

Kemal Ayan* 

Nail Aslan 

Manisa Celal Bayar Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine
Mühendisliği Bölümü,
Manisa/Türkiye

Fırat Mavi 

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü,
İzmir/Türkiye

Sırrı Can Polat 

Cansu Apaydın 

Nurşen Saklakoğlu 

Manisa Celal Bayar Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine
Mühendisliği Bölümü,
Manisa/Türkiye

EYM ile Üretilen PLA Parçaların Talaşlı İmalatla Delinmesinde Katman Kalınlığının ve Delme Parametrelerinin Delik Kalitesine Etkisi

Biyobozunur ve işlenebilir yapısı nedeniyle PLA, EYM (Eriyik Yığılma Modelleme) yönteminde sıkça tercih edilir. Ancak elde edilen parçaların yüzey kalitesi ve geometrik doğruluğu, çoğunlukla son işlem adımlarını zorunlu kılar. Bu çalışmada, katman kalınlığı ile kesme ve ilerleme hızlarının, delik çapı, silindiriklik, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, kesme hızının delik doğruluğu, ilerleme hızının silindiriklik ve her iki parametrenin delaminasyon üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Yüzey kalitesi ile boyutsal tutarlılığın dengelenmesi adına düşük katman kalınlığı, yüksek kesme ve orta düzeyde ilerleme hızı önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Eriyik Yığılma Modelleme, Polilaktik asit (PLA), Delme, Proses Optimizasyonu.

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 1 Mayıs 2025

Kabul: 16 Mayıs 2025

*Sorumlu Yazar: Kemal Ayan

Email: kemal.ayan@cbu.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1688383>

1. GİRİŞ

Polilaktik Asit (PLA), mısır nişastası, buğday ve pirinç gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, biyobozunur özellikte bir termoplastiktir. PLA üretimi, tarımsal ürünlerin fermantasyonu sonucu oluşan laktik asidin, doğrudan yoğunlaştırılması veya laktid halkalarının polimerizasyonu ile gerçekleştirilir [1,2]. Mekanik özellikleri açısından polietilen tereftalat (PET), işlenebilirlik açısından ise polistirene (PS) benzer özellikler gösterir. Buna karşın, PLA'nın düşük darbe direnci ve sınırlı termal stabilite gibi dezavantajları bulunmaktadır [3]. Tüm bu sınırlamalara rağmen PLA, katmanlı üretim teknikleri ile karmaşık geometrileri yüksek hassasiyetle üretebilme olanağı ve ekonomik avantajları nedeniyle eklemeli üretim yöntemlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Literatürde, PLA'nın biyobozunur yapısını iyileştirmek ve mekanik

özelliklerini geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen farklı katkı çalışmaları da bulunmaktadır [4-6]. Ancak, bu süreçlerin ardından boyutların iyileştirilmesi ve yüzey kalitesinin artırılması için kesme ve delme gibi son işleme işlemleri gereklidir. Bu bağlamda, eklemeli imalatla üretilen PLA parçaların delme özelliklerini anlamak, işleme süreçlerini optimize etmek ve nihai bileşenlerde boyutsal doğruluğu sağlamak açısından oldukça önemlidir. Uygun kesme takımları ve delme parametrelerinin seçimi, yüksek yüzey kalitesi ve hassas boyutsal toleransların elde edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak, eklemeli imalat ile üretilen PLA'nın katman temelli yapısı, işleme süreçlerinde ek zorluklar yaratmakta ve işlem parametrelerinin deneysel olarak doğrulanmasını zorunlu kılmaktadır.

PLA ile ilgili literatür, özellikle talaşlı delme işlemi konusunda sınırlı bilgi sunmaktadır. Baraheni ve arkadaşları [7], eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş PLA parçaların delme performansını değerlendirmek amacıyla konvansiyonel delme (CD) ve ultrasonik destekli delme (UD) tekniklerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre, CD işleminde matkabin ilerlemesiyle itme kuvvetleri artarken, UD tekniğinde ultrasonik titreşimler sayesinde kuvvetler daha stabil hâle gelmektedir. Ayrıca, kesme hızının artmasıyla itme kuvvetlerinin azaldığı, ilerleme hızının artmasıyla ise arttığı görülmüştür. Aynı çalışma, düşük ilerleme hızı ve yüksek kesme hızı kombinasyonunun delaminasyonu azalttığını; UD tekniğinin ise CD yöntemine kıyasla delaminasyonu yaklaşık %18 oranında daha da düşürdüğünü göstermiştir. Bu iyileşme, ultrasonik delmenin sağladığı kuvvet stabilitesi ve daha düzenli talaş oluşumu ile ilişkilendirilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar genellikle PLA kompozitlerinin delme tekniklerine odaklanmakta, ancak delme sırasında oluşan hasar mekanizmalarına sınırlı şekilde değinmektedir. Delme işleminde meydana gelen başlıca hasar türleri matris çatlakları, elyaf kırılması (kompozit yapılar), termal bozulmalar ve delaminasyondur. Bunlar arasında özellikle delaminasyon, bileşenlerin yorulma direncini ve yapısal bütünlüğünü ciddi şekilde etkileyen önemli bir kusurdur [8,9]. Havacılık endüstrisinde delaminasyona bağlı kusurlar nedeniyle parça reddedilme oranları %60'a kadar ulaşabilmektedir. Bu olumsuz etkileri azaltmak için araştırmacılar, takım geometrisi, kesici takım malzemesi, kesme parametreleri ve titreşim destekli işleme teknikleri gibi faktörlerin delaminasyon, kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini detaylı biçimde incelemiştir [10-13].

PLA'nın talaşlı işleme performansını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunların başında PLA'nın termal stabilitesi, mekanik özellikleri ve eklemeli imalat sırasındaki yazdırma parametreleri gelir. PLA'nın nispeten düşük erime noktası (yaklaşık 153-168°C), işleme sırasında termal bozulma riskini artırarak kötü delik kalitesine, hızlı takım aşınmasına ve nihai parçalarda boyutsal hatalara neden olabilir [14,15]. Ayrıca, PLA'nın kırılma yapısı ve düşük darbe direnci nedeniyle işleme sırasında çatlak oluşumu ve yüzey kusurlarına yatkınlığı da yüksektir. Bu nedenle, yüksek boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi elde edebilmek için talaşlı işleme parametrelerinin dikkatli biçimde seçilmesi gerekmektedir [10, 16].

Ayrıca, Eriyik Yığılma Modellemesi (EYM) yöntemiyle üretilmiş PLA parçaların yazdırma parametreleri de talaşlı işleme performansını

etkileyen önemli değişkenlerdir. Katman yüksekliği, baskı hızı ve dolgu yoğunluğu gibi üretim parametreleri, katmanlar arası yapışma mukavemetini ve parçanın genel mekanik dayanımını şekillendirerek işleme performansını doğrudan etkilemektedir[17]. EYM yöntemiyle üretilmiş PLA'nın anizotropik doğası, katmanlar arası bağlanma farklılıkları sebebiyle deliklerin geometrik doğruluğunu ve yapısal stabiliteyi azaltmakta; iç boşluklar ve katman hizasızlıkları da talaşlı işlemeyi daha zor hale getirmektedir. Bu nedenle, üretimde yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirliği sağlamak için talaşlı işleme parametrelerinin doğru şekilde modellenmesi ve malzemenin çeşitli gerilim koşulları altındaki davranışının iyi anlaşılması büyük önem taşımaktadır.

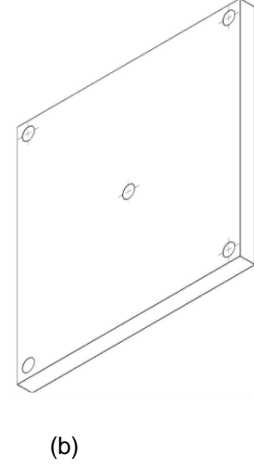
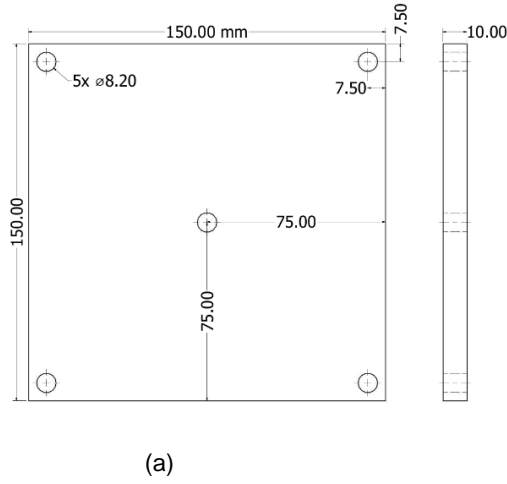
Bu çalışmanın temel amacı, EYM yöntemiyle üretilen PLA parçaların talaşlı delinmesinde optimal kesme parametrelerini deneysel olarak belirlemektir. Katman yüksekliği ile talaşlı imalat parametrelerinin PLA'nın delik kalitesi üzerindeki etkileri, kontrollü deneyler ile incelenmiştir. Yapılan deneyler, delik boyutlarını hassas bir şekilde kontrol etmek amacıyla parametrelerin optimizasyonunu hedeflemekte ve katman kalınlığı değişiminin süreç üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Bu çalışma ayrıca, deneysel bulgulara dayanarak delme parametrelerinin sistematik analizini sağlayarak, EYM ile üretilmiş PLA parçalarının delik kalitesi ve güvenilirliğini iyileştirmek için önemli bilgiler sunmakta ve eklemeli imalat sonrası son-işlem süreçlerine yönelik literatüre katkı sağlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Eriyik Yığılma Modelleme Yöntemiyle Üretim

Çalışmada kullanılan numuneler, Ultimaker S5 marka üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş olup, her biri 150 × 150 × 10 mm boyutlarında ve %100 dolgu yoğunluğuna sahiptir. Deneylerde kullanılan bu PLA plakaların detaylı teknik çizimi Şekil 1'de sunulmaktadır.

Çalışmada kullanılan PLA plakalar, CNC dikey işleme merkezine rijit bir şekilde sabitlenebilmeleri amacıyla beş adet sabitleme deliği içerecek şekilde tasarlanmıştır. Üretimde kullanılan hammadde, önceki çalışmalarda performansı optimize edilmiş olan NatureWorks 4043D PLA granüllerinden elde edilen, 2.85 mm çapında renksiz filamentlerdir. Filamentlerin üretim öncesinde nem kaynaklı hataların önüne geçmek amacıyla 45°C sıcaklıkta, 12 saat boyunca fırında kurutulması sağlanmıştır. Tasarım dosyaları, Ultimaker Cura v5.3.1 dilimleme yazılımı kullanılarak G-kod formatına dönüştürülmüş ve üretim işlemleri Tablo 1'de verilen parametreler ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Delik delme çalışmasında kullanılan plakanın teknik çizimleri. a) Ön ve sol yan görünüşler, b) İzometrik görünüş.

Tablo 1. Üretim Parametreleri

Nozül Çapı	0,4 mm
Nozül Sıcaklığı	210°C
Tabla Sıcaklığı	60°C
Dolgu Tarama Açısı	+45°/-45°
Baskı Hızı	60 mm/sn
Katman Genişliği	0,38 mm
Dolgu/Katman Hattı Çakışma Oranı	% 10

Tüm bu üretim parametreleri, ilgili literatürde yer alan önceki çalışmaların bulgularına dayalı olarak seçilmiştir [18, 19]. Bu çalışmada katman kalınlığının delik kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, 0.1 mm, 0.2 mm ve 0.3 mm olmak üzere üç farklı katman kalınlığına sahip PLA plakalar üretilmiştir.

2.2. Talaşlı İmalat ile Delik Delme

Delme işlemleri, 6.7 mm çapında yüksek hızlı çelik (HSS) matkap ucu kullanılarak, ETASIS ETAMILL VL1000 model CNC dikey işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı kesme hızı ve ilerleme hızı kombinasyonları uygulanarak bu parametrelerin delik kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Her bir parametre kombinasyonu için dört tekrar yapılmış; böylece hem sonuçların tekrarlanabilirliği hem de istatistiksel geçerliliği sağlanmıştır.

Delme işlemleri tek geçişli olarak uygulanmış ve takımın giriş ve çıkış hızları sabit tutulmuştur. Her delme işleminden sonra takım yüzeyleri talaş kalıntılarında arındırılmış, su ile soğutma uygulanarak takımın bir sonraki işlem öncesinde oda sıcaklığına dönmesi sağlanmıştır. Deneylerde 27 farklı kombinasyonda kullanılan katman kalınlığı,

ilerleme hızı ve kesme hızı değerlerine ait detaylı bilgiler Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. Deneyin bağımsız değişkenleri ve seviyeleri

Bağımsız Değişkenler	Değerler		
l : Katman kalınlığı [mm]	0.1	0.2	0.3
f : İlerleme hızı [mm/min]	50	100	150
V_c : Kesme hızı [m/min]	12.629	18.944	25.258

2.3. Çap, Silindiriklik ve Delaminasyon Ölçümü

Çap ve silindiriklik ölçümleri, Hexagon marka Glory model Koordinat Ölçüm Makinesi (CMM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çap sapması, ölçülen delik çapından kullanılan takım çapının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır.

Delaminasyon, özellikle kompozit ve katmanlı yapıdaki malzemelerde yaygın olarak karşılaşılan bir sorundur ve malzeme katmanlarının birbirinden ayrılması veya soyulması şeklinde tanımlanır. Bu olgu, katmanlar arası yapışmayı zayıflatarak yapısal bütünlüğü ve mekanik performansı olumsuz yönde etkileyebilir. Delaminasyon; mekanik gerilmeler, çevresel etkiler veya üretim sürecinde oluşabilecek yerleşik kusurlar sonucu ortaya çıkabilir ve

malzemenin uzun vadeli dayanımını önemli ölçüde düşürebilir.

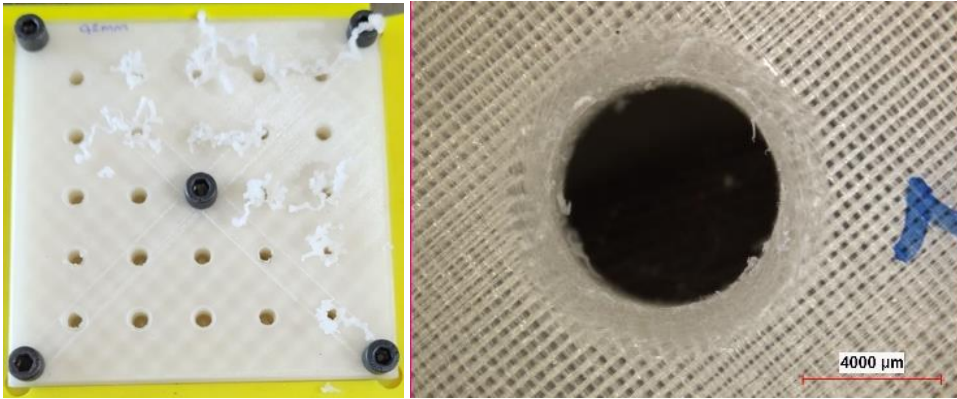
Bu çalışmada, delme işlemi sırasında oluşan delaminasyonun boyutunu nicel olarak değerlendirmek amacıyla görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Görüntü işleme yöntemi, delik ile çevresindeki malzeme arasındaki kontrastı kullanarak delik sınırlarının belirlenmesi amacıyla başlamaktadır. Belirlenen sınırlar doğrultusunda delik merkezi ve çapı hesaplanmakta, bu değer delaminasyonun iç sınır çapını temsil etmektedir.

Bu fonksiyon, Şekil 3(a)'da gösterilen dairenin hesaplanan merkezini referans alarak, belirlenen katsayı yardımıyla dış sınır çapının belirlenmesini sağlamıştır. Bu çap değeri kullanılarak dış sınır Şekil 3(b)'de mavi renkli daire olarak gösterilmiştir.

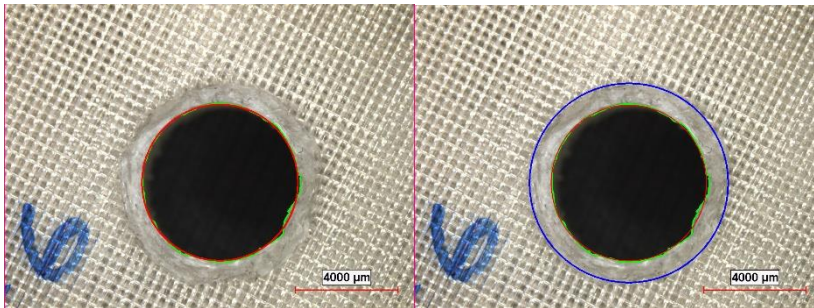
Delaminasyon miktarı, stereo mikroskop ile elde edilen görüntüler üzerinde uygulanan analizler aracılığıyla, etkilenen alanın belirlenmesi yoluyla tespit edilmiştir. Doğru ve tekrarlanabilir ölçümler sağlamak amacıyla analiz öncesinde delik çevresindeki talaşlar dikkatlice temizlenmiş, böylece görüntü işlemeye bağlı hatalar minimize edilmiştir. Delaminasyonun dış sınırının belirlenmesi sürecinde, hasarsız bölge ile hasarlı bölge arasındaki kontrast farkının yetersiz olması nedeniyle bazı sınırlamalarla

karşılaşılmıştır. Delik sınırlarının belirlenmesinde kullanılan kontrast tabanlı görüntü işleme yöntemi, dış sınırın tespitinde yeterli doğruluğu sağlayamadığından, bu sorunu aşmak amacıyla ayarlanabilir katsayılı bir daire çizim fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 2, deliklerin delme sonrası orijinal hâlini ve talaş temizliği yapılmış yüzey durumlarını göstermektedir. Görüntülerin işlenmesinde Python v3.13 programlama dili kullanılmış ve böylece ölçümlerin doğruluğu ile tekrarlanabilirliği güvence altına alınmıştır [20,21].

Bu yöntemle, Şekil 3'te gösterilen merkez nokta referans alınarak 10×3 büyütme oranında iç çap hesaplanmıştır; böylece delaminasyon bölgesine karşılık gelen dış sınır sistematik biçimde tanımlanmıştır. Daha sonra, iç ve dış sınır dairelerine ait çap ve alan değerleri hesaplanarak delaminasyonun boyutu nicel olarak belirlenmiştir. Alan hesaplamalarında standart daire alanı hesaplama formülü kullanılmıştır. Hesaplamaların son aşamasında, delaminasyon alanı, dış sınırı temsil eden mavi daire alanından, iç sınırı temsil eden kırmızı daire alanının çıkarılmasıyla elde edilmiştir; böylece etkilenen bölge izole edilerek güvenilir bir şekilde analiz edilmiştir.



Şekil 2. a) 0.2 mm katman kalınlığıyla üretilmiş plakanın delme işlemi sonrasındaki görüntüsü b) 50 mm/dak ilerleme hızı ve 18.944 m/dak kesme hızıyla delinen bir deliğin görüntüsü



Şekil 3. Delaminasyon iç sınırı (kırmızı) (a); dış sınırı (mavi) gösterimi (b)

2.4. Deliklerin Yanal Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü

Deliklerin yanal yüzeylerinin pürüzlülükleri Mitutoyo SurfTest SJ-301 stylus uçlu profilometre ile ölçülmüştür. Ölçümlerde R profili esas alınmış, Gaussian filtre uygulanmış, cut-off değeri 0.8 mm ve örneklem adedi 5 olarak uygulanmıştır. Elde edilen yüzey profili üzerinden Ra ve Rz değerleri hesaplanmıştır.

2.5. İstatistiksel Analiz

Delik kalitesi üzerinde farklı talaşlı imalat parametrelerinin etkisini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek amacıyla, çok yönlü varyans analizi (n-way ANOVA) uygulanmıştır. Bu güçlü istatistiksel yöntem, bağımsız değişkenler olan katman kalınlığı, ilerleme hızı ve kesme hızı ile bağımlı değişkenler olan delik çapı sapmaları, silindiriklik, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkileri sistematik olarak incelemek için kullanılmıştır. Her bir parametre, önceden belirlenen aralıklarda dikkatlice değiştirilmiş; böylece hem bireysel faktörlerin ana etkileri hem de bu faktörler arasındaki anlamlı etkileşimler analiz kapsamına alınmıştır.

3. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA

Çap sapmasına ilişkin elde edilen ANOVA sonuçları, kesme hızı ve ilerleme hızı değişkenlerinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu, buna karşın katman kalınlığının delik çapı üzerinde belirgin bir etkisinin bulunmadığını ortaya koymuştur. Bu bulgular doğrultusunda, ileri analizlerde endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen 0.2 mm katman kalınlığı ile üretilmiş numuneler esas alınmıştır. Dolayısıyla, diğer katman kalınlıklarında üretilen delik örnekleri kapsam dışı bırakılmıştır.

Yalnızca kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin bağımsız değişken olarak kabul edildiği bu revize edilmiş modelin ANOVA sonuçları Tablo 3'te özetlenmiştir. Elde edilen verilere göre, kesme hızının delik çapı sapması üzerinde, ilerleme hızına kıyasla çok daha belirgin bir etki yarattığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bu iki parametre arasındaki etkileşim de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş; bu durum, parametrelerin delik çapını birlikte ve karşılıklı olarak güçlü bir biçimde etkilediğini göstermiştir.

Şekil 4a, delme parametreleri ile delik çapı sapması arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Kesme hızı 12.63 m/dak olarak uygulandığında, elde edilen delik çaplarının, nominal takım çapından daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun, delme sırasında iş parçasında oluşan elastik gerilmelerin takımın çıkışıyla birlikte serbest kalması ve ardından gerçekleşen elastik geri toparlanma (spring-back) ile açıklanabileceği düşünülmektedir.[10,22,23] Bu mekanizma sonucunda, delik çapında daralma meydana gelmiştir.

Buna karşılık, kesme hızı 25.3 m/dak seviyesine çıkarıldığında, delik çaplarının çoğunlukla nominal takım çapının üzerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durumun, kesici takım ile malzeme arasında artan sürtünme kuvveti nedeniyle oluşan ısının, PLA'nın lokal olarak termal yumuşamasına neden olmasıyla açıklanabileceği düşünülmektedir. Artan sıcaklık, malzemenin viskozitesini azaltarak deformasyona karşı daha duyarlı hale gelmesine yol açmakta ve bu da delik çapında kalıcı bir genişleme eğilimine neden olmaktadır.

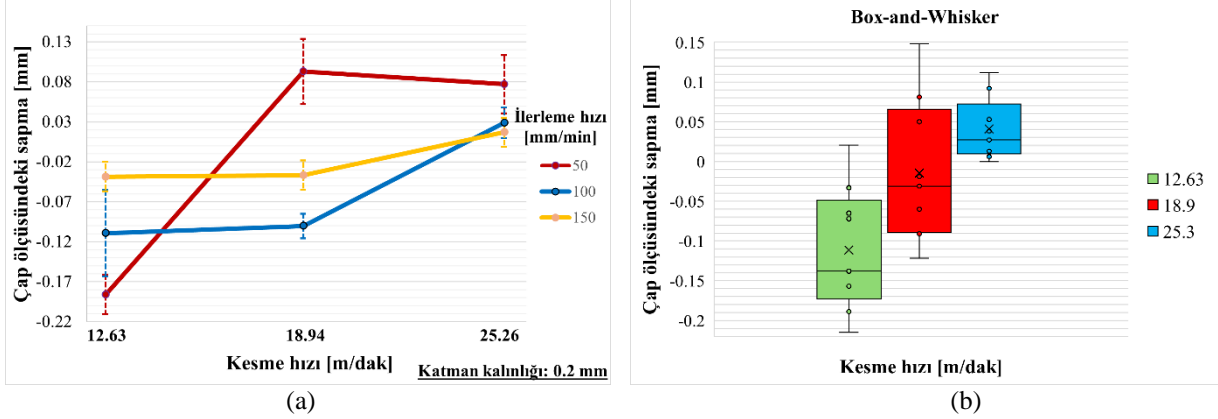
Talaşlı imalat çalışmalarında, box-and-whisker (kutu grafikleri), kesme ve ilerleme hızları gibi bağımsız değişkenlerin; çap sapması, silindiriklik ve delaminasyon gibi işlem çıktıları üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla sıkça kullanılmaktadır. Bu bağlamda, Şekil 4b, delme parametreleri ile çap sapmaları arasındaki ilişkiyi görsel olarak sunmakta ve optimal işlem koşullarının belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Elde edilen veriler doğrultusunda, en düşük çap sapması, 18.94 m/dak kesme hızı ve 150 mm/dak ilerleme hızı kombinasyonunda gözlemlenmiştir. Öte yandan, en yüksek çap sapması ise 12.63 m/dak kesme hızı ve 50 mm/dak ilerleme hızı kombinasyonunda meydana gelmiştir. Ayrıca, 25.26 m/dak kesme hızıyla gerçekleştirilen delme işlemlerinde, diğer kombinasyonlara kıyasla daha yüksek tekrarlanabilirlik (daha dar yayılım aralığı) elde edildiği görülmüştür. Bu durum, yüksek kesme hızının işleme sürecindeki kararlılığı artırdığını göstermektedir.

Silindiriklik için elde edilen ANOVA sonuçları Tablo 4'te sunulmaktadır. İlerleme hızı, kesme hızına kıyasla daha yüksek bir etkiye sahiptir. Parametreler temelde silindirikliği birbirlerinden bağımsız bir şekilde etkilemektedir.

Tablo 3. Çap ölçüsündeki sapma değeri için uygulanan çok yönlü ANOVA sonuçları.

Çap sapması	Karelerin toplamı	Ortalamaların karekökü	F değeri	p değeri
Model	0.2046	0.0256	17.55	< 0.0001
İlerleme hızı (B)	0.0161	0.0080	5.52	0.0142
Kesme hızı (C)	0.1075	0.0537	36.88	< 0.0001
B&C	0.0845	0.0211	14.5	< 0.0001



Şekil 4. Çaptaki sapma değerinin kesme hızına bağlı değişimi. a) çizgi grafiği, b) box-and-whisker grafiği.

Tablo 4. Silindiriklik değeri için uygulanan çok yönlü ANOVA sonuçları.

Silindiriklik	Karelerin toplamı	Ortalamaların karekökü	F değeri	p değeri
Model	0.0619	0.0155	10.26	<0.0001
İlerleme hızı (B)	0.0494	0.0247	16.36	<0.0001
Kesme hızı (C)	0.0126	0.0063	4.16	0.0294

Silindiriklik ölçümünde, milimetre cinsinden elde edilen değerlerin artması, delik geometrisinin ideal silindirik formdan sapma miktarını göstermekte olup, silindirikliğin bozulduğunu ifade eder. Başka bir deyişle, ölçülen değer ne kadar büyükse, delik o kadar az silindirik yapıdadır.

Uygulanan parametre aralıkları kapsamında, en iyi (optimum) silindiriklik, 50 mm/dak ilerleme hızı ve 18.94 m/dak kesme hızı kombinasyonunda elde edilmiştir. Buna karşılık, en kötü silindiriklik değeri, 100 mm/dak ilerleme hızı ile 25.3 m/dak kesme hızı kombinasyonunda gözlemlenmiştir (Şekil 5). Bu bulgu, özellikle yüksek kesme hızının ilerleme hızıyla birlikte arttığında, takım sapması ve talaş birikimi gibi faktörlerin silindirikliği olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

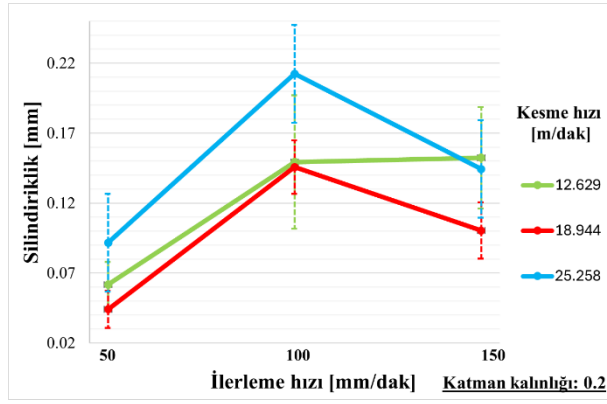
Delaminasyon için elde edilen ANOVA sonuçları Tablo 5'te sunulmaktadır. Her iki parametre de istatistiksel olarak anlamlı ve birbirlerine yakın seviyelerde etkiye sahiptir. Ayrıca parametreler delaminasyonu birbirlerine bağımlı bir şekilde de etkilemektedir.

İlerleme hızı arttıkça, delaminasyon değerlerinde azalma, kesme hızı arttıkça ise artma eğilimi gözlemlenmiştir. Delaminasyonun düşük olduğu parametre kombinasyonlarında, ölçülen standart sapma değerlerinin de oldukça düşük olduğu

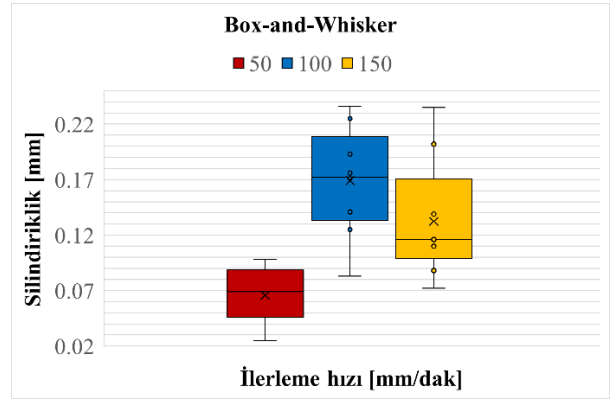
dikkat çekmektedir; bu durum, hem daha kararlı bir işleme sürecine hem de daha homojen bir delaminasyon davranışına işaret etmektedir.

Düşük kesme hızı koşullarında, talaş kaldırma sırasında itme kuvvetlerinin arttığı ve EYM yöntemiyle üretilmiş parçaların katmanlı yapısı nedeniyle, bu kuvvetlerin delik çevresinde katmanlar arası soyulma (delaminasyon) mekanizmasını tetiklediği düşünülmektedir. Buna karşın, kesme hızının artırılmasıyla talaş kaldırma sürecinde oluşan ısının yükseldiği, bunun da PLA'nın lokal olarak yumuşamasına neden olarak, malzemenin kesici takım etkisine karşı daha az direnç göstermesine ve dolayısıyla delaminasyonun azalmasına yol açtığı değerlendirilmiştir.

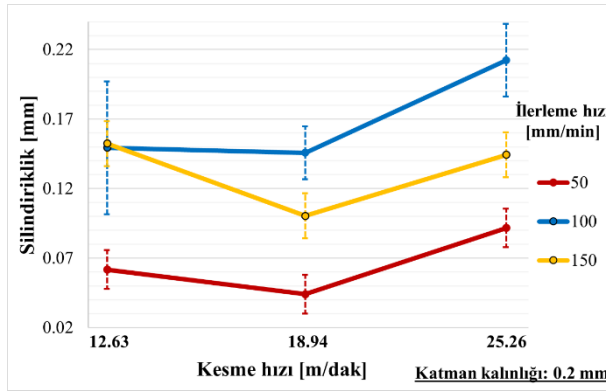
Öte yandan, yüksek ilerleme hızı, talaş kaldırma süresini kısaltmasına rağmen, takımın iş parçasına uyguladığı talaş yükünü ve itme kuvvetlerini artırmakta; bu da delaminasyon oluşumunu tekrar artırmaktadır. Bu bağlamda, yüksek kesme hızı ile sağlanan termal yumuşama ve düşük ilerleme hızı ile minimize edilen mekanik yük birleştiğinde, en düşük delaminasyon seviyesinin bu parametre kombinasyonlarında sağlanabileceği düşünülmektedir. Bu bulgu, optimal delik kalitesi için ısıl ve mekanik etkilerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.



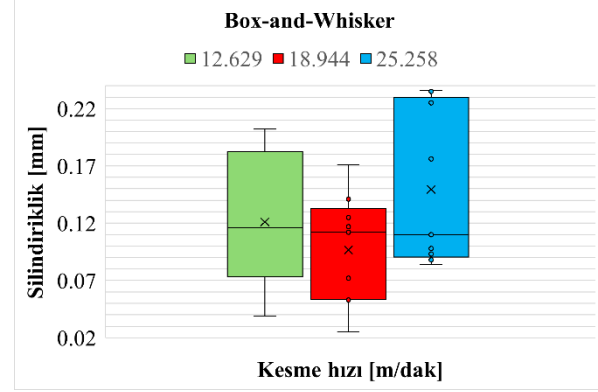
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5. Silindiriklik değerinin delme parametrelerine bağlı değişimi. a) ilerleme hızına bağlı çizgi grafiği, b) ilerleme hızına bağlı box-and-whisker grafiği, c) kesme hızına bağlı çizgi grafiği, d) kesme hızına bağlı box-and-whisker grafiği.

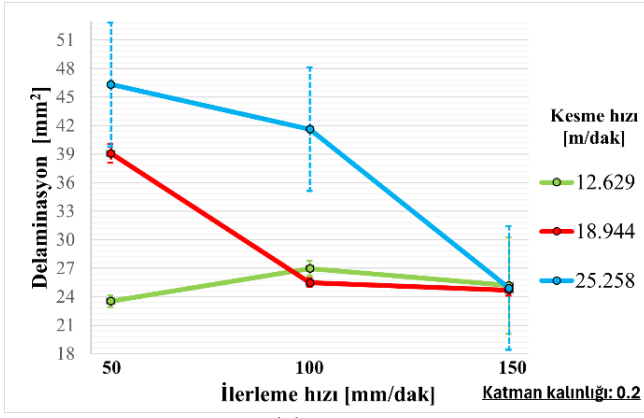
Tablo 5. Delaminasyon değeri için uygulanan çok yönlü ANOVA sonuçları.

Delaminasyon	Karelerin toplamı	Ortalamaların karekökü	F değeri	p değeri
Model	1876.38	234.55	31.29	< 0.0001
İlerleme hızı (B)	586.6	293.3	39.13	< 0.0001
Kesme hızı (C)	705.84	352.92	47.08	< 0.0001
B&C	583.94	145.99	19.48	< 0.0001

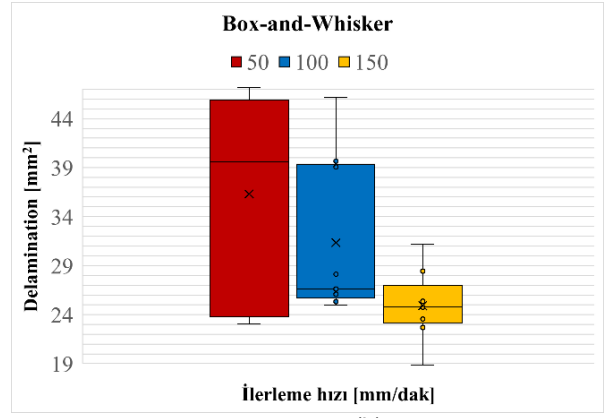
Deneyde kullanılan bağımsız değişkenlerin tamamının, yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, parametrelerin ikili kombinasyonlar halinde (örneğin A×C ve B×C) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin de istatistiksel olarak anlamlı bulunması, bu değişkenlerin birbirleriyle bağımlı bir şekilde etki gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Analiz sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en yüksek etkiye sahip değişkenin katman kalınlığı olduğu görülmüştür. Bu bulgu, EYM yöntemiyle üretilen parçalarda katman kalınlığına

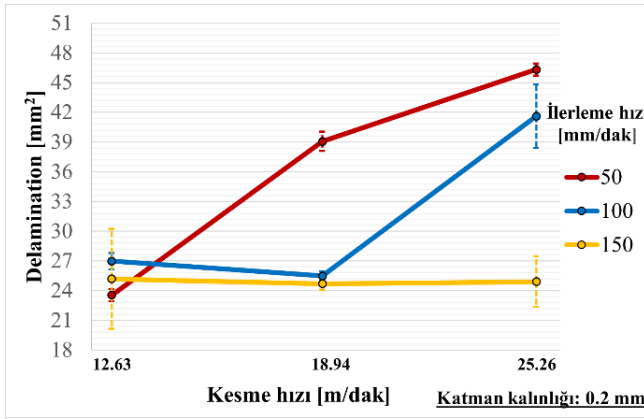
bağlı olarak yüzeyde oluşan basamak (stair-stepping) dokularının pürüzlülük üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle A×C (katman kalınlığı × kesme hızı) ve B×C (ilerleme hızı × kesme hızı) etkileşimlerinin anlamlılığı dikkate alındığında, yüzey pürüzlülüğünün yalnızca tek bir parametreye değil, katman kalınlığı ile talaşlı işleme parametrelerinin birlikte optimize edilmesine duyarlı olduğu söylenebilir (Tablo 6). Bu durum, yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için çok değişkenli optimizasyon yaklaşımlarının gerekliliğine işaret etmektedir.



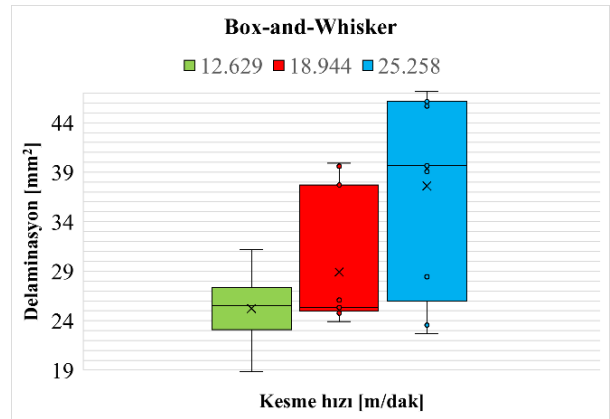
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6. Delaminasyon değerinin delme parametrelerine bağlı değişimi. a) ilerleme hızına bağlı çizgi grafiği, b) ilerleme hızına bağlı box-and-whisker grafiği, c) kesme hızına bağlı çizgi grafiği, d) kesme hızına bağlı box-and-whisker grafiği.

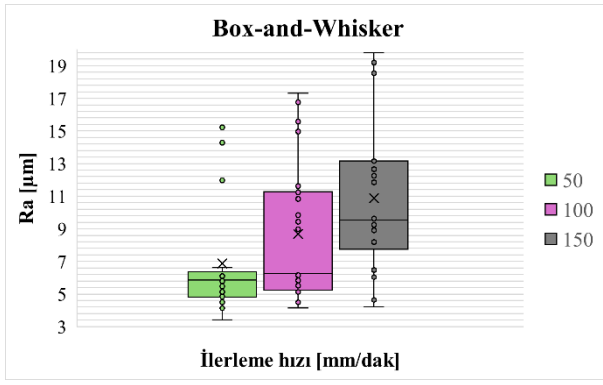
Tablo 6. Yüzey pürüzlülüğü değeri için uygulanan çok yönlü ANOVA sonuçları.

Ra	Karelerin toplamı	Ortalamaların karekökü	F değeri	p değeri
Model	1183.83	65.77	10.90	< 0.0001
Katman kalınlığı (A)	154.77	77.39	12.83	< 0.0001
İlerleme hızı (B)	107.60	53.80	8.92	0.0005
Kesme hızı (C)	94.71	47.36	7.85	0.0011
A&B	158.25	39.56	6.56	0.0002
A&C	285.06	71.27	11.82	< 0.0001
B&C	265.89	66.47	11.02	< 0.0001

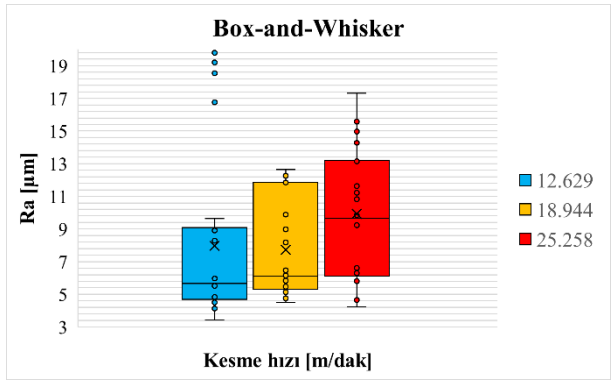
Rz	Karelerin toplamı	Ortalamaların karekökü	F değeri	p değeri
Model	23512.10	1306.23	6.85	< 0.0001
Katman kalınlığı (A)	3141.74	1570.87	8.24	0.0008
İlerleme hızı (B)	1340.12	670.06	3.51	0.0372
Kesme hızı (C)	3032.95	1516.47	7.95	0.0010
A&B	3276.99	819.25	4.30	0.0045
A&C	5348.87	1337.22	7.01	0.0001
B&C	4828.01	1207.00	6.33	0.0003

İlgili veriler incelendiğinde hem kesme hızı hem de ilerleme hızının artışıyla deliklerin yanall yüzeylerinin pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Fakat standart sapmanın yüksek olması sebebiyle

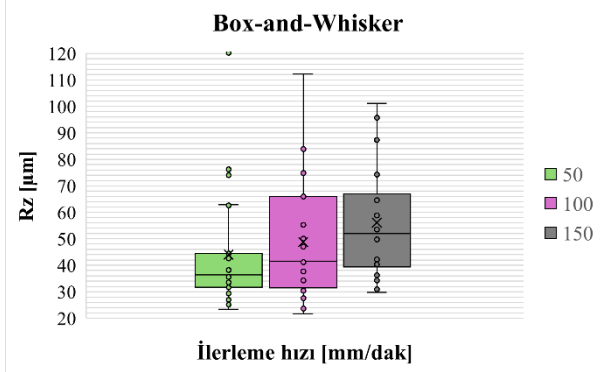
düşük kesme hızı ve düşük ilerleme hızı değerlerinin istikrarlı bir ideal parametre kombinasyonu sağladığı söylenememektedir (Şekil 7).



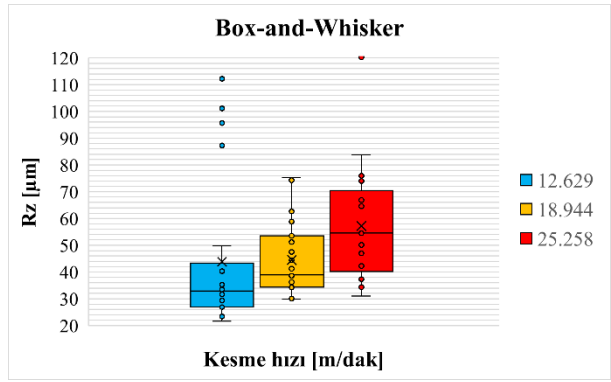
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 7. Yüzey pürüzlülük değerlerinin delme parametrelerine bağlı box-and-whisker grafikleri. a) Ra değerinin ilerleme hızına bağlı grafiği, b) Ra değerinin kesme hızına bağlı box-and-whisker grafiği, c) Rz değerinin ilerleme hızına bağlı grafiği, d) Rz değerinin kesme hızına bağlı box-and-whisker grafiği,

4. SONUÇ

Bu çalışma, EYM yöntemi kullanılarak üretilen PLA plakalarda, baskı katman kalınlığı ve delme parametrelerinin delik çapı sapması, silindiriklik, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü oluşumu üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar Çok Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) kullanılarak analiz edilmiş ve parametrelerin etkileri istatistiksel olarak tartışılmıştır. Sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Katman kalınlığı parametresinin çap sapmasına etkisi istatistiksel olarak etkisizdir. Çap sapması üzerinde büyük oranda kesme hızı parametresi etkindir.
- Silindiriklik değeri üzerinde en etkili parametre açıkça ilerleme hızıdır.
- Delaminasyon seviyeleri incelendiğinde hem kesme hem de ilerleme hızı parametrelili birbirlerine bağımlı olarak ikili etkiye sahiptir. Parametrelerin etki dereceleri birbirlerine benzerdir.

- Katman kalınlığı-işleme parametresi etkileşiminin (A&C, A&B) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki payı oldukça yüksektir. Bu sebeple yüzey pürüzlülüğü bir kalite etkeni olarak esas alınığında katman kalınlığı ile delme parametreleri birlikte birbirine bağımlı bağımsız değişkenler olarak değerlendirilmelidir.
- Çalışmada uygulanan seviyeler nezdinde, yüksek kesme hızının EYM ile üretilmiş polimer parçaların delinmesinde hem boyutsal doğruluğu hem de pürüzlülüğü iyileştirmektedir.
- Boyutsal doğruluk, silindiriklik, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü etkenleri birlikte ele alındığında düşük katman kalınlığı (0.1 mm), yüksek kesme hızı (18 veya 25 m/dak) ve düşük ilerleme hızı değerleri (50 veya 100 mm/dak) kombinasyonu önerilebilmektedir.
- EYM ile üretilen parçaların delinmesinde önerilen "ince katman + hızlı kesme + orta ilerleme hızı" stratejisiyle delik kalitesi iyileştirilebilir ve ardıl işlem ihtiyacı azaltılabilir.

Ayrıca çalışma nihayetinde EYM ile üretilen parçaların delinmesine yönelik takım yükleri gibi mekanik, polimerin yumuşamasını sebebiyet verdiği düşünüldüğün için ısı ve uygulanan katman

kalınlığının merdiven etkisi sebebiyle yüzey pürüzlülüğünü etkilediği düşünüldüğü için geometrik bileşenleri bir bütün olarak değerlendiren kapsamlı bir model üzerinde çalışılabileceği önerilmektedir.

INFLUENCE OF LAYER THICKNESS AND CUTTING-PARAMETER SETTINGS ON HOLE QUALITY WHEN DRILLING FDM-PRINTED PLA PARTS

Due to its biodegradable nature and ease of processing, PLA is widely used Material Extrusion Based Additive Manufacturing (MEX). However, final parts often require post-processing, particularly drilling, to improve surface finish and dimensional accuracy. This study investigates the influence of layer thickness, cutting speed, and feed rate on hole diameter deviation, cylindricity, delamination, and surface roughness in drilled PLA plates. Results show that cutting speed primarily affects hole accuracy, while feed rate has a significant impact on cylindricity. Delamination is strongly influenced by both parameters. Optimal performance is achieved using a low layer thickness, high cutting speed, and moderate feed rate combination.

Keywords: Additive Manufacturing, Fused Deposition Modelling, Polylactic acid (PLA), Drilling, Process Optimisation.

KAYNAKLAR

1. Shogren, R. L., Doane, W. M., Garlotta, D., Lawton, J. W., & Willett, J. L. (2003). "Biodegradation of starch/polylactic acid/poly(hydroxyester-ether) composite bars in soil." *Polymer Degradation and Stability*, 79(3), 405-411
2. Bajpai, P. K., Singh, I., & Madaan, J. (2012). "Tribological behavior of natural fiber reinforced PLA composites." *Wear*, 296(1-2), 395-398
3. Garlotta, D. (2001). "A Literature Review of Poly(Lactic Acid)." *Journal of Polymers and the Environment*, 9(2), 63-84. DOI: 10.1023/A:1020200822435.
4. A. Doğru, A. Sözen, M. Ö. Seydibeyoğlu, and G. Neşer, "Hemp Reinforced Polylactic Acid (PLA) Composite Produced By Fused Filament Fabrication (FFF)", *HJBC*, vol. 50, no. 3, pp. 239–246, 2022, doi: 10.15671/hjbc.1032298.
5. A. Sözen, A. Doğru, M. Demir, H. N. Özdemir, and Y. Seki, "PRODUCTION OF WASTE JUTE DOPED PLA (POLYLACTIC ACID) FILAMENT FOR FFF: EFFECT OF PULVERIZATION", *IJ3DPTDI*, vol. 7, no. 1, pp. 124–128, 2023, doi: 10.46519/ij3dptdi.1213659.

6. A. Doğru, S. Yılcıoğlu, G. Ülkü, B. Şentürk Turan, and M. Ö. Seydibeyoğlu, "Comparison of wood fiber reinforced PLA matrix bio-composites produced by Injection Molding and Fused Filament Fabrication (FFF) methods", *HJBC*, vol. 50, no. 3, pp. 215–226, 2022, doi: 10.15671/hjbc.1053764.
7. Mohammad Baraheni, Mohammad Reza Shabgard, Saeid Amini, Evaluating the hole quality produced by vibratory drilling: additive manufactured PLA+, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2021) 117:785–794
8. N.S. Mohan et al. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials, *Journal of Materials Processing Technology* 186 (2007) 265–271
9. Hossein Heidarya, Navid Zarif Karimib , Giangiacomo Minak, Investigation on delamination and flexural properties in drilling of carbon nanotube/polymer composites, *Composite Structures* 201 (2018) 112–120
10. Madhan Kumar and K. Jayakumar, Mechanical and drilling characterization of biodegradable PLA particulate green composites, *JOURNAL OF THE CHINESE INSTITUTE OF ENGINEERS*, 2022, VOL. 45, NO. 5, 437–452, <https://doi.org/10.1080/02533839.2022.2061602>
11. Antonio Díaz-A´lvarez, A´ngel Rubio-Lo´pez, Carlos Santiuste and Mari´a Henar Migue´lez, Experimental analysis of drilling induced damage in biocomposites, *TextileResearchJournal*88(22)
12. Leonardo Riva, Roberto Pagani, Antonio Fiorentino, Alberto Borboni, Additive manufacturing of PLA to mimic the thrust force of mandibular bone during drilling, *Procedia CIRP* 110 (2022) 198–201
13. Masannan, V.; Anbalagan, C.; Lakshmaiya, N.; Kumar, P. Experimental Investigation on the Drilling Characteristics of Kenaf/PLA-Based Laminates. *Eng. Proc.* 2024, 61, 9. <https://doi.org/10.3390/engproc2024061009>
14. F. Carrasco, P. Pagès, J. Gámez-Pérez, O.O. Santana, M.L. Maspoch, Processing of poly(lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability* 95 (2010) 116e125.
15. Racha Al-Itry, Khalid Lamnawar, Abderrahim Maazouz, Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy. *Polymer*

- Degradation and Stability Volume 97, Issue 10, October 2012, Pages 1898-1914
16. Bajpai, P. K., Singh, I., & Madaan, J. "Tribological behavior of natural fiber reinforced PLA composites." *Wear* Volume 297, Issues 1–2, 15 January 2013, Pages 829-840]
 17. El Mehtedi, M., Cristofolini, L., La Vecchia, G. M., & Minetola, P. (2024). Evaluation of surface quality and burr formation in hybrid manufacturing of polymeric components. *Journal of Composites Science*, 8(4), 131. <https://www.mdpi.com/2504-4494/8/4/131>
 18. Hsueh, M.-H.; Lai, C.-J.; Chung, C.-F.; Wang, S.-H.; Huang, W.-C.; Pan, C.-Y.; Zeng, Y.-S.; Hsieh, C.-H. Effect of Printing Parameters on the Tensile Properties of 3D-Printed Polylactic Acid (PLA) Based on Fused Deposition Modeling. *Polymers* 2021, 13, 2387. <https://doi.org/10.3390/polym13142387>].
 19. Muammel M. Hanon, László Zsidai, Quanjin Ma, Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors, *Materials Today: Proceedings*, Volume 42, Part 5, 2021, Pages 3089-3096
 20. Krishnamoorthy A, Boopathy S, Rajendra, Palanikumar K (2009) Delamination analysis in drilling of CFRP composites using response surface methodology. *J Compos Mater* 43(24):2885–2902
 21. Davim PJ, Rubio CJ, Abrao AM (2007) A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Compos Sci Technol* 67(9):1939–1945
 22. Shokrieh M, Kamali M (2005) Theoretical and experimental studies on residual stresses in laminated polymer composites. *J Compos Mater* 39(24):2213–2225
 23. Shtuchnyi BP (1974) *Plastics machining. Reference manual.* Mashynostroyeniye, Moscow, p 144