

TAGUCHI METODOLOJİSİ İLE ERİYİK YIĞMA MODELLEME SÜRECİ PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Fuat Kartal¹

fkartal@kastamonu.edu.tr

¹ Makina Mühendisliği Bölümü, Kastamonu Üniversitesi, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, Eriyik Yığılma Modelleme (EYM) (Fused Deposition Modeling) (FDM) işlemi PolylacticAcid (PLA) filament kullanılarak inşa edilen bir parçanın optimum yüzey pürüzlülüğünü belirlemek için bir deneysel tasarım tekniği uygulaması sunulmuştur. İşleme parametreleri olarak, tabla sıcaklığı, nozul sıcaklığı, baskı hızı, dolgu yüzdesi, katman kalınlığı göz önüne alınarak yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri araştırılarak sunulmuştur. Deneysel, Taguchi'nin her faktör için üç seviye kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önemli faktörleri ve etkileşimlerini belirlemek için istatistiksel olarak ANOVA analizi ile uygulanmıştır. ANOVA analizinden elde edilen sonuçlara göre katman kalınlığı ve Raster genişliğinin yüzey kalitesini büyük ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Raster açısı pek etkili olmadığı belirlenmiştir. Fakat hava boşluğu, boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesi üzerinde çok az etkiye sahiptir. Üç boyutlu tasarımı yapılan bir parçanın yanal ve üst ortalama pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Deneysel sonuç, üç düzlemde yüzey pürüzlülüğü değerinin farklı olduğunu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Eriyik Yığılma Modelleme (EYM), Deneysel tasarım, eklemeli üretim, katmanlı imalat, parametrik en uygun şekle sokma

OPTIMIZATION OF FUSED DEPOSITION MODELING PROCESS PARAMETERS BY TAGUCHI METHODLOGY

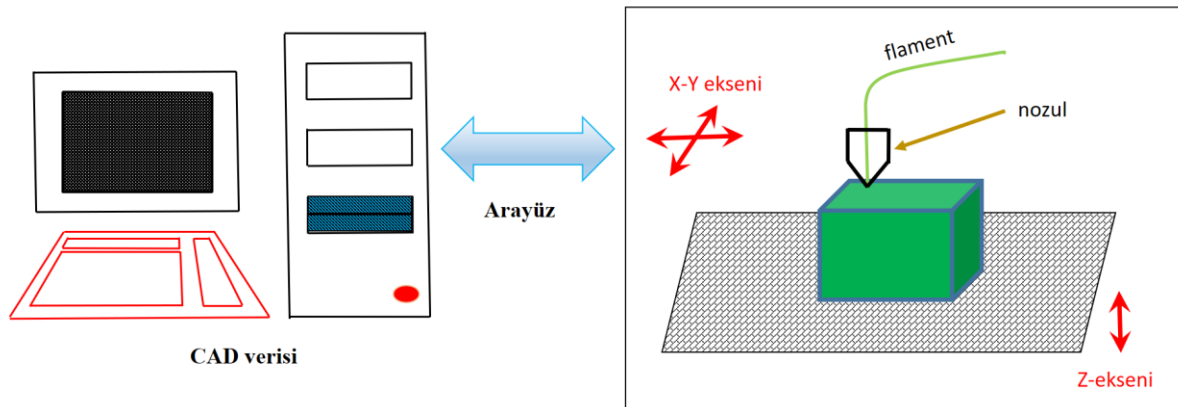
ABSTRACT

In this work, an experimental design technique is presented to determine the optimum surface roughness of a partially constructed using a PolylacticAcid (PLA) filament with the Fused Deposition Modeling (FDM) process. The processing parameters are presented by investigating the effects of surface roughness considering the table temperature, nozzle temperature, printing speed, fill percentage, layer thickness. The experiments were taken out using Taguchi's three levels for each gene. It was applied statistically by ANOVA analysis to learn important factors and interactions. Granting to the solutions obtained from the ANOVA analysis, it was ascertained that the layer thickness and the raster width affect the surface quality largely. It has been decided that the raster angle is not efficient. Nevertheless, the air gap has little effect on dimensional accuracy and open character. The lateral and top mean roughness values of a three-dimensional designed part are measured. Experimental results shows that surface roughness value is different in three planes.

Keywords: Fused deposition modeling (FDM) Experimental design Additive manufacturing Process parameters

1. GİRİŞ

EYM nesnelerin katmanlı olarak üç boyutlu (3D) model verilerden üretilmesi için malzemeleri birleştiren bir süreçtir [1,2]. EYM'nin evrimiyle birlikte, sayısal verilerden herhangi bir şeklin doğrudan (genellikle bir CAD modeli) fiziksel, (üç boyutlu) bir cisimciğin hızlı, son derece otomatikleştirilmiş ve tamamen esnek bir süreçle imalatı daha kolay hale gelmiştir [2-4]. Ayrıca parça karmaşıklığı yüksek olmasına rağmen ürünün üretim süresini önemli düşürebilmektedir [1]. EYM, bir STL dosyasını (STEREOLithography dosya formatı) işleyen, matematiksel olarak dilimleme ve modeli oluşturma işlemi için yönlendiren bir yazılım süreciyle başlar [4-6]. Gerekirse, destek yapıları oluşturulabilir. Makine, farklı hedeflere ulaşmak için birden fazla malzeme dağıtabilir. Günümüzde, EYM, havacılık uygulamasında ve hızlı prototiplemede özellikle küçük partiler halinde işlevsel parçaları üreten hızlı bir üretim tekniği olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, üretilen prototiplerin doğru işlevsel gereklilikleri sağlamak için yüksek doğruluğa sahip olması gerekir [2-5] Bununla birlikte, EYM sürecinin doğruluğu, birçok faktörün bir fonksiyonu olduğu için tahmin etmek zordur; bunların bazıları birbirine bağlı olabilmektedir. EYM prototiplerinin doğruluğunu etkileyen faktörler tabaka kalınlığı, baskı hızı, yapı sıcaklığı, Raster genişliği, Raster açısı, hava boşluğu. ve parça doldurma stili. EYM'de parça hatalarının başlıca nedenlerinden biri, farklı eksen boyunca tek biçimli olmayan büzülme olmasıdır [3, 4]. Büzülmeyi telafi etmek için bir malzeme büzülme katsayısı hesaplanır ve her yönde CAD dosyasına ölçekleme faktörü uygulanır. Ortaya çıkan geometri, kullanılan ölçeklendirme faktörüne bağlı olarak nominal geometride kıyasla biraz büyük olabilir [5-8]. Şekil 1'de görüldüğü üzere, bu işlemde malzeme bir sıvılaştırma kafasında sıvı halde getirilir ve daha sonra herhangi bir CAD modeliyle doğrudan, katmanlı bir şekilde 3 boyutlu parça üretmek için parçaların enine kesit geometrisini izleyen bir şekilde üretilir [1-8].



Şekil 1. Üç boyutlu katman oluşturma yöntemi genel şeması.

2. MATERIAL ve METOD

2.1. Taguchi metodu ve Deney parametreleri

Bu projede, EYM ile üretilmiş parçalarının yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluğu üzerindeki göreceli katkısını değerlendirmek için Taguchi deney yöntemi tasarlanıp uygulanmıştır. Taguchi yöntemi, ortogonal diziler adı verilen özel bir dizi kullanır. Bu standart diziler, performans parametrelerini etkileyen tüm faktörlerin tam bilgisini verecek minimum deney sayısını uygulama yolunu öngörür. EYM parçalarının kalitesini etkileyen seçilmiş işlem parametreleri ve seviyeleri Tablo 1'de verilmiştir ve parametreler sınırlı olduğu için L9 dizisi

seçilmiştir. Tablo 2 L9 dizisini göstermektedir. Taguchi yöntemine göre, kalite karakteristiği, varyasyonu kritik bir etkiye sahip olan bir parametredir. Taguchi yöntemi, en sık kullanılan deney tasarım yöntemlerinden biridir. Taguchi yöntemi, çok faktörlü, tam faktöriyel tasarımlarla ilişkili çok sayıda deneyin üstesinden gelmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bir çalışma için gerekli olan deney sayısının azaltılması, genellikle, Plackett-Burman tasarımlarında da kullanılan bir varsayım olan parametrenin parametreleri arasındaki etkileşimleri göz ardı ederek gerçekleştirilir. Taguchi yöntemi, deneyde incelenen faktörlerin, bir sistemin veya bir işlemi optimize etmek için tasarım değişkenleri olarak kullanıldığı bir optimizasyon işleminin ilk adımı olarak sıklıkla kullanılır [4,5]. EYM parçalarını oluşturmaya hazırlanırken, yazılımda birçok üretim parametresi gereklidir. Optimum kaliteye ulaşmak için, bu parametreler, uygulamaların gereksinimlerine göre farklı şekilde ayarlanır. Bu nedenle, deneydeki ilk adım, EYM parçalarının kalitesini etkilemesi muhtemel süreç kontrol parametrelerini belirlenmesidir. İşleme parametreleri olarak, tabla sıcaklığı, nozul sıcaklığı, baskı hızı, dolgu yüzdesi, katman kalınlığı giriş parametreleri olarak seçilmiştir.

Tablo 1. İşlem parametreleri ve seviyeleri

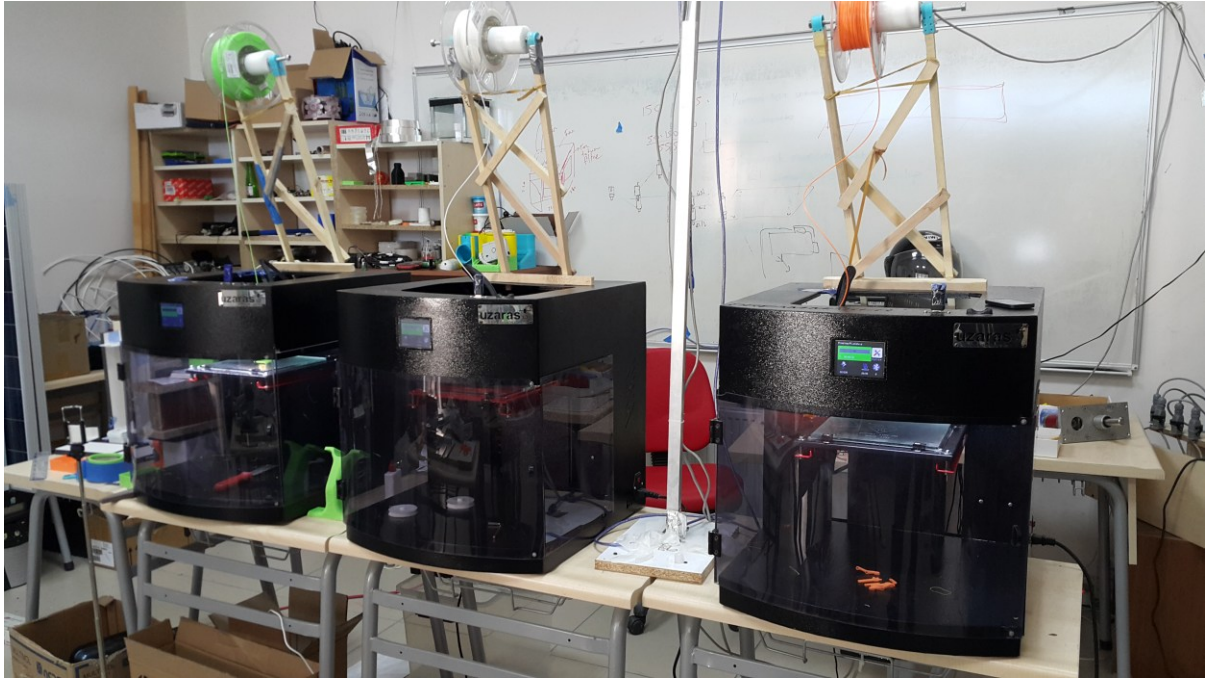
Faktörler	Birim	Kod	Seviyeler	Çıktı
Tabla sıcaklığı	(C°)	A	40; 50; 60	Ra
Nozul sıcaklığı	(C°)	B	210; 220; 230	(µm)
Katman yüksekliği	(µm)	E	150; 200; 250	

Tablo 2. Taguchi L9 deney düzeni ve sırası

Deney no	Tabla sıcaklığı (C°)	Nozul sıcaklığı (C°)	Katman yüksekliği (µm)
1	40	210	150
2	40	220	200
3	40	230	250
4	50	210	200
5	50	220	250
6	50	230	150
7	60	210	250
8	60	220	150
9	60	230	200

2.2. Kullanılan üç boyutlu yazıcı

Bu çalışmada, EYM parçalar için yaygın olarak kullanılan bir materyal olan PLA malzemesi kullanılarak numuneler açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Şekil 2’de gösterilen Dream maker açık kaynak kodlu 3 boyutlu yazıcı CAD stl dosyalarından üretilmiş G kodu vasıtasıyla parça üretir. Ekstrüzyon kafasına sahip yazıcı ile PLA filamentler eritilerek üç boyutlu parçalar oluşturur. Üç katmanlı çözünürlük ayarları ile tasarım doğrulaması için hızlı bir parça inşa etmeyi veya daha kaliteli yüzey ayrıntısı için daha ince ayarlar seçmek mümkün olabilmektedir. Kullanılan Dream maker açık kaynak kodlu 3 boyutlu yazıcı 200x203x305 mm işleme alanına sahiptir. Parçanın CAD modeli SolidWorks paket programında hazırlanıp, malzeme oluşturulması için EYM makinesine giriş uzantısı (.stl) formatına dönüştürülmüştür. Tablo 3’te Dream Maker 3B yazıcıya ait teknik kapasite özellikleri verilmiştir.



Şekil 2. Açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı.

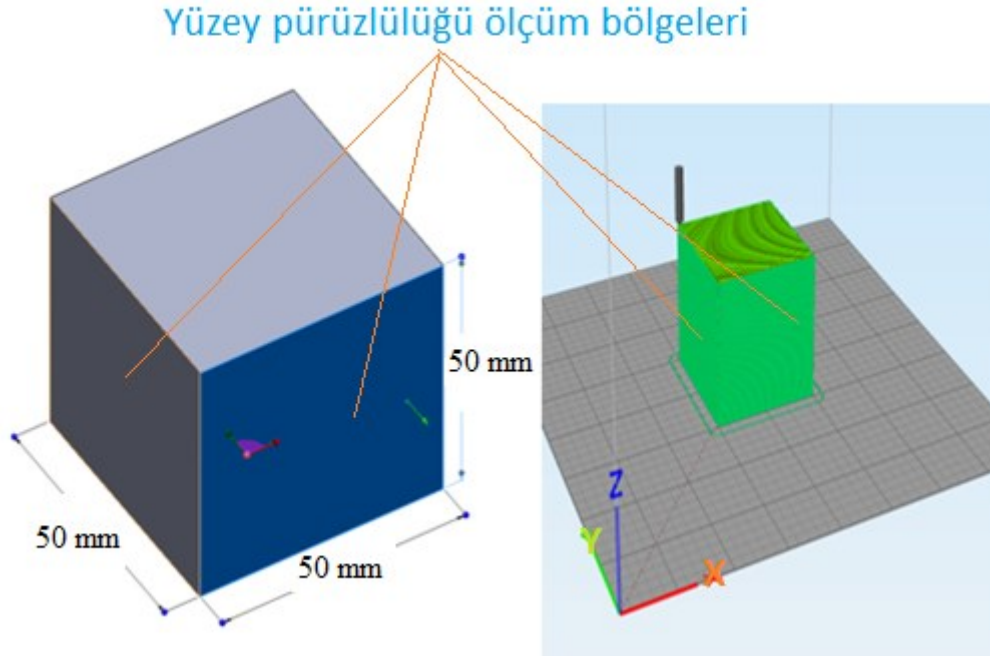
Tablo 3. Kullanılan açık kaynak kodlu üç boyutlu yazıcının teknik kapasite özellikleri

Baskı boyutu	200 × 200 × 200 mm
Maksimum çözünürlük	0.1 mm-0.4 mm
XY eksen konumlandırma doğruluğu	0.012 mm
Nozul çapı	0.4 mm
Giriş voltajı	100 V-240 V
Çalışma gerilimi	12 V
Dosya biçimi	STL, G-kodu
Baskı Malzemesi	PLA
Malzeme Çapı	1,75 mm

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında seçilen işleme parametresi tabla sıcaklığı, nozul sıcaklığı ve katman kalınlığıdır. Bu parametreler göz önüne alınarak iş parçasının pürüzlülüğünü en aza indirmek için deneysel veriler kullanılarak sayısal optimizasyon yapılmıştır. Şekil 3'te SolidWorks üç boyutlu tasarım programında 50x50x50 mm ölçülerine sahip üç boyutlu yazıcıda üretilecek parçanın görüntüsü ve G kodu üretmek için kullanılan dilimleme programında küp iş parçasının yerleşimi görülmektedir. Tablo 2'de gösterilen Taguchi L9 deney düzenine göre parametre ayarları deney sırasına göre yapıp toplam 9 adet deney gerçekleştirilmiştir. Elde edilen üç boyutlu küp parçalarının yanal yüzeylerinden 4 farklı yüzeyden olmak kaydıyla yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve sinyal gürültü oranları Tablo 4'te verilmiştir. İş parçası yani küplerin ısıtıcı tabla yüzeyine gelen ve bitirme yüzeyi olan üst yüzeyden yüzey pürüzlülük değerleri alınmamıştır. Bunun nedeni ise

alt tablaya temas eden yüzeyin çok pürüzsüz olması ve üst yüzeyin ise pürüzlülük cihazında ölçülemeyecek derecede pürüzlü olmasından dolayıdır.



Şekil 3. 50x50x50 boyutlarında küpün üç boyutlu tasarım ve yazıcı programında yerleşim görüntüsü

Tablo 4. Taguchi L9 deney düzeni ve deneysel Ra ve S/N değerleri

Deney no	Tabla sıcaklığı (C°)	nozul sıcaklığı (C°)	Katman kalınlığı (µm)	Ra (µm)	S/N (dB)
1	40	210	150	9,22	-19,296
2	40	220	200	10,06	-20,047
3	40	230	250	10,22	-20,189
4	50	210	200	9,98	-19,979
5	50	220	250	10,72	-20,603
6	50	230	150	9,22	-19,294
7	60	210	250	10,22	-20,189
8	60	220	150	9,22	-19,294
9	60	230	200	9,56	-19,605

Varyans analizi sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre tüm parametreler istatistiki olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Parametrelerin etkileri ve seviyeleri için ana etki çizimi Şekil.4'te gösterilmiştir. Analiz yapılırken ortalama yüzey pürüzlük değeri için en küçük daha iyidir seçilmiştir. Yani yüzey pürüzlülük değerinin en düşük olması için S/N oranının hesaplanması için en küçük daha iyidir hesaplaması Minitab 17 istatistiki paket programı tarafından yapılmıştır. Üç boyutlu üretimde yüzey pürüzlülüğü düşük olması istenir ve tercih edilir ama hiçbir zaman pürüzsüz yüzey elde etmek mümkün olmamıştır. Taguchi analizinden elde edilen optimize edilmiş işlem parametreleri ve bunlara karşılık gelen sıralama Tablo 6'da ve Tablo 7'de gösterilmiştir. R² regresyon belirtme katsayısı %99.94 ve standart sapma 0,0265016 olarak hesaplanmıştır. % 95 güven aralığında Ra'nın tahmini için doğrusal regresyon denklemi denklem (1)'de verilmiştir. Tablo 5'te görüldüğü üzere işlem parametrelerinin sıralamasında nozul sıcaklığı % 86.85 ile birinci etkili parametre,

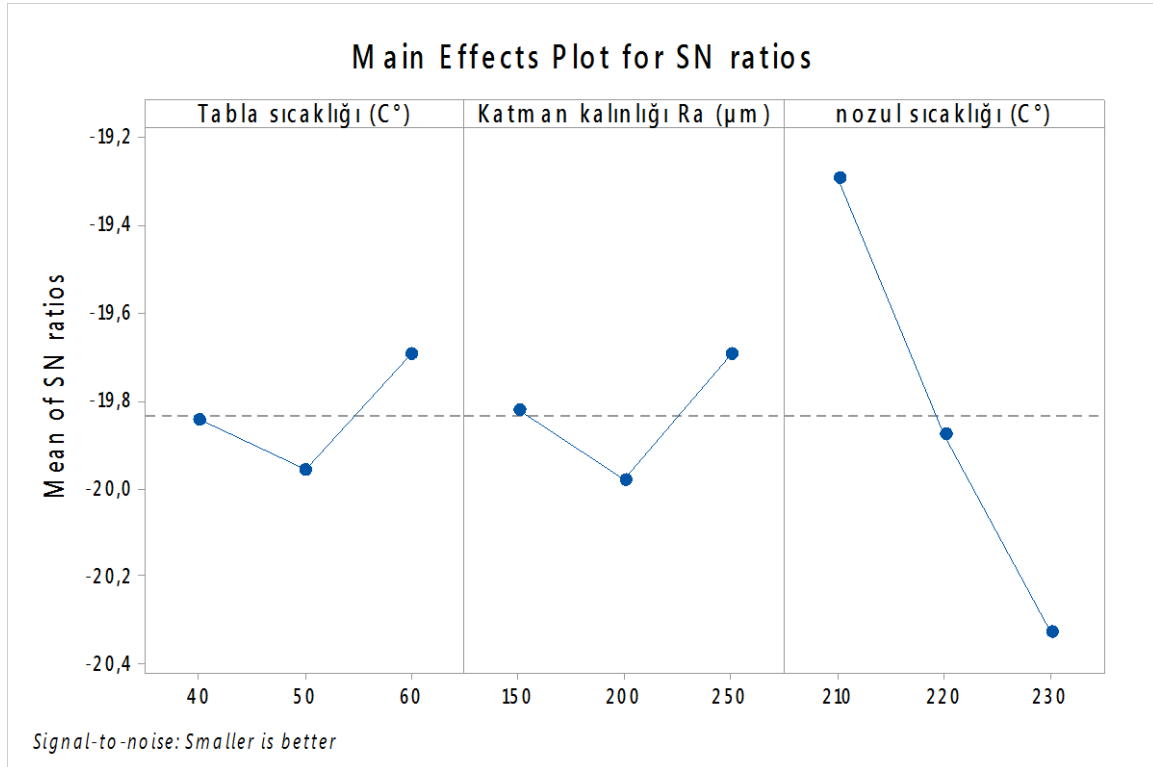
% 7.1 etki ile ikinci parametre katman yüksekliği yada kalınlığı üçüncü önem sırasına % 5.9 ile ısıtma tablası sıcaklığı etkili olmuştur. Tabla sıcaklığı yada katman kalınlığı eritilmemiş bir filament yazdırılamayacağı için nozul sıcaklığı parametresinin yanında sönük kalmıştır. İyi bir eriyik oluşturma aynı zamanda iyi bir yüzey oluşumunda başlıca etkilidir.

Yüzey pürüzlülüğü Ra'nın tahmininde kullanılan doğrusal regresyon denklemi;

$$Ra = 9,82300 + 0,0087 \text{ tabla sıcaklığı}_{40} + 0,1490 \text{ tabla sıcaklığı}_{50} - 0,1577 \text{ tabla sıcaklığı}_{60} - 0,0177 \text{ katman kalınlığı}_{150} + 0,1753 \text{ katman kalınlığı}_{200} - 0,1577 \text{ katman kalınlığı}_{250} - 0,6030 \text{ nozul sıcaklığı}_{210} + 0,0393 \text{ nozul sıcaklığı}_{220} + 0,5637 \text{ nozul sıcaklığı}_{230} \quad (1)$$

Tablo 5. Ra için parametrelerin Varyans analiz tablosu.

Faktör	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Etki (%)
Tabla sıcaklığı	2	0,14140	0,07070	100,67	0,010	5,9
Katman kalınlığı	2	0,16774	0,08387	119,41	0,008	7,1
Nozul sıcaklığı	2	2,04863	1,02431	1458,44	0,001	86,85
Hata	2	0,00140	0,00070			0,05
Toplam	8	2,35918				100

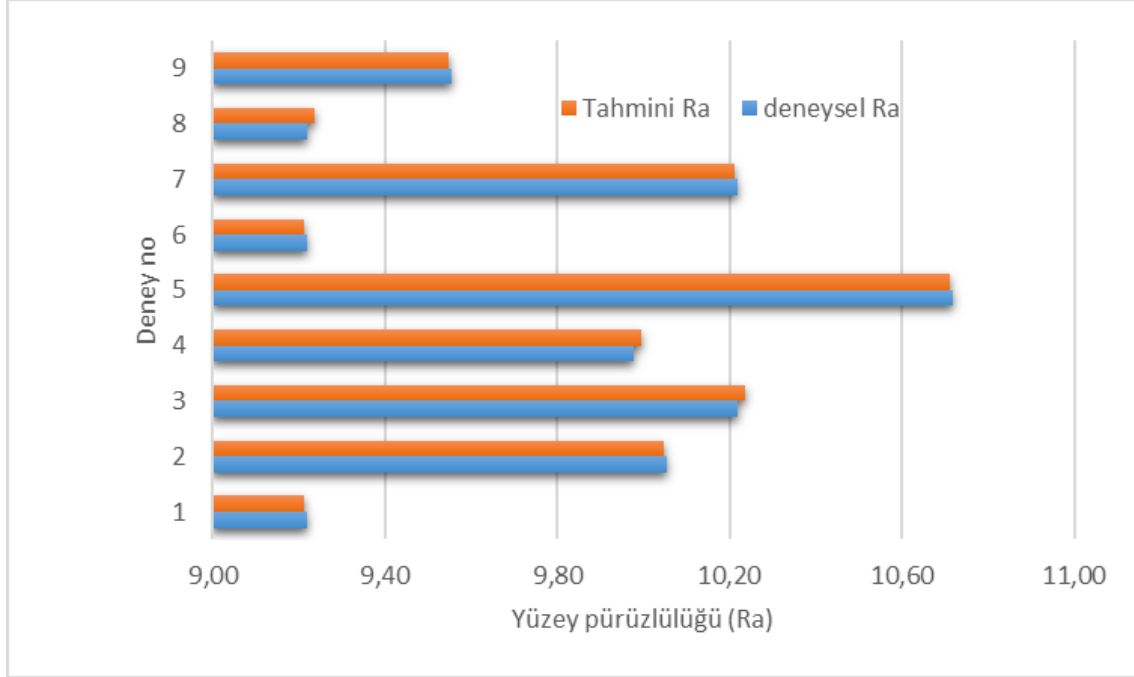


Şekil 4. Ra için parametrelerin ana etkiler grafiği

Tablo 6. Daha küçük daha iyi kriterine göre parametre etkilerinin sıralaması ve S/N oranları

Seviye	Tabla sıcaklığı (C°)	Katman kalınlığı Ra (µm)	nozul sıcaklığı (C°)
--------	----------------------	--------------------------	----------------------

1	-19,84	-19,82	-19,29
2	-19,96	-19,98	-19,88
3	-19,70	-19,70	-20,33
Fark (maks.-Min.)	0,26	0,29	1,03
Sıralama	3	2	1



Tablo 7. En düşük yüzey pürüzlülük değerleri için optimum işlem parametreleri

Tabla sıcaklığı (C°)	Nozul sıcaklığı (C°)	Katman yüksekliği (µm)
50	230	200

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, açık kaynak kodlu üç boyutlu yazıcıda işleme parametreleri katman yüksekliği, nozul sıcaklığı ve tabla sıcaklığı belirlenen seviyelerde denemeleri yapılarak pürüzlülüğüne olan etkisi istatistiksel olarak araştırılmıştır. Yukarıdaki çalışmadan görülebileceği gibi, parçanın hassasiyetini hızlı prototiplemeye etkileyen birçok faktör vardır, bu faktörlerin arasında bu çalışmada seçilen işlem parametreleri de en önemli etkili faktörlerdendir.

Bu çalışma kapsamında belirtilen sınırlar içerisinde elde edilen test sonuçlarından aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

- Boyutsal doğruluğu ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için optimal parametre ayarı, tabla sıcaklığı 50 C°, nozul sıcaklığı 230 C°, katman yüksekliği 200 µm değerlerinde olması uygundur, fakat açık kaynak kodlu yazıcı olduğu için bu parametre seviyeleri başka ortam ve makineler için geçerli olmayabilir.

- Elde edilen deneysel sonuçlar, XY düzlemindeki yüzey pürüzlülüğünü etkileyen işlem parametrelerinin Z yönünde olduğu gibi aynı kalıbı takip etmediğini göstermektedir.
- İşlem parametrelerinin sıralamasında nozul sıcaklığı % 86.85 ile birinci etkili parametre, % 7.1 etki ile ikinci parametre katman yüksekliği yada kalınlığı üçüncü önem sırasına % 5.9 ile ısıtma tablası sıcaklığı etkili olmuştur.
- Ra'nın tahmin modeli ile deneysel arasında ki fark ortalama % 0.12 değerini geçmemiştir. Geliştirilen regresyon modeli Ra'nın tahmini için yeterli ve güvenli olduğu söylenilebilir.
- Nozul sıcaklığının 230 C olması üretici PLA üretici firmaların tavsiye ettiği nozul sıcaklık değeri 220 C° olması bu çalışmada hesaplanan değer 230 C olması çalışma ortamının sıcaklığı ile açıklanabilir, çalışma ortamında hava akışı ve soğuk olma şartı eriyik olan filamentin hızlı soğuması ve oluşan yüzeyin morfolojik yapısını etkilediği söylenilebilir.

TEŞEKKÜR

Yazar Kastamonu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanlığına laboratuvar faaliyetlerine verdikleri maddi manevi destekten ötürü teşekkür eder. Ayrıca yazar UZARAS 3D yazıcı merkezine teknik destekten ötürü teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Pandey Pulak M, Rangunath N. Improving accuracy through shrinkage modelling by using Taguchi method in selective laser sintering. *Int J Mach Tools Manuf* 2007;47:985–95.
- [2] Yiyo Kuo, Taho Yang, Guan-wei Huang. The use of grey-based Taguchi method to optimize multi response simulation problems. *Eng Optimiz* 2008;40(6):517–28.
- [3] Wang CC, Lin TW, Hu SS (2007) Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the gray relational analysis. *Rapid Prototyp J* 13(5):304–315
- [4] Sood AK, Ohdar R, Mahapatra S (2009) Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey Taguchi method. *Mater Des* 30(10):4243–4252
- [5] Zhang JW, Peng AH (2012) Process-parameter optimization for fused deposition modeling based on Taguchi method. *Adv Mater Res* 538:444–447
- [6] Fowlkes, W.Y. and Creveling, C.M., 1995. Engineering methods for robust product design: using taguchi methods in technology and product development (p. 432). Reading, MA: Addison Wesley Longman, Inc
- [7] R. Clancy and V. Jamalabad, “Fused deposition of ceramics: progress towards a robust and controlled process for commercialization,” *Solid Free. Fabr. Proc.*, no. December 2015, pp. 185–194, 1997.
- [8] Rayegani, F., & Onwubolu, G. C.: Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). *The International Journal of Advanced manufacturing Technology*, 2014 pp.1-11, doi:10.1007/s00170-014-5835-2