



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>

ABS ESASLI NUMUNELERİN 3D YAZICI İLE ÜRETİLMESİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

OPTIMIZATION OF 3D PROCESSING PARAMETERS USED FDM METHOD IN THE PRODUCTION OF ABS BASED SAMPLES

Yazarlar (Authors): Musa Bilgin^{ID*}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bilgin M., “Abs Esaslı Numunelerin 3d Yazıcı İle Üretilmesinde İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(2): 236-249, (2022).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1126200

Araştırma Makale/ Research Article

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

ABS ESASLI NUMUNELERİN 3D YAZICI İLE ÜRETİLMESİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Musa Bilgin 

Hacettepe Üniversitesi, Hacettepe ASO 1.OSB Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: musabilgin@hacettepe.edu.tr

(Geliş/Received: 04.06.2022; Düzeltme/Revised: 11.07.2022; Kabul/Accepted: 25.07.2022)

ÖZ

Üç boyutlu (3D) yazıcılar ile imalat; birçok girdi parametresi olmasından dolayı oldukça karmaşık bir süreçtir. Bu durum optimum üretim parametrelerin belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada; ABS malzemelerin 3D yazıcılarda ergiyik yığıma modelleme (FDM) ile üretilmesinde doluluk oranı (%50, %70 ve %90), dolgu deseni (doğrusal, sekizgen ve bal peteği) ve katman kalınlığı (0,19 mm, 0,29mm ve 0,39 mm) işlem parametrelerinin; yüzey pürüzlülüğü, çekme dayanımı ve imalat sürelerine etkileri varyans analizi (ANOVA) incelenmiştir. Çıktı parametreleri üzerinde en etkili işlem parametresi katman kalınlığıdır. Azalan katman kalınlığının yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımı üzerinde olumlu etkisi olurken, imalat süresi üzerinde olumsuz etkisi olmuştur. Taguchi L_{27} (3^3) deneysel tasarımına göre gerçekleştirilen deneylerde optimizasyon işleminde üç farklı çıktı parametresi değerlendirildiği için çoklu performans optimizasyonunda değerlendirme kriteri olarak gri ilişkisel derece kullanılmıştır. Optimum işlem parametresi doğrusal dolgu deseni, %90 dolgu oranı ve 0,19 mm katman kalınlığı olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: ABS, FDM, 3D Baskı, Optimizasyon, Gri İlişkisel Analiz.

OPTIMIZATION OF 3D PROCESSING PARAMETERS USED FDM METHOD IN THE PRODUCTION OF ABS BASED SAMPLES

ABSTRACT

Manufacturing with three-dimensional (3D) printers is a very complex process due to many input parameters. This situation makes it difficult to determine optimum production parameters. In this study; when the production of ABS materials with the fused deposition method (FDM) in 3D printers, the effects of process parameters, which are infill density (50%, 70%, and 90%), fill pattern (linear, octagonal and honeycomb), and layer thickness (0.19mm, 0.29mm and 0.39mm) were investigated on surface roughness, tensile strength, and manufacturing times by analysis of variance (ANOVA). The most effective process parameter on the output parameters was the layer thickness. While the decreasing layer thickness had a positive effect on the surface roughness and tensile strength, it had a negative effect on the manufacturing time. In the experiments carried out according to the Taguchi L_{27} (3^3) experimental design, since three different output parameters were evaluated in the optimization process, the gray relational degree was used as the evaluation criterion in the multiple performance optimizations. The optimum processing parameter was determined as linear fill pattern, 90% infill density and 0.19 mm layer thickness.

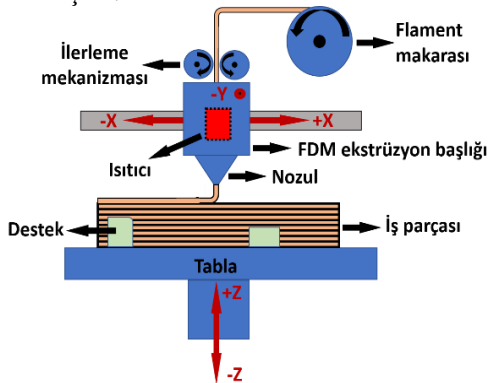
Keywords: ABS, FDM, 3D Printing, Optimization, Gray Relational Analysis.

1. GİRİŞ

Geleneksel imalat süreçlerine kıyasla daha kısa üretim süresi ve düşük maliyetle karmaşık şekillerin üretiminde avantaj sağlayan eklemeli imalat teknolojisi hızla gelişerek havacılık, otomobil ve biyo-mühendislik gibi çeşitli imalat sektörlerinde kullanılmaktadır [1]. Eklemeli imalat ile parça üretimi; CAD ortamında tasarımı yapılan ürünün enine kesitler şeklinde bölünerek; oluşturulan iki boyutlu verilerin üst üste katman halinde bir araya gelmesi ile fiziksel parça elde edilmesi temeline dayanmaktadır [2]. Üç boyutlu (3D) yazıcılar ile baskı düşük maliyetler ile az sayıda ürünün üretilebildiği bir eklemeli imalat yöntemidir [3].

ISO/ASTM 52900:2015'ye göre eklemeli imalat yöntemleri; bağlayıcı püskürtme, doğrudan enerji biriktirme, malzeme ekstrüzyonu, malzeme püskürtme, toz yatak ergitme, levha laminasyon ve tank polimerizasyonu olmak üzere yediye ayrılmaktadır [4].

Bir malzeme ekstrüzyon yöntemi olan; ergiyük yığılma modelleme (Fused Deposition Modeling; FDM) termoplastik malzemelerinin belirli bir desene göre katman katman oluşturulmasıdır [5]. Diğer eklemeli imalat yöntemlerinin aksine herhangi bir özel ortam gereksinim olmadan ev/ofis ortamında rahatlıkla uygulanabilen FDM yöntemi termoplastik malzemelerden parça üretilmesinde öne çıkmaktadır [6]. FDM yöntemi özellikle kullanım kolaylığı, maliyeti, yüksek baskı hızı ve üstün parça kalitesi, nedeniyle 3D yazıcılar ile plastik parça üretiminde yaygın olarak kullanıldığından en büyük pazar payına sahiptir [7 – 10]. FDM yönteminin şematik gösterimi Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. FDM yönteminin şematik gösterimi

FDM yönteminde; ısı ile şekillenebilen ABS, PLA, PEEK gibi termoplastik malzemeler ergime sıcaklığına kadar ısıtılarak nozuldan ekstrüze edilerek baskı yatağında katmanların oluşumu sağlanmaktadır [9, 11]. Flamet olarak ABS'ler özellikle ucuz olmasının yanı sıra ısıya karşı dirençleri, son şekillendirme için talaşlı imalata uygun olması ve arzu edilen mekanik özellikleri sağladığından yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

Katman yüksekliği, dolgu yoğunluğu ve dolgu deseni gibi parametreler ürün kalitesi üzerinde etken olan işlem parametreleri [13] ve 3D yazıcıda en kolay müdahale edilebilen parametreler olarak ortay çıkmaktadır.

Dolgu yoğunluğunun artırılması malzemenin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemesine rağmen üretim zamanını olumsuz yönde etkilemektedir [13, 14]. 3D yazıcılar ile parça üretiminde birçok dolgu deseni mevcut olup [15] parçalarının özellikle çekme ve basma özelliklerini değiştirmektedirler [16]. Katman kalınlığı ise üretilen parçanın yüzey kalitesinin mekanik özellikleri üzerinde etken parametrelerinin başında gelmektedir [13,17, 18]. Daha iyi yüzey kalitesi için katman kalınlığının inceltilmesi ise üretim zamanını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeplerden dolayı FDM ile parça üretiminde imalat kalitesi birçok işlem parametresinin bir kombinasyonu olup karmaşık ve anlaşılması zor bir süreçtir [10]. FDM'de birçok girdi parametresi olması işlem verimliliğini arttırtılarak optimumum ürün elde edilmesinin zorlaştırmaktadır. Bu nedenle kullanıcılarının rahatlıkla müdahale edebildiği işlem parametrelerinin optimize edilmesi ile işlem verimliliği artırılmadır.

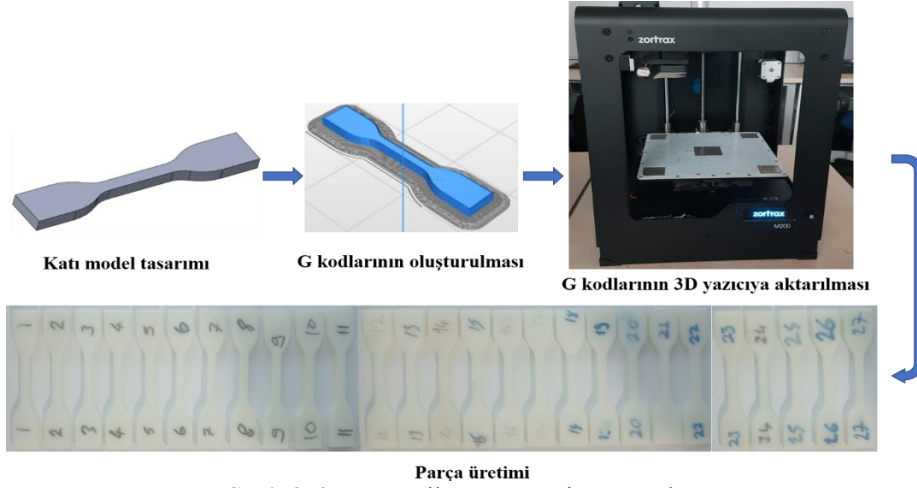
Bu kapsamda 3 farklı işlem parametresi ile 3 farklı değişken kullanılarak Taguchi L₂₇ (3³) deneysel tertip düzeninde çekme test numuneleri üretilmiştir. İşlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, imalat süresi ve çekme dayanımı üzerine, etki türleri ve etki oranları ANOVA aracıyla belirlenmiştir. Çalışma kapsamında optimum işlem parametresinin belirlenmesinde; yüzey pürüzlülüğü, imalat süresi ve çekme dayanımı olmak üzere 3 farklı çıktı parametresinin değerlendirilmektedir. Bu kapsamda; çoklu işlem verilerinin optimizasyonu için gri ilişkisel analiz yöntemi ile tek bir gri ilişkisel derece oluşturulmuş ve Taguchi metodoloji kullanılarak optimum işlem parametreleri belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Malzeme ve Ekipman

Çalışma kapsamında üretilen çekme numunelerinin katı modelleri ASTM D638-IV

standardına uygun olarak Solidworks 2020'de tasarlanmış, Z-Suite yazılımında G kodları oluşturulmuş ve Zortrax marka 200 Model 3D yazıcıda üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. 3D yazıcı ile parça üretim aşamaları

Flament olarak özellikle ucuz olması, gerekli olduğunda talaşlı imalat ile son şekillendirmeye uygunluğu, yüksek sıcaklıklara dayanımı dikkate alınarak ticari olarak bulunabilen Z-ABS tercih edilmiştir. Flamentlerin çapı 1,75 mm olup mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. ABS malzemenin mekanik özellikleri [12]

Özellik	Birim	Değer
Çekme Mukavemeti	MPa	30,46
Kopma Gerilmesi	MPa	25,89
Özgül ağırlık	gr/cm ³	1,195
Shore sertliği (d)		69,2

2.2. İşlem Parametreleri ve Deneysel Ölçümler

FDM yöntem ile üretilen parçaların; çekme dayanımları, yüzey pürüzlülükleri ve imalat süreleri işlem parametrelerinden direkt olarak etkilenmektedir. Çalışma kapsamında; işlem parametreleri olarak 3D yazıcı kullanıcılarının en rahat müdahale edebildikleri parametrelerin seçilmesine özen gösterilmiştir. Deneysel çalışmada üç farklı parametre için üç farklı değişken belirlenerek Taguchi L₂₇ (3³) deneysel tertip düzenine göre deneyler yapılmıştır. İşlem parametreleri ve işlem değişkenleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Dolgu desenlerinin şematik gösterimi Şekil 3 de verilmiştir. Doğrusal dolgu deseninde tarama açısı 45 derecedir.

Çizelge 2. İşlem parametreleri ve değişkenleri

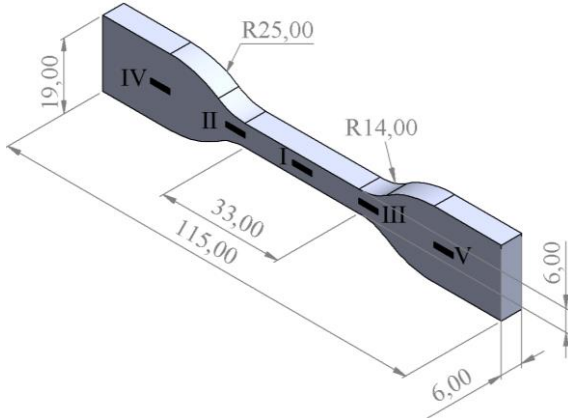
Parametreler	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Doluluk oranı	%	50	70	90
Katman kalınlığı	mm	0,19	0,29	0,39
Dolgu deseni		Doğrusal	Sekizgen	Bal peteği

Diğer işlem parametreleri sabit olup; alt ve üst katman sayısı 4, Z-SUITE programında sunulan 3 farklı baskı kalitesi içerisinde normal kalite seçilmiştir.



Şekil 3. Dolgu desenlerinin şematik gösterimi [19]

ASTM D638-IV standardına uygun çekme numunelerin üretilmesinin ardından yüzey pürüzlülüğü ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri (Ra) Şekil 4'de gösterilen beş noktadan gerçekleştirilmiş olup en düşük ve en yüksek iki değer çıkarılmasının artında kalan üç değer aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo SJ-210 cihazında yapılmıştır. Çekme testleri 2 mm/s hızında Instron 3369 cihazında gerçekleştirilmiştir. İşleme süresinin değerlendirilmesinde Z-Suit programın verdiği bitirme süreleri esas alınmıştır.

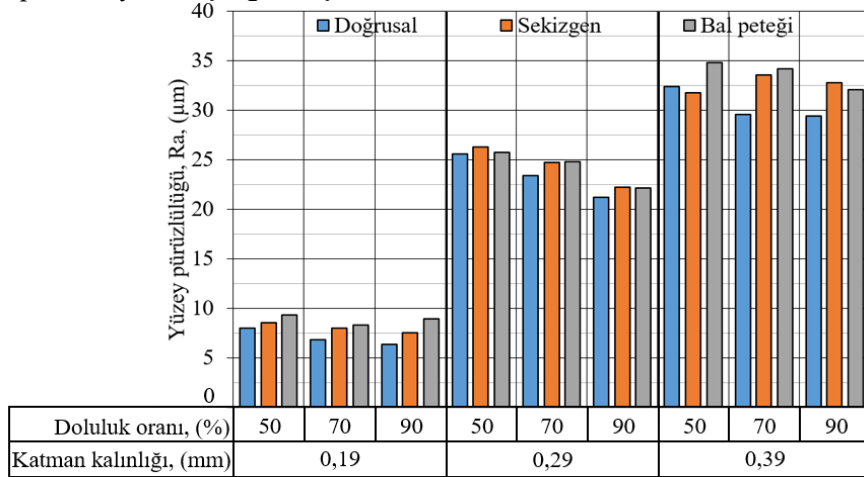


Şekil 4. Çekme numunesi ölçüleri ve yüzey pürüzlülüğü ölçüm bölgeleri

2.3. Optimizasyon

Girdi parametrelerinin; yüzey pürüzlülüğü, çekme mukavemeti ve imalat süresine etki oranları ve etki türleri varyans analiz (ANOVA) ile belirlenmiştir.

Optimum işlem parametrelerinin belirlenmesi için karar verme sürecinde üç farklı bağımlı değişken (yüzey pürüzlülüğü, çekme mukavemeti ve imalat süresi) etken olduğu için çoklu işlem optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çoklu işlem optimizasyonu için gri ilişkisel



Şekil 5. İşlem parametreleri ile yüzey pürüzlülüğündeki değişim

Gerçekleştirilen deneylerde en iyi yüzey pürüzlülüğü doğrusal dolgu deseninin kullanıldığı, dolgu oranının %90 olduğu 0,19 mm katman kalınlığında 6,410 µm olarak elde edilmiştir. En kötü yüzey pürüzlülüğü ise bal

analiz yöntemi kullanılarak gri ilişki derecesi hesaplanmış; ardından Taguchi metodolojisi ile gerçekleştirilen ANOVA sonucu optimum işlem parametresi ve çoklu işlem optimizasyonunda işlem parametrelerinin etki türleri ve oranları belirlenmiştir.

3. DENEYSEL VE İSTATİKSEL BULGULAR

FDM yöntemi ile ABS filamentler kullanılarak çekme numuneleri üretilmiştir. İşlem parametrelerinin çekme dayanımına, yüzey pürüzlülüğüne ve imalat süresine etkileri incelenerek işlem parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

3.1. İşlem Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Üretilen bir ürünün kalitesinin belirlenmesi için en sık tercih edilen değerlendirme kriterlerinden birisi yüzey pürüzlülüğüdür. ABS malzemenin FDM yöntemi ile eklemeli imalatında işlem değişkenlerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki (Ra) değişimler Şekil 5'deki grafikte sunulmuştur.

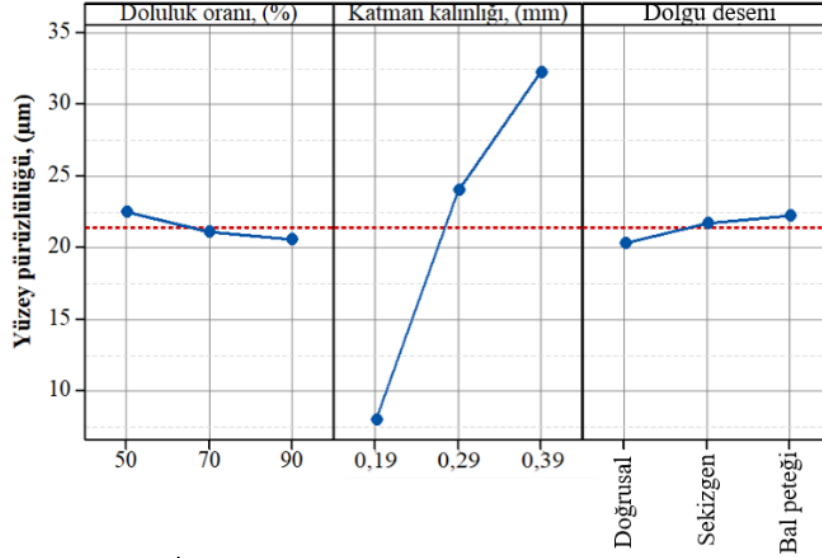
peteği dolgu deseninde, dolgu oranının %50 olduğu 0,39 mm katman kalınlığında 34,830 µm'dir. Çizelge 3'de işlem parametrelerinin etki oranları, Şekil 6'de işlem parametrelerinin etki türleri görülmektedir.

Çizelge 3. İşlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etki oranları

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Etki Oranı
Doluluk oranı, (%)	1	15,81	15,81	3,07	0,093	%0,6
Katman kalınlığı, (mm)	1	2646,46	2646,46	513,15	0	%94,6
Dolgu deseni	1	17,17	17,17	3,33	0,081	%0,6
Hata	23	118,62	5,16			%4,2
Toplam	26	2798,05				%100

Çizelge 3 incelendiğinde işlem parametreleri içinde yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametre %94,6 etki oranı ile katman kalınlığı olurken, dolgu deseni ve dolgu oranının etki oranları %0,6'dır. Hem dolgu deseninin hem de

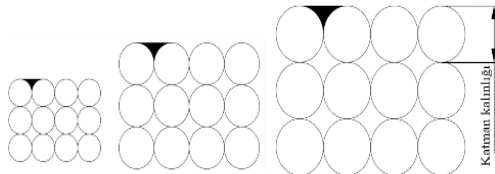
dolgu oranının P-Value değerlerinin 0,05'den büyük olması her iki parametrenin de yüzey pürüzlülüğünde etki düzeylerinin göz aradı edilebileceğinin göstermektedir.



Şekil 6. İşlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etki türleri

Şekil 6 incelendiğinde katman kalınlığındaki sürekli artışın yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Etki düzeylerinin düşük olmasına rağmen doluluk oranının artması yüzey pürüzlülüğünü olumlu etkilerken; dolgu deseninin sırasıyla doğrusal, sekizgen ve bal peteği olması ile yüzey pürüzlülüğü olumsuz etkilenmektedir.

Katman kalınlığı yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin başında gelmektedir [17]. Azalan katman kalınlığı yüzey kalitesinin olumlu yönde etkilemektedir[13]. Katman kalınlığının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin yüksek olması beklen bir durumdur. Katman kalınlığının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin daha net anlaşılması için işlem parametrelerinde kullanılan katman kalınlığının şematik gösterimi Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Katman kalınlığının yüzey yapısına etkisi

Katman kalınlığı bir katman ile bir sonraki katman arasındaki dikey eksenindeki mesafe olarak tanımlamak mümkündür. Katman

kalınlığının artması ile nozuldan ekstrüze olan ABS'lerin yan yana gelme mesafeleri de doğal olarak artmaktadır. Bu artış Şekil 7' de siyah ile gösterilen bölgenin derinliğinin de artmasına neden olarak yüzey pürüzlülüğünün olumsuz yönde etkilemektedir.

3.2. İşlem Parametrelerinin İmalat Süresine Etkisi

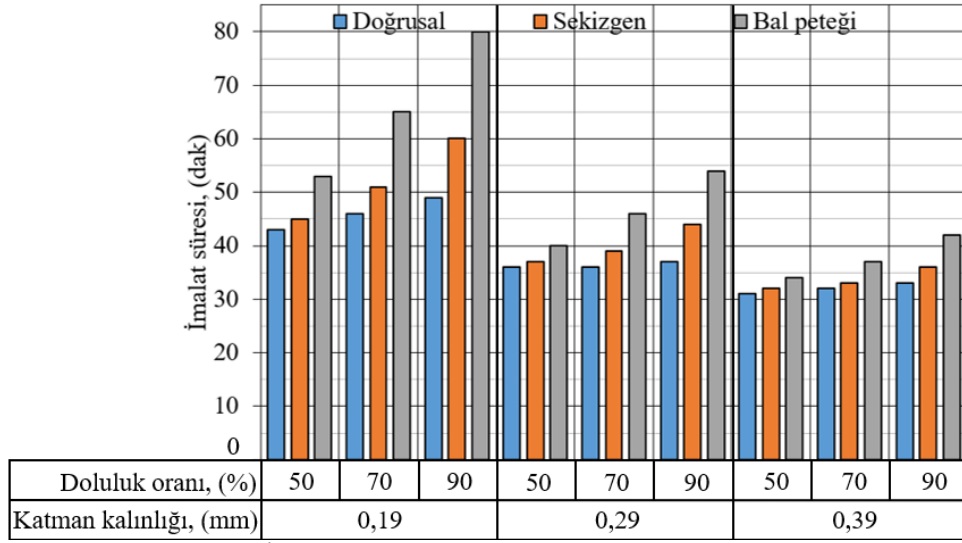
Ürün imalat süresi maliyet giderlerinin en önemli kaleminin oluşturmaktadır. İstenilen kalitede bir ürünün imalat süresinin kısaltılması daha rekabet edilebilir koşulların oluşturulmasında en önemli etkenlerden biridir. Deneyler kapsamında ABS malzemelerinin FDM yöntemi ile üretilmesinde Z-Suit programının verdiği imalat süreleri esas alınarak elde edilen imalat süreleri Şekil 8'de sunulmuştur.

En uzun imalat süresi 0,19 mm katman kalınlığında, %90 doluluk oranında Bal peteği dolgu deseninde 80 dakika olarak gerçekleşmiştir. En kısa imalat ise 0,39 mm katman kalınlığında, doğrusal dolgu deseninde ve %50 dolgu oranında 31 dakika olmuştur. Azalan dolgu oranı ve artan katman kalınlığı imalat süresini kısaltmaktadır [13]. Çizelge 4'de İşlem parametrelerinin imalat süresine etki

oranları, Şekil 9’da ise işlem parametrelerini imalat süresine etki türleri verilmiştir.

İmalat süresinde en etkili parametre %53,7’lük etki oranı ile katman kalınlığı iken onu sırasıyla %18,9’luk etki oranı ile dolgu deseni ve %11,4’lük etki oranı ile dolgu oranı

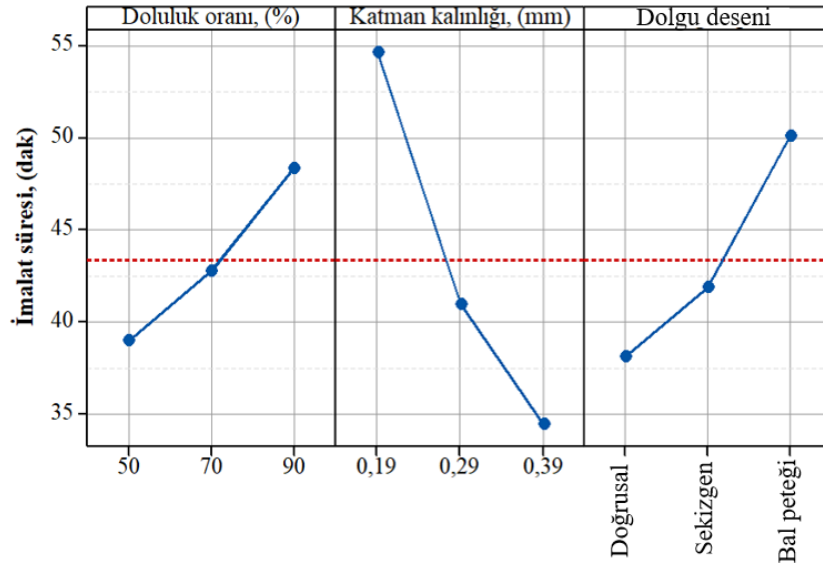
izlemektedir. Katman kalınlığının artması ile imalat süresi sürekli azalma göstermektedir. Dolgu oranının artması işlemi süresinin artırmaktadır. Dolgu deseninin bal peteği olması ile en yüksek imalat süresi meydana gelmektedir.



Şekil 8. İşlem parametreleri ile imalat süresindeki değişim

Çizelge 4. İşlem parametrelerinin imalat süresine etki oranları

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Etki Oranı
Doluluk oranı, (%)	1	392	392	16,39	0	%11,4
Katman kalınlığı, (mm)	1	1840,2	1840,22	76,94	0	%53,7
Dolgu deseni	1	648	648	27,09	0	%18,9
Hata	23	550,1	23,92			%16,0
Toplam	26	3430,3				%100



Şekil 9. İşlem parametrelerinin imalat süresine etki türleri

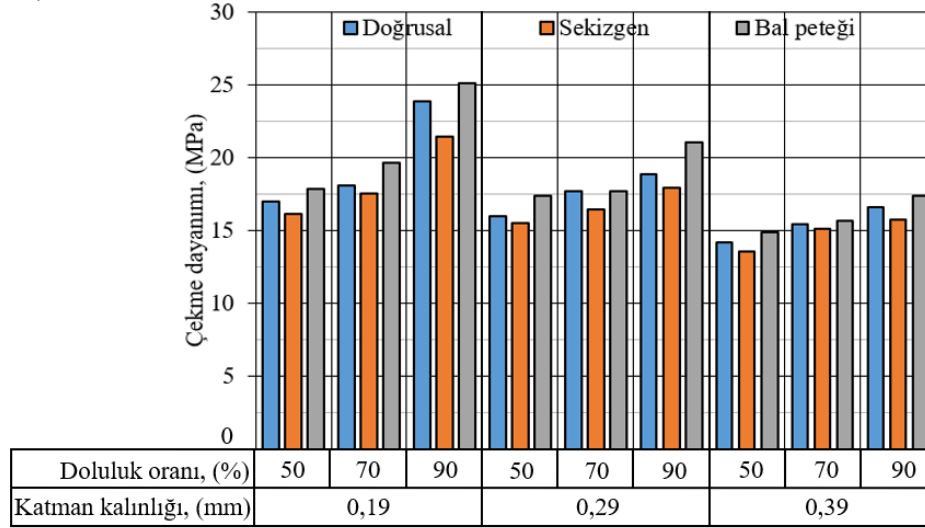
Katman kalınlığının artması ile parça kalınlığı için gerekli olan 2 boyutlu kesit sayısının azalması imalat süresine pozitif yönde etkilemektedir. Doluluk oranının artırılması ürünün oluşturulması için daha fazla ABS malzemenin nozuldan ekstrüze edilmesi ve nozulun daha fazla yol almasına sebebiyet vererek imalat süresini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca dolgu desenin imalat süresinde etki oranının belirleyici olması; parçanın oluşturulması için gerekli olan dolgunun çevre uzunluğu artmasına paralel olarak imalat süresinin artmasındandır. Özellikle katman kalınlığının azalması ile dolgu deseninin etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 8). Bu durum azalan katman kalınlığı ve dolgu deseni çevresinin uzamasının direkt etkileşimi olarak yorumlanabilmektedir.

3.3. İşlem Parametrelerinin Çekme Dayanımına Etkisi

FDM yöntemin üretim parametreleri ile mekanik özellikler arasında bir etkileşim vardır [14]. Endüstriyel olarak kullanılan bir üründen

mekanik dayanımların yüksek olması arzu edilen bir durumdur. Çünkü; imalat kalitesinin belirlenmesinin sadece yüzey pürüzlülüğün değil aynı zamanda mekanik özelliklerinin de dikkate alınması gerekmektedir [20]. ABS malzemenin FDM yöntemi ile üretilmesinde farklı işlem parametrelerinde elde edilen numunelerin çekme testi sonuçları Şekil 10'daki grafikte sunulmuştur.

En yüksek çekme dayanımı 0,19 mm katman kalınlığı, %90 doluluk oranı ve bal peteği dolgu deseninde 25.107 MPa iken en düşük çekme dayanımı 0,39 mm katman kalınlığı, %50 doluluk oranı ve sekizgen dolgu deseninde 13,554 MPa'dır. Çizelge 5 ve Şekil 11'de sırasıyla işlem parametrelerinin çekme dayanımı üzerine etki oranları ve etki türleri verilmiştir.



Şekil 10. İşlem parametreleri ile çekme dayanımındaki değişim

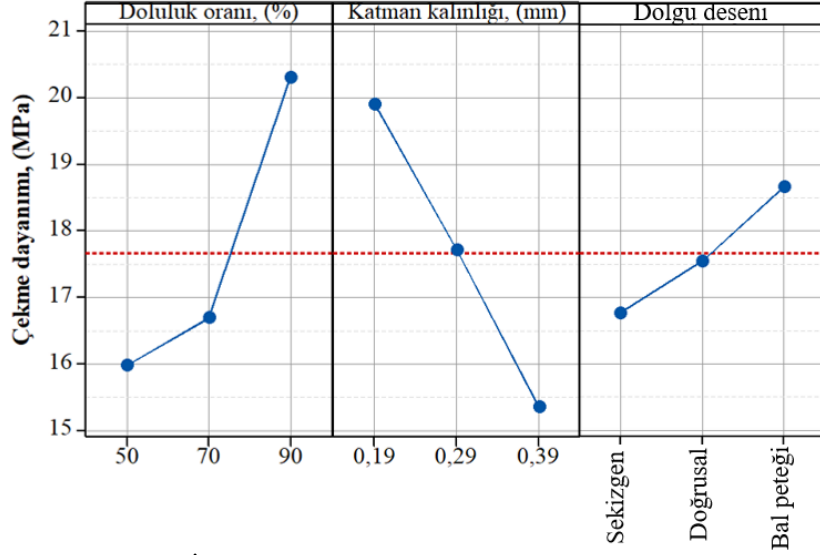
Çizelge5. İşlem parametrelerinin çekme dayanımına etki oranları

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Etki Oranı
Doluluk oranı, (%)	1	70,05	70,049	60,27	0	%36,0
Katman kalınlığı, (mm)	1	81,8	81,796	70,38	0	%42,0
Dolgu deseni	1	16,26	16,256	13,99	0,001	%8,3
Hata	23	26,73	1,162			%13,7
Toplam	26	194,83				%100

Deneyler kapsamında kullanılan her işlem parametresinin P-Value değerleri 0,05'den küçük olduğundan çekme dayanımı üzerinde etkili oldukları görülmektedir. Çekme dayanımı üzerinde en etkili iki parametre %42,0 ve %36,0

etki oranları ile katman kalınlığı ve doluluk oranıdır. %8,3'lük etki oranı ile dolgu deseni en az etkiye sahiptir.

Çekme dayanımı üzerine en etkili parametre olan katman kalınlığının artması ile çekme dayanımı azalmaktadır. Katman kalınlığının azalması ile katmanların birbirleri ile temasının daha fazla olması çekme mukavemetini olumlu etkilemektedir. Artan doluluk oranı ile birim alandaki malzeme miktarı artmakta bu durum çekme mukavemetini artırmaktadır. Sekizgen dolgu deseninde çekme dayanımı olumsuz etkilemektedir. Kullanılan dolgu desenini kesit



Şekil 11. İşlem parametrelerinin çekme dayanımına etki türleri

3.4. Gri İlişkiler Analiz ile Test Sonuçlarının Yorumlaması

Gri ilişkisel analiz ile; elde edilen çoklu deneysel verilerinin tek bir gri ilişkisel derecenin optimizasyona dönüştürülerek deneysel verilerin genel değerlendirilmesi olarak tanımlanabilmektedir [21 – 24]. Farklı kalite özelliklerine sahip iki veya daha fazla yanıt olması durumunda, gri ilişkisel analiz kullanılarak çoklu yanıt optimizasyonunun gerçekleştirilmesi tercih edilen yöntemdir. Gri ilişkisel analiz, daha az veya eksik bilgi içeren bir sisteme başarıyla uygulanabilmektedir [25]. Bu nedenle, bu çalışmada işlem parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu gri ilişkisel analizde aşağıdaki adımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

- Deneysel sonuçların normalleştirilmesi,
- Sapma miktarının belirlenmesi,
- Gri ilişki katsayısının belirlenmesi,
- Gri ilişkisel derecelerin belirlenmesi ve sıralaması.

3D yazıcı ile gerçekleştirilen eklemeli imalat işleminde elde edilen parça için düşük yüzey pürüzlülüğü ve imalat süresi tercih edilirken

alanı incelendiğinde (Şekil 3) keskin birleşmeler dikkat çekmektedir. Bu durum çekme testi esnasında malzeme sürekliliğinde olumsuz etki yapmaktadır. En iyi çekme testi sonucunu ise bal peteği dolgu deseni vermektedir. Bal peteğinin altıgen yapısı çekme esnasında malzemenin uzamasına katkıda bulunarak çekme dayanımının artmasını sağlamaktadır.

yüksek çekme mukavemeti beklenmektedir. Bu nedenle gri ilişkisel analiz yöntemine göre normalizasyon ile referans dizi oluşturulurken yüzey pürüzlülüğü ve imalat sürelerinde minimum değerler dikkate alınırken çekme dayanımında maksimum değer esas alınmaktadır. Bu kapsamda yüzey pürüzlülüğü ve imalat süresi için Denklem (1) kullanılarak "küçük değer daha iyidir", çekme dayanımı için Denklem (2) kullanılarak "büyük değer daha iyidir" hedef değerler seçilerek normalizasyon işlemi yapılmaktadır. Normalizasyon işlemi sonucunda çıktı parametreleri değerleri 0 ile 1 arasına karşılaştırılabilir bir dizi oluşturulmaktadır.

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (1)$$

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (2)$$

Burada $x_i^0(k)$: deneysel verilerde elde edilen orijinal veri serisi. $i = 1, 2, 3, \dots, m$; $k = 1, 2, \dots, n$ 'dir. m : deneysel veri sayısı (toplam deney sayısı) ve n : parametre sayısıdır (yanıt değişkeni). $x_i^*(k)$: ön işleme sonrası elde edilen

veri dizisidir. Normalizasyon işlemi sonrası orijinal veri dizisi ile normalizasyon dizisi arasındaki farkın mutlak değeri olan sapma miktarı belirlenmektedir. Bunun için Denklem (3) kullanılmıştır.

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)| \quad (3)$$

Burada $\Delta_{0i}(k)$: sapma miktarı, $x_0^*(k)$: referans değeri belirtmektedir. Sapma katsayısının belirlenmesinin ardından Denklem (4) kullanılarak gri ilişki katsayısı belirlenmelidir.

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (4)$$

$\xi_i(k)$: gri ilişki katsayısı, Δ_{\max} ve Δ_{\min} dizideki min. ve mak. sapma miktarı, ζ : ayırt edici katsayı. ζ , 0 ile 1 arasındadır genel olarak 0,5 olarak kullanılmaktadır.

Gri ilişki katsayıları türetildikten sonra, gri ilişki katsayıların ortalama değerini gri ilişki derece olarak alınabilir [22, 24, 26]. Denklem (5) kullanılarak gri ilişki katsayılarının ortalaması ile gri ilişki derecesi belirlenmelidir.

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (5)$$

Gri ilişki derecenin daha yüksek değeri, referans dizisi ve uyumluluk dizisi arasındaki daha güçlü ilişki derecesini temsil eder. Gri ilişki derecenin en yüksek değerleri, istenen yanıtlar için işleme parametrelerinin optimal kombinasyonunu temsil eder [24, 26]. Çizelge 6'da katman kalınlığı, dolgu oranı ve dolgu türünün farklı işlem parametrelerinde uygulanması ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü, imalat süresi ve çekme dayanımları verilmiştir.

Çizelge 6. Deneysel parametreleri ve sonuçları

Test No	Doluluk oranı, (%)	Katman kalınlığı, (mm)	Dolgu deseni	Yüzey pürüzlülüğü, (µm)	İmalat süresi, (dak)	Çekme dayanımı, (MPa)
1	50	0.19	Doğrusal	8.050	43	16.972
2	50	0.19	Sekizgen	8.610	45	16.158
3	50	0.19	Bal Peteği	9.376	53	17.799
4	50	0.29	Doğrusal	25.604	36	15.967
5	50	0.29	Sekizgen	26.300	37	15.512
6	50	0.29	Bal Peteği	25.722	40	17.360
7	50	0.39	Doğrusal	32.364	31	14.131
8	50	0.39	Sekizgen	31.757	32	13.554
9	50	0.39	Bal Peteği	34.830	34	14.870
10	70	0.19	Doğrusal	6.846	46	18.061
11	70	0.19	Sekizgen	8.007	51	17.558
12	70	0.19	Bal Peteği	8.381	65	19.671
13	70	0.29	Doğrusal	23.417	36	17.710
14	70	0.29	Sekizgen	24.719	39	16.432
15	70	0.29	Bal Peteği	24.839	46	17.716
16	70	0.39	Doğrusal	29.460	32	15.403
17	70	0.39	Sekizgen	32.747	33	15.084
18	70	0.39	Bal Peteği	32.045	37	15.630
19	90	0.19	Doğrusal	6.410	49	23.873
20	90	0.19	Sekizgen	7.568	60	21.458
21	90	0.19	Bal Peteği	8.944	80	25.107
22	90	0.29	Doğrusal	21.186	37	18.837
23	90	0.29	Sekizgen	22.201	44	17.937
24	90	0.29	Bal Peteği	22.185	54	21.006
25	90	0.39	Doğrusal	29.566	33	16.566
26	90	0.39	Sekizgen	33.520	36	15.704
27	90	0.39	Bal Peteği	34.161	42	17.344

Gri ilişkisel analiz yöntemi karmaşık çoklu yanıt sistemlerinin analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir. FDM yöntemi ile çalışan 3D yazıcılardan elde edilen ürünlerden en düşük yüzey pürüzlülüğü ve imalat süresinin yanı sıra en yüksek çekme mukavemetinin elde edilmesi için çıktı parametreleri gri ilişkisel analiz

yönetimi ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve imalat süresi için Denklem (1), imalat süresi için Denklem (2) kullanılarak normalizasyon işlemi, Denklem (3) ile sapma miktarı, Denklem (4) ile gri ilişki katsayısı, Denklem (5) ile gri ilişki derecesi hesaplanarak Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. Gri ilişkisel analiz verileri

Test No	Normalizasyon			Sapma miktarı			Gri ilişki katsayısı			Gri ilişki derecesi	Sıra
	Y.P. (μm)	İ.S. (dak)	Ç.D. (N)	Y.P. (μm)	İ.S. (dak)	Ç.D. (N)	Y.P. (μm)	İ.S. (dak)	Ç.D. (N)		
1	0.9423	0.7551	0.2959	0.0577	0.2449	0.7041	0.8965	0.6712	0.4152	0.661	5
2	0.9226	0.7143	0.2254	0.0774	0.2857	0.7746	0.8660	0.6364	0.3923	0.632	6
3	0.8957	0.5510	0.3674	0.1043	0.4490	0.6326	0.8273	0.5269	0.4415	0.599	9
4	0.3246	0.8980	0.2089	0.6754	0.1020	0.7911	0.4254	0.8305	0.3873	0.548	16
5	0.3001	0.8776	0.1695	0.6999	0.1224	0.8305	0.4167	0.8033	0.3758	0.532	18
6	0.3205	0.8163	0.3294	0.6795	0.1837	0.6706	0.4239	0.7313	0.4271	0.527	21
7	0.0868	1.0000	0.0499	0.9132	0.0000	0.9501	0.3538	1.0000	0.3448	0.566	14
8	0.1081	0.9796	0.0000	0.8919	0.0204	1.0000	0.3592	0.9608	0.3333	0.551	15
9	0.0000	0.9388	0.1139	1.0000	0.0612	0.8861	0.3333	0.8909	0.3607	0.528	20
10	0.9847	0.6939	0.3901	0.0153	0.3061	0.6099	0.9702	0.6203	0.4505	0.680	3
11	0.9438	0.5918	0.3466	0.0562	0.4082	0.6534	0.8990	0.5506	0.4335	0.628	7
12	0.9307	0.3061	0.5295	0.0693	0.6939	0.4705	0.8782	0.4188	0.5152	0.604	8
13	0.4016	0.8980	0.3597	0.5984	0.1020	0.6403	0.4552	0.8305	0.4385	0.575	11
14	0.3558	0.8367	0.2491	0.6442	0.1633	0.7509	0.4370	0.7538	0.3997	0.530	19
15	0.3515	0.6939	0.3603	0.6485	0.3061	0.6397	0.4354	0.6203	0.4387	0.498	26
16	0.1889	0.9796	0.1600	0.8111	0.0204	0.8400	0.3814	0.9608	0.3731	0.572	12
17	0.0733	0.9592	0.1324	0.9267	0.0408	0.8676	0.3505	0.9245	0.3656	0.547	17
18	0.0980	0.8776	0.1797	0.9020	0.1224	0.8203	0.3566	0.8033	0.3787	0.513	25
19	1.0000	0.6327	0.8932	0.0000	0.3673	0.1068	1.0000	0.5765	0.8240	0.800	1
20	0.9593	0.4082	0.6842	0.0407	0.5918	0.3158	0.9247	0.4579	0.6129	0.665	4
21	0.9108	0.0000	1.0000	0.0892	1.0000	0.0000	0.8487	0.3333	1.0000	0.727	2
22	0.4801	0.8776	0.4573	0.5199	0.1224	0.5427	0.4902	0.8033	0.4795	0.591	10
23	0.4444	0.7347	0.3794	0.5556	0.2653	0.6206	0.4737	0.6533	0.4462	0.524	23
24	0.4449	0.5306	0.6450	0.5551	0.4694	0.3550	0.4739	0.5158	0.5848	0.525	22
25	0.1852	0.9592	0.2607	0.8148	0.0408	0.7393	0.3803	0.9245	0.4035	0.569	13
26	0.0461	0.8980	0.1861	0.9539	0.1020	0.8139	0.3439	0.8305	0.3805	0.518	24
27	0.0235	0.7755	0.3281	0.9765	0.2245	0.6719	0.3386	0.6901	0.4266	0.485	27

Y.P.: Yüzey Pürüzlülüğü (Ra), **İ.S.:** İmalat süresi, **Ç.D.:** Çekme dayanımı

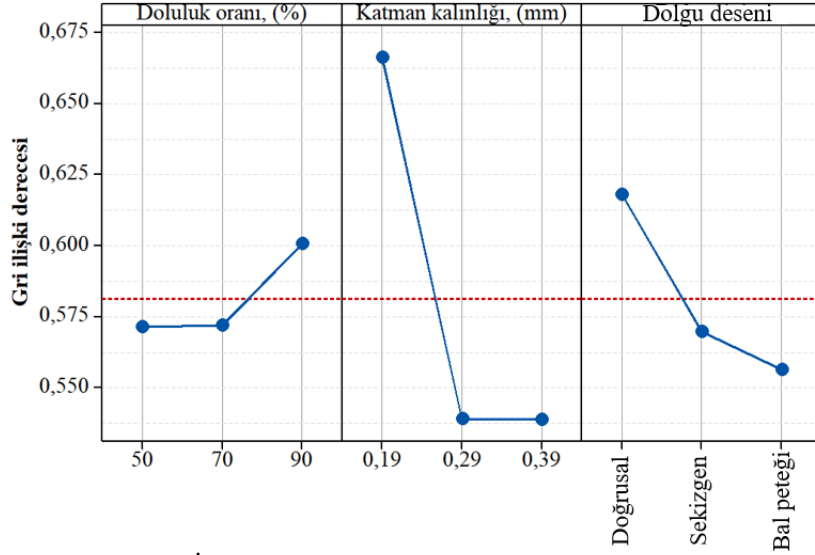
Gri ilişkisel derecenin yüksek değeri, ideal normalleştirilmiş değer ile deneysel değer arasındaki daha güçlü ilişki derecesi olarak dikkate alınır. Bu nedenle, daha yüksek gri ilişkisel derece, karşılık gelen proses parametre kombinasyonunun optima daha yakın olduğunu gösterir. Optimum işlem parametrelerinin belirlenmesinde gri ilişki

derecesinin en yüksek olduğu işlem Çizelge 7, Çizelge 8 ve Şekil 12 de görüldüğü üzere 19 numaralı deneyde elde edilmiştir (A3B1C1). ABS parçaların FDM yöntemi ile üretilmesinde optimum işlem parametreleri; %90 doluluk oranı, 0,19 mm katman kalınlığı ve doğrusal dolgu deseninin kullanıldığı işlemde elde edilmiştir.

Çizelge 8. Gri ilişkisel derece için yanıt tablosu (büyük değer daha iyidir)

Sembol	Parametre	Gri ilişki derecesi				Sıra
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Maks.- Min.	
A	Doluluk oranı (%)	0.5715	0.5718	0.6006*	0.0291	3
B	Katman kalınlığı (mm)	0.6662*	0.5389	0.5389	0.1273	1
C	Dolgu deseni	0.6180*	0.5697	0.5563	0.0617	2

Toplam ortalama gri ilişkisel derece = 0.5813

**Şekil 12.** İşlem parametrelerinin gri ilişkisel derecesine etkisi

İşlem parametrelerinin; çoklu performans özellikleri üzerindeki önemini araştırmak için MINITAB yazılımı kullanılarak %95 güven düzeyinde gri ilişkisel derece için ANOVA yapılmıştır. ANOVA'nın amacı, hangi üretim parametresinin gri ilişkisel derecenin performans karakteristiğini önemli ölçüde etkilediğini incelemektir (Çizelge 9). İlk olarak, Denklem (6) kullanılarak toplam kare sapması (SST) hesaplanmaktadır.

$$SS_T = \sum_{j=1}^p (\gamma_j - \gamma_m)^2 \quad (6)$$

p = ortogonal dizideki deney sayısı, γ_j = j. deney için gri ilişkisel derecenin ortalaması ve γ_m = gri ilişkisel derecenin toplam ortalaması.[22, 27 – 29]

Denklem (7)'de ise; ortalama kare (MS), kare sapmaların (SS) toplamının karşılık gelen

serbestlik derecesine (DF) bölünmesiyle elde edilebilir,

$$MS = \frac{SS}{DF} \quad (7)$$

Fisher değeri (F) ve anlamlılık olasılığı (P), işleme süreci parametrelerinin çoklu performans özellikleri üzerindeki önemini belirlemek için kullanılabilir. Büyük bir F değeri veya küçük bir P değeri için, ilgili işleme parametresinin performans özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. [22, 28, 30].

Denklem (8)'de verilen işlem parametrelerinin etki oranları SST'ye karşılık gelen SS'ye bölünmesiyle hesaplanabilir.

$$Etki oranı, (\%) = \frac{SS_T}{SS} \times 100 \quad (8)$$

Çizelge 9. Gri ilişkisel derece için ANOVA.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Etki Oranı
Doluluk oranı. (%)	2	0,005029	0,002514	2,24	0,133	%3,5
Katman kalınlığı. (mm)	2	0,097218	0,048609	43,22	0	%67,6
Dolgu deseni	2	0,018985	0,009493	8,44	0,002	%13,2
Hata	20	0,022492	0,001125			%15,7
Toplam	26	0,143724				%100,0

Toplam ortalama gri ilişkisel derece = 0.5813

Yüzey pürüzlülüğü, imalat süresi ve çekme dayanımı; çıktı parametrelerinin gri ilişkisel derece kullanılarak gerçekleştirilen çoklu işlem optimizasyonunda en etkili parametre %67,6 etki oranı ile katman kalınlığı olmuştur. Dolgu deseninin etki oranı %13,2'dir. Doluluk oranının etki oranı %3,5'dir ve P-value değerinin 0,05'den yüksek olması dolgu deseni parametresinin çoklu işlem optimizasyonunda önem arz etmediğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada ABS malzemelerinin FDM yöntemi ile üretilmesinde doluluk oranı, katman kalınlığı ve dolgu deseni işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, imalat süresi ve çekme dayanımı üzerine etkileri araştırılmış. Gri ilişkisel analiz yöntemi ile işlem parametreleri optimizasyonu yapılarak aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

- En iyi yüzey pürüzlülüğü; %90 dolgu oranı, 0,19 mm katman kalınlığı ve doğrusal dolgu deseni işlem parametrelerinde 6,410 μm olmuştur.
- En kötü yüzey pürüzlülüğü; %50 dolgu oranı, 0,39 mm katman kalınlığı ve bal peteği işlem parametrelerinde 34,830 μm olmuştur.
- En uzun imalat süresi 80 dakikadır. Bu işlemin gerçekleştirildiği işlem parametreleri: 0,19 mm katman kalınlığı, %90 doluluk oranı ve bal peteği dolgu desenidir.
- En kısa imalat süresi ise 31 dakikadır. Bu işlemin gerçekleştirildiği işlem parametreleri: 0,39 mm katman kalınlığı, %50 dolgu oranı ve doğrusal dolgu desendir.
- En yüksek çekme dayanımı; 0,19 mm katman kalınlığı, %90 doluluk oranı ve bal peteği dolgu deseninde 25.107 MPa'dır.

- En düşük çekme dayanımı; 0,39 mm katman kalınlığı, %50 doluluk oranı ve sekizgen dolgu deseninde 13,554 MPa'dır.
- Yüzey pürüzlülüğü, çekme dayanımı ve imalat sürelerinde en etkili işlem parametresi katman kalınlığıdır. Artan katman kalınlığının yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımı olumsuz etkilerken, imalat süresi üzerinde olumlu etkisi olmuştur.
- Katman kalınlığının yüzey pürüzlülüğü, imalat süresi ve çekme dayanımı için etki oranı sırasıyla; %94,6 , %53, 7 ve %42,0'dir.
- Gri ilişkisel derece değeri dikkate alınarak çoklu işlem optimizasyonu sonucu; %90 dolgu oranı, 0,19 mm katman kalınlığı ve doğrusal dolgu deseni optimum işlem parametreleridir (A3B1C1).
- Çoklu işlem optimizasyonunda katman kalınlığının etki oranı %67,6, dolgu deseni ve doluluk oranının etki oranları sırasıyla; %13,2 ve %3,5'dir.

KAYNAKLAR

1. Mohan, N., Senthil, P., Vinodh, S., Jayanth, N., "A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process", Virtual and Physical Prototyping, Vol. 12, Issue 1, Pages 47–59, 2017.
2. Rashid, A., "Additive manufacturing technologies. in: The international academy for production engineering" CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Pages 20 – 45, Springer, Berlin, 2019.
3. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D., "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges", Composites Part B: Engineering, Vol. 143, Pages 172–196, 2018.
4. ISO/ASTM International, "ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing - General principles and

Terminology”, International Standard, Pages 1–26, 2015.

5. Walker, J.L., Santoro, M., “Processing production of bioresorbable polymer scaffolds for tissue engineering. In: Bioresorbable polymers for biomedical applications”, Pages 181-203, Woodhead Publishing, United Kingdom, 2017.

6. Agarwal, K.M., Shubham, P., Bhatia, D., Sharma, P., Vaid, H., Vajpeyi, R., “Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of abs specimens printed using fused deposition modelling (FDM)”, *Sensors International*, Vol. 3, Pages 100149 – 100157, 2022.

7. 3D printing market size & share | analysis report (2021-2028), <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/3d-printing-market-101902>, March 5, 2022

8. Jaisingh Sheoran, A., Kumar, H., “Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 21, Pages 1659–1672, 2020.

9. Vyavahare, S., Teraiya, S., Panghal, D., Kumar, S., “Fused deposition modelling: a review”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 26, Issue 1, Pages 176–201, 2020.

10. Mohamed, O.A., Masood, S.H., Bhowmik, J.L., “Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects”, *Advances in Manufacturing*, Vol. 3, Issue 1, Pages 42–53, 2015.

11. Turner, B.N., Strong, R., Gold, S.A., “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 20, Issue 3, Pages 192–204, 2014.

12. Z-ABS_Technical_Data_Sheet, https://cf.zortrax.com/wpcontent/uploads/2018/06/Z-ABS_Technical_Data_Sheet_eng-1.pdf, March 10, 2022.

13. Solomon, I.J., Sevvil, P., Gunasekaran, J., “A review on the various processing parameters in FDM”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 37, Pages 509–514, 2020.

14. Günay, M., Gündüz, S., Yılmaz, H., Yaşar, N., Kaçar, R., “PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı İçin 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu,” *Journal of Polytechnic*, Cilt 23, Sayı 1, Sayfa 73–79, 2019.

15. Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., Guzman, A., “Experimental Optimization of Fused

Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach”, *Procedia Manufacturing*, Vol. 10, Pages 791–803, 2017.

16. Baich, L., Manogharan, G., Marie, H., “Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts”, *International Journal of Rapid Manufacturing*, Vol. 5, Issue 3/4, Pages 308–319, 2015.

17. Anitha, R., Arunachalam, S., Radhakrishnan, P., “Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, Issue 1–3, Pages 385–388, 2001.

18. De Toro, E.V., Sobrino, J.C., Martínez, A.M., Eguía, V.M., “Analysis of the influence of the variables of the fused deposition modeling (FDM) process on the mechanical properties of a carbon fiber-reinforced polyamide”, *Procedia Manufacturing*, Vol. 41, Pages 731–738, 2019.

19. Z-SUITE 2: Print Preparation, <https://support.zortrax.com/pdf/create/steps.php?id=27770>, March 12, 2022.

20. Christodoulou, I.T., Alexopoulou, V.E., Karkalos, N.E., Papazoglou, E.L. and Markopoulos, A.P., “On the surface roughness of 3d printed parts with fdm by a low-budget commercial printer”, *Cutting & Tools in Technological System*, Vol. 96, Pages 52–64, 2022.

21. Uzun, G., “Analysis of grey relational method of the effects on machinability performance on austempered vermicular graphite cast irons”, *Measurement*, Vol. 142, Pages 122–130, 2019.

22. Acir, A., Canlı, M.E., Ata, İ. and Çakıroğlu, R., “Parametric optimization of energy and exergy analyses of a novel solar air heater with grey relational analysis”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 122, Pages 330–338, 2017.

23. Mia, M., Rifat, A., Tanvir, M.F., Gupta, M.K., Hossain, M.J., Goswami, A., “Multi-objective optimization of chip-tool interaction parameters using Grey-Taguchi method in MQL-assisted turning”, *Measurement*, Vol. 129, Pages 156–166, 2018.

24. Lin, C.L., “Use of the Taguchi Method and Grey Relational Analysis to Optimize Turning Operations with Multiple Performance Characteristics”, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 19, Issue 2, Pages 209–220, 2004.

25. Mishra, P.C., Das, D.K., Ukamanal, M., Routara, B.C. and Sahoo, A.K., "Multi-response optimization of process parameters using Taguchi method and grey relational analysis during turning AA 7075/SIC composite in dry and spray cooling environments", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Vol. 6, Issue 4, Pages 445–456, 2015.
26. Tzeng, C.-J., Lin, Y.-H., Yang, Y.-K. and Jeng, M.-C., "Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, Issue 6, Pages 2753–2759, 2009.
27. Sarikaya, M., Güllü, A., "Multi-response optimization of minimum quantity lubrication parameters using Taguchi-based grey relational analysis in turning of difficult-to-cut alloy Haynes 25", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 91, Pages 347–357, 2015.
28. Ramesh, K., Baranitharan, P., Sakthivel, R., "Investigation of the stability on boring tool attached with double impact dampers using Taguchi based Grey analysis and cutting tool temperature investigation through FLUKE-Thermal imager", *Measurement*, Vol. 131, Pages 143–155, 2019.
29. Mia, M., Rifat, A., Tanvir, M.F., Gupta, M.K., Hossain, M.J., Goswami, A., "Multi-objective optimization of chip-tool interaction parameters using Grey-Taguchi method in MQL-assisted turning", *Measurement*, Vol. 129, Pages 156–166, 2018.
30. Zerti, O., Yallese, M.A., Zerti, A., Belhadi, S., Girardin, F., "Simultaneous improvement of surface quality and productivity using grey relational analysis based taguchi design for turning couple (AISI D3 steel/ mixed ceramic tool (Al₂O₃ + TiC))", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Vol. 9, Issue 2, Pages 173–194, 2018.