

Hızlı Prototipleme Teknolojisi Harç Yığıma Yöntemi ile Üretilen Modellerin Ölçüsel Sapmalarının ve Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi

Barış ÖZLÜ^{1*}, Okan PISIK², Halil DEMİR³

¹Aksaray Üniversitesi Aksaray Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, Aksaray, TÜRKİYE

²TÜBİTAK Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü, ANKARA, TÜRKİYE

³Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Karabük, TÜRKİYE

Geliş / Received: 02/05/2019, Kabul / Accepted: 20/02/2020

Öz

Bu çalışmada, farklı geometrik toleranslarda ve ölçülerde model tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan model, hızlı prototip üretim uygulamalarından harç yığıma tekniği kullanılarak üretilmiştir. Model üretimi sırasında farklı uç tipi (katman kalınlığı) ve inşa yöntemleri kullanılmıştır. Modellerin üretiminde ABS M30 malzemesi kullanılmıştır. Üretilen her bir parça üç boyutlu tarama cihazı ile taranarak tasarlanan modellerin geometrik hataları ve ölçüsel sapmaları değerlendirilmiştir. Ayrıca farklı uç tipi ve inşa yöntemlerine göre üretilen modellerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Üretilen ve tasarımı yapılan modellerin geometrik hataları ve ölçüsel sapmalar karşılaştırıldığında ölçü tamlığı, en ince uç tipi olan T10 ve Solid Normal (SN) inşa yöntemi ile üretilen modelde ölçülmüştür. Bununla birlikte T10 uç tipi ve Solid Normal (SN) inşa yöntemi ile üretilen modelde optimum yüzey pürüzlülüğü 4 µm olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hızlı prototipleme, harç yığıma, ölçüsel sapma, yüzey pürüzlülüğü.

Investigation of Models Produced by Rapid Prototyping Technology Solid Ground Method the Dimensional Deviations and Surface Roughness

Abstract

In the study, different geometric tolerances and dimensions model design is made. Designed model, rapid prototype manufacturing applications using solid ground curing technique production is produced. Different tip type (layer thickness) and construction methods were used during model production. Production of models ABS M30 material is used. The geometric errors and the dimensional deviations of the models designed by scanning each piece with three-dimensional scanning device were evaluated. Furthermore, the models produced according to tip type and construction methods were measured surface roughness values. When the geometric errors and dimensional deviations of the models produced and designed were compared, they were measured in the model which was produced by T10 and Solid Normal (SN) construction method which is the thinnest tip type of measurement completeness. In addition, the T10 type and Solid Normal (SN) construction method optimum surface roughness was measured as 4 µm.

Keywords: Rapid prototyping, solid ground, dimensional deviations, surface roughness

*Sorumlu Yazar: barisozlu@aksaray.edu.tr

1. Giriş

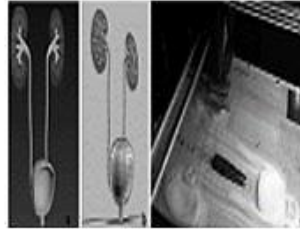
Hızlı prototipleme, üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım verilerini kullanarak bir parçanın veya montajın ölçekli modelini hızlı bir şekilde üretmek için kullanılan bir teknikler grubu olarak tanımlanabilir. Hızlı Prototipleme ayrıca katı serbest formlu imalat, bilgisayar otomatik imalat ve katmanlı imalat olarak da adlandırılır (Novakova vd., 2012). Yaklaşık otuza yakın hızlı prototipleme tekniği bulunmaktadır. Ancak bu tekniklerden yalnızca birkaçı yaygın olarak kullanılmaktadır. En yaygın hızlı prototipleme teknikleri; Stereolitografi (Stereo Lithography - SLA), Ergiyik Birikimli Modelleme (Fused Deposition Modeling - FDM), Tabakalı Parça İmalatı (Laminated Object Manufacture - LOM), Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering - SLS), 3 Boyutlu Püskürtmeli Baskı (3D Ink Jet Printing) olarak sıralanabilir (Tan vd., 2003, Pham ve Gault, 1998). Hızlı prototipleme tekniklerinden, ergiyik biriktirme modelleme

tekniği (FDM) ile 3B yazıcılarda üretilen parçaların üretiminde genellikle Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve Polylactic Acid (PLA) gibi termoplastik polimer malzemeler kullanılmaktadır (Bozdemir, 2018).

Son yıllarda insanoğlunun ihtiyaçlarının artması ve eklemeli imalat teknolojisinin gelişmesiyle birlikte kullanım alanın gittikçe arttığı görülmektedir. Özellikle tıp, savunma sanayisi, uzay ve havacılık, otomotiv, mimari, kalıpcılık, heykeltiricilik, kuyumculuk, dişçilik ve eğitim alanlarında üretilen ürünlerin ve parçaların yaygın olarak kullanılmaya başlandığı görülmektedir (Wohlers, 2012). Şekil 1’de hızlı prototipleme teknolojisinin kullanılması ile üretilen bazı ürünler görülmektedir. Birçok mühendislik uygulamasında olduğu gibi hızlı prototipleme ile üretilen parçalarda da, yüzey pürüzlülüğü önemli bir kriterdir. Hızlı prototipleme ile üretilen modellerin yüzey kalitesi çeşitli parametrelerle kendini gösterir.



Hızlı prototipleme teknolojisi ile üretilen kafatası parçaları.



Bileşimli yığıma yöntemi ile Cerrahpaşa üriner sistem modelinin PLA filamentten üç boyutlu yazıcıda basılması.



Medikal alanda hızlı prototipleme teknolojisi ile oluşturulan protez kol.



Üç boyutlu yazıcı kullanarak üretilen yüzük



Üç boyutlu yazıcıda bütün olarak üretilen giysi



Hızlı prototipleme teknolojisi ile elde edilmiş motor montajı

Şekil 1. Hızlı prototipleme teknolojisi yardımı ile üretilen farklı ürünler (Emre vd., 2015, Apak, 2010, Yıldırım, 2016, Bora, 2018).

Literatürdeki yapılan çalışmalara bakıldığında, hızlı prototipleme teknolojisi kullanılarak farklı çalışmalar yapılmıştır. Gri Taguchi yöntemi kullanılarak FDM imal edilmiş ABSP400 parçasının boyutsal doğruluğu üzerindeki parça oryantasyonu, örme genişliği, katman kalınlığı, hava boşluğu ve tarama açısı gibi beş işlem parametresinin etkilerini incelemişler (Sood vd., 2009). Biriktirilmiş ABS parçalarının boyutsal doğruluğunu etkileyen kilit faktörleri belirlemek için Taguchi yöntemi ve ANOVA tekniğini uygulamışlardır. Katman kalınlığı, örme genişliği, tarama açısı ve hava boşluğu gibi girdi değişkenleri göz önünde bulundurulmuş. Tabaka kalınlığı ve hava boşluğunun FDM parçalarının doğruluğunu önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmışlardır (Nancharaiyah vd., 2010). Ergiyik Birikimli Modelleme tekniğinde (FDM) işlem parametrelerinin, ABS malzemesinden üretilen prototipin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlar. Bu çalışmada Taguchi deney tasarımı, sinyal/gürültü oranı (S/N) ve varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Katman kalınlığı, örme genişliği ve birikme hızını içeren üç işlem parametresi göz önünde bulundurulmuş. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en önemli etkiye sahip olan faktörün, örme genişliği ve hızına göre

katman kalınlığının olduğunu ortaya koymuşlar. Ayrıca katman kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü arasında ters bir ilişki olduğu ortaya koymuşlardır (Anitha vd., 2001). Yapılan diğer bir çalışmada, düşük katman kalınlığında üretilen parçalarda daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş (Azanizawati, 2003). Diğer bir çalışmada ise, FDM teknolojisi ile üretilen parçalarda katman kalınlığının, katman üretim işlemlerinin yüzey kalitesi için en etkili parametre olduğunu belirtmişler, ayrıca yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, parçaların farklı üretim açılarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir (Ahn vd., 2009).

Yapılan bu çalışmada, CAD ortamında tasarımı gerçekleştirilen bir modelin hızlı prototipleme ile ürün haline dönüşmesi ve bu ürünün tasarıma geri dönütte bulunabilmesi için ölçüsel uygunluğunun ve yüzey pürüzlülüğünü araştırılması hedeflenmiştir.

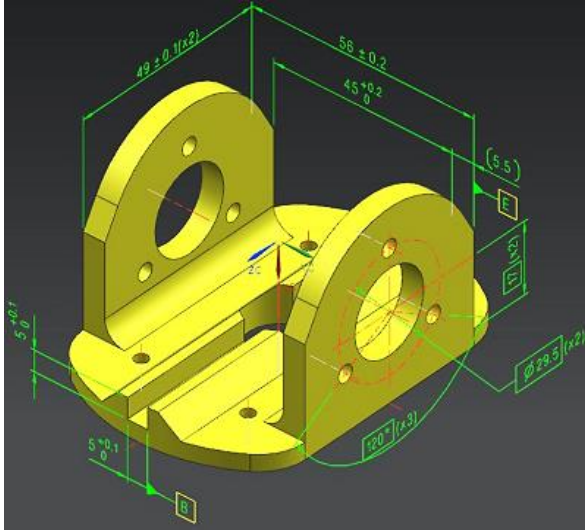
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada ergiyik yığıma modelleme (FDM) teknolojisi, hızlı prototip üretim uygulamalarından harç yığıma tekniği ile üretilecek modelin imalatında ABS-M30 filament plastik malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan ABS-M30 filament plastik malzemesinin mekanik özellikleri (Daneshmand vd., 2012)

Mekanik özellikleri	Birim	ABS-M30	Test Metodu
Çekme Mukavemeti	Mpa	36 Mpa	ASTM D638
Özgül Çekme Katsayısı	Mpa	2413 Mpa	ASTM D638
Çekme Uzaması	%	4	ASTM D638
Eğilme Mukavemeti	Mpa	61	ASTM D790
Eğme Modülü	Mpa	2317	ASTM D790
IZOD Darbe Çentik	J/m	139 J/m	ASTM D256

Deneylerde kullanılacak parçada dairesellik, uzunluk, radius, kanal, çap, pah, düzlemsellik, konum, diklik, açılı yüzeyler gibi çeşitli geometrik unsurlardan oluşacak şekilde CAD modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan CAD modeli Şekil 2'de verilmiştir.

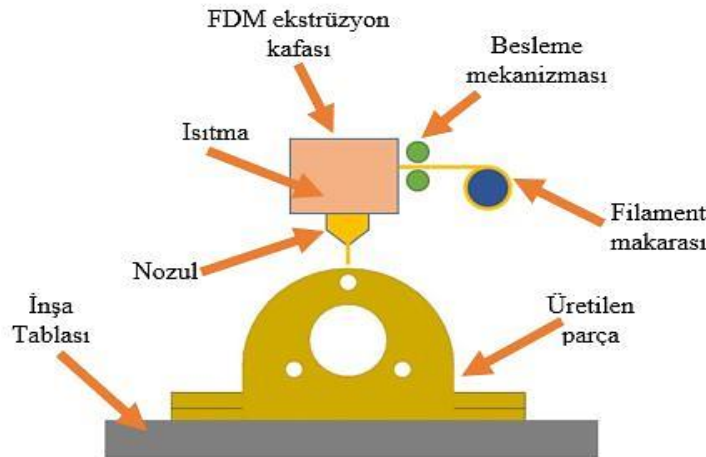


Şekil 2. Yapılan çalışmada kullanılacak modelin CAD görünümü.

Tasarlanan modeli oluşturmak için dünyada en yaygın şekilde kullanılan ergiyik yığma modelleme (FDM) yöntemi kullanılmıştır. Zorlu uygulamalar, yüksek hassasiyetli baskı ve doğrudan dijital üretimlerde, hassas ve yüksek toleransa sahip parçaların üretilmesi için geliştirilen FORTUS 360 MC Hızlı Prototipleme cihazı ile modellerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Modeller x ve y eksenlerin 18000 mm/dak ve z ekseninde 10000 mm/dak hızlarında inşa edilmiştir. Üretim sırasında tabla sıcaklığı 90 °C ve ABS-M30 filament plastik malzemesi için ergitme sıcaklığı 310 °C olarak belirlenmiştir. Ergiyik yığma modelleme (FDM) yönteminin üretim prosesi Şekil 3'de şematik olarak verilmiştir. Modellerin FORTUS 360 MC Hızlı Prototipleme cihazı ile üretilmesinde malzeme katman kalınlıklarına göre dört farklı uç tipi kullanılmıştır. Malzeme katman kalınlıklarına göre uç tipleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Fortus 360 MC prototip uç parametreleri.

Model Ucu	Destek Ucu	Katman Kalınlığı
T10	T12 WW	0.127 mm
T12	T12 WW	0.178 mm
T16	T12 WW	0.254mm
T20	T12 WW	0.330mm



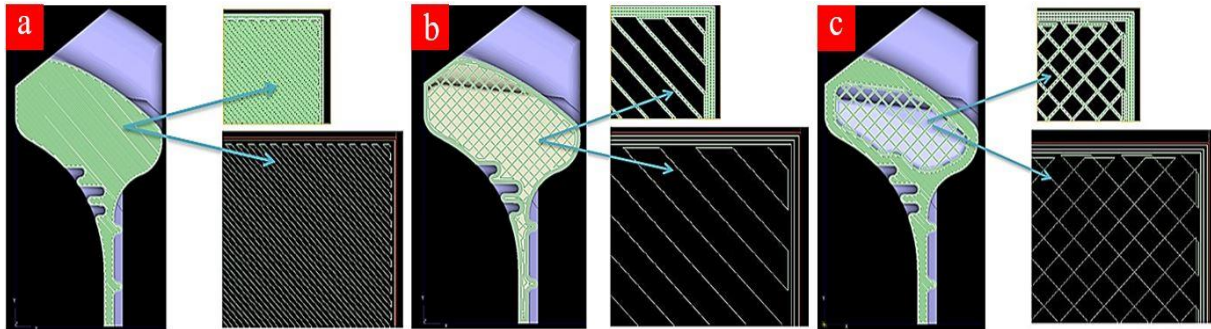
Şekil 3. Ergiyik yığma modelleme (FDM) yönteminin üretim prosenin şematik görünümü.

Yapılan çalışmada 12 adet modelin üretiminde dört farklı uç tipi, üç farklı inşa tipi ve sabit inşa açısı kullanılmıştır. Modellerin üretimi sırasında belirlenen parametreler Tablo 3’de verilmiştir. Üretim sırasında model yapısının dayanım ve maliyet unsurlarına göre üç farklı inşa yöntemi

mevcuttur. Bunlar Solid Normal (sık tek yönlü yapı), Sparse (tek yönlü yapı) ve Double Sparse (çift yönlü yapı) şeklindedir (Şekil 4). Model örme tekniğinin seçimi ürün inşa zamanını, harcanan malzeme miktarını, modelin ağırlığını ve maliyeti doğrudan etkilemektedir.

Tablo 3. Hızlı prototipleme teknolojisi harç yığıma yöntemi ile üretilecek modelin üretim parametreleri.

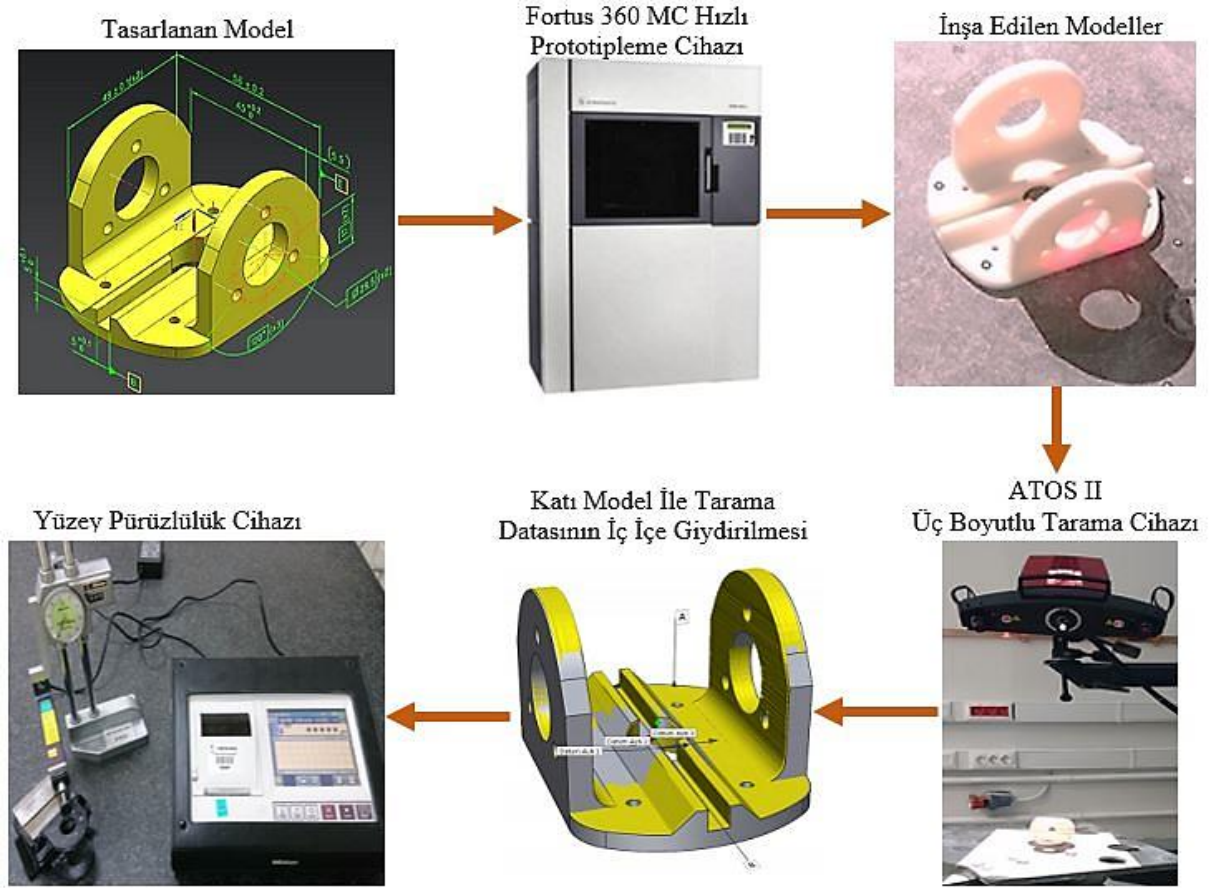
Malzeme	Model		
	Model Ucu (Katman Kalınlığı)	İnşa Tipi	İnşa Açısı
ABS-M30	T10	Solid Normal (SN)	60°
	T12		
	T16	Sparse (SP)	
	T20	Duble Sparse (DS)	



Şekil 4. Deneysel çalışmalarda kullanılan inşa tipleri; a) Solid Normal (sık tek yönlü yapı) b) Sparse (tek yönlü yapı) c) Double Sparse (çift yönlü yapı).

Üç farklı inşa yöntemi ve dört farklı uç tipi kullanılarak FORTUS 360 MC Hızlı Prototipleme cihazı ile üretilen parçalar, ATOS II üç boyutlu tarama cihazı ile üretilen parçaların bütün unsurlarının kamera ve lensler yardımı ile son derece hassas bir şekilde taranarak sayısız nokta bulutu oluşturularak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Katı model ile tarama sonrası elde edilen datalar iç içe giydirilerek, teknik resim ışığında ölçülecek geometri ve ölçülerin seçilmesi, ölçüm sonuçlarının raporlanması

Geomagic Control X ver.8.1.1 gerçekleştirilmiştir. Deneylerde modellerin yüzey pürüzlülük ölçümleri MİTUTOYO SJ-310 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler üretilen parçaların düzlemsel yüzeylerin üç farklı ölçümünün ortalamaları hesaplanarak yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri belirlenmiştir. Hızlı prototipleme teknolojisi harç yığıma yöntemi ile üretilen parçaların deney düzeneği Şekil 5’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5. Deney düzeneğinin şematik görünümü.

3. Deney Sonuçları

3.1. Ölçüsel Sapma Değerleri

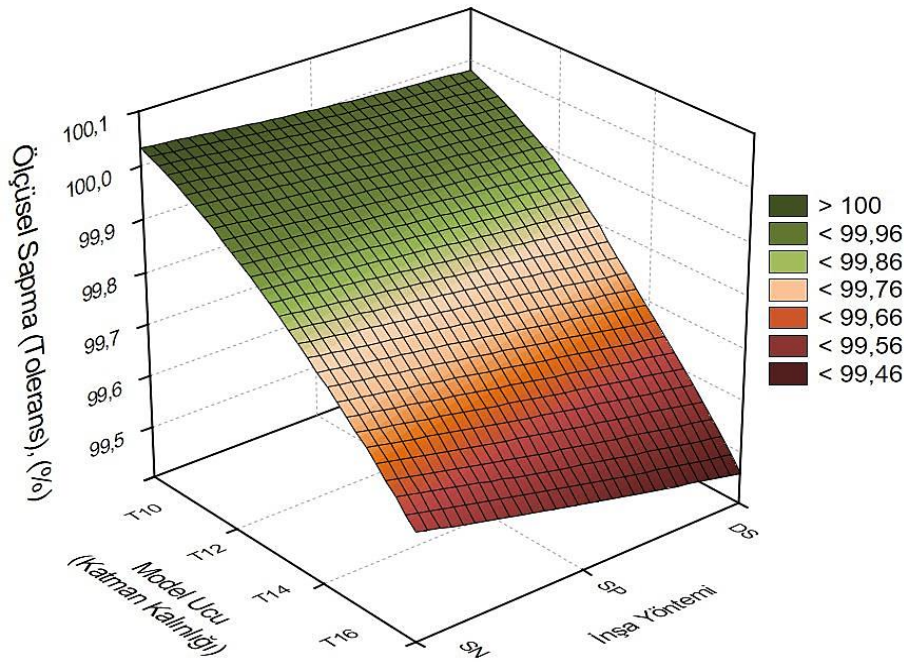
Bu çalışmada tasarımı yapılan model ergiyik yığıma modelleme (FDM) teknolojisi kullanılarak hızlı prototip üretim uygulamalarından harç yığıma tekniği kullanılarak, dört farklı model ucu (T10, T12, T16 ve T20), üç farklı inşa yöntemi (Solid Normal, Sparse ve Double Sparse) ve sabit uç açısı (60°) ile üretilmiştir. Tasarımı yapılan ve hızlı prototip üretim uygulamalarından harç yığıma tekniği kullanılarak üretilen parçalar için farklı uç tipi ve inşa yöntemine göre ölçüsel sapma değerleri Şekil 6'da verilmiştir.

İnşa edilen parçaların bütün yüzeyleri ve tasarımı yapılan modelde belirtilen bütün

ölçüleri kapsayacak şekilde tarama işlemleri gerçekleştirilmiştir. T10 uç tipiyle solid normal inşa yöntemiyle üretilen model, tasarımı yapılan modelle %100 aynı ölçülerde olduğu görülmüştür. T10 uç tipiyle solid normal inşa yöntemiyle üretilen modele göre, sparse inşa yöntemiyle üretilen modelde 0,03 mm'lik sapma ile %99,97 ve double sparse inşa yöntemiyle üretilen modelde ise 0,05mm'lik sapma ile %99,95 ölçüsel yakınlık görülmüştür. T12 uç tipiyle solid normal, sparse ve double sparse inşa yöntemleri ile üretilen parçaların ölçülerinde sırası ile 0,09 mm (%99,91), 0,11 mm (%99,89) ve 0,13 mm (%99,87) sapmalar olmuştur. T16 uç tipiyle solid normal, sparse ve double sparse inşa yöntemleri ile üretilen parçaların ölçülerinde ortalama 0,24 mm'lik bir sapma ölçülmüştür. T20 uç tipinde (katman kalınlığının 0.33 mm

çıkması) sırası ile solid normal inşa yönteminde 0,33mm (%99,67), sparse inşa yönteminde 0,39mm (%99,61) ve duble sparse inşa yönteminde ise 0,44mm (%99,56) ile en yüksek ölçüsel sapma değerleri tespit edilmiştir. Model üretiminde uç tipinin T10'dan T20'ye kadar değişmesi ile uçların katman kalınlığı artmıştır. Model inşası sırasında kullanılan uçların kalınlığının arması ölçüsel sapmalar ile paralellik arz etmiştir.

İnşa yöntemlerine göre ölçüsel sapmalar, bütün uçlarda (katman kalınlıklarında) en iyi ölçüsel değerler solid normal yöntemi ile inşa edilen modellerde görülürken, en büyük ölçüsel sapma değerleri duble sparse inşa yönteminde görülmüştür. Bunun nedeni solid normal inşa yönteminin, sparse ve duble sparse inşa tekniklerine göre daha sık örme tekniğine sahip olması ölçüsel sapmaların daha az olmasına neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6. Hızlı prototip üretim uygulamalarından harç yığıma tekniği kullanılarak farklı model ucu ve farklı inşa yöntemi ile üretilen modellerin ölçüsel sapma değerleri.

3.2. Yüzey Pürüzlülüğü

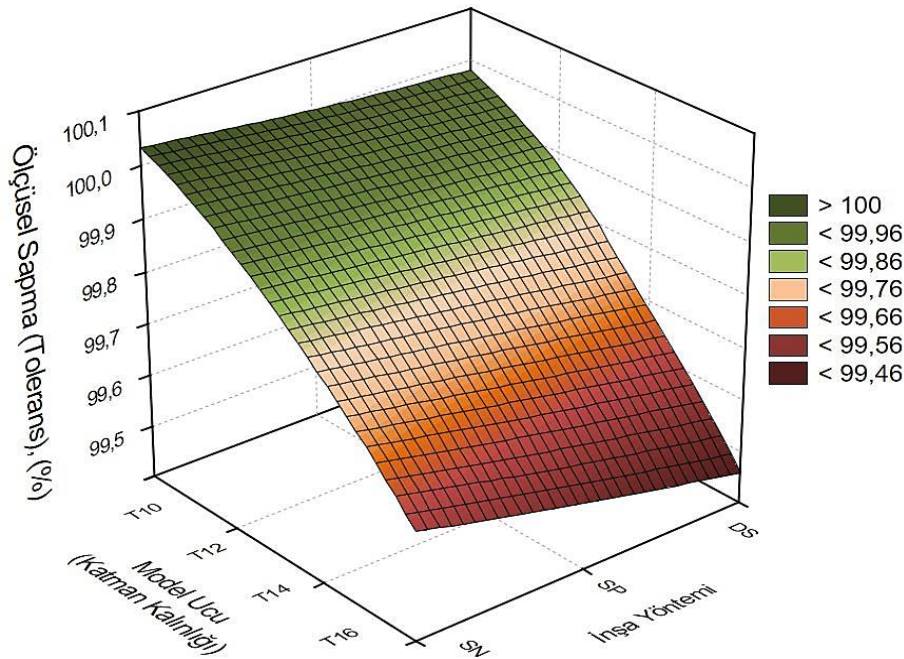
Ergiyik yığıma modelleme (FDM) teknolojisi, hızlı prototip üretim uygulamalarından harç yığıma tekniği kullanılarak dört farklı model ucu (T10, T12, T16 ve T20), üç farklı inşa yöntemi (Solid Normal, Sparse ve Duble Sparse) ve sabit uç açısı (60°) ile parçalar üretilmiştir. Üretilen her bir model üzerinde belirlenen 3 farklı düzlemsel referans yüzeyi seçilerek bu yüzeylerden yüzey pürüzlülük

değerleri ölçülmüştür. Ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalamaları hesaplanarak yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) belirlenmiştir.

Şekil 7'de ergiyik yığıma modelleme teknolojisi, hızlı prototip üretim uygulamalarından harç yığıma tekniği kullanılarak dört farklı model ucu (katman kalınlığı), üç farklı inşa yöntemi ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. T10 uç tipiyle solid normal inşa

yöntemiyle üretilen modelin yüzey pürüzlülük değeri 4 μm olmuştur. Uç tipinin (katman kalınlığının) T12, T16 ve T20 olması ile yüzey pürüzlülüğü değerleri sırası ile %37,5 (5,5 μm), %70 (6,8 μm) ve %87,3 (7,49 μm) oranlarda artma olmuştur. Modellerin üretimi sırasında kullanılan uçların (katman kalınlığı) kalınlıklarının artması ile yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmüştür. T10 uç tipiyle Sparse ve Double Sparse inşa yöntemiyle üretilen modelin yüzey pürüzlülük değeri, solid normal inşa yöntemiyle üretilen modelin yüzey pürüzlülük değerine göre sırası ile %17,5 (4,7 μm) ve %12,5 (4,5 μm) oranlarda artma olmuştur. T10, T12, T16 ve T20 farklı model uçlarında, sparse ve double sparse inşa yöntemleriyle üretilen modellerin yüzey pürüzlülük değerleri, solid normal inşa

yöntemine göre artma görülmüştür. En iyi yüzey pürüzlülük değerlerinin sıra ile solid normal, double sparse ve sparse inşa yönteminde ölçülmesinin sebebi; solid normal inşa yöntemi modelin dış katmanında çevresel tek döngüde geçmesi ile model inşa dolgusunu sık bir yapıdan oluşturması ile en iyi yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Sparse (tek yönlü yapı) inşa yöntemi ile modelin dış katmanın çevresel bir döngüde geçmesi ve yapı inşasının da tek yönde yapılmakta ve örme aralığı diğerlerine göre daha seyrek olması yüzey pürüzlülüğünün kötü çıkmasına neden olmuştur. Sonuç olarak parça üretimi sırasında kullanılan model uç tipi (katman kalınlığı) ve inşa yöntemi üretilen parçaların yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.



Şekil 7. Hızlı prototip üretim uygulamalarından harç yığılma tekniği kullanılarak farklı model ucu ve farklı inşa yönteminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.

4. Sonuç

Bu çalışmada, ergiyik yığılma modelleme (FDM) teknolojisi hızlı prototip üretim

uygulamalarından harç yığılma tekniği kullanılarak dört farklı model ucu (T10, T12, T16 ve T20), üç farklı inşa yöntemi (Solid Normal, Sparse ve Double Sparse) ve sabit uç

açısı (60°) ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Ayrıca üretilen parçalar ile tasarlanan model arasındaki ölçüsel sapmalar analiz edilmiştir. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki verilmiştir.

- T10 model ucu ve Solid Normal inşa yöntemi ile üretilen parça ile tasarlanan model arasında %100 ölçü tamlığı elde edilirken, T20 model ucu ve Solid Normal inşa yöntemi ile üretilen parça ile tasarlanan model arasında %0,33'lik bir sapma görülmüştür.
- En büyük ölçüsel sapma T20 model ucu ve double sparse inşa yöntemi ile üretilen parça ile tasarlanan model arasında %0,44 olmuştur.
- En iyi yüzey pürüzlülüğü T10 model ucu ve Solid Normal inşa yöntemi ile üretilen parçada 4 µm ölçülmüştür.
- En yüksek yüzey pürüzlülük değeri T20 model ucu ve Sparse inşa yöntemi ile üretilen parçada 8,15 µm olmuştur.

5. Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde laboratuvar imkânlarından faydalanmamızı sağladığı için TÜBİTAK-SAGE teşekkür ederiz.

6. Kaynaklar

Novakova Marcincinova L., Novak-Marcincin J., Barna J., Torok J., 2012, "Special materials used in FDM rapid prototyping technology application", *IEEE, 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems, Lisbon, Portugal*, 73-76.

Tan K.H., Chua C.K., Leong K.F., Cheah C.M., Cheang P., Abu Bakar M.S., Cha S.W., 2003, "Scaffold development using selective laser sintering of polyetheretherketone-

hydroxyapatite biocomposite blends", *Biomaterials*, 24, 3115-3123.

Pham D.T., Gault R.S., 1998, "A Comparison of Rapid Prototyping Technologies", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(10-11), 1257-1287.

Bozdemir M., 2018, "Silah kabzasının 3B yazıcılarla tasarım ve imalatı", *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(1), 57-68.

Emre Ş., Yolcu M.B., Celayir S., 2015, "Üç boyutlu yazıcılar ve çocuk cerrahisi", *Çocuk Cerrahisi Dergisi*, 29(3), 77-82.

Apak S., 2010, "Farklı Hızlı Prototipleme cihazlarında Üretilen Parçaların Üretim Zamanı ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Ana Bilim Dalı*, Ankara, 22-84.

Yıldıran M., 2016, "Moda giyim sektöründe üç boyutlu yazıcılarla tasarım ve üretim", *Art-e Sanat Dergisi*, 9(17), 155-172.

Bora M., 2018, "Görsel sanatlar eğitiminde bilgisayar teknolojisinden yararlanma olanakları", *İdil Sanat Dergisi*, 7(49), 1177-1189.

Wohlers T., 2012, "Wohlers report 2012: Additive manufacturing and 3D printing, state of the industry", Colorado, USA: Wohlers Associates.

Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S., 2009, "Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method", *Materials and Design*, 30, 4243-4252.

Nancharaiah T., Raju D.R., Raju V.R., 2010, "An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components", *International Journal on Emerging Technologies*, 1(2), 106-111.

Anitha R., Arunachalam S., Radhakrishnan P., 2001, "Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling", *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3), 385-388.

Azanizawati M., 2003, “Quality assessment of hollow rapid prototyping model”, *Master’s Thesis, Universiti Teknologi, Malaysia*.

Ahn D., Kweon J.H., Kwon S., Song J., Lee S., 2009, “Representation of surface roughness in fused deposition modeling”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15-16), 5593-5600.

Daneshmand S., Aghanajafi C., Shahverdi H., 2012, “Investigation of rapid manufacturing technology with ABS material for wind tunnel models fabrication”, *Journal of Polymer Engineering*, 32(8-9), 575-584.