

GAZI

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Statistical Evaluation of the Screw Pull Out Forces of PLA Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling

Ahmet Murat Pinar^a, Berkay Ergene^b, Gökmen Atlıhan^c, Ahmet Arif Mağatlı^d, Fırat Kaya^e, Burak Karahan^f, Mehmet Emir Nişancı^g

Submitted: 22.03.2023 Revised: 24.06.2023 Accepted: 07.08.2023 doi:10.30855/gmbd.0705073

ABSTRACT

In this study, the effects of multiple printing parameters on the screw pull out force of PLA samples produced with a 3D printer were investigated statistically. Based on the Taguchi L27 orthogonal array, tests were carried out at different levels of printing speed, printing temperature, infill density, build plate temperature and infill pattern factors. Experiment results were assessed at the 95 % confidence level with analysis of variance, main effects and interaction graphs. Thus, the effects of factors and some two-way interactions on the screw pull out force and the levels that give the optimum response are determined. Accordingly, it is obtained that only the printing temperature, infill rate, infill pattern and printing temperature-fill rate factors and interactions are significant; It is also found that the infill density has the highest effect on the holding force with 55.08 %, followed by the printing temperature (18.62 %), printing temperature-infill density (12.19 %) and infill pattern (4.03 %). Finally optimum pull out force is predicted at the second level of printing speed ($A_2= 50$ mm/s), third level of printing temperature ($B_3= 230$ °C), third level of infill density ($C_3=100$ %), third level of build plate temperature ($D_3=80$ °C) and the first level of infill pattern ($E_1=$ Grid) as 1885.89 N. In 3 confirmation experiments performed at these levels, an average pull out force of 1993.33 N is obtained and it is determined that the result was within the specified confidence interval. Thus, the optimization made is of sufficient accuracy.

Eriyik Yığma Modelleme ile Üretilen PLA Parçaların Vida Tutma Kuvvetlerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

ÖZ

Bu çalışmada, 3D yazıcı ile üretilen PLA numunelerin çoklu yazdırma parametrelerinin vida tutma kuvveti üzerindeki etkileri istatistiksel olarak araştırılmıştır. Taguchi L27 Ortogonal dizi esas alınarak, yazdırma hızı, yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, tabla sıcaklığı ve dolgu deseni faktörlerinin farklı seviyelerinde testler gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, varyans analizi, ana etkiler ve etkileşim grafikleri ile % 95 güven seviyesinde değerlendirilmiştir. Böylece faktörlerin ve bazı etkileşimlerin vida tutma kuvveti üzerindeki etkileri ve optimum cevabı veren seviyeler belirlenmiştir. Buna göre sadece yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, dolgu deseni ve yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı faktör ve etkileşimlerinin anlamlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, doluluk oranının % 55.08'lik oranla tutma kuvveti üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu ve bunu sırasıyla yazdırma sıcaklığı (% 18.62), doluluk oranı (% 12.19) ve dolgu deseni (% 4.03) faktör ve etkileşimlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Son olarak, optimum tutma kuvveti yazdırma hızının ikinci ($A_2= 50$ mm/s), yazdırma sıcaklığının üçüncü ($B_3= 230$ °C), doluluk oranının üçüncü ($C_3= % 100$), tabla sıcaklığının üçüncü ($D_3= 80$ °C) ve dolgu deseninin birinci seviyesinde ($E_1=$ Grid) 1885.89 N olarak tahmin edilmiştir. Bu seviyelerde gerçekleştirilen 3 adet doğrulama deneyinde, ortalama 1993.33 N'luk tutma kuvveti elde edilmiş olup, sonucun belirlenen güven aralığında olduğu tespit edilmiştir. Böylece yapılan optimizasyonun yeterli doğrulukta olduğu söylenebilir.

Keywords: Fused deposition modelling, Additive manufacturing, Optimization, Taguchi method, Screw pull out force

^a Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0721-6723
e mail: apinar@pau.edu.tr

^b Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0000-0001-6145-1970

^c Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0599-525X

^d Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0009-0007-1041-5970

^e Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0009-0005-7560-4428

^f Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0009-0008-0222-7918

^g Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0009-0007-7057-9627

*Corresponding author:
apinar@pau.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Eriyik yığma modelleme, Katmanlı imalat, Optimizasyon, Taguchi method, Vida tutma kuvveti

1. Giriş (Introduction)

Mevcut katmanlı (eklemeli) üretim metotları içinde üretim cihazlarının kullanılabilirliğinin yanı sıra malzeme temininin de kolay olması nedeniyle eriyik yığıma modelleme (EYM) sıklıkla tercih edilmektedir [1, 2]. Bu yöntemde filament adı verilen kompozit esaslı ya da saf termoplastik polimer, zıt doğrultuda döndürülen iki diskten geçerek bir rezistansa yönlendirilir. Eriyik haldeki polimer, itme kuvvetinin etkisiyle nozul çapına düşürülerek imalat tablasına akıtılır. Böylelikle, malzemenin katmanlar halinde üst üste biriktirilmesiyle parça üç boyutlu olarak üretilmiş olur. Eklemeli imalat geleneksel üretim teknikleriyle mukayese edildiğinde, atık malzeme miktarının azlığı, nispeten daha düşük ücretle prototip oluşturma, çoğunlukla ikincil işlemlere gerek kalmadan parçanın tek seferde kolayca oluşturulması gibi çeşitli avantajlara sahiptir [3-5]. Bu avantajlarının yanı sıra, eklemeli üretim geleneksel imalat tekniklerine göre anlamlı kılan en önemli özellik, geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi oldukça zahmetli veya olanaksız olan, karmaşık şekillere sahip özellikle otomotiv, biyomedikal, havacılık ve mimari alanındaki parçaların kolaylıkla üretebilmesidir [6-8]. EYM teknolojisi kabaca şu adımlardan oluşmaktadır: Parçanın bir CAD programında oluşturulup STL formatında kaydedilmesi; dilimleyici yazılımıyla baskı parametrelerinin belirlenip 3B yazıcının kontrol ünitesine uygun G kodlara dönüştürülmesi; ve bu kodları içeren parça NC dosyasının 3B yazıcıya yollanıp parça basım işleminin gerçekleştirilmesi. Dilimleyici yazılımla belirlenen baskı parametreleri, parçanın kalitesini, mekanik özelliklerini ve üretim süresini direkt olarak etkilemekte olup, büyük önem arz etmektedir. Aşağıda bu alanda yapılan çalışmalar özetlenmektedir.

Ercan ve Yunus [5] PLA (Polilaktik asit) malzemeyi kullanarak 6 farklı dolgu deseninde sandviç panel üretimini gerçekleştirmişler ve bunlara ait maksimum basma gerilmesi değerleri ve elastisite modüllerini karşılaştırmışlardır. Chaidas vd. [9] PLA yazdırma sıcaklığının yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada ortalama yüzey pürüzlülüğü, maksimum profil yüksekliği ve RMS pürüzlülük parametrelerinin farklı sıcaklık değerlerindeki değişimleri değerlendirilmiştir. Günay vd. [10] EYM yöntemi ile üretilen PLA+ numunelerin 3 farklı doluluk oranı ve iki farklı tarama açısındaki çekme ve eğme dayanımlarını araştırmışlardır. Buna göre, 3B yazıcı ile sabit üretim hızı (60 mm/s), 3 değişik doluluk oranı (% 50, % 75 ve % 100) ve 2 farklı tarama açısında (-45/+45° ve 0/90°) standarda uygun çekme ve eğme test numuneleri hazırlamışlardır. Deney numunelerini standart çekme cihazında üç nokta eğme ve çekme testine tabi tutarak, deneysel sonuçları değerlendirmişlerdir. Aydın vd. [11] 3B yazıcı ile üretilen PLA numunelerinde, yazdırma sıcaklığı (190 °C, 200 °C, 210 °C ve 220 °C) ve yazdırma hızı (30, 50 ve 70 mm/saniye) parametrelerinin reolojik özelliklerini, sertlik ve çekme performanslarını çalışmışlar, ve sistemin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Tokdemir vd. [12] 3 farklı markaya ait ahşap katkılu PLA filament kullanarak, 2 farklı katman kalınlığı, 2 farklı duvar kalınlığı ve 2 farklı doldurma oranında üretilen numunelerin çekme mukavemetlerini gözlemlemişlerdir. Altun vd [13], [12] no'lu yayında belirtilen aynı malzeme ve parametreleri kullanarak, bunların yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Günay vd. [14] 3B yazıcı ile üretilen PLA+ parçaların çekme mukavemetini Taguchi yöntemi ile optimize etmişlerdir. L18 deney tasarımı esas alınarak, farklı yazdırma hızı, doluluk oranı ve tarama açıları seviyelerinde gerçekleştirilen testler, varyans analizi ile değerlendirilmiştir. Menderes vd [15] 3B yazıcı ile imal edilen Polietilenterfatat Glikol (PET-G) numunelerin farklı dolgu deseni ve üst katman sayısında gerçekleşen basım işlemlerinde titreşim ölçümleri gerçekleştirmişler ve bunların yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini belirlemişlerdir. Bir diğer çalışmada ise, Ergene vd. [16] PET-G malzemedeki EYM ile ürettikleri konik açılı kirişlerin titreşim özelliklerini hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizi yardımı ile tespit etmişlerdir. Ergene ve Çağın [17] ise, PET-G malzemedeki üretilen yapıların çekme özelliklerini farklı çekme hızlarında deneysel olarak incelemişlerdir.

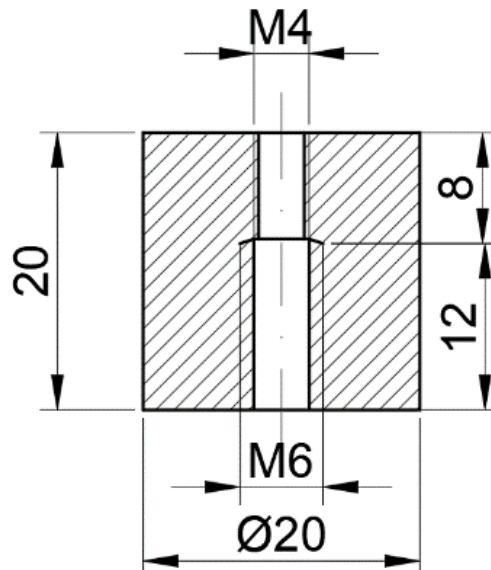
Diğer yandan polimer malzemelere ait vida tutma performansına ait çalışmalar aşağıda değerlendirilmiştir. Zeren ve Maral [18], orta yoğunluklu polietilen numunelerin farklı termal çevrim ve çevre koşullarındaki vida tutma performansını araştırmışlardır. Bu amaçla numuneler farklı çevre koşulları için 5 guruba ayrılmış olup, cam kaptaki 1 ay süreyle bekletilmiştir. Buna göre birinci grup 20 °C'deki suda, ikinci grup, 60 °C'de suda, üçüncü grup 20 °C'de NaCl ile doymuş suda, dördüncü grup 60 °C'de NaCl ile doymuş suda, beşinci grup 60 °C'de kuru ortamdaki fırında bekletilmiştir. Tüm numuneler M4 civata ile boydan boya olacak şekilde vidalanmıştır. Buna göre sulu ortamdaki numunelerin vida tutma dayanımının arttığı, doymuş NaCl suyuna batırılan numunelerin vida sıyırma performansının, suya batırılan numunelere göre daha düşük olduğu ve genel olarak vida tutma kuvvetinin sıcaklıkla ters orantılı olarak değiştiği elde edilmiştir. Ünal [19] cam elyaf takviyeli polimer kompozit numunelerin metrik, yuvarlak testere, trapez ve kare profilli civata bağlantılarındaki vida tutma kuvvetlerini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmıştır. Buna göre tüm vidaların dış üstü çapları ve adımları sırasıyla 16 ve 2mm olarak alınmıştır. Yapılan, test ve analiz

sonuçlarında metrik diş profiline sahip vidanın vida tutma performansının daha iyi olduğu saptanmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçların iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Yu vd. [20], demiryolu traversleri için üretilen ahşap, sentetik kompozit, geri dönüştürülmüş plastik ve partikül dolgu reçine numunelerin GageLok-5 vida rayı civatası ile bağlantılarına ait vida tutma mukavemeti ve delik mikro yapısı üzerinden hasar analizini incelemişlerdir. Ayrıca malzeme özelliklerinin vida tutma dayanımı ve kırılma davranışı üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Buna göre, farklı travers malzemeleri arasında vida tutma dayanımında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğunu ve malzemelerin kayma mukavemeti ile vida tutma mukavemeti arasında yüksek bir korelasyon olduğunu tespit etmişlerdir. Kubiak vd. [21] bir çift çekirdekli pedikül civatasını ve ticari olarak temin edilebilen bir silindirik pedikül civatasının vida tutma mukavemetini, üç farklı yoğunluktaki (0,16, 0,32 ve 0,64 g/cm³) poliüretan köpük malzeme üzerinde test etmişlerdir. Çift çekirdekli pedikül vidaların tüm poliüretan köpük malzemeler için düz silindiriklere göre daha yüksek tutma kuvveti performansı gösterdikleri elde edilmiştir. Einafsar vd. [22] farklı matkap çaplarına sahip 20 adet konik çekirdekli titanyum civatayı yüksek yoğunluklu polietilen bloklara vidalamışlardır. Montaj esnasında her civata için maksimum torku kaydetmişlerdir. Bu işlemi takiben kemik vida yapısının doğal frekansını ölçmek için ivme ölçer ve akustik modal analiz gerçekleştirmişlerdir. Son olarak da tahribatlı çekme testinden vida tutma kuvveti, yer değiştirme ve enerji dağılımı verilerini elde etmişlerdir. Matkap çapı ile vida tutma kuvveti ve torkun ters orantılı olarak değiştiğini yüksek korelasyonda elde etmişlerdir. Einafsar vd. [23] iki farklı gözenekli yapıya sahip poliüretan köpük ve yüksek yoğunluklu polietilen numuneler üzerinde vida tutma testleri gerçekleştirmişlerdir. Kırkbeş adet titanyum pedikül vidası her bir malzemede 10, 20 ve 30 mm derinlikte vidalanmış olup, bunlara ait katılık, akma kuvveti, vida tutma kuvveti ve yer değiştirme değerleri ölçülmüştür. Serbest gerilimli ve ön gerilimli olmak üzere iki farklı durum için homojenleştirilmiş sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilerek deneysel verilerle mukayese etmişlerdir.

Yukarıdaki veriler ışığında, 3B yazıcılarla üretilen polimer malzemelerin birçok mekanik özellikleri ve yüzey kaliteleri incelenirken vida tutma kuvvetlerinin belirlendiği bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Buna karşın, önerilen çalışmada, literatürde önemli bir eksikliği giderecek, yazdırma parametrelerinin vida tutma kuvveti üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

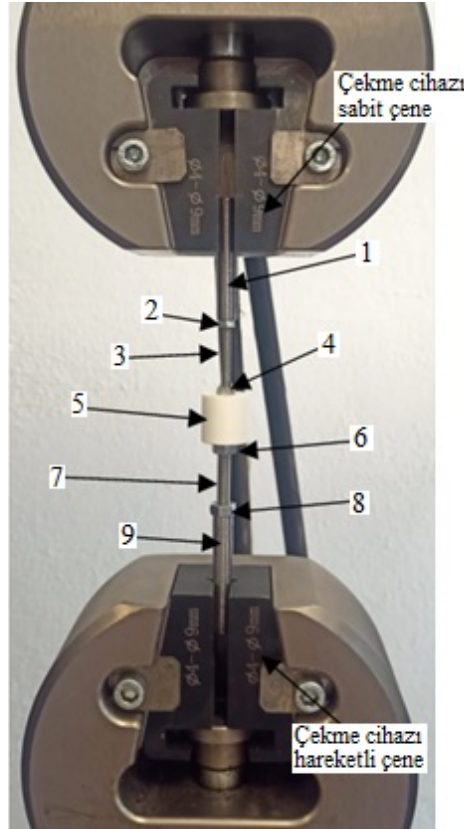
2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Yapılan fizibilite ve pilot test çalışmalarının bir sonucu olarak PLA deney numunesi boyutları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Numunelere ait ölçüler (Dimensions of samples)

Numunelerin ölçümü öncesinde, Şekil 2'de verilen ölçüm düzeneğinin imalatı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Vida tutma kuvveti ölçüm düzeneği (Screw pull out force measurement system)

Deney düzeneği toplamda 9 parçadan oluşmaktadır (Şekil 2). Bunlar 1: Üst bağlantı parçası; 2: Üst bağlantı parçası ile üst bağlantı saplamasının bağlantısını yapan M4 somun; 3: Üst bağlantı saplaması (M4); 4: Numune ile üst bağlantı saplamasının bağlantısını yapan numune üst somunu (M4); 5: Numune; 6: Numune ile alt bağlantı saplamasının bağlantısını yapan numune alt somunu (M6); 7: Alt bağlantı saplaması (M6); 8: Alt bağlantı parçası ile alt bağlantı saplamasının bağlantısını yapan alt somun (M6) ve 9: Alt bağlantı parçasıdır. Numunelerin çenelere bağlantısını gerçekleştiren 1 ve 9 numaralı alt ve üst bağlantı parçaları De Lorenzo S547-8899 Universal Tornada işlenmiştir. Numunelerin bağlantı parçalarına tutturulmasını sağlayan 3 ve 7 numaralı bağlantı saplamaları (sırasıyla M4 ve M6) hazır olarak temin edilmiş olup, testere tezgâhı ile uygun boyda kesilmiştir. Bu işlemin ardından torna tezgahında sırasıyla hassas boya getirilmiş, çapakları alınıp montaj kolaylığı sağlaması için pah kırılmıştır. Sistemdeki bağlantıları gerçekleştiren 2 şer adet M4 ve M6 somunlar hırdavatçıdan hazır olarak temin edilmiştir.

Numuneye ait katı model Solidworks yazılımı kullanılarak merkezinde 1 mm'lik boydan boya bir delik unsuru olacak şekilde çizilmiştir. Bu delik unsurunun sebebi numunenin M4 ve M6 vida unsurlarına ait delik ve kılavuz operasyonlarında eksen kaçıklarının engellemek üzere pilot delik vazifesi görmesidir. STL dosya formatındaki numune dosyasında Cura dilimleme yazılımı kullanılarak deney parametreleri oluşturulmuş ve her bir numuneye ait G-kodlar elde edilmiştir. Aşağıda deney parametreleri dışında sabit olarak alınan baskı parametreleri verilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Sabit olarak alınan yazdırma parametreleri (Constant printing parameters)

Yazdırma parametresi	Birim	Değer
Filament çapı	mm	1.75
Nozul çapı	mm	0.4
Katman kalınlığı	mm	0.2
Boşta çalışma hızı	mm/s	100
Fan hızı	%	100

Numuneler, Creality-Ender 3 Pro 3B yazıcıda (Şekil 3) 1.75 mm çapında ve 1.24 g/cm³ yoğunluğunda Microzey marka PLA filament kullanılarak oluşturulmuştur.



Baskı Alanı: 22x22x25 cm
 Yazıcı Boyutları: 44x41x46.5 cm
 Maksimum Hareket Hızı: 180mm/s
 Filament: 1.75 PLA,TPU,ABS
 Giriş Voltajı: AC 110-220V 50-60Hz
 Çıkış: DC24V 15A 360W
 Nozzle: 0.4mm
 Hassasiyet: ± 0.1 mm
 Dosya Biçimi: STL,OBJ,G-CODE
 Çalışma Modu: Bilgisayar bağlantısı ya da SD Kart
 Max Nozzle Sıcaklığı: 255 Derece
 Max Tabla Sıcaklığı: 110 Derece

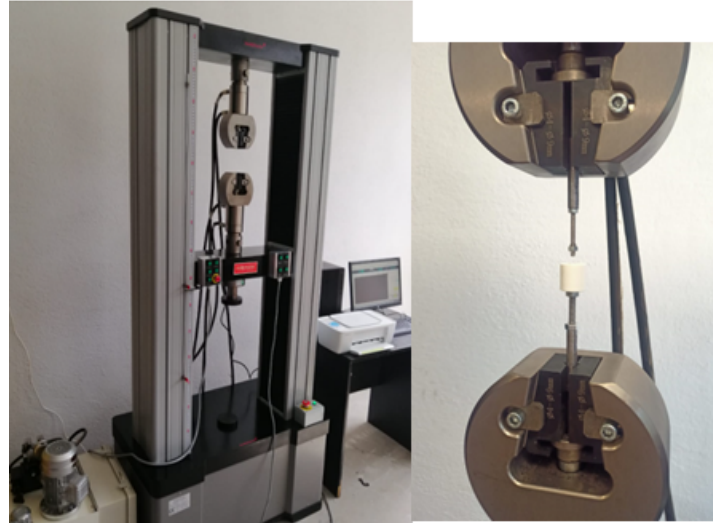
Şekil 3. Numunelerin basıldığı yazıcı ve buna ait özellikler (The 3D printer on which the samples are printed and its properties)

Deney tasarımı esas alınarak farklı baskı parametrelerinde basılan numuneler, universal torna tezgâhı aynasına bağlanarak sırasıyla $\phi 3.3$ mm matkapla delinmiş ve sonrasında M4 kılavuzla üst kısımdaki vida tutma kuvvetinin ölçüleceği vida unsuru oluşturulmuştur. Sonrasında parça diğer tarafından torna aynasına bağlanıp alt kısımdaki vida unsurunu oluşturmak üzere 5 mm'lik matkapla delinip M6 kılavuz çekilmiştir. Numunelerin bağlantı aparatları, saplamalar ve somunlarla montajı sonrasında ölçüm aşamasına gelinmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Ölçüm öncesi numunenin hazırlanması (Preparation of the sample before measurement)

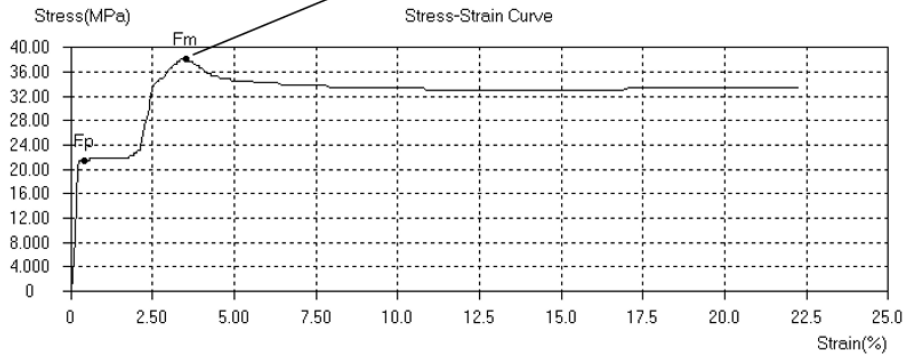
Numunelere ait vida tutma kuvveti ölçümleri 100 kN kapasiteli Hardway WDW100 serisi çift kolon çekme-basma test cihazında ASTM D638-14 Tip4'e uygun olarak 5 mm/dk'lık çekme hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Numunelere ait vida tutma kuvvetlerinin ölçülmesi (Measuring the screw pull out forces of the samples)

Çekme testleri sonucunda cihazdan alınan maksimum kuvvet değeri vida tutma kuvveti (F_m) olarak alınıp, istatistiki hesaplamalarda kullanılmıştır. Aşağıda 20 mm/s'lik yazdırma hızı, 200 °C'lik yazdırma sıcaklığı, % 60 doluluk oranında 40 °C'lik tabla sıcaklığı ve ve Grid dolgu deseni şartlarında gerçekleştirilen 1 no'lu deney ait sonuçlar verilmiştir (Şekil 6).

Coil No/Packet No		Type	Circle
Size(mm)	4	So(mm ³)	12.57
Lo(mm)	75	Lu(mm)	
A(%)	/	Su(mm ³)	/
Z(%)	/	Fm(kN)	0.480
Rm(MPa)	38	FeH(kN)	/
ReH(MPa)	/	FeL(kN)	/
ReL(MPa)	/	Fp(kN)	0.270
Rp(MPa)	21	E(GPa)	11

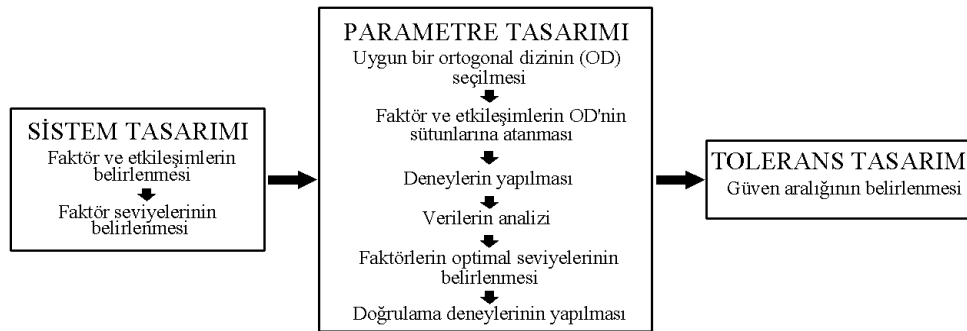


Şekil 6. Vida tutma kuvveti değerinin belirlenmesi (Determination of screw pull out force value)

Şekil 6'da görüldüğü gibi, vida tutma kuvveti çekme testindeki maksimum kuvvet olan 480 N olarak alınmıştır.

3. Deneysel Tasarım ve İstatistiksel Değerlendirme (Experiment Design and Statistical Evaluation)

Tüm istatistiksel çalışmalar, Taguchi yöntemi ile % 95 güven seviyesinde (0.05 anlamlılık oranında) Minitab 18 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Karmaşık hesaplamalar içermemesi, minimum deneyle yapılabilmesi ve bağımsız değişkenlerin en iyi seviyelerinin kolaylıkla elde edilmesi sebebiyle yöntem endüstriyel ve akademik araştırmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Yöntem, sistem, parametre ve tolerans tasarımı gibi ana bölümlerinden oluşmaktadır (Şekil 7) [24-27].



Şekil 7. Taguchi metodunun uygulama adımları (Application steps of the Taguchi method) [24-27]

Sistem tasarımı, bağımlı değişkeni etkileyen işlem parametrelerinin ve bu parametrelere ait seviyelerin tespit edildiği bölümdür. Parametre tasarımı, Taguchi yönteminin en kapsamlı ve kritik bölümüdür. Bu kısımda, işlem parametrelerine ilişkin en iyi seviyeler elde edilmekte; bu seviyelerdeki bağımlı değişken tahmin edilmekte ve bu seviyelerdeki doğrulama deneyleri yapılmaktadır. Tolerans tasarımı kısmında, belirli güven mertebesinde, tahmin edilen bağımlı değişkenin alt ve üst limitleri hesaplanmaktadır. Nihayetinde, doğrulama testlerine ait sonuç, bu aralığın içerisindeyse, yöntemin optimizasyonu yeterli doğrulukta ortaya koyduğu kabul edilmektedir [24-27].

Sunulan çalışmada, eriyik yığıma şekillendirme ile elde edilen PLA numunelerinin üretilmesindeki, önemli işlem parametrelerinin (yazdırma hızı, yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, tabla sıcaklığı ve dolgu deseni) ve bunlara ait ikili etkileşimlerin vida tutma kuvveti üzerindeki etkileri Taguchi yöntemi kullanılarak istatistiksel olarak tartışılmıştır. Tablo 2'de yapılan pilot deneyler sonucunda elde edilen faktörler ve bunlara ait özellikler

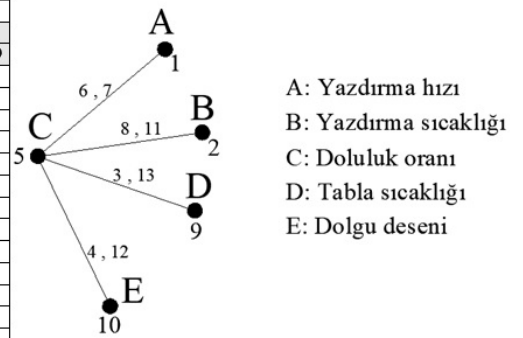
verilmiştir.

Tablo 2. Faktörler ve bunlara ait özellikler (Factors used and their properties)

Faktörler	Birimler	Seviyeler		
		1	2	3
Yazdırma hızı (A)	mm/s	20	50	80
Yazdırma sıcaklığı (B)	°C	200	215	230
Doluluk oranı (C)	%	60	80	100
Tabla sıcaklığı (D)	°C	40	60	80
Dolgu deseni (E)	-	Grid	Line	Gyroid

Araştırmadaki test miktarını ve hassasiyetini direkt olarak etkileyen OD 'nin tespiti, işlem parametrelerinin ve bunlara ait etkileşimlerin toplam serbestlik derecesini esas alarak belirlenmektedir. Seçilecek OD 'ye ait serbestlik derecesi deney sisteminin serbestlik derecesinden büyük ya da eşit olmalıdır [24-27]. Sistemin serbestlik derecesi, faktör ve etkileşimlerin serbestlik derecelerinin toplanmasıyla elde edilmektedir [24-27]. İlgili işlem parametresine ait serbestlik derecesi, o faktöre ait seviye sayısından 1 çıkartılarak tespit edilmektedir. Böylece, deney sistemimizde beş işlem parametresi kullanıldığından, faktörlere ait serbestlik derecesi $5 \times 2 = 10$ dur. Etkileşimlerde ise, etkileşimi oluşturan parametrelere ait serbestlik dereceleri çarpılarak belirlenmektedir. Sistemde 2 adet etkileşim düşünüldüğünden, bunlara ait serbestlik derecesi $2 \times 4 = 8$ dir. Böylece, sistemin serbestlik derecesi $10 + 8 = 18$ olarak hesaplanmaktadır. Deneylerde 13 sütun ve 27 satırdan oluşan 26 serbestlik dereceli L27 ortogonal dizi seçilmiştir (Şekil 8). Bu matris test planını oluşturmakta olup, dizideki 27 satır parametrelerin farklı kombinasyonlarındaki deneyleri göstermektedir. Dizinin sütunlarına faktör ve bunlara ait etkileşimler atanmaktadır. Bu işlem için en yaygın metot lineer grafik yöntemidir. Şekil 8'deki lineer grafikte görüldüğü gibi matristeki birinci sütun yazdırma hızına (A), ikinci sütun yazdırma sıcaklığına (B), beşinci sütun doluluk oranına (C), dokuzuncu sütun tabla sıcaklığına (D), onuncu sütun dolgu deseni ve geri kalanlarda ikili etkileşimlere atanmıştır.

Deney no	Sütun no												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	A	B	CxD	CxE	C	AxC	AxC	BxC	D	E	BxC	CxE	CxD
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2



Şekil 8. Faktör ve etkileşimlerin lineer grafik yöntemiyle sütunlara aktarılması ve L27 OD (Assignment of the factors and interactions to columns with linear graph method and L27 OA)

3.1. Deneysel bulgular ve istatistiksel analiz (Experimental results and statistical analysis)

Tablo 3'te L27 ortogonal dizi esas alınarak yapılan deney planı ve vida tutma kuvveti (F_m, N) ölçüm sonuçları görülmektedir.

Tablo 3. Numunelere ait vida tutma kuvveti sonuçları (Screw holding force results of samples)

Test no.	Yazdırma hızı (A)	Yazdırma sıcaklığı (B)	Doluluk oranı (C)	Tabla sıcaklığı (D)	Dolgu deseni (E)	F_m
1	20	200	60	40	Grid	480
2	20	200	80	60	Line	525
3	20	200	100	80	Gyroid	800
4	20	215	60	60	Line	475
5	20	215	80	80	Gyroid	520
6	20	215	100	40	Grid	995
7	20	230	60	80	Gyroid	465
8	20	230	80	40	Grid	785
9	20	230	100	60	Line	2005
10	50	200	60	60	Gyroid	320
11	50	200	80	80	Grid	640
12	50	200	100	40	Line	945
13	50	215	60	80	Grid	525
14	50	215	80	40	Line	720
15	50	215	100	60	Gyroid	935
16	50	230	60	40	Line	550
17	50	230	80	60	Gyroid	785
18	50	230	100	80	Grid	2110
19	80	200	60	80	Line	435
20	80	200	80	40	Gyroid	505
21	80	200	100	60	Grid	890
22	80	215	60	40	Gyroid	425
23	80	215	80	60	Grid	900
24	80	215	100	80	Line	1160
25	80	230	60	60	Grid	625
26	80	230	80	80	Line	925
27	80	230	100	40	Gyroid	1310

3.1.1. Varyans analizi (ANOVA) (Analysis of Variance (ANOVA))

Çalışmada yazdırma hızı (A), yazdırma sıcaklığı (B), doluluk oranı (C), tabla sıcaklığı (D), dolgu deseni (E) ve bunlara ait 2 adet ikili etkileşimlerin ($B \times C$ ve $B \times E$) vida tutma kuvveti üzerindeki etkilerini incelemek ve anlamlı parametreleri belirlemek için ANOVA gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara ait ANOVA değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Buna göre; yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, dolgu deseni ve yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı faktör ve etkileşimleri anlamlıdır. Ayrıca, doluluk oranının % 55.08'lik oranla tutma kuvveti üzerinde en dominant etkiye sahip olduğu ve bunu anlamlılık oranıyla yazdırma sıcaklığı (% 18.62), yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı (% 12.19) ve dolgu deseni (% 4.03) işlem parametreleri izlemektedir. Polimer ürünlerin imalat parametrelerinin, çekme dayanımlarına olan etkilerinin incelendiği güncel literatür çalışmaları incelendiğinde de, doluluk oranının en önemli parametrelerden biri olduğu vurgulanmıştır [28]. Hikmat vd. [29] EYM ile PLA malzemeden ürettikleri numunelerin yazdırma parametrelerinin çekme dayanımlarına etkilerini Taguchi metodu ile değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, imalat yönünün en etkili parametre olduğunu bunu anlamlılık sırasına göre, nozul çapı, doluluk oranı, dış çerçeve sayısı, nozul sıcaklığı, üretim açısının ve yazdırma hızının izlediğini elde etmişlerdir. Çalışmamız ile paralel olarak doluluk oranının çekme mukavemeti üzerinde anlamlı ve yazdırma hızının da anlamlı olmadığını gözlemlemişlerdir.

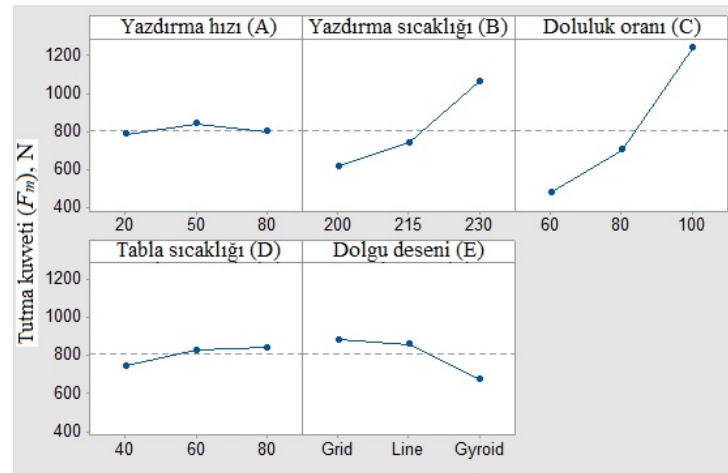
Tablo 4. Tutma kuvveti sonuçları için ANOVA (ANOVA for pull out force results)

Kaynak	DF	SS	V	F	$F_{0,05}$	SS'	PCR
Yazdırma hızı (A)	(2)	13780	-		4.46	-	-
Yazdırma sıcaklığı (B)	2	957135	478568	25.01	4.46	918869.88	18.62
Doluluk oranı (C)	2	2756169	1378084	72.03	4.46	2717903.88	55.08
Tabla sıcaklığı (D)	(2)	48802	-		4.46	-	-
Dolgu deseni (E)	2	237146	118573	6.20	4.46	198880.88	4.03
BxC	4	678115	169529	8.86	3.84	601584.76	12.19
CxE	(4)	66920	-		3.84	-	-
Hata	16	306121	19132.56		-	497445.6	10.08
Toplam	26	4934685			-	4934685	100

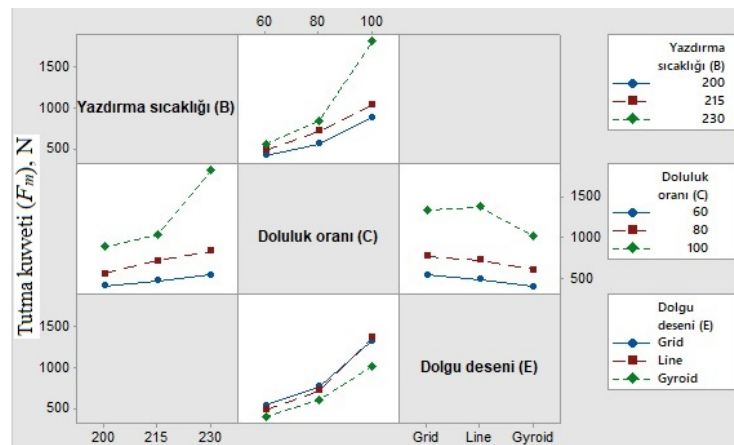
DF: Serbestlik derecesi, SS: Kareler toplamı, V: Varyans, SS': Saf kareler toplamı ve PCR: Yüzde katkı oranı

3.1.2. Optimum tutma kuvvetinin belirlenmesi ve tartışma (Determination of the optimum pull out force and discussion)

Faktörlerin optimum tutma kuvvetini veren seviyeleri ANOVA, ana/etkileşim grafikleri esas alınarak tespit edilmiştir. Ana etkiler grafiği (Şekil 9) incelendiğinde, anlamlı parametrelerden tutma kuvvetinin yazdırma sıcaklığı ve doluluk oranıyla doğru orantılı olarak değiştiği; yine en yüksek tutma kuvvetinin “Grid” dolgu deseninde elde edildiği bunu “line” ve “gyroid” desenlerinin izlediği açıkça görülmektedir. Buna göre 230 °C'lik yazdırma sıcaklığında, % 100 doluluk oranında ve Grid doluluk deseninde optimum tutma kuvveti elde edilecektir. Benzer şekilde etkileşim grafiğinde (Şekil 10) yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı etkileşiminde, 230 °C'lik yazdırma sıcaklığında ve % 100'lük doluluk oranında dramatik bir kuvvet artışı elde edilmiştir. Anlamlı olmayan faktörlere ait grafiklere bakıldığında, 50 mm/dk'lık yazdırma hızında ve 80 °C'lik tabla sıcaklığında daha yüksek tutma kuvvetleri gözlemlenmiştir.



Şekil 9. İşlem parametrelerine ait ana etkiler grafiği (Main effects graph of process parameters)



Şekil 10. Faktörlere ait ikili etkileşimler grafiği (two-way interactions graph of factors)

Bu verilere ışığında, optimum kuvvet yazdırma hızının ikinci ($A_2= 50$ mm/s), yazdırma sıcaklığının üçüncü ($B_3= 230$ °C), doluluk oranının üçüncü ($C_3= \% 100$), tabla sıcaklığının üçüncü ($D_3= 80$ °C) ve dolgu deseninin birinci seviyesinde ($E_1=$ Grid) elde edilmiştir. Taguchi optimum tutma kuvvetini aşağıdaki eşitlikle tahmin etmektedir.

$$P_t = M_{B_3C_3} + M_{E_1} - M_O \quad (1)$$

$M_{B_3C_3}$ Yazdırma sıcaklığı ve doluluk oranının 3. seviyesinde gerçekleşen deneylere ait ortalama (1808.33 N), M_{E_1} Dolgu deseninin 1. seviyesinde gerçekleşen deneylere ait ortalama (883.3 N) ve M_O da tüm deney sonuçlarına ait ortalamayı (805.74 N) ifade etmektedir Buna göre optimum tutma kuvveti 1885.89 N olarak tahmin edilmiştir.

Bu işlemi takiben sistemin optimizasyonu yeterli doğrulukta gerçekleştirdiğinin test edilmesi gerekmektedir. Bunun için ilk adım güven aralığının (CI) belirlenmesidir ve aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır [27].

$$CI = \left(F_{0.05}(1, DF_e) \cdot V_e \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right] \right)^{1/2} \quad (2)$$

Eşitlikteki $F_{0.05}(1, DF_e)$, 0.05 anlamlılık düzeyinde 1'e ve hatanın serbestlik derecesi (16) dikkate alınarak ilgili tablolardan 4.49 olarak alınmıştır. V_e hatanın varyans değerini ifade etmektedir ve 19132.56 olarak elde edilmiştir. R en iyi faktör değerlerinde yapılan doğrulama test sayısını temsil etmektedir ve üç adet gerçekleştirilmiştir. Son olarak n_{eff} , etkin tekrarlamaya sayısıdır ve Eş. 3 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$n_{eff} = N / (1 + V_t) \quad (3)$$

Burada, N (27) toplam test sayısını, V_t (6) de, ortalamanın tahmin edildiği faktör ve etkileşimlere ait toplam serbestlik derecesini belirtmektedir. Buna göre, n_{eff} 3.86 olarak belirlenmiştir. Böylece, $CI = \pm 225.59$ olarak elde edilmiştir. Yapılan 3 adet doğrulama testine ait sonuçların ortalamasının $1660.3 < C_m < 2111.48$ aralığında yer alması gerekmektedir. Buna göre, en iyi şartlarda ($A_2=50$ mm/dk, $B_3=230$ °C, $C_3=\% 100$, $D_3= 80$ °C ve $E_1=$ Grid) gerçekleştirilen doğrulama deneylerinde 1993.33 N ortalama tutma kuvveti elde edilmiş olup, sistemin optimizasyonu başarı ile gerçekleştirilmiştir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Farklı yazdırma parametrelerinin eriyik yığıma modelleme yöntemiyle üretilen PLA numunelerdeki farklı yazdırma parametrelerinin vida tutma kuvveti üzerindeki etkileri Taguchi metodolojisi ile değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Varyans analizine göre, yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, dolgu deseni ve yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı faktör ve etkileşimleri anlamlıdır. Ayrıca, doluluk oranının % 55.08'lik oranla tutma kuvveti üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu ve bunu sırasıyla yazdırma sıcaklığı (% 18.62), yazdırma sıcaklığı- doluluk oranı (% 12.19) ve dolgu deseni (% 4.03) faktör ve etkileşimleri izlemektedir.
- Ana etkiler grafiğine göre, vida tutma kuvvetinin yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı ve tabla sıcaklığı ile doğru orantılı olarak değiştiği gözlemlenirken, "Grid" dolgu deseninde en yüksek tutma kuvveti elde edilmiş ve bunu "Lines" ve "Gyroid" seviyelerinin izlediği belirlenmiştir. Etkileşim grafiği dikkate alındığında, ana etkiler grafiğini doğrular nitelikte yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı etkileşiminde 230 °C yazdırma sıcaklığında ve % 100 doluluk oranında çok anlamlı bir artış olduğu gözlemlenmiştir
- Optimum tutma kuvvetinin yazdırma hızının ikinci ($A_2= 50$ mm/s), yazdırma sıcaklığının üçüncü ($B_3= 230$ °C), doluluk oranının üçüncü ($C_3= \% 100$), tabla sıcaklığının üçüncü ($D_3= 80$ °C) ve dolgu deseninin birinci seviyesinde ($E_1=$ Grid) elde edilmiş ve Taguchi tarafından 1885.89 N olarak tahmin edilmiştir. Yine bu seviyelerde gerçekleştirilen 3 adet doğrulama deneylerinde ortalama 1993.33 N'luk tutma kuvveti elde edilmiş olup, belirlenen güven aralığında olduğu tespit edilmiştir. Böylece yapılan optimizasyonun yeterli doğrulukta olduğu söylenebilir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında 1919B012107398 başvuru no'lu proje ile maddi olarak desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] G. Kumar, G. Pavan and S.P. Regalla, "Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM)" *Trans Tech Publications- In Applied Mechanics and Materials*, vol 110, pp. 2245-2251, 2012. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.2245
- [2] B. Ergene, İ. Şekeroğlu, Ç. Bolat and B. Yalçın, "An experimental investigation on mechanical performances of 3D printed lightweight ABS pipes with different cellular wall thickness" *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 15, no. 8, pp. 8169-8177, 2021. doi:10.46519/ij3dptdi.1069544
- [3] W.C. Smith and R. W. Dean, "Structural characteristics of fused deposition modeling polycarbonate material" *Polymer Testing*, vol. 32, no. 8, Pages 1306-1312, 2013. doi:10.1016/j.polymertesting.2013.07.014
- [4] C. Weller, R. Kleer and F. T. Piller, "Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited", *Int. J. Production Economics*, vol. 164, pp. 43-56, 2015. doi:10.1016/j.ijpe.2015.02.020
- [5] N. Ercan ve D. E. Yunus, "Eriyik yığıma modelleme ile üretilen hücresel sandviç panellerin basma özelliklerinin incelenmesi" presented at the 4 th International Congress on 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry (3D-PTC2019), Antalya, 2019.
- [6] S. H. Yazdani, A. H. Akbarzadeh, H. Niknam and K. Hermenean, "3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance", *Composite Structures*, vol. 200, pp. 886-909, 2018. doi:10.1016/j.compstruct.2018.04.002
- [7] B. Ergene and Ç. Bolat, "An experimental study on the role of manufacturing parameters on the dry sliding wear performance of additively manufactured PETG" *International Polymer Processing*, vol. 37, no. 3, pp. 255-270, 2022. doi:10.1515/ipp-2022-0015
- [8] B. Ergene and B. Yalçın, "Eriyik yığıma modelleme (EYM) ile üretilen çeşitli hücresel yapıların mekanik performanslarının incelenmesi" *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 38, sayı 1, ss. 201-218, 2023. doi:10.17341/gazimmfd.945650
- [9] D. Chaidas, K. Kitsakis and S. Maropoulos, "The impact of temperature changing on surface roughness of FFF process". 20th Innovative Manufacturing Engineering and Energy Conference, Kallithea Chalkidiki, 2016.
- [10] M. Günay, R. Kaçar, H. Yılmaz, H. Demir ve S. Gündüz, "3D Baskı ile Üretilen PLA Esaslı Numunelerde Doluluk Oranı ve Tarama Açısının Mekanik Özelliklere Etkisi", 3rd International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, Antalya, 2018:33-39.
- [11] M. Aydın, F. Yıldırım ve E. Çantı "Farklı yazdırma parametrelerinde PLA filamentin işlem performansının incelenmesi", 3rd International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, Antalya, 2018:295-307.
- [12] V. Tokdemir, S. Altun ve K. Kurtoğlu, "Ahşap filamentlerin ve baskı parametrelerinin çekme direncine etkisi" presented at the 4th International Congress On 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry , 2019.
- [13] S. Altun, V. Tokdemir ve S. Yılmaz, "Farklı ahşap filamentler ile yazdırılmış örneklerin yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal kararlılığı" presented at the 4th International Congress On 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies And Digital Industry , 2019.
- [14] M. Günay, S. Gündüz, H. Yılmaz, N. Yaşar ve R. Kaçar, "PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu" *Politeknik Dergisi*, cilt 23, sayı 1, ss. 73-79, 2020. doi:10.2339/politeknik.422795
- [15] M. Kam, H. Saruhan and A. İpekçi, "Investigation the effect of 3D printer system vibrations on surface roughness of the printed products", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 7, no. 3, pp. 147-157, 2019. doi:10.29130/dubited.441221
- [16] B. Ergene, G. Atlıhan and A.M. Pinar, "Experimental and finite element analyses on the vibration behavior of 3D-printed PET-G tapered beams with fused filament fabrication" *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, vol. 19, no. 4, pp. 634-651, 2023. doi:10.1108/MMMS-11-2022-0265
- [17] B. Ergene and Ç. Bolat, "An Experimental investigation on the effect of test speed on the tensile properties of the petg produced by additive manufacturing" *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 6, no. 2, pp. 250-260, 2022. doi:10.46519/ij3dptdi.1069544

- [18] A. Zeren and E. Maral. "Screw pullout behaviour in polyethylene" *Materials and Design*, vol. 28, no. 10, pp. 2698-2705, 2007. doi:10.1016/j.matdes.2006.10.007
- [19] E. Ünal, "The effect of different tread profiles on pullout strength of glass fiber reinforced polymer composite materials." *Cumhuriyet Science Journal*, vol. 39, no. 2, pp. 550-556, 2018. doi:10.17776/cs.421618
- [20] P. Yu, A. Manalo, W. Ferdous, C. Salih, R. Abousnina, T. Heyer and P. Schubel, "Failure analysis and the effect of material properties on the screw pull-out behaviour of polymer composite sleeper materials" *Engineering Failure Analysis*, vol. 128, e105577, 2021. doi:10.1016/j.engfailanal.2021.105577
- [21] A. J. Kubiak, K. Lindqvist-Jones, K. D. Dearn and D. E. Shepherd, "Comparison of the mechanical properties of two designs of polyaxial pedicle screw" *Engineering Failure Analysis*, vol. 95, pp. 96-106, 2019. doi:10.1016/j.engfailanal.2018.08.023
- [22] M. Einafshar, A. Hashemi and A. Kiapour, "Evaluation of the efficacy of modal analysis in predicting the pullout strength of fixation bone screws" *JOR Spine*, vol. 5, no. 4, e1220, 2022. doi:10.1002/jsp.2.1220
- [23] M. Einafshar, A. Hashemi, and G. Herry van Lenthe, "Homogenized finite element models can accurately predict screw pull-out in continuum materials, but not in porous materials" *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 202, e105966, 2021. doi:10.1016/j.cmpb.2021.105966
- [24] A. M. Pinar, "Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 aluminium alloy via Taguchi method," *The Arabian Journal for Science and Engineering B: Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 705-714, 2013. doi:10.1007/s13369-012-0372-5
- [25] A. M. Pinar and A. Güllü, "Optimization of numerical controlled hydraulic driven positioning system via Taguchi method" *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 25, no. 1, pp. 93-100, 2010.
- [26] A. M. Pinar and K. Firat, "Machinability evaluation of multi-directional turning tools" *Materials Testing*, vol. 62, no. 3, pp. 311-316, 2020. doi:10.3139/120.111487
- [27] A. M. Pinar ve K. Firat, "AISI 4140 çeliğin çok yönlü takımla tornalanmasında yüzey pürüzlülük performansının optimizasyonu," *Politeknik Dergisi*, cilt 19, sayı 4, ss. 491-498, 2016. doi:10.2339/2016.19.4 491-498
- [28] H. Radhwan, Z. Shayfull, A. E. H. Abdellah, A. R. Irfan and K. Kamarudin, "Optimization parameter effects on the strength of 3D-printing process using Taguchi method," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2129, no. 1, e020154, 2019. doi:10.1063/1.5118162
- [29] M. Hikmat, S. Rostam and Y. M. Ahmed, "Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology," *Results in Engineering*, vol. 11, e100264, 2021. doi:10.1016/j.rineng.2021.100264

This is an open access article under the CC-BY license

