



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu

Optimization of 3D printing operation parameters for tensile strength in PLA based sample

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa GÜNAY¹, Süleyman GÜNDÜZ², Hakan YILMAZ³, Nafiz YAŞAR⁴,
Ramazan KAÇAR⁵

ORCID¹: 0000-0002-1281-1359

ORCID²: 0000-0003-4285-5114

ORCID³: 0000-0002-8553-388X

ORCID⁴: 0000-0002-1427-1384

ORCID⁵: 0000-0002-3903-1838

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Günay M., Gündüz S., Yılmaz H., Yaşar N. ve Kaçar R., “PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 73-79, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.422795

PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı için 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu

Araştırma Makalesi / Research Article

Mustafa GÜNAY^{1*}, Süleyman GÜNDÜZ², Hakan YILMAZ³, Nafiz YAŞAR⁴, Ramazan KAÇAR²

¹Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

³Mühendislik Fakültesi, Tıp Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

⁴Yenice Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 11.05.2018 ; Kabul/Accepted : 25.02.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, ergiyik yığıma modelleme (FDM) esaslı 3D yazıcı kullanılarak üretilen PLA+ numunelerin mekanik özelliklerine baskı hızı, doluluk oranı ve tarama açısının etkileri detaylı olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, Taguchi L₁₈ deney tasarımına göre 3D yazıcı ile standart çekme test numuneleri hazırlanmıştır. İşlem parametrelerinin (Baskı hızı, doluluk oranı ve tarama açısı) çekme dayanımı üzerindeki etkileri varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. Ayrıca, Taguchi metodolojisi uygulanarak çekme dayanımı için işlem parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Sonuç olarak, çekme dayanımı üzerinde en etkin parametre doluluk oranı olurken, sırasıyla tarama açısı ve baskı hızı diğer önemli parametreler olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3D baskı, FDM, çekme dayanımı, optimizasyon, PLA.

Optimization of 3D Printing Operation Parameters for Tensile Strength in PLA Based Sample

ABSTRACT

In this study, the mechanical properties of PLA+ samples produced by using fused deposition method (FDM) based 3D printer were investigated in detail for the effects of printing speed, infill rate and raster angle. For this purpose, standard tensile test specimens were prepared with a 3D printer according to Taguchi L₁₈ experimental design. The effects on the tensile strength of the process parameters (printing speed, infill rate and raster angle) were determined by analysis of variance (ANOVA). In addition, the process parameters for the tensile strength were optimized by applying the Taguchi methodology. Consequently, while the most effective parameter on the tensile strength was the infill rate, the raster angle and the printing speed were determined as other important parameters, respectively.

Keywords: 3D printing, FDM, tensile strength, optimization, PLA.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde her sektörde olduğu gibi imalat sektöründe de artan teknolojik yenilikler, ürünlerin pazara sürüm süresini kısaltarak firmaların rekabetçi kalabilmeleri adına oldukça önemli bir rol oynamaktadır [1]. Son zamanlarda endüstriyel uygulamalarda farklı ve hızlı prototipleme teknolojilerinin kullanımı giderek artmaktadır. Hızlı prototipleme yöntemlerinden birisi olarak bilinen üç boyutlu (3D) yazıcılar, endüstrinin yanı sıra araştırma ve akademik çalışmalar içinde kullanılmaktadır [2]. Bu teknoloji sayesinde tasarımların bir ön prototipi kolay ve hızlı bir şekilde üretilebilmektedir [3]. 3D yazıcı ile üretim otomotiv, havacılık ve savunma, uzay teknolojileri, mimari yapılar, ürün ve makine tasarımları, medikal cihazlar ve tıbbi uygulamalar gibi birçok alanda kendine yer edinerek yoğun ilgi odağı haline gelmiştir. Ayrıca tıp ve sağlık alanında kişiye ve ihtiyaca özel organ, doku ve implant uygulamalarında kullanımı yaygınlaşmaktadır [4].

Üç boyutlu baskı, diğer adıyla katmanlı imalat ASTM 52900:2015 standardında geleneksel üretim metodolojileri ve kalıplaşmış imalat yöntemleri yerine 3D model verilerinden parçalar oluşturmak için katman üzerine katman oluşturarak materyallerin birleştirilmesi sürecidir [5]. Katmanlı imalat, bir ürünün hem üretim süresini hem de maliyetini düşürmek için oldukça mükemmel bir potansiyele sahiptir. Bu teknoloji için birçok yöntem kullanılabilen olup, yöntemler arasındaki farklılıklar genellikle katmanların nasıl oluşturulduğu ile ilgilidir. Seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering_SLS), ergiyik yığıma modelleme (Fused Deposition Modeling_FDM), Stereolithography (SLA), dijital ışık işleme (Digital Light Processing_DLP) teknolojileri katmanlı imalat için en çok uygulanan teknolojiler arasındadır [2]. FDM birleştirme yoluyla yığıma teknolojisi olup, bu yöntemde ısı ile şekil alabilen termoplastik (PLA, ABS vb.) malzemeler kullanılmaktadır [6]. FDM teknolojisi, ürün kalitesini ve malzeme özelliklerini etkileyen çok sayıda parametreye sahip karmaşık bir süreçtir ve bu parametrelerin kombinasyonunun anlaşılması oldukça

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mgunay@karabuk.edu.tr

güçtür [7,8]. FDM baskılı parçaların kalitesi ve performansı üzerinde işlem parametrelerinin (katman kalınlığı, tarama açısı, tarama genişliği, hava boşluğu, dolgu yoğunluğu, baskı yönü ve besleme hızı) önemli bir etkisi vardır [9-11]. Bu yöntemde, mekanik özellikler fonksiyonel parçalar üzerinde oldukça önemli etkilere sahip olup, işlem parametrelerinin mekanik performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi büyük önem kazanmaktadır [12]. Diğer yandan, ergiyik yığıma modelleme yöntemi, ürün kalitesini ve malzeme özelliklerini etkileyen çok sayıda parametreye sahip olan karmaşık bir süreçtir ve bu parametrelerin kombinasyonunun anlaşılması genellikle zordur [13].

Literatür incelendiğinde, tarama açısı, baskı hızı ve doluluk oranının ergiyik yığıma modelleme (FDM) yöntemiyle üretilen endüstriyel ürünlerin mekanik özellikleri için en önemli işlem/üretim parametreleri olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda genellikle ABS malzemelerin dayanımı incelenmiş olup, en önemli işlem parametrelerinin birlikte etkilerinin incelendiği çalışmaların çok sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, öncelikle PLA+ malzemedeki FDM yöntemi kullanılarak üç farklı doluluk oranı ve baskı hızı ile iki farklı tarama açısında çekme numuneleri üretilmiştir. Çalışma kapsamında, maliyetleri minimuma indirmek amacıyla Taguchi metodolojisi uygulanarak deneysel ve istatistiksel analizler yapılmıştır. Son olarak, işlem parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkileri varyans analizi ile değerlendirilmiş ve işlem parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzeme Ve Ekipman (Material And Equipment)

Bu çalışmada, mekanik özellikleri incelenen numuneler Polilaktik Asit (PLA) malzemedeki 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan PLA filament ESUN firması tarafından üretilen ve PLA+ ticari ürün adı altında bulunabilen 1.75 mm çapındadır. Ergiyik yığıma modelleme (FDM) yöntemi ile kullanıma uygun olan bu filamentte ait mekanik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir [14]. Araştırma kapsamında, PLA'nın kullanılmasının esas nedeni ABS'den daha fazla avantaja sahip bir plastik türü olmasıdır [15]. PLA, yenilenebilir kaynaklardan (mısır nişastası, tapyoka kökleri veya şeker kamışı) üretilen, daha az toksik içeren ve 3D baskıda daha düşük sıcaklıklar gerektiren, dolayısıyla enerji

tüketimini pozitif yönde etkileyen biyolojik olarak çözünebilen bir termoplastik alifatik polyesterdir.

PLA+ esaslı çekme numuneleri delta tipinde sabit basım tablasına sahip bir 3D yazıcıda üretilmiştir. 3D yazıcı, 0.4 mm nozul çapına sahip olup, açık kaynak kodlu yazılımla çalışan düşük maliyetli bir cihazdır. Bu çalışmada, çekme testleri için ASTM D638-IV standardına uygun numuneler hazırlanmıştır. Bu amaçla, ilgili numune katı modelleri Solidworks yazılımında oluşturularak 3D yazıcı için uygun formata dönüştürülmüştür. Numunelerin katı modelleri Repetier-Host yazılımı ile G-code dosyalarına çevrilerek üretime hazır hale getirilmiştir.

2.2. Deney Tasarımı Ve Optimizasyon (Experimental Design And Optimization)

FDM yöntemi ile imal edilen numunelerin mekanik özellikleri işlem parametrelerinin seçimleriyle ilgilidir. Bu bağlamda, üç farklı doluluk oranı (%50, 75 ve 100) ve baskı hızı (30, 60 ve 90 mm/s) ile iki farklı tarama açısı (-45/45° ve 0/90°) belirlenmiş ve Taguchi L₁₈ deney tasarımı uygulanarak çekme numuneleri basılmıştır. Numunelerin üretiminde baskı sıcaklığı malzeme tedarikçi firmanın önerisine göre belirlenmiş olup, nozul ucu ve tabla sıcaklığı sırasıyla 210°C ve 40°C olarak ayarlanmıştır. Basım sırasındaki ortam sıcaklığı 26°C olarak ölçülmüştür. Çekme numunesi standart kalınlığı ve nozul çapına bağlı olarak çekme numunesi üretimi için 17 katman kullanılmıştır. Bu katmanlardan ilk üç ve son üç tanesi solid olarak adlandırılan tam dolu katman şeklinde ve seçilen tarama açısına paralel olarak basılmıştır. Arada kalan katmanlar ise doluluk oranı parametresine göre oluşturulmuştur. Ayrıca, tüm numunelere 0.3 mm kalınlığında iki adet dış çerçeve eklenmiştir. Numunelerin üretimi için vakumlu koruyucu içerisinde yer alan PLA+ filament paketi açılarak tüm üretim sürecinde aynı malzeme kullanılmıştır. Ürünlerin 3D yazıcı tablası üzerine yerleşimleri tüm üretim aşamalarında aynı tutulmuştur. Bu çalışma kapsamında kullanılan tüm işlem parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çekme dayanımı, bir malzemenin herhangi bir uygulamadaki performans yeteneğinin önemli bir ölçüsüdür. Çekme testleri için uygulanan deney tasarımına göre üçer adet numune üretilmiştir. Delta tipi 3D yazıcı ve numunelerin katmanlı üretim modeli detay görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir. Çekme testleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bünyesinde bulunan 50 kN kapasiteli SHIMAZDU marka test cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2). Çekme testleri 5 mm/s

Çizelge 1. PLA+ filamentin özellikleri (Properties of PLA+ filament)

Baskı sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Bozulma sıcaklığı (°C,0.45 MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Eğme dayanımı (MPa)	Darbe dayanımı (kJ/m ²)
205-225	1.24	52	60	29	87	7

Çizelge 2. Numune işlem parametreleri (Process parameters of sample)

İşlem parametreleri	Değer
Tarama açısı (°)	(-45/45), (0/90)
Doluluk oranı (%)	50, 75, 100
Baskı hızı (mm/s)	30, 60, 90
Nozul sıcaklığı (°C)	210
Tabla sıcaklığı (°C)	40
Ortam sıcaklığı (°C)	26
Alt kabuk katman sayısı	3
Üst kabuk katman sayısı	3
Dış duvar sayısı	2
Destek durumu	Yok
Tabla kaplaması	Maskeleme bandı
Soğutma	Yok

çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel hataları minimize edebilmek için her bir şart için üç deney numunesi test edilmiş, elde edilen çekme dayanımı değerlerinin ortalaması alınarak değerlendirilmeler yapılmıştır. Bu çalışmanın son aşamasında, PLA+ malzemeden katmanlı üretim ile numunelerin üretiminde kullanılan işlem parametrelerinin (tarama açısı, baskı hızı, doluluk oranı) çekme dayanımına bağlı olarak istatistiksel analiz ve optimizasyon yapılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle deneysel sonuçlara %95 ($\alpha=0.05$) güven düzeyinde varyans analizi (ANOVA) uygulanarak çekme dayanımı üzerinde doluluk oranı, baskı hızı ve tarama açısının etki seviyeleri belirlenmiştir. İşlem parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi metodolojisi uygulanmıştır. FDM yöntemi kullanılarak basılan numunelerde maksimum çekme dayanımı (performans karakteristiği) istenildiği için işlem

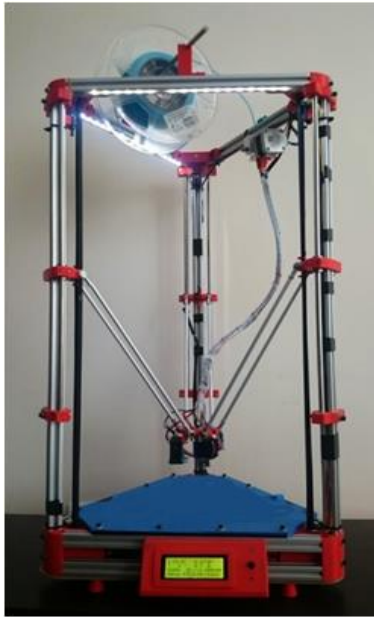
parametrelerin optimizasyonunda Taguchi'nin "en büyük en iyi" amaç fonksiyonu kullanılmıştır (Eş.1). Taguchi, bu parametrelerin seviyelerinin performans karakteristiğini ölçmek için amaç fonksiyonu değerlerini sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürür. S/N oranları yardımıyla işlem parametrelerinin optimum kombinasyonu belirlenmektedir [16].

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

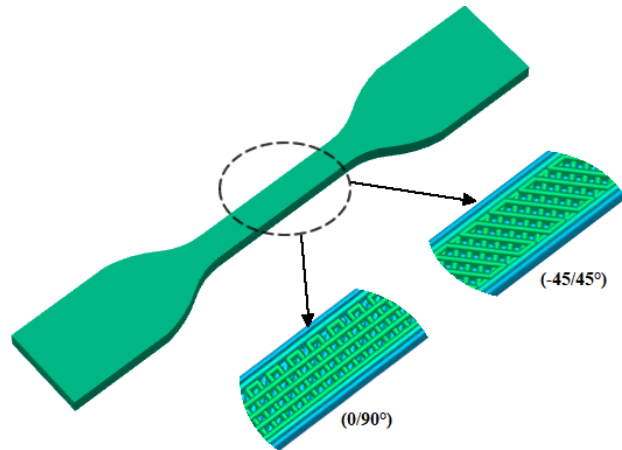
3. DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (ASSESSMENT OF EXPERIMENTAL AND STATISTICAL RESULTS)

3.1. İşlem Parametrelerinin Çekme Dayanımına Etkisi (Effect on Tensile Strength of Process Parameters)

3D yazıcı kullanılarak üretilen PLA+ numunelerin mekanik özelliklerine baskı hızı (30, 60, 90 mm/s), doluluk oranı (%50, 75, 100) ve tarama açısının (-45/+45° ve 0/90°) etkisi sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te görülmektedir. Ayrıca, iki farklı tarama açısında %100 doluluk oranında elde üretilen numunelerin çekme testi sonrasında elde edilen gerilme-uzama grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. 0/90° tarama açısı, Şekil 1b'den görülebileceği gibi, numunenin alternatif katmanlarının FDM makinesi nozulunun yatay düzlemde 0° ve 90° açılarda yön değiştirerek imal edilmesi anlamına gelmektedir. Benzer şekilde, -45/+45° tarama açısı makine nozulu tarafından takip edilen diğer biriktirme düzenini göstermektedir. Baskı hızına bağlı olarak %50, 75 ve 100 doluluk oranları ile -45/+45° ve 0/90° tarama açısında PLA+ malzemesinden üretilen numunelerin çekme dayanımları değişimi Şekil 3'te verilmektedir



a)



b)

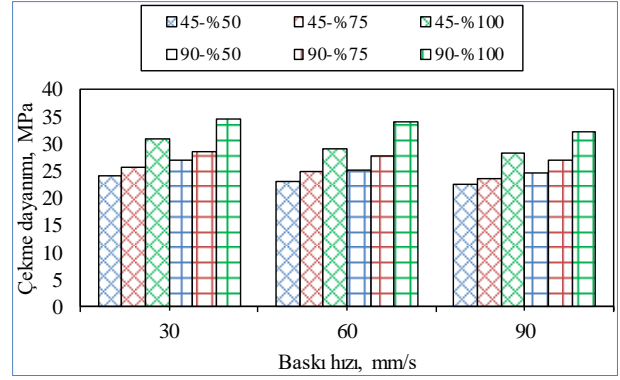
Şekil 1. a) Delta tipi 3D yazıcı, b) Çekme numunesi detayı (a- Delta type 3D printer, b- Tensile sample detail)

Şekil 3 incelendiğinde, çekme dayanımı her iki tarama açısı için benzer eğilimde olup, baskı hızının artmasına bağlı olarak çekme dayanımı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Chacon ve ark. [17], PLA malzemenin mekanik özelliklerine işlem parametrelerinin etkisini araştırmışlar ve sonuç olarak baskı hızının artmasıyla dayanım değerlerinin düştüğünü, fakat yüzde uzama değerlerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada benzer olarak, baskı hızının artması katman kalınlığının düşmesine neden olarak çekme dayanımının azalmasına katkı sağlamıştır. Bu nedenle, FDM uygulamalarında, hem mekanik özelliklerde azalmaya neden olan hem de baskı süresinde önemli bir azalma sağlamayacağı için yüksek baskı hızında üretimden kaçınılmalıdır.

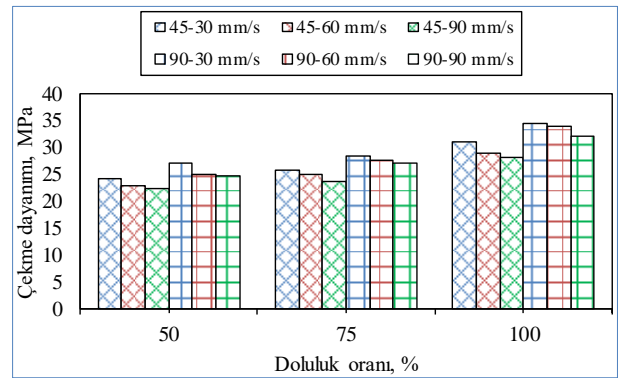


Şekil 2. Çekme test cihazı (Tensile testing device)

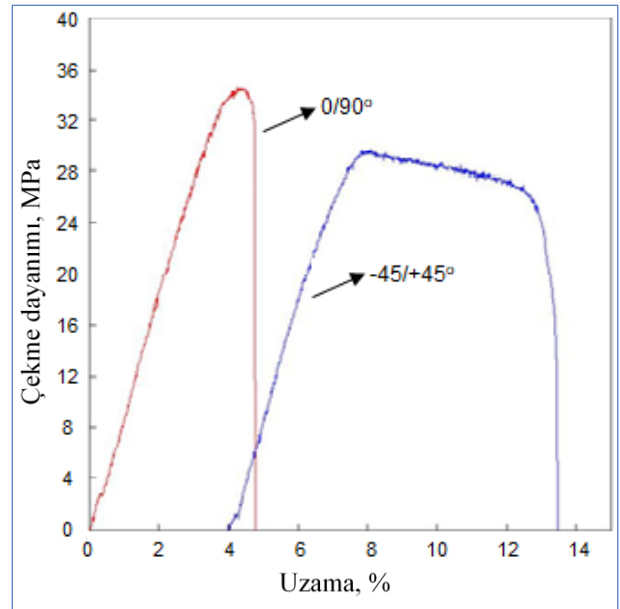
Doluluk oranına bağlı olarak 30, 60 ve 90 mm/s baskı hızı ile $-45/+45^\circ$ ve $0/90^\circ$ tarama açısıyla PLA+ malzemesinden üretilen numunelerin çekme dayanımları değişimi Şekil 4'te görülmektedir. Şekil 4'ten görülebileceği gibi, üç farklı baskı hızında ve her iki tarama açısında yönünde elde edilen numunelerin çekme dayanımları artan doluluk oranı ile belirgin bir şekilde artmıştır. Bilindiği gibi malzemelerin çekme dayanımı uygulanan yükün numunenin kesit alanına oranlanmasıyla belirlenir. Üretilen numunelerin kesit alanları aynı olmasına rağmen, kesit alandaki doluluk oranının yüksek olması birim alana düşen çekme yükü taşıma kapasitesini arttıracaktır. Bu sebeple, Samykano ve ark. [18] tarafından bahsedildiği gibi 30, 60 ve 90 mm/s baskı hızlarında ve $-45/+45^\circ$, $0/90^\circ$ tarama açıları ile üretilen PLA numunelerin hepsi, doluluk oranının artmasına bağlı olarak yüksek dayanım sergilemişlerdir. En yüksek çekme dayanımı %100 doluluk oranı, 30 mm/s baskı hızı ve $0/90^\circ$ tarama açısına sahip numunede 34.60 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. Baskı hızına göre çekme dayanımı değişimi (Variation of tensile strength according to printing speed)



Şekil 4. Doluluk oranına göre çekme dayanımı değişimi (Variation of tensile strength according to infill rate)



Şekil 5. PLA+ numunenin gerilme-uzama grafiği (Stress-strain graph of PLA+ sample)

Şekil 3 ve 4 dikkatlice incelendiğinde, tüm baskı hızı ve doluluk oranları için $0/90^\circ$ tarama açısıyla üretilen numunelerin çekme dayanımlarının $-45/+45^\circ$ tarama açısıyla basılan numunelerden daha yüksek olduğu

görülmektedir. Şekil 5'teki gerilme-uzama grafikleri bu sonucu desteklemektedir. Bu sonucun, Ahn ve ark. tarafından bahsedildiği gibi [19] FDM yöntemi ile 3D yazıcı kullanılarak üretilen PLA+ numunelerin anizotropik özellik sergilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer bir ifadeyle, çekme dayanımının tarama açısına bağlı olarak kayda değer bir değişim gösterdiği açıkça grafiklerden görülmektedir. ABS malzeme ile yapılan ilgili çalışmalarda katman kalınlığı, tarama açısı, baskı hızı, doluluk oranı ve hava boşluğu gibi işlem parametrelerinin ergiyik yığılma modelleme ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini etkilediği ifade edilmiştir [20-22]. Bu çalışmada, bahsedilen işlem parametrelerinden baskı hızı, tarama açısı ve doluluk oranının numunelerin statik yük etkisi altındaki davranışları üzerinde belirgin etkisi olduğu tespit edilmiştir. Ancak, endüstriyel uygulamalarda fonksiyonel iş parçalarının en önemli mekanik özelliklerinden birisi olan çekme dayanımı üzerinde işlem parametrelerinin etki düzeylerinin belirlenmesi sonuçların uygulanabilirliğini artıracaktır.

Çizelge 3. Çekme dayanımı için ANOVA sonuçları (ANOVA results for tensile strength)

Parametre	SD	KT	KO	F değeri	PCR (%)
Baskı hızı	2	14.0470	7.024	36.400	6.23
Doluluk oranı	2	162.013	81.007	419.77	71.80
Tarama açısı	1	45.45	45.452	235.53	20.15
Baskı hızı*Doluluk oranı	4	0.702	0.175	0.910	0.31
Baskı hızı*Tarama açısı	2	0.027	0.013	0.070	0.01
Doluluk oranı*Tarama açısı	2	2.61	1.304	6.760	1.16
Hata	4	0.772	0.193		0.34
Toplam	17	225.621			

İşlem parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etki seviyelerini belirlemek amacıyla %95 güven düzeyinde varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır (Çizelge 3). Burada, her bir parametrenin önem seviyesini gösteren P değerleri ile serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (KT), kareler ortalaması (KO) ve F değerleri görülmektedir. Parametrelerin önem seviyesi, ANOVA tablosundaki P değeri dikkate alınarak belirlenmektedir. Ayrıca, her bir değişkenin çekme dayanımı üzerindeki yüzde etki oranları (Percentage Contribution Ratio_PCR)

hesaplanmış olup, ANOVA tablosunda verilmiştir. Parametrelerin çekme dayanımı üzerindeki yüzde etki oranları incelendiğinde, en fazla öneme sahip değişken %71.80'lik PCR ile doluluk oranı olarak belirlenmiştir. Çekme dayanımı üzerinde istatistiksel olarak önem sıralaması, tarama açısı (%20.15 PCR) ve baskı hızı (%6.23 PCR) şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

3.2. Optimizasyon Sonuçları (Optimization Results)

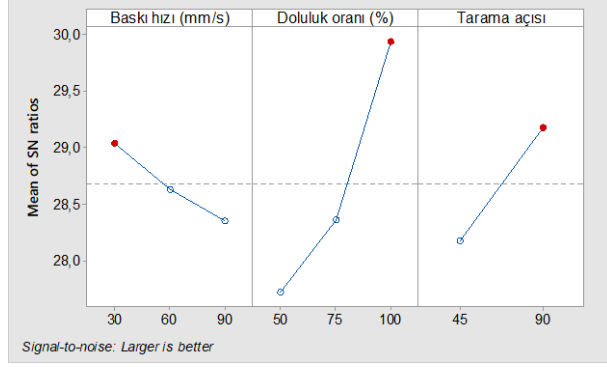
FDM yöntemi ile en iyi mekanik özelliklerde endüstriyel ürünler üretebilmek için işlem parametrelerinin gerçek seviyelerini belirlemek zor olmakla birlikte zaman ve maliyet açısından önemli kayıplara neden olacaktır. Bunun temel nedeni, çok sayıda FDM parametresinin ve bu özellikleri etkileyen parametreler arasında yüksek derecede bir etkileşimin olmasıdır. Bu bağlamda, deney tasarımına bağlı olarak bir optimizasyon metodolojisi uygulamak gerçeğe en yakın çözümün bulunmasını kolaylaştıracaktır [16]. Bu nedenle hem ilgili literatüre hem de sürdürülebilir imalata katkı vermesi açısından, bunun gibi süreçlerde yaygın olarak kullanılan Taguchi metodolojisinin uygulanması çok anlamlı olacaktır. Bu çalışmada, literatür araştırmalarına göre belirlenen en önemli FDM işlem parametrelerinden üç tanesine (baskı hızı, doluluk oranı ve tarama açısı) göre üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Çekme testi için numuneler, FDM yöntemi ile Taguchi L₁₈ deney tasarımı uygulanarak 3D yazıcıdan üretilmiştir. PLA+ malzemeden basılan numuneler için çekme dayanımının maksimum olmasını sağlayan işlem parametrelerinin bulunması amacıyla Taguchi'nin "en büyük en iyi yaklaşımına" göre Eşitlik (1) ile S/N oranları hesaplanmıştır. İşlem parametrelerine göre çekme dayanımının S/N oranları değişimini incelemek için Şekil 5'teki ana etki grafikleri çizilmiştir. Ayrıca, çekme dayanımı için hesaplanan ortalama S/N oranlarının değişkenlere göre dağılımı Çizelge 4'te verilmiştir.

Taguchi metodolojine göre optimum parametre seviyelerini belirlemek için işlem parametrelerinin S/N oranları incelenmektedir. Maksimum S/N oranı performans karakteristiği (çekme dayanımı) için en uygun işlem parametresini gösterir [16]. Şekil 5'teki ana etki grafiklerinden baskı hızının çekme dayanımı üzerinde negatif yönde bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4. Çekme dayanımının ortalama S/N oranları (Mean S/N ratios for tensile strength)

Seviye	Baskı hızı (mm/s)	Doluluk oranı (%)	Tarama açısı (°)
1	29.04*	27.73	28.18
2	28.64	28.37	29.18*
3	28.36	29.94*	
Delta	0.68	2.21	1.00
*Parametrelerin optimum seviyeleri			



Şekil 5. Çekme dayanımının S/N oranları için ana etki grafiği (Main effect graph for S/N ratios of tensile strength)

Çizelge 4'teki S/N oranları incelenecek olursa, çekme dayanımına göre optimum parametrelerin baskı hızının 1.seviyesi (30 mm/s), doluluk oranının 3.seviyesi (%100) ve tarama açısının 2.seviyesi (0/90°) olduğu görülmektedir. Ayrıca, Çizelge 4'teki S/N oranlarının maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark (delta) değerlerinden en etkin parametrenin doluluk oranı olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, FDM yöntemiyle üretilen plastik esaslı parçaların basma dayanımlarında olduğu gibi [23], çekme dayanımları açısından da en önemli işlem parametresinin doluluk oranı olduğunu göstermektedir. Diğer yandan, varyans analizi sonuçları ve optimum işlem parametrelerine göre elde edilen sonuçların tutarlılığı göze çarpmaktadır. Buradan, FDM yöntemiyle üretilen endüstriyel parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde Taguchi metodolojisinin uygulanabileceği açıkça görülmektedir. İleride yapılacak araştırmalarda, FDM ile üretilen endüstriyel plastik ürünler için önemli diğer mekanik özellikler dikkate alınarak çoklu performans karakteristikleri için optimizasyon süreçleri uygulanabilir ve mekanik özelliklerin tahmini için matematiksel modeller geliştirilebilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, PLA+ malzemeden ergiyük yığıma modelleme ile 3D yazıcı kullanılarak üretilen numunelerde, baskı hızı, doluluk oranı ve tarama açısının çekme dayanımına etkileri varyans analizi incelenmiştir. Ayrıca, Taguchi metodolojisi kullanılarak optimum işlem parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- -45/+45° ve 0/90° tarama açısında üretilen PLA+ malzemelerinin hepsinde baskı hızının artmasıyla dayanım değerleri azalırken, doluluk oranının artmasına bağlı olarak dayanım değerleri artmıştır.
- %50, 75 ve 100 doluluk oranı ile 30, 60 ve 90 mm/s baskı hızında 0/90° tarama açısıyla üretilen numunelerin çekme dayanımı -45/45° tarama açısıyla üretilenden daha yüksek bulunmuştur.

- ANOVA sonuçlarına göre çekme dayanımı üzerinde en etkili parametre %71.80'lik PCR ile doluluk oranı olarak belirlenmiştir.
- Taguchi optimizasyonu sonucunda, maksimum çekme dayanımı için 30 mm/s baskı hızı, %100 doluluk oranı ve 0/90° tarama açısı optimum işlem parametreleri olarak tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Delikanlı K., Sofu M.M. ve Bekci U., "Üretim sektöründe hızlı direkt imalat sistemlerinin yeri ve önemi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4: 33-39, (2005).
- [2] Dizon J.R.C., Espera A.H., Chen Q. and Advincula R.C., "Mechanical characterization of 3D-printed polymers", *Additive Manufacturing*, 20: 44-67, (2018).
- [3] Polzin C., Spath S. and Seitz H., "Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process", *Rapid Prototyping Journal*, 19(1): 37-43, (2013).
- [4] Karagöz M. ve Cerit A.A., "Kişiye özel implant tasarımlarının 3 boyutlu yazıcılarla üretilmesi", *International Symposium On 3D Printing Technologies*, 311-317, (2016).
- [5] Lee J.Y., An J. and Chua C.K., "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials", *Applied Materials Today*, 7: 120-133, (2017).
- [6] Turner B.N., Strong R. and Gold S.A., "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling", *Rapid Prototyping Journal*, 20(3): 192-204, (2014).
- [7] Casavola C., Cazzato A., Moramarco V. and Pappalettere C., "Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory", *Materials and Design*, 90: 453-458, (2016).
- [8] Rankouhi B., Javadpour S., Delfanian F. and Letcher T., "Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS respect to layer thickness and orientation", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16: 467-481, (2016).
- [9] Tymrak B.M., Kreiger M. and Pearce J.M., "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers under realistic environmental conditions", *Materials and Design*, 58: 242-246, (2014).
- [10] Domingo M., Puigriol J. M., Garcia A.A., Lluma J., Borros S. and Reyes G., "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling polycarbonate parts", *Materials and Design*, 83: 670-677, (2015).
- [11] Sood A.K., Ohdar R.K. and Mahapatra S.S., "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts", *Materials and Design*, 31: 287-295, (2010).
- [12] Vaezi M. and Chua C.K., "Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53: 275-284, (2011).
- [13] Mohamed O.A., Masood S.H. and Bhowmik J.L., "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future

- prospects”, *Advances in Manufacturing*, 3: 42–53, (2015).
- [14] ESUN 3D. <http://www.esun3d.net/products/142.html>.
- [15] Fratila D. and Rotaru H., Additive Manufacturing-A Sustainable Manufacturing Route, *MATEC Web of Conferences*, 94, (2017).
- [16] Taguchi G., Chowdhury S. and Wu Y., “Taguchi's Quality Engineering Handbook, *John Wiley & Sons, Inc.*, New Jersey, USA, (2005).
- [17] Chacon J.M., Caminero M.A., Garcia-Plaza E. and Nunez P.J., “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection”, *Materials and Design*, 124: 143–157, (2017).
- [18] Samykano M., Selvamani S.K., Kadirgama K., Ngui W.K., Kanagaraj G. and Sudhakar K., “Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2019), <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03313-0>
- [19] Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S. and Wright P.K., “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS”, *Rapid Prototyping Journal*, 8(4): 248–257, (2002).
- [20] Lee C.S., Kim S.G. and Ahn S.H., “Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts”, *Journal of Materials Processing Technology*, 8: 248–257, (2007).
- [21] Lee B.H., Abdullah J. and Khan Z.A., “Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object”, *Journal of Materials Processing Technology*, 169: 54–61, (2005).
- [22] Wu W., Geng P., Li G., Zhao D., Zhang H. and Zhao J., “Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS”, *Materials*, 8: 5834–5846, (2015).
- [23] Zaman U.K., Boesch E., Siadat A., Rivette M. and Baqai A.A., “Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi's design of experiments”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018), <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3014-6>