


Eriyik Yığıma Modelleme Süreci Parametrelerinin Taguchi Tabanlı Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Çoklu Yanıt Optimizasyonu

İnayet Burcu Toprak^{1,*} 

¹Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Antalya, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 11.06.2024

Kabul: 09.08.2024

Anahtar Kelimeler:

Eriyik yığıma modelleme

Polilaktik asit

Taguchi yöntemi

Gri ilişkisel analiz

ÖZET

Bu çalışmada, eriyik yığıma modelleme ile üretilen polilaktik asit numunelerinin çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve ağırlık gibi özellikleri incelenmiştir. Numunelerin 3D baskısı için dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve baskı hızı olmak üzere üç temel parametre dikkate alınmıştır. Deneylerin tasarımında Taguchi'nin L9 ortogonal dizisi kullanılmış ve varyans analizi yöntemiyle her bir süreç parametresinin her bir yanıtı olan göreceli etkisi ve katkısı belirlenmiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan testlerde, çekme mukavemeti için optimum parametrelerin baskı hızı 60 mm/s, katman kalınlığı 0.3 mm ve %80 dolgu yoğunluğu olduğu; akma mukavemeti için ise 50 mm/s, katman kalınlığı 0.3 mm ve %80 dolgu yoğunluğu olduğu; ağırlık için ise 50 mm/s, katman kalınlığı 0.2 mm ve %40 dolgu yoğunluğu olduğu belirlenmiştir. Gri İlişki Analizi, en yüksek gri ilişki derecesinin 50 mm/s baskı hızı, 0.3 mm katman kalınlığı ve %80 dolgu yoğunluğunda elde edildiğini göstermiştir. Bu parametre değerlerinde çekme dayanımı 52.29 MPa, akma dayanımı 42.82 MPa ve parça ağırlığı 9.5818 gram olarak elde edilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre, %76 katkı oranı ile Gri İlişki Derecesi için en önemli değişkenin dolgu yoğunluğu olduğu tespit edilmiştir. Önerilen Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi, tüm yanıtlar için optimum parametreleri belirlemiştir. Bu çalışma, nihai ürün üretim süreci için en iyi 3D baskı işlem parametre ayarlarını belirleyerek literatüre katkı sağlamaktadır.

Multiple Response Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters Using Taguchi-Based Gray Relational Analysis

ARTICLE INFO

Received: 11.06.2024

Accepted: 09.08.2024

Keywords:

Fused deposition modeling

Polylactic acid

Taguchi method

Grey relational analysis

ABSTRACT

In this study, the tensile strength, yield strength, and weight properties of polylactic acid samples produced by fused deposition modeling were investigated. Three key parameters for 3D printing, namely infill density, layer thickness, and printing speed, were considered. Taguchi's L9 orthogonal array was used in the experiment design, and the relative effects and contributions of each process parameter to each response were determined using variance analysis. In the tests conducted using the Taguchi method, the optimal parameters for tensile strength were determined to be a printing speed of 60 mm/s, a layer thickness of 0.3 mm, and an 80% infill density; for yield strength, a printing speed of 50 mm/s, a layer thickness of 0.3 mm, and an 80% infill density were found to be optimal; and for weight, a printing speed of 50 mm/s, a layer thickness of 0.2 mm, and a 40% infill density were identified as optimal. Grey Relational Analysis has shown that the highest grey relational degree was achieved at a printing speed of 50 mm/s, a layer thickness of 0.3 mm, and 80% infill density. At these parameter values, the tensile strength was measured as 52.29 MPa, yield strength as 42.82 MPa, and the part weight as 9.5818 grams. According to the results of variance analysis, infill density was identified as the most important variable for Grey Relational Degree, with a contribution rate of 76%. The proposed Taguchi-based grey relational analysis method determined the optimum parameters for all responses. This study contributes to the literature by determining the optimal 3D printing process parameters for final product manufacturing.

*Corresponding author, e-mail: ibmutlu@akdeniz.edu.tr

To cite this article: İ.B. Toprak, Multiple Response Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters Using Taguchi-Based Gray Relational Analysis, *Manufacturing Technologies and Applications*, 5(2), 89-103, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1499800>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Katmanlı üretim veya 3D baskı, havacılık ve uzay, otomotiv, savunma, tıbbi ve tüketici ürünleri de dâhil olmak üzere birçok endüstriyel sektörde kullanılmaktadır [1, 2]. Eriyik Yığılma Modelleme (EYM), lazer gerektirmeden hassas prototipler üretebildiği için birçok endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. EYM yöntemi, 3D CAD dosyalarından doğrudan 3D nesnelere oluşturur. Bu işlem, modelin STL dosyasının ön işleme yazılımına aktarılmasıyla başlar ve ardından takım yolları üretim cihazına aktarılır. Termoplastik malzeme, sıcaklık kontrollü bir nozul aracılığıyla katman katman ekstrüde edilir. Üretim, bilgisayar destekli üretim (CAM) yazılım sistemi tarafından tamamen kontrol edilen sayısal kontrollü bir mekanizma tarafından gerçekleştirilir [3].

Son yıllarda, EYM işlem ayarlarının değişkenliğinin basılı ürün özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak önemli bir konu haline gelmiştir. Araştırmalar, dayanıklılık, baskı süresi, boyutsal doğruluk, sertlik gibi özelliklerin, çeşitli EYM 3D yazıcı parametreleri tarafından ayarlanabileceğini göstermektedir [4]. Genellikle bir işlem parametresi değiştirilirken diğerleri sabit tutulur. Ancak, birden fazla parametrenin optimize edilmesi ve parametreler arasındaki etkileşimlerin göz ardı edilmesi durumunda deney sayısı hızla artar. Bu da zaman ve kaynak israfına neden olabilir. Bu bağlamda, Taguchi yöntemi gibi istatistiksel analiz ve optimizasyon teknikleri, en uygun baskı parametrelerinin belirlenmesinde etkili araçlar olarak öne çıkmaktadır.

Kothandaraman ve Balasubramanian tarafından yapılan araştırmada, EYM yöntemiyle üretilen düz bir nesnenin yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için baskı parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Deneylerde Polilaktik Asit (PLA) malzemesi kullanılmış ve baskı sıcaklığı, katman kalınlığı ve baskı hızı gibi ana parametreler üzerinde odaklanılmıştır. Taguchi' nin deney tasarımı olan L9 ortogonal dizini kullanılarak test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler, baskı sıcaklığının en etkili parametre olduğunu göstermiş, katman kalınlığı ve baskı hızının ise daha az etkili olduğunu belirlemiştir. Bu bulgular, baskı sürecinde baskı sıcaklığının dikkatle kontrol edilmesinin önemini vurgulamaktadır [5]. Benzer şekilde, Handiansah vd. [6], Termoplastik Poliüretan (TPU) malzemesiyle yapılan 3D baskının yüzey pürüzlülüğünü optimize etmek için çeşitli işlem parametrelerinin etkisini incelemiştir. Bu parametreler arasında akış hızı, katman kalınlığı, nozul sıcaklığı, baskı hızı, örtüşme ve fan hızı bulunmaktadır. Deneyler L27 ortogonal Taguchi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve optimal parametre kombinasyonu belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, katman kalınlığının baskı yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkisi olduğu ve en yüksek katkı oranına sahip olduğu bulunmuştur. Heidari-Rarani vd. [7], PLA numunelerinin çekme özellikleri üzerinde etkili olan dolgu yoğunluğu, baskı hızı ve katman kalınlığı gibi üç önemli işlem parametresinin etkisini araştırmıştır. Deney tasarımı olarak Taguchi yöntemi uygulanmış ve deney sayısını azaltarak maksimum mekanik özellikler, minimum ağırlık ve minimum baskı süresi için optimal parametreler bulunmaya çalışılmıştır. Rasheed vd. [8], EYM işlem parametrelerinin Polilaktik Asit-Akrilonitril Bütadien Stiren (PLA-ABS) bi-katmanlı kompozitin çekme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Dört ana parametre (dolgu yoğunluğu, katman sayısı, baskı hızı ve yatak sıcaklığı) farklı seviyelerde değiştirilmiş ve Taguchi optimizasyon tekniği kullanılarak deneyler optimize edilmiştir. Sonuçlar, dolgu yoğunluğunun çekme dayanımını en çok etkilediğini, baskı hızının da önemli olduğunu göstermektedir. Dina vd. [9]' da çalışmalarında, EYM sürecinin işleme parametrelerinin nihai katman kalınlığı, baskı hızı, yönlendirme açısı, dış sınır sayısı ve nozul sıcaklığı gibi beş imalat değişkeninin çekme dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Pinar vd. [10], 3D yazıcı ile üretilen PLA numunelerinin vida tutma kuvveti üzerindeki etkilerini istatistiksel olarak araştırmıştır. Taguchi L27 Ortogonal Dizisi kullanılarak, yazdırma hızı, yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, tabla sıcaklığı ve dolgu deseni gibi farklı faktörlerin çeşitli seviyeleri test edilmiştir. Çalışma, yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, dolgu deseni ve yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı faktörleri ve etkileşimlerinin anlamlı olduğunu ortaya koymuştur. Demir [11], 3D yazıcı ile üretilen PLA parçaların sertliği üzerine yazıcı parametrelerinin etkisini araştırmıştır. İncelenen parametreler nozul çapı, katman yüksekliği, iç örgü açısı ve nozul sıcaklığıdır. Her bir parametre için üç seviye belirlenmiş ve deney sayısı Taguchi deney tasarımı ile optimize edilmiştir. Nozul çapının sertliğe %85 oranında etkisi varken, nozul sıcaklığının etkisi belirsiz kalmıştır. Sertlik, katman kalınlığı ile ters orantılı, nozul çapı ile doğru

orantılıdır. Daha büyük nozul çapı, daha iyi mekanik özellikler ve daha kısa üretim süresi sağlamaktadır. Tunçel ve Bayraklılar [12], EYM kullanılarak üretilen PLA numunelerinin basma mukavemetini optimize etmeyi amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda Taguchi yöntemi kullanılarak üç farklı işlem parametresi (duvar kalınlığı, dolgu deseni ve baskı hızı) optimize edilmiştir. Sonuçlar, duvar kalınlığının en etkili parametre olduğunu, dolgu deseni ve baskı hızının ise daha az etkili olduğunu göstermektedir.

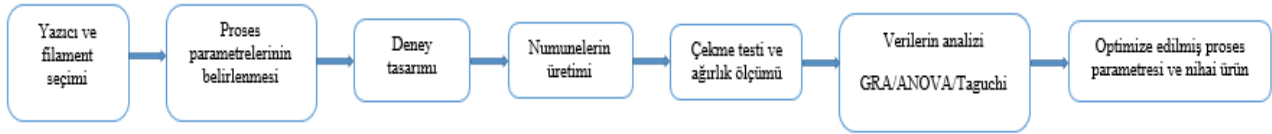
Bu çalışmalar, EYM sürecinde kullanılan çeşitli baskı parametrelerinin, üretilen parçaların yüzey kalitesi, mekanik dayanımı ve diğer kritik özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymakta ve Taguchi yöntemi gibi optimizasyon tekniklerinin bu alanda etkin bir şekilde kullanılabilmesini göstermektedir. Ancak, EYM süreçlerinde genellikle birden fazla performans kriteri aynı anda optimize edilmek istenir. Örneğin, bir parça için hem yüzey kalitesinin yüksek olması hem de mekanik dayanımının güçlü olması gerekebilir. Bu tür çoklu kriterlerin bulunduğu durumlarda, tek bir optimizasyon yöntemi yetersiz kalabilir ve dengeleyici çözümler bulmak zorlaşabilir. İşte bu noktada, çok kriterli karar verme yöntemlerine (MCDM) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür durumlarda, Gri İlişkisel Analiz (GRA) gibi yöntemler tercih edilmesinin önemi büyüktür. GRA, farklı kriterler arasındaki ilişkileri analiz ederek, tüm kriterleri dikkate alan dengeli ve optimum çözümler elde edilmesine olanak tanır. Özellikle, EYM gibi birden fazla parametrenin ve performans kriterinin bulunduğu karmaşık süreçlerde, GRA sayesinde daha kapsamlı ve dengeli sonuçlar elde edilebilir. GRA'nın sunduğu sistematik yaklaşım, parametrelerin her birinin toplam performans üzerindeki etkilerini belirleyerek en uygun kombinasyonların seçilmesini sağlar. Böylece, EYM ile üretilen parçaların kalitesi ve performansı artırılabilir. Shakeria vd. [13], farklı işlem parametrelerinin (baskı odası sıcaklığı, baskı sıcaklığı, katman kalınlığı ve baskı hızı gibi) silindiriklik, dairesellik, dayanıklılık, Young modülü ve deformasyon gibi belirli özellikler üzerindeki etkisini GRA yöntemiyle araştırmıştır. Singh ve Barti [14], gerilme dayanımı, eğilme dayanımı ve aşınma direncini eş zamanlı olarak etkileyen en iyi parametreleri belirlemeyi amaçlayarak GRA yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada, katman yüksekliği, ekstruder sıcaklığı, doluluk yüzdesi ve baskı hızının üç mekanik özelliği üzerindeki farklı kombinasyonlarının etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sharma ve Kumar [4], EYM ile basılmış PLA numunelerinin mekanik özelliklerini incelemiştir. Özellikle, çekme dayanımı ve Shore sertliği gibi mekanik özellikler üzerindeki etkiler araştırılmıştır. İşlem parametrelerinin (katman yüksekliği, nozul sıcaklığı, raster açısı ve çevresel basınç gibi) bu mekanik özelliklere olan etkisi değerlendirilmiştir. GRA kullanılarak daha iyi mekanik özelliklere sahip numunelerin üretimi için işlem parametreleri optimize edilmiştir. John vd. [15], Taguchi deney tasarımı ve GRA kullanarak hücresel geometri, nozul çapı ve gerilme hızı gibi parametreleri incelemişlerdir. Yapılan çekme testleri sonuçlarına göre, kare desenli numuneler diğerlerine göre daha iyi performans göstermiş ve mekanik dayanımı daha yüksek bulunmuştur. GRA, 0.8 mm'lik büyük nozul çapı, dakikada 5 mm'lik gerilme hızı ve kare hücresel geometri kombinasyonunun en yüksek ilişki derecesine sahip olduğunu göstermiştir. Nozul çapının en belirgin faktör olduğu ve hücresel geometrinin ise ikinci sırada yer aldığı belirlenmiştir. Patel vd. [3] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, öncelikle çekme dayanımı, Shore sertliği ve boyutsal hassasiyet gibi mekanik özelliklere odaklanılmıştır. Numunelerin 3D baskısı için belirlenen işlem parametreleri arasında katman yüksekliği, dolgu yoğunluğu ve baskı hızı bulunmaktadır. Çalışmanın bir sonraki aşamasında, Taguchi tabanlı Gri İlişkisel Analiz (TGRA) yöntemi kullanılarak çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiş ve tüm mekanik özelliklerin en uygun seviyede optimize edildiği bir numune üretilmiştir.

Otomotiv ve savunma sektörlerinde, parçaların hafif ve dayanıklı olması gereklidir. Hafif parçalar, araçların performansını artırırken yakıt verimliliğini de iyileştirir. Savunma sektöründe ise hafif ve dayanıklı malzemeler, taşıma kapasitesini artırırken operasyonel manevra kabiliyetini artırır. Ayrıca zamanın etkili bir şekilde yönetilmesi önemlidir. Özellikle savunma sektöründe, operasyonların kesintisizliği ve hızlı tepki verebilme yeteneği, zamanın kritikliğini daha da artırır. Bu ihtiyaçları karşılamak için, EYM gibi 3D baskı teknolojileri önemli bir rol oynar. Bu teknolojiler, hızlı prototipleme ve üretim süreçlerini sağlayarak zamanı kısaltabilirler. Ayrıca, çeşitli malzemelerle hafif ve dayanıklı parçaların üretimini mümkün kılarlar. Ancak, bu teknolojilerin

etkin bir şekilde kullanılabilmesi için işlem parametrelerinin doğru bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, EYM yöntemiyle üretilen parçaların çekme, akma dayanımı ve ağırlığını etkileyen dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve baskı hızı gibi işlem parametreleri incelenmiştir. Deneyler Taguchi yöntemi kullanılarak tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Taguchi gri ilişkisel analiz yöntemi (TGRA), çekme ve akma dayanımını maksimize etmek ve ağırlığı minimize etmek için birden fazla performans özelliğini optimize etmede kullanılmıştır. Detaylı literatür incelemesinden, çoğu araştırmacının EYM işlem parametrelerinin optimizasyonunda Taguchi yöntemini kullandığı görülmüştür. Birkaç çalışmada TGRA denenmiş ancak önerilen giriş-yanıt kombinasyonları kullanılmamıştır. Bu çalışma literatüre ilave bir katkı sunmuştur. Giriş parametrelerinin değerleri ve yanıtlar, literatür incelemesi sonucunda belirlenmiştir. Özellikle çok amaçlı optimizasyon için TGRA metodolojisinin seçilmesine karar verilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Önerilen yöntem Şekil 1'de gösterilmiştir. İlk olarak, donanım, malzeme ve işlem parametrelerinin seçimi yapılmıştır. Deney için Taguchi'nin L9 tasarımı kullanılmış ve numuneler bu tasarıma göre basılmıştır. Ardından, numunelerin mekanik özellikleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler, analiz sürecinde değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın genel diyagramı (General diagram of the article)

2.1. İşlem Parametreleri ve Araştırma Değerleri (Process Parameters and Research Values)

Araştırmalar, EYM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özelliklerinin baskı hızı, katman kalınlığı ve dolgu yoğunluğu gibi işlem faktörlerinden etkilendiğini göstermektedir [16]. Deneyler için Taguchi deney tasarımının L9 ortogonal dizisi kullanılmıştır ve her işlem parametresi için üç farklı seviye dikkate alınmıştır. Bu seviyeler, literatür dikkate alınarak belirlenmiştir. İncelenen işlem parametrelerinin araştırma aralıkları ve elde edilen seviyeleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. İşlem parametreleri ve seviyeleri (Process parameters and levels)

Parametreler	Seviyeleri		
Dolgu Yoğunluğu (DY) (%)	40	60	80
Katman Kalınlığı (KK) (mm)	0.2	0.25	0.3
Baskı Hızı (H) (mm/sn)	40	50	60

2.2. Materyal (Material)

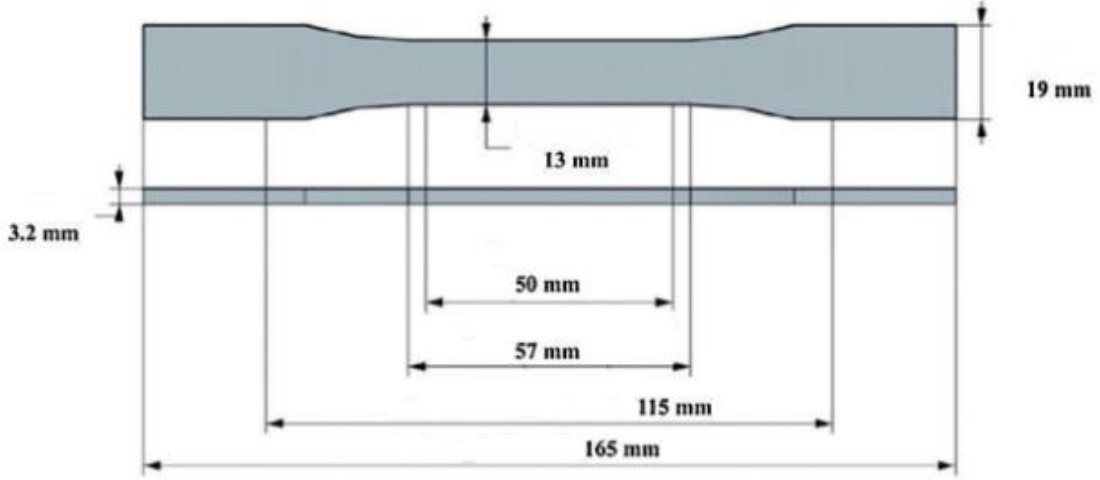
Analiz amacıyla test numunelerinin basımında Teira3D 1.75 mm lik PLA' dan yapılmış beyaz filament kullanılmıştır. PLA malzemesinin özellikleri Tablo 2' de gösterilmektedir.

Tablo 2. PLA malzeme özellikleri (PLA material properties)

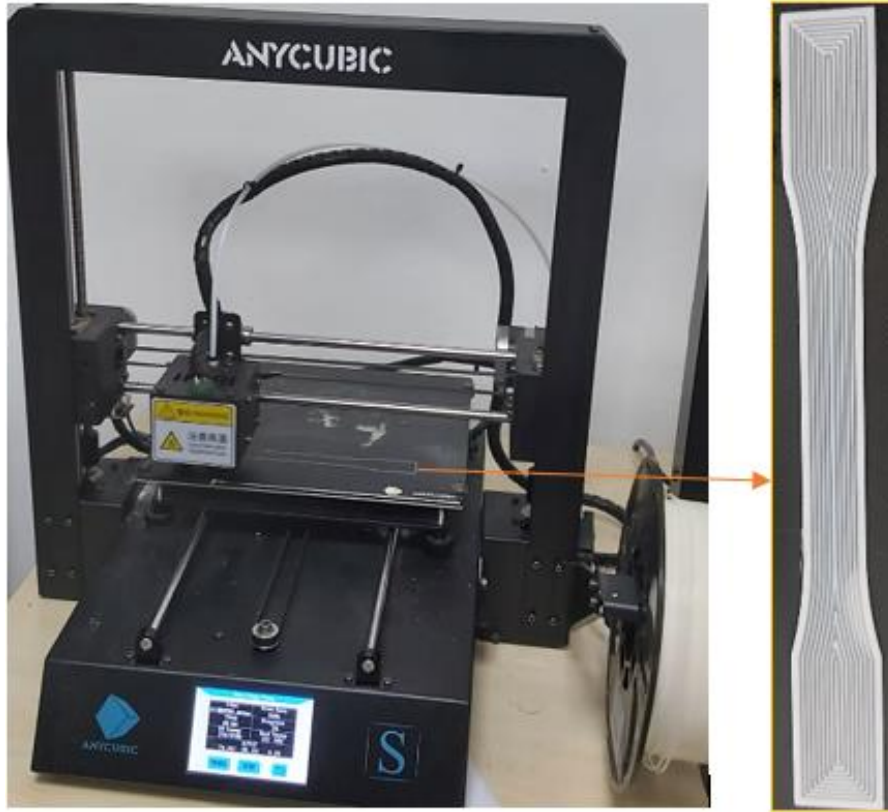
Özellik	Aralık
Ekstrüzyon Sıcaklığı	200-220 °C
Tabla Sıcaklığı	50-60 °C

2.3. Numune Hazırlığı (Sample Preparation)

PLA'nın çekme özellikleri ASTM D638 tip 1 standardı kullanılarak incelenmiştir. CAD 3D modelinin oluşturulması için kullanılan örneğin şekli ve boyutları Şekil 2'de gösterilmiştir [17]. CAD modeli STL formatında CURA yazılımına aktarılmıştır. PLA örneklerini üretmek için ANYCUBIC yazıcı kullanılmıştır (Şekil 3). Her bir numune 0.4 mm nozul çapı, 50 °C platform sıcaklığı, 210 °C baskı sıcaklığı olmak üzere aynı özelliklerle basılmıştır.



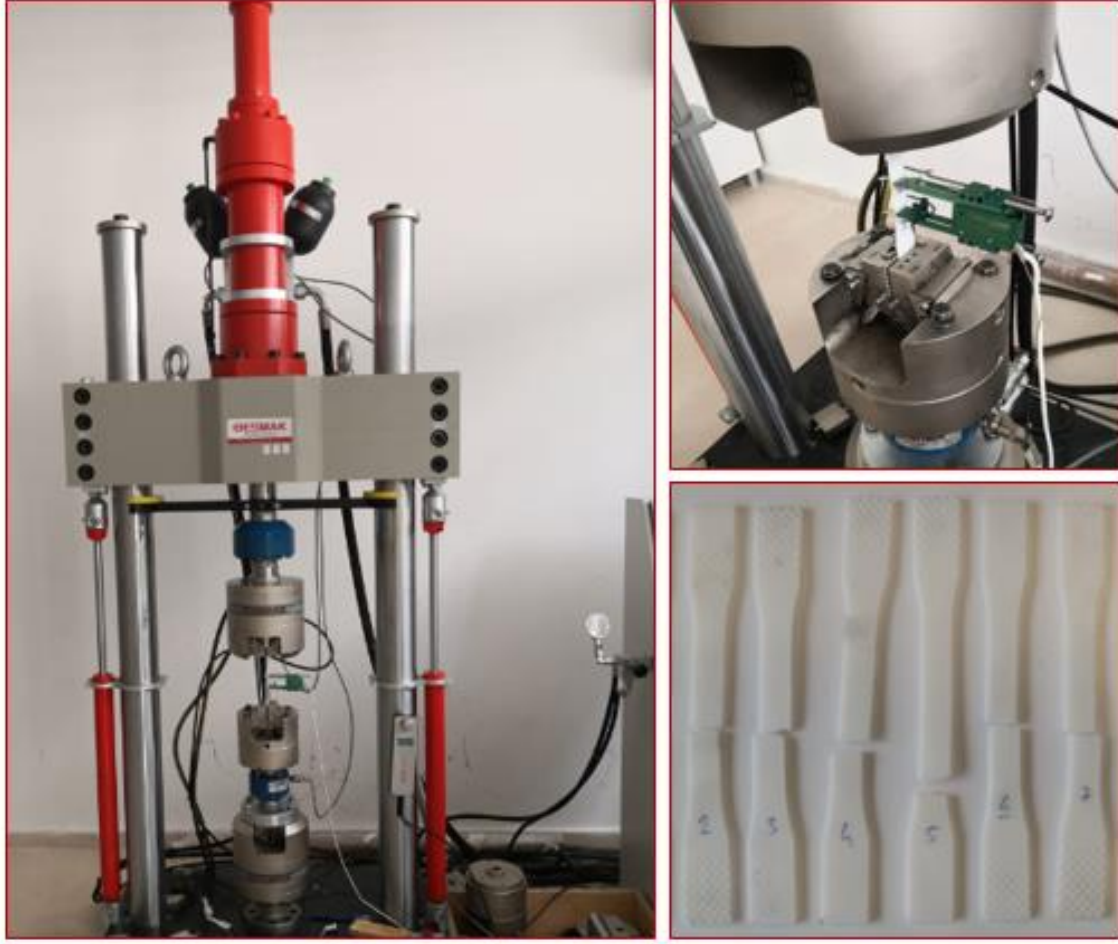
Şekil 2. Çekme numunesinin CAD modeli (CAD model of the tensile specimen)



Şekil 3. Numunenin 3 boyutlu baskısı (3D printing of the specimen)

2.4. Ölçüm Sonuçları (Measurement Results)

Karadeniz Teknik Üniversitesi METAM' da gerçekleştirilen ölçümlerde, çekme testleri 25kN kapasiteli Besmatik statik dinamik universal test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde ekstansiyometre kullanılmış olup, çekme hızı 5 mm/dak olarak belirlenmiştir. Üretim parametre değişikliklerinin numunelerin çekme ve akma dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek için bu test sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 4' te çekme testi cihazı, test esnasındaki numuneler, çekme testi sonrası numunelerin kopma görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 4. Çekme testi cihazı, test esnasındaki numuneler ve çekme testi sonrası numunelerin kopma görüntüleri (Tensile test machine, specimens during the test, and images of the specimens after fracture)

Ayrıca, Şekil 5'te RADWAG AS 220.R2 PLUS kullanılarak yapılan numunelerin ağırlık ölçümüne ait görüntüyü bulabilirsiniz.



Şekil 5. Numunelerin ağırlık ölçümü (The weight measurement of the samples)

Çekme dayanımı (ÇD), Akma Dayanımı (AD) ve Ağırlık (A) için Taguchi' nin L9 Ortogonal Dizisi kullanılarak belirlenen yanıtlar Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Ölçülen yanıtlar (Measured responses)

Deney No	Dolgu Yoğunluğu (%)	Katman Kalınlığı (mm)	Baskı Hızı (mm/sn)	ÇD (MPa)	AD (MPa)	A (g)
1	40	0.2	40	41.73	34.73	7.5667
2	40	0.25	50	44.14	38.53	8.0964
3	40	0.3	60	48.17	30.85	8.7138
4	60	0.2	50	46.08	27.53	8.181
5	60	0.25	60	48.14	28.71	8.6518
6	60	0.3	40	48.65	34.19	9.1133
7	80	0.2	60	49.89	36.09	8.9661
8	80	0.25	40	51.72	35.97	9.3539
9	80	0.3	50	52.29	42.82	9.5818

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Taguchi Deney Tasarım Yöntemi (Taguchi Experimental Design Method)

Taguchi metodu, ürün ve süreçlerin geliştirilmesinde kullanılan deneysel bir tasarım ve optimizasyon tekniğidir. Bu yöntem, maliyetleri minimize etmeye odaklanarak en az deney sayısı ile maksimum bilgi elde etmeyi amaçlar [3-4]. Endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilen Taguchi metodu, birçok değişkenin etkileşimini analiz etmek için tasarlanmıştır. Bu çalışmada, EYM ile üretilen örneklerin mekanik özellikleri, EYM sürecinin kontrol parametreleri ile ilişkilendirilerek Taguchi tekniği kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada, numunelerin dayanıklılığına odaklanılmış ve en yüksek dayanıklılığın elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, çekme ve akma dayanımı için "daha büyük, daha iyi" kalite kriteri benimsenmiştir. S/N oranı hesaplama formülü, Eşitlik 1' de gösterilmiştir [18].

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (1)$$

S/N oranı, bu kalite kriterini nicel olarak değerlendirmek için kullanılan bir yöntemi temsil etmektedir. Numunenin hafif olması amaçlandığından, ağırlık için yanıtların kalite özelliklerini değerlendirirken Eşitlik 2'deki "daha düşük, daha iyi" prensibi tercih edilmiştir [18].

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (2)$$

ANOVA, parametrelerin %95 güven düzeyindeki önemini ve yanıtları etkilemedeki yüzde katkıları belirlemek için sıkça kullanılan bir istatistiksel analiz yöntemidir [14]. Bireysel yanıtların analizi için ANOVA gerçekleştirilmiştir. Çekme dayanımı için Tablo 4' te sunulan analiz sonuçları, dolgu yoğunluğunun çekme dayanımını en çok etkileyen faktör olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Tablo 5 ve Şekil 6' da gösterildiği gibi, sinyal-gürültü oranı verileri, parametreleri sıralamak ve bunların numunenin çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini belirlemek için kullanılmıştır. Tablo 5' e göre, baskı sırasında numunenin çekme mukavemetini en çok etkileyen parametrenin dolgu yoğunluğu olduğu, bunu katman kalınlığı ve baskı hızının takip ettiği açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar, literatürü desteklemektedir [3]. Şekil 6' ya göre, çekme dayanımı için optimum baskı koşulları, %80 dolgu yoğunluğu (DY), 0.30 mm katman kalınlığı (KK) ve 60 mm/sn baskı hızı (H) olarak belirlenmiştir. Modelin R kare değeri %96.60' dır. Katman kalınlığı ve dolgu yoğunluğu arttıkça, numunenin çekme dayanımı belirgin şekilde artmaktadır. Ayrıca, baskı hızının 40 mm/sn' den 60 mm/sn' ye çıkmasıyla çekme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Daha kalın katmanlar, daha az katman gerektirir ve bu da daha az ara yüzey ve bağlantı noktası demektir. Bu durum, daha güçlü bir mekanik bağlanma ve homojen bir yapı oluşturabilir, bu da çekme dayanımını artırabilir. Syed vd. göre, katman kalınlığındaki artış, bileşenin genel dayanıklılığını artırır; bu durum, numunenin çekme mukavemetinin önemli ölçüde artmasına yol açar. Dolgu yoğunluğunun çekme mukavemeti üzerindeki etkisi ise çok açıktır: Numunenin yoğunluğu arttıkça, çekme mukavemeti

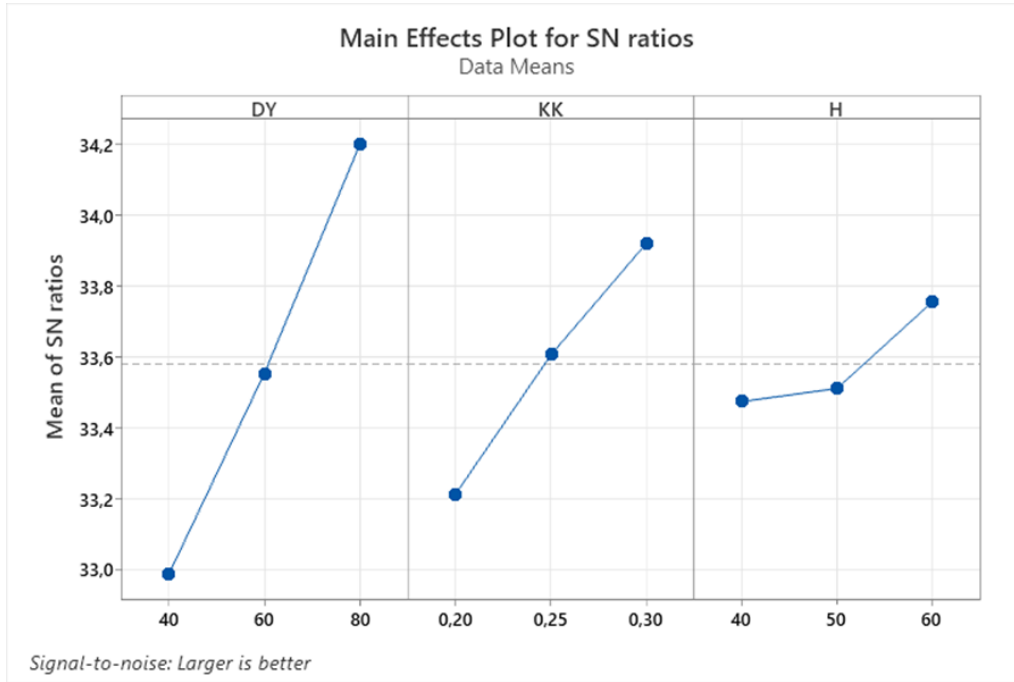
de artar. Dolayısıyla, dolgu yoğunluğunun artmasıyla birlikte çekme mukavemetinde bir artış gözlemlenir [19]. Günay vd. [20], üretilen numunelerin kesit alanlarının aynı olmasına rağmen, kesit alanındaki doluluk oranının artmasının birim alana düşen çekme yükü taşıma kapasitesini artıracak ve bu durumun yüksek dayanıma neden olacağını açıklıyorlar. Ahmad vd. [21] de, dolgu yoğunluğunun artmasıyla mekanik dayanıklılığın artacağını, bu durumun daha fazla malzemenin birikmesiyle ve dolayısıyla parçanın içinde daha az boşluk olmasıyla gerçekleşeceğini belirtiyorlar.

Tablo 4. Çekme dayanımı için ANOVA (ANOVA for tensile strength)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	PCR (%)
DY	2	2.2122	2.2122	1.10612	20.21	0.047	68.75
KK	2	0.7564	0.7564	0.37821	6.91	0.126	23.5
H	2	0.1395	0.1395	0.06975	1.27	0.440	4.34
Residual Error	2	0.1094	0.1094	0.05472			
Total	8	3.2176					

Tablo 5. Çekme dayanımı için yanıt tablosu (Response table for tensile strength)

Level	DY	KK	H
1	32.99	33.21	33.47
2	33.55	33.61	33.51
3	34.20	33.92	33.76
Delta	1.21	0.71	0.28
Rank	1	2	3



Şekil 6. Çekme dayanımı için S/N oranlarının ana etki grafiği (Main effect plot of S/N ratios for tensile strength)

Tablo 6' da sunulan ANOVA sonucuna göre, dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve baskı hızı, akma dayanımının %77.64' ünü açıklamaktadır. Tablo 7' deki S/N oranlarına ilişkin yanıt tablosu, dolgu yoğunluğunun akma dayanımı üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğunu, bunu baskı hızı ve katman kalınlığının takip ettiğini göstermektedir. Şekil 7' ye göre, akma dayanımı için optimum baskı koşulları, %80 dolgu yoğunluğu (DY), 0.30 mm katman kalınlığı (KK) ve 50 mm/sn baskı hızı (H) olarak belirlenmiştir. Kerekes vd. [22], dolgu yoğunluğunun artmasıyla birlikte Young modülü, başlangıç akma gerilimi, mukavemet ve tokluk özelliklerinin arttığını bulmuştur. Numunenin özelliklerini orta düzeyde etkileyen bir diğer faktör olarak katman kalınlığını

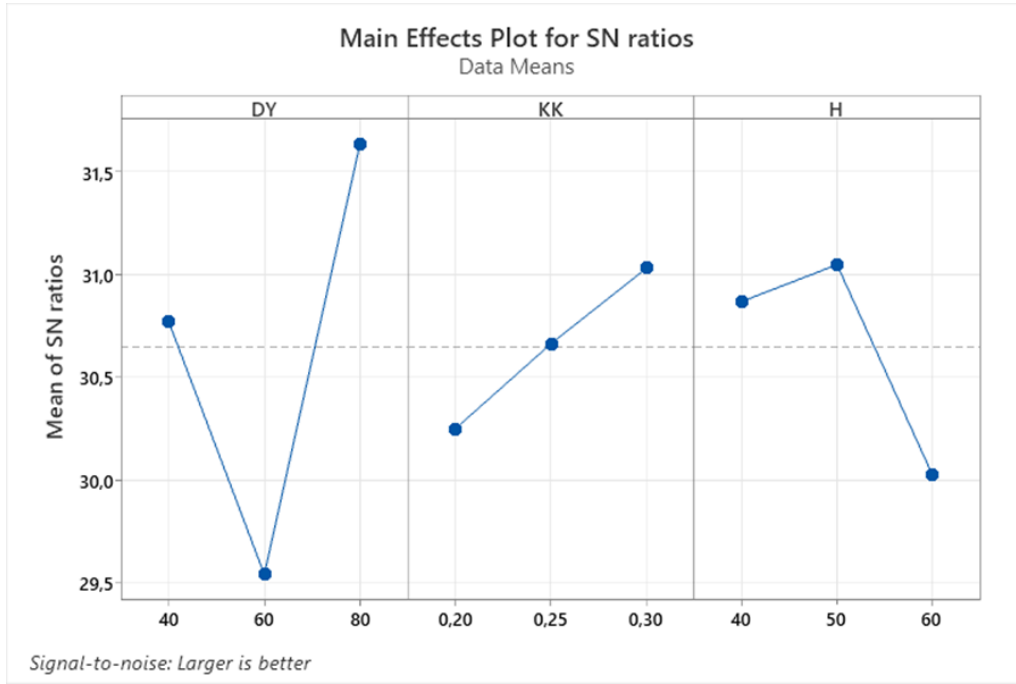
belirlemiştir. Daha düşük tabaka kalınlığının, akma sonrası özelliklerdeki belirsizlikleri artırdıklarını gözlemlemiştir.

Tablo 6. Akma dayanımı için ANOVA (ANOVA for yield strength)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	PCR (%)
DY	2	6.6078	6.6078	3.3039	2.47	0.288	55.22
KK	2	0.9121	0.9121	0.4561	0.34	0.746	7.6
H	2	1.7705	1.7705	0.8852	0.66	0.602	14.8
Residual Error	2	2.6761	2.6761	1.3381			
Total	8	11.9666					

Tablo 7. Akma dayanımı için yanıt tablosu (Response table for yield strength)

Level	DY	KK	H
1	30.77	30.25	30.87
2	29.54	30.67	31.05
3	31.63	31.03	30.03
Delta	2.09	0.78	1.02
Rank	1	3	2



Şekil 7. Akma dayanımı için S/N oranlarının ana etki grafiği (Main effect plot of S/N ratios for yield strength)

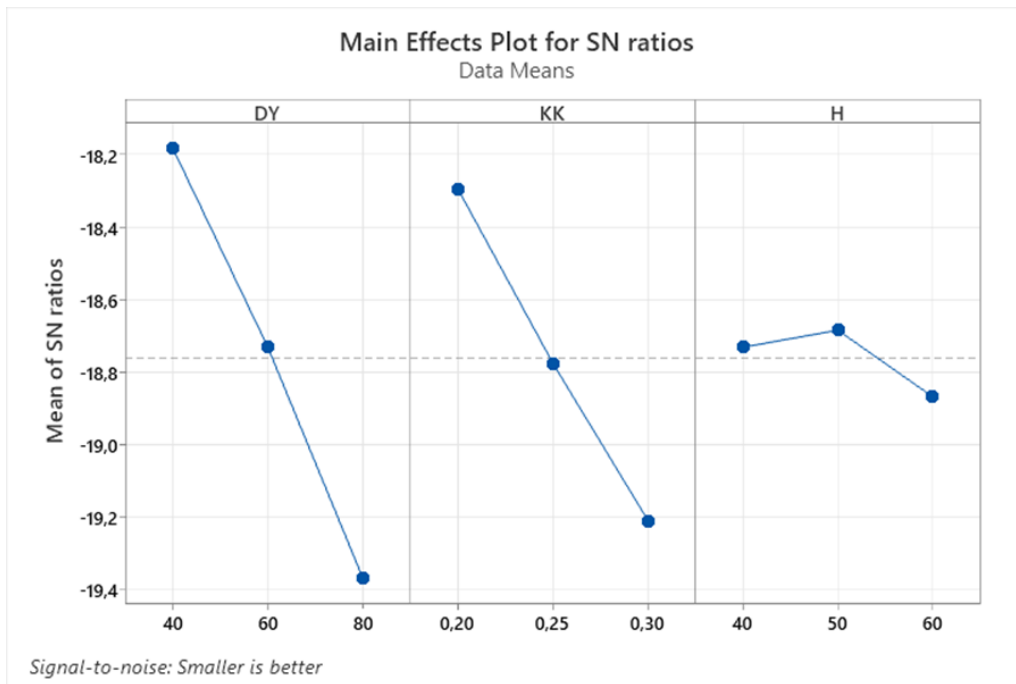
Tablo 8' de sunulan ANOVA tablosundan, dolgu yoğunluğunun ağırlığa en yüksek etkiye sahip olduğu ve bunu katman kalınlığının takip ettiği görülmektedir. Tablo 9' daki sıralama sonuçlarına göre, ağırlık için en etkili parametre 1.18 değeriyle dolgu yoğunluğu iken en az etkili parametre 0.18 değeriyle baskı hızı olmuştur. Ana etki grafiğine göre, dolgu yoğunluğu ve katman kalınlığının artışının ağırlığı artırdığı görülmektedir. Bu sonuç, Tunçel vd.'nin çalışmasını destekler niteliktedir [23]. Şekil 8'e göre, minimum ağırlık için optimum baskı koşulları, %40 dolgu yoğunluğu (DY), 0,20 mm katman kalınlığı (KK) ve 50 mm/sn baskı hızı (H) olarak belirlenmiştir. Modelin R kare değeri 98.40'dır. Dolgu yoğunluğu, EYM yöntemiyle üretilen parçanın hem kütlesini hem de dayanıklılığını önemli ölçüde etkiler. Daha düşük yoğunluklar, azalan baskı süresi ve malzeme kullanımıyla maliyet tasarrufu ve ağırlık azaltımı sağlar. Ancak, yapı içindeki boşlukların artması gözenekliliği artırır ve bu durum, bağlanmış alanın azalmasına ve dolayısıyla mekanik özelliklerin zayıflamasına yol açabilir. Öte yandan, dolgu yoğunluğunun artması, daha yüksek mekanik kalite sunar ancak basım süresini önemli ölçüde uzatabilir [21].

Tablo 8. Ağırlık için ANOVA (ANOVA for weight)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	PCR (%)
DY	2	2.10758	2.10758	1.05379	37.92	0.026	60.74
KK	2	1.25265	1.25265	0.62633	22.54	0.042	36.1
H	2	0.05389	0.05389	0.02694	0.97	0.508	1.55
Residual Error	2	0.05558	0.05558	0.02779			
Total	8	3.46971					

Tablo 9. Ağırlık için yanıt tablosu (Response table for weight)

Level	DY	KK	H
1	-18.18	-18.30	-18.73
2	-18.73	-18.78	-18.68
3	-19.37	-19.21	-18.87
Delta	1.18	0.91	0.18
Rank	1	2	3



Şekil 8. Ağırlık için S/N oranlarının ana etki grafiği (Main effect plot of S/N ratios for weight)

3.2. Gri İlişkisel Analiz (Grey Relational Analysis)

Taguchi yöntemi kullanılarak her bir yanıt bağımsız olarak optimize edilebilmektedir. Birçok durumda, tek bir yanıt değeri (tek bir ölçüt veya tek bir hedef) kullanmak yetersiz olabilir çünkü gerçek dünya uygulamaları genellikle çok karmaşıktır ve birden fazla kriter veya hedefi dikkate almak gerekir. Çoklu yanıt değerlendirmesi, EYM gibi karmaşık 3B baskı süreçlerinde analizi daha kapsamlı hale getirir ve karar verme sürecini iyileştirir. Gri ilişkisel analiz (GRA), çok kriterli karar verme problemlerini çözmek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde, çeşitli alternatiflerin performansı arasındaki ilişkileri analiz etmek için gri ilişkisel derece (GRG) kullanılır. GRG, her bir alternatifin belirlenen kriterlere olan yakınlığını ölçen bir ölçüdür. Çok amaçlı optimizasyon durumunda, en yüksek performansın en yüksek GRG ile ilişkilendirildiği gözlemlenmiştir [4, 19]. GRA'nın uygulanmasında temel adımlardan biri verinin normalizasyonudur. Veriyi normalleştirmek için üç seçenek sunulur: nominal, daha küçük ve daha büyük daha iyidir. Bu aşama, verilen veriyi 0 ile 1 arasında standart boyutsuz bir ölçeğe dönüştürür. Çalışmada, çekme ve akma dayanımı gibi mekanik özelliklerin optimize edilmiş performansı için en yüksek değere sahip olması gerektiği düşünüldüğünden, daha büyük daha iyidir seçeneği tercih edilmiştir. Daha büyük daha iyidir seçeneği için, veriyi normalleştirmede eşitlik 3 kullanılmıştır [13].

$$X^*(p) = \frac{X_i(p) - \text{Min}(X_i(p))}{\text{Max}(X_i(p)) - \text{Min}(X_i(p))} \quad (3)$$

Dönüşüm sırasında, ağırlığın minimize edilmesi istendiğinden daha küçük, daha iyi yaklaşımı kullanılmıştır. Ağırlığı minimize etmek için normalleştirirken eşitlik 4 kullanılmıştır [24].

$$X^*(p) = \frac{\text{Max}(X_i(p)) - X_i(p)}{\text{Max}(X_i(p)) - \text{Min}(X_i(p))} \quad (4)$$

Daha sonra, her bir yanıtın sapma dizisi belirlenir. Gri İlişkisel Katsayı, bu sapma dizisinden hesaplanır. Ardından, her bir yanıtın ağırlığı Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi ile belirlenir.

AHP, çok kriterli karar verme süreçlerinde karar vericilere kriterler arasındaki öncelikleri belirlemede ve alternatifler arasında tercih yapmada yardımcı olan matematiksel yöntemdir. İlk adım olarak, karar verme sürecinde önemli olan kriterler belirlenir. İkinci adımda, belirlenen kriterler birbirleriyle karşılaştırılarak karşılaştırma matrisi oluşturulur. Bu matris, her kriter çifti için önem derecelerini içerir. Üçüncü adımda, karşılaştırma matrisindeki verilere dayanarak, kriterlerin öncelikleri veya normalize edilmiş ağırlıkları hesaplanır. Bu hesaplama süreci, tutarlılık kontrolü yaparak ve ağırlıkları belirlemek için özel matematiksel işlemler kullanarak gerçekleştirilir [25]. Son olarak, dördüncü adımda, belirlenen kriterlere göre alternatifler değerlendirilir ve her alternatif için kriter ağırlıkları kullanılarak toplam değerlendirme yapılır. Bu değerlendirme sonucunda, en uygun alternatif veya alternatifler belirlenir ve karar verme süreci yapılandırılarak nesnel bir karar verme ortamı sağlanır.

AHP, karmaşık karar verme problemlerinde farklı kriterler arasındaki ilişkileri analiz ederek, karar vericilere sistematik bir yaklaşım sunar. Hem akademik hem de endüstriyel alanda geniş bir uygulama alanına sahiptir [26-28]. AHP ile hesaplanan ağırlık değerleri şu şekildedir: çekme dayanımı için 0.5571, akma dayanımı için 0.3202 ve ağırlık için 0.1226.

Son olarak, Gri İlişkisel Derece (GRG), her bir yanıtın Gri İlişkisel Katsayı değerlerinin AHP ile ağırlıklı toplamı olarak hesaplanır. Bu süreç, her bir yanıtın etkisini dikkate alarak tek bir çoklu yanıt skoru elde etmek için yapılır [14].

Gri İlişkisel Derece ve sıralamalar yukarıdaki adımlara göre hesaplanmış ve sonuçlar tablo 10' da gösterilmiştir. En yüksek gri ilişkisel derece 1. sıradadır. Deney 9, kontrol edilebilir parametrelerin en iyi optimum kombinasyonunu temsil etmektedir. GRG sonuçları, parametrelerin GRG üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla ANOVA tekniği kullanılarak analiz edilmiştir. Tablo 11, toplam varyansın %76'sının en yüksek katkıya sahip olan dolgu yoğunluğuna ($p < 0.05$) ait olduğunu göstermektedir. Benzer sonuç Patil vd. [29] çalışmasında da görülmektedir. Ayrıca, katman kalınlığı ve baskı hızının GRG üzerindeki etkisi söz konusu olduğunda önemsiz değişkenler olduğu sonucuna varılabilir ($p > 0.05$). Model için R-kare değeri %96.59' dur. GRG için sinyal-gürültü oranı Yanıt Tablosuna (Tablo 12) göre, en yüksek etkiye sahip olan faktör dolgu yoğunluğu, bunu katman kalınlığı ve baskı hızı takip etmektedir.

Şekil 9, maksimum ve minimum çoklu performansla ulaşmak için ilgili parametre seviyelerini göstermektedir. Optimum GRG değerinin %80 dolgu yoğunluğu, 0.30 mm katman kalınlığı ve 50 mm/sn baskı hızında elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Tablo 13, başlangıç ve optimum parametreler arasındaki GRG iyileştirmesini göstermektedir. Karşılaştırma için seçilen başlangıç parametreleri: %80 dolgu yoğunluğu, 0.30 mm katman kalınlığı ve 40 mm/sn baskı hızıdır. Bu parametrelerin yanıtları: 51.18 MPa çekme dayanımı, 32.91 MPa akma dayanımı ve 9.5777 g ağırlıktır. Bu parametreler için hesaplanan GRG değeri ise 0.6407' dir. Optimum parametrelerle yapılan deneyde çekme dayanımı 52.29 MPa, akma dayanımı 42.82 MPa, ağırlık 9.5818 g ve GRG değeri 0.9182' dir. Dolayısıyla %43.31' lik bir GRG iyileştirmesi elde edilmiştir. Ağırlıkta kayda değer bir değişim olmamakla birlikte, çekme dayanımında 1.11 MPa, akma dayanımında 9.91 MPa artış meydana gelmiştir.

Tablo 10. Gri ilişkisel analiz sonucu (Result of grey relational analysis)

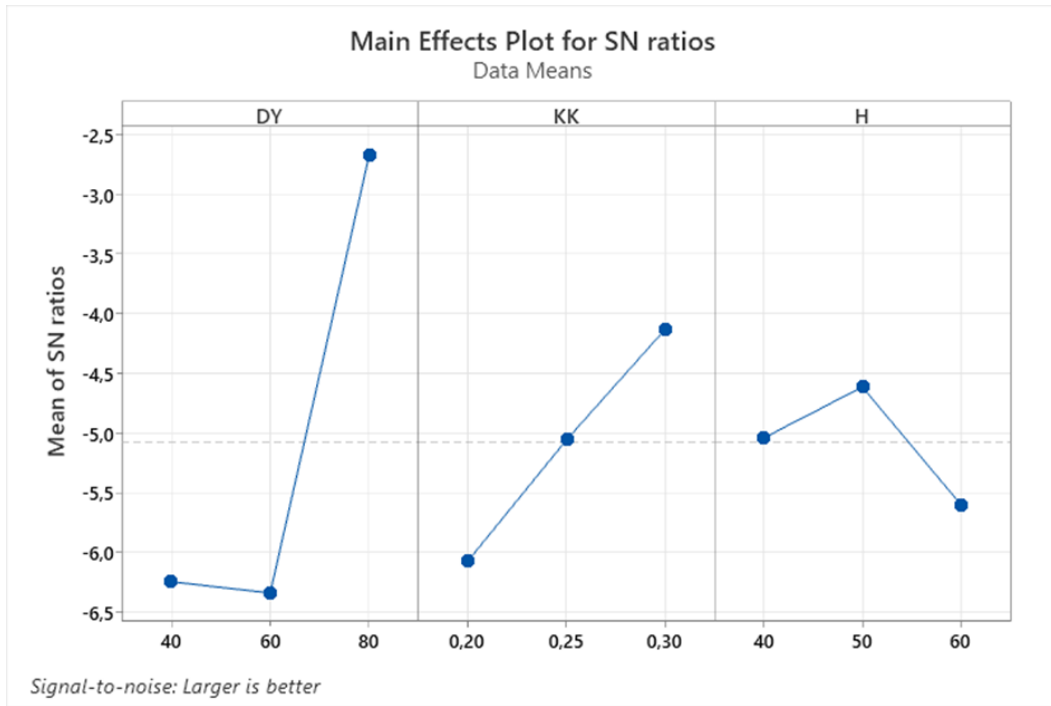
Deney No	Normalizasyon			Uzaklık Matrisi			Gri İlişki Katsayısı			Gri İlişki Derecesi							
	ÇD	Ağırlık	AD	ÇD	Ağırlık	AD	ÇD	Ağırlık	AD	ÇD*0.5571	Ağırlık*0.1226	AD*0.3202	GRG	Sıralama			
1	41.7300	7.5667	34.7300	0.0000	1.0000	0.4709	1.0000	0.0000	0.5291	0.3333	1.0000	0.4859	0.1857	0.1226	0.1556	0.4639	8
2	44.1400	8.0964	38.5300	0.2282	0.7371	0.7194	0.7718	0.2629	0.2806	0.3931	0.6554	0.6406	0.2190	0.0804	0.2051	0.5045	5
3	48.1700	8.7138	30.8500	0.6098	0.4307	0.2171	0.3902	0.5693	0.7829	0.5617	0.4676	0.3898	0.3129	0.0573	0.1248	0.4951	6
4	46.0800	8.1810	27.5300	0.4119	0.6952	0.0000	0.5881	0.3048	1.0000	0.4595	0.6212	0.3333	0.2560	0.0762	0.1067	0.4389	9
5	48.1400	8.6518	28.7100	0.6070	0.4615	0.0772	0.3930	0.5385	0.9228	0.5599	0.4815	0.3514	0.3119	0.0590	0.1125	0.4835	7
6	48.6500	9.1133	34.1900	0.6553	0.2325	0.4356	0.3447	0.7675	0.5644	0.5919	0.3945	0.4697	0.3298	0.0484	0.1504	0.5285	4
7	49.8900	8.9661	36.0900	0.7727	0.3055	0.5598	0.2273	0.6945	0.4402	0.6875	0.4186	0.5318	0.3830	0.0513	0.1703	0.6046	3
8	51.7200	9.3539	35.9700	0.9460	0.1131	0.5520	0.0540	0.8869	0.4480	0.9026	0.3605	0.5274	0.5028	0.0442	0.1689	0.7159	2
9	52.2900	9.5818	42.8200	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.3333	1.0000	0.5571	0.0409	0.3202	0.9182	1

Tablo 11. GRG için ANOVA (ANOVA for GRG)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	PCR (%)
DY	2	26.161	26.161	13.0805	22.29	0.0435	76
KK	2	5.627	5.627	2.8134	4.79	0.173	16.35
H	2	1.461	1.461	0.7307	1.25	0.445	4.24
Residual Error	2	1.173	1.173	0.5867			
Total	8	34.422					

Tablo 12. GRG için yanıt tablosu (Response table for GRG)

Level	DY	KK	H
1	-6.240	-6.065	-5.038
2	-6.335	-5.053	-4.612
3	-2.672	-4.129	-5.596
Delta	3.663	1.936	0.984
Rank	1	2	3



Şekil 9. Parametre yanıtlarının ve GRG' nin etkilerinin grafiksel gösterimi (Graphical representation of parameter responses and GRG effects)

Tablo 13. Başlangıç ve optimum parametre sonuçlarının karşılaştırılması

Yanıtlar	Başlangıç Parametresi			Optimum Parametre		
	DY %80	KK 0.30 mm	H 40 mm/s	DY %80	KK 0.30 mm	H 50 mm/s
ÇD		51.18 MPa		52.29 MPa		
AD		32.91 MPa		42.82 MPa		
A		9.5777 g		9.5818 g		
GRG		0.6407		0.9182		

4. SONUÇ (RESULT)

Bu çalışma, işlem parametrelerinin çıkış tepkileri üzerindeki etkisini araştırmakla kalmayıp aynı zamanda Taguchi yöntemi tabanlı gri ilişkisel analiz kullanılarak çekme dayanımı, akma dayanımı

ve ağırlığı eş zamanlı olarak etkileyen optimize edilmiş yazıcı parametrelerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu hedeflere ulaşmak için gri ilişkisel analiz (GRA) ve Taguchi yöntemleri kullanılmıştır. Araştırmadan çıkan sonuçlar şunlardır:

Çekme dayanımını en çok etkileyen parametre, dolgu yoğunluğudur ve katkısı %68.75' tir ($p < 0.05$).

Akma dayanımı için yapılan ANOVA analizine göre, parametreler akma dayanımının %77.64' ünü açıklamaktadır. Parametrelerin p değerleri 0.05'ten büyük çıkmıştır. S/N oranlarına ilişkin yanıt tablosu, dolgu yoğunluğunun akma dayanımı üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğunu, bunu baskı hızı ve katman kalınlığının takip ettiğini göstermektedir.

Ağırlık, %60.74 ($p < 0.05$) katkı ile dolgu yoğunluğundan ve %36.10 ($p < 0.05$) katkı ile katman kalınlığından etkilenmektedir.

Taguchi Yöntemi'nin eksiklikleri, çoklu hedef optimizasyonunu sağlayan Gri İlişkisel Analiz ile giderilebilir. 9 deneyin deneysel verileri için Gri İlişkisel Derece ve sıralamalar hesaplanmıştır. En yüksek GRG'ye sahip optimum işlem parametreleri 9. deneyde elde edilmiştir.

Bu makine-malzeme-işlem parametre kombinasyonu için, ağırlığı en aza indirmek ve aynı zamanda çekme ve akma dayanımlarını maksimize etmek için dolgu yoğunluğu %80, katman kalınlığı 0.30 mm ve baskı hızı 50 mm/s olarak ayarlanmalıdır. Bu parametre değerlerinde çekme dayanımı 52.29 MPa, akma dayanımı 42.82 MPa ve ağırlık 9.5818 gram olarak elde edilmiştir. GRA kullanarak yapılan optimizasyon, başlangıç şartlarına göre GRG' de %43.31' lik bir iyileşme sağlamıştır. Gri ilişkisel analiz, çoklu yanıt optimizasyonunu gerçekleştirmek için etkili bir teknik olarak gözlemlenmiştir.

GRG için en önemli değişken %76 katkı oranı ile dolgu yoğunluğudur. Ayrıca, katman kalınlığı ve baskı hızınının GRG üzerindeki etkisi göz önüne alındığında anlamsız değişkenler olduğu sonucuna varılabilir ($p > 0.05$). Modelin R-kare değeri %96.59'dur.

Taguchi tabanlı GRA yöntemi literatürde kullanılmış olmasına rağmen, çalışmada kullanılan girdi-çıkı veri kombinasyonu daha önce araştırılmamıştır. Bu nedenle, çalışmanın özgün bir katkı sağladığı düşünülmektedir.

Daha sonraki çalışmalarda, farklı parametrelerin aynı çoklu yanıtların optimizasyonundaki etkilerini daha detaylı bir şekilde incelemek mümkün olabilir. Ayrıca, farklı çoklu yanıt optimizasyon yöntemlerinin karşılaştırılması ve performanslarının değerlendirilmesi de gelecek araştırmalarda dikkate alınabilir. Gelecekteki araştırmalarda, bulanık mantık ve genetik algoritma gibi tekniklerin uygulanabilirliği ve etkinliği incelenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. O. Özsolak, Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler, *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1): 9-14, 2019.
2. D.M. D'Addona, S.J. Raykar, D. Singh, D.Kramar, Multi objective optimization of fused deposition modeling process parameters with desirability function, *Procedia CIRP*, 99: 707-710, 2021.
3. K. Patel, S. Acharya, G.D. Acharya, Multi objective optimization of FDM parameters using taguchi grey relation analysis for PLA specimen, *Jurnal Kejuruteraan*, 36(1): 113-122, 2024.
4. K. Sharma, K. Kumar, Parametric multi-objective optimization of fused deposition modelling (FDM) with biopolymer using Grey-Taguchi method, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 1248(1):012107, 2022.
5. L. Kothandaraman, N.K. Balasubramanian, Optimization of the printing parameters to improve the surface roughness in fused deposition modeling, *2E3S Web of Conferences*, 399, 03003, 2023.
6. H. Hasdiansah, R.I. Yaşın, P. Pristiansyah et al., FDM-3D printing parameter optimization using taguchi approach on surface roughness of thermoplastic polyurethane parts, *Int J Interact Des Manuf*, 17: 3011-3024, 2023.
7. M. Heidari-Rarani, N. Ezati, P. Sadeghi, M. Badrossamay, Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35(12): 2435-2452, 2022.
8. A. Rasheed et al, Experimental investigation and Taguchi optimization of FDM process parameters for the enhancement of tensile properties of Bi-layered printed PLA-ABS, *Mater. Res. Express*, 10, 095307, 2023.

9. D. Ali, A.F. Huayier, A. Enzi, Parametric prediction of FDM process to improve tensile properties using Taguchi method and artificial neural network, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(4): 130-138, 2023.
10. A.M. Pinar, B. Ergene, G. Atlıhan, A. A. Mağatlı, F. Kaya, B. Karahan, M. E. Nişancı, Statistical evaluation of the screw pull out forces of PLA parts manufactured by fused deposition modeling, *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 9(2): 310-321, 2023.
11. S. Demir, 3B yazıcı ile Polilaktik asit (PLA) esaslı numune üretiminde yazıcı parametrelerinin sertlik üzerindeki etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(2), 136-144, 2024.
12. O. Tunçel, M.S. Bayraklılar, The application of the Taguchi method for optimizing the compression strength of PLA samples produced using FDM, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1): 133-141, 2024.
13. Z. Shakeri, K. Benfriha, N. Zirak, M. Shirinbayan, Optimization of FFF processing parameters to improve geometrical accuracy and mechanical behavior of polyamide 6 using grey relational analysis (GRA), *Research Square*, 2021.
14. M. Singh, P.S. Bharti, Grey relational analysis based optimization of process parameters for efficient performance of fused deposition modelling based 3D printer, *Journal of Eng. Research*, ICMET Special Issue, 2022.
15. J. John, D. Devjani, S. Ali, S. Abdallah, S. Pervaiz, Optimization of 3D printed polylactic acid structures with different infill patterns using Taguchi-grey relational analysis, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6(1): 62-78, 2023.
16. A. Dey, N. Yodo, A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 3(3):64, 2019.
17. J.Y. Tey, W.H. Yeo, Y.J. King, W.O. Ding, 3D printing of polylactic acid bioplastic-carbon fibres and twisted kevlar composites through coextrusion using fused deposition modeling, *Journal of Renewable Materials*, 8(12): 1671-1680, 2020.
18. Y. Kuruoğlu, M. Akgün, H. Demir, FDM yöntemiyle üretilen ABS, PLA ve PETG numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımının modellenmesi ve optimizasyonu, *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(3): 358-369, 2022.
19. Md. A. B. Syed, Q. Rahman, H. Md. Shahriar, M.M.A Khan, Grey-Taguchi approach to optimize fused deposition modeling process in terms of mechanical properties and dimensional accuracy, *Journal of Engineering Research, Innovation and Education*, 4(1), 2022.
20. M. Günay, S. Gündüz, H. Yılmaz, N. Yaşar, R. Kaçar, PLA Esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3d baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 73-79, 2020.
21. N.F.N. Ahmad, Y.H. Wong, N.N.N. Ghazali, A systematic review of fused deposition modeling process parameters, *Soft Science*, 2(11), 2022.
22. T.W. Kerekes, H. Lim, W.Y. Joe, G.j. Yun, Characterization of process-deformation/damage property relationship of fused deposition modeling (FDM) 3D-printed specimens, *Additive Manufacturing*, 25: 532-544, 2019.
23. O. Tunçel, K. Tüfekci, Ç. Kahya, Multi-objective optimization of 3D printing process parameters using gray-based Taguchi for composite PLA parts, *Polym Compos*, 1-15, 2024.
24. P. Achuthamenon Sylajakumari, R. Ramakrishnasamy, G. Palaniappan, Taguchi grey relational analysis for multi-response optimization of wear in co-continuous composite. *Materials*, 11(9), 1743, 2018.
25. A.A Supçiller, O. Çapraz, AHP-TOPSIS yöntemine dayalı tedarikçi seçimi uygulaması, ekonometri ve istatistik, 12. Uluslararası Ekonometri, Yöneylem Araştırması, İstatistik Sempozyumu Özel Sayısı, 13: 1-22, 2011.
26. T. Varol, Y. Kandemir, Alüminyum matrisli kompozitler için en uygun takviye malzemesinin AHP yöntemi ile seçimi, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 946-963, 2022.
27. M.R. Sadabadi, E. Chang, M. Saberi, Z. Zhou, Are MCDM methods useful? A critical review of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Analytic Network Process (ANP), *Cogent Engineering*, 6(1), 2019.
28. E. Ekin, G. Dolanbay, AHP temelli TOPSIS yöntemi ile yer seçim problemine ilişkin bir uygulama, *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(1): 301-317, 2024.
29. P. Patil, D. Singh, S.J. Raykar, J. Bhamu, Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for Printing Polylactic Acid (PLA) polymer components, *Materials Today: Proceedings* 45(6): 4880-4885, 2021.