



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

FFF/FDM YÖNTEMİNDE TAGUCHİ DENEY TASARIMI İLE PARAMETRE OPTİMİZASYONU

PARAMETER OPTIMIZATION IN FFF/FDM METHOD
USING TAGUCHI EXPERIMENTAL DESIGN

Yazarlar (Authors): Selin ALTUN^{ID}, Zeynep KAYĞIN^{ID}, Ali Fatih HALİLOĞLU^{ID}, Rümeysa KOCA^{ID}, Hasan BAŞ^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Altun S., Kaygın Z., Haliloğlu A. F., Koca R., Baş H., “FFF/FDM Yönteminde Taguchi Deney Tasarımı ile Parametre Optimizasyonu” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(2): 154-161, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1321818

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

FFF/FDM YÖNTEMİNDE TAGUCHİ DENEY TASARIMI İLE PARAMETRE OPTİMİZASYONU

Selin ALTUN^a, Zeynep KAYĞIN^a, Ali Fatih HALİLOĞLU^a, Rümeysa KOCA^a,
Hasan BAŞ^{*a}

^a Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: hasan.bas@omu.edu.tr

(Geliş/Received: 12.01.2024; Düzeltme/Revised: 07.06.2024; Kabul/Accepted: 10.07.2024)

ÖZ

Bu çalışmanın amacı eriyik yığma teknolojisinde (Fused Filament Fabrication (FFF) veya Fused Deposition Modeling (FDM)) baskı kalitesini artırmak ve baskı parametrelerinin etkilerini araştırmaktır. Bu kapsamda polilaktik asit (PLA) filament kullanılmış ve Taguchi parametre optimizasyonu ile katman kalınlığı, ekstrüder sıcaklığı, fan hızı, duvar baskı hızı ve geri çekme mesafesi gibi baskı parametreleri optimize edilmiştir. Taguchi deney tasarımı kullanılarak her bir faktör için 5 farklı seviyede toplam 25 numune üretilmiştir. Numuneler, sezgisel olarak kalite puanlaması yöntemiyle değerlendirilmiş ve her biri 1 ile 10 arasında puanlanmıştır. Baskı parametrelerinin ürün kalitesine etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiş olup, baskı esnasında karşılaşılan hatalar tanımlanarak çözüm önerileri sunulmuştur. Araştırma sonucunda, optimal baskı parametreleri olarak 0,24 mm katman kalınlığı, 200 °C ekstrüder sıcaklığı, 60 mm/s fan hızı, 24 mm/s duvar baskı hızı ve 0,6 mm/s geri çekme hızı belirlenmiştir. Ekstrüder sıcaklığının artması baskının genel kalitesini düşürürken diğer parametrelerin değişimi doğrusal bir etki yaratmamıştır. Bu araştırma, FFF metoduyla üretilen parçaların genel kalitesini ve üretim süreçlerini optimize etmeyi hedeflemektedir. Çalışmada kullanılan metodolojinin endüstriyel uygulamalarda benimsenmesi, daha yüksek kalite ve verimlilik sağlanmasına ve FFF teknolojisinin daha geniş bir kullanım alanına sahip olmasına katkıda bulunabilir.

Anahtar Kelimeler: Eriyik Yığma Yöntemi, FFF, FDM, Taguchi, Deney Tasarımı.

PARAMETER OPTIMIZATION IN FFF/FDM METHOD USING TAGUCHI EXPERIMENTAL DESIGN

ABSTRACT

This study aims to enhance the print quality and investigate the effects of print parameters in Fused Filament Fabrication (FFF) or Fused Deposition Modeling (FDM) technology. In this context, polylactic acid (PLA) filament was used, and print parameters such as layer thickness, extruder temperature, fan speed, wall print speed, and retraction distance were optimized using the Taguchi parameter optimization method. A total of 25 samples were produced using the Taguchi experimental design, with five different levels for each factor. The samples were evaluated using an intuitive quality scoring method, with each sample being rated between 1 and 10. The effects of the print parameters on product quality were analyzed in detail, and errors encountered during printing were identified with proposed solutions. As a result of the research, the optimal print parameters were determined to be a layer thickness of 0.24 mm, an extruder temperature of 200 °C, a fan speed of 60 mm/s, a wall print speed of 24 mm/s, and a retraction speed of 0.6 mm/s. While increased extruder temperature generally decreased print quality, changes in the other parameters did not produce a linear effect. This study aims to optimize the quality and production processes of parts produced using the FFF method. If adopted in industrial applications, the methodology used in this study could contribute to higher quality and efficiency and a more comprehensive range of applications for FFF technology.

Keywords: Fused Deposition Modeling, FFF, FDM, Taguchi, Experimental Design.

1. GİRİŞ

FFF, nesnelerin 3 boyutlu (3D) model verilerinden katmanlar halinde üretildiği bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntem, karmaşık parçaların hızlı ve etkili bir şekilde üretilmesine olanak tanır. Ancak, FFF'in zayıf bir yönü, ürünlerin yüzey kalitesinin genellikle istenen düzeye ulaşamamasıdır. Bu nedenle, son ürünlerin kalitesini iyileştirmek ve beklentileri karşılamak için ayrıca bitirme işlemlerine ihtiyaç duyulabilir. Bu işlemler hem zaman alıcıdır hem de maliyetlidir. FFF yöntemi için kritik öneme sahip olan bir dizi parametre bulunmaktadır. Bu parametreler, FFF yönteminin sonuçlarını belirleyen ve kalitesini etkileyebilen faktörlerdir.

FFF yönteminde ürün kalitesini arttırmak için baskı parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Taguchi metodu, parametre optimizasyonu için kullanılan etkili ve basit bir yöntem olup mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır [1-3]. Taguchi metodu eklemeli imalat çalışmalarında da kullanılmıştır [4-7]. Kartal [8] eriyik yığıma yönteminde süreç parametrelerinin optimizasyonunu Taguchi metodolojisi kullanarak gerçekleştirmiştir. Kartal [8], PLA filament kullanarak ürettiği numunelerde katman kalınlığı ve raster genişliğinin yüzey kalitesini etkilediğini göstermiştir. Baş, Elevli and Yapıcı [9] çalışmasında, FFF tipi yazıcılardaki üretim süreçlerini hata ağacı analizi (FTA) ile incelemiş ve üretim sırasında meydana gelebilecek hataları detaylı bir şekilde ortaya koymuşlardır. Bacak, Varol ÖZkavak and Tatlı [10] çalışmalarında, FFF yöntemiyle üretilen PLA numunelerin çekme dayanımını etkileyen işlem parametrelerini detaylı bir şekilde ele almıştır. Günay, Gündüz, Yılmaz, Yaşar and Kaçar [11], FFF baskı parametrelerini PLA numunelerin çekme dayanımı üzerinden incelemiş ve Taguchi L₁₈ deney tasarımı ile bu parametrelerin etkilerini değerlendirmiştir. Bilgin [12] tarafından yürütülen çalışmada ise ABS malzeme ile üretilen parçalarda baskı parametrelerinin etkilerini inceleyerek optimum parametreleri belirlemiştir. Seçgin and Kahraman [13], PETG filament kullanarak yapılan parçalarda yüzey pürüzlülüğü üzerine parametre optimizasyonu yapmış ve katman kalınlığının en önemli parametre olduğunu bulmuşlardır. Sood, Ohdar and Mahapatra [14], FFF sürecindeki kritik parametrelerin boyutsal doğruluğa etkisini Taguchi ve gri Taguchi

yöntemleriyle belirlemişlerdir. Zhang and Peng [15], FFF performansını belirleyen dört kritik süreç parametresini Taguchi ve bulanık kapsamlı değerlendirme ile optimize etmişlerdir. Bu örnek çalışmalar, FFF teknolojisinin çeşitli yönlerini keşfetme ve optimize etme çabalarını ortaya koymaktadır.

FFF yöntemi ile ilgili incelenmesi gereken birçok derleme makale de bulunmaktadır. Brenken, Barocio, Favalaro, Kunc and Pipes [16] fiberle güçlendirilmiş polimerlerin eriyik yığıma yöntemiyle üretimine yönelik çalışmaları inceleyerek derleme bir makale yapmışlardır. Daminabo, Goel, Grammatikos, Nezhad and Thakur [17] ise polimer malzeme üretimini ve FFF tekniğini incelemiş ve FFF'nin ölçeklenebilirlik, maliyet etkinliği ve geniş malzeme işleme yeteneklerini vurgulamıştır. Sathies, Senthil and Anoop [18], polimer temelli eklemeli imalat süreçleri ve FFF uygulamalarındaki ilerlemeleri özetlemiş, FFF'nin konvansiyonel üretim sorunlarına çözüm sunduğunu belirtmiştir.

Bu çalışmada FFF yönteminde Taguchi deney tasarımını kullanarak parametre optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon parametreleri olarak katman kalınlığı, ekstrüzyon sıcaklığı, soğutma fan hızı, duvar baskı hızı ve geri çekme hızı belirlenmiştir. Katman kalınlığı, baskı kalitesini etkileyen önemli bir parametredir; ince katmanlar daha pürüzsüz yüzeyler sunarken, kalın katmanlar hızlı baskı sağlar ancak yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilir. Ekstrüzyon sıcaklığı, malzemenin akışkanlığını ve yapışkanlığını düzenlerken, fan hızı baskı sırasında soğutmayı kontrol eder. Baskı hızı, üretim hızını etkiler; daha yüksek hızlar hızlı üretimi sağlar ancak yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilir. Geri çekme hızı filament akışını düzenler ve doğru ayarlandığında çekme ve deformasyonları önler.

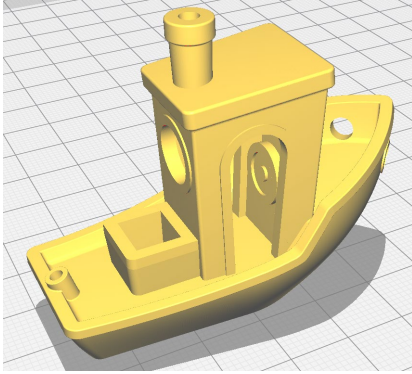
Baskı parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanması, 3D baskı ürünlerinin kalitesini arttırmak ve üretim süreçlerini yönetmek için kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla, bu parametrelerin uygun bir şekilde optimize edilmesi, 3D baskı ürünlerinin kalitesini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda endüstriyel uygulamalarda daha etkili bir kullanımını da mümkün kılar. Bu, FFF teknolojisinin endüstriyel üretimde daha yaygın bir şekilde benimsenmesine katkı sağlayabilir ve ürünlerin

daha hızlı ve maliyet etkin bir şekilde üretilmesini teşvik edebilir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Malzeme ve Ekipman

Numunelerin üretiminde Makerbot Replicator 5th Generation 3D yazıcı, malzeme olarak da PLA filament kullanılmıştır. Baskı modeli olarak 3B yazıcıların performansını denemede sıklıkla kullanılan 3DBenchy modeli seçilmiştir. Bu model yüzey kalitesi, model doğruluğu ve çarpılma gibi sorunları gözler önüne sererek 3D yazıcı performansını kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi sağlar [19]. 3D Benchy %80 ölçekli olarak dilimlenmiş olup X, Y, Z eksenlerinde sırasıyla 48 mm, 24,08 mm ve 37,4 mm ölçülere sahiptir (Şekil 1).

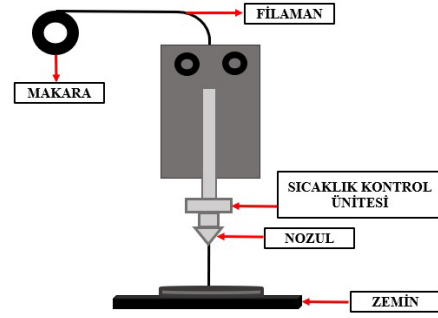


Şekil 1. #3DBenchy tasarımının üç boyutlu yazıcı programında yerleşim görüntüsü

2.2.FFF Metodu

Eklemeli imalat teknolojileri, konvansiyonel talaşlı imalat teknolojilerinden farklı olarak, üç boyutlu bilgisayar destekli (CAD) verilerden fiziksel parçaları katman katman oluşturma ve sadece ihtiyaç duyulduğu kadar malzeme kullanma prensibine dayanmaktadır [17]. Bu teknolojiler arasında yer alan malzeme ekstrüzyonu, ASTM standartlarına göre yedi farklı kategoride incelenen bir eklemeli imalat yöntemidir ve FFF, bu kategorideki malzeme ekstrüzyonu yöntemlerinden biri olarak bilinir [20]. Eriyik yığma teknolojisinde genellikle ince plastik tel veya filament kullanılır; ancak zaman zaman, haznedan beslenen plastik granül de tercih edilebilir. Plastik malzeme, nozul içindeki bir ısıtıcı tarafından ergime noktasının hemen üzerindeki bir sıcaklıkta tutularak ekstrüzyon işlemine tabi tutulur. Nozuldan çıkan eriyik plastik, tablaya ulaştığında anında sertleşir ve tablanın yüzeyine yapışır. Bir katman tamamlandığında platform aşağıya iner

ve nozul diğer katmanı inşa eder. Katman kalınlığı ve düşey boyut hassasiyeti nozul çapına bağlıdır. FFF sisteminin çalışma prensibi Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. FFF teknolojisinin şematik gösterimi

2.3. Taguchi Metodu Deney Tasarımı

Taguchi'nin deneysel tasarım yaklaşımı, ürün ve süreçteki değişkenliği en aza indirmek amacıyla kullanılır. Bu yaklaşım, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçmeyi hedefler [21]. Taguchi metodu, ortogonal diziler olarak adlandırılan belirli sıralamaları kullanır. Bu standart diziler, performans parametrelerini etkileyen tüm faktörlerle ilgili en kapsamlı bilgiyi sağlamak ve en az sayıda deney yapmak için bir yöntem önermektedir [8].

Taguchi yöntemi, çok sayıda deneyi daha etkili bir şekilde yönetmek amacıyla geliştirilmiş bir optimizasyon yaklaşımıdır. Kalite iyileştirmeyi hedefleyen bu yöntem, deney tasarımı ve parametre optimizasyonu ile ürün veya süreç tasarımındaki faktörlerin etkilerini değerlendirir, böylece istenilen kalite seviyesine daha etkili bir şekilde ulaşılabilir. Taguchi yöntemi, faktörlerin etkileşimleri ve varyasyonun etkilerini göz önünde bulundurarak belirli faktörlerin sistemdeki önemini belirlemeyi amaçlar. Bu yöntem, süreçlerin daha etkin ve kararlı hale getirilmesinde önemli bir rol oynar.

Bu çalışma, FFF yöntemi kullanılarak PLA filament malzemeden üretilen numunelerin baskı kalitesinde işlem parametrelerinin etkisini belirlemeyi amaçlamıştır. Baskı deseni Diamond Fill (Fast) olarak belirlenmiştir. İç dolgu yoğunluğu %80, destek yoğunluğu %8 ve iç baskı hızı 90 mm/s olmak üzere sabit parametre; katman kalınlığı, ekstrüder sıcaklığı, fan hızı, duvar baskı hızı ve geri çekme

mesafesi parametreleri ise bağımsız değişken olarak seçilmiştir.

Belirlenen parametrelerin, FFF yöntemi ile üretilen parçaların baskı kalitesine göreceli katkısını değerlendirmek amacıyla bir Taguchi L₂₅ deney yöntemi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Deney tasarımında katmankalınlığı aralığı 0,16-0,20 mm, ekstrüder sıcaklık aralığı 200-220 °C, Fan hızı %60-100, Duvar baskı hızı 12-28 mm/s ve geri çekme mesafesi 0,4-0,8 mm aralığında olacak şekilde belirlenmiştir (Çizelge 1).

2.4. Sezgisel Değerlendirme

Deneylerin değerlendirme sürecinde kullanılan kalite puanlaması, üretilen baskıların sezgisel bir puanlama yöntemi kullanılarak incelenmesine dayanmaktadır.

Bir baskı için puanlama yapılırken, söz konusu baskıda görülen hatalar 1 ile 10 arasında puanlanmış ve her bir hatanın şiddeti eşit kabul edilmiştir. Bu puanlama yönteminde 1 yüksek kaliteyi temsil ederken, 10 düşük kaliteyi ifade etmektedir. Örneğin, sızıntı ve iplik hatası için baskının iç kısmını görmeye engel olacak kadar yoğun hata görülürse 10 puan, estetik görünüme engel olmayacak şekilde çok az rastlanırsa 1 puan verilmiştir. Baskıda görülen hatalar 4 farklı gözlemci tarafından önem derecesine göre puanlandıktan sonra ortalamaları alınarak hata değerleri bulunmuştur. Sonuç olarak bir baskının sezgisel kalite puanı, baskıda görülen hata değerlerinin ortalaması alınarak bulunur.

Sezgisel puanlama süreci, gözlemcilerin kişisel deneyim ve estetik tercihlerine dayanmaktadır ve elde edilen sonuçlar makalenin sonuç bölümünde detaylı olarak ele alınmıştır. Bu şekilde, farklı parametre ayarlarının ürün kalitesine olan etkisi sistematik bir şekilde analiz edilerek, en uygun parametre kombinasyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır.

3.DENEYSEL BULGULAR

3.1. FFF Yöntemin Görülen Hatalar

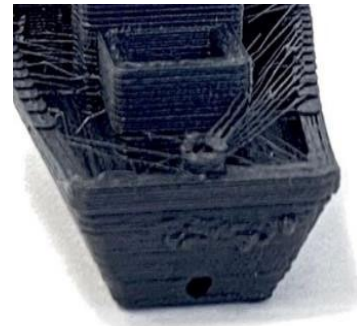
FFF'in aşamaları katı modellerin oluşturulması, dilimlenmesi, basılması ve temizleme olarak belirtilebilir. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları ile oluşturulan model, evrensel STL formatında kaydedilir. Sonrasında dilimleme ve G-kod oluşturma işlemleri dilimleme programı ile gerçekleştirilir.

Oluşturulan G-kod dosyası, 3D yazıcıya aktararak baskı süreci başlatılır. Baskı hataları dilimleme aşamasındaki kullanıcı ayarlarından da kaynaklanabilir. Bu nedenle, özellikle dilimleme aşamasında doğru ayarlamalar yapılmalıdır.

Baş, Eevli and Yapıcı [9] yaptıkları çalışmada FFF yönteminde oluşabilecek hataları detaylı bir şekilde açıklamışlardır. Bu hatalar arasında ekstrüzyon kesintileri, yan yüzeylerde bozulmalar, sarkmalar, boyutsal hatalar, küçük bölümlerin basılmaması, aşırı ısınma, üst yüzeyde çizikler, bükülme, destek problemleri, kıvrılmış kenarlar, delik ve boşluk problemleri, baskı başlangıç problemleri, fil ayağı ve görünür iç dolgu gibi çeşitli sorunlar bulunmaktadır. Bu hatalar, kullanıcıların yanlış dilimleme ayarları, mekanik sorunlar ve sıcaklık dalgalanmaları gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanmaktadır. Bu hatalara sebep olan toplam 49 adet kök neden belirlemişlerdir. Mekanik sorunlar, sıcaklık ve kalibrasyon hatası gibi faktörler baskı sırasında modelin yanlış basılmasına neden olabilir. Bu çalışma kapsamında üretilen numunelerde literatürde belirtilen hataların bir kısmı tespit edilmiştir. Bu hatalar, deney numunelerinden alınan örnek görsellerle birlikte açıklanmıştır.

3.1.1. Yan Yüzeylerde Deformasyonlar

Yazdırma sırasında yüzey deformasyonları, damlacıklar, çizgiler ve dalgalı desenler gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Bunlar genellikle geri çekilme, mekanik hatalar, sıcaklık dalgalanmaları veya düzensiz ekstrüzyon kaynaklıdır (Şekil 3).



Şekil 3. Yan yüzeyde deformasyonlar

3.1.2. Sızıntı ve İplikler

Genellikle yanlış geri çekme mesafesi, düşük geri çekme hızı, aşırı yüksek sıcaklık veya uzun süreli ekstrüzyon olmadan yapılan hareketlerle ilgili

olarak tüylü veya saçlı görüntüler ortaya çıkabilir. Geri çekme mesafesi sızıntıya neden olabilir; düşük geri çekme hızı plastik sızıntısına yol açar. Aşırı sıcaklık ise plastik akışkanlığını artırarak sızıntıya sebep olabilir (Şekil 4).



Şekil 4. Sızıntı ve İplikler

3.1.3. Üst Yüzeyde Çizikler

Aşırı ekstrüzyon ve düzensiz dikey kaldırma ayarları, baskının üst yüzeyinde çiziklere neden olabilir. Bu sorunu çözmek için uygun dikey kaldırma ayarlarını etkinleştirmek veya ekstrüzyon çarpanı ayarlarını düşürmek etkili olabilir (Şekil 5).



Şekil 5. Üst Yüzeyde Çizikler

3.1.4. Katman Kayması

Katman kayması (Şekil 6), 3D baskıda katmanların istenmeyen konumlarda olmasıdır. Mekanik sorunlar veya düşük tabaka yapışkanlığı nedeniyle gerçekleşebilir. Sorunu çözmek için mekanik kontrol ve düzenli bakım önemlidir. Doğru yatak sıcaklığı ve tabaka yapıştırıcı ayarları ile katman kayması önlenir, daha stabil baskılar elde edilebilir.



Şekil 6. Katman Kayması

3.1.5. Destek Nedeniyle Alt Yüzeyde Sorunlar

Destek (raft veya support) nedeniyle düşük yüzey kalitesi, etkisiz köprüleme veya çöken desteklerle ortaya çıkar. Yanlış dilimleme ayarları nedeniyle meydana gelen bu sorunları çözmek için katman kalınlığı ve destek doluluk yüzdesi ayarları kontrol edilmelidir. Çökme riskini azaltmak için ise yeterli doluluk oranı ve kaliteli filament kullanımına dikkat edilmelidir (Şekil 7).



Şekil 7. Destek nedeniyle alt yüzeyin pürüzlülüğü

3.1.6. Baskının Yatağa Yapışmaması

Baskının yatağa yapışmaması sorunu, düşük tabaka yapışkanlığı, düzensiz baskı platformu seviyesi veya yetersiz yatak sıcaklığı gibi nedenlere bağlıdır. Sorunu çözmek için doğru baskı yatağı sıcaklığına, uygun tabaka yapışkanlığına ve düzgün seviyelenmiş bir baskı platformuna dikkat etmek önemlidir.

3.2. Taguchi Deney Parametreleri ve Kalite Değerlendirmesi

Bu çalışmanın kapsamında, Taguchi deney düzenine göre belirlenen parametre ayarları sırasıyla uygulanmış ve toplamda 25 farklı deney gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Çizelge 1'de sunulan Taguchi deney düzenine uygun olarak sistematik bir şekilde planlanmış ve uygulanmıştır. Bu deneylerin temel amacı, belirlenen parametrelerin çeşitli kombinasyonlarına bağlı olarak üretilen ürünlerin kalitesini değerlendirmektir.

Şekil 8, yürütülen analizde parametrelerin etkilerini ve seviyelerini gösteren ana etki

çizimini içermektedir. Analiz sürecinde, ortalama baskı kalitesi değerlerini belirlemek için "en küçük daha iyidir" kriteri benimsenmiştir. Bu kriter doğrultusunda, baskı hataları değerinin mümkün olduğunca düşük olması hedeflenmiş ve S/N oranları hesaplanmıştır. S/N oranının maksimize

edilmesi, belirli bir performans ölçütünü en üst düzeye çıkarmayı hedefler. Bu durumda, S/N analizi ile en yüksek kalite değeri elde edilebilir. Taguchi analizinden elde edilen optimize edilmiş işlem parametreleri ve bunlara karşılık gelen sıralama Çizelge 2'te gösterilmiştir.

Çizelge 1. Taguchi deney düzeni ve sezgisel kalite değerleri

Deney Numarası	Katman Kalınlığı (mm)	Ekstrüder Sıcaklığı (°C)	Fan Hızı (%)	Duvar Baskı Hızı (mm/s)	Geri Çekme Mesafesi (mm)	Sezgisel Kalite Değerleri
1	0,16	200	60	12	0,4	1,468
2	0,16	205	70	16	0,5	2,250
3	0,16	210	80	20	0,6	2,031
4	0,16	215	90	24	0,7	1,625
5	0,16	220	100	28	0,8	2,625
6	0,18	200	70	20	0,7	2,750
7	0,18	205	80	24	0,8	2,250
8	0,18	210	90	28	0,4	2,937
9	0,18	215	100	12	0,5	2,593
10	0,18	220	60	16	0,6	2,781
11	0,20	200	80	28	0,5	1,500
12	0,20	205	90	12	0,6	1,875
13	0,20	210	100	16	0,7	2,218
14	0,20	215	60	20	0,8	2,250
15	0,20	220	70	24	0,4	2,468
16	0,22	200	90	16	0,8	1,500
17	0,22	205	100	20	0,4	1,437
18	0,22	210	60	24	0,5	1,812
19	0,22	215	70	28	0,6	2,218
20	0,22	220	80	12	0,7	3,062
21	0,24	200	100	24	0,6	0,968
22	0,24	205	60	28	0,7	0,843
23	0,24	210	70	12	0,8	1,437
24	0,24	215	80	16	0,4	1,781
25	0,24	220	90	20	0,5	2,875

Çizelge 2: S/N oranlarına ilişkin yanıt tablosu

Seviye	Katman Kalınlığı	Ekstrüder Sıcaklığı	Fan Hızı	Duvar Baskı Hızı	Geri Çekme Mesafesi
1	-5,82	-3,77	-4,58	-5,98	-5,74
2	-8,46	-4,24	-6,74	-6,27	-6,63
3	-6,15	-6,14	-6,29	-6,86	-5,42
4	-5,69	-6,29	-6,34	-4,79	-5,63
5	-3,11	-8,80	-5,28	-5,33	-5,82
Fark (maks-min)	5,35	5,02	2,16	2,06	1,20

Bu analitik süreç, üç boyutlu üretimde arzu edilen ve tercih edilen yüksek baskı kalitesini elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, Çizelge 3'te en yüksek baskı kalitesi değerlerine ulaşmak için kullanılan optimum işlem parametreleri sunulmaktadır.

Çizelge 3: En yüksek baskı kalitesi değerleri için optimum işlem parametreleri

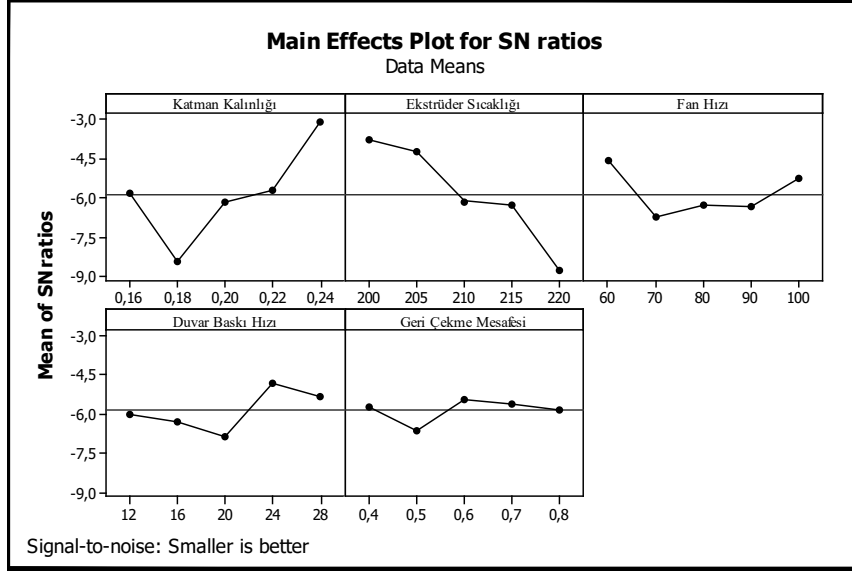
Katman Kalınlığı (mm)	Ekstrüder Sıcaklığı (°C)	Fan Hızı (%)	Duvar Baskı Hızı (mm/s)	Geri Çekme Mesafesi (mm)
0,24	200	60	24	0,6

4. SONUÇ

Bu çalışmada, FFF yöntemindeki baskı parametreleri Taguchi metoduyla optimize edilmiştir. Çalışmada katman kalınlığı, ekstrüder sıcaklığı, fan hızı, duvar baskı hızı ve geri çekme mesafesi parametreleri bağımsız değişken olarak seçilmiş ve bu parametrelerle ilgili olarak toplamda 25 adet örnek üretilmiştir. Üretilen numunelerin değerlendirme süreci, kalite puanlamasına dayanmaktadır. Bu puanlama sürecinde, belirli bir parametre kombinasyonu ile gerçekleştirilen baskılar,

gözlemcilerin kişisel deneyim ve estetik tercihlerine dayalı olarak sezgisel bir puanlama

yöntemi kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 8. Kalite değerleri için parametrelerin ana etkiler grafiği

Benchy modeli üzerinde meydana gelen hataların şiddeti eşit kabul edilerek, bu hatalar önem derecelerine göre 1 ile 10 arasında sezgisel olarak puanlanmıştır.

Yapılan deney numunelerinin incelenip sezgisel kalite puanlaması yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, yan yüzeyde deformasyon hata türüne ait en yüksek hata değeri 20 numaralı numunede gözlemlenmiştir. Sızıntı-iplik ve üst yüzeyde çizik sorunları yine 20 numaralı numunede en çok gözlemlenmiştir. Katman kayması problemi en çok 25. numunede ortaya çıkmışken alt yüzey problemi ise en çok 9. numunede oluşmuştur.

Sezgisel puanlar üzerinden yapılan Taguchi analizi sonucunda optimum baskı parametreleri belirlenmiştir. Analiz sürecinde, "en küçük daha iyidir" kriteri benimsenmiş ve ortalama baskı kalitesi değerleri belirlenirken baskı hataları değerinin mümkün olduğunca düşük olması hedeflenmiştir. Bu kriter doğrultusunda, S/N oranları hesaplanmıştır. S/N oranının maksimize edilmesi, belirli bir performans ölçütünü en üst düzeye çıkarmayı hedefler. Bu bağlamda, S/N analizi ile en yüksek kalite değeri elde edilebilir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, optimal baskı parametreleri ve kalite değerleri şu şekildedir:

- Optimum parametreler 0,24 mm katman kalınlığı, 200 °C ekstrüder sıcaklığı, 60 mm/s

fan hızı, 24 mm/s duvar baskı hızı, 0,6 mm/s geri çekilme hızı olarak bulunmuştur. Fakat bulunan bu optimum değerler makine ve ortama göre değişkenlikler gösterebilir.

- Taguchi Analizi sonucunda en düşük kalite değeri 3,062 olarak 0,22 mm katman kalınlığı, 220 °C ekstrüder sıcaklığı, 80 mm/s fan hızı, 12 mm/s duvar baskı hızı ve 0,7 mm/s geri çekilme hızı parametrelerine sahip olan 20 numaralı numunede ortaya çıkmıştır.

- En yüksek kalite değeri ise 0,24 mm katman kalınlığı, 205 °C ekstrüder sıcaklığı, 60 mm/s fan hızı, 28 mm/s duvar baskı hızı ve 0,7 mm/s geri çekilme hızı parametrelerine sahip olan 22 numaralı numunede 0,843 olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak Taguchi yöntemi ile FFF metodunda parametre optimizasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan deneysel yaklaşım, FFF yöntemiyle gerçekleştirilen 3D baskılarda kaliteyi artırmak ve istenmeyen hataları minimize etmek adına iyi bir örnek teşkil etmektedir.

KAYNAKLAR

1. Kara, F., Bulan, N., Akgün, M. and Köklü, U., "Multi-Objective Optimization of Process Parameters in Milling of 17-4 PH Stainless Steel using Taguchi-based Gray Relational Analysis", Engineered Science, Vol. 26, Pages 961, 2023.

2. Kara, F., Bayraktar, F., Savaş, F. and Özbek, O., “Experimental and statistical investigation of the effect of coating type on surface roughness, cutting temperature, vibration and noise in turning of mold steel”, *Journal of Materials and Manufacturing*, Vol. 1, Pages 31-43, 2023
3. Nas, E., Özbek, O., Bayraktar, F. and Kara, F., “Experimental and Statistical Investigation of Machinability of AISI D2 Steel Using Electroerosion Machining Method in Different Machining Parameters”, *Advances in Materials Science and Engineering*, Pages 1241797, 2021.
4. Baş, H., Yapıcı, F. and Ergün, E., “Effective use of adaptive slicing in binder jetting using Taguchi method and surface roughness measurement with image processing”, *Rapid Prototyping Journal ahead-of-print(ahead-of-print)*, 2024.
5. Giri, J., Sunheriya, N., Sathish, T., Kadu, Y., Chadge, R., Giri, P., Parthiban, A. and Mahatme, C., “Optimization of process parameters to improve mechanical properties of fused deposition method using taguchi method”, *Interactions* Vol. 245, Issue 1, Pages 87, 2024.
6. Singh, T. K., Birru, A. K. and Singh, K. N., “Optimizing the printing parameters for dimensional accuracy of distal femur bone by using Taguchi’s method”, *Journal of Engineering and Applied Science*, Vol. 71, Issue, Pages 10, 2024.
7. Wambua, J. M., Mwema, F. M., Akinlabi, S., Birkett, M., Xu, B., Woo, W. L., Taverne, M., Ho, Y.-L. D. and Akinlabi, E., “Optimisation of printing parameters of fused filament fabrication and uniaxial compression failure analysis for four-point star-shaped structures”, *Rapid Prototyping Journal* Vol. 30, Issue 5, Pages 885-903, 2024.
8. Kartal, F., “Optimization of fused deposition modeling process parameters”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Cilt 1, Sayı 1, Sayfa 49-56, 2017.
9. Baş, H., Eleveli, S. and Yapıcı, F., “Fault tree analysis for fused filament fabrication type three-dimensional printers”, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 19, Issues 5, Pages 1389-1400, 2019.
10. Bacak, S, Özkavak, H. V. ve Tatli, M., “FDM yöntemi ile üretilen PLA numunelerin çekme özelliklerine işlem parametrelerinin etkisinin incelenmesi”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, Cilt 9, Sayı 1, Sayfa 209-216, 2021.
11. Günay, M., Gündüz, S., H. Yılmaz, Yaşar, N ve Kaçar, R., “PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, Cilt, 23, Sayı 1, Sayfa 73-79, 2020.
12. Bilgin, M., “ABS Esaslı Numunelerin 3d Yazıcı ile Üretilmesinde İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Cilt 6, Sayı 2, Sayfa 236-249, 2022.
13. Seçgin, Ö. ve Kahraman, H., “PETG materyali kullanılarak FDM yöntemiyle eklemeli imalat işleminde yüzey pürüzlülüğünün parametrik optimizasyonu”, *International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences*, Cilt 1, Sayfa 623-626, 2023.
14. Sood, A. K., Ohdar, R.K. and Mahapatra, S.S., “Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method”, *Materials and Design*, Vol. 30, Issue 10, Pages 4243-4252, 2009.
5. Zhang, J.W. and Peng, A.H., “Process-Parameter optimization for fused deposition modeling based on Taguchi method”, *Advanced Materials Research*, Vol., 538-541, Pages 444-447, 2012.
16. Brenken, B., Barocio, E., Favaloro, A., Kunc, V. and Pipes, R. B., “Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review”, *Additive Manufacturing*, Vol. 21, Pages 1-16, 2018.
17. Daminabo, S.C., Goel, S., Grammatikos, S.A., Nezhad, H.Y. and Thakur, V.K., “Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems”, *Materials Today Chemistry*, Vol. 16, Pages 100248, 2020.
18. Sathies, T., Senthil, P. and Anoop, M.S., “A review on advancements in applications of fused deposition modelling process”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 26, Issues 4, Pages 669-687, 2020.
19. Anonymous, “3D Benchy”, <https://www.3dbenchy.com/>, October 24, 2023.
20. ASTM, “Standard terminology for additive manufacturing technologies”, <https://www.astm.org/f2792-12a.html>, October 20, 2023.
21. Canıyılmaz, E., “Kalite geliştirmede Taguchi Metodu ve bir uygulama”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2001