

Makine Öğrenmesi Modelleri Kullanılarak Eriyik Yığıma Modellemesi Süreçlerinde Enerji Verimliliğine Yönelik Parametre Optimizasyonu

Mehmet Şah GÜLTEKİN^{1,a}, Cüneyt ÖZDEMİR^{2,b}

¹Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Siirt, Türkiye

²Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-1251-9219; ^bORCID: 0000-0002-9252-5888

Makale Bilgileri

Geliş : 04.01.2026

Kabul : 31.08.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1855791

Sorumlu Yazar

Mehmet Şah GÜLTEKİN

mehmetsahgultekin@siirt.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Eklmeli imalat

FDM

Makine öğrenmesi

Optimizasyon

PLA

Atf şekli: GÜLTEKİN, M.Ş., ÖZDEMİR, C., (2026). Makine Öğrenmesi Modelleri Kullanılarak Eriyik Yığıma Modellemesi Süreçlerinde Enerji Verimliliğine Yönelik Parametre Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 623-634.

ÖZ

Eklmeli imalat teknolojilerinin endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşması, üretim süreçlerinde enerji verimliliğini sürdürülebilir üretim açısından kritik bir araştırma alanı hâline getirmiştir. Bu çalışma, FDM (Fused Deposition Modeling) yöntemiyle gerçekleştirilen üç boyutlu baskı süreçlerinde enerji tüketiminin tahmin edilmesine yönelik makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım önermektedir. Çalışmada farklı baskı hızları, nozul sıcaklıkları, doluluk oranları ve katman kalınlıkları kullanılarak PLA numuneler üretilmiş; üretim sırasında enerji tüketimi gerçek zamanlı olarak dijital wattmetre ile ölçülmüştür. Elde edilen veriler Random Forest ve XGBoost algoritmaları kullanılarak analiz edilmiş ve baskı parametrelerinin enerji tüketimi üzerindeki etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, doluluk oranı ve nozul sıcaklığının enerji tüketimini belirleyen en etkili parametreler olduğunu, baskı hızının ise enerji tüketimi üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Geliştirilen tahmin modelleri, üretim öncesinde enerji tüketiminin yüksek doğrulukla öngörülmesine olanak sağlamış ve optimum süreç parametrelerinin belirlenmesine katkı sunmuştur. Gerçek zamanlı deneysel ölçümlere dayalı olarak geliştirilen bu yaklaşım, FDM süreçlerinde enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik karar destek mekanizmalarının geliştirilmesine katkı sağlayarak sürdürülebilir eklmeli imalat uygulamaları için bilimsel bir temel sunmaktadır.

Parameter Optimization for Energy Efficiency in Fused Deposition Modeling Using Machine Learning Models

Article Info

Received : 04.01.2026

Accepted : 31.08.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1855791

Corresponding Author

Mehmet Şah GÜLTEKİN

mehmetsahgultekin@siirt.edu.tr

Keywords

Additive manufacturing

FDM

Machine learning

Optimization

PLA

How to cite: GÜLTEKİN, M.Ş., ÖZDEMİR, C., (2026). Parameter Optimization for Energy Efficiency in Fused Deposition Modeling Using Machine Learning Models. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 623-634.

ABSTRACT

The widespread adoption of additive manufacturing technologies in industrial applications has made energy efficiency a critical research topic for sustainable manufacturing. This study proposes a machine learning-based approach for predicting energy consumption in Fused Deposition Modeling (FDM) three-dimensional printing processes. PLA specimens were fabricated using different printing speeds, nozzle temperatures, infill densities, and layer thicknesses, while energy consumption during the printing process was measured in real time using a digital power meter. The collected data were analyzed using the Random Forest and XGBoost algorithms to statistically evaluate the effects of printing parameters on energy consumption. The results revealed that infill density and nozzle temperature were the most influential factors affecting energy consumption, while printing speed also had a significant impact on the overall energy demand. The developed prediction models enabled highly accurate estimation of energy consumption prior to production and facilitated the identification of optimal process parameters. Based on real-time experimental measurements, the proposed approach contributes to the development of decision-support mechanisms for improving energy efficiency in FDM processes and provides a scientific foundation for sustainable additive manufacturing applications.

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat teknolojileri son yıllarda tasarım özgürlüğü, kişiselleştirilebilir üretim olanağı ve malzeme kullanımındaki verimlilik gibi avantajlar nedeniyle endüstriyel uygulamalarda hızla yaygınlaşmıştır [1,2]. Bu teknolojilerin artan kullanımı, üretim süreçlerinin sürdürülebilirlik boyutunun daha fazla önem kazanmasına yol açmış; özellikle enerji tüketiminin doğru modellenmesi ve optimize edilmesi, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de üretim verimliliğinin artırılması açısından kritik bir araştırma alanı hâline gelmiştir [3,4].

Fused Deposition Modeling (FDM) yöntemi, yaygın kullanımına karşın enerji tüketimini etkileyen çok sayıda işlem parametresine sahip karmaşık bir üretim sürecidir. Doluluk oranı, baskı hızı, nozul sıcaklığı ve katman kalınlığı gibi parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki bireysel ve etkileşimli etkilerinin ayrıntılı biçimde anlaşılması, FDM süreçlerinin daha sürdürülebilir yönetilmesi için gereklidir [5-7].

Literatürde enerji verimliliğine yönelik çalışmaların büyük bölümü ya deneysel gözlemlerle sınırlı kalmakta ya da sınırlı parametre setleri üzerinden değerlendirme yapmaktadır. Bununla birlikte, güncel akıllı üretim yaklaşımları gerçek zamanlı veri toplama ve makine öğrenmesi yöntemleriyle desteklenen daha bütüncül modelleme ihtiyaçlarını ortaya koymaktadır [8,9]. Özellikle makine öğrenmesi tabanlı tahmin modellerinin son dönemde artan şekilde enerji tüketimi analizlerinde kullanıldığı görülmektedir [10,11].

Bu bağlamda, FDM süreçlerinde enerji tüketiminin yüksek doğrulukla tahmin edilmesi ve optimum baskı parametrelerinin belirlenmesi, sürdürülebilir üretim stratejilerinin tasarlanmasına önemli katkılar sunmaktadır. Bu çalışma, farklı baskı parametreleri altında üretilen PLA numunelerden elde edilen gerçek zamanlı güç tüketimi verilerini kullanarak enerji tüketiminin makine öğrenmesi tabanlı olarak modellenmesini amaçlamaktadır. Random Forest ve XGBoost algoritmalarının kullanıldığı bu yaklaşım, enerji tüketimini etkileyen kritik değişkenleri belirlemenin yanı sıra üretim öncesinde enerji ihtiyacının öngörülmesine olanak tanıyan pratik bir karar destek mekanizması sunmaktadır [8,9]. Böylece çalışma, FDM süreçlerinin enerji verimliliği açısından optimize edilmesine yönelik literatürdeki mevcut boşluğu doldurmayı ve sürdürülebilir eklemeli imalat uygulamalarına katkı sağlamayı hedeflemektedir [12].

FDM tabanlı eklemeli imalat süreçlerinde yalnızca enerji tüketimi değil, aynı zamanda yüzey kalitesi, boyutsal doğruluk ve mekanik dayanım gibi performans kriterleri de büyük önem taşımaktadır. Baskı parametrelerinde yapılan değişiklikler enerji tüketimini azaltırken yüzey kalitesini veya mekanik özellikleri olumsuz etkileyebileceğinden, optimum baskı koşullarının belirlenmesi çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmaların üretim kalitesini de göz önünde bulundurması gerekmektedir.

FDM süreçlerinde doluluk oranı, nozul sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı gibi işlem parametrelerinin yalnızca enerji tüketimi üzerinde değil, aynı zamanda üretilen parçaların mekanik dayanımı, çekme mukavemeti ve yüzey kalitesi üzerinde de belirleyici etkileri olduğu literatürdeki temel çalışmalarda gösterilmiştir [13,14]. Literatürde PLA'nın yanı sıra ABS, PETG ve yüksek performanslı polimerlerin enerji tüketim profilleri incelenmiş; thermal bed (ısıtıcı tabla) ve ekstrüder güç taleplerinin malzeme türüne göre belirgin farklılıklar gösterdiği bildirilmiştir [15,16]. Enerji tüketiminin tahmin edilmesinde ve parametrelerin etkilerinin analiz edilmesinde Yanıt Yüzey Metodu (YYM), Yapay Sinir Ağları (YSA) ve geleneksel regresyon analizleri sıklıkla kullanılmış; ancak son yıllarda karmaşık, doğrusal olmayan verisetlerinde yüksek başarımla gösteren makine öğrenmesi algoritmaları ön plana çıkmıştır [17,18]. Bununla birlikte, süreç optimizasyonunda yalnızca enerji tasarrufunu değil, üretim süresi ve mekanik performansı eş zamanlı olarak ele alan çok amaçlı (multi-objective) optimizasyon yaklaşımlarının gerekliliği vurgulanmaktadır [19-22,25,26].

Bu bağlamda, bu çalışmanın literatürdeki mevcut araştırmalardan temel özgün yönleri; (i) 1 Hz örnekleme frekansında yüksek çözünürlüklü ve gerçek zamanlı güç ölçümlerine dayanması, (ii) Random Forest ve XGBoost gibi iki güçlü topluluk öğrenme (ensemble) algoritmasını karşılaştırmalı olarak değerlendirmesi ve (iii) yalnızca bir tahmin modeli sunmayıp minimum enerji tüketimini hedefleyen deneysel olarak doğrulanmış bir optimizasyon çerçevesi sunmasıdır. Bu özgün yönleriyle çalışma, gerçek zamanlı ölçüme dayalı, karşılaştırmalı ve deneysel olarak doğrulanmış bir optimizasyon çerçevesi sunarak alana bütüncül bir katkı sağlamaktadır [23,24].

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, FDM (Fused Deposition Modeling) teknolojisiyle üretilen PLA numunelerde enerji tüketiminin tahmin edilmesi ve optimize edilmesine yönelik makine öğrenmesi tabanlı bir yöntem uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar, kontrollü bir laboratuvar ortamında ticari tip bir FDM yazıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Baskı süreci boyunca güç tüketimi, yazıcıya entegre edilen yüksek hassasiyetli bir enerji ölçüm modülü aracılığıyla gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir. Ölçüm sistemi, anlık akım ve gerilim değerlerini 1 Hz örnekleme frekansında kaydederek toplam enerji tüketiminin doğru şekilde hesaplanmasını sağlamıştır.

2.1. Numune Üretimi ve Deney Parametreleri

Deneylerde ticari sınıf PLA filament (1.75 mm) kullanılmıştır. Enerji tüketimini etkileyen dört temel işlem parametresi değerlendirilmiştir Çizelge 1’de parametreler verilmiştir.

Çizelge 1. İşlem parametreleri

Parametre	Sembol	Birim	Aralık
Baskı hızı	v	mm/s	40 – 80
Nozul sıcaklığı	T _n	°C	190 – 220
Doluluk oranı	ρ	%	20 – 80
Katman kalınlığı	t	mm	0.10 – 0.30

Bu parametre kombinasyonlarıyla standart geometriye sahip test numuneleri üretilmiş, her parametre seti üç tekrar ile doğrulanmıştır. Tüm üretimlerde 0.4 mm çapında nozul ve 60 °C tabla sıcaklığı kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar laboratuvar ortamında Creality Ender-3 V3 SE FDM tipi üç boyutlu yazıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Baskı işlemleri boyunca tüm numuneler aynı üretim koşullarında üretilmiş ve deneyler sabit baskı ortamında yürütülmüştür. Deneylerde kullanılan yazıcı ve baskı süreci Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan Creality Ender-3 V3 SE FDM yazıcısı ve baskı süreci

Çalışmada kullanılan Eriyik Yığılma Modellemesi teknolojisinin temel çalışma prensibi ve süreçte enerji tüketen kritik bileşenleri aşağıda açıklanmaktadır. Süreçte filament makarasından beslenen termoplastik malzeme (PLA), ekstrüder mekanizması aracılığıyla ısıtılmış nozula iletilmekte ve erime sıcaklığına ulaştırılarak katman katman yazıcı tablası üzerine serilmektedir. Sisteminde toplam elektriksel güç tüketimi esas olarak üç temel eksendeki step motorların mekanik hareketlerinden, nozuldaki termal ısıtıcı bloğundan ve tabla sıcaklığını sabit tutan ısıtma elemanlarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle baskı hızı,

nozlu sıcaklığı ve katman kalınlığı gibi işlem parametrelerinin doğrudan bu bileşenlerin anlık güç çekimlerini etkilediği görülmektedir [27,28].

Çizelge 2, Creality Ender-3 V3 SE yazıcının teknik özelliklerini özetlemektedir. Yazıcı, 220x220x250 mm'lik geniş bir baskı hacmine sahip olup, FDM (Eritilmiş Biriktirme Modelleme) teknolojisini kullanmaktadır. Cihaz, maksimum 260°C nozul sıcaklığı ve 100°C tabla sıcaklığı kapasitesi sayesinde, PLA, PETG, TPU ve ABS dahil olmak üzere geniş bir filament yelpazesini destekleyebilmektedir. Yazıcının nozul çapı standart olarak 0,4 mm'dir ve baskı hızı normalde 180 mm/s civarında tavsiye edilmektedir.

Çizelge 2. Creality Ender-3 V3 SE yazıcısının teknik özellikleri

Açıklama	Ölçüler / Özellik
Yazıcı modeli	Creality Ender-3 V3 SE
Baskı teknolojisi	FDM (Fused Deposition Modeling)
Baskı hacmi	220 × 220 × 250 mm
Baskı hızı	Maksimum 250 mm/s (önerilen 180 mm/s)
Baskı hassasiyeti	±0,1 mm
Katman kalınlığı	0,10–0,35 mm
Nozul çapı	0,40 mm
Maksimum nozul sıcaklığı	260 °C
Maksimum tabla sıcaklığı	100 °C
Filament çapı	1,75 mm
Desteklenen filamentler	PLA, PETG, TPU, ABS
Güç kaynağı	350 W, 100–240 V AC

Çizelge 3, deneylerde kullanılan Creality Ender-3 V3 SE yazıcısı için Creality Print yazılımında belirlenen temel baskı (dilimleme) parametrelerini göstermektedir. Deneylerde 1,75 mm çapında PLA filament kullanılmıştır. Baskılar sırasında katman kalınlığı, baskı hızı, nozul sıcaklığı ve doluluk oranı deney planına göre değiştirilirken, diğer dilimleme parametreleri tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Böylece enerji tüketimi üzerindeki değişimin yalnızca deneysel faktörlerden kaynaklanması sağlanmıştır.

Çizelge 3. Deneylerde kullanılan dilimleme (slicing) parametreleri

Açıklama	Ölçüler / Özellik
Yazıcı	Creality Ender-3 V3 SE
Dilimleme yazılımı	Creality Print
Malzeme	PLA
Filament çapı	1,75 mm
Nozul çapı	0,40 mm
Katman kalınlığı	0,10–0,30 mm
Baskı hızı	40–80 mm/s
Nozul sıcaklığı	190–220 °C
Tabla sıcaklığı	60 °C
Doluluk oranı	%20–80
Dolgu deseni	Lines
Soğutma fanı	%100
Destek yapısı	Kullanılmadı

Baskı sürecinde enerji tüketimi, **TOGRAT dijital priz tipi wattmetre (220 V, 16 A, 3680 W)** kullanılarak gerçek zamanlı olarak ölçülmüştür. Ölçüm cihazı yazıcı ile şebeke arasına bağlanarak baskı süresince anlık güç (W), gerilim (V), akım (A), frekans (Hz) ve toplam enerji tüketimi (kWh) değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen ölçüm verileri deney sonunda kayıt altına alınmış ve makine öğrenmesi modellerinin eğitim ve doğrulama aşamalarında kullanılmıştır. Ölçüm cihazına ait teknik özellikler Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Deneylerde kullanılan enerji ölçüm cihazının teknik özellikleri

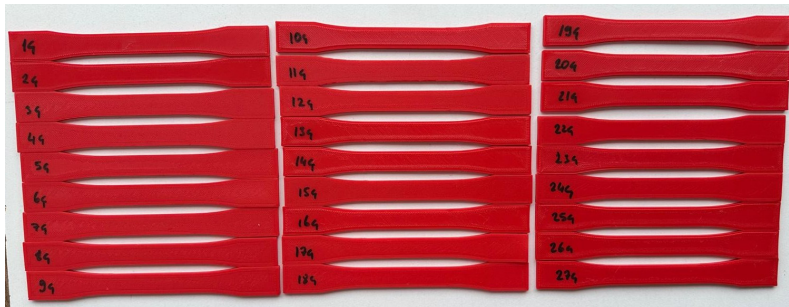
Özellik	Değer
Cihaz	TOGRAT Dijital Priz Tipi Wattmetre
Besleme gerilimi	220–240 V AC
Maksimum akım	16 A
Maksimum güç	3680 W
Frekans	50 Hz
Ölçülen parametreler	Gerilim (V), Akım (A), Güç (W), Enerji Tüketimi (kWh), Enerji Maliyeti
Güç gösterim çözünürlüğü	0,1 W
Ekran tipi	Arka aydınlatmalı LCD
Ölçüm yöntemi	Gerçek zamanlı priz tipi enerji ölçümü

Baskı işlemleri sırasında yazıcının elektriksel güç tüketimi prize bağlanan dijital enerji ölçüm cihazı kullanılarak gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir. Ölçüm cihazı baskı süresince anlık güç değerlerini sürekli olarak izleyerek enerji tüketiminin hesaplanmasında kullanılmıştır. Ölçüm sürecine ait örnek ekran görüntüleri Şekil 2’te verilmiştir.



Şekil 2. TOGRAT dijital wattmetre ile baskı sürecinde gerçekleştirilen gerçek zamanlı enerji tüketimi ölçümleri: (a) baskının başlangıç aşaması, (b) baskı sırasında anlık güç tüketimi

Deney kapsamında her parametre kombinasyonu için PLA çekme test numuneleri üretilmiş ve numuneler deney planına uygun şekilde kodlanmıştır. Üretilen numuneler daha sonra enerji tüketimi analizlerinde ve makine öğrenmesi modellerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Farklı deney koşullarında üretilen numuneler Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. Farklı baskı parametre kombinasyonlarında üretilen PLA çekme test numuneleri

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Veri Toplama ve Ön İşlem

Baskı süreci boyunca, üretimin başlama anından tamamlanmasına kadar geçen süre zarfında yazıcıdan elde edilen anlık güç tüketim verileri yüksek zaman çözünürlüğü ile sürekli olarak kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak her bir numune için toplam enerji tüketimi (Wh) cinsinden hesaplanmıştır. Elde edilen ham veri seti, ölçüm cihazlarından ve çevresel etkilerden kaynaklanabilecek gürültü ve tutarsızlıkları gidermek amacıyla kapsamlı bir ön işleme sürecine tabi tutulmuştur.

Ön işleme aşamasında; ilk olarak anormal değerlerin tespiti ve giderilmesi için istatistiksel eşikleme yöntemleri uygulanmış, ardından veri bütünlüğünü sağlamak amacıyla eksik veri kontrolü gerçekleştirilmiştir. Eksik veya hatalı ölçümlerin bulunması durumunda, bu gözlemler veri setinden çıkarılmış ya da uygun interpolasyon yöntemleri ile düzeltilmiştir. Modelleme sürecinde değişkenler arası ölçek farklılıklarının tahmin performansını olumsuz etkilemesini önlemek amacıyla tüm sürekli değişkenler normalize edilmiştir.

Her bir numune için; toplam üretim süresi, baskı süresince ölçülen anlık güç değerlerinin ortalaması ve toplam enerji tüketimi bağımlı değişkenler kapsamında değerlendirilirken; nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı, baskı hızı, doluluk oranı ve katman kalınlığı gibi baskı parametreleri bağımsız değişkenler olarak modele dâhil edilmiştir. Bu yapı, enerji tüketiminin hem zamansal hem de süreç parametreleriyle olan ilişkisini kapsamlı biçimde incelemeye imkân sağlamıştır.

3.2. Makine Öğrenmesi Modelleri

Enerji tüketiminin doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmesi amacıyla, literatürde regresyon problemlerinde yüksek performans gösterdiği bilinen iki farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır: Random Forest Regressor ve XGBoost Regressor. Bu modeller, doğrusal olmayan ilişkileri ve parametreler arasındaki karmaşık etkileşimleri başarıyla temsil edebilme yetenekleri nedeniyle tercih edilmiştir.

Oluşturulan veri seti, modelin genelleme yeteneğini değerlendirmek amacıyla %80 eğitim ve %20 test verisi olacak şekilde rastgele bölünmüştür. Model performansını en üst düzeye çıkarmak amacıyla, her iki algoritma için de ağaç sayısı, maksimum derinlik, öğrenme oranı ve alt örnekleme oranı gibi temel hiperparametreler grid-search tabanlı hiperparametre optimizasyonu yöntemiyle belirlenmiştir.

Eğitilen modellerin başarımı; determinasyon katsayısı (R^2), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) metrikleri kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, modeller tarafından hesaplanan değişken önem düzeyleri analiz edilerek enerji tüketimi üzerinde en etkili baskı parametreleri belirlenmiş ve bu parametrelerin üretim süreci üzerindeki fiziksel anlamları yorumlanmıştır.

Makine öğrenmesi modellerinin geliştirilmesi, veri ön işleme ve performans değerlendirme süreçleri Python 3.10 programlama dili ortamında scikit-learn (v1.3.0) ve xgboost (v1.7.6) kütüphaneleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Verisetindeki doğrusal olmayan (non-linear) karmaşık ilişkileri ve parametre etkileşimlerini yüksek doğrulukla temsil edebilme yetenekleri, aşırı öğrenmeye (overfitting) karşı dirençli olmaları ve küçük/orta ölçekli veri setlerinde sergiledikleri yüksek genelleme başarısı nedeniyle ensemble (topluluk) öğrenme yöntemlerinden Random Forest Regressor ve XGBoost Regressor algoritmaları tercih edilmiştir.

4. SONUÇLAR

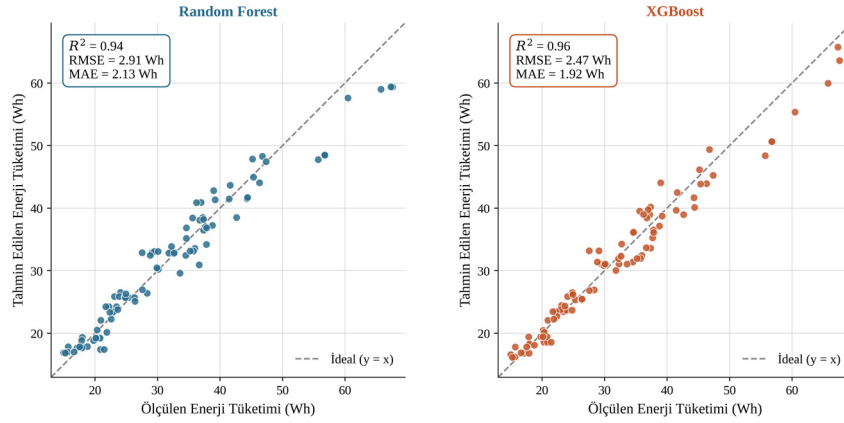
Bu çalışmada farklı baskı parametreleri altında gerçekleştirilen FDM üretimlerinden elde edilen gerçek zamanlı güç ölçümleri analiz edilerek toplam enerji tüketimini etkileyen temel değişkenler belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, FDM süreçlerinde enerji tüketiminin tek bir parametreye bağlı olmadığını; doluluk oranı, nozul sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığının etkileşimli olarak süreci şekillendirdiğini göstermektedir.

Deneyisel veriler üzerinde eğitilen makine öğrenmesi modelleri yüksek tahmin doğruluğu sağlamıştır. Random Forest modeli test verisinde $R^2=0.93$, XGBoost modeli ise $R^2=0.95$ başarı göstermiş; her iki modelde de RMSE değerleri düşük seviyede kalarak enerji tüketiminin güvenilir biçimde tahmin edilebildiğini ortaya koymuştur. Değişken önem analizine göre **doluluk oranı**, enerji tüketimindeki en baskın değişken olarak belirlenmiş; bunu **nozul sıcaklığı** ve **baskı hızı** izlemiştir. Doluluk oranının artmasıyla birlikte toplam enerji tüketiminin doğrusal olmayan bir şekilde yükseldiği, özellikle %60 üzerindeki yoğunluklarda artışın belirginleştiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, yüksek nozul sıcaklığı hem güç gereksinimini artırmakta hem de baskı süresi üzerindeki etkisi nedeniyle toplam enerji tüketimini yükseltmektedir. Modellerin nicel performans karşılaştırması Çizelge 5'te özetlenmiştir.

Çizelge 5. Makine öğrenmesi modellerinin performans karşılaştırması

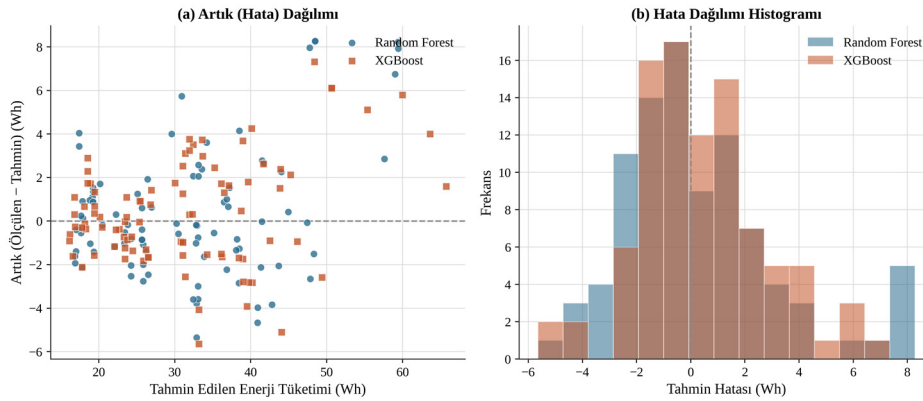
Model	R ² skoru	Hata metriği (RMSE/MAE)	Kullanım amacı
Random forest	0.93	Düşük RMSE	Tahminleme ve Karşılaştırma
XGBoost	0.95	Düşük RMSE	En Yüksek Doğruluk ve Değişken Önem Analizi
Doğrulama (Optimizasyon)	-	MAE < %5	Optimum Parametre Setinin Test Edilmesi

Random Forest ve XGBoost modellerinin test verisi üzerindeki tahmin başarımı Şekil 4'te ölçülen ve tahmin edilen enerji tüketimi değerlerinin karşılaştırıldığı saçılım grafikleriyle görselleştirilmiştir. Veri noktalarının ideal doğru ($y = x$) çevresinde yoğunlaşması modellerin yüksek tahmin doğruluğunu desteklemekte; XGBoost modelinin daha dar bir saçılım sergilemesi Çizelge 5'teki daha yüksek R² ve daha düşük RMSE değerleriyle uyumludur.



Şekil 4. Test verisinde ölçülen ve tahmin edilen enerji tüketiminin karşılaştırması: (a) Random Forest, (b) XGBoost

Modellerin tahmin hatalarının yapısı Şekil 5'te artık dağılımı ve hata histogramı ile incelenmiştir. Artıkların sıfır eksenine çevresinde belirgin bir yanlılık göstermeden dağılması ve hataların sıfır etrafında dar bir bantta yoğunlaşması, her iki modelin de sistematik bir sapma içermeden güvenilir tahminler ürettiğini göstermektedir.



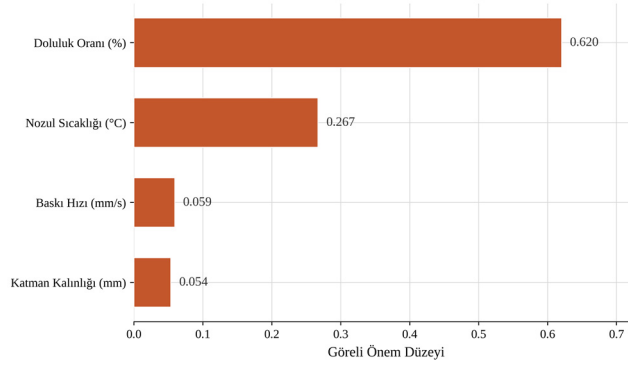
Şekil 5. Makine öğrenmesi modellerinin tahmin hatalarının analizi: (a) artık (ölçülen – tahmin) dağılımı, (b) hata dağılımı histogramı

Baskı hızının enerji tüketimi üzerindeki etkisi ise daha karmaşık bir ilişki göstermiştir. Düşük hızlarda baskı süresinin uzaması enerji tüketimini artırırken, çok yüksek hızlarda nozulun daha fazla güç talep etmesi toplam tüketimi yeniden yükseltmiştir. Bu durum baskı hızında bir **optimum denge noktası** bulunduğunu ortaya koymuştur. Katman kalınlığının artması ise baskı süresini kısalttığı için enerji tüketimini genel olarak azaltma eğilimi göstermiştir. Baskı parametrelerinin enerji tüketimine etkisi ve karakteristik davranışları Çizelge 6'da özetlenmiştir.

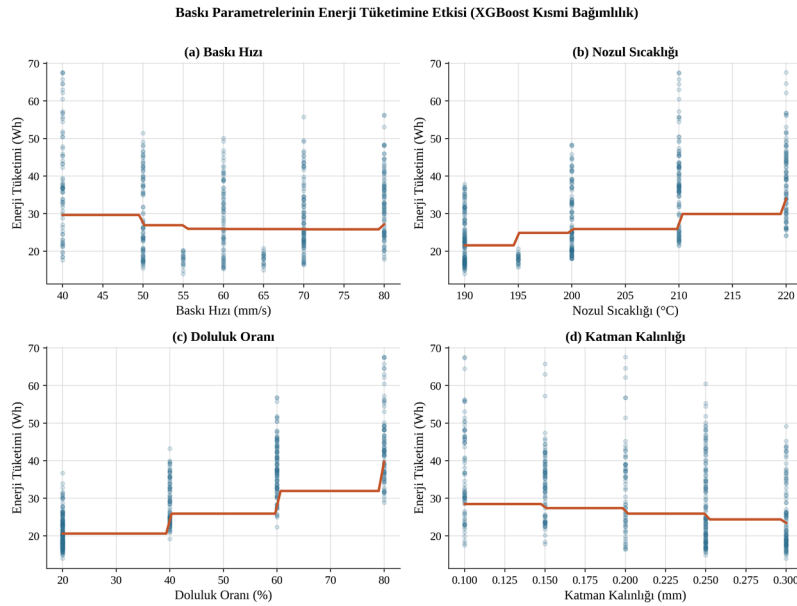
Çizelge 6. Baskı parametrelerinin enerji tüketimine etkisi ve karakteristiği

Baskı parametresi	Enerji tüketimine etkisi	Değişken önem düzeyi	Davranış karakteristiği ve gözlem
Doluluk oranı	Artırır	1. (En yüksek)	Doğrusal olmayan artış; özellikle %60 üzerinde belirgin enerji yükselişi.
Nozul sıcaklığı	Artırır	2. (Yüksek)	Hem anlık güç gereksinimini hem de dolaylı olarak süreci etkileyerek tüketimi artırır.
Baskı hızı	Karmaşık (Optimum denge)	3. (Orta)	Düşük hızlarda süre uzamasıyla, çok yüksek hızlarda ise artan güç talebiyle tüketim artar (U-benzeri davranış).
Katman kalınlığı	Azaltır	4. (Düşük)	Baskı süresini kısalttığı için toplam enerji tüketimini düşürme eğilimindedir.

Baskı parametrelerinin enerji tüketimi üzerindeki göreceli önemi Şekil 6’da XGBoost modelinden elde edilen önem düzeyleriyle görselleştirilmiştir. Doluluk oranının açık ara en baskın değişken olduğu, bunu nozul sıcaklığının izlediği; baskı hızı ve katman kalınlığının ise görece düşük etkiye sahip olduğu görülmektedir.

**Şekil 6.** XGBoost modeline göre baskı parametrelerinin enerji tüketimine göreceli önemi

Parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki bireysel etkileri Şekil 7’deki kısmi bağımlılık eğrileriyle ayrıntılı olarak incelenebilir. Doluluk oranının artmasıyla enerji tüketiminin doğrusal olmayan biçimde ve özellikle %60 üzerinde belirgin şekilde yükseldiği; baskı hızının orta aralıkta minimuma ulaşmış çok yüksek değerlerde yeniden arttığı (U-benzeri davranış); katman kalınlığının artmasının ise baskı süresini kısaltarak toplam tüketimi azalttığı gözlenmektedir.

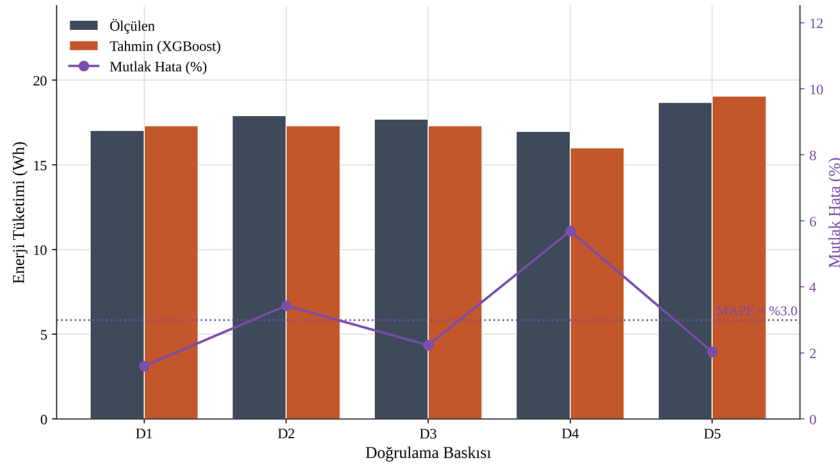
**Şekil 7.** Baskı parametrelerinin enerji tüketimine etkisi (XGBoost kısmi bağımlılık eğrileri): (a) baskı hızı, (b) nozul sıcaklığı, (c) doluluk oranı, (d) katman kalınlığı

Optimizasyon analizleri sonucunda XGBoost modeli kullanılarak minimum enerji tüketimini sağlayan baskı parametreleri belirlenmiştir. Optimum kombinasyonun düşük doluluk oranı, orta seviye baskı hızı ve orta-alt aralıkta nozul sıcaklığı ile elde edildiği tespit edilmiştir. Bu parametre setiyle gerçekleştirilen doğrulama baskılarında model tarafından öngörülen enerji tüketimi ile ölçülen değerler arasında düşük hata oranı ($MAE < 5\%$) görülmüştür. Çizelge 7’de optimum Üretim Parametreleri verilmiştir.

Çizelge 7. Optimum üretim parametreleri

Parametre	Enerji tasarrufu için tespit edilen optimum seviye
Doluluk oranı	%20
Baskı hızı	60 mm/s
Nozul sıcaklığı	200°C
Katman kalınlığı	0.30 mm

Optimum parametre setinin geçerliliği Şekil 8’de sunulan doğrulama baskılarıyla değerlendirilmiştir. Ölçülen ve model tarafından tahmin edilen enerji tüketimi değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve ortalama mutlak yüzde hatanın (MAPE) yaklaşık %3 düzeyinde kalarak %5 hedefinin altında gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 8. Optimum parametrelerle yapılan doğrulama baskılarında ölçülen ve tahmin edilen enerji tüketimi ile mutlak hata (MAPE ≈ %3)

Elde edilen sonuçlar, FDM süreçlerinin enerji verimliliğinin yalnızca tek bir üretim parametresinin değiştirilmesiyle değil, çoklu parametre optimizasyonu ile önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermektedir. Makine öğrenmesi tabanlı yaklaşım, hem üretim öncesi enerji ihtiyacının yüksek doğrulukla tahmin edilmesini sağlamakta hem de sürdürülebilir üretime yönelik karar süreçlerine etkin şekilde katkı sunmaktadır.

Bu çalışmada enerji tüketiminin tahmin edilmesine odaklanılmış olup yüzey pürüzlülüğü veya diğer kalite karakteristikleri deneysel olarak değerlendirilmemiştir. Gelecek çalışmalarda enerji tüketimi ile yüzey kalitesi, mekanik özellikler ve üretim süresinin birlikte ele alınması, optimum baskı parametrelerinin belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

4.1. Tartışma

Bu çalışmada FDM süreçlerinde enerji tüketiminin hem deneysel veriler hem de makine öğrenmesi tabanlı modeller aracılığıyla analiz edilmesi, eklemeli imalatın sürdürülebilirlik boyutuna yönelik önemli bulgular ortaya koymuştur. Sonuçlar, enerji tüketiminin tek bir üretim parametresine indirgenemeyecek kadar karmaşık bir yapıya sahip olduğunu, özellikle doluluk oranı ve nozul sıcaklığı gibi parametrelerin sistem üzerinde baskın rol oynadığını göstermektedir. Literatürde enerji tüketimi çoğunlukla baskı süresi ile ilişkilendirilirken, bu çalışmada doğrudan güç ölçümü yoluyla elde edilen veriler enerji profilinin daha ayrıntılı şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu yönüyle çalışma, gerçek zamanlı sensör tabanlı veri toplamanın enerji analizlerinde sağladığı avantajları vurgulamaktadır.

Random Forest ve XGBoost modellerinin yüksek doğrulukla enerji tüketimini tahmin edebilmesi, FDM süreçlerinde makine öğrenmesinin güçlü bir karar destek aracı olabileceğini ortaya koymaktadır. Literatürde benzer çalışmalar çoğunlukla sınırlı parametre setleri veya teorik tüketim modelleri üzerinden yürütülürken, bu araştırma gerçek üretim koşullarından elde edilen çok boyutlu veri setiyle daha gerçekçi ve pratik bir yaklaşım sunmaktadır. Özellikle XGBoost modelinin değişken önem analizinde doluluk oranını en kritik parametre olarak belirlemesi, önceki araştırmaların doluluk oranının malzeme tüketimi ve mekanik performans üzerindeki etkisine odaklanan bulgularıyla uyumludur; ancak bu çalışma doluluk oranının enerji tüketimi açısından da belirleyici bir faktör olduğunu nicel olarak ortaya koymuştur.

XGBoost modelinin Random Forest Regressor'e kıyasla daha yüksek bir açıklayıcılık katsayısı ($R^2 = 0.95$) ve daha düşük RMSE değeri sunmasının temel nedeni; XGBoost'un gradyan artırma (gradient boosting) altyapısı sayesinde ağaçları sıralı olarak eğitmesi, bir önceki ağacın artık hatalarını (residuals) sonraki adımlarda minimize etmesi ve parametreler arasındaki yüksek boyutlu doğrusal olmayan etkileşimleri daha hassas bir biçimde modelleyebilmesidir.

Baskı hızına ilişkin bulgular, üretim süresi ile güç tüketimi arasındaki doğrusal olmayan dengeyi göstermesi bakımından dikkat çekicidir. Literatürde bazı çalışmalar hızın yalnızca baskı süresini etkilediğini ileri sürerken, bu çalışmada yüksek hızlarda nozulun artan güç talebi nedeniyle toplam enerji tüketiminin yeniden yükseldiği görülmüştür. Bu durum, enerji verimliliği odaklı süreç optimizasyonunda hız parametresinin hem termal hem de mekanik yüklerle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın bir diğer önemli katkısı, optimum üretim parametrelerinin makine öğrenmesi modelleri kullanılarak belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlar, minimum enerji tüketimi açısından tek bir ideal parametre yerine çoklu değişkenlerin dengeli şekilde optimize edildiği bir kombinasyonun gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, gelecekte enerji verimliliği odaklı akıllı üretim sistemlerinin tasarlanması için kullanılabilir.

Bununla birlikte çalışma bazı sınırlılıklara da sahiptir. Analizler yalnızca PLA malzemesi ve belirli bir FDM yazıcı üzerinde gerçekleştirilmiştir; farklı malzemeler veya yazıcı mimarileri için enerji tüketim profilleri değişebilir. Ayrıca, çevresel koşullar (ortam sıcaklığı, fan verimi, güç kaynağı tipi) gibi ek faktörlerin modele dahil edilmesi daha kapsamlı tahmin performansı sağlayabilir. Gelecek çalışmalarda farklı malzeme türleri, daha geniş parametre aralıkları ve derin öğrenme tabanlı modellerin kullanılması enerji tahminlerinin genellenabilirliğini artıracaktır.

Bu çalışmada temel amaç baskı parametreleri ile enerji tüketimi arasındaki ilişkinin makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak modellenmesidir. Bununla birlikte literatürde baskı parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, mekanik dayanım ve boyutsal doğruluk üzerinde de önemli etkiler oluşturduğu bilinmektedir. Dolayısıyla enerji tüketimini minimize eden parametre kombinasyonlarının üretim kalitesi açısından da değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda enerji tüketimi ile yüzey pürüzlülüğü, mekanik performans ve baskı süresi birlikte ele alınarak çok amaçlı optimizasyon modelleri geliştirilebilir.

Genel olarak çalışma, FDM süreçlerinin enerji verimliliğinin makine öğrenmesi ile modellenmesine yönelik literatürdeki boşluğu doldurmakta; sürdürülebilir eklemeli imalat uygulamaları için hem teorik hem de pratik anlamda önemli bir katkı sunmaktadır.

5. GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen bulgular, FDM süreçlerinde enerji tüketiminin modellenmesine yönelik önemli katkılar sunmakla birlikte, konunun daha geniş bir çerçevede ele alınabilmesi için gelecekte yapılabilecek araştırmalara da ışık tutmaktadır. Bu kapsamda aşağıdaki geliştirme alanları önerilmektedir:

Çalışma yalnızca PLA malzemesi ile sınırlı olduğundan, ABS, PETG, kompozit dolgulu filamentler veya yüksek sıcaklık dayanımlı mühendislik polimerlerinin enerji tüketim profillerinin analiz edilmesi genellenabilirliği artıracaktır. Kartesyen, CoreXY veya Delta tipi 3D yazıcılar farklı hareket sistemlerine sahiptir ve enerji tüketimi açısından değişkenlik gösterebilir. Farklı yazıcı mimarilerinin karşılaştırılması gelecekteki modellerin daha geniş kapsamlı olmasını sağlayacaktır. Nozul ve tabla ısıtma dinamikleri, fan

hızları, hız ivme–yavaşlama profilleri, ekstrüzyon akış hızı gibi ek parametrelerin modele dahil edilmesi enerji tüketiminin daha ayrıntılı şekilde açıklanmasına katkı sağlayabilir.

Makine öğrenmesi modellerinin yazıcı kontrol yazılımına entegre edilerek üretim sırasında anlık enerji tahmini ve otomatik parametre ayarı yapan akıllı bir geri besleme mekanizması geliştirilebilir. Özellikle LSTM, GRU veya derin regresyon modellerinin zaman serisi şeklindeki güç verilerini işlemesi, enerji tahmin performansını artırabilir. Enerji tüketiminin yanı sıra yüzey kalitesi, mekanik dayanım ve baskı süresi gibi performans kriterlerini birlikte optimize eden çok amaçlı (multi-objective) optimizasyon algoritmalarının uygulanması daha kapsamlı çözümler sunacaktır. Enerji tüketimi verilerinin karbon ayak izi hesaplamaları, maliyet analizi ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ile birleştirilmesi, eklemeli imalatın çevresel etkilerine yönelik daha bütüncül değerlendirmeler yapılmasını sağlayabilir.

Bu öneriler doğrultusunda yapılacak çalışmalar, FDM ve diğer eklemeli imalat teknolojilerinde enerji verimliliğinin daha kapsamlı modellenmesine ve sürdürülebilir üretim stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

1. Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* (2nd ed.). Springer.
2. Sürmen, H.K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
3. Enemuoh, E.U., Menta, V.G., Abutunis, A., O'Brien, S., Kaya, L.I. & Rapinac, J. (2021). Energy and eco-impact evaluation of fused deposition modeling and injection molding of polylactic acid. *Sustainability*, 13(4), Article 1875.
4. Ulkir, O. (2023). Energy-consumption-based life cycle assessment of additive-manufactured products with different types of materials. *Polymers*, 15(6), Article 1466.
5. Griffiths, C. A., Howarth, J., De-Almeida-Rowbotham, G., Rees, A. & Kerton, R. (2016). A design of experiments approach for the optimisation of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing. *Journal of Cleaner Production*, 139, 74-85.
6. Öztürk, O., Şen, M.A. & Aydın, M. (2024). The influence of fused filament fabrication parameters on the fracture behavior of PLA specimens considering energy consumption. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 12(2), 451-464.
7. Kamer, M.S., Temiz, Ş. & Kaya, A. (2023). Determination of energy consumption during the tensile test sample production in 3D printer working with the fused deposition modeling method. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(3), 1998-2007.
8. Aktepe, E. & Ergün, U. (2025). Machine learning approaches for FDM-based 3D printing: A literature review. *Applied Sciences*, 15(18), Article 10001.
9. El-Youbi El Idrissi, M.A., Laaouina, L., Jeghal, A., Tairi, H. & Zaki, M. (2023). Modeling of energy consumption and print time for FDM 3D printing using multilayer perceptron network. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(4), Article 128.
10. Qin, J., Liu, Y. & Grosvenor, R. (2018). Multi-source data analytics for AM energy consumption prediction. *Advanced Engineering Informatics*, 38, 840-850.
11. Camposeco-Negrete, C. (2020). Optimization of printing parameters in fused deposition modeling for improving part quality and process sustainability. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(7-8), 2131-2147.
12. Yang, W., Liu, Y., Chen, J., Chen, Y. & Shang, E. (2024). Process-based modeling of energy consumption for multi-material FDM 3D printing. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, 1, 190-202.
13. Kechagias, J. D. & Vidakis, N. (2022). Parametric optimization of material extrusion 3D printing process: an assessment of Box-Behnken vs. full-factorial experimental approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(5), 3163-3172.
14. Chacon, J.M., Caminero, M.A., Garcia-Plaza, E. & Nunez, P.J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of part orientation, layer thickness and infill level on mechanical properties. *Materials & Design*, 124, 143-157.

15. Petousis, M., Michailidis, N., Papadakis, V.M., Korlos, A., Mountakis, N., Argyros, A., ... & Vidakis, N. (2023). Optimizing the rheological and thermomechanical response of acrylonitrile butadiene styrene/silicon nitride nanocomposites in material extrusion additive manufacturing. *Nanomaterials*, 13(10), 1588.
16. Mecheter, A. & Tarlochan, F. (2023). Fused filament fabrication three-dimensional printing: assessing the influence of geometric complexity and process parameters on energy and the environment. *Sustainability*, 15(16), 12319.
17. Elmenshaw, S.E., Mahmoud, D., Aly, M.H. & Backar, S. (2026). Optimization of fused deposition modelling (FDM) spline quality characteristics using plan do check act (PDCA) and Taguchi. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 1(79), 1105-1116.
18. Mustafa, M.S., Zafar, M.Q., Muneer, M.A., Arif, M., Siddiqui, F.A. & Javed, H.M.A. (2020). Process parameter optimization in fused deposition modeling (FDM) using response surface methodology (RSM). *Res. Sq*, 19.
19. Yang, J., Wang, F., Dun, Y., Huang, Z., Zhang, A. & Liu, Y. (2024). Prediction-based multi-objective optimization method for 3D printing resource consumption. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134(3), 1805-1843.
20. Naser, A. Z., Defersha, F., Xu, X. & Yang, S. (2026). A hybrid machine learning–genetic algorithm approach to multi-criteria sustainable optimization of additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 143(3), 1389-1408.
21. Murat, D., Mustafa, S., Uguz, A. & Cakir, M.C. (2026). Optimizing process parameters of FDM-printed PLA components using a combined Taguchi-CRITIC-VIKOR Approach. *Journal of Engineering Sciences*, 13(1), A19.
22. Fulkerson, O., Inman, E., Rane, A., Noori, H., Deep, A. & Ramesh, S. (2024). Multi-objective Bayesian optimization of fused filament fabrication parameters for enhanced specific fracture energy in PLA-carbon fiber composites. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 10(1), 2395089.
23. Gültekin, M.Ş. (2026). Prediction of tensile strength of PLA parts produced with FDM using Taguchi L27, ANOVA, and large-scale machine learning models and optimal parameter design. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 08927057261429023.
24. Gültekin, M.Ş. & Özdemir, C. (2026). Optimization of flexural strength of PLA flexural test specimens produced by FDM using Taguchi L27 orthogonal array and hybrid regression model. *Journal of Polymer Science*, 64(10), 2122-2137.
25. Kamer, M.S., Doğan, O., Temiz, Ş. ve Yaykaşlı, H. (2021). 3 Boyutlu yazıcı ile farklı yazdırma parametreleri kullanılarak üretilen eğme test numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 835-846.
26. Kaveloğlu, S., Temiz, Ş., Doğan, O. ve Kamer, M.S. (2022). 3 boyutlu yazıcı ile üretilen farklı hücre çaplarındaki bal peteği sandviç yapıların eğme dayanımlarının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(2), 459-470.
27. Boztepe, M.H. (2025). Investigation of tensile strength in 3D printed PLA+ samples: Influence of raster angle and infill density. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(4), 937-948.
28. Tunçel, O. ve Tutar, M. (2023). EYM ile üretilen YMK yapılı numunelerde kenar genişliğinin basma dayanımı üzerine etkisinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(3), 851-858.