



YAPIM ZAMANI İÇİN ERİMİŞ BİRİKİM MODELLEME İŞLEM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Fuat Kartal¹, Celal Nazlı², Zekeriya Yerlikaya³, Fadime Simsek⁴ ve M. Hüseyin Çetin⁵

^{1,2,4}Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, Türkiye,

³Fen Bilgisi Eğitimi Bölümü, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, Türkiye,

⁵Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye,

ÖZET

Eriyik yığıma modelleme (Fused Deposition Modeling) (FDM), makul bir zaman periyodunda geometrik karmaşıklıkla işlevsel plastik parçaları oluşturabilme özelliğinden dolayı, en hızlı büyüyen katman imalatı teknolojilerinden biri olarak gelişimini devam ettiren bir teknolojidir. Bu çalışmada, FDM, tasarlanan CAD verilerinden doğrudan nesnelere oluşturmak için yarı erimiş termoplastik polimerin bir tabla üzerine katmanlar şeklinde inşa edilmesiyle üretilen hızlı bir prototipleme tekniğidir. Bu çalışmanın amacı, dolgu tipi (ızgara, üçgen ve petek), katman kalınlığı (μm), dolum yoğunluğu (%10, %20 ve %30) gibi süreç parametrelerinin yapım süresi üzerindeki etkisinin incelenmesidir.

Anahtar kelimeler: Eriyik Yığıma Modelleme (EYM), deneysel tasarım, eklemeli üretim, katmanlı imalat, parametrik tasarım.

OPTIMIZATION OF FUSED DEPOSITION MODELING PROCESS PARAMETERS FOR BUILDING TIME

ABSTRACT

Fused Deposition Modeling (FDM) is a technology that continues to evolve as one of the fastest growing layer manufacturing technologies because of its ability to create functional plastic parts with geometric complexity over a reasonable period. FDM is a rapid prototyping technique that is produced by laying layers of semi-molten thermoplastic polymer on a plate to form objects directly from the designed CAD data. The purpose of this study was to investigate the effect of process parameters such as filler type (grid, triangle and honeycomb), layer thickness (μm), and fill density (10%, 20% and 30%) on construction time.

Keywords: Fused Deposition Modeling (FDM), Experimental design, additive manufacturing, layered manufacturing and parametric design.

1. GİRİŞ

FDM fikri oldukça basittir; Katman tabaka halinde biriktirilen ve katlaşmasına izin verilen eritilmiş bir materyalden üç boyutlu (3D) bir nesne oluşturulmuştur [1,2]. Katkı üretiminin ve 3-D baskının teknolojik gelişiminin hem tasarım hem de küçük parti üretimi için yararlı olduğu kanıtlanmış olduğundan, bu durum ticari hızlı prototip yapımında (RP) hızlı büyümeyi hızlandırmıştır [1-6]. Bu teknolojilerin büyük ölçüde yayılması, imalatçıları ve hobileri makine ve süreç iyileştirmelerine yönlendirmiştir. En yaygın kullanılan teknolojilerden biri erimiş birikim modellemesidir (FDM) [1-4]. Katkı üretim teknolojisi, bilgisayar destekli tasarım (CAD) veri dosyasından doğrudan katman

katmanları imal etmek için kullanılan gelişmiş bir üretim teknolojisidir [5-8]. Süreç, üç boyutlu (3B) bir parça oluşturmak için katman katmanına bir katman halinde malzeme ekleyerek, geleneksel üretim işlemine kıyasla daha kısa döngü süresine ve daha düşük maliyete sahip herhangi bir karmaşık parçanın üretilmesine yarar sağlayarak nesnelere oluşturmuştur [6-10]. Katkı üretim teknolojisi, özelleştirilmiş ürünler, fonksiyonel modeller, ameliyat öncesi modeller ve kavramsal modeller için mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır [2,3]. Bu teknoloji, uçak, diş restorasyonları, tıbbi implantlar ve otomotiv ürünleri gibi birçok mühendislik ve endüstri alanında uygulamalarını bulmaktadır [2-4]. Dünya ekonomisindeki rekabetin artmasıyla, tasarımcılar ve üretim mühendisleri, müşteri ihtiyaçlarını karşılamak ve rekabet avantajı sağlamak için ürünleri her zamankinden daha hızlı üretime zorluğuyla karşı karşıyadır [4, 5]. Katkı üretim süreci, herhangi bir takım ihtiyacının olmaması nedeniyle tasarım ve üretim çevrim süresini en düşük maliyetle kısaltmak için, karmaşık geometri oluşturmada etkin bir teknik sunmaktadır [8,9]. Piyasada birikmiş depozyon modelleme (FDM) gibi birçok ticari aditif üretim sistemi bulunmaktadır; doğrudan metal biriktirme (DMD), 3D baskı, seçici lazer sinterleme (SLS), inkjet modelleme (IJM) ve stereo-litografi (SLA). Bu sistemler, yapı katmanları ve bu işlemlerle güvenli bir şekilde üretilebilecek malzeme türlerinde farklılık gösterir [7-10].

Bu çalışmanın temel amacı, seçilen FDM süreç parametreleri ile yapım süresi arasında optimum seçeneğin tanımlanmasına odaklanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, EYM parçalar için yaygın olarak kullanılan bir materyal olan PLA malzemesi ile numunelerin üretimi için açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı kullanılmıştır (Şekil 1). Parçanın CAD modeli Solid Works paket programında hazırlanıp, malzeme oluşturulması için EYM makinesine giriş uzantısı “STL” formatına dönüştürülmüştür. Parçalar, 0.200 mm sabit katman kalınlığına sahip, PLA eriyik malzemenin yığılması yoluyla katmanlar halinde oluşturulmuştur. Tablo 1’de Dream Maker 3B yazıcıya ait teknik kapasite ve çalışmada kullanılan sabit parametreler verilmiştir.

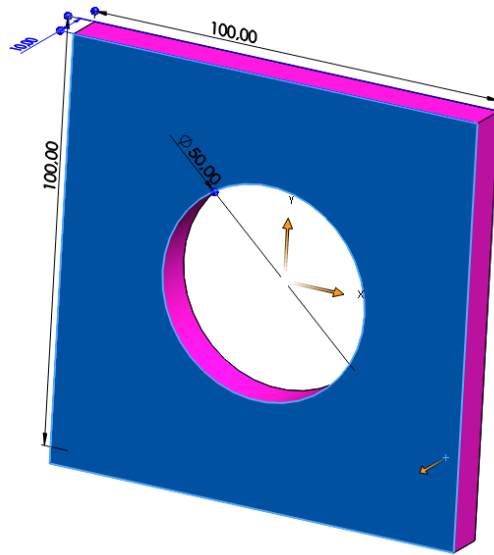


Şekil 1. Açık kaynak kodlu Dream Maker 3B yazıcı

İlk olarak, seçilen deney numunesinin tasarımı Şekil 2’de üzerinde ölçüleri gösterilen parça SolidWorks kullanılarak modellendi. Seçilen süreç parametrelerinin sayısına ve seviyelerine dayanılarak bir deney tasarımı (DOE) çerçevesi geliştirildi. Daha gerçekçi yanıtlar üretmek ve daha anlamlı ve doğru tahminler sağlamak için her işlem parametresi için üç seviye kullanılmıştır (Tablo 2)

Tablo 1. Kullanılan açık kaynak kodlu üç boyutlu yazıcının teknik kapasite özellikleri

Baskı boyutu:	Birim	200 × 200 × 200
Maksimum çözünürlük:	mm	0.1 mm-0.4
XY eksen konumlandırma doğruluğu:	mm	0.012
Nozul çapı:	mm	0.4 mm
Giriş voltajı:	V	100 V-240
Çalışma gerilimi:	V	12
Uyumlu yazılım:	-	Cura, Slic3r
Dosya biçimi:	-	STL
Baskı Malzemesi:	-	PLA
Malzeme Çapı:	mm	1.75
Dolgu oranı	%	10
Katman kalınlığı	mm	0.200

**Şekil 2.** İş parçasının üç boyutlu tasarım görüntüsü ve ölçüleri.

Üç farklı seviyedeki diğer birçok proses parametresine sahip olmak ve geleneksel tam faktöriyel yöntem kullanılarak, kapsamlı bir deney sayısına ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle Taguchi yöntemi, daha az deneyden istatistiksel olarak geçerli sonuçlar elde etmek için benimsenmiştir. Taguchi tasarımında, Ortogonal diziler adı verilen özel bir diziler dizisi deneysel koşulların belirlenmesi için kullanılabilir. Toplam serbestlik derecesine bağlı olarak, uygun Ortogonal dizi seçilir. Bu durumda, L9 Ortogonal dizi (Tablo 3), parametrelerin karışık seviyelerini barındırmak için sanal ve fiziksel testler için seçilmiştir. Bu dizi, her deneme veya deneme için gereken işlem parametreleri ayarlarını belirlemiştir.

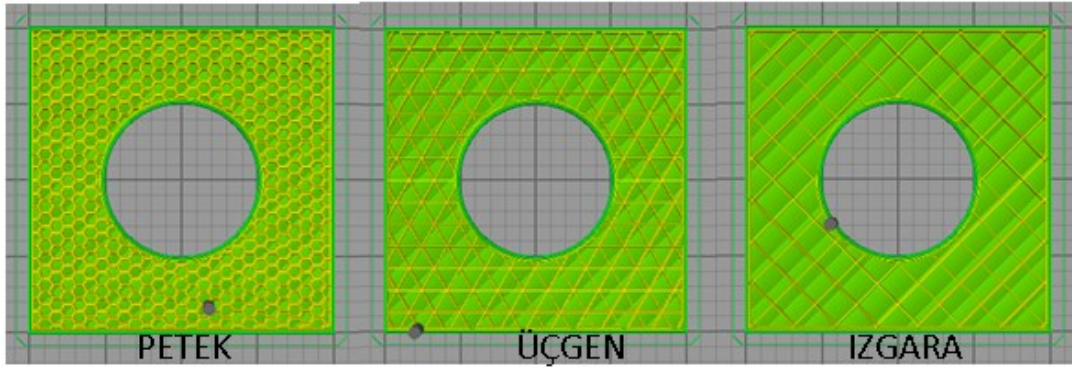
Tablo 2. İşlem parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Dolgu Tipi	Izgara	Üçgen	Petek
Katman Yüksekliği (µm)	100	200	300
Dolgu yoğunluğu (%)	10	20	30

Şekil 3'te iş parçasının, yazdırılırken hangi dolgu şekli ile oluşturulacağını ki bunlar ızgara, üçgen ve petek modelleri yaygın olarak kullanılan ve tercih parametreleridir. Kullanıcılar için hangi şeklin, üretim zamanını ve buna bağlı olarak maliyeti nasıl etkilediği hususu, bir merak konusu olmuştur.

Tablo 3. Taguchi L9 Deney düzeni

Deney No	Dolgu Tipi	Katman Yüksekliği (µm)	Dolgu Yoğunluğu (%)
1	Izgara	100	10
2	Izgara	200	20
3	Izgara	300	30
4	Üçgen	100	20
5	Üçgen	200	30
6	Üçgen	300	10
7	Petek	100	30
8	Petek	200	10
9	Petek	300	20

**Şekil 3.** İş parçası iç dolgu tipi görüntüleri.

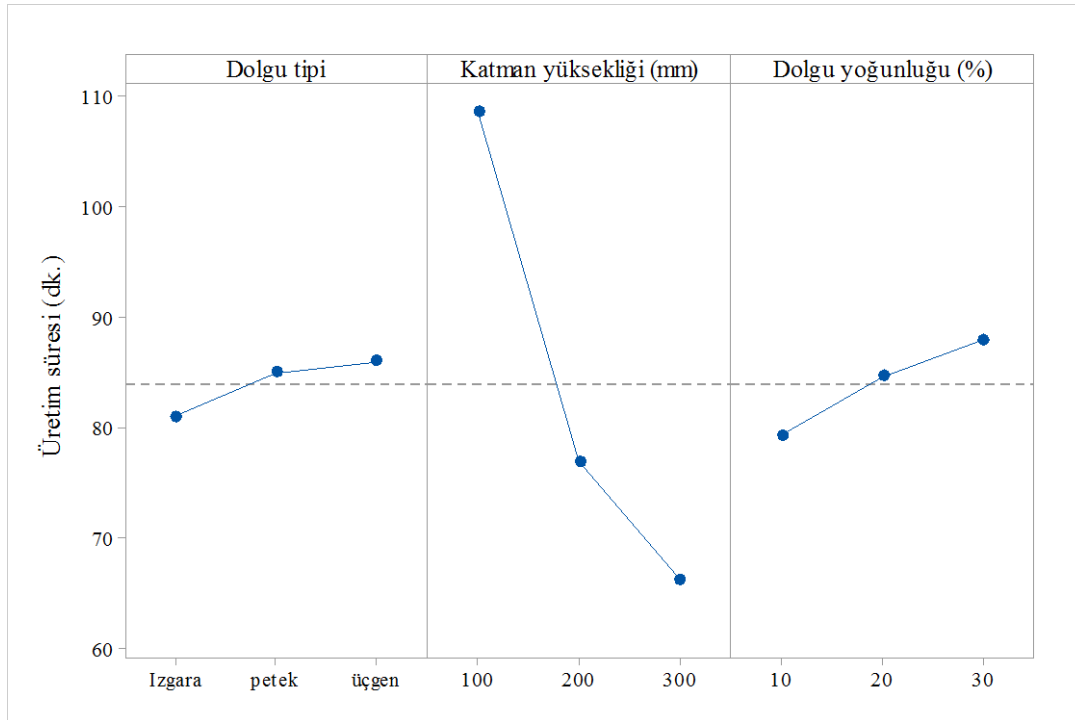
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında Dream Maker 3B yazıcı ile PLA filament kullanılarak yazdırma işlemi yapılmıştır. PLA malzemenin basılması için tabla sıcaklığı 50 °C, nozul 220 °C’de sabit olarak ayarlanıp 40x40x40mm boyutlarında parçalar oluşturulmuştur. Üç boyutlu yazıcıda filament kullanmak suretiyle, eriyik tabakalarının belli bir düzen ve şekilde inşa edilmesi sürecinde birden fazla girdi parametreleri vardır. Genel olarak çıktı parametreleri olarak incelenen çıktılar; yüzey pürüzlülüğü, ölçü doğruluğu, işlem süresi ve maliyet gibi ana etkilenen çıktı parametreleri olarak literatürde yerini almıştır. Bu çalışmada ise üretim süresini etkileyeceği muhtemel ve en çok değişkenlik arz eden parametreler seçilmiş olup bu parametre ve seviyelerinin üretim süresine etkileri irdelenmiştir. Tablo 4’te Taguchi L9 ortogonal deney düzenine göre gerçekleştirilen deneylerde yapım süresi, filament uzunluğu ve parça ağırlığının maliyet parametrelerine göre etkileri ve tepkileri gösterilmiştir.

Tablo 4. İşlem parametreleri ve sonuçları

No	Dolgu tipi	Katman Yüksekliği (mm)	Dolgu Yoğunluğu (%)	Yapım Süresi (dk.)	Filament Uzunluğu (mm)	Ağırlık (g)
1	Izgara	100	10	99	14725	44,27
2	Izgara	200	20	77	23373	70,28
3	Izgara	300	30	67	30240	90,92
4	Üçgen	100	20	111	17016	51,16
5	Üçgen	200	30	81	24882	74,81
6	Üçgen	300	10	66	29397	88,39
7	Petek	100	30	116	18206	54,74
8	Petek	200	10	73	21806	65,56
9	Petek	300	20	66	29699	89,3

Şekil 4’te parametrelerin ana etkiler grafiği verilmiştir. Bu grafikte seçilen üç parametrenin; dolgu tipi, katman yüksekliği ve dolgu yoğunluğu, her bir seviyenin üretim süresine katkısı sinyal gürültü oranları etki ettirilerek çıktı alınmıştır. Grafikte en küçük en iyidir kriteri seçilmiştir. Dolgu tipi için en uygun seçenek ızgara şekli olmuştur, katman yüksekliği için ise 300 mikron yükseklik üretim süresinin kısa olması için ideal olmuştur. Yine üçüncü ve son işlem parametresi olan dolgu yoğunluğu ise, % 10 değeri sürenin minimum olması için gerekli seviye olmuştur. Bu çalışma kapsamında çıktının sadece imal süresi temel alındığı için elde edilen parametreler yüzey pürüzlülüğü, ölçü doğruluğu ve mekanik dayanım için ideal olmayabilir. Bu çalışma kapsamında seçilen parametrelerden %87 etki oranı ile üretim süresine en etkili faktör katman yüksekliği olmuştur. Örnek olarak 100 µm katman kalınlığında yapılan bir işlem 1 mm yüksekliğindeki bir bölgeyi oluştururken 10 katman yapılarak elde edilirken 300 µm lik katman yüksekliğinde, 3 seferde aynı kalınlık elde edilebilecektir. Gidilen veya kat edilen yol mesafesi arttığı için üretim süresi ve buna bağlı olarak toplam tüketilen filament ve elektrik sarfiyatı, artış gösterecektir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak yüzey kalitesinin, ölçü tamlığının ve mekanik dayanımının fazla önemli olmadığı baskılarda, katman yüksekliği yüksek tutulabilir. 0.4 mm nozul çapında, maksimum 350 µm lik katman kalınlığı seçilebilir.



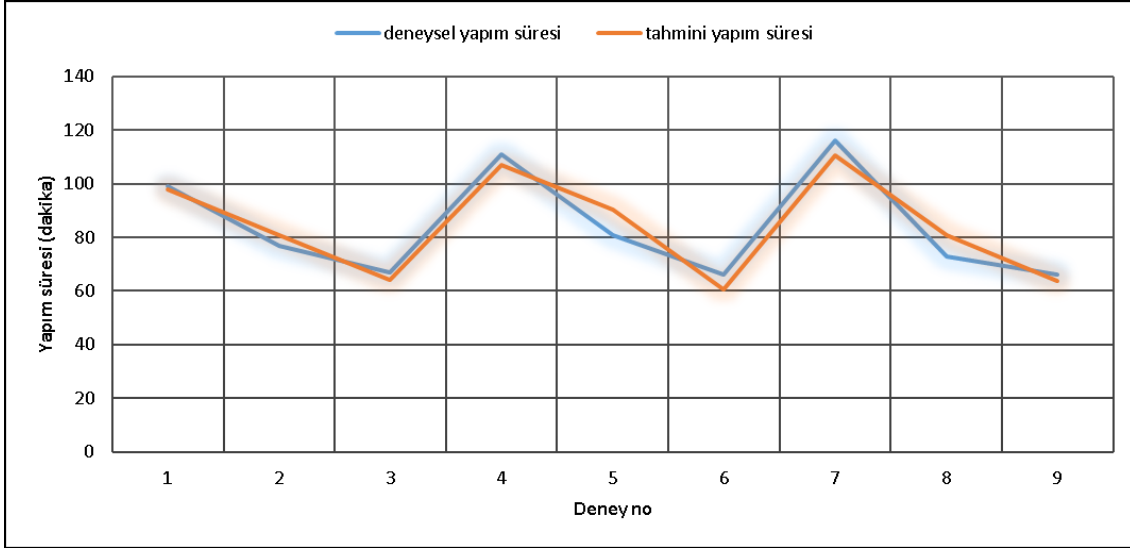
Şekil 4. Parametrelerin üretim süresine etki grafiği

Yapım süresi tahmini için geliştirilen basit doğrusal regresyon denkleminde %95 güven aralığında tahmin sağlayan denklemler elde edilmiştir. Denklemler sırasıyla aşağıda 1, 2 ve 3 verilmiştir. Izgara tipi için yapım süresi doğrusal tahmin denklem 1’de, petek tipi için yapım süresi doğrusal tahmin denklem 2’de ve üçgen tipi için yapım süresi doğrusal tahmin denklem 3’te verilmiştir. Şekil 6’da elde edilen basit doğrusal regresyon denklemi ile tahmin edilen üretim süresinin, gerçek üretim süresi ile olan karşılaştırılması verilmiştir. Gerçek ile tahmin edilen değerler %5 farkı geçmemiştir. İşlem parametrelerinin üretim süresi üzerinde ne kadar etkili olduğu, Şekil 5’te verilen pasta grafikte gösterilmiştir. Verimli makine hacmi kullanımı için tek bir kurulumda, birden fazla parça üretmek önemli maliyet ve zaman tasarrufu da sağlanabilir. Waghchore [12], eriyik yığıma modellemede (FDM) minimum yapım süresi için optimum yapıyı oryantasyon açısının belirlenmesini amaçlamıştır.

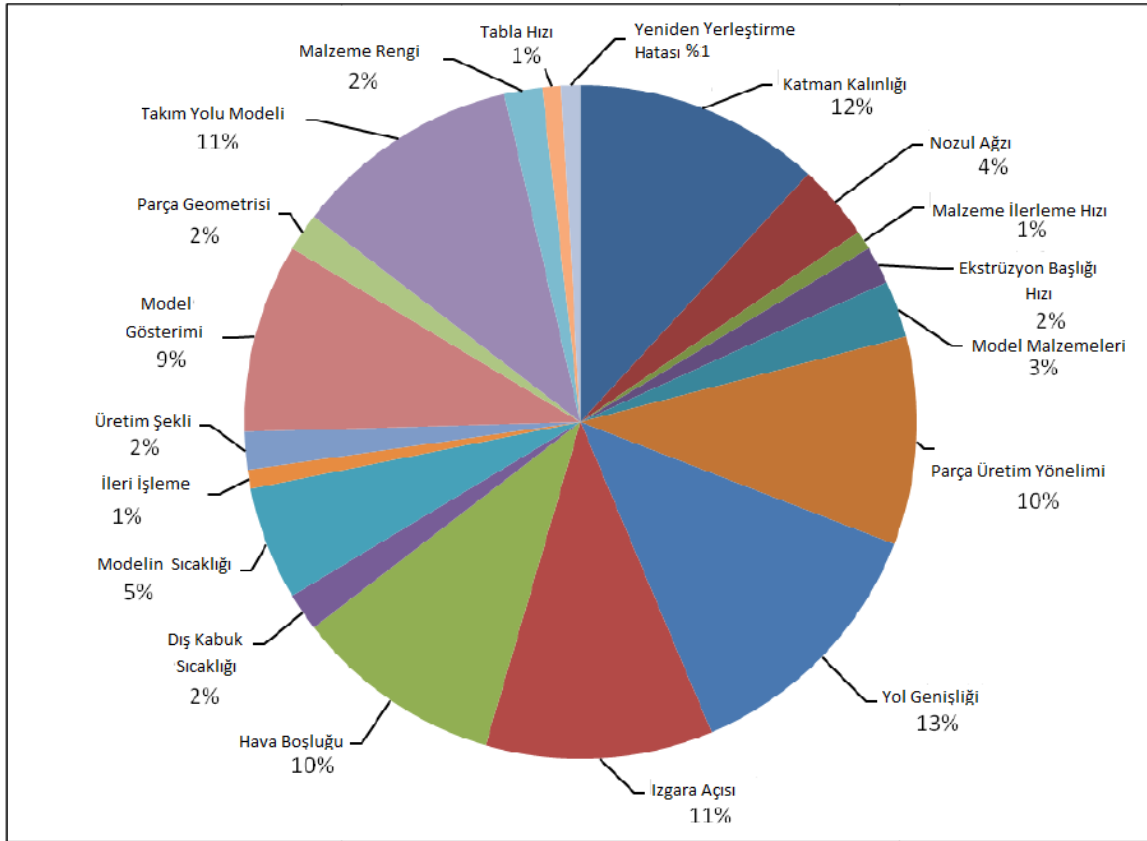
$$\text{Yapım süresi (dak)} = 114,7 - 0,2117 \text{ Katman yüksekliği (mm)} + 0,433 \text{ Dolgu yoğunluğu (\%)} \quad (1)$$

$$\text{Yapım süresi (dak)} = 118,7 - 0,2117 \text{ Katman yüksekliği (mm)} + 0,433 \text{ Dolgu yoğunluğu (\%)} \quad (2)$$

$$\text{Yapım süresi (dak)} = 119,7 - 0,2117 \text{ Katman yüksekliği (mm)} + 0,433 \text{ Dolgu yoğunluğu (\%)} \quad (3)$$



Şekil 5. Gerçek üretim süreleri ile tahmin edilen sürelerin karşılaştırılması.



Şekil 6. FDM parçalarının imalatında etkili parametrelerin dağılımı [13].

3.1. Doğrulama Deneyleri

Optimum proses parametrelerinin performanslarını doğrulamak için doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 5 'ten, optimize edilmiş parametrelerin, yanıt değişkenleri üretim zamanı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gözlemleyebiliriz. Optimize edilmemiş parametreler yani başlangıç parametreleri dolgu tipi (ızgara), katman yüksekliği (100 µm) ve dolgu yoğunluğu (%) dir. Bu parametreler Şekil 4'te verilen üretim süresini en düşük yapan parametreler seçilerek programda değer tahmini yapılmıştır. Tahmin edilen değer 58 dakika olmuştur. Bu parametreler seçilerek yapılan doğrulama deneyi sonucunda üretim süresi 60 dakika olarak elde edilmiştir. Tahmin edilen değerle

gerçek değer arasında fark, %3'ü aşmamıştır. Elde edilen tüm bu bilgiler ve sonuçlar literatürle paralellik göstermektedir [11-24].

Tablo 5. Doğrulama deneyleri ve sonuçları.

Parametreler	Birim	Başlangıç	Optimize	Deneyel
Dolgu Tipi	-	Izgara	Izgara	Izgara
Katman Yüksekliği	(μm)	100	300	300
Dolgu yoğunluğu	(%)	10	10	10
Ölçülen değer	(dk.)	99	58	60

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu makale, 1.75 mm PLA filament ile hazırlanan iş parçalarının üretim süresi için işlem parametrelerinin optimizasyonunu yaparak sunmuştur. En kısa sürede ürün elde etmek için, Taguchi'nin deneysel tasarımı deneyleri yürütmek için kullanılmıştır. Bu amaçla deney için L9 ortogonal dizi seçilmiştir. Dokuz sayıda deney L9 (3^3) ortogonal diziye göre tasarlanmıştır. Bu çalışma kapsamında ele alınan parametreler dolgu tipi, katman kalınlığı ve dolgu yüzdesidir. Üretim süresinin minimum olması ve en iyi çözümü belirlemek için objektif değerlerin karşılık gelen en iyi değerlerinden, maksimum sapma toplamını en aza indirme kriteri kullanılmış ve dolgu tipi ızgara, katman yüksekliği 300 μm ve dolgu oranı %10 olması gerektiği saptanmıştır. Çalışmada, katman yüksekliğinin ve dolgu oranında artması, yapım süresini kısaltırken kullanılan filament uzunluğu ve üretilen parçanın ağırlığını değiştirtildiği görülmüştür. Üretilen parça ağırlığı ise iç dolgu oranı ve katman yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Yüzey kalitesi, ölçü tamlığı ve mekanik dayanımın önemli olmadığı görsel parça üretiminde, üretim süresini düşürmek için katman yüksekliği büyük, dolgu oranını düşük ve ızgara tipi dolgu modeli olarak seçilmelidir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar açık kaynak kodlu üç boyutlu yazıcılarda farklı sonuçların elde edilmesini sağlayabilmiştir. Kullanıcılara kendi yazıcıları için deneme çalışmaları yapmaları önerilir. Üretim zamanı için; 3 μm katman yüksekliği, ızgara tipinde dolgu kullanımı ve %10'luk dolgu oranı, optimum ve anlamlı olduğu belirlenen işlem parametreleridir. Tahmin edilen üretim süresi ile optimum değerler arasında gerçekleştirilen deneysel fark %3'ü geçmemiştir.

TEŞEKKÜR

KÜ-BAP-01 / 2016-61 proje numaralı bu çalışma Kastamonu üniversitesi bilimsel araştırmalar koordinatörlüğü BAP kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar Kastamonu üniversitesi bilimsel araştırmalar koordinatörlüğüne teşekkür eder. Yazarlar ayrıca Kastamonu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanlığına laboratuvar faaliyetlerine verdikleri maddi manevi destekten ötürü teşekkür eder.

5. KAYNAKLAR

- [1] A. Sung-Hoon, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, P. K. Wright. "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS", Rapid prototyping journal, 2002 (8-4) 248-257
- [2] K. P. Thrimurthulu, P. M. Pulak, M. Pandey, N. V. Reddy. "Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004 (44- 6) 585-594
- [3] R. Anitha, S. Arunachalam, P. Radhakrishnan. "Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling", Journal of Materials Processing Technology, 2001 (118- 1,3) 385-388
- [4] G. Kumar, G. Pavan, S. P. Regalla. "Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM)", Trans Tech Publications- In Applied Mechanics and Materials, 2012 (110) 2245-2251
- [5] R. Rao, D. Venkata, P. Rai. "Optimization of fused deposition modeling process using teaching-learning-based optimization algorithm", Engineering Science and Technology, 2016(19-1) 587-603
- [6] P. Pitayachaval, K. Masnok. "Feed rate and volume of material effects in fused deposition modeling nozzle wear", 4th International Conference on In Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 2017 (1) 39-44

- [7] Z. Zhu, V. Dhokia, S. T. Newman. "A new algorithm for build time estimation for fused filament fabrication Technologies", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016 (12) 2214-2228
- [8] E. Fodran, M. Koch, U. Menon. "Mechanical and dimensional characteristics of fused deposition modeling build styles", In Solid Freeform Fabrication Proc, 1996(1) 419-442
- [9] G. Teitelbaum, A. Linda, C. Schmidt, Y. Goer. "Examining potential design guidelines for use in fused deposition modeling to reduce build time and material volume", In ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 2009(1) 73-82
- [10] G. Kumar, G. Pavan, S. P. Regalla. "Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM)", In Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, 2012 (110) 2245-2251
- [11] F. Ali, B. V. Chowdary, J. Maharaj. "Influence of some process parameters on build time, material consumption, and surface roughness of FDM processed parts: inferences based on the Taguchi design of experiments", In Proceedings of The 2014 IACJ/ISAM Joint International Conference, 2014, Orlando-Florida
- [12] P. Sreedhar, C. M. Manikandan, G. Jothi. "Experimental Investigation of Surface Roughness for Fused Deposition Modeled Part with Different Angular Orientation", International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 2012 (5-3) 21-28
- [13] R. K. Waghchore. "Determination of build orientation of rapid prototyping (RP) components for optimum builds time", Int J Adv Technol Eng Res., 2017 (2-2) 27-31