



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

## FDM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN ABS, PLA VE PETG NUMUNELERİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE ÇEKME DAYANIMININ MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

### MODELLING AND OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS AND TENSILE STRENGTH OF ABS, PLA AND PETG SAMPLES PRODUCED BY FDM METHOD

**Yazarlar (Authors):** Yasin Kuruoğlu , Mahir Akgün , Halil Demir 

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kuruoğlu Y., Akgün M., Demir H., “Fdm Yöntemiyle Üretilen Abs, Pla ve Petg Numunelerin Yüzey Pürüzlülüğü ve Çekme Dayanımının Modellenmesi Ve Optimizasyonu” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(3): 358-369, (2022).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1148923

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# FDM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN ABS, PLA VE PETG NUMUNELERİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE ÇEKME DAYANIMININ MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Yasin Kuruoğlu<sup>a</sup>\*, Mahir Akgün<sup>b</sup>, Halil Demir<sup>c</sup>

<sup>a</sup>TÜBİTAK SAGE Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü, TÜRKİYE

<sup>b</sup>Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Tek. Bölümü, TÜRKİYE

<sup>c</sup>Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [mahirakgun@aksaray.edu.tr](mailto:mahirakgun@aksaray.edu.tr)

(Received: 26.07.2022; Revised: 18.08.2022; Accepted: 10.09.2022)

## ÖZ

Bu çalışma, Eriyik Yığıma Modelleme (FDM) teknolojisi kullanılarak üretilen numunelerin yüzey kalitesi ve çekme dayanımı üzerinde ABS, PLA ve PETG filamentlerin ve baskı parametrelerinin etkisini incelemektedir. Bu amaçla, Taguchi L27 dizinine göre baskı deney tasarımı yapılmıştır. Filament malzemesi, dolun oranı, katman kalınlığı, doldurma hızı ve tarama açısı baskı parametreleri iken, yüzey pürüzlülüğü ve çekme mukavemeti de baskı kalitesi göstergeleridir. Ayrıca, deneysel ölçümler sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımı değerlerini matematiksel olarak modellemek için regresyon analizi de uygulanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları filament malzemesinin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımı üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. ABS ve PETG filamentlere göre PLA filament de yüzey pürüzlülüğünün sırasıyla ortalama %7,23 ve %54,19 oranında daha az olduğu ve ayrıca, diğer filamentlere göre PLA filament de çekme dayanımının sırasıyla ortalama %46,46 ve %34,12 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** ABS, PLA, PETG, Yüzey Pürüzlülüğü, Çekme Dayanımı, Optimizasyon.

## MODELLING AND OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS AND TENSILE STRENGTH OF ABS, PLA AND PETG SAMPLES PRODUCED BY FDM METHOD

### ABSTRACT

The current study examines the influence of ABS, PLA, and PETG filaments and printing parameters on the surface quality and tensile strength of the samples produced using Fused Deposition Modeling (FDM) technology. For this purpose, a print experiment design has been made according to the Taguchi L27 index. While filament material, filling ratio, layer thickness, filling speed, and scanning angle are printing parameters, surface roughness and tensile strength are print quality indicators. Regression analysis has been also applied to mathematically model the surface roughness and tensile strength values obtained from experimental measurements. The outcomes of this study show that the filament material plays an important role in the surface roughness and tensile strength. Moreover, it has been determined that the surface roughness of PLA filament is 7.23% and 54.19% less on average, respectively, compared to ABS and PETG filaments, and also the tensile strength of PLA filament is 46.46% and 34.12% higher compared to other filaments, respectively.

**Keywords:** ABS, PLA, PETG, Surface Roughness, Tensile Strength, Optimization.

## 1. GİRİŞ

FDM, kısa sürede karmaşık geometrilerin verimli bir şekilde oluşturmak için çoğunlukla endüstrinin yanı sıra araştırma ve akademik alanlar içinde kullanılan yaygın bir 3D baskı yöntemidir [1]. Büyük bir parçadan malzeme çıkarılarak nihai bir küçük tasarımın elde edildiği geleneksel üretim metodolojilerinin aksine, 3D baskı, katman üzerine katman oluşturarak materyallerin birleştirilmesi ile daha az malzeme israfı ile karmaşık şekillerin oluşturulmasına olanak tanımaktadır [2, 3]. Bu teknoloji sayesinde tasarımların bir ön prototipi kolay ve hızlı bir şekilde üretilebilmektedir [4]. 3D baskının sayısız avantajından biri de tek bir yapı içinde hareketli parçaları hızlı prototipleme yeteneğidir [2]. Bu teknoloji, ürünlerin pazara sürüm süresini azaltarak endüstriyel üretkenliği artırmaya ve üretim maliyetlerini düşürmeye yardımcı olabilir [5]. Bu üstün yanlarından dolayı uzay ve havacılık sanayi, otomotiv, medikal ve inşaat gibi endüstriyel uygulamalarda kullanımı yaygınlaşmaktadır [3, 5, 6]. Ayrıca, bu yöntem ile ağırlık tasarrufunun kritik olduğu uygulamalar için %40-60 daha hafif ve yapısal olarak sağlam ürünler üretilebilmektedir [7]. Bu yöntemde termoplastik polimerler yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır [8]. FDM yönteminde, filament malzemesi, katman kalınlığı, yapı oryantasyonu, tarama açısı, dolgu yüzdesi, ekstrüder sıcaklığı, yatak sıcaklığı, baskı hızı ve ekstrüzyon gibi çeşitli işlem parametreleri, yazdırılan numunelerin kalitesine ve mekanik özelliklerine karar vermede önemli etkiye sahiptir. Günay ve arkadaşları [9], PLA+ malzeme kullanılarak FDM yönteminde baskı parametrelerinin optimizasyonuna çalışmışlardır. Sonuç olarak, çekme dayanımı üzerinde en etkin parametrenin doluluk oranı olduğunu ve sırasıyla tarama açısı ve baskı hızının diğer önemli parametreler olduğunu bildirmişlerdir. Zhang ve arkadaşları [10], FDM yöntemi ile üretilen PLA ve bakır/PLA kompozit parçanın mekanik özelliklerinin karakterizasyonu üzerine çalışmışlardır. Sonuç olarak, PLA malzemeye göre bakır takviyesinin çekme dayanımını düşürdüğünü ve % uzamayı arttırdığını gözlemlemişlerdir. Uzun ve Erdoğan [11], takviyesiz, %20 bakır takviyeli ve %20 karbon-fiber takviyeli PLA kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, PLA malzemeye bakır ve karbon fiber takviyesinin çekme ve eğilme dayanımlarını

düşürdüğünü bildirmişlerdir. Melenka ve arkadaşları [12], farklı lif içeriklerinin (ağırlıkça %4,04, 8,08 ve %10,1) sürekli kevlar liflerle güçlendirilmiş FDM baskılı naylonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, ağırlıkça %10,1 fiber içeren parçaların en yüksek sertlik ve mukavemete sahip olduğunu göstermiştir. Evlen ve arkadaşları [13], PLA ve PET filament malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde doluluk oranının etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, doluluk oranı arttıkça PLA ve PET malzemelerin sertliğinin arttığını, yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımının belirli bir noktaya kadar arttığını ve daha sonra azalma eğilimine girdiğini bildirmişlerdir.

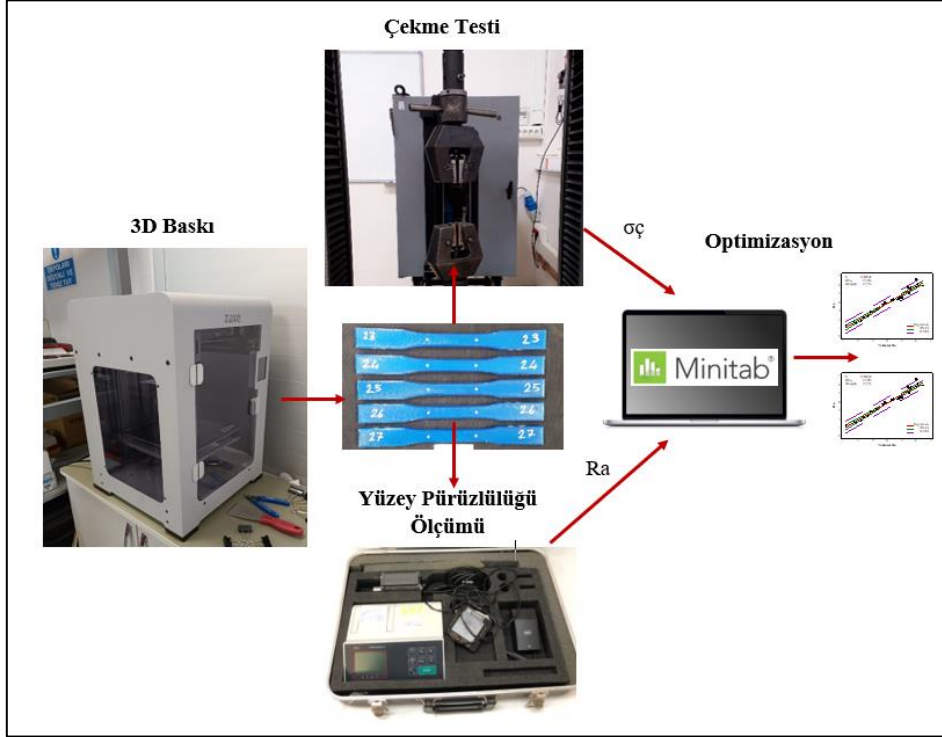
Literatür araştırmasında, Eriyik Yiğma Modelleme (FDM) teknolojisinde etkili baskı parametreleri ile birlikte farklı filament malzemelerinin baskı kalitesi ve ürün özellikleri üzerine etkilerini karşılaştırmalı bir şekilde incelendiği çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Bu yüzden, bu çalışmada baskı kalitesi ve ürün özellikleri bakımından PLA, ABS ve PETG filament malzemelerinin performanslarının değerlendirilmesi ve baskı parametrelerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Zaxe marka 3D yazıcıda ABS, PLA ve PETG filamentler kullanılarak ASTM D638-IV standartlarına uygun numuneler üretilmiştir. Ergiyik yiğma modelleme (FDM) yöntemi ile üretime uygun olan bu filamentler Zaxe firmasından ticari olarak temin edilmiştir. Çizelge 1'de filamentlerin mekanik özellikleri verilmiştir [14]. FDM yöntemi ile üretilen numunelerin kalitesi ve mekanik özellikleri üzerinde filament malzemesinin yanı sıra proses parametrelerinin etkisinin analizi de amaçlanmıştır. Bu bağlamda, her bir filament malzemesi ile üç farklı doluluk oranı (%20, 40 ve 60), üç farklı katman kalınlığı (0,1 0,2 ve 0,3 mm), üç farklı doldurma hızı (40, 60 ve 80 mm/s) ve üç farklı tarama açısında (30°, 45° ve 60°) ASTM D638-IV standartlarına uygun üçer adet numune üretilmiştir. Şekil 1'de üretim süreci görülmektedir. Çekme testleri TÜBİTAK SAGE yerleşkesinde yer alan 100 kN kapasiteli INSTRON marka test cihazında gerçekleştirilmiştir.

Üretilen numunelerin yüzey kalitesini belirlemek için Mitutoyo surfest sj-210 cihazı kullanılarak pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde örnekleme uzunlu 0,8 mm ölçme uzunluğu 5,6 mm olarak

seçilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerlerini belirlemek için üretilen numunelerin üst yüzeylerinde dört farklı noktada ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerin ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.



Şekil 1. Deney Seti.

Çizelge 1. Filamentlerin mekanik özellikleri.

Filament	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme dayanımı (MPa)	Eğme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Baskı sıcaklığı (°C)
ABS	1,04	43	66	22	220-260
PLA	1,25	65	97	8	190-210
PETG	1,23	49	68	225	230-250

Ayrıca, “FEI QUANTA FEG 250” taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak çekme testi sonrası numunelerde meydana gelen kırılma mekanizmaları incelenmiştir.

### 3. DENEYSEL TASARIM VE OPTİMİZASYON

Proses tasarımı ve ideal proses parametrelerinin belirlenmesi açısından günümüzde, optimizasyon ve teknikleri giderek artan bir şekilde önem kazanmaya devam etmektedir. Taguchi yöntemi, yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM), varyans analizi (ANOVA), yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik algoritma yaygın kullanılan bir takım istatistiksel

modellerdir [15-17]. İstatistiksel modeller sayesinde, daha az deneme ile optimum koşulların belirlenmesi, işçilik, enerji ve fire gibi maliyetleri önemli miktarda azalmaktadır. Taguchi yöntemi, optimum işleme koşullarını belirlemek için kullanılan bu tekniklerden biridir. Deneme sayısını azaltarak ve böylece üretim ve test maliyetlerini azaltarak minimum zaman aralığında verimli proses şartları sağlamaktadır [18]. Eriyik Yığılma Modelleme teknolojisinde nihai ürünün kalitesini ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için baskı parametrelerinin en uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir.

Bu bağlamda Taguchi L27 ortogonal dizisi kullanılarak çekme numuneleri üretilmiştir. Baskı sıcaklığı ve tabla sıcaklığı üretici firma tavsiyesi dikkate alınarak sırasıyla 210°C ve 40°C olarak seçilmiştir. Optimizasyon işleminde, filament malzemesi, doluluk oranı (A), katman kalınlığı (B), doldurma hızı (C) ve tarama açısı (D) girdi faktörleri olarak seçilirken çekme dayanımı ve yüzey pürüzlülüğü de çıktı parametresi olarak seçilmiştir. Deneysel ölçümler sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımı değerleri ve baskı parametreleri arasındaki ilişkiyi tanımlamak ve modellemek için, varyans (ANOVA) analizi ve regresyon analizleri uygulanmıştır. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerini elde etmek için baskı parametrelerinin optimizasyonunda Eşitlik 1'de yer alan "en küçük en iyi" yaklaşımı kullanılırken maksimum çekme dayanımı

değerini elde etmek için ise Eşitlik 2'te yer alan "en büyük en iyi" yaklaşımı kullanılmıştır.

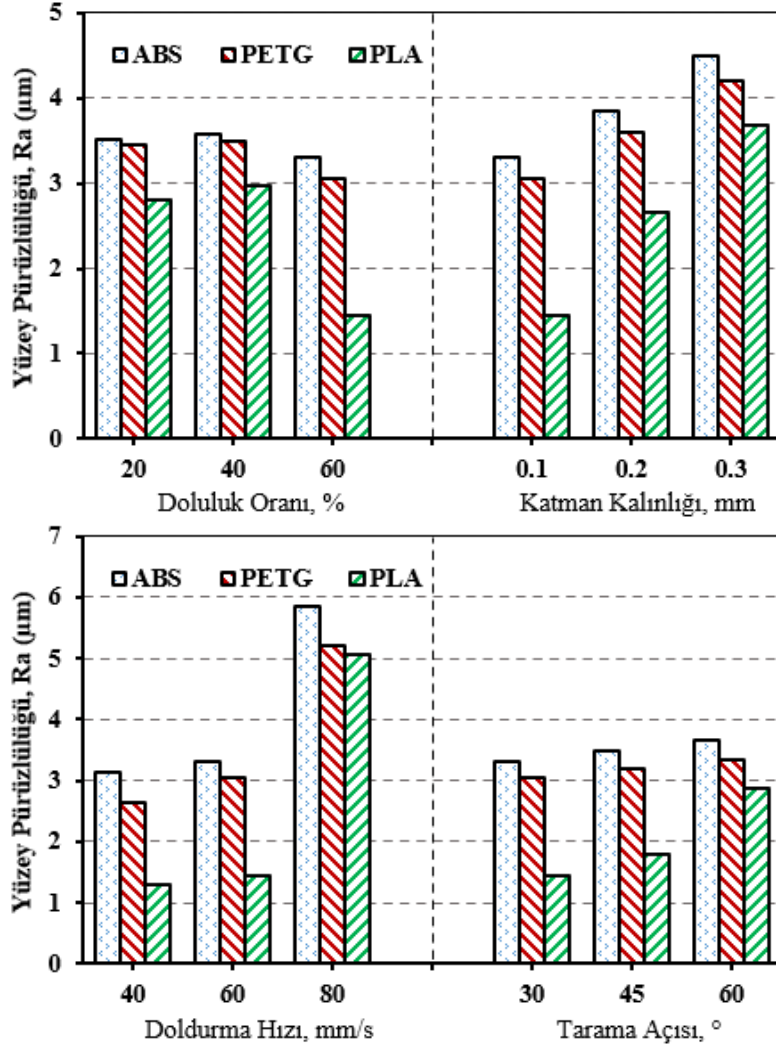
$$n = \frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

$$n = \frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

#### 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

##### 4.1. Deneysel Sonuçlarının Değerlendirilmesi

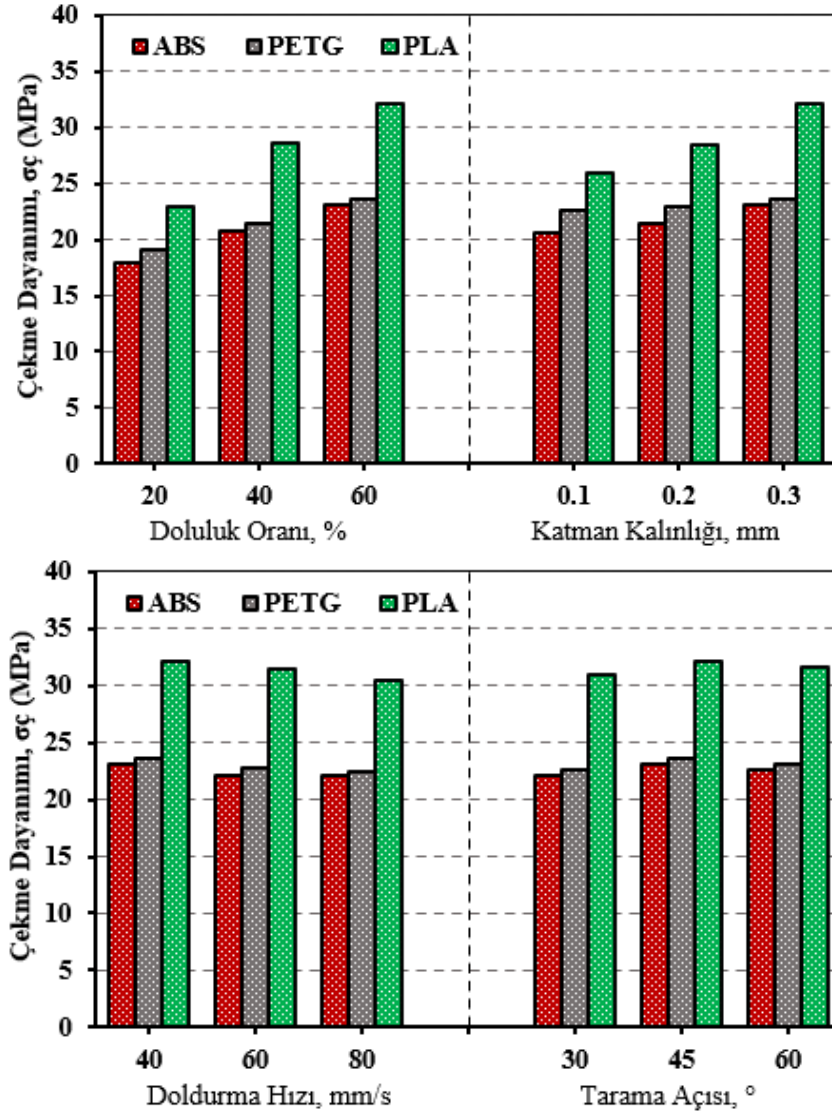
3D yazıcı kullanılarak üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde filament malzemeleri ve baskı parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Şekil 2 ABS, PLA ve PETG filament malzemeleri kullanılarak üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde doluluk oranı, katman kalınlığı, doldurma hızı ve tarama açısının etkilerini göstermektedir.



Şekil 2. Baskı parametrelerine göre yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

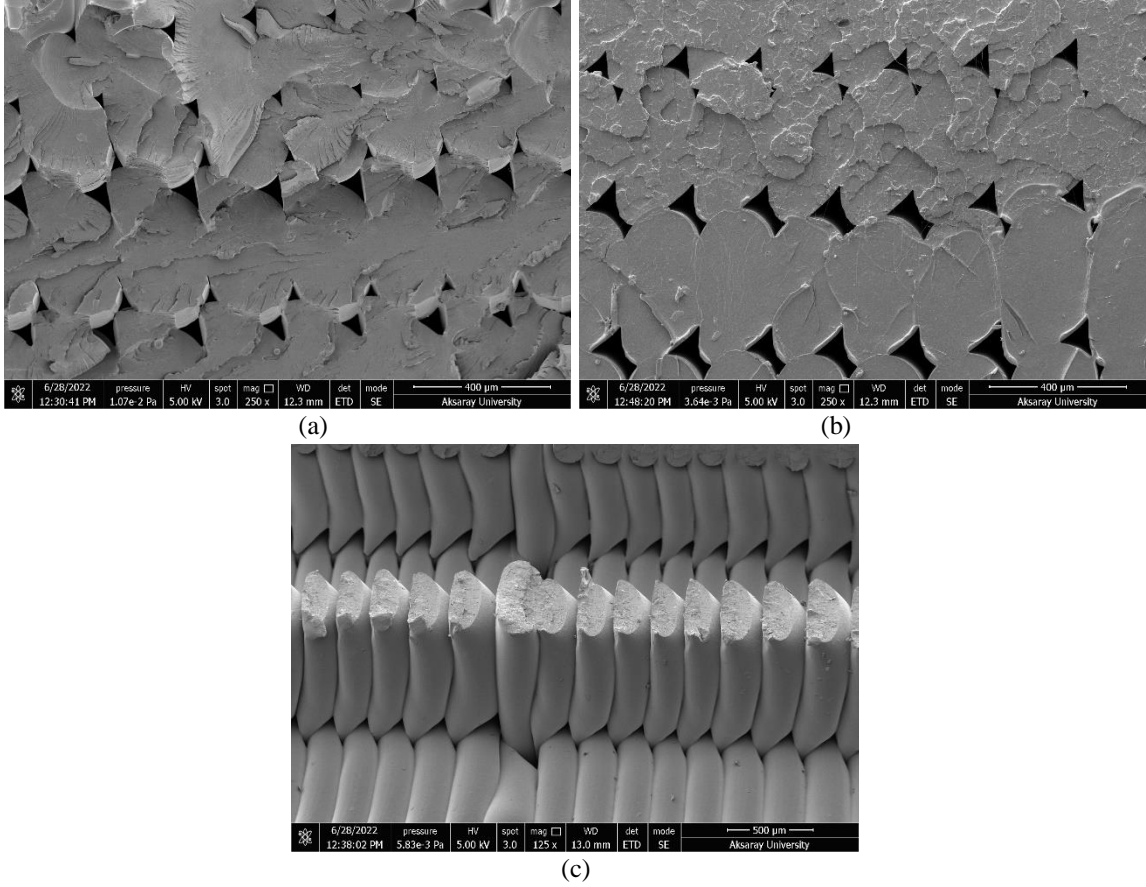
Şekil 2 incelendiğinde, ABS ve PETG filamentlerde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre PLA filament de ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde filament malzemesinin yanı sıra doldurma hızı ve katman kalınlığının etkin rol oynadığı da söylenebilir. Grafiğe göre doldurma hızı ve katman kalınlığının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin belirgin bir şekilde arttığı ancak doluluk oranının artması ile bir miktar azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca üç filament malzemesi için en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri en yüksek doldurma hızı ile en yüksek katman kalınlığı seviyesinde ölçülmüştür. Benzer şekilde, Sammaiah ve ark. [19], ABS filament malzemesi ile üretilen numunelerin yüzey kalitesine baskı parametrelerinin etkisini araştırdıkları çalışmalarında, katman kalınlığının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığını dolgu yoğunluğunun

artması ile azaldığını bildirmişlerdir. Başka bir çalışmada, Shirmohammadi ve ark. [20], yüzey kalitesinin doğrudan katman kalınlığı ile ilişkili olduğunu ve katman kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve bu durumu katman kalınlığı artırılarak yazdırılan numunelerin yüzeyinin daha keskin ve katmanların daha belirgin olması ile ilişkilendirmişlerdir. Bütün deneylerde ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre bu üç filament malzemesinin performansı karşılaştırıldığında, ABS ve PETG filamentlere göre PLA filament de yüzey pürüzlülüğünün sırasıyla ortalama %7,23 ve %54,19 oranında daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 3D yazıcı uygulamalarında yüzey kalitesini arttırmak için katman kalınlığının düşük ya da orta seviyeleri seçilmelidir. Farklı filament malzemeleri ve baskı parametrelerinde üretilen numunelerin çekme dayanımlarının değişimi Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Baskı parametrelerine göre çekme dayanımının değişimi.





Şekil 4. Çekme testi uygulana a) ABS b) PETG ve c) PLA numunelerinden alınan SEM kırık yüzey görüntüleri.

Şekil 3 incelendiğinde, üç filament malzemesi ile üç farklı doldurma hızında ve üç farklı tarama açısında elde edilen numunelerin doluluk oranının ve katman kalınlığının artması ile çekme dayanımlarının arttığı görülmektedir. Günay ve ark. [9], doluluk oranının artması ile çekme dayanımındaki artışı kesit alandaki doluluk oranının artmasının bir sonucu olarak birim alana düşen çekme yükü taşıma kapasitesinin artması ile ilişkilendirmişlerdir. Diğer taraftan, filament malzemesinin üretilen numunelerin çekme dayanımı üzerinde etkili rol oynadığı düşünülmektedir. Bütün baskı şartlarında ABS ve PETG filamentlerde elde edilen çekme dayanımı değerlerine göre PLA filament de ölçülen çekme dayanımı değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. ABS ve PETG filamentlere göre PLA filament de çekme dayanımının sırasıyla ortalama %46,46 ve %34,12 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4'te çekme testi sonrası kopan numunelerin kırık yüzeylerinden alınan SEM resimleri görülmektedir. Şekil incelendiğine bütün filamentler için üst ve alt katmanların birbirine mükemmel bir şekilde yapıştığı ancak PLA numuneye göre ABS ve PETG numunelerinde hava ceplerinin ve katmanlar

arasında boşluklar içeren gözenekli yapıların daha fazla olduğu görülmektedir. ABS ve PETG numunelerinde çekme dayanımındaki düşüşe bu gözenekli yapıların oluşumunun neden olduğu düşünülmektedir. Benzer bir çalışmada, Özsoy ve ark. [21], PLA numunelerinin ABS numunelerine göre daha yüksek dayanım değerlerine sahip olduğunu bildirmişlerdir ve bu durumu numune üretim sürecinde tabakalar arasında sağlanan bağın PLA malzeme numuneleri için ABS numunelerine göre daha iyi olması ile açıklamışlardır.

#### 4.2. Ra ve $\sigma_c$ için Sinyal-gürültü (S/N) Oranının Analizi

ABS, PLA ve PETG filamentleri ile farklı baskı parametrelerinde üretilen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) değerleri ile her bir baskı kombinasyonu için bu değerlere karşılık gelen S/N değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Ra ve  $\sigma_c$  için aritmetik ortalama değerleri sırasıyla 4,14  $\mu\text{m}$  ve 22,12 MPa olarak hesaplanmıştır. Çizelge 3'te deneysel ölçümler ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımı değerleri için S/N oranlarının değerlerini göstermektedir. Bu

tabloda her bir baskı faktörü için en yüksek değer optimum kontrol seviyesini göstermektedir. Ayrıca Ra ve  $\sigma_c$  için baskı faktörlerinin seviye değerleri Şekil 5'te görsel form da gösterilmiştir. Bu grafikte her bir baskı faktörü için S/N oranının en yüksek olduğu nokta optimum seviyeyi göstermektedir. Buna göre en düşük yüzey pürüzlülüğü değerini veren optimum baskı parametrelerinin seviyeleri ve S/N oranları A (Düzey 2, S/N = -10,00), faktör B (Düzey 3, S/N = -10,73), faktör C (Düzey 1, S/N = -9,18), faktör D (Düzey 2, S/N = -9,86) ve faktör E (Düzey 1, S/N = -10,41) olarak belirlenmiştir. Bir başka deyişle, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) için PLA filament malzemesi, %60 doluluk, 0,1 mm katman kalınlığı, 60 mm/s doldurma hızı ve 30°

tarama açısı optimum baskı parametreleri seviyeleridir. Bu parametrelerde üretilen numune de ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 1,44  $\mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde, maksimum çekme dayanımı değerini veren optimum baskı parametrelerinin seviyeleri ve S/N oranları A (Düzey 2, S/N = 28,69), faktör B (Düzey 3, S/N = 27,74), faktör C (Düzey 3, S/N = 27,11), faktör D (Düzey 1, S/N = 26,79) ve faktör E (Düzey 2, S/N = 26,89) olarak belirlenmiştir. Özet olarak, maksimum çekme dayanımı değeri ( $\sigma_c$ ) için PLA filament malzemesi, %60 doluluk, 0,3 mm katman kalınlığı, 40 mm/s doldurma hızı ve 45° tarama açısı optimum baskı parametreleri seviyeleridir. Bu parametrelerde üretilen numune de çekme dayanımı değeri 32,18 MPa olarak ölçülmüştür.

Çizelge 2. Test sonuçları.

Test Id	Parameters					Ra	Ra S/N (dB)	$\sigma_c$	$\sigma_c$ S/N (dB)
	A	B	C	D	E				
1	ABS	20	0,1	40	30	1,77	-4,959	17,60	24,910
2	ABS	20	0,1	40	45	2,39	-7,568	17,56	24,890
3	ABS	20	0,1	40	60	3,00	-9,5424	15,09	23,573
4	ABS	40	0,2	60	30	2,50	-7,958	16,41	24,302
5	ABS	40	0,2	60	45	3,30	-10,370	19,54	25,818
6	ABS	40	0,2	60	60	3,85	-11,709	17,27	24,745
7	ABS	60	0,3	80	30	4,33	-12,729	21,77	26,757
8	ABS	60	0,3	80	45	5,21	-14,336	22,06	26,872
9	ABS	60	0,3	80	60	6,85	-16,713	20,72	26,327
10	PLA	20	0,2	80	30	4,14	-12,340	24,40	27,747
11	PLA	20	0,2	80	45	4,35	-12,769	22,93	27,208
12	PLA	20	0,2	80	60	4,50	-13,064	24,15	27,658
13	PLA	40	0,3	40	30	3,85	-11,709	27,63	28,827
14	PLA	40	0,3	40	45	4,40	-12,869	28,30	29,035
15	PLA	40	0,3	40	60	4,50	-13,064	28,05	28,958
16	PLA	60	0,1	60	30	1,44	-3,1672	30,62	29,720
17	PLA	60	0,1	60	45	1,78	-5,0084	31,35	29,924
18	PLA	60	0,1	60	60	2,00	-6,0206	28,60	29,127
19	PETG	20	0,3	60	30	4,65	-13,349	19,97	26,007
20	PETG	20	0,3	60	45	5,80	-15,268	18,64	25,408
21	PETG	20	0,3	60	60	6,24	-15,903	19,44	25,773
22	PETG	40	0,1	80	30	5,85	-15,343	19,35	25,733
23	PETG	40	0,1	80	45	5,92	-15,446	19,61	25,849
24	PETG	40	0,1	80	60	6,05	-15,635	19,38	25,747
25	PETG	60	0,2	40	30	4,08	-12,213	22,47	27,032
26	PETG	60	0,2	40	45	4,45	-12,967	22,36	26,989
27	PETG	60	0,2	40	60	4,70	-13,442	22,21	26,931

#### 4.3. Varyans Analizi (Anova)

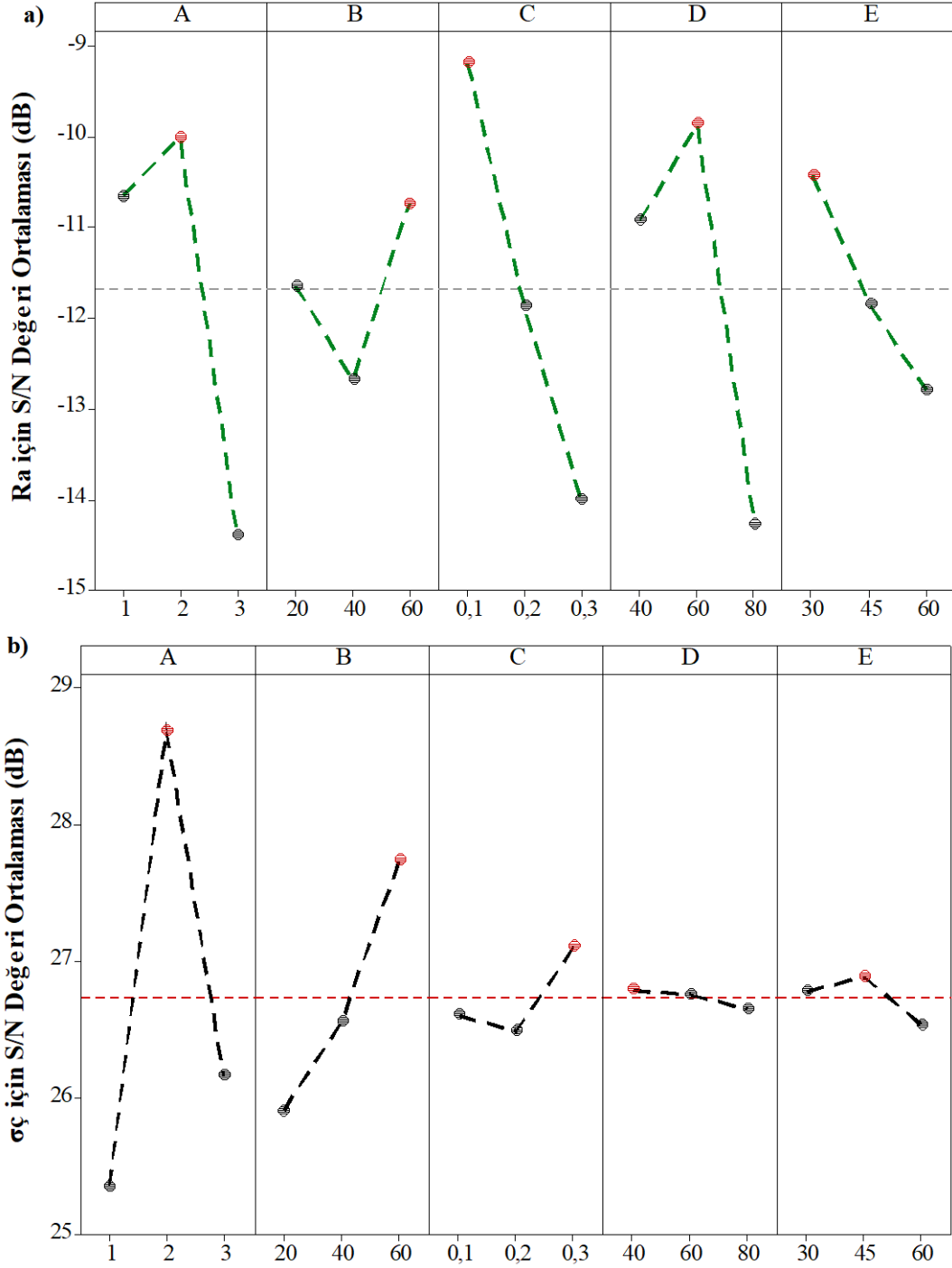
Baskı kalitesi ve çekme dayanımı üzerinde her bir baskı parametresinin bireysel etkileşimini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımı için ANOVA sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir. Bu analiz %5 anlamlılık düzeyinde ve %95 güven düzeyinde gerçekleştirilmiştir [18, 22, 23].



Çizelge 3. S/N yanıt sonucu.

Baskı Faktörleri										
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
<b>Ra</b>						<b><math>\sigma\phi</math></b>				
<b>1</b>	-10,65	-11,64	<b>-9,18</b>	-10,92	<b>-10,41</b>	25,36	25,91	26,61	<b>26,79</b>	26,78
<b>2</b>	<b>-10,00</b>	-12,67	-11,80	<b>-9,86</b>	-11,84	<b>28,69</b>	26,56	26,49	26,76	<b>26,89</b>
<b>3</b>	-14,39	<b>-10,73</b>	-13,99	-14,26	-12,78	26,16	<b>27,74</b>	<b>27,11</b>	26,66	26,54
<b>Delta</b>	4,39	1,94	4,80	4,40	2,36	3,33	1,83	0,62	0,14	0,35

Şekil 5. a) Ra ve b)  $\sigma\phi$  için ortalama S/N oranları ortalama değerleri.

**Çizelge 4.** Varyans analiz sonucu.

Faktörler	SD	Seq SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Etki oranı (%)
<b>Ra</b>						
A	2	18,444	9,222	61,81	0,000	32,10
B	2	1,643	0,821	5,51	0,015	2,86
C	2	13,913	6,956	46,63	0,000	24,21
D	2	16,474	8,236	55,21	0,000	28,67
E	2	4,595	2,297	15,40	0,000	8,00
Hata	16	2,387	0,149			4,15
Toplam	26	57,457				100
<b>σç</b>						
A	2	379,325	189,663	223,27	0,000	73,77
B	2	101,965	50,983	60,02	0,000	19,83
C	2	12,235	6,117	7,20	0,006	2,38
D	2	3,842	1,921	2,26	0,136	0,75
E	2	3,262	1,631	1,92	0,179	0,63
Hata	16	13,592	0,849			2,64
Topla	26	514,222				100

Çizelge 4'te yer alan F değerleri dikkate alınarak baskı parametrelerinin önem düzeyleri belirlenmiştir. Çizelgenin son sütunu, Ra ve σç üzerinde her bir baskı parametresinin etki düzeyinin yüzde değerini göstermektedir. Çizelge 3'e göre A, B, C, D ve E faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki yüzde etki oranları sırasıyla %32,10 %2,86 %24,21 %28,67 ve %8 olarak bulunmuştur. Çekme dayanımı bakımından değerlendirildiğinde ise A, B, C, D ve E faktörlerinin yüzde etki oranları sırasıyla %73,77 %19,83 %2,38 %0,75 ve %0,63 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak hem yüzey pürüzlülüğünü hem de çekme dayanımını sırasıyla %32,10 ve %73,77 katkı oranları ile etkileyen en önemli baskı faktörü filament malzemesidir.

#### 4.4. Regresyon Analizi

Baskı parametreleri ve çıktı parametreleri arasındaki bağıntıyı sayısal olarak ifade edebilmek için regresyon analizi uygulanmıştır. Eşitlik 3, Eşitlik 4 ve Eşitlik 5'te sırasıyla ABS, PLA ve PETG filament malzemeleri için baskı parametrelerine bağlı olarak geliştirilen çekme dayanımı tahmin denklemleri görülmektedir;

$$\sigma\epsilon = 15,17 + 0,1177B + 4,12C - 0,0192D - 0,0197E \quad (3)$$

$$\sigma\epsilon = 23,84 + 0,1177B + 4,12C - 0,0192D - 0,0197E \quad (4)$$

$$\sigma\epsilon = 16,88 + 0,1177B + 4,12C - 0,0192D - 0,0197E \quad (5)$$

Doğrusal regresyon analizi aracılığıyla geliştirilen çekme dayanımı tahmin denklemleri için R<sup>2</sup> değeri 0,945 olarak elde edilmiştir. Oldukça yüksek belirleme katsayısına (R<sup>2</sup>) sahip olan tahmin denklemleri gerçek değerlere yakın değerler üretmektedir ve ayrıca, Şekil 7 (a)'da verilen her bir baskı kombinasyonu için elde edilen karşılaştırma grafiği de bu durumu doğrulamaktadır. Eşitlik 6, Eşitlik 7 ve Eşitlik 8'de sırasıyla ABS, PLA ve PETG filament malzemeleri için baskı parametrelerine bağlı olarak geliştirilen yüzey pürüzlülüğü tahmin denklemleri görülmektedir;

$$Ra = -1,682 - 0,00556B + 8,68C + 0,03906D + 0,0136E \quad (6)$$

$$Ra = -1,931 - 0,00556B + 8,68C + 0,03906D + 0,0136E \quad (7)$$

$$Ra = -0,067 - 0,00556B + 8,68C + 0,03906D + 0,0136E \quad (8)$$

Yüzey pürüzlülüğü tahmin denklemleri için R<sup>2</sup> değeri 0,832 olarak elde edilmiştir. R<sup>2</sup> değerinin 1'e yaklaştıkça bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki uyumun arttığı bildirilmiştir. Çekme dayanımına göre yüzey pürüzlülüğü için gerçek ve tahmini değerler arasındaki fark bir miktar fazladır. Bu durum üzerinde ana faktörlerin dışında nozul sıcaklığının, tabla sıcaklığı ve ekstrüder fan sıcaklığı gibi faktörlerin etkili olduğu düşünülmektedir. Şekil 7 (b)'da verilen her bir baskı kombinasyonu için elde edilen karşılaştırma grafiğinde gerçek değerler ve tahmini değerler arasındaki sapmalar görülmektedir. Geliştirilen tahmin

denklemlerinin ve optimizasyon işleminin başarısının görülmesi açısından doğrulama deneylerinin yapılması son derece önemlidir. Bu bağlamda, Eşitlik 9 ve 10 kullanılarak Ra ve  $\sigma_c$  için güven aralığı (CI) değerleri hesaplanmıştır.

$$n_{eff} = \frac{N}{1+T_{dof}} \quad (9)$$

$$CI_{Ra\ Fc\ P} = \sqrt{F_{\alpha,1,fe} V_e \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (10)$$

Bu denklemlerde yer alan N toplam deney sayısını, Tdof toplam serbestlik derecesini,  $F_{\alpha,1,fe}$  %95 güvenilirlik seviyesini,  $\alpha$  anlamlılık düzeyini, fe hatanın serbestlik derecesini,  $V_e$  hata varyansını,  $n_{eff}$  tekrarlanan etkinlik sayısını ve R doğrulama deneyleri için tekrar sayısını temsil etmektedir. Ra ve  $\sigma_c$  için Sinyal-gürültü (S/N) oranı analizi sonucuna göre en düşük yüzey pürüzlülüğü ve en yüksek çekme dayanımı değerini veren faktör grubu sırasıyla A2B3C1D2E1 ve A2B3C3D1E2 olarak elde edilmiştir.  $T_{Ra}$  (4,14) ve

$T_{\sigma_c}$  (22,12) baskı numunelerinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımı değerlerini göstermektedir. Optimum Ra değerinin hesaplanmasında Eşitlik 11 kullanılırken, optimum  $\sigma_c$  değerinin hesaplanmasında Eşitlik 12 kullanılmıştır;

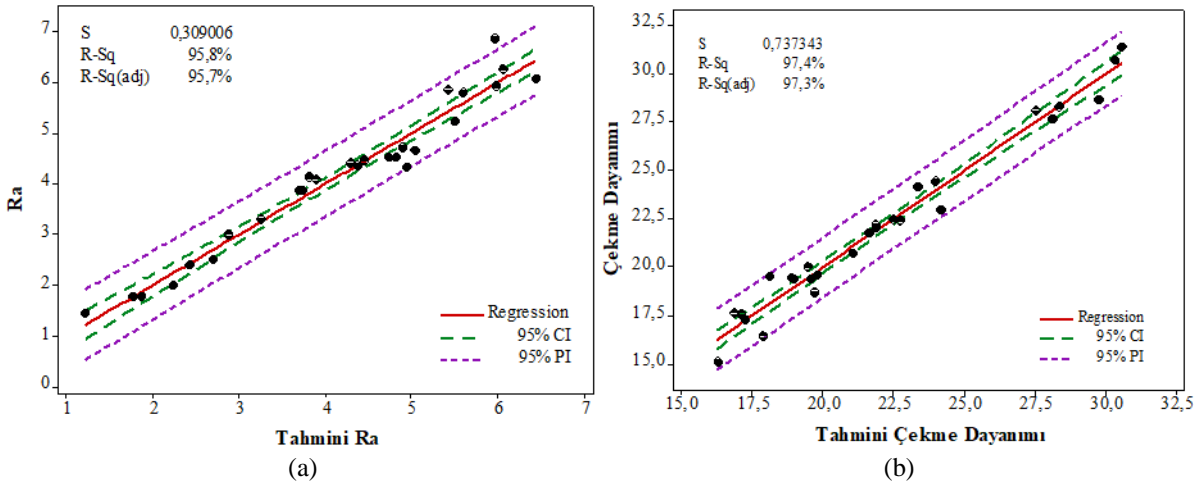
$$Ra_{opt} = (A_2 - T_{Ra}) + (B_3 - T_{Ra}) + (C_1 - T_{Ra}) + (D_1 - T_{Ra}) + (E_1 - T_{Ra}) + T_{Ra} \quad (11)$$

$$\sigma_{c\ opt} = (A_2 - T_{\sigma_c}) + (B_3 - T_{\sigma_c}) + (C_3 - T_{\sigma_c}) + (D_1 - T_{\sigma_c}) + (E_2 - T_{\sigma_c}) + T_{\sigma_c} \quad (12)$$

$Ra_{opt}$  değeri 1,412  $\mu\text{m}$  ve  $\sigma_{c\ opt}$  değeri 31,33 MPa olarak hesaplanmıştır.

$$[Ra_{opt} - CI_{Ra}] < Ra_{exp} < [Ra_{opt} + CI_{Ra}] = [1,412 - 0,79] < 1,44 < [1,412 + 0,79] = 0,622 < 1,44 < 2,202$$

$$[\sigma_{c\ opt} - CI_{\sigma_c}] < \sigma_{c\ exp} < [\sigma_{c\ opt} + CI_{\sigma_c}] = [31,33 - 1,90] < 32,18 < [31,33 + 1,9] = 29,43 < 32,18 < 33,23$$



Şekil 7. a) Ra ve b)  $\sigma_c$  için tahmini değerler ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımı değerleri güven aralığı sınırları içerisinde ve buna bağlı olarak proses parametrelerinin optimizasyonu 0,05 anlamlılık düzeyinde gerçekleştirilmiştir [24]. Ayrıca, optimizasyon işleminin doğruluğu yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımı için optimum seviyelerde ve rastgele seviyelerde test edilmiştir. Çizelge 5'te Taguchi yöntemi ve regresyon denklemleri kullanılarak elde edilen tahmini değerler ile bunlara karşılık gelen deneysel sonuçlar verilmiştir. Optimizasyon işleminin güvenilirliği açısından deneysel ve tahmini değerler arasındaki hata oranının %20'den az olması gerektiği bildirilmiştir [25].

Çizelge 5. Doğrulama test sonuçları.

Seviye	Deneysel	Tahmin	Hata (%)
<b>Ra</b>			
A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub> E <sub>1</sub> (optimum)	1,440	1,355	5,90
A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub> E <sub>1</sub> (Rastgele)	1,690	1,466	13,25
<b><math>\sigma_c</math></b>			
A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub> E <sub>2</sub> (optimum)	32,18	30,48	5,28
A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub> E <sub>1</sub> (Rastgele)	28,30	27,21	3,85

Yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımı için hesaplanan hata yüzdeleri kabul edilebilir sınırlar içindedir. Bu yüzden doğrulama testlerinden elde edilen sonuçlar başarılı bir optimizasyonu göstermektedir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Eriyik Yığıma Modelleme (FDM) teknolojisi ile üretilen numunelerin yüzey kalitesi ve çekme dayanımları üzerinde ABS, PLA ve PETG filament malzemeleri ve doluluk oranı, katman kalınlığı, doldurma hızı ve tarama açısı gibi baskı parametrelerinin etkileri deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- ABS ve PETG filamentlere göre PLA filament de yüzey pürüzlülüğünün sırasıyla ortalama %7,23 ve %54,19 oranında daha az olduğu tespit edilmiştir.
- Çekme testi sonuçlarına göre ABS ve PETG filamentlere kıyasla PLA filament de çekme dayanımının sırasıyla ortalama %46,46 ve %34,12 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür.
- En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri için ideal seviye grubu  $A_2B_3C_1D_2E_1$  (PLA filament malzemesi, %60 doluluk, 0,1 mm katman kalınlığı, 60 mm/s doldurma hızı ve  $30^\circ$  tarama açısı) olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde gerçekleştirilen baskı sonucunda elde edilen numunenin yüzey pürüzlülüğü değeri 1,44  $\mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir.
- Maksimum çekme dayanımı değeri ( $\sigma_c$ ) için optimum seviye grubu  $A_2B_3C_3D_1E_2$  (PLA filament malzemesi, %60 doluluk, 0,3 mm katman kalınlığı, 40 mm/s doldurma hızı ve  $45^\circ$  tarama açısı) olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde gerçekleştirilen baskı sonucunda elde edilen numunenin çekme dayanımı değeri 32,18 MPa olarak ölçülmüştür.
- Varyans analiz sonuçlarına göre 3D yazıcı kullanarak üretilen numunelerin hem yüzey pürüzlülüğü hem de çekme dayanımı üzerinde sırasıyla %32,10 ve %73,77 etki oranları ile filament malzemesi en etkili parametredir.
- 3D yazıcı kullanarak üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımını tahmin etmek için geliştirilen denklemlerin sırasıyla 0,832 ve 0,945  $R^2$

değerleri ile gerçek değerlere oldukça yakın sonuçlar göstermiştir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmaya laboratuvar imkânları ile katkı sağlayan, TÜBİTAK-SAGE Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsüne teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

1. Dizon, J.R.C., Espera, A.H., Chen, Q. and Advincula, R.C., "Mechanical characterization of 3D-printed polymers", *Addit Manuf.*, Vol. 20, Pages 44-67, 2018.
2. Mamo, H.B., Tura, A.D., Johnson, Santhosh, A., Ashok, N. and Kamalakara, Rao, D., "Modeling and analysis of flexural strength with fuzzy logic technique for a fused deposition modeling ABS component", *Mater Today Proc.*, Vol. 57, Pages 768-774, 2022.
3. Lee, J.Y., An, J. and Chua, C.K., "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials", *Appl Mater Today.*, Vol. 7, 120-133, 2017.
4. Polzin, C., Spath, S. and Seitz, H., "Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process", *Rapid Prototyp J.*, Vol. 19, Issue 1, Pages 37-43, 2013.
5. Melchels, F.P.W., Feijen, J. and Grijpma, D.W., "A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering", *Biomaterials*. Vol. 31, Issue 24, 6121-6130, 2010.
6. Stansbury, J.W. and Idacavage, M.J., "3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities", *Dent Mater*. Vol. 32, Issue 1, 54-64 2016.
7. Schuldt, S.J., Jagoda, J.A., Hoisington, A.J., Delorit, J.D., "A systematic review and analysis of the viability of 3D-printed construction in remote environments", *Autom Constr.* Vol. 125, Pages 103642, 2021.
8. Turner, B., Strong, R.A. and Gold, S., "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling", *Rapid Prototyp J.* Vol. 20, Issue 3, 192-204, 2014.
9. Günay, M., Gündüz, S., Yılmaz, H., Yaşar, N. and Kaçar, R., "PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu", *Politeknik Dergisi*, Cilt 23, Sayı 1, Sayfa 73-79, 2020.

10. Zhang, X., Chen, L., Mulholland, T. and Osswald, T.A., "Characterization of mechanical properties and fracture mode of PLA and copper/PLA composite part manufactured by fused deposition modeling", *SN Applied Sciences*, Vol. 1, Issue 6, Pages 1-12, 2019.
11. Uzun, M., Erdoğan, Y.E., "Eriyik Yığıma Modellemesi ile Üretimde Takviyesiz ve Takviyeli PLA Kullanımının Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması", *Journal of the Institute of Science and Technology*, Cilt 10, Sayı 4, Sayfa 2800-2808, 2020.
12. Melenka, G.W., Cheung, B.K.O., Schofield, J.S., Dawson, M.R. and Carey, J.P., "Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures", *Compos Struct*, Vol. 153, Pages 866–875, 2016.
13. Evlen, H., Özdemir, M.A., Çalışkan, A., "Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri", *Politeknik Dergisi*, Cilt 22, Sayı 4, Sayfa 1031-1037, 2019.
14. ABS, PLA, PETG Filament özellikleri, <https://zaxe.com/> Temmuz 21, 2022.
15. Samtas, G., "Optimization of cutting parameters using Taguchi method during the face milling of AISI 1040 with coated and uncoated inserts", *Düzce University Journal of Science & Technology*, Vol. 4, Pages 278-292, 2016.
16. Kara, F. and Öztürk, B., "Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard-machining of DIN 1.2738 mold steel", *Sensor Review*, Vol. 39, Issue 1, Pages 24-33, 2018.
17. Özlü, B., "Experimental and statistical investigation of the effects of cutting parameters on kerf quality and surface roughness in laser cutting of Al 5083 alloy", *Surface Review and Letters*, Vol. 28, Issue 10, Pages 2150093, 2021.
18. Kıvak, T., "Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts", *Measurement*, Vol. 50, Pages 19-28, 2014.
19. Sammaiah, P., Rushmamanisha, K., Praveenadevi, N., Reddy, I.R., "The influence of process parameters on the surface roughness of the 3d printed part in FDM process", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 981, Issue. 4, Pages 042021, 2020.
20. Shirmohammadi, M., Goushchi, S.J., Keshtiban, P.M. "Optimization of 3D printing process parameters to minimize surface roughness with hybrid artificial neural network model and particle swarm algorithm", *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 6, Issue 2, Pages 199-215, 2021.
21. Özsoy, K., Erçetin, A., Çevik, Z.A., "Comparison of Mechanical Properties of PLA and ABS Based Structures Produced by Fused Deposition Modelling Additive Manufacturing", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Cilt 27, Sayfa 802-809, 2021.
22. Akgün, M., "Optimization of Process Parameters Affecting Cutting Force, Power Consumption and Surface Roughness Using Taguchi-Based Gray Relational Analysis in Turning AISI 1040 Steel", *Surface Review and Letters*, Vol. 29, Issue 3, Pages 2250029, 2022.
23. Özlü, B., Akgün, M., Demir, H., "AA 6061 Alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 5, Sayı 2, Sayfa 151-158, 2019.
24. Yıldırım, Ç.V., "Grafit parçacık takviyeli nano akışkan kullanılarak AISI 316'nın frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının optimizasyonu", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Cilt 7, Sayı 1, Sayfa 326-341, 2019.
25. Cetin, M.H., Ozelik, B., Kuram, E., Demirbas, E., "Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, Pages 2049-2056, 2011.