

Araştırma Makalesi
10.65520/jasam.1842469

Künye:

Sayı: 1
Yıl: 2026
Sayfa: 58-74

 
Kaan YEŞİLKAYA 1^{a*}
Hakan YEŞİLKAYA 2^b

^a Yük. Lis. Öğr., Erciyes Üniversitesi,
yesilkaya.kn@gmail.com

^b Öğr. Gör., Türk Hava Kurumu
Üniversitesi, hyesilkaya@thk.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Geliş Tarihi: 27.01.2026

Kabul Tarihi: 06.04.2026

Yayın Tarihi: 18.05.2026

Atıf:

Kaan YEŞİLKAYA 1, Hakan
YEŞİLKAYA 2, (2026). **FDM
Yönteminde Karbon Fiber
Takviyesinin ve Üretim
Parametrelerinin Boyutsal
Doğruluğa Etkisi** JASAM, 1, 58-74.
<https://doi.org/10.65520/jasam.1842469>

Screened by
 iThenticate®
for Authors & Researchers



Except where otherwise noted, content
in this article is licensed under a
Creative Commons 4.0 International
license. Icons by Font Awesome.

FDM Yönteminde Karbon Fiber Takviyesinin ve Üretim Parametrelerinin Boyutsal Doğruluğa Etkisi

Öz

Kolay ulaşılabilir ve düşük maliyetli bir üretim yöntemi olan eriyik yığma modelleme (FDM/fused deposition modeling) yöntemi eklemeli imalat (Eİ) yöntemleri arasında popüler yöntemlerden biridir. Filament formunda termoplastikler sıcak nozul yardımıyla baskı platformunda katmanlar halinde üretilmektedir ve yöntemin doğası gereği yeterli boyutsal doğruluk elde edilememektedir. Filamentlere takviye elemanları eklemek ve üretim parametrelerini optimize etmek boyutsal doğruluğun artmasına olanak tanımaktadır. Çalışmada takviyesiz ve %15 karbon fiber (CF/carbon fiber) ve takviyeli (PLA-CF 15) polilaktik asit (PLA) filamentlerle, 0° ve 90° baskı yönelimlerinde, 50 °C ve 70 °C tabla sıcaklıklarında tam fonksiyonel deney tasarımı kullanılarak üretilen numunelerin (ASTM D638 tip 4) X, Y ve Z uzunluklarının boyutsal doğrulukları incelenmiştir. Deney tasarımı (DOE/Design of Experiments) analizleri sonucunda sinyal/gürültü (S/N) oranları incelendiğinde X uzunluğunda CF takviyesi boyutsal doğruluğu düşürürken, Y ve Z uzunluğunda boyutsal doğruluğu artırmıştır. 90° baskı yönelimi tüm uzunluklarda boyutsal doğruluğu artırmıştır. 50 °C tabla sıcaklığı Z uzunluğunda boyutsal doğruluğu artırmış, 70 °C tabla sıcaklığı ise X ve Y uzunluğunda boyutsal doğruluğu artırmıştır. Varyans analizi (ANOVA/Analysis of Variance) ile tüm uzunluklar için katkı oranı sıralamasının CF takviyesi, tabla sıcaklığı ve baskı yönelimi şeklinde olduğu sonucuna varılmıştır. CF takviyesi tüm uzunluklar için anlamlı P-değerlerine sahip olmuştur. Ayrıca Z uzunluğu için CF takviyesine ek olarak tabla sıcaklığı ve baskı yönelimi de anlamlı P-değerlerine sahip olmuşlardır. Filamentlere takviye elemanı ilavesi ve üretim parametrelerinin optimizasyonu ile boyutsal doğruluğun iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: FDM, Boyutsal doğruluk, Karbon fiber PLA, Üretim parametreleri



The Effect of Carbon Fiber Reinforcement and Production Parameters on Dimensional Accuracy in the FDM Method

Abstract

Fused Deposition Modeling (FDM), a readily accessible and cost-effective manufacturing method, is one of the most widely used techniques among additive manufacturing (AM) processes. In this method, thermoplastics in filament form are deposited layer by layer onto the build platform using a heated nozzle; however, due to the inherent nature of the process, achieving sufficient dimensional accuracy remains challenging. The incorporation of reinforcement elements into filaments and the optimization of process parameters enable improvements in dimensional accuracy. In this study, the dimensional accuracy of the X, Y, and Z lengths of specimens (ASTM D638 Type

IV), produced using unreinforced and 15% carbon fiber (CF)-reinforced polylactic acid (PLA-CF 15) filaments at 0° and 90° build orientations and at bed temperatures of 50 °C and 70 °C, was investigated using a full factorial design of experiments. According to the results of the Design of Experiments (DOE) analysis, evaluation of the signal-to-noise (S/N) ratios indicated that CF reinforcement decreased dimensional accuracy in the X direction, while it improved dimensional accuracy in the Y and Z directions. A 90° build orientation improved dimensional accuracy in all directions. A bed temperature of 50 °C improved dimensional accuracy in the Z direction, whereas a bed temperature of 70 °C improved dimensional accuracy in the X and Y directions. Based on the Analysis of Variance (ANOVA), the ranking of contribution ratios for all dimensions was determined to be CF reinforcement, bed temperature, and build orientation, respectively. CF reinforcement exhibited statistically significant p-values for all dimensions. In addition, for the Z dimension, both bed temperature and build orientation also exhibited statistically significant p-values alongside CF reinforcement. It was concluded that dimensional accuracy can be improved through the incorporation of reinforcement elements into filaments and the optimization of process parameters.

[The English Extended Abstract is available at the end of the article.]

Keywords: FDM, Dimensional accuracy, Carbon fiber PLA, Production parameters



1. Giriş (Introduction)

Eklemleri imalat (Eİ) yöntemlerinin güncelliğini koruması ve teknolojilerinin sürekli olarak gelişmesi bu yöntemlerin araştırmacılar için popüler bir çalışma alanı olmasına ve çeşitli sektörlerde kullanılmasına olanak tanımaktadır (Birosz et al., 2023). Söz konusu yöntemlerin otomotiv, savunma, havacılık ve sağlık gibi farklı sektörlerde ürün prototipleme ve parça üretimleri için kullanımı mevcuttur (Karagöz et al., 2021). Geleneksel imalat yöntemlerinin yetersiz kaldığı alanlarda sağladığı avantajlar Eİ'nin popülerliğinin artmasına ve yaygınlaşmasına yardımcı olmuştur. Özellikle hızlı ürün prototipleme imkânı sunması, üretim işlemi için kalıp gereksiniminin olmaması, ihtiyaç duyulan kadar malzeme kullanması, malzeme tasarrufu sağlaması ve atık oluşumunu minimize etmesi, kişiye özgü ürünlerin oluşturulmasına imkân tanınması, karmaşık geometri ve içi boşluklu yapıları üretebilmesi Eİ'nin öne çıkan avantajlı özellikleri arasında yer almaktadır (Başcı & Yamanoglu, 2021). Eİ çeşitli malzemeleri işleyebilme kabiliyetine sahiptir. Metaller, polimerler, seramikler ve kompozitler Eİ'de ham madde olarak kullanılabilen malzemeler arasında yer almaktadır (Karagöz et al., 2021).

Polimer malzemeler söz konusu olduğunda en yaygın kullanılan yöntemlerden biri eriyik yığıma modelleme (FDM/fused deposition modeling) yöntemidir (Başcı & Yamanoglu, 2021). Termoplastiklerin ham madde olarak kullanıldığı FDM yönteminde, makaraya sarılı filament dişliler yardımıyla sıcak nozula iletilir. Sıcak nozul yardımıyla eritilen filament, baskı platformunda fanlar yardımı ile soğutulur ve katlaşır. Baskı platformunda ilk katmanın üzerine ardışık şekilde katman katman binmiş ham maddeler nihai geometriyi oluşturur. Yöntemin doğası gereği üretilen çıktılarda yeterli boyutsal doğruluk elde edilmesi zordur (Noriega et al., 2013). Yöntemde katmanların birleştiği noktalarda boşlukların oluşma olasılığı vardır ve bu boşluklar parça kalitesini olumsuz etkilemektedir. Boyutsal doğruluk ürünlerin kullanılabilirliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Özellikle kalite ve sürdürülebilirlik gerektiren sektörler için yüksek boyutsal doğruluğa ihtiyaç duyulmaktadır. FDM yöntemi ile üretilen nihai geometrilerde elde edilen boyut toleransları parçaların kalitesinde ve kullanılabilirliğinde önemli bir role sahiptir. FDM yönteminde çeşitli değişikliklerin yapılması ile boyutsal doğruluğun artırılması mümkündür (P. Sharma et al., 2022). Yöntemde üretim parametrelerinin optimizasyonu boyutsal doğruluğun artırılmasına olanak tanır. Araştırmacılar katman kalınlığı (Gorana et al., 2023), üretim yönü, dolgu yoğunluğu, kontur sayısı (Deswal et al., 2019), dolgu deseni, baskı düzlemi ve parçanın baskı tablasındaki konumu (Camposeco-Negrete, 2020) gibi çeşitli parametrelerin optimize edilmesi ile boyutsal doğruluğun artırılması üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Yetersiz boyutsal doğruluğun yanı sıra FDM yöntemini kısıtlayan bir diğer olumsuzluk yeterli malzeme kütüphanesinin olmayışıdır (Wang et al., 2020). Polikarbonat (PC) (Gorana et al., 2023), akrilonitril bütadien stiren (ABS), polietilen tereftalat glikol (PET-G) ve polilaktik asit (PLA) gibi polimerler

FDM yönteminde ham madde olarak kullanılan malzemelerdendir (Tezel, 2019). Bor nitrit, grafen ve karbon fiber (CF/carbon fiber) benzeri takviye elemanları kullanılarak polimerlerin mekanik dayanımları, ısı kararlılıkları, yüzey kaliteleri ve sertlikleri gibi çeşitli özellikleri iyileştirilebilmektedir. Takviyeli polimer malzemelerin üretimi FDM yönteminde kullanılan ham madde kütüphanesinin genişlemesine olanak tanımaktadır (Bindhu et al., 2018). Üretim parametrelerinin ve takviye katkısının filamentler üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi için çeşitli analizler yapılmaktadır (Gorana et al., 2023).

Deney tasarımı (DOE/Design of Experiments) analizleri ile sinyal/gürültü (S/N) oranı elde edilmektedir (Aydın, 2023). Üretim parametrelerinin S/N oranlarının belirlenmesi optimum parametrelerin belirlenmesine olanak tanımaktadır (Hikmat et al., 2021). Yöntemde temel olarak üç adet S/N oranı hesaplama denklemi mevcuttur. Bu denklemler “küçük daha iyidir”, “büyük daha iyidir” ve “nominal daha iyidir” şeklinde sıralanmaktadır (Aydın, 2023; Tunçel et al., 2024). DOE analizleri sonrasında yapılan varyans analizi (ANOVA/Analysis of Variance) ile parametrelerin katkı oranları ve anlam düzeyleri belirlenebilmektedir (Hikmat et al., 2021).

Literatürde FDM yöntemi ile farklı üretim parametrelerinde üretilen parçaların boyutsal doğruluğunun incelendiği çok sayıda çalışma mevcuttur. Sharma ve diğ. (P. Sharma et al., 2022) ABS ve PLA filament kullanarak çeşitli geometrik yapılar için farklı üretim parametrelerinde (duvar kalınlığı, dolgu yoğunluğu, tabla sıcaklığı, baskı hızı, katman kalınlığı ve nozul sıcaklığı) boyutsal doğruluk analizi yapmışlardır. Ayrıca boyutsal doğruluğun tahmini için makine öğrenmesi kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada PLA'nın ABS'ye kıyasla daha yüksek boyutsal doğruluğa sahip olduğu ve üretim parametrelerinin boyutsal doğruluk üzerinde etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Gorana ve diğ. (Gorana et al., 2023) FDM yöntemi kullanarak ürettikleri parçanın boyutsal doğruluğunu iyileştirebilmek için üretim parametrelerini (katman kalınlığı, baskı yönelimi, raster açısı ve tarama genişliği) optimize etmişlerdir. Uzunluk ve çap değerlerini varyans analizi ile değerlendirmişlerdir. Yaptıkları deneyleri Taguchi dizisine göre tasarlamışlardır. Uzunluk açısından boyutsal doğruluğu en fazla etkileyen parametrenin baskı yönelimi olduğu sonucuna varmışlardır. Taguchi yaklaşımının parametreleri optimize etmek için basit ama etkili bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Şeker ve Erdinler (Şeker & Erdinler, 2025) yaptıkları çalışmada ABS filament kullanarak, farklı baskı yoğunluğunda ve baskı açısında ürettikleri parçanın boyutsal doğruluğunu incelemişlerdir. Parça üzerinde uzunluk, genişlik ve kalınlık ölçümü yapmışlardır. Ayrıca ağırlığı ve görsel yüzey özelliklerini de incelemişlerdir. Üretim parametrelerinin boyutsal doğruluğu etkilediği ve uygun üretim parametreleri ile boyutsal doğruluğun artırılabilirliği sonucuna varmışlardır. Aktepe ve Aktepe (Aktepe & Aktepe, 2024) polietilen tereftalat (PET) ve PLA filamentin geri çekme performansı ile boyutsal doğruluğunu incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada farklı baskı hızlarında ürettikleri parçaları analiz etmişlerdir. Üretim parametresindeki seviye değişiminin boyutsal doğruluğu etkilediğini belirlemişlerdir. Toprak (Toprak, 2024) yaptığı çalışmada farklı seviyelerde dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve baskı hızı parametreleri ile Taguchi metodu kullanarak PLA'nın boyutsal doğruluğunun ve üretim sürecinin optimizasyonunu incelemiştir. En uygun üretim parametrelerinin kullanılması ile boyutsal doğruluğun artırılabilirliği sonucuna varmıştır. Sharma ve diğ. (K. Sharma et al., 2021) üretim parametrelerinin (katman yüksekliği, raster açısı, nozul sıcaklığı ve çevresel basıncı) boyutsal doğruluğa etkisini incelemişlerdir. Deneylerini Taguchi L9 dizisine dayalı olarak gerçekleştirmişlerdir. Üretim parametrelerinin boyutsal doğruluğu etkilediği sonucuna varmışlardır. Sudin ve diğ. (Sudin et al., 2016) FDM yönteminde değişken olmayan üretim parametreleri kullanarak aynı şekillerin farklı uzunluklardaki boyutsal doğruluklarını incelemişlerdir. Küre, silindir ve daire parçalarının, kare parçalara kıyasla daha düşük boyutsal doğruluğa sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Parça şekillerinin ve uzunluklarının boyutsal doğruluğu etkilediğini belirtmişlerdir.

Literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde; çalışmalar özellikle üretim parametrelerinin optimizasyonu ile boyutsal doğruluğun iyileştirilmesine odaklanmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda çeşitli takviye elemanlarının boyutsal doğruluğa olan etkileri üzerinde yeterli çalışma mevcut değildir. Literatürde yer alan çalışmalara ek olarak bu çalışmada CF takviyesinin FDM yöntemi ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca baskı yönelimi ve tabla sıcaklığı

parametrelerinin de boyutsal doğruluk üzerindeki etkileri çalışmada yer almaktadır.

Bu çalışmada CF takviyesinin, baskı yöneliminin ve tabla sıcaklığının FDM yöntemi ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir; 2. Bölümde CF takviyeli filamentlerin üretimi, deney numunesi, üretim parametreleri, ölçümler, DOE analizleri ve ANOVA ile ilgili bilgiler yer almaktadır. 3. Bölümde elde edilen ölçümler ve sapmalar, DOE analizi sonucunda elde edilen S/N oranları ve ANOVA sonucunda elde edilen katkı oranları na ve P-değerlerine ilişkin bilgiler sunulmuştur. 4. Bölümde sonuçlar ve tartışma yer almaktadır.

2. Materyal Metot (Material Method)

2.1. Karbon Fiber Takviyeli Polilaktik Asit Filament Üretimi (Production of Carbon Fiber Reinforced Polylactic Acid Filament)

CF takviyeli PLA (PLA-CF 15) filamentin üretiminde matris malzemesi olarak PLA ve takviye elemanı olarak CF kullanılmıştır. PLA-CF 15 filamentin üretimi için çift vidalı ekstrüder kullanılmıştır. Ekstrüzyon işlemi için kademeli ısıtma kullanılmıştır. Ekstrüzyon işlemi çıkışında filament önce ılık ardından soğuk su ile soğutulmuştur. Üretim işlemi Filameon firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 1,75 mm çapında takviyesiz ve %15 CF takviyeli PLA filamentler kullanılmıştır. PLA ve PLA-CF 15 filamentlerinin teknik özellikleri Tablo 1’de yer almaktadır.

Tablo 1. PLA ve PLA-CF 15 filamentlerinin teknik özellikleri (Filameon PLA, n.d.; Filameon PLA-CF 15, n.d.).

PLA	Değer	PLA-CF 15	Değer
Çap (mm)	1,75	Çap (mm)	1,75
Tolerans (mm)	±0,03	Tolerans (mm)	±0,03
Yoğunluk (g/cm ³)	1,24	Yoğunluk (g/cm ³)	1,23
Nozul Sıcaklığı (°C)	190-230	Nozul Sıcaklığı (°C)	200-230
Erime Akış Hızı (210°C/2,16kg)	6	Erime Akış Hızı (210°C/2,16kg)	-
Akma Sınırındaki Gerilme Direnci (MPa)	60	Çekme Dayanımı (MPa)	55
Uzama Gerinimi (%)	6	Uzama Gerinimi (%)	-
Eğme Dayanımı (MPa)	83	Eğme Dayanımı (MPa)	80
Rockwell Sertliği (R ölçeği)	105	Rockwell Sertliği (R ölçeği)	108
Sıcaklık Dayanımı (°C)	55	Sıcaklık Dayanımı (°C)	65

2.2. Deney Numunesi (Test Sample)

Çalışma kapsamında, ASTM D638 Tip 4 çekme numuneleri üretilmiştir. Numunelerin boy (X-115 mm), en (Y-19 mm) ve yükseklik (Z-3,2 mm) uzunlukları boyutsal doğruluk açısından incelenmiştir. Deney numunelerinin üretimi için 1,75 mm çapında Filameon marka PLA ve PLA-CF 15 filamentler kullanılmıştır. Kullanılan filamentler üretici firma (Filameon) tarafından hazır olarak temin edilmiştir. Numunelerin üretimi Şekil 1a’da sunulan Ender-3 S1 FDM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri %100 dolulukta üretilmiştir. Numuneler çevresinde 3 etek sayısı olacak şekilde üretilmiştir ve destek yapısı numunelere temas etmemiştir. Deney numuneleri üzerinde ölçümü yapılan ideal uzunluklar Şekil 1b’de gösterilmiştir.

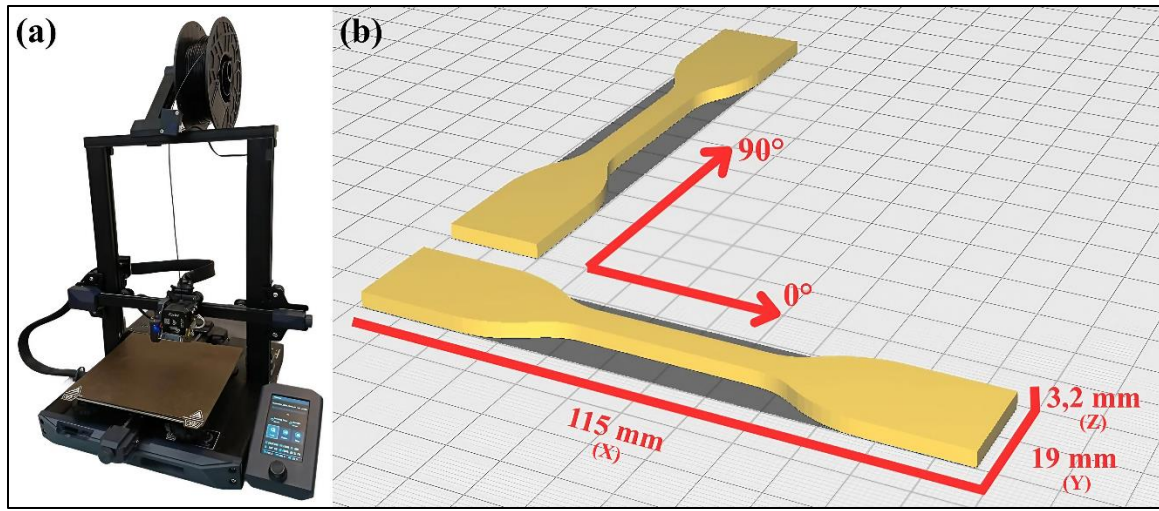
2.3. Deney Parametreleri (Experimental Parameters)

FDM yönteminde üretimi gerçekleştirmek için kullanılan çok sayıda üretim parametresi bulunmaktadır. Katman kalınlığı, baskı yönelimi, raster açısı ve genişliği, nozul sıcaklığı, baskı hızı, dolgu yoğunluğu ve deseni, nozul çapı, kontur sayısı ve genişliği bu parametrelerden bazılarıdır (Jaisingh Sheoran & Kumar, 2020; Solomon et al., 2021). Kullanılan üretim parametreleri ürün kalitesini etkilemektedir (Toprak, 2024). Çalışmada iki seviyede CF takviyesi, baskı yönelimi ve tabla sıcaklığı değişken parametreler

olarak kullanılmıştır. Baskı yönelimi üretim parçasının baskı platformu üzerinde üç eksenle konumlandırılması anlamına gelmektedir (Jaisingh Sheoran & Kumar, 2020). Numunelerin uzunluk ölçüleri ve tabla üzerindeki baskı yönelimleri şekil 1b’de sunulmuştur. Tabla sıcaklığı, üretim işlemi süresince baskı platformunun sahip olduğu sıcaklığı ifade etmektedir. Deney numunelerinin değişken üretim parametreleri Tablo 2’de yer almaktadır.

Tablo 2. Değişken üretim parametreleri.

NO	Parametre	Seviye 1	Seviye 2
1.	Karbon fiber oranı (%)	0	15
2.	Baskı yönelimi (°)	0 (yatay)	90 (dikey)
3.	Tabla sıcaklığı (°C)	50	70



Şekil 1. (a) Ender-3 S1 FDM cihazı, (b) deney numunelerinin baskı yönelimleri ve uzunlukları.

Çalışmada CF takviye oranının, baskı yöneliminin ve tabla sıcaklığının boyutsal doğruluğa etkisi incelendiği için Tablo 2 dışında kalan tüm üretim parametreleri, her bir numunenin üretimi için sabit tutulmuştur. Bu parametreler için UltiMaker Cura programının varsayılan ayarları kullanılmıştır. Sabit üretim parametreleri Tablo 3’te yer almaktadır.

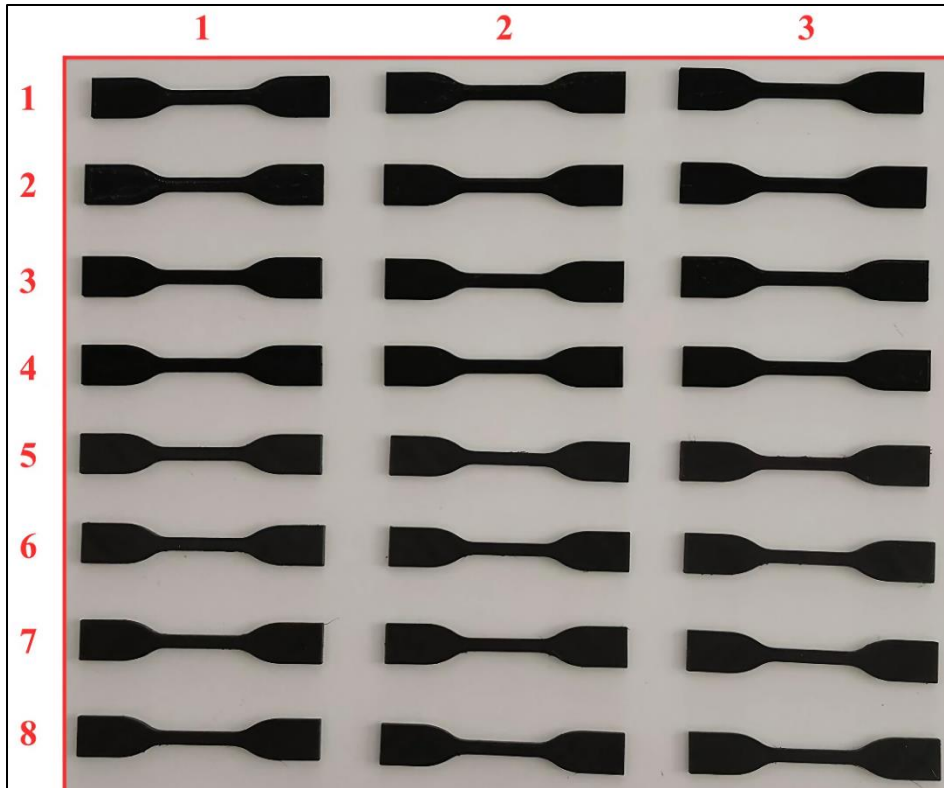
Tablo 3. Sabit üretim parametreleri.

NO	Parametre	Değer
1.	Katman yüksekliği (mm)	0,2
2.	Duvar kalınlığı (mm)	0,8
3.	Üst/Alt kalınlık (mm)	0,8
4.	Dolgu yoğunluğu (%)	100
5.	Nozul sıcaklığı (°C)	230
6.	Baskı Hızı (mm/s)	60
7.	Geri çekme mesafesi (mm)	0,8
8.	Geri çekme hızı (mm/s)	40
9.	Fan (%)	100
10.	Etek sayısı	3

Tam fonksiyonel deney tasarımı ile belirlenen deney seti parametreleri ve sabit parametreler UltiMaker Cura dilimleme programı aracılığı ile üretim için tanımlanmıştır.

2.4. Ölçüm ve Veri Toplama (Measurement and Data Collection)

Çalışmada makine ve insan kaynaklı hataların ortadan kaldırılması veya minimize edilebilmesi için tekrarlı ölçümler yapılmıştır. Her bir deney numunesinin X, Y ve Z uzunlukları 0,01 çözünürlük değerine sahip dijital kumpas kullanılarak ölçülmüştür. Her bir numune ve uzunluğun ölçümleri için dijital kumpas ölçüm öncesinde sıfırlanmıştır. Şekil 2’de FDM cihazı ile üretilen her bir deney numunesi yer almaktadır.



Şekil 2. FDM cihazı ile üretilen deney numuneleri.

Deney numunelerinin uzunluk ölçümleri altışar kez ve her numunenin aynı noktasından olacak şekilde yapılmıştır. Üçer adet üretilen her bir numunenin altı adet ölçümü sonucunda elde edilen uzunlukların ortalaması alınmıştır. Ortalama sonucunda elde edilen değer ölçülen uzunluk (r_1 , r_2 ve r_3) olarak kabul edilmiştir (Denklem 1).

$$\text{Ölçülen uzunluk} = \frac{\text{Ölçüm}_1 + \text{Ölçüm}_2 + \text{Ölçüm}_3 + \text{Ölçüm}_4 + \text{Ölçüm}_5 + \text{Ölçüm}_6}{6} \quad (1)$$

$$\text{Sapma (Dev)} = |\text{İdeal uzunluk} - \text{Ölçülen uzunluk}| \quad (2)$$

$$\text{Ortalama sapma (MDev)} = \frac{\text{Sapma}_{r_1} + \text{Sapma}_{r_2} + \text{Sapma}_{r_3}}{3} \quad (3)$$

İdeal ve ölçülen uzunluğun farkı alınarak sapma değeri bulunmuştur (Denklem 2). Üç adet deney numunesi üretilmesi sebebiyle üretilen her bir numune için sapma değeri (Devr_1 , Devr_2 ve Devr_3) hesaplanmıştır. Elde edilen sapma değerlerinin ortalaması alınarak ilgili deney parametrelerinin ortalama sapması belirlenmiştir (Denklem 3) (P. Sharma et al., 2022).

2.5. DOE Analizleri ve ANOVA (DOE Analyses and ANOVA)

Çalışmada üç farklı üretim parametresi (CF takviye oranı, baskı yönelimi ve tabla sıcaklığı), iki farklı seviyede boyutsal doğruluk açısından incelenmiştir. Deney setleri tam fonksiyonel deney tasarımına uygun olacak şekilde oluşturulmuştur. Tablo 4'te deney setleri yer almaktadır. Tam fonksiyonel deney tasarımına göre belirlenen sekiz deney seti üç kez üretilmiştir ve üretim sonucunda yirmi dört adet numune elde edilmiştir. Numunelerin ölçümleri ile elde edilen veriler Minitab 17 kullanılarak analiz edilmiştir.

DOE analizi ile "küçük daha iyidir" denklemi kullanılarak üretim parametrelerinin S/N oranları belirlenmiştir. Çalışmada DOE analizi sonrasında X, Y ve Z uzunlukları için %95 güven seviyesinde ANOVA gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda üretim parametrelerinin ilgili uzunluktaki boyutsal doğruluğa yüzdesel katkıları ve P-değerleri belirlenmiştir.

Tablo 4. Tam fonksiyonel deney tasarımına uygun deney setleri.

NO	CF Oranı (%)	Baskı Yönelimi (°)	Tabla Sıcaklığı (°C)
1.	0	0	50
2.	0	0	70
3.	0	90	50
4.	0	90	70
5.	15	0	50
6.	15	0	70
7.	15	90	50
8.	15	90	70

3. Bulgular (Findings)

3.1. Numune Ölçümleri ve Sapma Değerleri (Sample Measurements and Deviation Values)

Üçer adet üretilen her bir deney numunesinin X, Y ve Z uzunluklarında yapılan altı ölçümün ortalaması alınarak elde edilen ölçülen uzunluklar Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5. X, Y ve Z uzunluklarının ölçülen ve ideal uzunlukları (mm).

NO	Xr1	Xr2	Xr3	Yr1	Yr2	Yr3	Zr1	Zr2	Zr3	İdeal X	İdeal Y	İdeal Z
1.	115,18	115,24	115,27	19,19	19,20	19,20	3,38	3,36	3,38	115,00	19,00	3,20
2.	115,15	115,13	115,14	19,17	19,13	19,13	3,46	3,44	3,44	115,00	19,00	3,20
3.	115,27	115,23	115,13	19,26	19,19	19,20	3,33	3,29	3,44	115,00	19,00	3,20
4.	115,12	115,07	115,03	19,20	19,13	19,11	3,51	3,32	3,30	115,00	19,00	3,20
5.	115,36	115,21	115,36	19,11	19,02	19,10	3,00	3,03	3,13	115,00	19,00	3,20
6.	115,30	115,27	115,28	19,14	19,04	19,05	2,98	3,05	3,04	115,00	19,00	3,20
7.	115,24	115,26	115,27	19,13	19,09	19,09	3,14	3,04	3,05	115,00	19,00	3,20
8.	115,23	115,25	115,14	19,06	19,07	19,04	3,03	3,06	3,05	115,00	19,00	3,20

Her bir deney setinde üretilen üç numunenin ölçülen uzunlukları ideal uzunluktan çıkarılarak sapmaları belirlenmiştir. Üç numunenin de sapmalarının ortalaması alınarak ortalama sapma değeri elde edilmiştir. Her bir deney numunesinde elde edilen sapma ve ortalama sapma değerleri tablo 6'da yer almaktadır.

Tablo 6. X, Y ve Z uzunluklarında elde edilen sapma değerleri ve ortalama sapmalar (mm).

NO	Dev Xr1	Dev Xr2	Dev Xr3	Dev Yr1	Dev Yr2	Dev Yr3	Dev Zr1	Dev Zr2	Dev Zr3	MDev X	MDev Y	MDev Z
1.	0,18	0,24	0,27	0,19	0,20	0,20	0,18	0,16	0,18	0,23	0,20	0,17
2.	0,15	0,13	0,14	0,17	0,13	0,13	0,26	0,24	0,24	0,14	0,14	0,25
3.	0,27	0,22	0,13	0,26	0,19	0,20	0,13	0,09	0,24	0,21	0,22	0,15
4.	0,12	0,07	0,02	0,20	0,13	0,11	0,31	0,12	0,10	0,07	0,15	0,17
5.	0,36	0,21	0,36	0,11	0,02	0,10	0,20	0,17	0,07	0,31	0,07	0,15
6.	0,30	0,27	0,28	0,14	0,04	0,05	0,22	0,15	0,16	0,28	0,08	0,18
7.	0,24	0,26	0,27	0,13	0,09	0,09	0,06	0,16	0,15	0,26	0,11	0,12
8.	0,23	0,25	0,14	0,06	0,07	0,04	0,17	0,14	0,15	0,21	0,06	0,15

3.2. DOE Analizi (DOE Analysis)

Tam fonksiyonel deney tasarımı kullanılarak hazırlanan deney setlerinin üretimi sonrasında X, Y ve Z uzunluklarında gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen veriler Minitab 17 programı kullanılarak analiz edilmiştir. CF takviye oranının ve üretim parametrelerinin X, Y ve Z uzunluklarına olan etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

S/N oranları parametrelerin çıktılar üzerindeki etkilerinin anlamlandırılması noktasında değerlendirilmesi gereken kalite ölçütüdür (Gorana et al., 2023). Çalışmada en yüksek boyutsal doğruluğun bulunabilmesi için en düşük boyutsal sapmayı elde etmek amaçlanmıştır. Bu bağlamda S/N oranlarının hesaplanmasında denklem 4'te yer alan "küçük daha iyidir" denklemi kullanılmıştır.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (4)$$

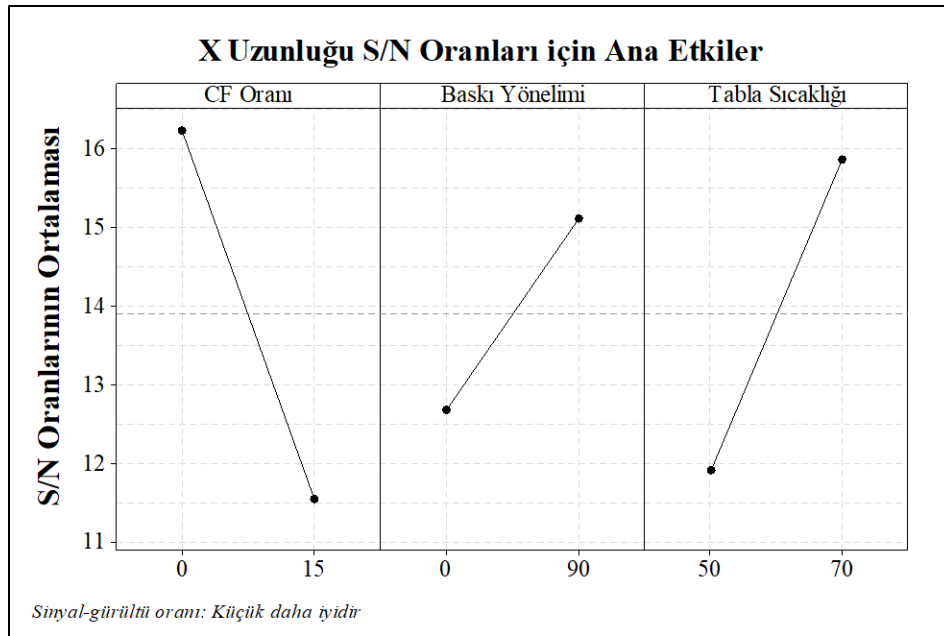
Denklemden "n" ifadesi deney sayısı ve "Y_i" ifadesi i'inci performans karakteristiği anlamına

gelmektedir (Tunçel et al., 2024). Üretim parametrelerinin S/N oranları Tablo 7’de yer almaktadır.

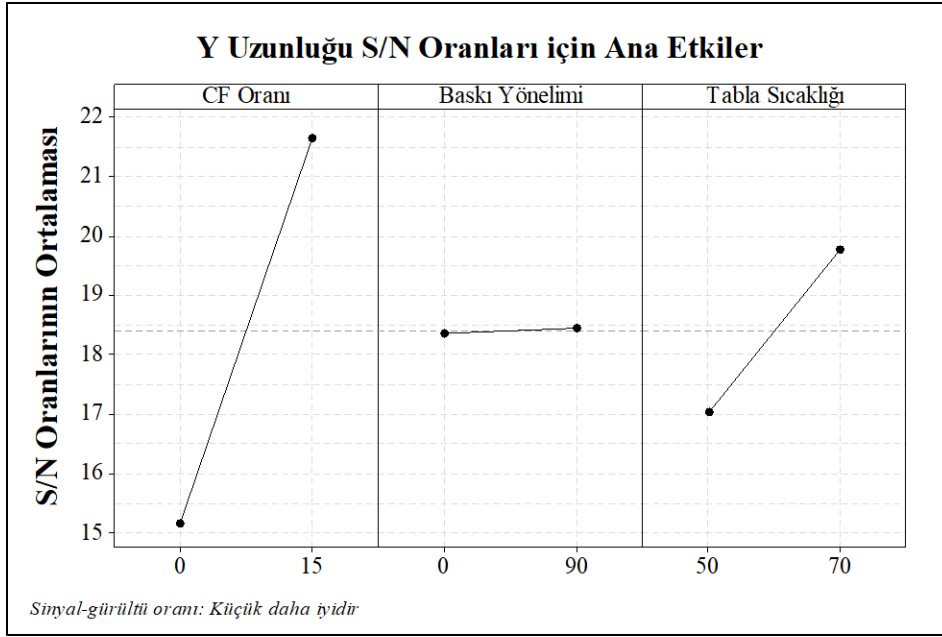
Tablo 7. Parametrelerin S/N oranları.

Seviye	X Uzunluğu			Y Uzunluğu			Z Uzunluğu		
	CF Oranı	Baskı Yönelimi	Tabla Sıcaklığı	CF Oranı	Baskı Yönelimi	Tabla Sıcaklığı	CF Oranı	Baskı Yönelimi	Tabla Sıcaklığı
1	16,24	12,68	11,93	15,15	18,36	17,02	14,29	14,62	16,13
2	11,56	15,12	15,87	21,65	18,44	19,78	16,22	15,90	14,38
Delta	4,67	2,43	3,94	6,49	0,08	2,75	1,94	1,28	1,76
Rank	1	3	2	1	3	2	1	3	2

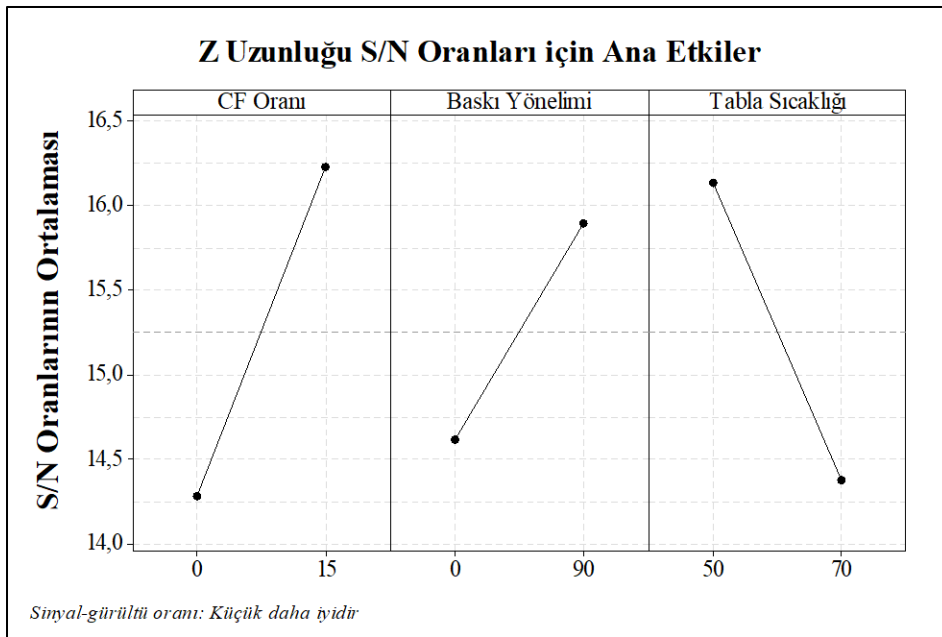
Yüksek S/N oranı boyutsal doğruluğun daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir (Gorana et al., 2023). Bu bağlamda Tablo 7’de yer alan S/N değerleri incelendiğinde; X uzunluğu için en yüksek S/N oranı %0 CF oranında (16,24), 90° baskı yöneliminde (15,12) ve 70 °C tabla sıcaklığında (15,87) elde edilmiştir. Y uzunluğu için %15 CF oranında (21,65), 90° baskı yöneliminde (18,44) ve 70 °C tabla sıcaklığında (19,78) en yüksek S/N oranı değerlerine ulaşılmıştır. Z uzunluğunda ise en yüksek S/N oranı %15 CF oranında (16,22), 90° baskı yöneliminde (15,90) ve 50 °C tabla sıcaklığında (16,13) gözlemlenmiştir. Bu parametrelerde X, Y ve Z uzunlukları için en iyi boyutsal doğruluklar elde edilmiştir.



Şekil 3. X uzunluğu S/N oranları için ana etkiler grafiği.



Şekil 4. Y uzunluğu S/N oranları için ana etkiler grafiği.



Şekil 5. Z uzunluğu S/N oranları için ana etkiler grafiği.

S/N grafiklerinde büyük değerlerin elde edildiği noktalar daha yüksek boyutsal doğruluğun elde edildiği parametre seviyelerini göstermektedir (Aydın, 2023). Bu bağlamda Şekil 3, 4 ve 5'te X, Y ve Z uzunluklarına ait S/N oranları için ana etkiler grafikleri incelendiğinde grafiklerdeki artışlar boyutsal doğruluğun arttığını ifade etmektedir.

CF takviyesinin ısı iletkenliğini artırdığı ve termal genleşme katsayısını (CTE) düşürdüğü dolayısıyla parçadaki deformasyonu azalttığı literatürde yer almaktadır (Love et al., 2014). Bu bağlamda Y ve Z uzunluklarında %15 CF oranında boyutsal doğruluğun artmasının sebebi CF takviyesi ile ısı iletkenliğinin artırması ve CTE'nin düşmesi olduğu düşünülmektedir.

Literatürde baskı yöneliminin boyutsal doğruluk üzerindeki etkisinin net bir örüntü ile

açıklanmasının zor olduğu ifade edilmekle birlikte, baskı yöneliminin boyutsal doğruluğu etkilediği belirtilmektedir (Alafaghani et al., 2017). Çalışmada numunelerin üretimi için kullanılan FDM cihazının çalışma prensibi gereği X yönlü hareket baskı kafasının hareketi ile ve Y yönlü hareket tablanın hareketi ile gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda 0° baskı yöneliminde baskı kafası ve 90° baskı yöneliminde tabla daha aktif hareket gerçekleştirmektedir.

3.3. ANOVA (ANOVA)

ANOVA parametrelerin çıktılar üzerindeki yüzdesel katkılarının belirlenmesine olanak tanımaktadır (Gorana et al., 2023). Çalışmada her bir uzunluk için ANOVA gerçekleştirilmiş olup elde edilen ANOVA çıktıları Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. Varyans Analizleri.

	Source	DF	Seq SS	Contribution (%)	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
X Uzunluğu	CF Oranı	1	43,68	41,68	43,68	43,677	9,60	0,036
	Baskı Yönelimi	1	11,84	11,30	11,84	11,837	2,60	0,182
	Tabla Sıcaklığı	1	31,08	29,66	31,08	31,084	6,83	0,059
	Error	4	18,19	17,36	18,19	4,548	-	-
	Total	7	104,79	100,00	-	-	-	-
Y Uzunluğu	CF Oranı	1	84,298	77,56	84,2975	84,2975	36,49	0,004
	Baskı Yönelimi	1	0,013	0,01	0,0129	0,0129	0,01	0,944
	Tabla Sıcaklığı	1	15,136	13,93	15,1364	15,1364	6,55	0,063
	Error	4	9,240	8,50	9,2403	2,3101	-	-
	Total	7	108,687	100,00	-	-	-	-
Z Uzunluğu	CF Oranı	1	7,504	41,31	7,504	7,5043	24,85	0,008
	Baskı Yönelimi	1	3,281	18,06	3,281	3,2806	10,86	0,030
	Tabla Sıcaklığı	1	6,172	33,98	6,172	6,1724	20,44	0,011
	Error	4	1,208	6,65	1,208	0,3020	-	-
	Total	7	18,165	100,00	-	-	-	-

Tablo 8 incelendiğinde; X uzunluğu için %41,68 katkı oranı ile CF oranı boyutsal doğruluğu en çok etkileyen üretim parametresi olmuştur. CF oranını sırası ile %29,66 ve %11,30 katkı oranları ile tabla sıcaklığı ve baskı yönelimi parametreleri takip etmiştir. X uzunluğuna benzer şekilde Y uzunluğu içinde üretim parametrelerinin boyutsal doğruluğa etkisi sırasıyla %77,56, %13,93 ve %0,01 katkı oranları ile CF oranı, tabla sıcaklığı ve baskı yönelimi şeklinde olmuştur. Z uzunluğunda %41,31 katkı oranı elde edilen CF oranı, %33,98 ve %18,06 katkı oranları elde edilen tabla sıcaklığı ve baskı yönelimi parametrelerinden daha yüksek etki göstermiştir.

En yüksek hata oranı %17,36 ile X uzunluğu analizinde elde edilmiştir. Y uzunluğu analizinde %8,50 ve Z uzunluğu analizinde %6,65 hata oranı elde edilmiştir.

P-değerleri 0,05’ten küçük olan parametreler istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmektedir (Hikmat et al., 2021). Bu bağlamda X uzunluğunda 0,036, Y uzunluğunda 0,004 ve Z uzunluğunda 0,008 P-değeri elde edilen CF oranı parametresi uzunlukların tamamında 0,05 değerinin altında değere sahip olmuştur. Ayrıca Z uzunluğu için 0,011 ve 0,030 P-değerleri elde edilen tabla sıcaklığı ve baskı yönelimi parametreleri de ilgili uzunlukta 0,05 P-değerinin altında değerlere sahip olmuşlardır.

4. Sonuç ve Tartışma (Conclusion and Discussion)

Takviyeli filamentlerin ve optimum üretim parametrelerinin kullanılması FDM yöntemi ile üretilen

parçaların boyutsal doğruluğunun iyileştirilebilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmada tam fonksiyonel deney tasarımı kullanılarak iki seviyede CF takviyesinde (%0 ve %15), baskı yöneliminde (0° ve 90°) ve tabla sıcaklığında (50 °C ve 70 °C) üretilen numunelerin boyutsal sapmaları hesaplanmıştır ve ilgili parametrelerin boyutsal doğruluğa etkileri incelenmiştir. Deney numunesi olarak ASTM 638D Tip 4 çekme numunesi kullanılmıştır ve numunenin X (115 mm), Y (19 mm) ve Z (3,2 mm) uzunlukları ideal uzunluk olarak kabul edilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak DOE analizi ve ANOVA gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda S/N oranları ile X, Y ve Z uzunluklarında en iyi boyutsal doğruluğun elde edildiği parametreler belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen ilgili çıktılar;

- X uzunluğunda; CF takviyesiz PLA filament, 90° baskı yönelimi ve 70 °C tabla sıcaklığı parametreleri ile en iyi boyutsal doğruluk elde edilmiştir.
- Y uzunluğunda; CF takviyeli PLA filament, 90° baskı yönelimi ve 70 °C tabla sıcaklığı parametreleri ile en iyi boyutsal doğruluk elde edilmiştir.
- Z uzunluğunda; CF takviyeli PLA filament, 90° baskı yönelimi ve 50 °C tabla sıcaklığı parametreleri ile en iyi boyutsal doğruluk elde edilmiştir.
- CF takviyeli PLA filament kullanımı Y ve Z uzunluklarında boyutsal doğruluğu artırırken, X uzunluğunda CF takviyesiz PLA filament kullanımı boyutsal doğruluğu artırmıştır.
- 90° baskı yönelimi tüm uzunluklar için boyutsal doğruluğu artırmıştır.
- 70 °C tabla sıcaklığı kullanımı X ve Y uzunluklarında boyutsal doğruluğu artırırken, Z uzunluğunda 50 °C tabla sıcaklığı boyutsal doğruluğu artırmıştır.

Çalışmada ayrıca ANOVA gerçekleştirilmiş olup, üretim parametrelerinin yüzdesel katkılarına ve P-değerlerine ilişkin elde edilen çıktılar;

- X, Y ve Z uzunluklarında parametrelerin katkı oranları sıralamaları CF oranı, tabla sıcaklığı ve baskı yönelimi şeklinde olmuştur.
- CF oranı uzunlukların tamamı için anlamlı bir etkiye sahip olmuştur. Ayriyeten Z uzunluğu için CF oranının yanı sıra tabla sıcaklığı ve baskı yönelimi parametreleri de anlamlı etki değerlerine sahip olmuşlardır.

Elde edilen veriler doğrultusunda üretim parametrelerinin değişimi boyutsal doğruluğu etkilemektedir. Optimum üretim parametrelerinin kullanımı ile daha yüksek boyutsal doğruluk elde edilebilir. Üretim parametrelerinin yanı sıra FDM yönteminde kullanılan filamentlere CF gibi takviye elemanlarının eklenmesi ile boyutsal doğruluğun artırılması mümkündür. FDM yöntemi ile üretilen parçalarda uygun malzeme ve optimum üretim parametrelerinin seçilmesi daha yüksek boyutsal doğrulukların elde edilebilmesine olanak tanır.



Hakem: Dış, Bağımsız.

Beyanname:

1. Özgünlük Beyanı:

Bu çalışma özgündür.

2. Yazar Katkıları:

Kaan YEŞİLKAYA: *Literatür Taraması; Veri Toplama; Veri İşleme; Yazma – orijinal taslak; Yazma – inceleme ve düzenleme.*

Hakan YEŞİLKAYA: *Fikir; Kavramsallaştırma; Veri İşleme; Analiz; Yazma – orijinal taslak; Yazma – inceleme ve düzenleme.*

3. Etik Kurul İzni:

Etik Kurul İzni gerekmemektedir.

4. Finansman/Destek:

Bu çalışma, herhangi bir finansman ya da destek almamıştır.

5. Çıkar Çatışması Beyanı:

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

6. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Beyanı:



KAYNAKÇA

Aktepe, E., & Aktepe, Ş. (2024). PLA ve geri dönüştürülmüş PET filamentlerinin 3D FDM baskıda boyutsal doğruluk ve gerçekilme performansının karşılaştırılması. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 8(1), 114–123.

Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017). Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: A design-for-manufacturing approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791–803.

Aydın, E. (2023). Taguchi optimizasyon metodunun imalat mühendisliği alanında kullanımı: Minitab örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28(3), 1049–1068.

Başcı, Ü. G., & Yamanoğlu, R. (2021). Yeni nesil üretim teknolojisi: FDM ile eklemeli imalat. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(2), 339–352.

Bindhu, B., Renisha, R., Roberts, L., & Varghese, T. O. (2018). Boron nitride reinforced polylactic acid composites film for packaging: Preparation and properties. *Polymer Testing*, 66, 172–177.

Birosz, M. T., Safranyik, F., & Andó, M. (2023). Concurrent shape and build orientation optimization for FDM additive manufacturing using the principal stress lines (PSL). *Heliyon*, 9(4), e15022.

Camposeco-Negrete, C. (2020). Optimization of FDM parameters for improving part quality, productivity and sustainability of the process using Taguchi methodology and desirability approach. *Progress in Additive Manufacturing*, 5(1), 59–65.

Deswal, S., Narang, R., & Chhabra, D. (2019). Modeling and parametric optimization of FDM 3D printing process using hybrid techniques for enhancing dimensional preciseness. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13(3), 1197–1214.

Filameon PLA. (n.d.). Retrieved November 13, 2025, from <https://www.filameon.com/urun/filameon-pla-filament>

Filameon PLA-CF 15. (n.d.). Retrieved November 13, 2025, from <https://www.filameon.com/urun/pla-cf-filament>

Gorana, F., Kumar Sahu, K., & Kumar Modi, Y. (2023). Parameter optimization for dimensional accuracy of fused deposition modelling parts. *Materials Today: Proceedings*, 78, 640–646.

- Hikmat, M., Rostam, S., & Ahmed, Y. M. (2021). Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology. *Results in Engineering*, 11, 100264.
- Jaisingh Sheoran, A., & Kumar, H. (2020). Fused deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1659–1672.
- Karagöz, İ., Danış Bekdemir, A., & Tuna, Ö. (2021). 3B yazıcı teknolojilerindeki kullanılan yöntemler ve gelişmeler üzerine bir derleme. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(4), 1186–1213.
- Love, L. J., Kunc, V., Rios, O., Duty, C. E., Elliott, A. M., Post, B. K., Smith, R. J., & Blue, C. A. (2014). The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing. *Journal of Materials Research*, 29(17), 1893–1898.
- Noriega, A., Blanco, D., Alvarez, B. J., & Garcia, A. (2013). Dimensional accuracy improvement of FDM square cross-section parts using artificial neural networks and an optimization algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9–12), 2301–2313.
- Şeker, S., & Erdinler, E. S. (2025). 3B baskı sürecinde tarama açısı ve doluluk oranının boyutsal uygunluğa etkisi: ABS malzeme üzerine bir çalışma. *Journal of Bartın Faculty of Forestry*, 27(2), 303–311.
- Sharma, K., Kumar, K., Singh, K. R., & Rawat, M. S. (2021). Optimization of FDM 3D printing process parameters using Taguchi technique. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1168(1), 012022.
- Sharma, P., Vaid, H., Vajpeyi, R., Shubham, P., Agarwal, K. M., & Bhatia, D. (2022). Predicting the dimensional variation of geometries produced through FDM 3D printing employing supervised machine learning. *Sensors International*, 3, 100194.
- Solomon, I. J., Sevvil, P., & Gunasekaran, J. (2021). A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 509–514.
- Sudin, M. N., Shamsudin, S. A., & Abdullah, M. A. (2016). Effect of part features on dimensional accuracy of FDM model. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11, 8067–8072.
- Tezel, T. (2019). FDM ile üretilen PET-G malzemenin üretim sıcaklığı ve hızının boyutsal doğruluğa etkisi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 3(2), 82–85.
- Toprak, İ. B. (2024). Polilaktik asit malzeme ile eriyik yığılma modellemede boyutsal doğruluk ve üretim süresi için parametre optimizasyonu. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 5(2), 39–48.
- Tunçel, O., Tüfekci, K., & Kahya, Ç. (2024). Multi-objective optimization of 3D printing process parameters using gray-based Taguchi for composite PLA parts. *Polymer Composites*, 45(14), 12870–12884.
- Wang, C., Tan, X. P., Tor, S. B., & Lim, C. S. (2020). Machine learning in additive manufacturing: State-of-the-art and perspectives. *Additive Manufacturing*, 36, 101538.



Research Article
10.65520/jasam.1842469

Imprint:

Issue : 1
Year: 2026
Page: 72-74



Kaan YEŞİLKAYA 1^{a*}
Hakan YEŞİLKAYA 2^b

^a Master's Student, Erciyes University,
yesilkaya.kn@gmail.com

^b Lec., Türk Hava Kurumu University,
hyesilkaya@thk.edu.tr

* Corresponding Author

Received: 1.27.2026
Accepted: 4.06.2026
Published: 5.18.2026

Citation:

Kaan YEŞİLKAYA 1, Hakan
YEŞİLKAYA 2 (2026). **The Effect of
Carbon Fiber Reinforcement and
Production Parameters on
Dimensional Accuracy in the FDM
Method.** JASAM, 1, 72-74.
<https://doi.org/10.65520/jasam.1842469>

The Effect of Carbon Fiber Reinforcement and Production Parameters on Dimensional Accuracy in the FDM Method

Extended Abstract

Additive manufacturing (AM) methods, which utilize metals, polymers, ceramics, and composites as raw materials, are a manufacturing technology in which the final product is created by layering materials one on top of another. AM, which enables the production of complex structures, has found applications in various industries. The ability to rapidly develop products, the absence of mold requirements, the minimization of waste material generation, the customization of products, and the production of structures with complex geometries and internal voids are among the method's advantages. Due to its accessibility and low cost, fused deposition modeling (FDM) is one of the most popular AM methods. In this method, thermoplastics are deposited in layers onto a build platform using a heated nozzle; however, by the nature of the process, sufficient dimensional accuracy cannot be achieved. Various modifications and improvements can enhance the dimensional accuracy of parts produced using the FDM method. Production parameters influence dimensional accuracy, and selecting optimal production parameters for the material can improve dimensional accuracy. In addition to insufficient dimensional accuracy, a limited material library is another constraint of the FDM method. Improving the properties of filaments used in the FDM method with reinforcing elements such as carbon fiber (CF) enables the expansion of the method's material library.

Various analyses are required to determine the effects of production parameters and reinforcing materials on filaments and to identify optimal production parameters. Design of Experiments (DOE) analysis and Analysis of Variance (ANOVA) enable the evaluation of production parameters and the contribution of reinforcing elements. While there are numerous studies in the literature focusing on improving dimensional accuracy through the optimization of production parameters, the number of studies on the dimensional accuracy of reinforced polymers is limited.

In this study, ASTM D638 Type 4 tensile specimens were produced using the FDM method with polylactic acid (PLA) filament at two different levels of CF reinforcement (0% and 15%), print orientation (0° and 90°), and build plate temperature (50 °C and 70 °C). The length (X-115 mm), width (Y-19 mm), and height (Z-3.2 mm) of the specimens were examined in terms of dimensional accuracy. The

Screened by



Except where otherwise noted, content
in this article is licensed under a
Creative Commons 4.0 International
license. Icons by Font Awesome.

experimental sets were determined using a fully factorial experimental design. Eight experimental sets were produced three times each, and a total of 24 specimens were measured six times for dimensional accuracy. Dimensional deviations observed in the X, Y, and Z lengths were determined through length measurements. The obtained data were analyzed using Minitab 17. The X, Y, and Z lengths were evaluated separately.

As a result of the DOE analysis, the S/N ratios of the parameters were examined. In the analyses, the “lower is better” criterion was used for S/N ratios. For the X dimension, the highest S/N ratio was obtained at a 0% CF ratio (16.24), a 90° printing orientation (15.12), and a 70 °C table temperature (15.87). For the Y-direction, the highest S/N ratio values were achieved at a 15% CF ratio (21.65), a 90° print orientation (18.44), and a 70 °C bed temperature (19.78). For the Z-direction, the highest S/N ratio was observed at a 15% CF content (16.22), a 90° print orientation (15.90), and a plate temperature of 50 °C (16.13). The percentage contribution rates of the parameters in the respective directions were determined via ANOVA. In the X direction, the highest contribution of 41.68% was obtained at the CF ratio. Table temperature and print orientation followed with contribution rates of 29.66% and 11.30%, respectively. For the Y-direction, the contribution rates of the parameters were 77.56%, 13.93%, and 0.01% for the CF ratio, table temperature, and print orientation, respectively. For the Z-direction, the CF ratio also had the highest contribution rate at 41.31%, while the table temperature and print orientation had contribution rates of 33.98% and 18.06%, respectively. The significance levels of the parameters were also examined in the ANOVA results. For the CF ratio parameter, significant levels were obtained with P-values of 0.036, 0.004, and 0.008 for the X, Y, and Z lengths, respectively. In addition to the CF ratio, the bed temperature and print orientation parameters, which yielded P-values of 0.011 and 0.030 for the Z-axis, were also found to be statistically significant for that axis.

The study concluded that production parameters affect dimensional accuracy, and that using optimal production parameters and adding reinforcing elements to the filaments can improve dimensional accuracy. It is possible to achieve higher dimensional accuracy in parts produced using the FDM method by selecting appropriate materials and optimal production parameters.

Keywords: FDM, Dimensional accuracy, Carbon fiber PLA, Production parameters.



Peer-review: External, Independent.

Declarations:

1. Statement of Originality:

This work is original.

2. Author Contributions:

Kaan YEŞİLKAYA: Literature Search; Data Collection; Data Processing; Writing – original draft; Writing – review & editing.

Hakan YEŞİLKAYA: Concept; Conceptualization; Data Processing; Analysis; Writing – original draft; Writing – review & editing.

3. Ethics approval:

Not applicable.

4. Funding/Support:

This work has not received any funding or support.

5. Competing Interests:

The authors declares no competing interests.

6. Sustainable Development Goals:

