



Araştırma Makalesi / Research Article

Ergiyik Yığma Yöntemi ile Üretilen PLA Kompakt Çekme Numunelerinin Kırılma Davranışına İmalat Parametrelerinin Etkisinin Belirlenmesi

Determination of Manufacturing Parameters Effect on Fracture Behavior of PLA Compact Tension Specimens Produced by Fused Deposition Modeling

İlkay Gün¹, Mehmet Eker^{2*}

¹ Tarsus Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ilkaygnn23@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1010-6456>

² Tarsus Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, mehmeteker@tarsus.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6785-1710>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 10 Kasım 2025
Revizyon 6 Ocak 2026
Kabul 7 Ocak 2026
Online 25 Mart 2026

Anahtar Kelimeler:

eklemeli imalat, ergiyik yığma yöntemi, kırılma tokluğu, mod I, PLA, Taguchi eniyilemesi

ÖZ

Eklemeli imalat, katman katman malzeme ekleyerek nesnelerin üretildiği bir üretim sürecidir. Geleneksel imalat yöntemlerinden farklı olarak eklemeli imalat, dijital üç boyutlu (3D) model verilerini kullanarak katmanları bir araya getirir. Katmanların biraraya getirilmesinde belirlenmesi gereken çok sayıda değişken söz konusudur. Her bir değişkenin üretilecek nesnenin özellikleri üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bu özelliklerden bir tanesi de bir başlangıç çatlak varlığında malzemenin çatlak ilerleme ve kırılma davranışdır. Bu çalışmada, ergiyik yığma yöntemi ile üretilen polilaktik asitin (PLA) mod I kırılma davranışına eklemeli imalat parametrelerinin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, örgü türü, doluluk oranı, örgü açısı gibi önemli imalat parametrelerini ve çatlak uzunluğu gibi kritik bir geometrik durumu değişken olarak ele alınarak her bir değişkenin PLA malzemesinin kırılma davranışı üzerindeki etkileri üç seviyede incelenmiştir. Örgü açısı ve örgü türü, malzemenin tabakaları arasındaki ilişkiyi belirleyen önemli faktörlerdir. Doluluk oranı, malzemenin iç yapısındaki boşlukları belirlemektedir. Çatlak uzunluğu ise malzeme dayanıklılığını ve yapısal bütünlüğünü etkileyen olası bir hasar durumunu modelleyen temel bir faktördür. Tüm bu değişkenler üç farklı seviyede ele alınıp PLA malzemesinin mod I kırılma davranışı mukayeseli şekilde belirlenmiştir. Elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri ile her bir test koşuluna ait kırılma tokluğu hesaplanmış ve tüm değişken ve seviyelerin sonuçlar üzerindeki etkisi Taguchi eniyileme yöntemi ile tayin edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 November 2025
Received in revised form 6 January 2026
Accepted 7 January 2026
Available online 25 March 2026

Keywords:

additive manufacturing, fused deposition modeling, fracture toughness, mode I, PLA, Taguchi optimization

Doi: 10.24012/dumf.1820763

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Additive manufacturing is a production process in which objects are manufactured by adding material layer by layer. Unlike conventional manufacturing methods, additive manufacturing assembles layers using digital three-dimensional (3D) model data. There are numerous variables that need to be determined in the assembly of layers. Each variable has an influence on the properties of the object to be produced. One of these properties is the crack propagation and fracture behavior of the material in the presence of an initial crack. In this study, the effects of additive manufacturing parameters on Mode I fracture behavior of polylactic acid (PLA) produced by fused deposition modeling method were experimentally investigated. In the study, the effects of each variable on the fracture behavior of PLA material were examined at three levels by considering important manufacturing parameters such as infill pattern, infill density, and raster angle, as well as a critical geometric condition such as crack length. Raster angle and infill pattern are important factors that determine the relationship between the layers of the material. Infill density determines the voids in the internal structure of the material. Crack length is a fundamental factor that models a potential damage condition affecting material strength and structural integrity. All these variables were considered at three different levels, and the Mode I fracture behavior of PLA material was determined comparatively. Fracture toughness for each test condition was calculated using the obtained load-displacement curves, and the effect of all variables and levels on the results was determined by the Taguchi optimization method.

Giriş

Eklemeli imalat teknolojileri, geleneksel talaşlı/talaşsız imalat yöntemlerinden farklı olarak imal edilecek parçanın üç boyutlu modelinin bilgisayar ortamında dilimlenerek imalata hazır hale getirilmesi ve üç boyutlu yazıcılarda katman katman ve ihtiyaç kadar malzemenin eritilerek basılması süreçleridir. Günümüzde bu teknoloji, otomotiv, havacılık, savunma sanayi, inşaat, tıp, biyomedikal, biyomekanik, kimya, spor malzemeleri, oyuncak, dökümhane, elektronik ve akıllı yapı sektörleri gibi geniş bir yelpazede uygulanmaktadır [1], [2]. Özellikle 3D yazıcı teknolojisi, geleneksel üretim yöntemleriyle üretimi zor olan karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde yaygın bir yöntem haline gelmiştir. Polimerler, metaller, seramikler ve kompozit malzemeler gibi çeşitli materyaller, bilgisayar destekli tasarımlar kullanılarak doğrudan eklemeli imalatla üretilmektedir. Bu nedenle eklemeli imalat, Endüstri 4.0'ın temel taşlarından biri olarak kabul edilmektedir. Ergiyik yığma yöntemi ile imalat yapan yazıcılar, basım süresinin hızlı, sarf malzemelerinin düşük maliyetli ve çeşitli olması ve üretilen parçaların yüksek mukavemetli elde edilebilmesi gibi avantajları nedeniyle diğer 3D yazıcı modellerine göre daha yaygın tercih edilmektedir [3]. Eklemeli imalat, organik tasarımlar yapmaya elverişli olması sebebiyle enerji sarfiyatını ve atık miktarını azaltmayı ve/veya içi boş (aynı zamanda daha hafif) parçalar üretme kabiliyeti ile de hammadde ihtiyacını azaltmayı olanaklı kılmakta ve sürdürülebilir üretime katkı sunmaktadır. Bununla beraber, seri üretimin ekonomik açıdan elverişli olmaması, üretilen parçanın boyutunun kullanılan 3D yazıcının boyutlarıyla sınırlı olması 3D baskı yönteminin kullanımını sınırlaması gibi durumlar yöntemin dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Eklemeli imalat teknolojisinde yaygın olarak ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ve PLA (Polylactic Acid) başta olmak üzere PEKK (Polyetherketoneketone), PEI (Polyetherimide), PPSU (Polyphenylsulfone) ve PC (Polycarbonate) gibi yüksek mukavemet ve ısı dayanımına sahip malzemeler kullanılabilmektedir. Bunlar arasından PLA, organik kökenli, biyoçözünür filament olarak nitelendirilmektedir. Aynı zamanda PLA, filament çeşitleri arasında bilinirliği en yüksek ve evde basım için en uygun filamenttir. ABS'ye göre PLA filamentlerde daha düşük sıcaklıklarda daha kolay baskı yapılabilir. Biyolojik açıdan parçalanabilir bir yapıdadır ve bu özelliği ile diğer filament türlerinden daha çevre dostudur. Ayrıca baskı esnasında dışarıya kötü koku yaymamaktadır [4]. Sert bir yapıya sahip olan PLA'nın çekme dayanımı yüksektir. Fakat, görece düşük esnekliğe sahiptir, kırılma yapıdadır ve darbe dayanımı ABS'ye göre düşüktür. Basım sıcaklığı 190°C – 220°C değerleri arasında değişkenlik gösterir. Yatak sıcaklığının 50°C – 70°C arasında olması önerilir. Sağlığa zararlı bir madde olmadığı için insan vücuduyla direkt temas edebilecek ürünlerin üretiminde kullanılabilmektedir [5], [6].

Eklemeli imalat, geleneksel yöntemlerden farklı olarak, dijital üç boyutlu (3D) modellerden alınan veriler doğrultusunda katmanların birleştirilmesine dayanır. Bu süreçte, katman oluşturma ve birleştirme işlemlerinde belirlenmesi gereken çok sayıda parametre bulunmaktadır ve bu parametreler, üretilen nesnenin nihai özelliklerini önemli

ölçüde etkiler. Bu özelliklerden biri de malzemede çatlak gibi bir süreksizlik mevcutken bu süreksizliğin ilerleme ve kırılma davranışdır [7].

Mühendislik bileşenleri, farklı çalışma koşulları ve çevresel faktörler nedeniyle genellikle görünür ve/veya görünmez çatlak ilerlemesine karşı hassastırlar ve bu durum yapısal sistemin genel taşıma kapasitesinde kritik derecede kayba sebebiyet verebilmektedir. Dış yüklemelerde ve malzeme özelliklerindeki değişkenlik, istenmeyen kusurlar ve karmaşık imalat süreçlerinde meydana gelebilecek diğer kontrolsüz sorunlardan dolayı mühendislik bileşenlerinde belirsizlikler söz konusu olmaktadır. Bu tür belirsizlikler, mühendislik bileşenlerinin kırılma başarımı üzerinde oldukça etkindir [8]. Bundan dolayı, mühendislik bileşenlerinin kırılma davranışının incelenmesi önem arz etmektedir.

Literatürde, örgü yönünün değiştirilmesinin çatlak ucunda sünek benzeri davranışa yol açan, düşük yayılma hızıyla ilişkili, büyük bir deformasyon bölgesi oluştuğu belirlenmiştir [9]. Çoklu jet füzyonu ve ergiyik yığma yöntemleri ile üretilen naylon polimerlere uygulanan çekme testlerinde 60° örgü açısında elde edilen görece yüksek kırılma yükünün 30° ve 0° 'lere inildiğinde azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, çatlak ucu yarıçapının artışının her iki yöntemle üretilen numunelerde de kritik yükün azalmasında etkili olduğu gözlemlenmiştir [10]. Bir başka çalışmada, 3D-PLA çekme ve eğilme numunelerini $0^{\circ}/90^{\circ}$, $15^{\circ}/-75^{\circ}$, $30^{\circ}/-60^{\circ}$ ve $45^{\circ}/-45^{\circ}$ olmak üzere dört farklı örgü (raster) açısı kullanılarak üretilmiştir. $45^{\circ}/-45^{\circ}$ örgü yöneliminde, en yüksek yüzde uzama ve kırılma direnci ile en iyi başarımın elde edildiği tespit edilmiştir. Söz konusu çalışmada, $45^{\circ}/-45^{\circ}$ numunesinin kritik J-integrali $6815 \text{ J}/\text{m}^2$ iken, bu değer $0^{\circ}/90^{\circ}$ numunesi için $1839 \text{ J}/\text{m}^2$ olarak ölçülmüştür. Malzemenin kopma uzaması açısından en yüksek değer $45^{\circ}/-45^{\circ}$ raster açısında, en düşük değer ise $0^{\circ}/90^{\circ}$ raster açısında gerçekleştiği belirtilmiştir. Ayrıca, $45^{\circ}/-45^{\circ}$ yönelimde kırılma yükü en yüksek, $0^{\circ}/90^{\circ}$ yöneliminde ise en düşük değerinde elde edilmiştir [11]. Ergiyik yığma yöntemi ile elde edilmiş polilaktik asitin Mod I ve Mod II kırılma davranışı, tek kenar çatlaklı numune ve dört nokta eğme testi kullanılarak incelenmiştir. Başlangıç çatlağı yazıcıda yazım esnasında ve çatlaksız numuneye sonradan açılarak iki farklı şekilde elde edilen numuneler simetrik ve simetrik olmayan şekilde test edilmiştir. Her iki mod için de yazıcı ile açılan çatlaklı numunelerin kırılma tokluğunun daha yüksek elde edildiği belirtilmiştir [12]. Bir başka çalışmada, eklemeli imalat değişkenlerinin maksimum çekme dayanımı, kırılma uzaması, elastisite modülü, akma dayanımı ve kırılma tokluğu için eniyileme çalışması yapılmıştır. Taguchi, ANOVA ve çok amaçlı yöntem (multi-objective) ile doluluk oranı, ekstrüzyon sıcaklığı, örgü açısı ve katman kalınlığı değişken olarak alınıp sonuçlara etkisi detaylıca incelenmiştir. %60 dolgu oranı, 220°C ekstrüzyon sıcaklığı, 90° raster açısı ve 0,1 mm katman kalınlığında en iyi değerlerin elde edildiği belirtilmiştir [13]. Çekme ve tek kenarlı çentikli eğme numuneleri ile yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre, farklı yönelimlerde üretilen numunelerin kırılma direnci, üretim parametrelerine güçlü bir şekilde bağlıdır. Bu bağlamda, 45° yönelimle üretilen numuneler daha düşük kırılma tokluğu değerleri ile karakterize edilirken,

0° ve 90° yönelimle üretilen numuneler daha yüksek tokluk değerleri sergilemiştir. Bu davranış, numunelerdeki başlangıç çatlağı ile katmanlar arasındaki açının etkisinin anlaşılmasıyla açıklanabilir. Bu açı, 0°, ±45° ve 0°/90° yönelimle üretilen tek kenar çentikli eğme (SENB) numuneleri için sırasıyla ±45°, 0°/90° ve ±45°'dir [14]. Bir başka çalışmada, ergiyik yığıma yöntemi ile farklı örgü açıları ve yazma hızı ile üretilen polilaktik asit kompakt çekme numunelerinin kırılma davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. -45°/45° örgü açılı numunelerin 0°/90° açılı numunelere kıyasla daha yüksek kırılma tokluğu değerlerine sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca kırılma tokluğu değerlerinin artan yazma hızıyla azaldığı belirtilmiştir [15]. Benzer şekilde, baskı parametrelerinin 3D polimerlerin kırılma davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Numuneler 45°/-45° ve 0°/90° örgü yöntemlerinde, 20 mm/s ve 80 mm/s baskı hızlarında basılmışlardır. Bir dizi kompakt çekme testi gerçekleştirilmiş ve her bir numune grubu için kırılma tokluğu değerlerini belirlemek amacıyla doğrusal elastik kırılma mekanığı yaklaşımı kullanılmıştır. Deney sonuçları ile en düşük kırılma yükünün en yüksek hızda basılan numunelere ait olduğu gösterilmiştir. Aynı zamanda, çatlak ilerlemesinin 45°/-45° numunelerde başlangıç çatlağına 45° doğru, 0°/90° numunelerinde ise başlangıç çatlağına paralel gerçekleştiği gözlemlenmiştir [16]. Bir başka çalışmada, eklemeli imalat ile elde edilen PLA türü çekme testi numunelerinin uzama oranı, maksimum yük, akma, çekme ve kopma dayanımına imalat parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Yatay yerleşimli numunelerin dikey yerleşimli numunelere göre daha fazla yüke dayandığı gözlemlenmiştir [17]. PLA numunelerinin dolgu oranları değişken alınarak darbe davranışına odaklanılan bir çalışmada, elde edilen verilere göre en yüksek ortalama sertlik değerinin %100 doluluk oranına sahip numunede, en düşük ortalama sertlik değerinin ise %40 dolgu oranına sahip numunede olduğu belirtilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü açısından da en iyi sonuçların %100 doluluk oranında olduğu rapor edilmiştir [18]. Bir başka çalışmada, polilaktik asit filament kullanılarak ergiyik yığıma yöntemi ile elde edilen üç nokta eğme testi numunelerinin doluluk oranı (%10-20-30), örgü türü (oktet, çizgi, tri-hegzagonal) ve çatlak uzunluğunun (12 mm, 16 mm, 20 mm) Mod I çatlak ilerleme davranışına etkisi incelenmiştir. En kısa çatlakla sahip, yüksek doluluk oranındaki tri-hegzagonal numunelerin en yüksek eğilme rijitliğine sahip olduğu belirtilmiştir [7]. Literatür çalışmalarını incelendiğinde eklemeli imalat ile elde edilen numunelerin çoğunlukla çekme dayanımları açısından ele alındığı, kırılma davranışında ise üç nokta eğme testlerinin ağırlıklı olarak yapıldığı gözlenmektedir. Bununla birlikte, eklemeli imalat parametrelerinin eniyilenmesine dair çalışmalar görece azdır. Bu durum bu çalışmada imalat ve geometrik parametrelerin Mod I kırılma testi sonuçlarına etkisinin daha kapsamlı anlaşılmasının amaçlanmasındaki motivasyon olmuştur. Bu amaçlarla bu çalışmada, ergiyik yığıma yöntemi ile üretilen PLA malzemesinin Mod I kırılma davranışına eklemeli imalat parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, örgü türü, doluluk oranı, örgü açısı gibi önemli imalat parametrelerini ve çatlak uzunluğu gibi kritik bir geometrik durumu değişken olarak ele alınarak her bir değişkenin PLA malzemesinin kırılma davranışı üzerindeki etkileri üç seviyede incelenmiştir. PLA malzemesinin Mod I kırılma

davranışına ait elde edilen sonuçlar Taguchi yöntemi eniyilenmiştir.

Malzeme ve Yöntem

Ergiyik yığıma yöntemi ile imalatla, üretim yöntemi, doluluk oranı, örgü türü, örgü açısı, yazma hızı, nozul ve tabla sıcaklığı, katman kalınlığı gibi çok sayıda belirlenmesi gereken değişken bulunmaktadır. Bu değişkenlerin birçoğu birbirileri ile etkileşim halinde olduğundan imal edilen malzemenin özelliklerinin bu değişkenlerden nasıl etkilendiğini analiz etmek gerekmektedir. Bu amaç ile bağımlı değişkenin, bir ya da birden fazla bağımsız değişkenden nasıl etkilendiğinin incelenmesini sağlayan ve bir süreç tasarımı olan deney tasarımı teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerden birisi olan Taguchi yönteminde amaç, en az deney ve en düşük maliyetle kaliteli ürün ve süreç geliştirmektir [19]. Kompakt çekme testi numuneleri için tanımlanan değişkenlerin deneysel kırılma tokluğu üzerindeki etkilerinin incelenmesi için Taguchi deney tasarımı prosedürlerinden faydalanılmıştır. Örgü türü, doluluk oranı, örgü açısı ve çatlak uzunluğu parametreleri, bağımsız değişken ve kırılma tokluğu ise bağımlı değişken alınarak deneyler planlanmıştır. Numunelerin imalatında kullanılacak deney parametreleri ve seviyeleri Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Deney parametreleri ve seviyeleri ($W = 24 \text{ mm}$)

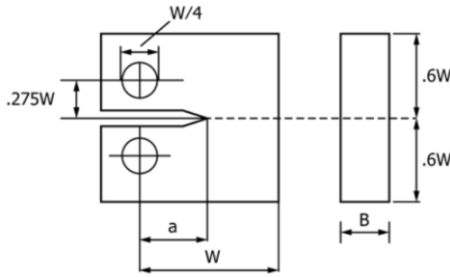
Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Örgü Türü	Izgara	Gyroid	Tri-hegzagonal
Doluluk Oranı (%)	25	50	75
Örgü Açısı (°)	0-90	22.5-67.5	45-45
Çatlak Uzunluğu (mm)	0.45*W	0.50*W	0.55*W

Belirlenen parametre ve seviyelere göre en uygun Taguchi matrisi olan L9 ortogonal deney tasarımı seçilmiştir. L9 matrisi imalat değişkenleri ve seviyelerini farklı kombinasyonlarda bir araya getireceği için değişkenlerin etkisinin kapsamlı incelenmesine olanak sağlayacaktır. Numuneler, farklı özelliklere sahip olduğu için kolaylık açısından N1, N2, N3 şeklinde kodlanmıştır. İlgili kodlar ve değişkenlerle tasarlanan Taguchi L9 matrisi Tablo 2'de verilmiştir.

Bu çalışmada, statik kırılma tokluğu testlerinde en yaygın kullanılan numunelerden biri olan kompakt çekme numuneleri ASTM D5045-14 standardına uygun olarak, eklemeli imalat yöntemiyle üç boyutlu yazıcıda farklı parametreler kullanılarak üretilmiştir. Üretilen numunelerin geometrisi, ASTM D5045-14 standardında genişlik (W) üzerinden tanımlanmış olup, Şekil 1'de gösterilmiştir. Burada, düzlem gerinim koşulunun sağlanması için genişlik $B = 2W$ olarak belirlenmiş, çatlak uzunluğu ise $0.45 < a/W < 0.55$ aralığında sınırlandırılmıştır. Başlangıç çatlağının oluşturulmasına ilişkin prosedür, ASTM D5054 (2013) standardında ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu çalışma kapsamında numune geometrisi, kullanılacak test düzeneği ile uyumlu olacak şekilde $W = 24 \text{ mm}$ olarak tasarlanıp boyutlandırılmıştır.

Tablo 2. Taguchi yöntemi ile uyarınca oluşturulan L9 deney tasarımı matrisi

Numune Numarası	Örgü Türü	Doluluk Oranı (%)	Örgü Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)
N1	Izgara	25	0 - 90	10.8
N2	Izgara	50	22.5 - 67.5	12
N3	Izgara	75	45 - 45	13.2
N4	Gyroid	25	22.5 - 67.5	13.2
N5	Gyroid	50	45 - 45	10.8
N6	Gyroid	75	0 - 90	12
N7	Tri-hegzagonal	25	45 - 45	12
N8	Tri-hegzagonal	50	0 - 90	13.2
N9	Tri-hegzagonal	75	22.5 - 67.5	10.8



Şekil 1. Standartlara uygun kompakt çekme testi numunesi [20]

Standartlara uygun kompakt çekme numunesi kullanılması halinde (ve $0.2 < x < 0.8$ sağlandığı sürece) $MPa\sqrt{m}$ birimindeki gerilme şiddeti faktörü aşağıdaki gibi elde edilir [17].

$$K_I = \left(\frac{F}{B W^{\frac{1}{2}}} \right) f(x) \quad (1)$$

Burada geometrik düzeltme faktörü,

$$f(x) = \frac{(2+x)(0.886 + 4.64x - 13.32x^2 + 14.72x^3 - 5.6x^4)}{(1-x)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

olup, ilgili standartta tariflenen şekilde belirlenecek parametreler aşağıdaki gibidir.

F = uygulanan yük, kN
 B = numune kalınlığı, cm
 W = numune genişliği, cm
 a = çatlak uzunluğu, cm
 $x = a/W$

Kompakt çekme numunelerine ait üç boyutlu modeller deney tasarımı matrisindeki eşleştirmeler takip edilerek cad yazılımı aracılığı ile oluşturulmuştur. Her bir model Creality Print yazılımı kullanılarak üç boyutlu yazıcıya aktarılacak üzere dilimlenerek toplamda dokuz farklı imalat dosyası (gcode) oluşturulmuştur. Oluşturulan imalat dosyaları eklemeli imalatın yapılacağı Creality Ender 3 S1 Pro modeli üç boyutlu yazıcıya aktarılmıştır. Referans alınan standart testlerin en az üç tekrarlı yapılmasını önerdiği için her bir numune grubuna ait modelinden üçer adet üretilmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan ergiyik yığma yöntemi ile deney tasarımında önerilen her bir test türü için üçer adet olmak üzere toplamda 27 adet kompakt çekme numunesi üretilmiştir. Numuneler seçilen imalat yöntemi ile uyumlu PLA filament kullanılarak üretilmiştir. PLA filamentin imalatçısı tarafından belirlenen mekanik özellikleri Tablo 3'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Deneyi gerçekleştirilen numunelere ait ortalama imalat süreleri ve malzeme ağırlıkları Şekil 2'de sunulmuştur. Doluluk oranının artmasıyla birlikte (örneğin, %75 doluluk oranına sahip N3, N6 ve N9 numuneleri), malzeme ağırlığında genelde bir artış gözlenmiştir. Ancak, imalat süreleri örgü türüne bağlı olarak farklılık göstermektedir. Örneğin, aynı doluluk oranına sahip N3 ve N9 numuneleri arasında imalat süresi açısından küçük bir fark bulunmuştur (N3: 46 dakika, N9: 47 dakika). Örgü türü hem imalat süresi hem de malzeme ağırlığı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Gyroid örgü türüne sahip numuneler (N4, N5 ve N6), genellikle daha uzun imalat süreleriyle birlikte orta seviyede malzeme ağırlığına sahip olmuştur.

Tablo 3. Polilaktik Asit (PLA) Filamentin Mekanik Özellikleri

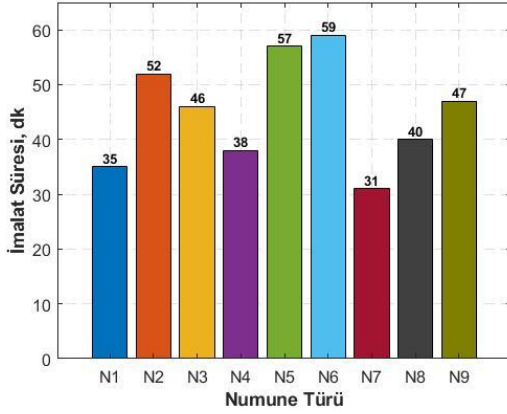
Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Elastik Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama (%)
PLA	1,23	1973	60	74	20

Buna karşın, daha yüksek doluluk oranları (%75 gibi) malzeme ağırlığını artırırken, imalat süresi örgü türüne bağlı olarak değişkenlik göstermiştir.

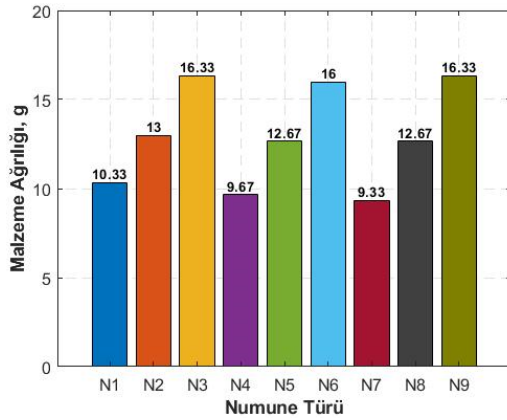
Gyroid örgü türü, imalat süresini uzatma eğiliminde iken malzeme ağırlığını dengeli bir seviyede tutmayı sağlamıştır. Tri-hexagonal örgü türü ise hem imalat süresi hem de malzeme ağırlığı açısından daha dengeli bir başarımlı sunmuştur. Bu sonuçlar, üretim sürecinde doluluk oranı, örgü türü ve örme açısının dikkatli bir şekilde planlanmasının, zaman yönetimi ve malzeme verimliliği açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Mod I kırılma testi deney düzeneği



(a)



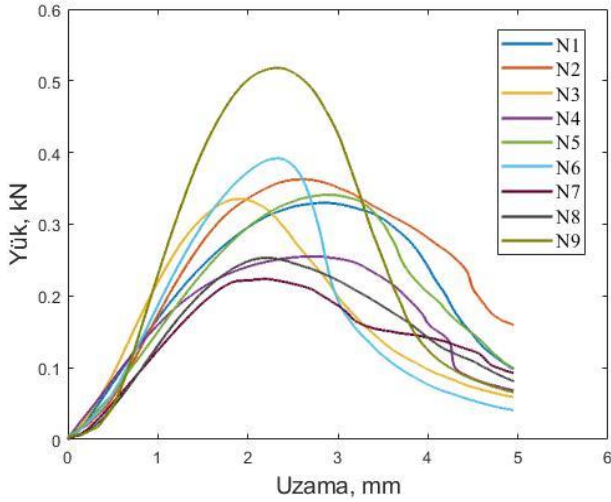
(b)

Şekil 2. Deneyi yapılan numunelere ait (a) ortalama imalat süresi, (b) malzeme ağırlığı (bir numune için)

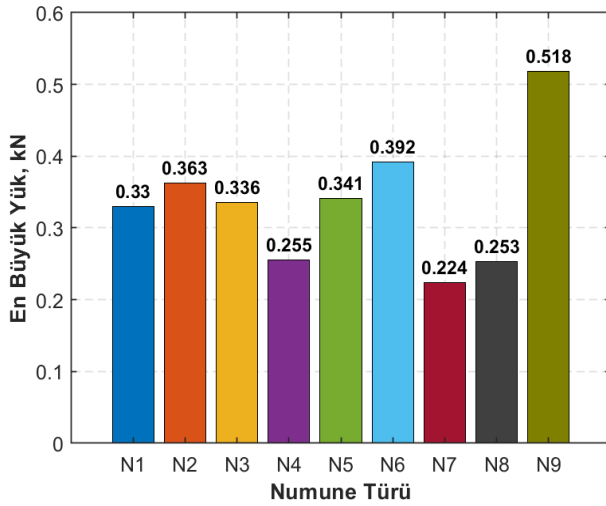
Test cihazı ile numunenin test edilmesini sağlayacak bir aparat, numune boyutlarına uygun olacak şekilde tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Test aparatının uygunluğunu ve rijitliğini denetlemek için asıl numuneler öncesinde yeterli sayıda kontrol numuneleri üretilmiş ve kontrol testleri yapılmıştır. Tutarlı sonuçların alındığından emin olunduktan sonra bu çalışmaya ait numuneler testlere tabi tutulmuştur. Gerinim hızı için cihazın hareketli kafasının hızı 2 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Testler, numuneler yük taşıma kabiliyetlerini kaybedene kadar sürdürülmüştür. Test düzeneğine ait bir görsel Şekil 3’de sunulmuştur.

L9 matrisi uyarınca yapılan her bir deneye ait yük-uzama eğrileri Şekil 4’de, en büyük yükler için sayısal büyüklükler Şekil 5’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tüm numunelerde en büyük yükler 1.5 – 3.5 mm deformasyon aralığından gerçekleşmiştir. Doluluk oranı en büyük olan (%75, N3, N6, N9) numune eğrilerinde bu aralığın daha dar olduğu ve en büyük yüke daha sivri bir tepe ile erişmekte, daha düşük olan numunelerde ise bu aralığın görece geniş olduğu gözlenmektedir. 4 mm uzamadan sonra tüm numunelerde taşınan yükler oldukça düşük mertebelere inmiştir. Buna rağmen eğrilerin son noktası olan 5 mm değerinde en büyük yük değeri N2 numunesinde, en düşük yük ise N6 numunesinde taşındığı görülmektedir. Bu sonuçta, örgü türü ve açısının etkin olduğu düşünülmektedir. Sayısal olarak sonuçlara bakıldığında taşınan yük ortalaması ise 0.335 kN olarak hesaplanmıştır. N7 numunesinin 0.224 kN değeri ile ortalamanın %49.55 oranında altında, en büyük yükün taşındığı N9 numunesinde 0.518 kN ile ortalamanın %35.33 oranında üstünde gerçekleştiği görülmektedir. Elde edilen yüklerden faydalanarak, her bir durum için gerilme şiddeti faktörleri Denklem 1 kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 6’da verilmiştir. Gerilme şiddeti bağıntısında geometrik düzeltme faktörü olarak hesaplanan $f(x)$ fonksiyonu, L9 matrisindeki değişkenlerden biri olan çatlak uzunluğuna da bağlıdır. Bu durum sonuçlar üzerinde etkilidir. Buna göre gerilme şiddeti açısından bakıldığında 2.102 MPa $\sqrt{m}$ ortalama sonuç olarak hesaplanmaktadır. En büyük yük sonuçlarından farklı olarak en büyük gerilme şiddeti faktörü ortalamadan %26.89 farkla N6 numunesinde, en düşük sonuca ise ortalamadan %34.73 daha az olarak N4 numunesinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar üzerinde diğer parametrelere kıyasla çatlak uzunluğunun daha baskın etkisinin olduğu belirtilebilir.

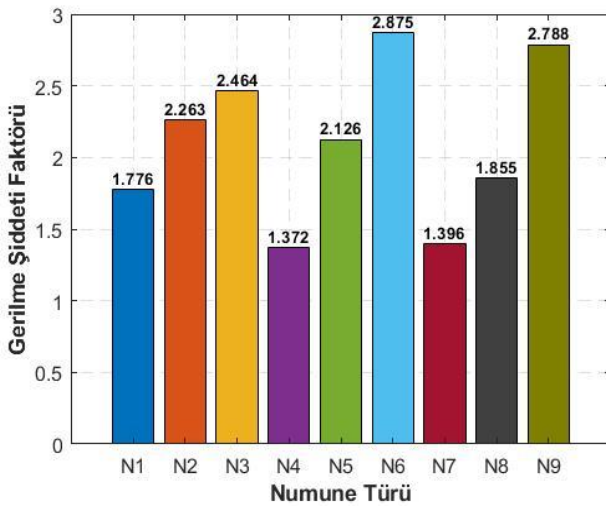
L9 matrisi Taguchi eniyileme yöntemi aracılığı ile oluşturulmuştur. Taguchi yönteminde sinyal gürültü oranı (S/N) adı verilen bir katsayı ile yapılan deney sonuçları yorumlanmaktadır. Sinyal/Gürültü (SN) analizi, sonuçların değişimleri yoluyla işlem koşulları için en sağlıklı grubu belirler. Taguchi, değişkenlerin en uygun seviyelerinin belirlenmesi için uygulamadaki problemleri hedefin türüne göre; en küçük en iyi, en büyük en iyi, hedef değer en iyi olmak üzere üçe ayırmıştır. Bu sayede, S/N oranını üç problemin hepsinde en yüksek değere çıkarırken, bir yandan sinyali arttırmak, diğer yandan ise varyasyonu azaltmak amaçlanmaktadır [19].



Şekil 4. Mod I kırılma testlerine ait yük-uzama eğrileri



Şekil 5. Mod I kırılma testlerine ait yük sonuçları



Şekil 6. Hesaplanan gerilme şiddeti faktörleri

Bağımlı ve bağımsız değişkenlerin elde edilen sonuçlar üzerindeki etkinliği deney matrisinin oluşturulmasında da faydalanılan Taguchi yöntemi ile incelenmiştir. Hesaplanan gerilme şiddeti faktörü sonuçlarıyla yapılan Taguchi analizlerine ait sinyal gürültü oranı sonuçları Tablo 4’de verilmiştir. Numunelerin yük taşıma kabiliyetlerinin ve dolayısıyla gerilme şiddeti faktörlerinin iyi olması istendiğinden S/N oranı için ‘En Büyük En İyi’ kriterine göre analizler yapılmıştır. Buna göre en iyi sonuçlara örgü türünün 1. seviyesi (Izgara), doluluk oranının 3. seviyesi (%75), örgü açısının 1. seviyesi (0-90) ve çatlak uzunluğunun 1. seviyesinde ulaşılmıştır. Bu durum ortalama gerilme şiddeti faktörü yükü sonuçları için verilen Tablo 5’te de benzer şekilde gözlenmiştir. Tabloda listelenen Delta değeri seviyelerde verilen en büyük ve en küçük sonuçlar arasındaki farkı, Rank değeri ise sonuçları üzerindeki en etkin değişkenin sıralamasını vermektedir. Buna göre Delta’nın en büyük değerinde Rank en düşük yani en etkili değişken olarak karşımıza çıkmaktadır. Tablo 4 ve 5 birlikte incelendiğinde doluluk oranının en büyük Delta değerine ve dolayısıyla en küçük Rank’a sahip olduğu görülmektedir. Sinyal gürültü oranı açısından en düşük etkiye örgü açısı sahipken, ortalama değerlere bakıldığında bu etki örgü türüne kaymaktadır.

Tablo 4. En büyük gerilme şiddeti faktörü için sinyal-gürültü oranları

Seviye	Örgü Türü	Doluluk Oranı (%)	Örgü Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)
1	6,640	3,548	6,512	6,817
2	6,159	6,339	6,251	6,390
3	5,727	8,639	5,763	5,319
Delta	0,914	5,091	0,749	1,497
Rank	3	1	4	2

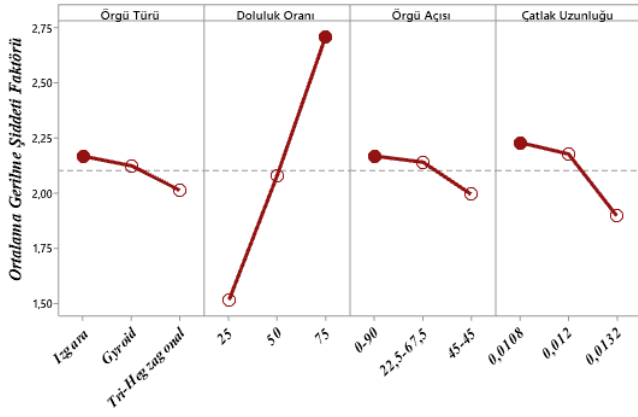
En büyük en iyi

Tablo 5. Ortalama gerilme şiddeti faktörü için yanıtlar

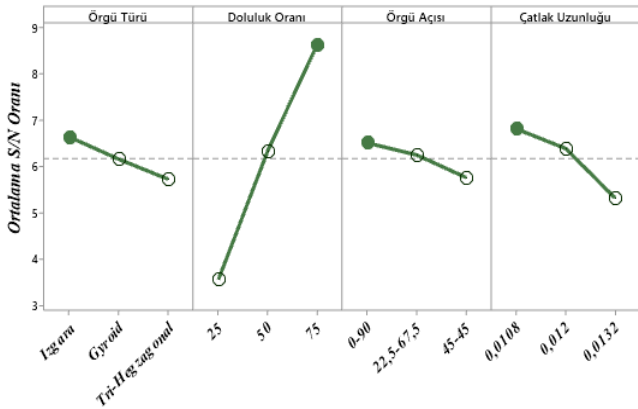
Seviye	Örgü Türü	Doluluk Oranı (%)	Örgü Açısı (°)	Çatlak Uzunluğu (mm)
1	2,168	1,515	2,169	2,230
2	2,125	2,082	2,142	2,179
3	2,014	2,710	1,996	1,898
Delta	0,154	1,194	0,173	0,333
Rank	4	1	3	2

En büyük en iyi

Tablo verilerine ilaveten çizdirilen ana etki grafikleri (Şekil 7-8) incelendiğinde seviyeler arasındaki en büyük farkın her iki grafikte de doluluk oranında, en düşük farkın ise sinyal/gürültü oranı için örgü açısında, ortalama gerilme şiddeti faktörü asonuçlarında da küçük bir farkla örgü türünde gerçekleştiği gözlenmektedir. Örgü açıları sonuçlarda eğri daha yatay bir seyir göstermektedir. Yani örgü açısının önemi göreceli olarak azalmaktadır. Sonuçlara en düşük katkının yine örgü türü tarafından sunulduğu en belirgin sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple örgü türü, en büyük yük sonuçlarının incelemesinde olduğu gibi gerilme şiddeti faktörü sonuçlarının Anova analizleri için de ihmal edilmiştir. Bu kabul diğer değişkenlerin etkisinin daha net görülmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 7 Değişkenlerin ortalama gerilme şiddeti faktörüne olan ana etki grafikleri



Şekil 8 Değişkenlerin gerilme şiddeti faktörü için ortalama S/N oranlarına olan ana etki grafikleri

Deney sonuçlarının bir başka incelemesi Anova analizi yardımıyla yapılmıştır. Hesaplanan gerilme şiddeti faktörü verilerinden elde edilen Anova analizi sonuçları Tablo 6-7'de verilmiştir. Örgü türünün ortalama gerilme şiddeti faktörü için hem Taguchi hem de Anova analizlerinde etkisinin çok küçük olduğu gözlemlendiğinden, nihai Anova analizleri yapılırken bu değişkenden arındırılmış olarak yapılmıştır. Tabloda yer alan F değeri, bir faktörün etkisinin hata varyansına göre büyüklüğünü ifade etmektedir. Yüksek F değerleri, faktörün etkisinin anlamlı olduğunu ve yanıt değişkeni üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu gösterir. P-değeri ise bir faktörün etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını test eder. Düşük P değeri (genelde < 0,05), faktörün yanıt değişkeni üzerinde anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Tablo 6. Gerilme şiddeti faktörü için Anova analizi sonuçları

Değişken	SF	Katkı	F-Değeri	P- Değeri
Doluluk Oranı	2	88,36%	56,21	0,0175
Örgü Açısı	2	2,15%	1,37	0,4225
Çatlak Uzunluğu	2	7,92%	5,04	0,1655
Hata	2	1,57%		
Toplam	8	100,00%		

Tablo 6 incelenildiğinde doluluk oranının katkısının %88,36 gibi oldukça yüksek bir oranda katkıya eriştiği gözlenmektedir. Bu sonuç 56,21 ile en yüksek F değeri ve

0,0175 gibi oldukça küçük P değeri ile istatistiksel olarak anlamlı bir değişken olduğu ile de desteklenmektedir. Sırasıyla çatlak uzunluğu ve örgü açısı da katkı oranları açısından listelenebilir. Bu değişkenlerin P değerleri incelendiğinde >0,05 olduğu yani istatistiksel olarak önemli bir etkisini olmadığı söylenebilir.

Tablo 7. Gerilme şiddeti faktörü için kurulan modele ait özet sonuçları

S	R-kare	R-kare (düzeltilmiş)	R-kare (tahmini)
0,138025	98,43%	93,71%	68,17%

Tablo 7'deki veriler incelendiğinde 0,138025 gibi oldukça düşük S hata değeri ile sonuçların güvenilir olduğunu görülmektedir. Ayrıca Model, mevcut veriye (%98,43 R-kare) ve düzeltmelere (%93,71 R-kare(düzeltilmiş)) iyi uyum sağlamaktadır. R-sq(düzeltilmiş) değerindeki düşüş, bazı faktörlerin modele eklenmesinin varyansı açıklama gücünü az da olsa düşürdüğünü göstermektedir. R-sq(tahmini) %68,17, modelin yeni veriler üzerinde tahmin performansının mevcut veri uyumuna kıyasla bir miktar düşük olduğunu ifade eder.

Gerilme şiddeti faktörü sonuçlarından elde edilmiş aşağıdaki regresyon denklemi yardımı ile bir model oluşturulmuştur. Model yardımıyla ilgili değişkenlerin farklı seviyelerine yer vererek elde edilecek bir tasarımdan gerilme şiddeti faktörü yeni bir deney yapmadan elde edilebilecektir.

$$\begin{aligned} \text{Gerilme Şiddeti Faktörü } \text{MPa}\sqrt{m} &= 2,1022 \\ &- 0,5870 \text{ Doluluk Oranı}_{25} - 0,0204 \text{ Doluluk Oranı}_{50} \\ &+ 0,6074 \text{ Doluluk Oranı}_{75} + 0,0671 \text{ Örgü Açısı}_{0-90} \\ &+ 0,0393 \text{ Örgü Açısı}_{22,5-67,5} - 0,1064 \text{ Örgü Açısı}_{45-45} \\ &+ 0,1281 \text{ Çatlak Uzunluğu}_{0,0108} \\ &+ 0,0763 \text{ Çatlak Uzunluğu}_{0,012} \\ &- 0,2044 \text{ Çatlak Uzunluğu}_{0,0132} \end{aligned}$$

Sonuç

Bu çalışmada, ergiyik yığıma yöntemi ile üretilen polilaktik asit (PLA) numunelerin Mod I kırılma davranışına eklemeli imalat parametrelerinin etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. ASTM D5045-14 standardına uygun kompakt çekme numuneleri, Taguchi L9 ortogonal deney tasarımı kullanılarak üretilmiş ve örgü türü, doluluk oranı, örgü açısı ve çatlak uzunluğu parametreleri üç farklı seviyede incelenmiştir.

Deney sonuçları, doluluk oranının kırılma tokluğunu etkileyen en baskın parametre olduğunu ortaya koymuştur. Anova analizi sonuçlarına göre doluluk oranı, gerilme şiddeti faktörü değerlerindeki varyansın %88,36'sına katkı sağlamış ve istatistiksel olarak anlamlı bulunan tek değişken olmuştur (F-değeri = 56,21, P-değeri = 0,0175). Yüksek doluluk oranlarında malzeme sürekliliğinin artması ve boşluk içeriğinin azalması, çatlak ilerlemesine karşı direnci önemli ölçüde artırmıştır.

Çatlak uzunluğu, ikinci en önemli etkiye sahip parametre olarak belirlenmiştir (Rank = 2). Kısa başlangıç çatlaklarına sahip numuneler, çatlak önündeki bağ uzunluğunun fazla olması nedeniyle genel olarak daha yüksek gerilme şiddeti faktörleri göstermiştir.

Örgü açısı ve örgü türü, kırılma davranışı üzerinde minimal etkiler sergilemiştir. 0° - 90° yönelimi, katmanların çatlak ilerleme yönüne göre uygun dizilimi sayesinde $\pm 45^{\circ}$ konfigürasyonlarına göre biraz daha iyi performans göstermiştir. Örgü türü seçiminin ise kırılma direnci üzerinde ihmal edilebilir düzeyde etkisi olduğu belirlenmiştir.

Geliştirilen regresyon modeli, deneysel verilere oldukça iyi uyum sağlamıştır ($R^2 = \%98,43$, $R^2(\text{adj}) = \%93,71$) ve incelenen parametre aralığı içinde test edilmek istenen kombinasyonlar için gerilme şiddeti faktörlerinin tahmin edilmesine olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak, eklemeli imalat ile üretilen PLA yapısal bileşenlerin yüksek doluluk oranı ve uygun örgü açısı kombinasyonunun kırılma tokluğunu iyileştirdiği tespit edilmiş olup, bu bulgular eklemeli imalat ile üretilen yapısal parçaların tasarımında faydalı bilgiler sunmaktadır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) tarafından yürütülen, 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında 1919B012328864 başvuru numarası ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] B. Yalçın, B. Ergene, and G. Tarihi, "Endüstride yeni eğilim olan 3-D eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi," *Int. J. Technol. Sci.*, vol. 9, no. 3, pp. 65-88, 2017.
- [2] E. Emir, "Investigation of burr formation and circularity error in drilling of PLA produced at different printing temperatures with machine learning-based prediction," *Dicle Univ. Eng. Fac. J.*, vol. 16, no. 2, pp. 421-429, Jun. 2025, doi: 10.24012/dumf.1656898.
- [3] 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," *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 8169-8177, 2021, doi: 10.15282/jmes.15.2.2021.16.0641.
- [4] A. Ghaznavi Youvalari, J. Alizadeh Kaklar, and M. Mohamadi, "Investigation of mechanical properties in PLA, ABS and epoxy resin parts fabricated by 3D printing technology," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, pp. 1-16, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-13866-8.
- [5] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review," *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol.

- 107, pp. 367-392, 2016. doi: 10.1016/j.addr.2016.06.012.
- [6] X. Wang *et al.*, "Research progress in polylactic acid processing for 3D printing," *J. Manuf. Process.*, vol. 112, pp. 161-178, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2024.01.038.
- [7] V. Arikian, "Effects of infill patterns and densities on crack propagation behavior in additive manufactured parts: a comparative study," *Mater. Test.*, vol. 65, no. 11, 2023, doi: 10.1515/mt-2023-0192.
- [8] Y. Feng, D. Wu, M. G. Stewart, and W. Gao, "Past, current and future trends and challenges in non-deterministic fracture mechanics: A review," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 412, p. 116102, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.CMA.2023.116102.
- [9] J. Gardan, A. Makke, and N. Recho, "Improving the fracture toughness of 3D printed thermoplastic polymers by fused deposition modeling," *Int. J. Fract.*, vol. 210, no. 1-2, pp. 1-15, Mar. 2018, doi: 10.1007/s10704-017-0257-4.
- [10] A. Zolfagharian, M. R. Khosravani, and A. Kaynak, "Fracture resistance analysis of 3D-printed polymers," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/polym12020302.
- [11] M. R. Ayatollahi and B. Saboori, "A new fixture for fracture tests under mixed mode I/III loading," *Eur. J. Mec.- A, Solids*, vol. 51, pp. 67-76, May 2015, doi: 10.1016/j.euromechsol.2014.09.012.
- [12] C. Valean *et al.*, "The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness," in *Procedia Structural Integrity*, vol. 28, pp. 1134-1139, 2020. doi: 10.1016/j.prostr.2020.11.128.
- [13] A. R. Kafshgar, S. Rostami, M. R. M. Aliha, and F. Berto, "Optimization of Properties for 3D Printed PLA Material Using Taguchi, ANOVA and Multi-Objective Methodologies," in *Procedia Structural Integrity*, vol. 34, pp. 71-77, 2021. doi: 10.1016/j.prostr.2021.12.011.
- [14] L. Marşavina *et al.*, "Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 274, p. 107766, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.engfracmech.2022.108766.
- [15] U. Kizhakkianan, D. W. Rosen, and N. Raghavan, "Experimental investigation of fracture toughness of fused deposition modeling 3D-printed PLA parts," *Mater. Today Proc.*, vol. 70, pp. 631-637, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.10.014.

- [16] M. R. Khosravani and T. Reinicke, “Effects of printing parameters on the fracture toughness of 3D-printed polymer parts,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 47, pp. 454-459, 2023, doi: 10.1016/j.prostr.2023.07.079.
- [17] B. Karakoç and G. Uzun, “Ergiyik Yığma Modelleme Yöntemi ile Üretilen Numunelerde Örne Yönteminin ve Baskı Yönünün Mukavemeti Olan Etkisi,” *J. Polytech.*, vol.27, no. 4, pp. 1233-1242, 2023, doi: 10.2339/politeknik.1262855.
- [18] Ç. Bolat and B. Ergene, “An Experimental Effort on Impact Properties of Poly(lactic acid) Produced by Additive Manufacturing,” *Duzce Univ. J. Sci. Technol.*, vol. 11, pp. 998–1013, 2023.
- [19] M. Şirvancı, *Kalite için Deney Tasarımı “Taguçi Yaklaşımı.”* İstanbul: Literatür Yayıncılık, 2011.
- [20] ASTM D 5054, “Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials,” *ASTM Book of Standards*, vol. 99, 2013.