

Eriyik Yığıma Modelleme Yönteminde PLA-CF Kompozitlerinin Yüzey Pürüzlülüğünün ve Boyutsal Doğruluğunun Deneysel Analizi ve Makine Öğrenmesi ile Tahmini

Yunus Kartal¹

Özet

Ekleme imalat teknolojileri, karmaşık geometrilerin hızlı ve düşük maliyetle üretilmesine olanak sağlayarak mühendislik uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu teknolojiler arasında yer alan eriyik yığıma biriktirme (EBM) yöntemi, özellikle polimer ve polimer esaslı kompozit malzemelerin üretiminde en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Ancak EBM yöntemi ile üretilen parçaların yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluğu, üretim parametrelerinden önemli ölçüde etkilenmektedir.

Bu çalışmada karbon fiber takviyeli polilaktik asit (PLA-CF) kompozit polimeri kullanılarak EBM yöntemi ile farklı üretim parametrelerinin numunelerin kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmada dört farklı katman kalınlığı (0.1, 0.15, 0.2 ve 0.25 mm) ve dört farklı nozul sıcaklığı (220, 225, 230 ve 235 °C) kullanılarak toplam 16 adet numune üretilmiştir. 30 × 50 × 3 mm boyutlarında üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri farklı yüzey bölgelerinden alınan on ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Boyutsal doğruluk ise numunelerin nominal ölçüleri ile gerçek ölçümleri arasındaki fark hesaplanarak değerlendirilmiştir.

Deneysel sonuçlar incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülük değerinin 0.1 mm katman kalınlığı ve 225 °C nozul sıcaklığında elde edildiği ve bu değer 0.78 µm olduğu belirlenmiştir. Katman kalınlığının artması ile yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca nozul sıcaklığının 230 °C değerine kadar yüzey kalitesini iyileştirdiği, bu değer üzerinde ise yüzey kalitesinin olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir. En yüksek yüzey

1 Doktor öğretim üyesi, Kırıkkale Üniversitesi, y.kartal@kku.edu.tr, 0000-0002-5102-7655

pürüzlülük değeri ise 0.25 mm katman kalınlığı ve 235 °C nozul sıcaklığında 6.67 μm olarak ölçülmüştür.

Elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk verileri ayrıca makine öğrenmesi algoritmalarının performansını değerlendirmek amacıyla veri seti olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda farklı makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin performansları karşılaştırılarak en uygun algoritmanın belirlenmesi amaçlanmıştır.

1. Giriş

Ekllemeli imalat teknolojileri son yıllarda üretim sektöründe önemli bir dönüşüm oluşturmuş ve geleneksel üretim yöntemlerine alternatif olarak geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bu teknolojiler arasında yer alan eriyik yığıma modelleme (EBM) yöntemi, düşük maliyetli ekipman gereksinimi ve kullanım kolaylığı sayesinde en yaygın kullanılan ekllemeli imalat tekniklerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Ceylan ve ark., 2024).

EBM yöntemi, termoplastik filament malzemelerin eritilerek katman katman biriktirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu süreçte katman kalınlığı, nozul sıcaklığı, yazdırma hızı ve doluluk oranı gibi birçok üretim parametresi nihai parçanın mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir (Kam ve ark., 2018).

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, EBM yöntemi ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünün özellikle katman kalınlığı ve üretim sıcaklığı gibi parametrelerden önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Katman kalınlığının azalması genellikle daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha iyi yüzey kalitesi ile sonuçlanmaktadır (Ceylan ve ark., 2024; Sasany ve ark., 2024).

Ayrıca nozul sıcaklığının filament malzemesinin akış özelliklerini ve katmanlar arası bağlanma kalitesini etkilediği, bu durumun da yüzey kalitesi ve mekanik özellikler üzerinde önemli rol oynadığı belirtilmektedir (Megersa ve ark., 2025; Pang ve ark., 2025).

Son yıllarda karbon fiber takviyeli polimer filamentler (CF-PLA gibi) yüksek mekanik dayanım, düşük yoğunluk ve iyi termal özellikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu kompozit malzemeler, standart PLA malzemesine kıyasla daha yüksek dayanım ve rijitlik sağlayabilmektedir (Naidu ve ark., 2025).

EBM yöntemi ile üretilen parçaların kalite özelliklerini iyileştirmek amacıyla üretim parametrelerinin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk, mühendislik parçalarının performansını ve kullanılabilirliğini doğrudan etkileyen kritik kalite parametreleri arasında

yer almaktadır. Yapılan araştırmalar katman kalınlığı ve üretim sıcaklığının yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir (Chacón ve ark., 2017; Ahn ve ark., 2002; Domingo-Espín ve ark., 2015).

Günümüzde eklemeli imalat süreçlerinin analizi ve optimizasyonunda makine öğrenmesi yöntemleri giderek daha fazla kullanılmaktadır (Tok M. ve ark., 2025). Makine öğrenmesi algoritmaları, üretim parametreleri ile ürün kalitesi arasındaki ilişkileri modelleyerek daha doğru tahminler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesi ve üretim parametrelerinin optimize edilmesi amacıyla çeşitli makine öğrenmesi modellerinin kullanıldığı çalışmalar literatürde yer almaktadır (García-Martínez ve ark., 2024; Faidallah ve ark., 2024).

Bu çalışmada karbon fiber takviyeli PLA (PLA-CF) kompozit malzemesi kullanılarak EBM yöntemi ile üretilen numunelerde katman kalınlığı ve nozul sıcaklığı parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca elde edilen deneysel veriler kullanılarak farklı makine öğrenmesi algoritmalarının performansları karşılaştırılmış ve en uygun algoritmanın belirlenmesi amaçlanmıştır.

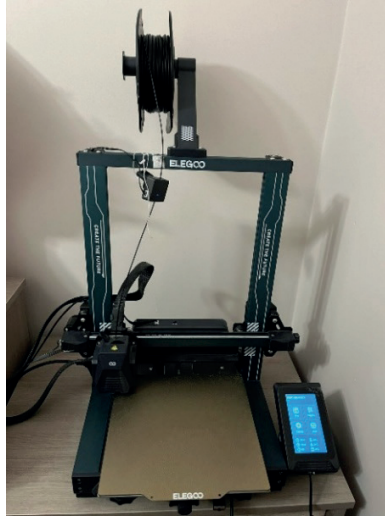
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Bu çalışmada üretim malzemesi olarak karbon fiber takviyeli polilaktik asit (PLA-CF) filament kullanılmıştır. PLA-CF kompozit malzemeler, PLA matris içerisine dağıtılmış kısa karbon fiber takviyeleri sayesinde yüksek mekanik dayanım ve boyutsal kararlılık sağlamaktadır. Ayrıca düşük yoğunlukları ve iyi baskı kabiliyetleri nedeniyle EBM tabanlı eklemeli imalat uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

2.2. Yöntem

Deneysel çalışmada numuneler Elegoo marka Neptun Pro 4 model EBM tabanlı üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir (Şekil 1). Numune geometrisi $30 \times 50 \times 3$ mm boyutlarında dikdörtgen plaka şeklinde tasarlanmıştır. Çalışmada iki farklı üretim parametresi değiştirilmiştir. Bu parametreler ve seviyeleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Üretimde kullanılan üç boyutlu eklemeli imalat cihazı

Tablo 1. Üretim parametreleri ve seviyeleri

Değişen parametreler	Seviye
Katman kalınlığı (mm)	0.1, 0.15, 0.2 ve 0.25
Nozul sıcaklığı (°C)	220, 225, 230 ve 235

Çalışmada sabit tutulan parametreler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmadaki sabit parametreler

Değişen parametreler	Seviye
Tabla sıcaklığı	60
Alt/üst desen	Eş merkezli
Fan hızı (%)	100
Doluluk oranı (%)	100
Malzeme	PLA-CF

2.2.1. Yüzej Pürüzlülüğü Ölçümleri

Numunelerin yüzej kalitesini belirlemek amacıyla yüzej pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler TMR marka 120 model yüzej pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Her numune için farklı yüzej bölgelerinden 10 adet pürüzlülük ölçümü alınmış ve bu ölçümlerin

ortalaması hesaplanarak numunenin ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) belirlenmiştir.

2.2.2. Boyutsal Doğruluk Analizi

Numunelerin boyutsal doğruluğu dijital kumpas kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler numunenin dış ölçülerini oluşturan: uzunluk (50 mm), genişlik (30 mm) ve kalınlık (3 mm) değerleri için gerçekleştirilmiştir. Boyutsal doğruluk, nominal tasarım ölçüleri ile ölçülen gerçek değerler arasındaki farkın hesaplanması ile belirlenmiştir.

2.2.3. Makine Öğrenmesi Analizi

DeneySEL çalışmadan elde edilen 16 adet yüzey pürüzlülük ve boyutsal doğruluk verisi, makine öğrenmesi analizlerinde veri seti olarak kullanılmıştır. Makine öğrenmesi analizinin amacı: üretim parametreleri ile yüzey kalitesi arasındaki ilişkiyi modellemek, en yüksek tahmin doğruluğunu sağlayan makine öğrenmesi algoritmasını belirlemek olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda veri seti farklı makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak analiz edilmiş ve algoritmaların performansları karşılaştırılmıştır.

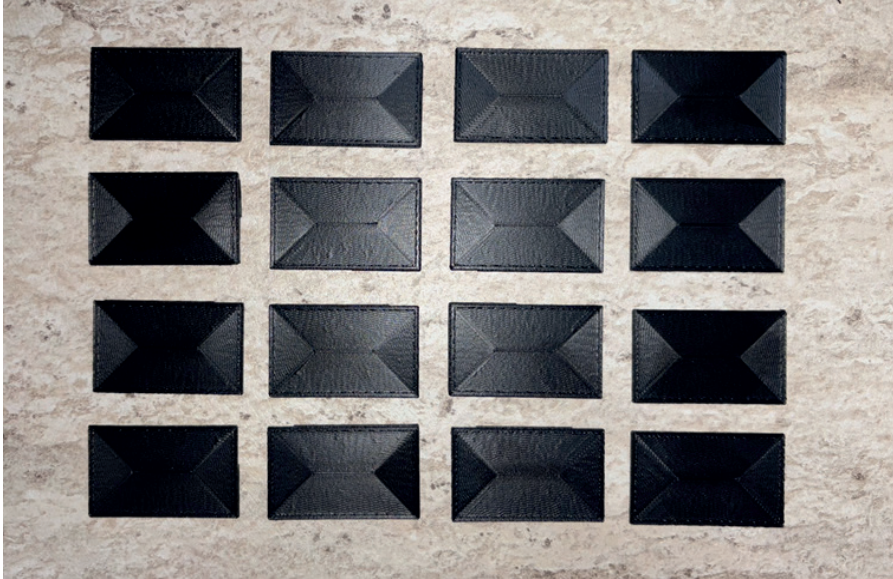
3. Sonuçlar

EBM yönteminde PLA-CF kompoziti kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada ölçülen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Gerçekleştirilen testler ve ölçülen sonuçlar

Katman kalınlığı (mm)	Nozul sıcaklığı (°C)	Yüzey pürüzlülüğü (Ra)	Boyutsal fark (%)
0.1	220	0.81	1.14
0.1	225	0.78	1.07
0.1	230	0.8	2.12
0.1	235	0.94	2.11
0.15	220	1.14	2.16
0.15	225	1.06	2.14
0.15	230	1.23	2.47
0.15	235	1.35	2.56
0.2	220	2.68	2.74
0.2	225	2.46	2.47
0.2	230	3.84	2.83
0.2	235	4.42	3.11
0.25	220	5.17	3.07
0.25	225	4.86	3.04
0.25	230	5.56	3.56
0.25	235	6.67	4.12

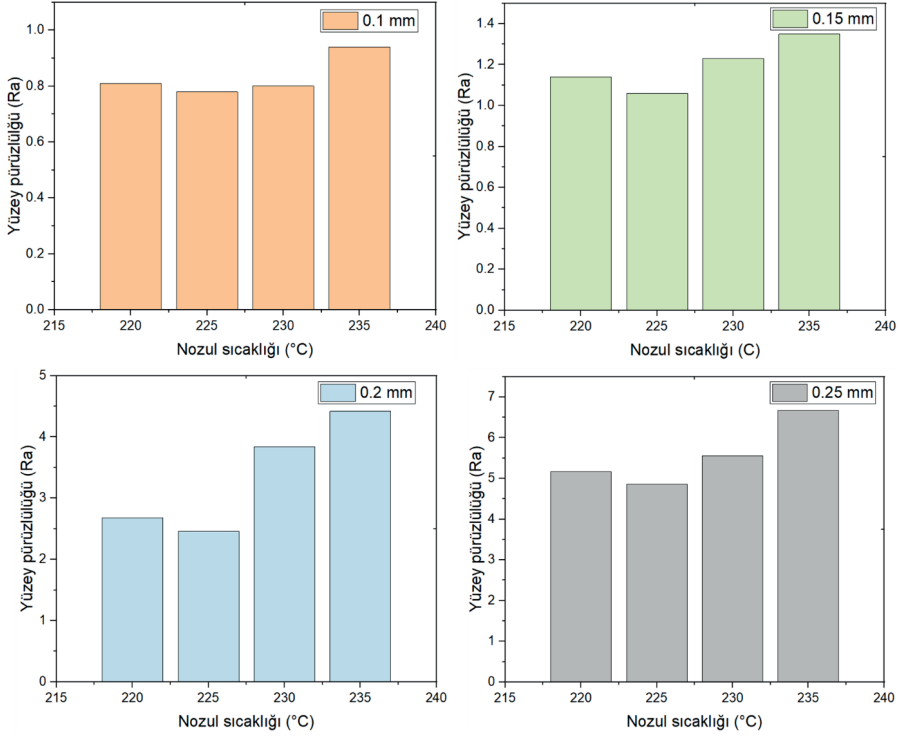
Çalışma kapsamında üretilen numunelerin görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Üretilen numuneler

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçlarının Değerlendirilmesi

EBM yöntemi ile üretilen PLA-CF numunelerin yüzey pürüzlülüğü sonuçları incelendiğinde, üretim parametreleri arasında özellikle katman kalınlığının yüzey kalitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlara göre en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0.1 mm katman kalınlığı ve 225 °C nozul sıcaklığında 0.78 μm olarak ölçülmüştür. Buna karşılık en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 0.25 mm katman kalınlığı ve 235 °C sıcaklıkta 6.67 μm olarak elde edilmiştir. Katman kalınlığına göre ortalama pürüzlülük değerleri incelendiğinde 0.10 mm katman kalınlığında yaklaşık 0.83 μm , 0.15 mm’de 1.19 μm , 0.20 mm’de 3.35 μm ve 0.25 mm’de 5.56 μm seviyesine yükseldiği görülmektedir. Bu durum katman kalınlığındaki artışın yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde artırdığını göstermektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Katman kalınlığı ve nozul sıcaklığına bağlı olarak ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri

Bu sonuçlar literatürdeki birçok çalışma ile uyum göstermektedir. EBM üretiminde katman kalınlığının artması, katmanlar arasındaki basamak (stair-stepping) etkisini artırarak yüzey pürüzlülüğünün yükselmesine neden olmaktadır. Bu etki özellikle düşük eğimli yüzeylerde daha belirgin hale gelmektedir (Boschetto & Bottini, 2014). Benzer şekilde Juan M. Chacón ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan çalışmada da katman kalınlığının azaltılması ile yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçüde iyileştiği ve daha düzgün yüzeylerin elde edildiği rapor edilmiştir.

Nozul sıcaklığının yüzey kalitesi üzerindeki etkisi incelendiğinde ise sıcaklığın belirli bir değere kadar yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği, ancak daha yüksek sıcaklıklarda yüzey kalitesinin yeniden bozulduğu görülmektedir. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğünün 230 °C sıcaklığa kadar iyileştiği, ancak 235 °C'de tekrar kötüleştiği belirlenmiştir. Bunun temel nedeni yüksek sıcaklıklarda filament malzemesinin viskozitesinin azalması ve ekstrüzyon sırasında daha kontrolsüz bir akış sergilemesidir. Bu durum katmanlar arasında düzensiz birikmelere ve yüzey dalgalanmalarına neden olabilmektedir.

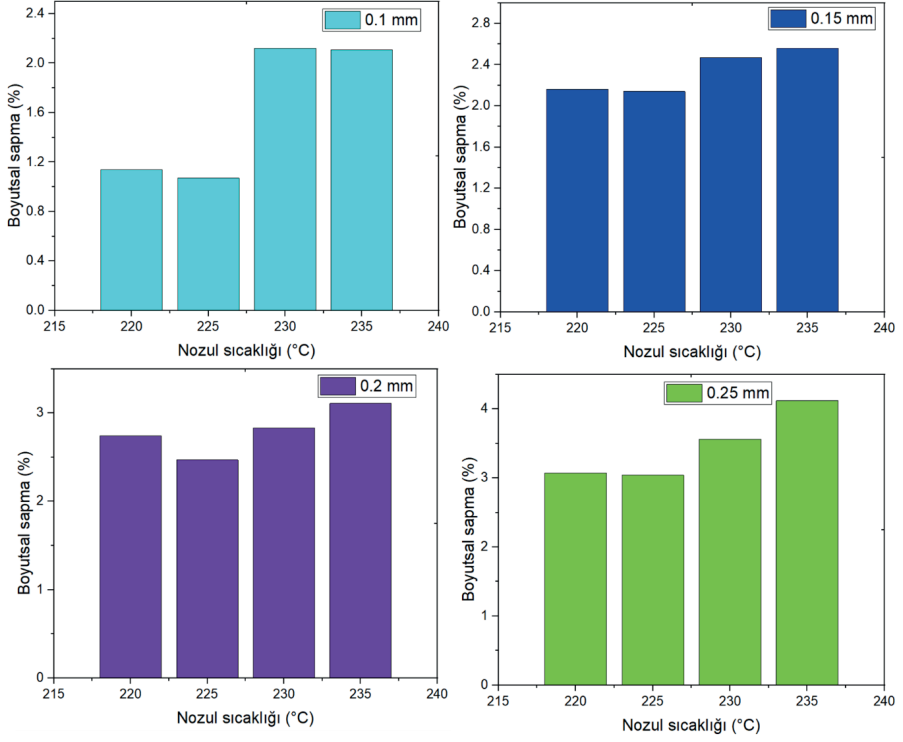
Benzer bulgular Suraj Singh ve arkadaşları (2020) tarafından yapılan çalışmada da rapor edilmiştir. Araştırmacılar, optimum ekstrüzyon sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilen baskılarda malzemenin aşırı akışkan hale geldiğini ve bunun yüzey kalitesini olumsuz etkilediğini belirtmiştir. Ayrıca Bryan Tımrak ve arkadaşları (2014) tarafından yapılan çalışmada da uygun sıcaklık değerlerinde katmanlar arası bağlanmanın iyileştiği, ancak aşırı sıcaklıkların yüzey pürüzlülüğünü artırabildiği ifade edilmiştir.

Karbon fiber takviyeli filamentlerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde ek bir etkisi de bulunmaktadır. Karbon fiber parçacıkları, polimer matris içerisinde heterojen bir yapı oluşturduğu için ekstrüzyon sırasında yüzeyde mikro düzensizliklere neden olabilmektedir. Bununla birlikte uygun baskı parametreleri kullanıldığında bu etkinin minimize edilebildiği belirtilmektedir (Khalili et al., 2023).

Sonuç olarak elde edilen bulgular, EBM üretiminde yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için düşük katman kalınlığı ve optimum nozul sıcaklığı değerlerinin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar literatürde rapor edilen eğilimlerle büyük ölçüde uyum göstermektedir.

3.2. Boyutsal Doğruluk Sonuçlarının Değerlendirilmesi

EBM yöntemi ile üretilen numunelerin boyutsal doğruluk sonuçları incelendiğinde, üretim parametrelerinin parçaların geometrik doğruluğu üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlara göre boyutsal hata değerleri katman kalınlığının artması ile birlikte artış göstermiştir. Ortalama boyutsal fark değerleri incelendiğinde 0.10 mm katman kalınlığında yaklaşık %1.61, 0.15 mm'de %2.33, 0.20 mm'de %2.79 ve 0.25 mm'de %3.44 seviyesine yükseldiği görülmektedir. Bu sonuçlar katman kalınlığının artmasının parçaların boyutsal doğruluğunu olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Üretim parametrelerine bağlı olarak ölçülen boyutsal sapma değerinin yüzdesel farkı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Ölçülen boyutsal sapma değerinin yüzdesel farkı

Katman kalınlığının boyutsal doğruluğa etkisi literatürde de geniş şekilde incelenmiştir. Katman kalınlığının artması, her katmanda ekstrüde edilen malzeme miktarının artmasına neden olmakta ve bu durum katmanların kenarlarında taşmalara yol açabilmektedir. Bu taşmalar özellikle küçük boyutlu parçalarda ölçüsel hataların artmasına neden olmaktadır (Dudescu & Raghavan, 2020). Ayrıca kalın katmanlar, soğuma sırasında daha fazla büzülme etkisi oluşturabilmekte ve bu durum parçaların nominal ölçülerden sapmasına yol açabilmektedir.

Nozul sıcaklığı da boyutsal doğruluğu etkileyen önemli parametrelerden biridir. Yüksek sıcaklık değerlerinde filamentin akışkanlığı artmakta ve ekstrüzyon sırasında malzemenin kontrolü zorlaşabilmektedir. Bu durum özellikle kenar bölgelerinde malzeme birikmesine neden olarak parçaların gerçek ölçülerinin tasarım ölçülerinden sapmasına yol açabilmektedir (Chacón et al., 2017). Bununla birlikte çok düşük sıcaklıklarda ise katmanlar arası bağlanma zayıflamakta ve bu durum da parçanın yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmektedir.

EBM üretiminde boyutsal doğruluğun iyileştirilmesi için uygun katman kalınlığı ve ekstrüzyon sıcaklığı kombinasyonunun belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, düşük katman kalınlıklarının hem yüzej kalitesi hem de boyutsal doğruluk açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Benzer sonuçlar Michael Dudescu ve Nishanth Raghavan (2020) tarafından yapılan çalışmada da rapor edilmiştir. Araştırmacılar düşük katman kalınlığı değerlerinin daha hassas ölçüler elde edilmesini sağladığını belirtmiştir.

Sonuç olarak elde edilen bulgular, EBM yöntemi ile üretilen PLA-CF kompozit parçaların boyutsal doğruluğunun üretim parametrelerine güçlü şekilde bağlı olduğunu göstermektedir. Özellikle katman kalınlığının azaltılması, hem yüzej kalitesini iyileştirmekte hem de parçaların tasarım ölçülerine daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

3.3. Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında farklı üretim parametrelerinde ölçülen yüzej pürüzlülükleri ve boyutsal sapmanın yüzdesel farkı makine öğrenmesi algoritmaları ile değerlendirilmiş ve en uygun tahmini gerçekleştiren algoritma belirlenmeye çalışılmıştır (Tablo 4).

Tablo 4. Makine öğrenmesi algoritmaları ve tahminlerinin değerleri

Yüzej pürüzlülüğü				Boyutsal sapma			
Algoritma	MAE	RMSE	Coefficient	Algoritma	MAE	RMSE	Coefficient
GP	1.5299	1.679	0.6857	GP	0.5148	0.6941	0.6616
LR	0.8009	0.9278	0.8862	LR	0.2157	0.2704	0.9352
MLP	0.4375	0.5651	0.958	MLP	0.324	0.3948	0.8592
SLR	0.7317	0.8258	0.9082	SLR	0.3657	0.4302	0.8272
SMOreg	0.7089	0.8343	0.9062	SMOreg	0.2464	0.3008	0.9261
IBK	1.2887	1.6016	0.6694	IBK	0.6913	0.7498	0.5171
KStar	0.8188	0.9665	0.9597	KStar	0.2855	0.4168	0.9264
LWL	0.8983	1.2447	0.7919	LWL	0.5271	0.5719	0.6976
AR	0.5735	0.6562	0.9446	AR	0.2644	0.3071	0.9203
Bagging	0.7042	0.9585	0.8798	Bagging	0.4065	0.554	0.6988
CVPS	1.8308	2.0366	-0.5347	CVPS	0.5952	0.7939	-0.6135
RC	0.4315	0.603	0.9559	RC	0.3434	0.4722	0.8383
RFC	0.9744	1.3428	0.8276	RFC	0.3658	0.4858	0.7926
RBD	0.7935	1.0509	0.8517	RBD	0.4897	0.5423	0.7306
Stacking	1.8308	2.0366	-0.5347	Stacking	0.5952	0.7939	-0.6135

DT	0.5017	0.7135	0.9328	DT	0.436	0.4971	0.7701
M5P	0.6396	0.7572	0.9245	M5P	0.2157	0.2704	0.9352
RF	0.4004	0.5817	0.9555	RF	0.2963	0.3752	0.8719
RT	0.4315	0.603	0.9559	RT	0.3434	0.4722	0.8383

3.2.1. Boyutsal Sapma Tahminine Yönelik Makine Öğrenmesi Modellerinin Performans Analizi

Bu çalışmada, katman kalınlığı ve nozul sıcaklığı gibi proses parametreleri kullanılarak elde edilen boyutsal sapma değerlerinin tahmini amacıyla farklı makine öğrenmesi algoritmalarının performansı karşılaştırılmıştır. Model performanslarının değerlendirilmesinde MAE, RMSE ve korelasyon katsayısı metrikleri kullanılmıştır. MAE ve RMSE değerlerinin düşük olması model tahminlerinin gerçek değerlere daha yakın olduğunu gösterirken, korelasyon katsayısının 1'e yaklaşması modelin açıklayıcılığının yüksek olduğunu ifade etmektedir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde bazı algoritmaların boyutsal sapma tahmininde diğerlerine göre daha başarılı olduğu görülmektedir. Özellikle linear regression (LR) ve M5P model tree algoritmalarının en yüksek performansı gösterdiği belirlenmiştir. Her iki algoritma için MAE değeri 0.2157, RMSE değeri 0.2704 ve korelasyon katsayısı 0.9352 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, söz konusu modellerin deneysel veriler ile tahmin edilen değerler arasında oldukça güçlü bir ilişki kurabildiğini göstermektedir. M5P algoritmasının karar ağacı temelli bir model olması ve doğrusal regresyonu ağaç yapısı içerisinde kullanması, küçük veri setlerinde yüksek tahmin doğruluğu sağlayabilmesini açıklamaktadır.

Benzer şekilde SMOreg algoritması da yüksek tahmin performansı sergileyen modeller arasında yer almaktadır. Bu model için MAE değeri 0.2464, RMSE değeri 0.3008 ve korelasyon katsayısı 0.9261 olarak hesaplanmıştır. Destek vektör regresyonu temelli bu yaklaşım, doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesinde etkili olduğundan proses parametreleri ile boyutsal sapma arasındaki ilişkiyi başarılı bir şekilde temsil edebilmiştir.

Orta düzey performans sergileyen modeller arasında random forest (RF), multilayer perceptron (MLP) ve KStar algoritmaları yer almaktadır. Bu modeller için korelasyon katsayısı değerleri sırasıyla 0.8719, 0.8592 ve 0.9264 olarak elde edilmiştir. Özellikle KStar algoritmasının korelasyon katsayısı yüksek olmasına rağmen hata değerlerinin (MAE=0.2855, RMSE=0.4168) nispeten daha büyük olması, tahminlerde belirli sapmaların oluşabildiğini

göstermektedir. Benzer şekilde MLP algoritması karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilmesine rağmen veri setinin sınırlı büyüklüğünden dolayı beklenen düzeyde performans sergileyememiş olabilir.

Diğer taraftan bazı algoritmaların tahmin performanslarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Özellikle CVparameterselection ve stacking yöntemlerinde korelasyon katsayısının -0.6135 gibi negatif bir değer alması, model tahminlerinin gerçek değerlerle tutarsız olduğunu göstermektedir. Bu durum, söz konusu yöntemlerin veri setinin boyutu veya dağılımı açısından uygun bir modelleme yaklaşımı olmadığını göstermektedir. Benzer şekilde IBk algoritmasının da yüksek hata değerleri (MAE=0.6913, RMSE=0.7498) ve düşük korelasyon katsayısı (0.5171) nedeniyle zayıf performans sergilediği belirlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, boyutsal sapma tahmini için doğrusal model tabanlı yaklaşımların veri setine daha iyi uyum sağladığı görülmektedir. Özellikle linear regression ve M5P algoritmalarının düşük hata değerleri ve yüksek korelasyon katsayıları sayesinde en başarılı tahmin modelleri olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, incelenen proses parametreleri ile boyutsal sapma arasındaki ilişkinin büyük ölçüde doğrusal karakterde olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, katman kalınlığı ve nozul sıcaklığı gibi üretim parametreleri kullanılarak boyutsal sapmanın tahmin edilmesinde M5P ve linear regression algoritmaları en uygun modeller olarak belirlenmiştir. Bu modellerin kullanılması, FDM tabanlı üretim süreçlerinde boyutsal doğruluğun önceden tahmin edilmesine ve üretim parametrelerinin optimize edilmesine katkı sağlayabilir.

3.2.2. Yüzey Pürüzlülüğü Tahminine Yönelik Makine Öğrenmesi Modellerinin Performans Analizi

Çalışmada farklı makine öğrenmesi algoritmalarının yüzey pürüzlülüğünü tahmin etme performansı MAE (mean absolute error), RMSE (root mean square error) ve korelasyon katsayısı (coefficient) kriterleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, modellerin tahmin doğruluğu açısından önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, RMSE ve MAE değerlerinin düşük, korelasyon katsayısının ise yüksek olması model performansının daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda sonuçlar incelendiğinde, RF (random forest) algoritmasının en iyi performansı sergilediği görülmektedir. RF modeli 0.4004 MAE, 0.5817 RMSE ve 0.9555 korelasyon katsayısı ile en düşük hata değerlerinden birine ve yüksek bir doğruluk seviyesine sahiptir. Benzer şekilde

MLP (multilayer perceptron) modeli de 0.4375 MAE, 0.5651 RMSE ve 0.9580 korelasyon katsayısı ile oldukça başarılı sonuçlar üretmiştir. Bu durum, yapay sinir ağlarının doğrusal olmayan ilişkileri modellemedeki etkinliğini göstermektedir.

Bunun yanı sıra RC, RT ve AR algoritmaları da yüksek korelasyon katsayıları ($\approx 0.94-0.96$) ve düşük hata değerleri ile güçlü tahmin performansı sergileyen modeller arasında yer almaktadır. Bu modeller, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametreler arasındaki karmaşık ilişkileri başarılı şekilde yakalayabilmektedir.

Doğrusal modeller incelendiğinde ise LR (linear regression) ve SLR (simple linear regression) algoritmalarının hata değerlerinin nispeten daha yüksek olduğu ve korelasyon katsayılarının diğer gelişmiş yöntemlere kıyasla daha düşük kaldığı görülmektedir. Bu durum, yüzey pürüzlülüğü gibi üretim süreçlerinde ortaya çıkan değişkenlerin çoğunlukla doğrusal olmayan ilişkiler içerdiğini ve basit doğrusal modellerin bu ilişkileri tam olarak temsil etmekte sınırlı kalabileceğini göstermektedir.

Öte yandan bazı algoritmaların (örneğin GP, IBK, CVPS, Stacking, RFC, RBD ve LWL) MAE ve RMSE değerlerinin oldukça yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum iki şekilde yorumlanabilir: ilgili algoritmaların veri setine uygun hiper parametrelerle eğitilmemiş olması, veri ölçeklendirme veya model kurulum sürecinde ortaya çıkabilecek hesaplama veya veri işleme hataları.

Özellikle CVPS ve Stacking modellerinde korelasyon katsayısının negatif (-0.5347) olması, modelin gerçek değerlerle ters yönlü bir ilişki kurduğunu ve tahmin performansının oldukça zayıf olduğunu göstermektedir.

Sonuçlar bütüncül olarak değerlendirildiğinde, topluluk tabanlı yöntemler ve yapay sinir ağı modellerinin yüzey pürüzlülüğü tahmininde daha yüksek doğruluk sağladığı görülmektedir. Özellikle random forest ve MLP algoritmaları, düşük hata değerleri ve yüksek korelasyon katsayıları ile diğer yöntemlere kıyasla daha başarılı performans göstermiştir. Bu durum, karmaşık üretim parametrelerinin etkilediği yüzey pürüzlülüğü gibi problemlerde doğrusal olmayan ve topluluk (ensemble) tabanlı yöntemlerin daha etkin sonuçlar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Dolayısıyla, ileri çalışmalar için model optimizasyonu ve hiperparametre ayarlamaları yapılarak özellikle RF ve MLP tabanlı modellerin geliştirilmesi, yüzey pürüzlülüğü tahmin doğruluğunu daha da artırabilecek potansiyel bir araştırma yönü olarak değerlendirilebilir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, FDM yöntemi ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğunu etkileyen temel proses parametrelerinden katman kalınlığı ve nozul sıcaklığının boyutsal sapma üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen veriler farklı makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak modellenmiştir. Makine öğrenmesi modellerinin performansları MAE, RMSE ve korelasyon katsayısı gibi istatistiksel performans ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Deneysel sonuçlar incelendiğinde, katman kalınlığının artmasıyla birlikte boyutsal sapma değerlerinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, katman kalınlığının büyümesiyle birlikte eriyik polimerin katmanlar arasında daha düzensiz bir şekilde birikmesi ve katmanlar arası geometrik hassasiyetin azalması ile açıklanabilir. Özellikle yüksek katman kalınlıklarında malzemenin katılma sürecindeki büzülme ve geometrik kararsızlıkların artması, parçaların nominal ölçülerden daha fazla sapsmasına neden olmuştur. Bu sonuç, FDM üretiminde boyutsal doğruluğun sağlanabilmesi için düşük katman kalınlıklarının tercih edilmesinin önemli olduğunu göstermektedir.

Nozul sıcaklığının boyutsal sapma üzerindeki etkisi incelendiğinde ise sıcaklığın artmasıyla birlikte boyutsal sapma değerlerinde belirli bir değişim eğilimi gözlenmiştir. Daha yüksek nozul sıcaklıklarında polimer eriyiğinin akışkanlığının artması, katmanlar arasında daha iyi bir yayılma sağlamasına rağmen bazı durumlarda malzemenin kontrolsüz akmasına ve geometrik doğruluğun azalmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle optimum nozul sıcaklığının belirlenmesi, boyutsal doğruluk açısından kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Makine öğrenmesi algoritmalarının performansları karşılaştırıldığında, linear regression ve M5P algoritmalarının en düşük hata değerlerine ve en yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, çalışmada kullanılan proses parametreleri ile boyutsal sapma arasındaki ilişkinin büyük ölçüde doğrusal bir karakter sergilediğini göstermektedir. Buna karşılık bazı algoritmaların daha yüksek hata değerleri üretmesi, veri setinin sınırlı büyüklüğü ve parametre sayısının az olması ile ilişkilendirilebilir. Özellikle karmaşık model yapısına sahip algoritmaların küçük veri setlerinde beklenen performansı gösteremediği görülmüştür.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, FDM üretim süreçlerinde boyutsal doğruluğun artırılabilmesi için düşük katman kalınlığı ve uygun nozul sıcaklığı kombinasyonlarının tercih edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca makine öğrenmesi tabanlı tahmin modellerinin kullanılması, üretim sürecinde

deneySEL deneme sayısını azaltarak üretim parametrelerinin daha hızlı ve etkin bir şekilde optimize edilmesine katkı sağlayabilir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara dayanarak gelecekte yapılacak çalışmalar için bazı öneriler sunulabilir. Öncelikle, model doğruluğunu artırabilmek amacıyla veri setine baskı hızı, dolgu oranı, soğutma fan hızı ve baskı yönü gibi ek proses parametrelerinin dahil edilmesi önerilmektedir. Ayrıca farklı polimer malzemeler kullanılarak gerçekleştirilecek deneySEL çalışmalar, makine öğrenmesi modellerinin genellebilirliğinin değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Bunun yanı sıra, daha büyük veri setleri ile gerçekleştirilecek çalışmaların derin öğrenme tabanlı yöntemlerin performansının değerlendirilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir. Son olarak, çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarının kullanılması ile hem mekanik özelliklerin hem de boyutsal doğruluğun aynı anda optimize edilmesi mümkün olabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma FDM üretim süreçlerinde boyutsal sapmanın tahmin edilmesinde makine öğrenmesi yöntemlerinin etkili bir araç olduğunu ortaya koymakta ve uygun proses parametrelerinin belirlenmesine yönelik önemli bir referans sunmaktadır.

Kaynakça

- Alberto Boschetto, & Luca Bottini. (2014). Roughness prediction in fused deposition modelling by neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 2727–2742.
- Bryan Tımrak, Mark Kreiger, & Joshua M. Pearce. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, 242–246.
- Ceylan, Mert & şahin, İsmail & Top, Neslihan. (2024). Ekstrüzyon Tabanlı Metal Eklemeli İmalat (EBAM): Teknoloji, Avantajlar ve Kısıtlar. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*. 5. 10.52795/mateca.1580405.
- Faidallah, R. F., Hanon, M. M., Salman, N. D., Ibrahim, Y., Babu, M. N., Gaaz, T. S., Szakál, Z., & Oldal, I. (2024). Development of Fiber-Reinforced Polymer Composites for Additive Manufacturing and Multi-Material Structures in Sustainable Applications. *Processes*, 12(10), 2217. <https://doi.org/10.3390/pr12102217>
- Hwan Jin Ahn, Michael Montero, Dan Odell, & Shad Roundy. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257.
- Ian Gibson, David W. Rosen, & Brent Stucker. (2021). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* (3rd ed.). Springer.
- Juan M. Chacón, Miguel A. Caminero, Enrique García-Plaza, & Pedro J. Núñez. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and surface quality. *Materials & Design*, 124, 143–157.
- Kam, Menderes & Saruhan, Hamit & İpekci, Ahmet. (2018). Investigation of surface treatment effect on mechanical properties of printed products by fused deposition modelling method.
- Khalili, Ali & Kami, Abdolvahed & Abedini, Vahid. (2023). Tensile and Flexural Properties of 3D-Printed Polylactic Acid/Continuous Carbon Fiber Composite. *Mechanics of Advanced Composite Structures*. 10. 10.22075/macs.2023.29500.1466.
- Luis García-Martínez, Carlos Fernández, & Daniel Pérez. (2024). Machine learning prediction of surface roughness in fused deposition modelling processes. *Additive Manufacturing*, 80, 103975.
- Manuel Domingo-Espín, Jordi Puigoriol-Forcada, Agustín A. Garcia-Granada, & Jose Lluma. (2015). Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & Design*, 83, 670–677.

- Megersa, Getu & Sitek, Wojciech & Nowak, Agnieszka. (2025). Investigation of nozzle temperature impact on surface roughness and mechanical properties of FDM-printed CF-PEEK components.
- Michael Dudesco, & Nishanth Raghavan. (2020). Optimization of FDM process parameters using Taguchi method for improved mechanical performance. *Rapid Prototyping Journal*, 26(6), 1123–1134.
- Naidu, Challa & Ramana, Challa & Yarraguntla, Srinivasa Rao & Rao, Kollabathula & Vasudha, Dadi & Anusha, Gandhi & Rajeshbabu, Koppisetty. (2023). A Concise Review on Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) and Their Mechanical Significance Including Industrial Applications. 10.5772/intechopen.109339.
- Pang, R., Lai, M. K., Teo, H. H., & Yap, T. C. (2025). Influence of Temperature on Interlayer Adhesion and Structural Integrity in Material Extrusion: A Comprehensive Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(6), 196. <https://doi.org/10.3390/jmmp9060196>
- Sasany Rafat & Jamjoom Faris & Kendirci, Merve & Yilmaz, Burak. (2024). Effect of Printing Layer Thickness on Optical Properties and Surface Roughness of 3D-Printed Resins: An In Vitro Study. *The International journal of prosthodontics*. 37. 165-173. 10.11607/ijp.8965.
- Suraj Singh, Seeram Ramakrishna, & Raghvendra Singh. (2020). Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 185–200.
- Tok Mustafa & Fedai Yusuf, (2025). Topology optimization for manufacturing aircraft bearing brackets via laser powder bed fusion. *Sādhanā*, 50.3: 139. <https://doi.org/10.1007/s12046-025-02810-1>

