

## Endüstriyel bir 3 boyutlu yazıcı ile imal edilen ABS malzemeli parçaların boyut hatalarının incelenmesi

*Investigation of dimensional form errors of parts manufactured with an industrial 3-dimensional printer using ABS material*

**Kadir KIRAN<sup>\*1,2,a</sup>, Bahri ŞEKERCİ<sup>2,b</sup>, Kemal Burak URGANCI<sup>2,c</sup>, Yunus Emre DELİKANLI<sup>3,d</sup>, Baki GEZGEN<sup>4,e</sup>**

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Gövde-Motor Bakım Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM), Tasarım ve İmalat Birimi, Isparta, Türkiye

<sup>3</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Senirkent Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>4</sup>Z Eksen Baskı Sistemleri ve Bilgi Teknolojileri San. ve Tic. A.Ş., İstanbul, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 08.01.2022

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 08.08.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 19.08.2022

### Öz

Eklemeli imalatta parça boyut hataları temel problemler arasında yerini almaktadır. Cihaz pozisyon hatalarına, parça çekmesine ya da büzülmesine ve STL dosya hatalarına bağlı olarak ortaya çıkan parça boyut hataları üretkenliği olumsuz etkilemektedir. Genel olarak, her bir cihaz-malzeme-imalat parametresi-geometri kombinasyonuna göre parçalarda farklı boyut hataları meydana gelebilmektedir. Dolayısıyla bu hataların hesaplanması ve analiz edilmesi son kullanıcılar ve cihaz imalatçıları açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda adı geçen çalışmada endüstriyel bir üç boyutlu yazıcı olan Zaxe Z1 cihazı ile ABS malzemeli parça imalatında parça boyut hataları araştırılmıştır. İlk olarak, farklı boyutlarda daire, kare ve eşkenar üçgen geometrilerini üzerinde barındıran bir test parçası tasarlanmıştır. Ardından, test parçalarının imalat tablasındaki konumuna göre ortaya çıkan hataları incelemek amacıyla imalat tablasının farklı bölgelerine toplam 5 adet test parçası konumlandırılarak imalatı gerçekleştirilmiştir. Üçüncü adımda, bu test parçaları üzerinde yer alan tüm test geometrileri koordinat ölçme makinesi ile taranarak iki boyutlu profilleri elde edilmiştir. Dördüncü adımda ise, geliştirilen en küçük kareler tabanlı geometri uydurma algoritması ile taranan profillere geometri uydurma yapılmıştır. Son olarak da, uydurulan ve tasarlanan geometriler arasındaki profil toleransı değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar analiz edildiğinde, profil tolerans değerlerinin imalat tablasındaki konuma ve geometriye bağlı olarak değişkenlik sergilediği görülmüştür ve imal edilen tüm geometriler tasarlanan boyutlarından daha küçüktür. Başka bir ifadeyle tüm geometriler çekmeye maruz kalmıştır. Genel olarak bakıldığında, geometri boyutu arttıkça profil tolerans değerlerinde artış söz konusudur. Tüm geometriler için ortalama profil tolerans değeri 0.1987 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer yarısı, yani  $\approx +0.1$  mm, kadar tarama yollarının kaydırılması ile daha hassas geometriler elde edilebilir.

**Anahtar kelimeler:** Boyut hatası, Eklemeli imalat, Geometri uydurma, Parça çekmesi, Profil toleransı

### Abstract

Part dimensional form errors are among the main problems in additive manufacturing. Part dimensional form errors due to device position errors, part shrinkage, and STL file errors negatively affect productivity. In general, different dimensional form errors may occur in parts according to each device-material-manufacturing parameter-geometry combination. Therefore, the calculation and analysis of these errors is of great importance for end users and device manufacturers. With this scope, in this study, part dimensional form errors were investigated in the manufacturing of parts using ABS material with the Zaxe Z1 device which is an industrial three-dimensional printer. First, a test part accommodating different sizes of circle, square and equilateral triangle geometries was designed. Then, in order to examine the errors that occur according to the position of the test parts on the building platform, a total of 5 test parts were positioned in different regions of the building platform and manufactured. In the third step, all the test geometries on these test parts were scanned with a coordinate measuring machine and their two-dimensional profiles were obtained. In the fourth step, geometry fitting was performed to the scanned profiles with the least squares-based geometry fitting algorithm. Finally, the profile tolerance values between the fitted and designed geometries were calculated. When the results are analyzed, it has been seen that the profile tolerance values vary depending on the location in the building platform and geometry, and all the manufactured geometries are smaller than their designed dimensions. In other words,

<sup>a</sup> Kadir KIRAN; kadirkiran@sdu.edu.tr, Tel: (0246) 211 19 16, orcid.org/0000-0002-6109-435X

<sup>b</sup> orcid.org/0000-0002-7304-0594

<sup>c</sup> orcid.org/0000-0001-5787-5770

<sup>d</sup> orcid.org/0000-0002-5647-1755

<sup>e</sup> orcid.org/0000-0002-5689-9241

all the geometries were subjected to shrinkage. Generally speaking, there is an increase in the profile tolerance values as the geometry size increases. The average profile tolerance value for all the geometries was calculated as 0.1987 mm. By offsetting the scanning paths by half of this value, i.e.,  $\approx +0.1$  mm, more precise geometries can be obtained.

**Keywords:** Dimensional form errors, Additive manufacturing, Geometry fitting, Part shrinkage, Profile tolerance

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Günümüzde, sanayide kullanılan metal parçaların yerine plastik parçaların kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır. Gelişen yeni imalat teknikleri ve mekanik özellikleri iyileştirilen yeni nesil plastiklerin kullanımı ile geleneksel metal parçanın yerini giderek plastik parçalar almaktadır (Ashtankar vd., 2016). Akrilonitril bütadien stiren (ABS) yüksek rijitliği, iyi darbe ve aşınma direnci, iyi yalıtım vb. gibi özellikleri sayesinde günümüzde sanayide sıklıkla kullanılan plastik ham maddelerden biridir (Yadav vd., 2019). En yaygın şekilde, uzay ve havacılıkta hem yüksek darbe dayanımı gerektirmeyen stratejik ara bağlantı elemanları olarak Ergiyik Biriktirmeli Eklemeli İmalat (EBEİ) yöntemi ile imal edilip kullanılmaktadır. Bununla birlikte biyomedikal alanında %10-20 doluluk oranlarında ABS malzeme kullanılarak EBEİ yöntemi ile hem kişiye özgü hem de yeterli mukavemette ve hafiflikte protez, ortez vb. gereçler imal edilerek insan-uzuv etkileşimi sağlanabilmektedir. EBEİ yönteminde kullanılan ABS, yukarıda bahsedilen alanlar haricinde endüstride de oldukça sık kullanılmaktadır. Televizyon ve güç donanımı kabinleri, elektrolitik kaplamaya uygun farlar, aynalar, dekoratif eşyalar, tıbbi emme pompaları ve oyuncaklar, darbe dayanımlı tiplerinden güç kutuları, telefon gövdeleri gibi birçok alana hitap etmektedir. Öte yandan, büro-iş makinaları gövde ve parçaları, boru ve bağlantıları, depo ve soğutucu iç astarları, çanta ve bavul (sert görünümde), askeri amaçlı tüfek dipçikleri ve daha birçok parça üretimi yapılmaktadır. Üç boyutlu yazıcı ile özelleştirilmiş ve karmaşık geometriye sahip ABS parçaların herhangi bir kalıp veya takıma ihtiyaç duymadan hızlı bir şekilde imal edilebilmesi, bu parçaların boyutsal doğruluğu, mukavemetleri ve yüzey kalitesi gibi soruları beraberinde getirmektedir (Pascu vd., 2018). Nihai kullanım parçalarının, endüstriyel üretimi için boyutsal doğruluk ve meydana gelen sapmalar bilinmelidir (Knoop & Schoeppner 2017). Parçaların montaj halinde çalışması söz konusu olduğunda, özellikle boyutsal doğruluk oldukça önemli bir faktör haline gelmektedir. İmal edilen parçaların tutarlı bir şekilde çalışabilmesi için tolerans değerlerine ihtiyaç vardır. EBEİ yönteminde nihai parça boyutunu temel olarak cihaz pozisyon hataları,

parça çekmesi ya da büzülmesi ve STL dosya hataları ya da kalitesi etkilemektedir (Bahnini vd., 2020). Bu boyut hataları kullanılan cihaz, malzeme, imalat parametreleri ve geometriye göre farklılık gösterebilmektedir. Literatürde bahsi geçen problemlerin altı çizilerek birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Pennington vd. (2005), Stratasys FDM2000 cihazını kullanarak ABS parçada ortam sıcaklığı, parça boyutu ve tabla üzerindeki konum faktörlerinin boyutsal doğruluk üzerindeki etkilerini incelemiştir. Boyutsal doğruluğun değerlendirilmesi için koordinat ölçme makinesi (KÖM) ve kumpas kullanılmıştır. KÖM ölçüm alması istenilen 135 farklı nokta programlanmış ve bu noktalardan alınan ölçüler ile nominal parçadaki aynı konumların ölçüleri karşılaştırılmıştır. Tabla üzerindeki konumun belirlenen 11 ölçüden 10'u üzerinde anlamlı bir etki ye sahip olduğu belirtilmiştir. Bir başka çalışmada, Melenka vd. (2015) Makerbot Replicator 2 cihazı ile imal edilen standart bir çekme numunesini incelemiş ve numune üzerindeki genişlik, uzunluk, kalınlık değerleri dijital bir kumpasla ölçülerek nominal ölçüler ile karşılaştırılmıştır. Ölçümlerde en yüksek sapmanın %6.05 ile numunenin dar kısmının genişliğinde meydana geldiği ve en düşük sapmanın %0.51 ile numune boyunda olduğu görülmüştür. Sudin vd. (2016) ise Stratasys FDM 400MC yazıcısı için bir çalışma ortaya konmuştur. Yazarlar ABS malzemeden imal edilmiş test numunesinin boyutsal doğruluğu incelenmiştir. Bir plaka üzerinde daire ve dikdörtgen şeklinde kesitler, yarım küre, daire ve dikdörtgen şeklinde yükseltmelerden oluşan test numunesinin unsurları KÖM kullanılarak üç ayrı noktadan üçer defa ölçülmüştür. Bu ölçümlerin ortalaması alınarak nominal değerlerle arasındaki farklılıklar tayin edilmiştir. Sonuçta, EBEİ cihazının küre silindir ve delik gibi yuvarlak unsurlarda  $\pm 0.127$  mm tolerans aralığının dışında ölçüler imal ettiği görülmüştür. Düz kenarlı kare gibi parçalarda daha yüksek hassasiyet elde edilerek  $\pm 0.127$ mm tolerans aralığının içinde değerler elde edilmiştir. Birden fazla EBEİ cihazının birbirleri ile kıyaslandığı bir çalışmada (Roberson vd., 2013) ise Stratasys uPrint Plus, Bits from Bytes 3D Touch ve Makerbot Replicator, 3D Systems V-Flash ve Solido SD300 Pro üç boyutlu yazıcıları ile imal edilen standart parçaların boyutsal doğrulukları, yüzey kaliteleri, tek ve çoklu inşa zamanları, harcanan malzeme

miktarları ve birim maliyetleri karşılaştırılmıştır. Test parçası tasarımında dikdörtgen, kare, daire gibi basit geometrilerin kullanıldığı çalışmada, imal edilmiş parçaların ölçüleri KÖM ile alınmış ve bu ölçümler ile standart parçanın teknik resmindeki ölçüler arasındaki fark hesaplanarak kıyaslanmıştır. Belirlenen unsurların ölçümleri ile teknik resim ölçüleri arasındaki farkların mutlak değeri toplanarak toplam fark elde edilmiştir. Sonuç olarak, toplam 4 mm ölçü farkı ile Stratasys uPrint cihazın en az hatalı imalatı gerçekleştirdiği, diğer cihazların ise sırasıyla SD300 için toplam 6 mm, 3D Touch için 12 mm, Replicator için 18 mm ve V-Flash için 25 mm hatalı imalat yaptığı görülmüştür. Farklı cihazların incelendiği diğer bir çalışma da [Hafsa vd. \(2014\)](#) tarafından gerçekleştirilmiştir. FDM 400 ve Makerbot Replicator 2 makineleri ile merdiven şeklinde test parçaları imal edilmiştir. İmalatta PLA ve ABS malzemeleri kullanılmıştır. Elde edilen test parçaları üzerinde 27 hat belirlenerek bu hat çizgilerinin ölçümleri KÖM ile gerçekleştirilmiştir. Test parçalarının ölçümleri ile nominal ölçüler karşılaştırılarak sapmalar tespit edilmiştir. Nominal boyuttan daha küçük değerde olan ölçüler için negatif değer kullanılmıştır. PLA malzemenin ABS malzemeye göre daha yüksek boyutsal doğruluk elde ettiği görülmüştür. En yüksek boyutsal sapmanın ABS malzeme -0.33667 mm olarak elde edildiği, en düşük değer ise -0.12667mm olarak PLA malzeme için elde edildiği ortaya konmuştur. [Kacmarcik vd. \(2018\)](#) çalışmasında Ultimaker 2+ ve ZEN3D 3B yazıcılarında PLA malzemenin imal edilen parçaların boyutsal doğruluklarını karşılaştırmıştır. Daire ve kare şeklinde delik ve yükseltilerin bulunduğu test parçasının ölçümü için KÖM kullanılmıştır. Ölçümlerde düzlemsel yüzeyler için tüm yüzeyi kapsayan çoklu çizgiler tanımlanmıştır. Dairesel delik ve çıkıntılar için yüzeye eşit dağıtılmış iki veya üç daire profil tanımlanmıştır. Ölçüm verisi için en küçük kareler yöntemine dayalı eğri uydurma algoritması kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda için pozisyon, çap ve boyut için en yüksek ve en düşük sapmalar ZEN3D yazıcı için sırasıyla 0.132mm ve -0.528mm, Ultimaker2+ için ise 0.178mm ve -0.358mm olarak bulunmuştur. Ayrıca çalışmada elde edilen sapmaların nominal ölçüler ile orantılı olmadığı ve aralarında anlamlı bir korelasyon kurulamadığı belirtilmiştir. Bu nedenle küçük nominal ölçülerde meydana gelen yüzdesel sapmalar daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Bu değerler ZEN3D için maksimum %2,63 ve minimum %-3,624, Ultimaker 2+ için maksimum %0,203 ve minimum %-3,377'dir. [Alsoufi ve Elsayed \(2018\)](#) tarafından endüstriyel olmayan uygun maliyetli masaüstü bir

3 boyutlu yazıcı ile boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada PLA, PLA+, ABS ve ABS+ malzemeler kullanılarak %100 dolulukta, eni ve boyu 40 mm, yüksekliği ise 15 mm olan numuneler imal edilmiştir. Çalışma neticesinde, PLA+ malzemesi ile en iyi yüzey ve boyut kalitesi elde edilmiştir. [Knoop ve Schoeppner \(2020\)](#) çalışmasında ise silindirik elemanların dış yüzey ve delikleri ulaşılabilir geometrik doğruluk kapsamında incelenmiştir. Bunun için iç ve dış yüzey ölçümü mümkün kılan 3 mm ila 30 mm çaplarında farklı numuneler tasarlanmıştır. Stratasys Fortus 400mc ile ABS-M30 malzemenin imal edilen test numuneleri KÖM ile ölçülmüştür. Elde edilen veriler en küçük kareler yöntemi ile iç ve dış çapı tanımlayan noktalar için birer daire uydurulmuştur. Çaptaki boyutsal sapma ve iç ile dış sınır çemberi arasındaki radyal fark olan dairesellik tayin edilmiştir. Çalışma sonucunda iç ve dış çap ölçümlerinde ölçüm sapmalarının nominal çap arttıkça arttığı görülmüştür. KÖM datası ile elde edilen her bir geometriye en küçük kareler yöntemi kullanarak optimum geometri uydurma çalışmalarından birini de [Kıran \(2021\)](#) ortaya koymuştur. Çalışmada 3B yazıcı ile daire, kare, dikdörtgen, üçgen ve elips şekilleri imal edilmiş, bu şekillerin ölçümü KÖM ile gerçekleştirilerek 2B profiller elde edilmiştir. Öte yandan, boyutsal doğruluk çalışmaları ile elde edilen verilerin bir standart ile karşılaştırılması verinin anlamlandırılması noktasında büyük bir öneme sahiptir. ISO tolerans sisteminde yer alan uluslararası tolerans (IT) kademelerinin kullanılarak eklemeli imalat ile elde edilen parçaların değerlendirildiği bir çalışma [Minetola vd. \(2016\)](#) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Stratasys Dimension Elite ve Bytes 3D Touch endüstriyel 3B yazıcılarını boyutsal hassasiyetleri açısından karşılaştırmıştır. Bunun için DIN EN ISO 286-1'e göre farklı nominal uzunlukların dikkate alındığı temel şekiller (düzlemsel yüzey, silindir, küre, koni) içeren bir referans parça tasarlanmıştır. Bu numune ABS malzeme ile adı geçen yazıcılarda imal edilmiştir. Elde edilen numuneler KÖM ile her bir şekil için en az 10 noktadan olmak üzere ölçümler yapılmıştır. Sonuçlar, EBEİ'nin +2,5 mm'ye kadar meydana gelen sapmalarla 11 ile 16 arasında IT sınıflarına ulaşabileceğini göstermektedir. Bu değer aralığı tolerans kademelerinde kaba işlem olarak geçmektedir. Ayrıca mümkün olan en düşük katman kalınlığı kullanılarak en düşük boyutsal sapma değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Farklı eklemeli imalat teknikleriyle elde edilebilecek standart kademesi konusunda bir çalışma ise [Lieneke vd. \(2019\)](#) tarafından

yapılmıştır. EBEİ, seçici lazer sinterleme (SLS) ve lazer hüzme ergitme (LHE) tekniklerinin incelendiği çalışmada, imal edilen test numunelerinin boyutsal doğruluk ve yüzey kaliteleri incelenmiştir. Test numunelerinin düzlük, dikdörtgensellik, paralellik ölçümü için bir plaka, yuvarlaklık, silindiriklik ve eş merkezlik ölçümü için silindirler ve delikler içerecek şekilde tasarlanmıştır. İmal edilen test numuneleri KÖM ve optik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Parçalar için ölçüm alınacak nokta sayıları belirlenerek bu noktaların nominal ölçülerinden sapmaları KÖM ile tespit edilmiş herhangi bir eğri uydurma yöntemi kullanılmamıştır. Çalışma sonucunda, SLS ve LHE tekniklerinin benzer sonuçlar verdiği ve 11 ila 15 IT sınıflarında bir boyutsal doğruluk elde edildiği görülmüştür. Farklı bir bakış açısı ile [Yaman \(2018\)](#) delik geometrilerinin çekme hatalarının telafisi için matematiksel modelleme tabanlı bir yöntem sunmuştur. Çalışma sonucunda, önerilen yöntem sayesinde imal edilen PLA malzemeli deliklerdeki çekme miktarının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Aynı yöntem [Dilberoglu vd. \(2019\)](#) tarafından yapılan çalışmada delik ve kanal geometrilerine sahip ABS malzemeli parçaların imalatında da kullanılmıştır.

Buraya kadar özetlenen çalışmalardan da görüldüğü üzere EBEİ yöntemi ile imal edilen parçalardaki boyutsal hatalar bu yöntemin temel problemlerinden biridir ve hala üzerinde çalışılmaya ihtiyaç vardır. Çünkü, boyutsal hatalar cihaza, kullanılan malzemeye ve imalat parametresine, geometriye vb. gibi değişkenlere bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Şu anda endüstride mevcut cihaz, malzeme, imalat parametresi ve geometri göz önünde bulundurulduğunda bu faktörlerin oluşturduğu sonsuz sayıda kombinasyon ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla her bir cihaz-malzeme-imalat parametresi-geometri kombinasyonunda farklı boyut hataları elde edilebilir. Bu hataların tespit ve analiz edebilmeleri için son kullanıcılara ve cihaz imalatçılarına sistematik ve pratik bir prosedür sunmaya ihtiyaç vardır. Ayrıca son kullanıcı ve cihaz imalatçıları açısından da cihazların hangi toleranslarda parça

imal edebildiğinin ortaya çıkarılması büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar hem son kullanıcının cihaz seçimine fayda hem de imalatçı firmanın cihazlarını daha da geliştirmesine katkı sağlayacaktır. Bahsi geçen hedefler çerçevesinde bu çalışmada endüstriyel bir yazıcı olan Zaxe Z1 cihazının ABS malzeme ile parça imalatındaki boyut hataları incelenmiştir. İlk olarak üzerinde farklı boyutlarda daire, kare ve eşkenar üçgen temel geometrilerini barındıran test parçası tasarlanıp, imalat platformunun farklı bölgelerine konumlandırılarak Z Eksen Baskı Sistemleri ve Bilgi Teknolojileri San. ve Tic. A.Ş. (Zaxe) firması tarafından sağlanan imalat parametreleri ile imal edilmiştir. Ardından tüm test parçalarında yer alan geometriler KÖM ile taranarak iki boyutlu profilleri elde edilmiştir. Son olarak da, MATLAB® ortamında geliştirilen bir algoritma ile bu taranan profillere geometri uydurma yapılar tasarlanıp geometriler ile karşılaştırılıp her bir geometriye ait profil tolerans değerleri hesap edilmiştir. Buradan itibaren çalışma şu şekilde organize edilmiştir. Kısım 2’de geometri uydurma sürecine yer verilmiştir. Kısım 3 deneysel çalışmaları ve profil toleransı elde etme sürecini kapsamaktadır. Son olarak da, Kısım 4’te elde edilen sonuçlar tartışılmalı olarak sunulmuştur.

## 2. Geometri uydurma süreci

### 2. Geometry fitting procedure

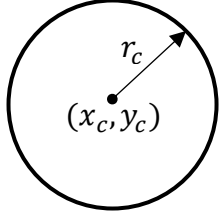
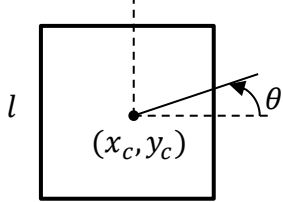
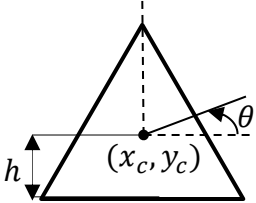
Bu kısımda çalışma kapsamında kullanılan test geometrilerine ve en küçük kareler geometri uydurma işlemine yer verilmiştir.

### 2.1. Test geometrileri

#### 2.1. Test geometries

Eklemeli imalatta ortaya çıkan profil toleranslarını belirleyebilmek amacıyla daire, kare ve eşkenar üçgen olmak üzere 3 adet temel geometri kullanılmıştır. Adı geçen geometrilere ait matematiksel modeller ve ilgili parametreler ([Kıran, 2021](#)) Tablo 1’de verilmiştir. Burada parametre vektöründe yer alan parametreler en küçük kareler yöntemi ile tespit edilmiştir.

**Tablo 1.** Test geometrileri ve matematiksel modelleri  
**Table 1.** Test geometries and their mathematical models

Geometri adı	Matematiksel model	Parametre vektörü	Geometri
Daire	$x = r_c \cos(u) + x_c$ $y = r_c \sin(u) + y_c$	$p = [r_c \ x_c \ y_c \ u]$	
Kare	$x_u = \frac{l}{2} ( \cos(u)  \cos(u) +  \sin(u)  \sin(u))$ $y_u = \frac{l}{2} ( \cos(u)  \cos(u) -  \sin(u)  \sin(u))$ $x = x_u \cos(\theta) - y_u \sin(\theta) + x_c$ $y = x_u \sin(\theta) + y_u \cos(\theta) + y_c$	$p = [l \ x_c \ y_c \ \theta \ u]$	
Eşkenar üçgen	$r = \frac{h}{\cos\left(\frac{2}{3} \arcsin\left(\sin\left(\frac{3}{2}u\right)\right)\right)}$ $x_u = r \cos(u)$ $y_u = r \sin(u)$ $x = x_u \cos(\theta) - y_u \sin(\theta) + x_c$ $y = x_u \sin(\theta) + y_u \cos(\theta) + y_c$	$p = [h \ x_c \ y_c \ \theta \ u]$	

## 2.2. En küçük kareler geometri uydurma

### 2.2. Least squares geometry fitting

Ölçülen ve Tablo 1’de verilen modeller sayesinde elde edilen geometri koordinatları arasındaki hatayı minimum yapan parametre vektörlerini

$$\epsilon(p) = \sum_{i=1}^n [x_i^{\text{ölçüm}} - x_i^{\text{model}}(p)]^2 + \sum_{i=1}^n [y_i^{\text{ölçüm}} - y_i^{\text{model}}(p)]^2 \quad (1)$$

Eşitlik (1)’de yer alan  $x_i^{\text{ölçüm}}$  ve  $y_i^{\text{ölçüm}}$  ölçülerek,  $x_i^{\text{model}}(p)$  ve  $y_i^{\text{model}}(p)$  matematiksel model ile elde edilen geometri koordinatlarını temsil etmektedir.  $n$  ise toplam veri sayısıdır. Bu geometri

$$p_{q+1} = p_q + h \quad (2)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Eşitlik (2)’de yer alan  $h$  parametrelerin güncellenme miktarıdır ve bu değer Levenberg-Marquardt yöntemi ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$h = (J^T J + \psi \text{diag}(J^T J))^{-1} (J^T D) \quad (3)$$

Eşitlik (3)’teki  $J$  Jacobian matrisidir ve bu matris sonlu farklar metodu ile hesaplanmıştır.  $\psi$  ise sönüm faktörüdür. Öte yandan,  $D$ :

bulmak amacıyla en küçük kareler yönteminden faydalanılmıştır. Bu yöntemle göre ilk olarak ölçülen ve modellenen koordinatlar arasındaki geometri parametrelerine bağlı hata aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Jia, 2017).

parametrelerine bağlı hatayı en küçük yapan ilgili parametreleri bulmak amacıyla doğru boyunca arama metodu kullanılmıştır. Bahsi geçen yöntemle göre bir sonraki parametre vektörü (Gavin, 2019):

$$D = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix}, D_x = x_i^{\text{ölçüm}} - x_i^{\text{model}}(p), D_y = y_i^{\text{ölçüm}} - y_i^{\text{model}}(p) \quad (4)$$

olarak hesap edilmiştir. Eşitlik (2)'de tanımlanan iteratif süreç aşağıda verilen yakınsama şartını sağlayana kadar devam etmektedir.

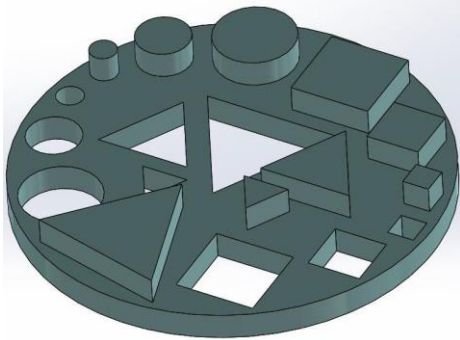
$$\text{maksimum}|J^T D| \leq 10^{-8} \quad (5)$$

Buraya kadar açıklanan süreç MATLAB® ortamında yazılan bir algoritma (Kıran, 2022) ile gerçekleştirilmiştir ve her bir geometri için ilgili geometri uydurma parametreleri tespit edilmiştir.

### 3. Deneysel çalışmalar

#### 3. Experimental studies

Boyutsal doğruluğu ve profil toleransını (PT) belirlemek amacıyla tüm test geometrilerini içeren bir test parçası tasarlanmıştır (Şekil 1). Geometri boyutlarının profil toleransına etkisini incelemek için, bu test parçasına sırasıyla 3 farklı çap ( $r_c = 5, 10, 15$  mm), uzunluk ( $l = 5, 10, 15$  mm) ve yükseklik ( $h = 5, 10, 15$  mm) değerine sahip daire, kare ve eşkenar üçgen geometrileri yerleştirilmiştir. Ayrıca Şekil 1'den görüldüğü üzere adı geçen geometriler dolu ve boş olarak da değerlendirilmiştir.

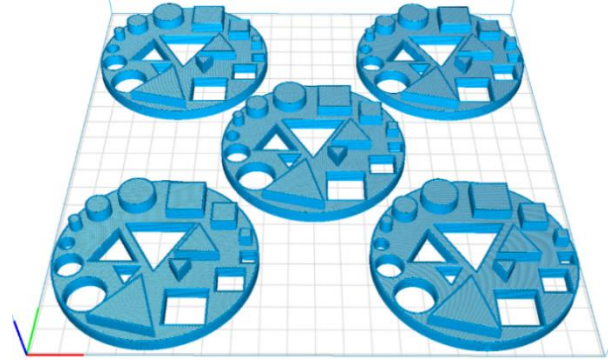


Şekil 1. Tasarlanan test parçası  
Figure 1. Designed test part

#### 3.1. Test parçasının imalatı

##### 3.1. Manufacturing of test part

Test parçalarının imalatında EBEİ teknolojisine sahip Zaxe Z1 üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır. Parçanın yazıcı tablasındaki konumunun boyutsal doğruluğa etkisini araştırmak amacıyla 5 adet test parçası Şekil 2'de görüldüğü gibi yazıcı imalat tablasının farklı konumlarına yerleştirilmiştir.



Şekil 2. Zaxe xdesktop yazılımında test parçalarının yerleşimi

Figure 2. Layout of test parts in Zaxe xdesktop software

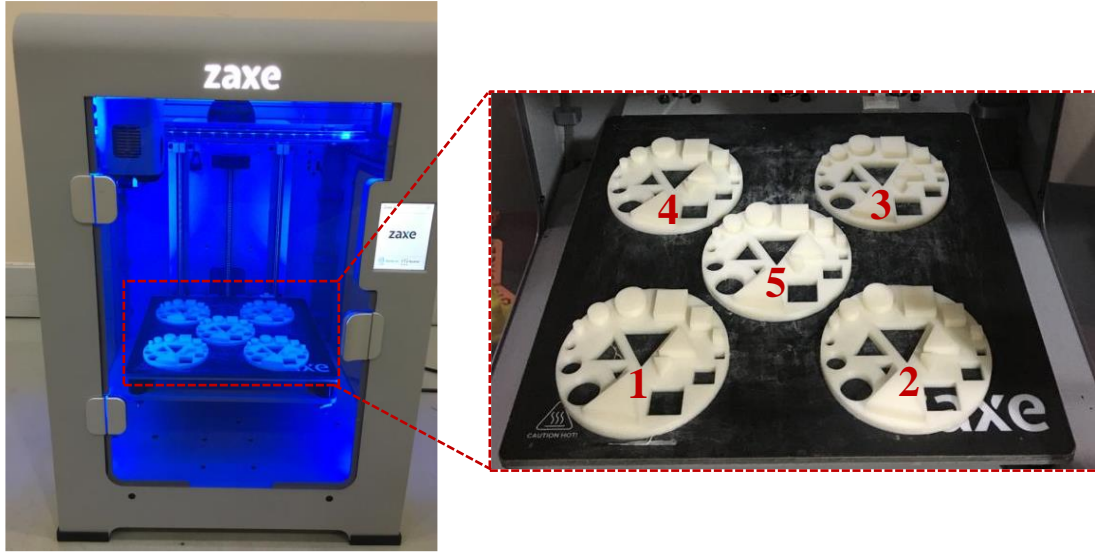
Bu parçaların yerleşimi ve ilgili imalat parametrelerinin tanımlanması (Tablo 2) Zaxe firmasının yerli yazılımı olan xDesktop ile gerçekleştirilmiştir. Test parçaları imalatı için 1.75 mm çapındaki Zaxe ABS filament kullanılmıştır. Bu malzemeye ait imalat parametreleri Zaxe firması tarafından sağlanmıştır.

Tablo 2. ABS filament için imalat parametreleri (nozül çapı 0.4 mm)

Table 2. Manufacturing parameters for ABS filament (nozzle diameter is 0.4 mm)

Parametre	Değer
Baskı Hızı (mm/s)	60
Katman Kalınlığı (mm)	0.1
İlk Katman Kalınlığı (mm)	0.2
Dolgu Deseni	ZigZag
Nozül Sıcaklığı (°C)	243
Tabla Sıcaklığı (°C)	100
Doluluk Oranı (%)	100
Fan Hızı (%)	0

Tablo 2'de verilen parametreler ile test parçalarının imalatı 20 saatte tamamlanmıştır ve 146 gr Zaxe ABS filament harcanmıştır. Şekil 3'te imalatı tamamlanan test parçaları gösterilmiştir. Burada her bir parça konumlarına göre numaralandırılmıştır. Sonuçlar da ilerleyen bölümlerde bu numaralara göre verilmiştir.



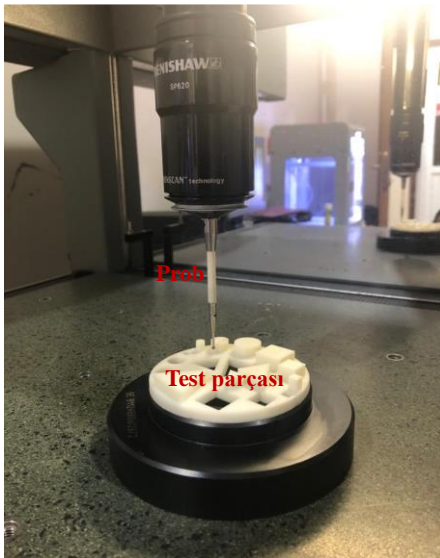
**Şekil 3.** İmalatı gerçekleştirilen test parçaları  
**Figure 3.** Manufactured test parts

Ayrıca, imal edilen parçalara imalat sonrası herhangi bir fiziksel ya da kimyasal son işlem uygulanmamıştır. Test parçaları tabladan ayrılarak KÖM ile ölçümleri yapılmıştır.

### 3.2. Test geometrilerinin ölçümü

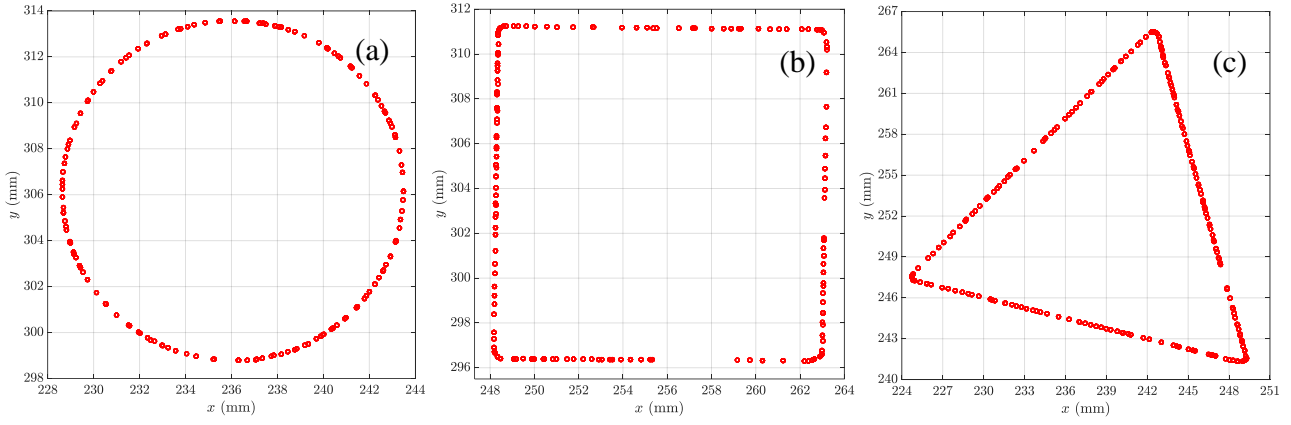
#### 3.2 Measurement of test geometries

İmalatı tamamlanan test parçalarında yer alan geometrilerin profilleri Renishaw Cyclone 2 KÖM ile taranmıştır (Şekil 4). Tüm taramalar 2 mm prob ile 100 mm/dak hızda gerçekleştirilmiştir. Örnek olması adına bu taramalar sonucu elde edilen her bir geometriye ait tarama verileri Şekil 5'te sunulmuştur.

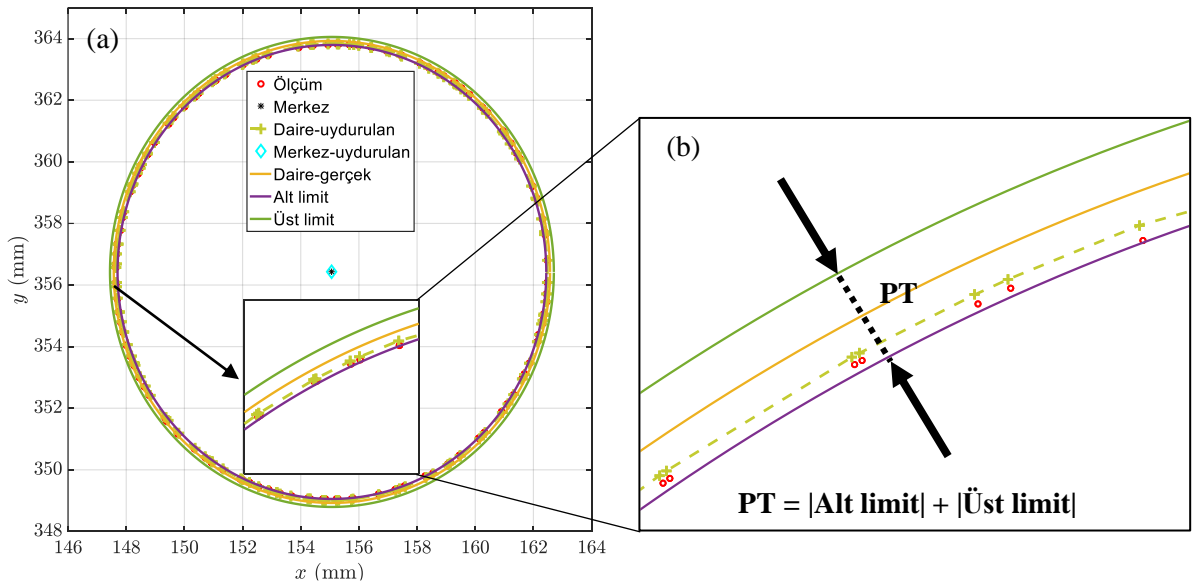


**Şekil 4.** Test parçalarının ölçüm süreci  
**Figure 4.** Measurement procedure of test parts

Profil tarama işlemi ile elde edilen her bir geometri verisi Bölüm 2.2'de açıklanan geometri uydurma sürecine tabi tutulmuştur. Örnek olarak Şekil 6(a)'da bir daire geometri verisi yapılan geometri uydurma karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekle yakından bakıldığında uydurulan daire geometrisinin ölçülen verileri başarı bir şekilde temsil edebildiği görülmektedir. Bu da geometri uydurma algoritmasının başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Ayrıca şekilde ölçülen ve gerçek geometriler arasındaki fark profil toleransı (ISO 1101:(E), 2012) kapsamında değerlendirilmiştir. Adı geçen toleransı belirlemek amacıyla Şekil 6(b)'de görüldüğü gibi alt ve üst geometri limitleri oluşturulmuştur. Profil toleransının tanımı gereği bu limitler tarama verilerindeki her bir noktayı içine alacak şekilde belirlenmiştir. Daha sonrasında bu iki limitin mutlak değerlerinin toplanmasıyla ilgili geometriye ait profil tolerans değeri elde edilmiştir.



**Şekil 5.** Örnek tarama verileri: (a) Daire (b) Kare (c) Eşkenar üçgen  
**Figure 5.** Sample scanning data: (a) Circle (b) Square (c) Equilateral triangle



**Şekil 6.** Örnek geometri uydurma: (a) Ölçüm, gerçek ve uydurulan geometrilerin karşılaştırılması (b) Profil toleransının belirlenmesi  
**Figure 6.** Sample geometry fitting: (a) Comparison of measured, actual and fitted geometries (b) Identification of profile tolerance

#### 4. Tartışma ve sonuçlar

##### 4. Discussion and conclusions

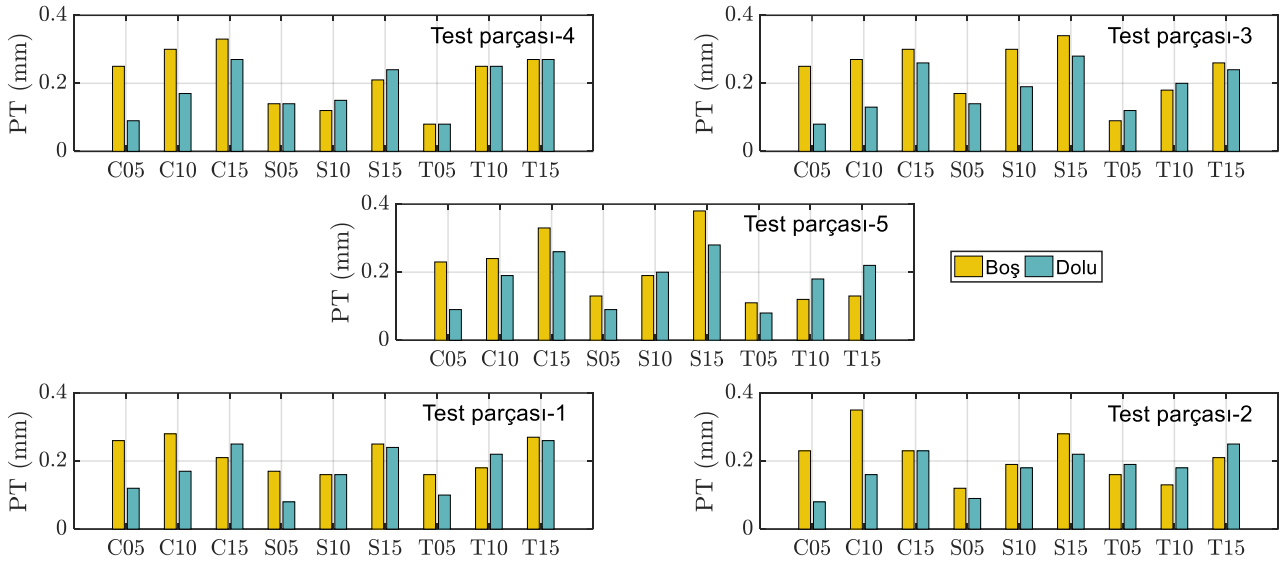
Tüm geometrilere ait profil tolerans değerleri Şekil 7’de karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Burada  $r_c = 5, 10, 15$  mm çaplara sahip daireler sırasıyla C05, C10 ve C15,  $l = 5, 10, 15$  mm uzunluklara sahip kareler sırasıyla S05, S10 ve S15,  $h = 5, 10, 15$  mm yüksekliklere sahip eşkenar üçgenler sırasıyla T05, T10 ve T15 olarak tanımlanmıştır. Şekilde verilen tolerans değerlerinin ortaya çıkmasında; cihaz pozisyon hataları, parça çekmesi ve STL dosya hatalarının rolü vardır. Tüm test parçalarında aynı STL dosya kullanıldığından test parçaların tolerans değerlerinin karşılaştırılmasında bu hatayı ihmal edebiliriz. Diğer kalan iki hata kaynağından, cihaz

pozisyon hatasının etkisini farklı pozisyonlarda yer alan test parçalarındaki tolerans değerleri yakından incelenerek görülebilir. Teorik olarak tüm test parçalarındaki ilgili geometrilerin tolerans değerlerinin aynı olması beklenirken, pratikte test parçasının imalat tablasındaki konumuna göre tolerans değerlerinde bir miktar farklılıklar vardır. Örneğin, C10-Boş geometri için test parçaları 1, 2, 3, 4 ve 5 için PT değerleri sırasıyla 0.28, 0.35, 0.27, 0.3 ve 0.24 mm’dir. Bir başka örnek olarak, S15-Dolu geometrisi için sırasıyla  $PT = 0.24, 0.22, 0.28, 0.24, 0.28$  mm’dir. Benzer gözlemler diğer geometriler içinde yapılabilir. Bu farklılıklar çok büyük olmadığından kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Öte yandan, EBEİ teknolojisinin en önemli parça boyut hata kaynağı olan parça çekmesi Şekil 7’de sunulan PT değerlerinin temel sebebi olarak



değerlendirilebilir. EBEİ teknolojisinin doğası gereği ergiyik halde imalat tablasına serilen plastik malzemeler belli bir süre sonra soğuyarak katılaşmaktadır. Bu faz değişimi sırasında serilen plastik malzemede çekme ya da büzülme meydana

gelmektedir ve nihai parçanın boyutları tasarlanan boyutlardan daha küçük olmaktadır. Bahsi geçen çekmenin miktarı temel olarak parçanın soğuma karakteristiğine bağlıdır.



**Şekil 7.** Tüm geometriler için belirlenen profil tolerans değerleri  
**Figure 7.** Identified profile tolerance values for all geometries

Şekil 7'ye genel olarak bakıldığında bu durumu gözlemlemek mümkündür. Başka bir deyişle, beklenildiği gibi PT değerlerinde lineer olmayan davranışlar söz konusudur. Her ne kadar tüm test parçalarının imalat parametreleri aynı olsa da parça boyutuna ve geometrisine, sınır şartlarına, imalat tablasındaki konumuna vb. bağlı olarak soğuma karakteristiği farklılık göstermektedir. Bu da test geometrilerinde ortaya çıkan çekme miktarlarını etkileyerek farklı PT değerine neden olmaktadır. Şekil 7 yakından incelendiğinde, bazı genel eğilimler gözlemlemek mümkündür. Örneğin, dolu daire geometrisi için çap arttıkça tüm test parçalarındaki ilgili PT değerlerinde artış söz konusudur. Bu durum ergiyik olarak tablaya biriktirilen ABS malzeme hacminin artmasıyla nihai parçanın daha fazla çekmesiyle ile açıklanabilir. Daha basit bir anlatımla, parça doldurma desenindeki her bir tarama yolunda biriktirilen ABS malzeme  $l$  uzunluğunda dairesel kesitli bir elastik çubuk olarak değerlendirilirse; çubuğun uzunluğu ile çekme miktarının doğru orantılı olduğu düşünülebilir. Bu davranış matematiksel model olarak Yaman (2018) çalışmasında verilmiştir. Öte yandan, benzer gözlem test parçası 3, 4 ve 5'te yer alan boş daire geometrileri içinde yapılabilir. Tüm test parçalarındaki daire geometrileri incelendiğinde en düşük PT test parçası 2 ve 3'te yer alan C05-Dolu geometrilerinde  $PT = 0.08$  mm olarak elde

edilmiştir. Yani imal edilen dairenin çapı tasarlanandan 0.04 mm daha küçüktür. En yüksek PT ise test parçası 2'de yer alan C10-Boş geometrisinde  $PT = 0.35$  mm olarak hesaplanmıştır. Yukarıda yapılan yorum gereği en yüksek PT değeri C15 geometrilerinde çıkması beklenirdi. Fakat imalat süreci lineer olmadığı için ortaya çıkan düzensiz soğuma karakteristiği, düzensiz sıcaklık gradyanları, cihaz pozisyon hatası, geometri yüzey pürüzlülüğünden dolayı KÖM tarama verilerindeki düzensizlikler vb. gibi lineer olmayan durumlardan ötürü beklenin dışında PT değerlerini elde edilebilir. Fakat, genel olarak değerlendirildiğinde tüm test parçalarında yer alan geometrilerin boyutları arttıkça PT değerleri artış sergilemektedir. Öte yandan, genel olarak dolu daire geometrisi boş daire geometrisine kıyasla daha az PT değerine sahiptir. Başka bir deyişle, dolu daire geometrisi olması gereken ölçüye daha yakındır. Her iki durumunda da geometrilerin ve imalat parametrelerinin aynı olmasına rağmen PT değerlerinde farklılıklar olmasının sebebi geometrilerin soğuma karakteristiği ile açıklanabilir. Yani dolu geometriler boş geometrilerle kıyasla daha düzenli ve hızlı soğuma gösterebilir. Başka bir ifade ile, test parçasının bütünü değerlendirildiğinde dolu kısımların termal iletkenliği boş kısımlara göre daha fazladır. Bu da boş geometrilerin kenarlarında ısı transferini oldukça azaltacaktır ve dolayısıyla soğuma hızında

bir düşüş olacaktır. Geometrilerdeki çekme süreci plastiğin camsı geçiş sıcaklığından (ABS için  $T_g \approx 100$  °C) oda sıcaklığına kadar devam ettiği dikkate alınrsa, soğuma hızındaki azalma çekme miktarının artmasına yol açabilmektedir (Bähr & Westkämper, 2018; Hämäläinen, 2017). Benzer yorum, test parçası 1, 2, 3 ve 5 test parçalarında yer alan kare geometrileri içinde yapılabilir. Fakat aynı durum eşkenar üçgen geometrisi için geçerli değildir. Çünkü imalat sırasındaki ısı transferine bağlı olarak ortaya çıkan çekme, parça geometrisini göre oluşturulan tarama yollarına bağlıdır. Tarama yolu boyunca serilen ergiyik plastik geometrilerin konumuna göre farklı miktarlarda çekme gösterebilmektedir. Bu durum yukarıda bahsi geçen soğuma hızından daha baskın olarak nihai çekme miktarlarını etkilediği düşünülmektedir. Bunlara ek olarak, geometri uydurma süreci sırasında her ne kadar tüm geometriler için aynı yakınsama şartı kullanılsa da, geometrilerin test parçası üzerindeki açısal konumlarındaki farklılıklardan dolayı algoritmaya farklı başlangıç parametreleri girilmiştir. Geometri uydurma süreci lineer olmayan bir süreç olduğundan, açısal konumdaki farklılıklar geometri uydurma parametreleri de bir miktar etkilemektedir. Bu da PT değerinde farklılıklara yol açabilir. Öte yandan, kare geometrisi için en düşük PT değeri test parçası 1’de yer alan S05-dolu geometrisinde 0.08 mm olarak elde edilmiştir. En yüksek ise PT = 0.38 mm olarak test parçası 5’de bulunan S15-Boş geometrisinde gözlemlenmiştir. Benzer şekilde eşkenar üçgen için en düşük PT değeri 0.08 mm olarak test parçası 4’de yer alan T05-Boş ve T05-Dolu geometrilerinde görülürken, en yüksek PT değeri ise 0.27 mm (Test parçası 1’de T15-Boş ve Test parçası 4’te T15-Dolu, T15-Boş) olarak tespit edilmiştir. Geometriler kendi arasında değerlendirildiğinde en düşük PT’ler tüm test geometrilerinde 0.08 mm’dir. En yüksek PT değeri olan 0.38 mm ise kare geometrisinde görülmüştür. Tüm bunlar dikkate alınarak daha hassas geometriler elde edebilmeleri için son kullanıcıya pratik bir öneride bulunmak yerinde bir adım olacaktır. Bahsi geçen amaç çerçevesinde, Şekil 7’de verilen PT değerlerinin ortalamasının yarısı kadar (yani  $PT_s = PT_{ortalama}/2 = 0.1987/2 = 0.0993 \approx 0.1$  mm) tarama yolları kaydırılabilir. Bu işlem xDesktop yazılımının ara yüzünde yer alan “XY toleransı” kısmından yapılabilir. Daha önce de belirtildiği üzere geometriler tasarlanan boyutlarından daha küçüktür, dolayısıyla bu kaydırma değeri yazılıma pozitif olarak girilmelidir. Tam tersi olması durumunda da bu değer negatif olmalıdır.

## Teşekkür

### Acknowledgement

Deneysel çalışmalar sırasında yardımlarından ötürü Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM), Tasarım ve İmalat Birimi teknisyenlerine teşekkür ederiz. Ayrıca, Z Eksen Baskı Sistemleri ve Bilgi Teknolojileri San. ve Tic. A.Ş. (Zaxe) firmasına çalışmaya olan katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

## Yazar katkısı

### Author contribution

Kadir KIRAN çalışma konusunun belirlenmesini, geometri uydurma algoritmasının yazılmasını, koordinat ölçme makinesi verilerinin işlenmesini, sonuçların yorumlanmasını ve makale yazımını gerçekleştirmiştir. Bahri ŞEKERCİ ve Yunus Emre DELİKANLI test parçalarının imalatını ve test geometrilerinin koordinat ölçme makinesi ile taramasını gerçekleştirmiştir. Ayrıca tarama verilerinin işlenmesinde, sonuçların yorumlanmasında ve makale yazımında katkılar sağlamıştır. Kemal Burak URGANCI koordinat ölçme makinesi verilerinin işlenmesinde, sonuçların yorumlanmasında ve makale yazımında katkıda bulunmuştur. Baki GEZGEN test parçalarının imalat parametrelerinin temin edilmesinde ve sonuçların yorumlanmasında katkılar sağlamıştır. Son olarak, tüm yazarlar makaleyi tamamen okuyup onaylamıştır.

## Etik beyanı

### Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

## Çıkar çatışması beyanı

### Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## Kaynaklar

### References

- Alsoufi, M. S., & Elsayed, A.E. (2018). Surface roughness quality and dimensional accuracy—a comprehensive analysis of 100% infill printed parts fabricated by a personal/desktop cost-effective FDM 3D printer. *Materials Sciences and Applications*, 9, 11-40. <https://doi.org/10.4236/msa.2018.91002>.

- Ashtankar, K. M., Kuthe, A. M., & Rathour, B. S. (2016). Effect of build orientation on mechanical properties of rapid prototyping (fused deposition modeling) made acrylonitrile butadiene styrene (ABS) parts. *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 11: Emerging Technologies* (pp.1–7), San Diego, California, USA. <https://doi.org/10.1115/IMECE2013-63146>.
- Bahnini, I., Uz Zaman, U. K., Rivette, M., Bonnet, N., & Siadat, A. (2020). Computer-aided design (CAD) compensation through modeling of shrinkage in additively manufactured parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9), 3999–4009. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04924-8>.
- Bähr, F., & Westkämper, E. (2018). Correlations between influencing parameters and quality properties of components produced by fused deposition modeling. *Procedia CIRP*, 72, 1214–1219. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.048>.
- Dilberoglu, U. M., Simsek, S., & Yaman, U. (2019). Shrinkage compensation approach proposed for ABS material in FDM process. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(9), 993–998. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1594252>.
- Gavin, H. P. (2019). The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems. *Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University*, 1–19.
- Hafsa, M. N., Ibrahim, M., Wahab, M. S., & Zahid, M. S. (2014). Evaluation of FDM pattern with ABS and PLA material. *Applied Mechanics and Materials*, 465, 55–59. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.55>.
- Hämäläinen, J. P. (2017). *Semi-crystalline polyolefins in fused deposition modeling* [Master thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finlandiya].
- ISO 1101:(E) (2012). *Geometrical product specifications (GPS)—geometrical tolerancing—tolerances of form, orientation, location and run-out*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jia, P. (2017). *Fitting a parametric model to a cloud of points via optimization methods* [Ph.D. thesis, Syracuse University, New York, USA].
- Kacmarcik, J., Spahic, D., Varda, K., Porca, E., & Zaimovic-Uzunovic, N. (2018). An investigation of geometrical accuracy of desktop 3D printers using CMM. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 393(1), 012085. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012085>.
- Kiran, K. (2021). Performance analysis of steepest descent-line search condition combinations in nonlinear least squares fitting of CMM data. *European Journal of Science and Technology*, 28, 1190–1196. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1012096>.
- Kiran, K. (2022). Performance evaluation of a conjugate gradient method considering step length computation techniques in geometry fitting of coordinate measuring machine data. *Measurement*, 196, 111202. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111202>.
- Knoop, F., & Schoepner, V. (2017). Geometrical accuracy of holes and cylinders manufactured with fused deposition modeling. *Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium* (pp. 2757–2776), Austin, Texas, USA. <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/16990>.
- Lieneke, T., Künneke, T., Schlenker, F., Denzer, V., & Zimmer, D. (2019). Manufacturing accuracy in additive manufacturing: a method to determine geometrical tolerances. *Joint Special Interest Group meeting between euspen and ASPE Advancing Precision in Additive Manufacturing Ecole Centrale de Nantes, France*.
- Melenka, G. W., Schofield, J. S., Dawson, M. R., & Carey, J. P. (2015). Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D desktop printer. *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 618–627. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2013-0093>.
- Minetola, P., Iuliano, L., & Marchiandi, G. (2016). Benchmarking of FDM Machines through Part Quality Using IT Grades. *Procedia CIRP*, 41, 1027–1032. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.075>.
- Pascu, N. E., Dobrescu, T. G., Balan, E., Jiga, G., & Adir, V. (2018). Design of ABS plastic components through FDM process for the quick replacement of outworn parts in a technological flow. *Materiale Plastice*, 55(2), 211–214. <https://doi.org/10.37358/MP.18.2.4997>.
- Pennington, R. C., Hoekstra, N. L., & Newcomer, J. L. (2005). Significant factors in the dimensional accuracy of fused deposition modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 219(1), 89–92. <https://doi.org/10.1243/095440805X6964>.

- Roberson, D. A., Espalin, D., & Wicker, R. B. (2013). 3D printer selection: A decision-making evaluation and ranking model. *Virtual and Physical Prototyping*, 8(3), 201–212. <https://doi.org/10.1080/17452759.2013.830939>.
- Sudin, M. N., Shamsudin, S. A., & Abdullah, M. A. (2016). Effect of part features on dimensional accuracy of FDM model. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(13), 8067–8072.
- Yadav, D. K., Srivastava, R., & Dev, S. (2019). Design & fabrication of ABS part by FDM for automobile application. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2089–2093. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.451>.
- Yaman, U. (2018). Shrinkage compensation of holes via shrinkage of interior structure in FDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5), 2187-2197. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1018-2>.