir dosya formatına dönüştürülmektedir. Bu dosya formatı genellikle STL, OBJ, AMF ve 3MF gibi formatlardır [4]. Dönüştürülen dosya, bir dilimleme yazılımı aracılığı ile işlenir. Slic3r, Cura ve Repetier gibi popüler açık kaynak dilimleme yazılımları bu adımda kullanılmaktadır [5]. Dilimleme yazılımı, yazdırılacak nesneyi katmanlara ayırır, katmanlar için yol oluşturur ve yazdırılacak nesneye destek yapıları ekler. Aynı zamanda tarama genişliği, tarama yönlendirmesi, dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve diğer yazıcı parametrelerini belirleyerek yazdırma işlemi için gerekli olan G-code'u oluşturmaktadır [6]. 3 boyutlu yazıcı, tasarlanan nesneyi yazdırmak için G-code talimatlarını takip etmektedir. Yazdırma işlemi, 3 boyutlu yazıcının ekstrüzyon başlığından çıkan erimiş malzemenin katmanlar halinde üst üste birleştirilmesiyle gerçekleşmektedir. Bu katmanlar, tasarlanan nesnenin 3 boyutlu modeline uygun şekilde bir araya getirilmektedir. Her bir katmanın üzerine eklenerek, nihai fiziksel modelin tabakalarını oluşturmaktadır. Bu süreç, malzemenin

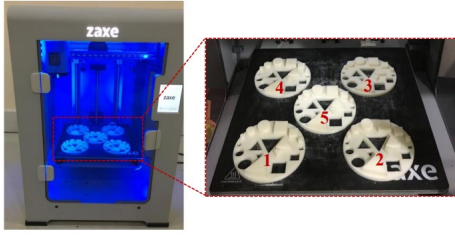
soğuması ve sertleşmesiyle birlikte ilerlemektedir. 3 boyutlu yazıcı G-code talimatlarını kullanarak, her adımda hangi konumda ve hangi özelliklere sahip olması gerektiğini belirlemektedir. Bu süreç, tasarlanan nesnenin dijital modelini gerçek bir fiziksel objeye dönüştürmek için hassas ve kontrollü bir üretim süreci sağlamaktadır [5].

3 boyutlu yazıcılar, termoplastik filament gibi malzemeleri kullanarak katman katman nesne üreten cihazlardır. ABS, PLA, PETG, Nylon gibi yaygın termoplastik filamentlerin yanı sıra, metal, ahşap ve karbon elyafı gibi daha egzotik malzemelerin kullanımı da mümkündür. Bu filamentler, farklı özelliklere sahip nesnelerin üretilmesini sağlamaktadır. 3 boyutlu yazdırma teknolojisi, birçok sektörde kullanılırken, sürekli olarak yeni malzemeler ve daha ileri seviye uygulamalar geliştirilmektedir. Böylece bu teknolojinin potansiyeli ve kullanım alanı genişlemeye devam etmektedir [7]. 3 boyutlu yazıcılarda geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması, atık yönetimi ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol oynamaktadır. Geri dönüştürülmüş malzemelerin 3 boyutlu yazıcılarda kullanılması, çevresel etkiyi azaltarak sürdürülebilir üretim pratiklerine katkı sağlamaktadır. Ayrıca geri dönüştürülmüş malzemelerin 3 boyutlu yazıcılarda kullanılması üretim maliyetlerini düşürerek ekonomik açıdan da avantaj sunmaktadır [8].

3 boyutlu yazıcılarda üretim hızlı ve seri olmasına rağmen, objelerin boyutsal doğruluğu ve çapaklanmalar nedeniyle katmanlarda bozulmalar yaşanabilmektedir. Bu nedenle dijital tasarımların boyutsal doğruluğu büyük önem taşımaktadır. Literatürde farklı malzemeler ve parametrelerle 3 boyutlu yazıcılarda üretilen nesnelerin performansını değerlendirmeye yönelik çalışmalar mevcuttur. ABS-plus malzemesiyle yapılan çalışmada; hızlı prototiplerde boyutsal doğruluk, düzlük ve yüzeysel dokusunu belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada FDM 3 boyutlu yazıcılardaki üretim süreçlerini optimize etmeye ve daha hassas sonuçlar elde etmeye yardımcı olmaktadır [9].

Endüstriyel 3 boyutlu yazıcı olan Zaxe Z1 yazıcısı kullanılarak ABS malzemenin üretilen parçalarda boyut hatalarını belirlemiştir. Farklı boyutlarda daire, kare ve eşkenar üçgen

şekilleri içeren test parçaları tasarlanmış ve imalat tablasının farklı bölgelerinde 5 farklı test parçası üretilmiştir. Baskısı alınan test objeleri Şekil 1'de görülmektedir. Baskıdan sonra taranan test parçalarının geometrileri iki boyutlu profiller olarak elde edilmiş ve geometri uydurma algoritmasıyla tasarlanan geometrilerle karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, profil tolerans değerlerinin imalat tablasındaki konuma ve geometriye bağlı olarak değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. İmal edilen tüm geometrilerin tasarlanan boyutlarından daha küçük olduğu görülmüştür. Başka bir deyişle, tüm geometriler çekmeye maruz kalmıştır. Genel olarak, geometri boyutu arttıkça profil tolerans değerinde artış gözlemlenmiştir. Tüm geometriler için ortalama profil tolerans değeri 0.1987 mm olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma da tarama yollarının kaydırılmasıyla daha hassas geometrilerin elde edilebileceğini göstermektedir [10].



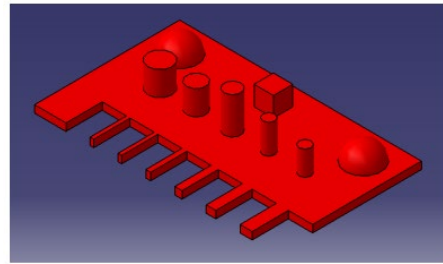
Şekil 1. Baskısı alınan test objeleri [10]

FDM yöntemiyle üretilen parçaların boyutsal doğruluğunu inceleyen çalışmada Stratasys FDM 400MC makinesinde standart işlem parametreleri kullanılarak farklı boyutlardaki dört parça ABS malzemesiyle üretilmiştir. Üretilen test objesi Şekil 2'de görülmektedir. Koordinat Ölçme Makinesi ile ölçülen lineer boyutlarla parçaların boyutsal doğruluğu hesaplanmıştır. Parçaların boyutlarının FDM modelinin doğruluğunu önemli ölçüde etkilediğini ve dairesel şekilli parçaların, özellikle silindirik, küresel ve deliklerin, makinenin toleransı dışında olduğunu göstermektedir [11].



Şekil 2. FDM yazıcı kullanılarak baskı alınan test objesi [11]

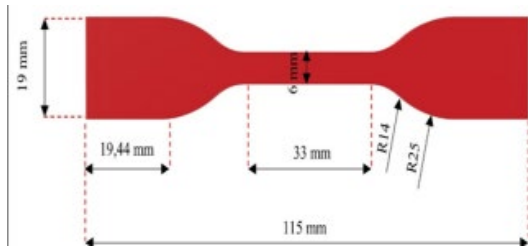
Hafsa vd. tarafından yapılan çalışmada, belirli bir parçanın üretimi için en uygun hızlı prototipleme ve imalat sürecini seçmenin zorluğuna odaklanmıştır. FDM yöntemiyle üretilen ABS ve PLA malzemeli parçalar Investment Casting süreci için ana model olarak değerlendirmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre, içi boş ABS model düşük tabaka kalınlığı ile en iyi boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğüne sahipken, PLA modeli genel olarak daha iyi döküm sonuçları üretmektedir. Yüksek tabaka kalınlığıyla üretilen dolu PLA modeli, diğerlerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir [12]. Mendel Max ve Kossel Mini açık kaynaklı 3 boyutlu yazıcılarının etkinliğini ve doğruluğunu inceleyen bir çalışmada, Fused Filament Fabrication (FFF) kullanılan bu yazıcılar üzerinde yapılan testlerde, katman yüksekliği ve dolgu yoğunluğu gibi FFF parametreleri çeşitlendirilmiştir. Baskı için hazırlanan test objesinin modeli Şekil 3'te görülmektedir. PLA ve ABS filamentleri kullanılarak üretilen parçaların boyutsal doğruluğu ve yüzey kalitesi ölçülmüştür. Sonuçlar, Mendel Max'in Kossel'e kıyasla daha düşük sapma gösterdiğini ve PLA filamentin daha iyi yüzey kalitesi sağladığını ortaya koymaktadır. Her iki yazıcı için de en iyi sonuçların, katman kalınlığı 0.178 mm ve dolgu yoğunluğu %20 olduğu durumlarda elde edildiği belirlenmiştir [13].



Şekil 3. Modellenen test objesi [13]

PLA malzemesinden yapılan parçaların boyutsal ve yüzey kalitesi, FFF kullanılarak değerlendirilmiştir. İşleme parametrelerinin, katman kalınlığı, baskı hızı ve sıcaklık gibi, parçaların özellikleri üzerindeki rolü incelemişlerdir. Ayrıca, titreşimli yüzey işleme (VSF) adlı bir post işleme operasyonunun, işlem süresinin parçaların yüzey ve boyutsal değişkenliği üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Katman kalınlığının hem doğrudan basılmış hem de post işlenmiş örneklerin yüzey ve boyutsal kalitesini kontrol etmek için önemli bir parametre olduğu bulunmuştur. Baskı sıcaklığı

ğının da örneklerin boyutsal doğruluğunda etkili olduğu görülmüştür. Post işleme düşünüldüğünde, üretilen örneklerin nihai yüzey kalitesini belirleyen kilit faktör süre olmuştur; post işlem ile yüzey pürüzlülüğü %66 oranında azalmıştır [14]. PLA, PET-G ve ABS malzemelerinden üretilen 3 boyutlu baskılı çekme test örneklerinin boyutsal doğruluğu üzerinde filament türü ve katman yüksekliğinin etkisi derinlemesine incelenmişlerdir. Üretilen test objesinin tasarımı ve boyutları Şekil 4'te görülmektedir. FFF teknolojisi temel alınarak, çeşitli katman yüksekliklerinde (0.2 mm, 0.3 mm ve 0.4 mm) çekme test örnekleri üretilmiş ve diğer baskı parametrelerini sabit tutulmuştur. Sadece nozül ve bina platformu sıcaklığı değiştirilmiştir. Üretilen test örneklerinin uzunluk, genişlik ve yükseklik değerleri ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar, her bir örneğin boyutsal doğruluğunu gözlemek için tasarım boyutları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, örnekler üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılarak nihai yüzey kaliteleri incelenmiştir. Boyutsal ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre, en doğru sonuçlar PET-G (uzunluk ve yükseklik) ve PLA (genişlik) örnekleri için kaydedilmiştir. Ayrıca, diğer filamentlere kıyasla PLA örneklerinde en iyi yüzey kalitesine ulaşılmıştır [15].



Şekil 4. Test objesinin tasarım ve boyutları [15]

Tezel yaptığı çalışmada ise eklemeli imalat yöntemi olan FDM ile PET-G malzemeden 5,10 ve 15 mm çapındaki içi boş ve dolu numuneler üretmiştir. 3 boyutlu yazıcıda baskısı alınan numune Şekil 5'te görülmektedir. Farklı yazdırma sıcaklıklarında ve hızlarında baskısı alınan test objelerinin boyutsal doğrulukları incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda yazdırma sıcaklığının boyutsal doğruluğu etkilediğini göstermiştir [16].



Şekil 5. Baskısı alınan test objesi [16]

Islam ve diğerleri tarafından yürütülen çalışmada, 3 boyutlu yazıcı ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğuyla ilgili önemli bir deneysel çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Parçaların doğruluğunu belirlemek amacıyla genel amaçlı bir koordinat ölçüm makinesi kullanılmıştır. Prizmatik parçalarda, 3 boyutlu baskı sürecinden kaynaklanan iki tür hata gözlemlenmiştir. Bu hatalar boyutsal değişiklikler ve delik çapındaki değişiklikler şeklindedir. Bu çalışma, 3 boyutlu baskı süreci ile ilişkilendirilen içsel boyut hataları üzerine önemli bir ön çalışma niteliindedir [17]. PLA malzemesi ve FDM teknolojisi kullanılarak üretilen örneklerin 3 boyutlu baskı sürecindeki boyutsal doğruluğunu araştırılmıştır. Çeşitli işlem parametreleri, yapı yönlendirmesi, raster yönlendirme açısı ve katman kalınlığı gibi faktörler üzerindeki etkiler incelenmiştir. Beyaz, gri ve siyah PLA filamentleri kullanılarak silindirik ve köpek kemiği çekme test örnekleri üretilmiştir. Çalışma, en iyi sonuçları elde etmek için optimum işlem parametrelerini belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, ticari FDM 3D yazıcılarıyla yüksek bir genel boyutsal doğruluk %98,81 elde edilebileceği görülmüştür. Ayrıca, filament renginin test parçalarının ağırlığı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu ve katman kalınlığı parametresinin doğruluk üzerinde önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, termoplastik filamentlerle FDM 3 boyutlu baskı kullanarak parça üretimini optimize etmek için rehberlik edebilecek önemli konfigürasyonları tanımlamaya yardımcı olmaktadır [18].

Kechagias vd. tarafından yapılan çalışmada, Polyjet Direct 3 boyutlu baskı süreci ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğunu etkileyen parametreleri incelenmiştir. Katman kalınlığı, inşa stili ve model ölçeği üzerinde dört deney gerçekleştirilmiştir. 0.01 mm hassasiyetinde dijital mikrometre ile lineer ve diyametrik boyutlar ölçülmüştür. ANOM diyagramları ile her parametrenin etkisi belirlenmiştir, performans ölçütlerine göre optimum seviyeler önerilmiştir. ANOVA analizi ile parametrelerin

performans üzerindeki etkisi yüzde olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, dış boyutların bıçak hareketi ve katman kalınlığından etkilendiğini, iç boyutların ise katman kalınlığı ve ölçek faktöründen öncelikli olarak etkilendiğini göstermiştir [19].

Bu çalışmada 3 boyutlu yazıcılarda kullanılmak üzere PET su şişelerinden üretilen filament ve ham olarak piyasada satılan PLA malzemesiyle boyutsal doğruluk ve geri çekilme için üç farklı hızda baskı alınmıştır. GD-PET 3 boyutlu yazıcıda kullanılabilirliği PLA filament ile kıyaslanmıştır. PLA ve geri dönüştürülerek üretilmiş PET filamentin yazdırma hızının boyutsal doğruluğa ve geri çekilmeyle olan ilişkisi deneysel olarak incelenmiştir.

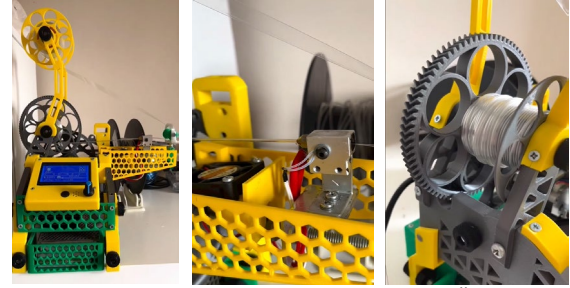
2. MATERYAL VE METOT

Günümüzde, küresel ölçekte kullanılan plastiklerin %88'i, çeşitli zararlı yöntemlerle imha edilmektedir. Bu yöntemler ya toprağın altına gömülmesi ya da yakılarak çevreye zararlı gazlar sızmaktadır. Bu endişe verici durum, her yıl dünya genelinde üretilen 260 milyon ton plastik atığın sadece %12'sinin geri dönüştürülebildiği anlamına gelmektedir. Bu büyük orandaki plastik atıkların etkisiz bir şekilde yönetilmesi, çevre kirliliği, ekosistem zararı ve sürdürülebilir kaynak kullanımı konularında ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle, plastik atıkların daha sürdürülebilir ve etkili bir şekilde geri dönüştürülmesine yönelik çözümler bulunması, küresel çevre sorunlarına karşı önemli bir adımdır [20].

PET, su şişeleri, gıda ambalajları ve tekstil ürünleri gibi çeşitli ürünlerde yaygın olarak kullanılan bir termoplastik polimer reçine türüdür. PET, neme ve kimyasallara dayanıklı, güçlü ve hafif bir malzemedir ve genellikle plastik şişe üretiminde tercih edilmektedir. Şeffaf ve kristal berraklığına sahip olan PET filament, ısıtıldığında veya çeşitli işlemlere tabi tutulduğunda şeffaflığını değiştirebilmektedir [21].

PET, hem mekanik hem de kimyasal geri dönüşüm işlemleriyle geri dönüştürülebilen bir polimerdir. Mekanik geri dönüşümde, kullanılmış PET malzemesi temizlenip kurutulduktan sonra granül haline getirilmekte ve eritilerek yeni PET filament elde edilmektedir. Kimyasal geri dönüşüm ise PET

malzemeyi kimyasal bileşenlerine ayırarak, bu bileşenleri yeni malzemeler oluşturmak için kullanmayı içermektedir. Ancak, PET malzemenin geri dönüşümü, yavaş üretim oranları ve yüksek maliyetli süreçler gibi bazı dezavantajları içermektedir. Bu nedenle, belirli bir geri dönüşüm programının özel ihtiyaçları ve hedefleri göz önüne alınarak uygun geri dönüşüm yöntemlerinin seçilmesi önemlidir. Çalışma, 5 ve 10 litrelik PET su şişelerinin kullanıldığı bir deneyi içermektedir. Atık olan kullanılmış PET su şişeleri, ilk olarak dış jelatinlerinden arındırılarak ve dış yüzeyleri pürüzsüz ve düzgün bir hale getirilmektedir. Daha sonra, sabit bir jilet ile tutarlı bir şekilde, silindirik olan PET su şişesi döndürülerek şerit şeklinde kesilmektedir. Elde edilen dikdörtgen kesitli şerit daha sonra geçiş bölgesinden ısıtılmış alanda geçerek 1.75 mm çapında filament elde edilmiştir. PET su şişeden filament üretimi için kullanılan makine görselleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. PET Su Şişesinden Filament Üretim Makinası

Geri dönüştürülmüş PET, plastik atıkların geri kazanımı ve tekrar kullanılabilir hale getirilmesi amacıyla üretilen bir malzemedir. PET, çeşitli içecek şişelerin, plastik kaplar ve ambalaj malzemeleri gibi çok yaygın bir plastik türüdür. Bu nedenle geri dönüştürülmüş PET, plastik atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Çalışmada atık PET su şişelerinden üretilen PET filament ile hazır olarak satın alınan PLA filament kullanılmıştır. Test objelerinin baskısında Creality marka Ender 3 pro üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır.

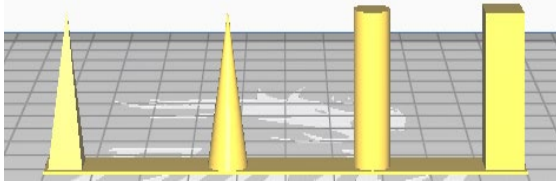
Boyutsal doğruluk testi için 6 farklı boyuttan oluşan kule modeli baskısı alınmıştır. Kule modeli Jay Dhariwall'in Fab Academy 2019 web sitesindeki bireysel ödev için, yapılan çalışmalar referans alınmıştır [22]. Kule modelin tabandan tepeye doğru çapları sırasıyla

25, 20, 15, 10, 5 ve 2.5 mm olarak düzenlenmiştir. Test objesinin yüksekliği ise 30 mm'dir. Şekil 7'de hazırlanan model verilmiştir.



Şekil 7. Boyutsal Doğruluk Test Objesi.

Geri çekilme performansını ölçmek için 100 mm uzunluğunda 10 mm genişliğinde 1 mm kalınlığında dikdörtgen prizma üzerine eşit aralıklar ile dört farklı geometriye sahip dikdörtgen prizma, silindir, konik ve üçgen prizmadan oluşan test objesi hazırlanmıştır. Bu model tasarlanırken Jay Dhariwall'in Fab Academy 2019 web sitesindeki bireysel ödev için, yapılan çalışmalar referans alınmıştır [22], web sitesindeki model üzerinde aynı geometrik şekiller kullanılmıştır. Bu çalışmada geometrik şekiller değiştirilmiştir. 3 boyutlu yazıcının farklı şekiller arasında geçiş yaparken geri çekilme performansı değerlendirilmiştir. Test objesinin toplam yüksekliği 31 mm'dir. Şekil 8'de hazırlanan model verilmiştir.



Şekil 8. Geri Çekilme Performansı Test Objesi.

Çalışmada dilimleme programı olarak CURA kullanılmıştır. Test objelerinin tamamında katman kalınlığı 0.2 mm olarak sabit tutulmuştur. Test objeleri 30 mm/s, 40 mm/s ve 50 mm/s yazdırma hızlarında 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Dolgu yoğunluğu bütün objelerde %10 olarak sabit tutulmuş ve dolgu şekli kübik olarak belirlenmiştir.

Geri dönüştürülmüş PET filament için yazdırma parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir. Baskı hızı haricindeki diğer parametreler sabit tutulmuştur.

Çizelge 1. GD-PET Filament Yazdırma Parametreleri.

Parametreler	Değer
Baskı Hızı (mm/s)	30, 40, 50
Katman Kalınlığı (mm)	0.2
Dolgu Yoğunluğu (%)	10
Dolgu Şekli	Kübik
Nozül Sıcaklığı (°C)	260
Yatak Sıcaklığı (°C)	85
Fan Hızı (%)	100

PLA filament için yazdırma parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir. Baskı hızı haricindeki diğer parametreler sabit tutulmuştur.

Çizelge 2. PLA Filament Yazdırma Parametreleri.

Parametreler	Değer
Baskı Hızı (mm/s)	30, 40, 50
Katman Kalınlığı (mm)	0.2
Dolgu Yoğunluğu (%)	10
Dolgu Şekli	Kübik
Nozül Sıcaklığı (°C)	210
Yatak Sıcaklığı (°C)	65
Fan Hızı (%)	100

PLA ve GD-PET filament yazdırma parametrelerinden sadece nozül ve yatak sıcaklığı farklıdır. PLA filament için 65 °C yatak sıcaklığı, 210 °C nozül sıcaklığı, GD-PET filament için 85 °C yatak sıcaklığı, 260 °C nozül sıcaklığında baskı alınmıştır.

Üretilen test objelerinin boyutsal doğruluğu Carbon Fiber Composites Digital Caliper kullanılarak ölçülmüştür. Kumpas Şekil 9'da verilmiştir.



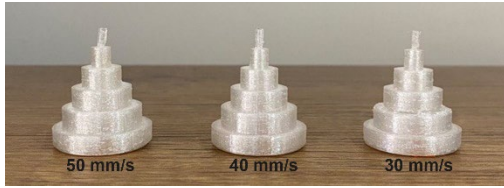
Şekil 9. Ölçüm için Kullanılan Kumpas.

Boyutsal doğruluk testi için üretilen objelerin ölçümleri her katman için tek tek yapıp kaydedilmiştir. Geri çekilme performansının gözlemlenebilmesi için test objelerine baskı sonrasında hiçbir işlem uygulanmamıştır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

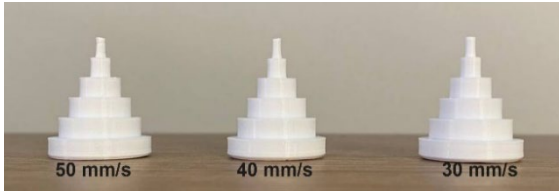
GD-PET filament kullanılarak üç farklı hızda test objesi üretilmiştir. Baskısı alınan test objelerinin görseli Şekil 10'da gösterilmiştir. Test objelerinin CAD çapları ve 3 boyutlu yazıcıdan baskı alındıktan sonraki ölçümleri

Çizelge 3 ve 4'te verilmiştir. En önemli fark 50-40 mm/s hızda üretilen objenin son katmanında sırasıyla %47 ve %38 olarak belirlenmiştir. Yazdırma işleminde boyutun küçük olmasından dolayı yapışma sorunu gözlemlenmiştir. Son katman dikkate alınmadığında CAD boyutuna yakın rakamlar kaydedilmiştir. Ancak genel olarak CAD boyutunun birebir aynısı olmadığı tespit edilmiştir. Üretilen test objelerinde yazdırma hızı arttıkça boyutsal doğrulukta düşüş gözlemlenmiştir. Bu yüksek hızda yapılan baskılarda filamentin daha hızlı soğuyarak, katılaşmasının tam ve düzgün olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ölçülen değerler Çizelge 3'te verilmiştir.



Şekil 10. GD-PET Filament Boyutsal Doğruluk Test Objeleri.

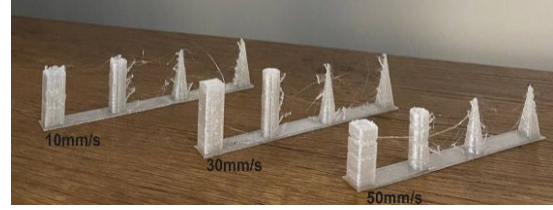
PLA filament ile üretilen test objeleri de üç farklı hızda üretilmiştir. Baskısı alınan test objelerinin görselleri Şekil 11'de gösterilmiştir. Test objelerinin CAD çapları ve 3 boyutlu yazıcıdan baskı alındıktan sonraki ölçümleri Çizelge 4'te gösterilmiştir. Ölçülen değerler incelendiğinde 30 mm/s hızda üretilen test objesinin 10, 15, 20 ve 25 mm çaplı kısımlarında CAD çizimiyle aynı değerler ölçülmüş, 2.5 ve 5 mm çaplı kısımlarda ise CAD çizimine oldukça yakın değerler ölçülmüştür. 50 mm/s hızda baskı alınan objenin son katmanında %25 oranında en büyük fark ölçülmüştür. GD-PET filamentle üretilen test objelerinde olduğu gibi PLA filament ile üretilen test objelerinde de baskı hızı arttıkça boyutsal doğrulukta düşmeler gözlemlenmiştir.



Şekil 11. PLA Filament Boyutsal Doğruluk Test Objeleri.

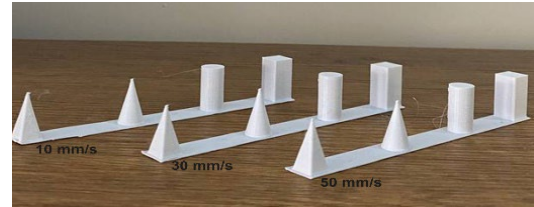
Geri çekilme performansının incelenmesi için GD-PET filament ile baskı alınan test objeleri Şekil 12'de gösterilmiştir. Üç farklı hızda baskı alınan objeler incelendiğinde baskı hızı arttıkça

geri çekilme performansının düştüğü tespit edilmiştir. 3 boyutlu yazıcıda baskı alınan test objelerinde, özellikle 50 mm/s hızda baskıda, nozül ucundaki malzemeden sızmalar oluşmuştur ve bu durum baskıda iplik veya saçak oluşumuna yol açmıştır. 30 mm/s hızda sızma oluşumu azalmıştır ancak tamamen kusursuz baskı alınmamıştır. Bu durumun nedeni ise baskı sıcaklığı olabileceği düşünülmektedir. GD-PET filamentin yüksek sıcaklıkta eridiği ve baskı esnasında akmalarn fazla olduğu gözlemlenmiştir. Fakat 260 °C'nin altında baskı alınması denenmiş fakat baskı esnasında nozül de tıkanmalar görülmüştür.



Şekil 12. GD-PET Filament Geri Çekilme Performansı Test Objeleri.

PLA filament ile geri çekilme performansı için test objeleri baskısı alınmıştır. Baskı alınan objeler Şekil 13'te verilmiştir. PLA filamentinin önerilen sıcaklıkta 210 °C'de baskı alınmıştır. Baskı hızı 50 mm/s olan baskılarda çok az baskı geçişlerinde kılçıklanma gözlemlenmiştir.



Şekil 13. PLA Filament Geri Çekilme Performansı Test Objeleri.

4. SONUÇLAR

GD-PET filament ile üretilen ve PLA filament kullanılarak üretilen objelerin testlerinde, baskı hızının artmasıyla boyutsal doğrulukta düşmeler gözlemlenmiştir. GD-PET ve PLA filament kullanılarak alınan baskılarda, yüksek hızda üretilen objelerin son katmanlarında büyük boyut farkları tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek baskı hızının filamentin daha hızlı soğuyarak tam katılaşmamasına neden olmasıyla açıklanabilmektedir. Her iki filament türüyle de yapılan baskılarda, genel olarak CAD boyutlarına yakın değerler kaydedilmiştir.

Boyutsal doğruluk testi için referans alınan çalışma ile kıyaslandığında, baskı alınan modellerin çapları küçüldüğünde, büyük olan ile kıyaslandığında baskılarda deformasyonların daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, özellikle yüksek baskı hızlarında, malzemenin istenen formu tam olarak alamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle, baskı hızının boyutsal doğruluk üzerindeki etkisi dikkate alınarak optimal parametrelerin belirlenmesi önemli olacaktır.

Geri çekilme performansı GD-PET filament ile PLA filament arasında kıyaslandığında, aynı hızda yapılan baskılarda GD-PET filamentte kılçıklanmanın daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. GD-PET filament, PET plastikten üretilir ve PLA filamentten farklı termal özelliklere sahiptir. Bu nedenle, GD-PET filamentin baskı sırasında daha yüksek sıcaklıklarda akışkan hale gelmesi ve daha düşük sıcaklıklarda hızla katılaşmaktadır. Kılçıklanma, filamentin yüksek sıcaklıklarda akışkan hale gelip daha düşük sıcaklıklarda hızla katılaşması sonucu oluşmaktadır.

Boyutsal doğruluğun ötesinde, GD-PET filamentin kılçıklanma eğilimi, özellikle yüksek hızlarda belirginleşmiştir. Kılçıklanmanın azaltılması için sıcaklık ayarlarının titizlikle kontrol edilmesi ve baskı parametrelerinin dikkatlice ayarlanması önemlidir. Bu bağlamda, malzemenin termal özelliklerini anlamak ve buna göre baskı ayarlarını optimize etmek, daha sağlam ve istikrarlı sonuçlar elde etmek adına kritik bir adım olacaktır.

Yapılan testlerde GD-PET filament ile üretilen test objelerinde ve PLA filament kullanılarak yapılan testlerde, baskı hızının artmasıyla boyutsal doğrulukta düşmeler gözlemlenmiştir. Hem GD-PET filamentle yapılan baskılarda hem de PLA filament ile yapılan baskılarda, yüksek hızda üretilen objelerin son katmanlarında büyük boyut farkları tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek baskı hızının

filamentin daha hızlı soğuyarak tam katılaşmamasına neden olmasıyla açıklanabilmektedir.

Sonuç olarak, baskı kalitesini arttırmak ve boyutsal doğruluğu yükseltmek için baskı parametrelerinin titizlikle ayarlanması önemlidir. Her iki filament türüyle de yapılan baskılarda, baskı hızı gibi parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, istenilen sonuçları elde etmek için gereklidir. Deneme yanılma yöntemiyle filamentlerin özelliklerini ve uygun baskı ayarlarını belirlemek, kaliteli ve hassas 3 boyutlu baskılar elde etmek için önemli bir adımdır.

Gelecek çalışmalarda, GD-PET filament, tasarım objeleri için kullanımı daha uygun olabilecek bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Ancak herhangi bir makinanın yedek parça baskısında kullanımı sırasında potansiyel zorluklar ortaya çıkabileceği düşünülmektedir. Bu zorluklar, malzemenin mukavemeti, dayanıklılığı ve uzun vadeli performansı ile ilgili olabilir. Bu nedenle, yedek parça üretiminde kullanılmadan önce malzemenin özellikleri dikkatlice gözden geçirilmeli ve gerekirse alternatif malzemeler de değerlendirilmelidir. Ayrıca, baskı ayarlarının doğru bir şekilde yapılandırılması ve tasarımın malzemenin özelliklerine uygun olarak düzenlenmesi, olası sorunların minimize edilmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma, GD-PET filament ve PLA filament kullanılarak yapılan 3D baskıların boyutsal doğruluğu ve malzeme performansı üzerindeki etkilerini anlamak adına önemli bilgiler sunmaktadır. Yüksek baskı hızlarının ve farklı filament türlerinin boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesine olan etkileri üzerindeki bu detaylı inceleme, endüstriyel ve hobi amaçlı 3D baskı uygulamalarında kullanıcıların daha bilinçli seçimler yapmalarına yardımcı olabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 3. GD-PET Filament ile Üretilmiş Boyutsal Doğruluk Objelerinin Ölçümleri.

CAD Çapı (mm)	50 hız ile 3			40 hız ile 3			30 hız ile 3		
	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde fark (%)	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde Fark (%)	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde Fark (%)
2.5	1.7	0.8	47.0	1.8	0.7	38.8	1.9	0.6	31.5
5	4.4	0.6	13.6	4.5	0.5	11.1	4.8	0.2	4.1
10	9.5	0.5	5.2	9.7	0.3	3.0	9.8	0.2	2.0
15	14.5	0.5	3.4	14.7	0.3	2.0	14.8	0.2	1.3
20	19.4	0.6	3.0	19.6	0.4	2.0	19.8	0.2	1.0
25	24.5	0.5	2.0	24.6	0.4	1.6	24.6	0.4	1.6

Çizelge 4. PLA Filament ile Üretilmiş Boyutsal Doğruluk Objelerinin Ölçümleri.

CAD Çapı (mm)	50 hız ile 3			40 hız ile 3			30 hız ile 3		
	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde fark (%)	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde Fark (%)	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde Fark (%)
2.5	2	0.5	25	2.3	0.2	8.6	2.4	0.1	4.1
5	4.7	0.3	6.3	4.8	0.2	4.1	4.9	0.1	2.0
10	9.8	0.2	2.0	9.9	0.1	1.0	10	0	0
15	14.9	0.1	0.6	14.9	0.1	0.6	15	0	0
20	19.8	0.2	1.0	19.8	0.2	1.0	20	0	0
25	24.9	0.1	0.4	24.9	0.1	0.4	25	0	0

KAYNAKLAR

- Horvath J, Horvath J. "A brief history of 3D printing". Mastering 3D Printing, Pages 3-10, 2014.
- Lee D, Miyoshi T, Takaya Y, Ha T, "3D Micro fabrication of Photosensitive Resin Reinforced with Ceramic Nanoparticles Using LCD Microstereolithography". Journal of Laser Micro/Nano engineering Vol. 1, Issue 2, 2006.
- Gokhare V. G, Raut D. N, Shinde D. K, "A review paper on 3D-printing aspects and various processes used in the 3D-printing". Int. J. Eng. Res. Technol, Vol. 6, Issue 6, Pages 953-958, 2017.
- Qin Y, Qi Q, Scott P. J, Jiang X. "Status, comparison, and future of the representations of additive manufacturing data". Computer-Aided Design, Vol. 111, Pages 44-64, 2019.
- Gokhare V. G, Raut D. N, Shinde D. K, "A review paper on 3D-printing aspects and various processes used in the 3D-printing". Int. J. Eng. Res. Technol, Vol. 6, Issue 6, Pages 953-958, 2017.
- Karman M, Saxena A, "A comprehensive study on 3D printing technology". MIT Int J Mech Eng, Vol. 6, Issue 2, 63-69, 2016.
- Dave H.K, Patel S.T, "Introduction to Fused Deposition Modeling Based 3D Printing Process". Fused Deposition Modeling Based 3D Printing, Pages 1-21, 2021.
- Filamentlerin Detaylı Karşılaştırılması, <https://artiboyut.com/2023/10/21/filamentlerin-detayli-karsilastirilmasi-2/>, Kasım 5, 2023.
- Nuñez P.J, Rivas A, García-Plaza, E, Beamud E, Sanz-Lobera A, "Dimensional and surface texture characterization in fused deposition modelling (FDM) with ABS plus". Procedia Engineering, Vol. 132, Pages 856-863, 2015.
- Kıran K, Şekerci B, Urgancı K. B, Delikanlı Y. E, Gezgen B, "Endüstriyel bir 3 boyutlu yazıcı ile imal edilen ABS malzemeli parçaların boyut hatalarının incelenmesi". Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 12, Sayı 4, Sayfa 1046-1057, 2022.
- Sudin M.N, Shamsudin S.A, Abdullah M.A, "Effect of part features on dimensional accuracy of FDM model". APRN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 11, Pages 8067-8072, 2016.

12. Hafsa M.N, Ibrahim M, Wahab M.S, Zahid M.S, “Evaluation of FDM pattern with ABS and PLA material”. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 465, Pages 55-59, 2014.
13. Ramli, F. R., Faudzie, M. S. M., Nazan, M. A., Alkahari, M. R., Sudin, M. N., Mat, S., & Khalil, S. N. “Dimensional accuracy and surface roughness of part features manufactured by open source 3D printer”. *ARPN J. Eng. Appl. Sci*, Vol. 13, Issue 3, Pages 1139-1144, 2018.
14. Taşcıoğlu, E., Kıtay, Ö., Keskin, A. Ö., & Kaynak, Y.”Effect of printing parameters and post-process on surface roughness and dimensional deviation of PLA parts fabricated by extrusion-based 3D printing”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 44, Issue 4, Pages 139, 2022.
15. Bolat, Ç., & Ergene, B. “An investigation on dimensional accuracy of 3D printed PLA, PET-G and ABS samples with different layer heights”. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Vol. 37, Issue 2, Pages 449-458, 2022.
16. Tezel T, “FDM ile Üretilen PET-G Malzemenin Üretim Sıcaklığı ve Hızının Boyutsal Doğruluğa Etkisi”. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, Vol. 3, Issue 2, Pages 82-8, 2019.
17. Islam, M. N., Boswell, B., & Pramanik, A. “An investigation of dimensional accuracy of parts produced by three-dimensional printing”. In *Proceedings of the World Congress on Engineering 2013*, Pages 522-525, IAENG, 2013.
18. Hanon, M. M., Zsidai, L., & Ma, Q. “Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors”. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 42, Pages 3089-3096, 2021.
19. Kechagias, J. P. A. I., Stavropoulos, P., Koutsomichalis, A., Ntintakis, I., & Vaxevanidis, N. “Dimensional accuracy optimization of prototypes produced by PolyJet direct 3D printing technology”. *Adv. Eng. Mech. Mater*, Vol. 978, Pages 61-65 2019.
20. What if we realised the true value of plastic?, <https://recyclingtechnologies.co.uk/>, Kasım 12, 2023.
21. Bartolome, L., Imran, M., Cho, B. G., Al-Masry, W. A., & Kim, D. H. “Recent developments in the chemical recycling of PET”. *Material recycling-trends and perspectives*, Vol. 406, Pages 576-596, 2012.
- 22.3D Printing and Scanning, <https://fabacademy.org/2019/labs/akgec/students/ja-y-dhariwal/assignments/week06/>, Ekim 10, 2023.