





Investigation of mechanical and physical properties of PLA and steel-added PLA filament materials used in melted filament manufacturing method

Ali Osman Er , Osman Muhsin Aydın* 

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kırıkkale University, 71450, Yahşihan, Kırıkkale, Türkiye

Highlights:

- Additive manufacturing applications and methods
- Effect of metal additives used melted filament manufacturing method on mechanical and physical properties
- Effect of printing parameters on mechanical and physical properties

Keywords:

- Additive manufacturing
- Melted filament manufacturing
- Doped filament
- Mechanical and physical properties

Article Info:

Research Article
Received: 03.04.2023
Accepted: 07.07.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1276420

Correspondence:

Author: Osman Muhsin Aydın
e-mail: osmanaydn195@gmail.com
phone: +90 554 914 4770

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effects of metal additives added to thermoplastic materials used in the fused filament production method on mechanical and physical properties were investigated. Additionally, the effect of printing parameters on mechanical and physical properties was also examined. In Table A, the print parameters and test results of the tensile and impact test specimens produced are given in detail.

Table A. Impact and tensile test results of PLA and PLA-Steel materials

Test Specimens	Variable Printing Parameters				Test Results			
	Infill (%)	Printing Temperature (°C)	Printing Speed (mm/s)	Layer Thickness (mm)	Impact Strength (kJ/m ²)		Tensile Strength (MPa)	
					PLA	PLA-Steel	PLA	PLA-Steel
1	25	190	40	0.2	10.81	4.97	23.41	13.17
2	25	200	60	0.3	9.76	3.16	21.81	10.88
3	25	210	80	0.4	9.52	2.73	20.63	10.02
4	50	190	60	0.4	11.00	4.56	20.39	10.29
5	50	200	80	0.2	11.83	6.87	25.21	13.24
6	50	210	40	0.3	11.48	5.71	26.48	13.75
7	100	190	80	0.3	13.54	9.52	31.84	15.48
8	100	200	40	0.4	13.53	8.68	38.32	17.37
9	100	210	60	0.2	14.27	11.51	41.62	19.60

Purpose:

Examination of the effect of 410L stainless steel powders added to PLA material on impact strength, tensile strength and thermal conductivity.

Theory and Methods: Impact test specimen in accordance with TS EN ISO 179-1 standard, tensile test specimen in accordance with ASTM D638-1 standard were produced with PLA and PLA-Steel filament materials with 80% 410L stainless steel powder additives by weight. The thermal conductivity test specimens produced have a diameter of 60 mm and a wall thickness of 3 mm. Charpy impact, tensile and thermal conductivity tests are applied to the produced specimens. In the Charpy impact test, first the fracture energy and then the impact strength value are reached. The tensile test was carried out with a preload force of 0.05 KN and a tensile speed of 5 mm/min. Thermal conductivity experiments were carried out at room temperature. Specimens are produced at variable printing parameters. Noise / Signal ratio analysis of the effect of printing parameters on impact and tensile strength was performed. Scanning electron microscope examination was performed on the specimens.

Results: Impact and tensile strength values of PLA material are better. According to the scanning electron microscope images, the air gaps formed on the surface of the test specimens with PLA material are smaller and their number is less. Impact and tensile strength values increase when the infill is increased. As the layer thickness is increased, the impact and tensile strength values decrease. Increasing the printing temperature increases the tensile strength values, while increasing the printing speed decreases the tensile strength values. The thermal conductivity value of PLA material increases with the addition of steel powder.

Conclusion: By adding 80% by weight of 410L stainless steel powder to PLA material, the mechanical properties of the material decreased while the thermal conductivity values increased. Better results can be obtained with different additive ratios.



Ergiyik filament ile imalat yönteminde kullanılan PLA ve çelik katkılı PLA filament malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi

Ali Osman Er^{ID}, Osman Muhsin Aydın^{ID}*

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Yahşihan, Kırıkkale, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Eklemeli imalat uygulamaları ve yöntemleri
- Ergiyik filament ile imalat yönteminde kullanılan metal katkıların mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi
- Baskı parametrelerinin mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 03.04.2023

Kabul: 07.07.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1276420

Anahtar Kelimeler:

Eklemeli imalat,
ergiyik filament ile imalat,
katkılı filament,
mekanik ve fiziksel
özellikler

ÖZ

Eklemeli imalat yöntemleri içerisinde bulunan ergiyik filament ile imalat yönteminde termoplastik kompozit filament malzemeler kullanılabilir. Termoplastik kompozit filament malzemeler farklı termal, kimyasal, mekanik ve yüzey özelliklerinin elde edilmesine imkân vermektedir. Bu çalışmada PLA filament ve yaklaşık olarak ağırlıkça %80 oranında 410L çelik tozu katkısına sahip olan PLA-Çelik filament malzemeler darbe dayanımı, çekme dayanımı ve termal iletkenlik özellikleri açısından karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda PLA malzeme için en yüksek darbe dayanımı 14,27 kJ/m², en yüksek çekme dayanımı 41,62 MPa ve en yüksek termal iletkenlik 0,1364 W/mK değerinde ölçülmüştür. Çelik tozu katkılı PLA malzeme için en yüksek darbe dayanımı 11,51 kJ/m², en yüksek çekme dayanımı 19,06 MPa ve en yüksek termal iletkenlik 0,2758 W/mK değerinde ölçülmüştür. Böylelikle çelik tozu katkısı ile PLA malzemenin darbe ve çekme dayanımı değeri azalmış, termal iletkenlik değeri ise artmıştır. Deney numunelerinin üretiminde dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin farklı seviyeleri kullanılmıştır. Bu baskı parametrelerinin darbe ve çekme dayanımı değerlerine olan etkisi incelenmiştir. Baskı parametrelerinin etkileri ANOVA analizi sonuçları ile ortaya konmuştur. Ayrıca taramalı elektron mikroskopu ile malzemelerin mikroyapısı incelenmiştir.

Investigation of mechanical and physical properties of PLA and steel-added PLA filament materials used in melted filament manufacturing method

H I G H L I G H T S

- Additive manufacturing applications and methods
- Effect of metal additives used melted filament manufacturing method on mechanical and physical properties
- Effect of printing parameters on mechanical and physical properties

Article Info

Research Article

Received: 03.04.2023

Accepted: 07.07.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1276420

Keywords:

Additive manufacturing,
melted filament
manufacturing,
doped filament,
mechanical and physical
properties

ABSTRACT

Thermoplastic composite filament materials can be used in the manufacturing method with melted filament, which is among the additive manufacturing methods. Thermoplastic composite filament materials allow obtaining different thermal, chemical, mechanical and surface properties. In this study, PLA filament and PLA-Steel filament materials with approximately 80% by weight of 410L steel powder were compared in terms of impact strength, tensile strength and thermal conductivity properties. As a result of the experiments carried out, the highest impact strength was measured at 14.27 kJ/m², the highest tensile strength was 41.62 MPa and the highest thermal conductivity was 0.1364 W/mK for PLA material. The highest impact strength was measured at 11.51 kJ/m², the highest tensile strength was 19.06 MPa and the highest thermal conductivity was 0.2758 W/mK for the steel powder added PLA material. Thus, the impact and tensile strength value of PLA material decreased and the thermal conductivity value increased with the addition of steel powder. Different levels of filling ratio, printing temperature, printing speed and layer thickness printing parameters were used in the production of test specimens. The effects of these pressure parameters on the impact and tensile strength values were investigated. The effects of printing parameters were revealed by the results of ANOVA analysis. In addition, the microstructure of the materials was investigated by scanning electron microscopy.

1. Giriş (Introduction)

Ekleme imalat, parçaların üretilmesi için bilgisayar destekli tasarım programları ile oluşturulan 3 boyutlu katı modelin verilerinden faydalanarak malzemelerin katmanlar halinde üst üste biriktirilmesi şeklinde tanımlanabilir [1]. Ekleme imalatın ortaya çıkışı prototipleme uygulamalarında kullanılmasıyla olmuştur. Günümüzde ekleme imalat; hızlı prototipleme, hızlı imalat, hızlı takımlama ve onarım uygulamalarında kullanılmaktadır [2-4]. Ekleme imalat; otomotiv, havacılık ve medikal sektörlerinde kendine daha fazla yer bulmaktadır [5, 6].

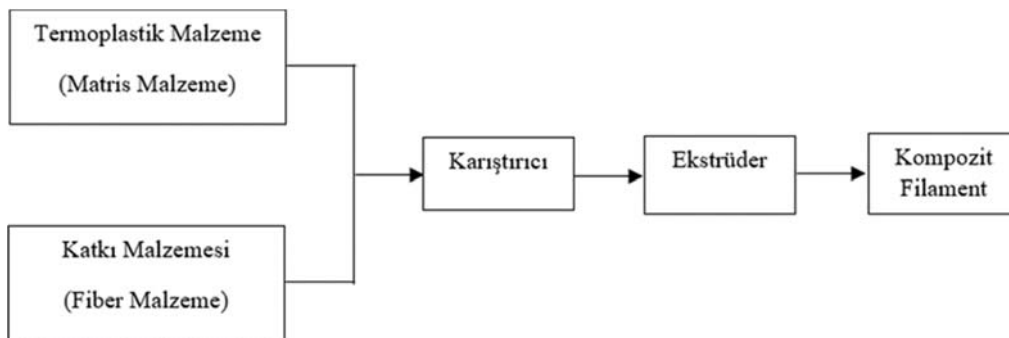
Ekleme imalat içerisinde yer alan yöntemlerde polimer, metal, seramik gibi malzemeler kullanılmaktadır. Polimer malzemeler üretim işlemleri için filament, reçine veya toz formunda, metal malzemeler toz veya tel formunda, seramik malzemeler ise toz formunda bulunmaktadır. Kullanılan malzemeler termal enerji, UV ışını, lazer ışını, elektron ışını gibi güç kaynakları ile şekillendirilmektedir. Ekleme imalat yöntemlerini, geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırdığımızda ekleme imalatın öne çıkan bir avantajı üretilecek parçalarda tasarım serbestliği sağlamasıdır. Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi mümkün olmayan parçalar ekleme imalat yöntemleri ile rahatlıkla üretilmektedir [7-10].

Ergiyik filament ile imalat, termoplastik malzemelerin termal enerjiyle ergiyik hale getirilmesi ve daha sonra nozuldan ekstrüze edilerek üretilen parça geometrisine göre katmanlar halinde inşa alanında biriktirilmesi ile üretim işleminin gerçekleştiği bir ekleme imalat yöntemidir [11, 12]. Ergiyik filament ile imalat yöntemi genellikle prototip parça üretiminde veya düşük seri üretim hacmine sahip işlevsel parçaların üretiminde kullanılmaktadır [13]. Ergiyik filament ile imalat yönteminde oldukça çeşitli sayıda termoplastik malzeme kullanılabilir. Bu malzemelere; PLA, ABS, Naylon ve PET-G örnek olarak verilebilir [14]. Gelişen teknoloji ve yapılan çalışmalar doğrultusunda ergiyik filament ile imalat yönteminde termoplastik kompozit malzemelerin kullanımına da olanak sağlanmaktadır. Termoplastik malzemelere karbon, metal, seramik ve ahşap gibi katkı maddeleri eklenerek kompozit filament malzemeler üretilmektedir. Termoplastik kompozit filament malzemeler ile farklı termal, kimyasal, mekanik ve yüzey özelliklerine sahip parçalar üretilmektedir [15].

Şekil 1'de gösterildiği gibi matris ve fiber yapıyı oluşturan malzemelerin homojen bir şekilde karışması için granül formunda bulunan termoplastik malzemeler ile katkı malzemeleri bir karıştırıcı yardımıyla karıştırılır. Daha sonra uygun çaplarda ekstrüze edilerek kompozit filament malzemeler haline getirilmektedir [16]. Literatürde yer alan kompozit (katkılı) PLA filamentler ile ilgili yapılan çalışmaları incelediğimizde PLA malzemeye farklı katkı maddeleri

eklenerek, bu katkı maddelerinin mekanik, fiziksel vb. özelliklere olan etkileri araştırılmıştır. Bazı çalışmalarda değişken baskı parametre değerleri kullanılarak, baskı parametrelerinin üretilen parçaların mekanik, fiziksel vb. özelliklere olan etkileri de ortaya konmuştur.

Güleç, farklı oranda karbon fiber katkısına sahip PLA filament malzemelerin çekme dayanımını incelemiştir. Deneysel sonuçlarda karbon fiber katkısı ile PLA malzemenin çekme dayanımı değerinin düştüğünü ve artan karbon fiber oranı ile çekme dayanımı değerlerindeki düşüşlerin büyüdüğünü belirtmiştir [17]. Ayrılmış vd., %30 oranında ahşap katkıya sahip bir PLA malzeme kullanarak farklı katman kalınlığına sahip deney numuneleri üretmişlerdir. Artan katman kalınlığı değeri ile numunelerin yoğunluklarının azaldığını ve bu sebeple çekme ve eğilme dayanımı değerlerinde düşüşlerin olduğunu belirtmişlerdir [18]. Lee ve Yu Wu, karbon fiber katkısına sahip PLA malzeme tarama açısı, dolgu oranı, yatak sıcaklığı, baskı sıcaklığı ve baskı hızı parametrelerinin darbe ve çekme dayanımı değerlerine olan etkisini incelemiştir. Deneysel sonuçlarda dolgu oranının artırılması ile çapraz tarama açısı kullanımının mekanik özellikleri iyileştirdiğini, diğer baskı parametrelerinin değiştirilmesiyle mekanik özelliklerde oluşan değişimlerin doğrusal sonuçlar vermediğini belirtmişlerdir [19]. Reverte vd., karbon fiber katkısına sahip PLA malzemenin çekme, eğilme ve kayma özelliklerini incelemiştir. Deneysel sonuçlarda karbon fiber katkısı ile gerilim değerlerinin yükseldiği, gerinim değerlerinin ise düştüğünü ortaya koymuşlardır [20]. Oksiuta vd., %5 oranında polietilen, magnezyum ve demir katkısına sahip farklı PLA filament malzemeler üretmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çekme deneyi sonuçlarına göre demir katkısı PLA malzemenin çekme dayanımı değerini yükseltmiş, polietilen ve magnezyum katkısı ise düşürmüştür. Malzemelere uyguladıkları sertlik testi ile polietilen, magnezyum ve demir katkısının PLA malzemenin sertlik değerini yükselttiğini ve en yüksek sertlik değerinin demir katkıya sahip PLA malzeme olduğunu belirlemişlerdir [21]. Bulanda vd., bakır, bronz, pirinç ve çelik katkıya sahip PLA malzemelerin darbe dayanımı ve sertlik değerlerini incelemiştir. Deneysel sonuçlarda eklenen katkı maddeleri ile PLA malzemenin darbe dayanımı ve sertlik değerinin düştüğünü ortaya koymuşlardır. Kompozit filament malzemeler içerisinde en yüksek darbe dayanımı değeri çelik katkıya sahip malzeme, en yüksek sertlik değeri ise bakır katkıya sahip malzeme olduğunu belirlemişlerdir [22]. Jiang ve Ning, 316L paslanmaz çelik katkılı PLA filament malzemelerin basma dayanımı ve termal özelliklerini incelemiştir. Kompozit filament malzemeleri %5, %10 ve %15 çelik katkı oranı ile üretmişlerdir. 316L paslanmaz çelik tozu katkısının PLA malzemenin basma dayanımı değerini yükselttiğini, en yüksek basma dayanımı değerinin %10 katkıya sahip kompozit filament malzeme ölçüldüğünü belirtmişlerdir. Katkı oranının %10'dan fazla olduğu durumda SEM görüntüsü sonuçlarına göre katmanlar arasında oluşan hava boşluğu sayısının arttığını ve böylelikle basma



Şekil 1. Kompozit (Katkılı) filament üretimi (Composite filament production) [16]

dayanımı değerlerinde düşüşlerin meydana geldiğini vurgulamışlardır. 316L paslanmaz çelik tozu PLA malzemenin termal genleşme değerini düşürmüştür. Böylelikle çelik tozu katkısı ile PLA malzemenin termal genleşme katsayısında oluşan düşüşlerin boyutsal doğruluğu artırdığını belirtmişlerdir [23]. Selvamani vd., %15 ve %70 oranında pirinç katkıya sahip PLA malzemelerin basma ve eğilme özelliklerini incelemişlerdir. Pirinç katkı oranının artması basma ve eğilme dayanımı değerlerini düşürmüştür. Ayrıca deney numunelerini farklı dolgu desenleri ile üretmek dolgu desenlerinin basma ve eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini de incelemişlerdir. En yüksek basma dayanımı değeri ızgara dolgu deseninde, en yüksek eğilme dayanımı değerinin eş merkezli dolgu deseninde oluştuğunu belirtmişlerdir [24].

Literatürde yer alan çalışmalarda karbon fiber, ahşap, çelik, polietilen, magnezyum, demir, bakır, bronz, pirinç gibi katkı maddeleri kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalar doğrultusunda, yaptığımız bu çalışmada paslanmaz çelik tozu katkısının ne gibi bir etkisi olacağını araştırılmak istenilmiştir. Literatür çalışmalarından farklı olacak şekilde paslanmaz çelik tozu malzemenin kalitesini 410L olarak belirlenmiştir. PLA ve 410L paslanmaz çelik tozu karışımında ağırlıkça çelik tozunun fazla olması istenildiği için %80 çelik tozu ve %20 PLA malzemeye sahip bir kompozit filamentin kullanılması tercih edilmiştir. Bu karışım oranıyla 410L paslanmaz çelik tozu katkısının, PLA malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinde ne gibi değişimlere yol açacağı incelenmiştir. Aynı zamanda deney numuneleri üretilirken farklı baskı parametre değerleri kullanılmıştır ve baskı parametrelerinin mekanik ve fiziksel özelliklere olan etkisi ortaya konmuştur.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

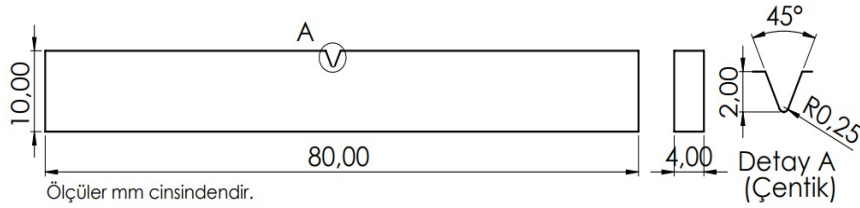
Bu çalışma kapsamında ergiyik filament ile imalat yöntemi kullanılarak, PLA ve %80 oranında 410L paslanmaz çelik tozu katkısı

içeren PLA filament malzemeye darbe, çekme ve termal iletkenlik deneyi uygulanmıştır. Darbe deney numuneleri TS EN ISO 179-1 standardına (Şekil 2) göre [25], çekme deney numuneleri ASTM D638-1 standardına (Şekil 3) göre üretilmiştir [26]. Termal iletkenlik deney numuneleri ise 60 mm çap ve 3 mm kalınlığa sahip olacak biçimde üretilmiştir. Deney numunelerinin üretiminde Ender-3 Pro marka üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır. PLA filament malzeme 3D3 Teknoloji firmasından, 410L paslanmaz çelik tozu katkısı içeren PLA filament malzeme Colorfabb firmasından temin edilmiştir. Filament malzemeler 1,75 mm çapa sahiptir.

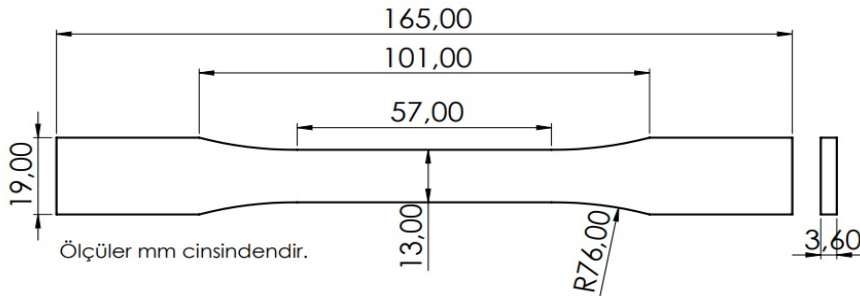
Deney numunelerinin katı modelleri Solidworks programı ile oluşturulmuştur. Numunelerin dilimleme işlemi ise Ultimaker Cura programı ile yapılmıştır. Deney numuneleri sabit ve değişken baskı parametrelerine göre üretilmiştir. Baskı parametreleri dilimleme işlemi esnasında seçilmiştir. Tablo 1'de sabit baskı parametreleri, Tablo 2'de ise değişken baskı parametreleri verilmiştir. Sabit ve değişken baskı parametreleri, malzemeleri üreten firmaların tavsiye edilen baskı ayarı kılavuzlarına göre seçilmiştir. Deney numunelerinin üretiminde 0,4 mm çapa sahip nozul kullanılmıştır.

Tablo 1. Sabit baskı parametreleri (Fixed printing parameters)

Sabit Baskı Parametreleri	Değerler
Hat Genişliği	0,4 mm
Duvar Hattı	3x0,4=1,2 mm
Alt Kalınlık	1,2 mm
Üst Kalınlık	1,2 mm
Kabuk	1,2 mm
İlk Katman Yazdırma Sıcaklığı	210°C
Baskı Yatağı Sıcaklığı	60°C
İlk Katman Yazdırma Hızı	20 mm/s
Dolgu Şekli	İzgara
Akış	%110



Şekil 2. Charpy darbe deney numunesi ölçüleri ve çentik tipi (Charpy impact test specimen dimensions and notch type) [25]



Şekil 3. Çekme deney numunesi ölçüleri (Tensile test specimen dimensions) [26]

Tablo 2. Değişken baskı parametreleri ve seviyeleri (Variable printing parameters and levels)

Dolgu Oranı (%)	Baskı Sıcaklığı (°C)	Baskı Hızı (mm/s)	Katman Kalınlığı (mm)
1 25	190	40	0,2
2 50	200	60	0,3
3 100	210	80	0,4

Deney numune sayısının azaltılması ve optimum sonuçların elde edilmesi için Taguchi L9 ortogonal dizisi metodundan yararlanılmıştır. Deney numuneleri Tablo 3'te yer alan baskı parametresi değerlerinde üretilmiştir.

TS EN ISO 179-1 standardına göre üretilen darbe deney numuneleri (Şekil 4), deney sonuçlarının doğruluğunun sağlanabilmesi için 9 farklı parametre değerinin her birinden 3 adet üretilmiştir. Böylelikle toplamda 54 adet darbe deney numunesi üretilmiştir. Charpy darbe deneyi ile numunelerin kırılma enerjisi değerine ulaşılmaktadır. Kırılma enerjisi, deney cihazında bulunan çekicinin ilk durumu ile deney numunesini kırdıktan sonraki son durumu arasındaki potansiyel enerji farkından bulunmaktadır. Kırılma enerjisi değerini bulmak için Eş.1'de verilen eşitlikten yararlanılmaktadır. Darbe dayanımı değerine de kırılma enerjisi üzerinden ulaşılmaktadır. Darbe dayanımı değerini bulmak için Eş.2'de verilen eşitlikten yararlanılmaktadır. Eş.2'de bulunan kesit alanı değeri deney numunesi üzerinde yer alan çentik bölgesinin altında kalan genişlik ölçüsü ile deney numunesinin kalınlık ölçüsünün çarpımı ile bulunmaktadır. V tipi çentiğe sahip olan Charpy darbe deney numunesinde genişlik ölçüsü 10 mm, çentik derinlik ise 2 mm ölçüsündedir. Bu durumda çentik bölgesi altında kalan genişlik 8 mm değerindedir. Deney numuneleri 4 mm kalınlıkta üretildiği için $8 \times 4 = 32 \text{ mm}^2$ eşitliği ile kesit alanı değerine ulaşılabilmektedir.

$$Kırılma \text{ enerjisi} = G.l.(cos\beta - cos\alpha) \quad (1)$$

$G = m.g$ G = çekiç ağırlığı m = çekiç kütlesi g = yerçekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
 l = sarkaç boyu α = düşme açısı β = yükselme açısı

$$Darbe \text{ Dayanımı} = \frac{Kırılma \text{ Enerjisi (Joule)}}{Kesit \text{ Alanı (mm}^2)} \quad (2)$$

ASTM D638-1 standardına göre üretilen çekme deney numuneleri (Şekil 5), deney sonuçlarının doğruluğunun sağlanabilmesi için aynı baskı parametresine sahip deney numunelerinden 2 adet üretilmiştir. Böylelikle her bir malzeme için 18 adet toplamda 36 adet çekme deney numunesi üretilmiştir.

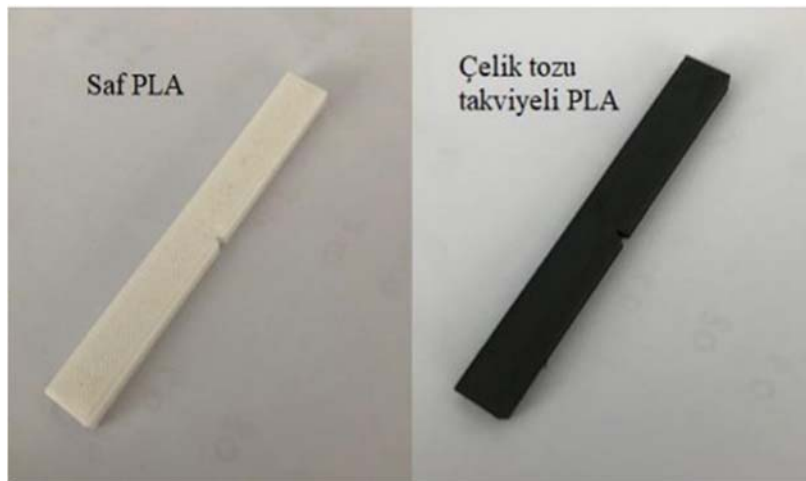
Darbe deneyleri için Terco MT-3016 deney cihazı kullanılmıştır. Çekme deneyleri için Instron 3369 Universal deney cihazı kullanılmıştır. Çekme deneyleri 0,05 KN ön yük kuvvetinde ve 5 mm/min çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Termal iletkenlik deneyleri için TA Instruments FOX 50 cihazı kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ile malzemelerin mikroyapısı incelenmiştir. İnceleme işlemi Hitachi-SU5000 cihazı ile yapılmıştır. Malzemelerin elektriksel iletkenlik değerleri düşük olduğu için deney numunelerinin yüzeyleri iletken bir malzeme ile kaplanmıştır. Kaplama malzemesi olarak saf altın kullanılmıştır. Leica EM ACE200 cihazı ile gerçekleştirilen kaplama işleminde kaplama kalınlığı yaklaşık olarak 7.5 nanometre ölçüsündedir. Şekil 6'da termal iletkenlik ve taramalı elektron mikroskobu incelemesi için üretilmiş deney numuneleri yer almaktadır.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Darbe, çekme ve termal iletkenlik deneyleri sonucunda PLA ve PLA-Çelik malzemelerine sahip deney numunelerinin darbe dayanımı, çekme dayanımı ve termal iletkenlik değerleri tayin edilmiştir.

Tablo 3. Deney numunelerinin değişken baskı parametre değerleri (Variable printing parameter values of test specimens)

Deney Numunesi	Kontrol Parametreleri ve Seviyeleri			
	Dolgu Oranı (%)	Baskı Sıcaklığı(°C)	Baskı Hızı(mm/s)	Katman Kalınlığı(mm)
1	25	190	40	0,2
2	25	200	60	0,3
3	25	210	80	0,4
4	50	190	60	0,4
5	50	200	80	0,2
6	50	210	40	0,3
7	100	190	80	0,3
8	100	200	40	0,4
9	100	210	60	0,2



Şekil 4. Darbe deney numuneleri (Impact test specimens)

Charpy darbe deneyi sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Tabloda yer alan deney numunesi sütunu farklı baskı parametrelerine sahip olan deney numunelerinin numaralarını göstermektedir. Her bir deney numunesi grubu için deneyler 3 kez tekrar edilmiştir. Tekrar edilen deneylerin sonuçları Tablo 4'te Romen rakamı ile gösterilen I, II ve III sütunlarında verilmiştir.

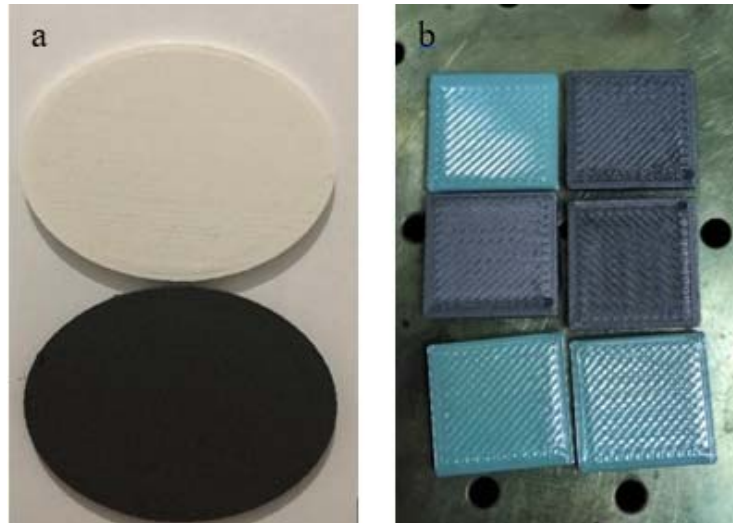
Tablo 4'te gerçekleştirilen darbe deneylerinin ortalama değerleri yer almaktadır. Ortalama değerler üzerinden her bir deney numunesi grubu için standart sapma hesaplaması yapılmıştır. Standart sapma değerleri her iki malzeme için de genel olarak yaklaşık değerlerdedir.

Tekrar edilen deneylerdeki sonuçlar ortalama değere yakın bir değerde oluşmuştur.

Şekil 7'de PLA ve PLA-Çelik malzemeye sahip olan deney numunelerinin ortalama değerler üzerinden darbe dayanımı değerleri karşılaştırılmıştır. Darbe deneyleri sonucunda tüm baskı parametrelerinde PLA malzemenin darbe dayanımı daha iyi seviyede olmuştur [22]. Deneyler sonucunda en yüksek darbe dayanımı değeri her iki malzeme için de 9 numaralı numunede olmuştur. En yüksek darbe dayanımı PLA malzeme için 14,27 kJ/m², PLA-Çelik malzeme için 11,51 kJ/m² değerindedir. En düşük darbe dayanımı değeri ise her



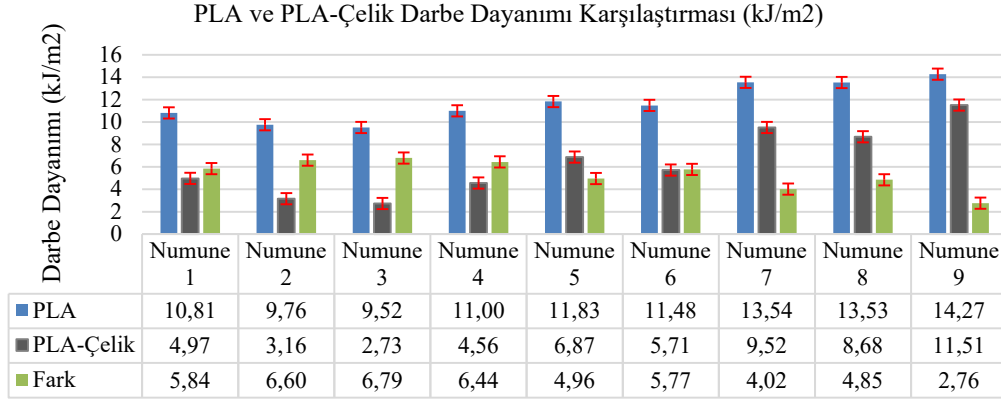
Şekil 5. Çekme deney numuneleri (Tensile test specimens)



Şekil 6. a-) Termal iletkenlik deney numuneleri (Thermal conductivity test specimens) b-) Taramalı elektron mikroskobu incelemesi için kaplanan deney numuneleri (Test specimens coated for scanning electron microscopy examination)

Tablo 4. Charpy darbe deneyi sonuçları (Charpy impact test results)

Deney numunesi	Darbe Dayanımı (kJ/m ²)					Standart Sapma	PLA-Çelik				
	PLA						PLA-Çelik				
	I	II	III	Ort.	Standart Sapma	I	II	III	Ort.	Standart Sapma	
1	10,87	11,00	10,56	10,81	0,22	5,05	5,12	4,74	4,97	0,20	
2	9,82	9,63	9,82	9,76	0,10	3,42	3,00	3,06	3,16	0,22	
3	9,76	9,39	9,39	9,52	0,21	2,87	2,72	2,60	2,73	0,13	
4	11,19	10,96	10,87	11,00	0,16	4,75	4,46	4,46	4,56	0,16	
5	11,90	12,03	11,56	11,83	0,24	6,79	6,70	7,12	6,87	0,22	
6	11,79	11,25	11,40	11,48	0,27	5,98	5,50	5,65	5,71	0,24	
7	13,54	13,41	13,67	13,54	0,13	9,55	9,38	9,63	9,52	0,12	
8	13,60	13,60	13,40	13,53	0,11	8,87	8,66	8,51	8,68	0,18	
9	14,40	14,00	14,40	14,27	0,23	11,25	11,64	11,64	11,51	0,22	



Şekil 7. PLA ve PLA-Çelik malzemeye sahip deney numunelerinin darbe dayanımı değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of impact strength values of test specimens with PLA and PLA-Steel material)

Tablo 5. Çekme deneyi sonuçları (Tensile test results)

Deney numunesi	Çekme Dayanımı (MPa)				Çekme Dayanımı (MPa)			
	PLA		Ortalama	Standart Sapma	PLA-Çelik		Ortalama	Standart Sapma
I	II	I			II			
1	23,13	23,69	23,41	0,40	13,17	13,17	13,17	0
2	22,02	21,60	21,81	0,30	10,57	11,18	10,88	0,43
3	20,50	20,76	20,63	0,18	10,41	9,63	10,02	0,55
4	20,20	20,59	20,39	0,27	10,87	9,71	10,29	0,82
5	25,33	25,09	25,21	0,17	13,31	13,16	13,24	0,10
6	26,73	26,22	26,48	0,35	13,79	13,71	13,75	0,05
7	32,27	31,40	31,84	0,62	15,91	15,05	15,48	0,60
8	38,44	38,21	38,32	0,15	17,55	17,18	17,37	0,25
9	42,31	40,93	41,62	0,97	20,20	18,99	19,60	0,85

iki malzeme için de 3 numaralı numunede olmuştur. En düşük darbe dayanımı PLA malzeme için 9,52 kJ/m², PLA-Çelik malzeme için 2,73 kJ/m² değerindedir. Tüm darbe dayanımı değerlerinin ortalaması alınarak iki malzeme arasında oluşan ortalama darbe dayanımı farkı 5,33 kJ/m² değerindedir. Böylelikle 410L çelik tozu katkısı ile PLA malzemenin darbe dayanımı değerinde yaklaşık olarak %55 oranında bir azalma görülmüştür. PLA malzemeye sahip deney numunelerinin darbe dayanımı sonuçlarının standart sapması 1,70 değerinde iken PLA-Çelik malzemeye sahip deney numunelerinin darbe dayanımı sonuçlarının standart sapması 2,98 değerindedir. Bu sebeple baskı parametre değerlerinin değişmesiyle PLA-Çelik malzemeye sahip deney numunelerinin darbe dayanımı değerlerinde daha büyük değişimler oluştuğu anlaşılabilmektedir.

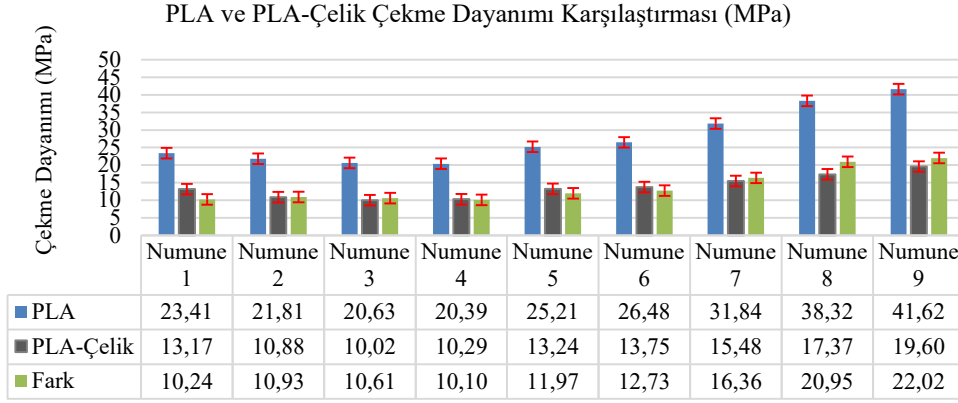
Çekme deneyi sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda yer alan deney numunesi sütunu farklı baskı parametrelerine sahip olan deney numunelerinin numaralarını göstermektedir. Her bir deney numunesi grubu için deneyler 2 kez tekrar edilmiştir. Tekrar edilen deneylerin sonuçları Tablo 5'te Romen rakamı ile gösterilen I ve II sütunlarında verilmiştir.

Tablo 5'te gerçekleştirilen çekme deneylerinin ortalama değerleri yer almaktadır. Ortalama değerler üzerinden her bir deney numunesi grubu için standart sapma hesaplaması yapılmıştır. Standart sapma değerleri her iki malzeme için de genel olarak yaklaşık değerlerdedir. Tekrar edilen deneylerdeki sonuçlar ortalama değere yakın bir şekilde olmuştur.

Şekil 8'de PLA ve PLA-Çelik malzemeye sahip olan deney numunelerinin ortalama değerler üzerinden çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. Çekme deneyleri sonucunda tüm baskı

parametrelerinde PLA malzemenin çekme dayanımı daha iyi seviyede olmuştur [27]. Deneyler sonucunda en yüksek çekme dayanımı değeri her iki malzeme için de 9 numaralı numunede olmuştur. En yüksek çekme dayanımı PLA malzeme için 41,62 MPa, PLA-Çelik malzeme için 19,6 MPa değerindedir. En düşük çekme dayanımı değeri ise her iki malzeme için de 3 numaralı numunede olmuştur. En düşük çekme dayanımı PLA malzeme için 20,63 MPa, PLA-Çelik malzeme için 10,02 MPa değerindedir. Tüm çekme dayanımı değerlerinin ortalaması alınarak iki malzeme arasında oluşan ortalama çekme dayanımı farkı 14 MPa değerindedir. Böylelikle çelik tozu katkısı ile PLA malzemenin çekme dayanımı değerinde yaklaşık olarak %50 oranında bir azalma görülmüştür. PLA malzemeye sahip deney numunelerinin darbe dayanımı sonuçlarının standart sapması 7,80 değerinde iken PLA-Çelik malzemeye sahip deney numunelerinin darbe dayanımı sonuçlarının standart sapması 3,26 değerindedir. Bu sebeple baskı parametre değerlerinin değişmesiyle PLA malzemeye sahip deney numunelerinin çekme dayanımı değerlerinde daha büyük değişimler oluştuğu anlaşılabilmektedir.

Şekil 9'da a grafiğinde verilen Sinyal/Gürültü (S/N) oranlarında PLA malzeme için dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin darbe dayanımı değerlerine olan etkisi gösterilmektedir. Sinyal/Gürültü oranları, en büyük en iyi tipinde hazırlanmıştır. Böylelikle her parametre için hesaplanan Sinyal/Gürültü oranının en yüksek olduğu değer en iyi deney sonucunu (darbe dayanımı değerinin en yüksek olduğu deney sonucu) göstermektedir [28]. Dolgu oranı için en iyi darbe dayanımı değeri 3. seviyede (%100) olmuştur. Dolgu oranının artırılması ile darbe dayanımı değerleri yükselmektedir [29]. Baskı sıcaklığı parametresinin farklı seviyelerde kullanılması darbe dayanımı üzerinde kayda değer bir etki göstermemiştir. Baskı hızı için en iyi



Şekil 8. PLA ve PLA-Çelik malzemeye sahip deney numunelerinin çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması
(Comparison of tensile strength values of test specimens with PLA and PLA-Steel material)

darbe dayanımı değeri 1. seviyede (40 mm/s) olmuştur. Artan baskı hızı değeri ile darbe dayanımı değerlerinde düşüşler görülmektedir [30]. Katman kalınlığı için en iyi darbe dayanımı değeri 1. seviyede (0,2 mm) olmuştur. Artan katman kalınlığı değeri ile darbe dayanımı değerlerinde düşüşler görülmektedir [31]. PLA malzemede S/N oranlarından yola çıkarak darbe dayanımı için optimum baskı parametre değerleri %100 dolgu oranı, 190°C baskı sıcaklığı, 40 mm/s baskı hızı ve 0,2 mm katman kalınlığıdır.

Şekil 9'b grafiğinde verilen Sinyal/Gürültü (S/N) oranlarında PLA-Çelik malzeme için dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin darbe dayanımı değerlerine olan etkisi gösterilmektedir. Dolgu oranı için en iyi darbe dayanımı değeri 3. seviyede (%100) olmuştur. Dolgu oranının artırılması ile darbe dayanımı değerleri yükselmektedir [32]. Baskı hızı için en iyi darbe dayanımı değeri 1. seviyede (40 mm/s) olmuştur. Artan baskı hızı değeri ile darbe dayanımı değerlerinde düşüşler görülmektedir [32]. Katman kalınlığı için en iyi darbe dayanımı değeri 1. seviyede (0,2 mm) olmuştur. Artan katman kalınlığı değeri ile darbe dayanımı değerlerinde düşüşler görülmektedir [32]. Baskı sıcaklığı için en iyi darbe dayanımı değeri 1. seviye (190°C) olmuştur. Baskı sıcaklığı parametresinin değiştirilmesi doğrusal sonuçlar vermemiştir [33]. PLA-Çelik malzemede S/N oranlarından yola çıkarak darbe dayanımı için optimum baskı parametre değerleri %100 dolgu oranı, 190°C baskı sıcaklığı, 40 mm/s baskı hızı ve 0,2 mm katman kalınlığıdır.

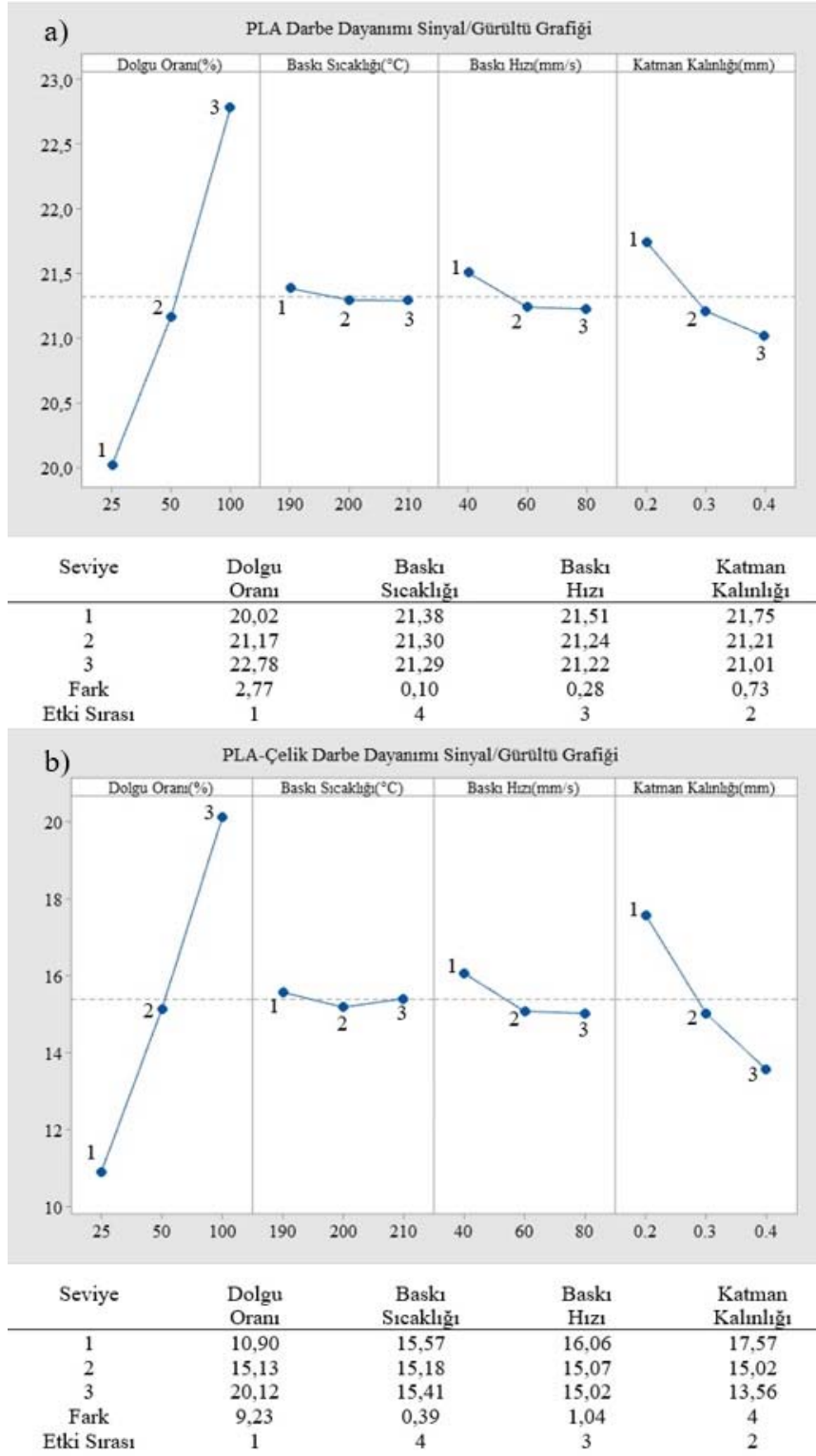
Dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin darbe dayanımına olan etkisi için ANOVA analizi yapılmıştır. ANOVA analizi Minitab programı ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6'da PLA malzeme için baskı parametrelerinin darbe dayanımına olan etkisinin ANOVA analizi sonuçları yer almaktadır. ANOVA analizinde, kaynak faktörlerinin etkisinin anlamlı olabilmesi için P değerinin 0,05 sayısından küçük olması gerekmektedir. En yüksek F değerine sahip olan kaynak faktörü de en önemli etkiyi göstermektedir [34]. Tablo 3.1'i incelediğimizde, dolgu oranı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin P değeri 0,05 sayısından küçük olduğu için darbe dayanımı değerlerine anlamlı bir etki göstermiştir. Baskı sıcaklığı ve baskı hızı parametrelerinin P değeri 0,05 sayısından büyük olduğu için darbe dayanımı değerlerine olan etkisi anlamlı değildir. Darbe dayanımı değerlerine en büyük etkiyi F değerine bakarak dolgu oranı baskı parametresinin ortaya koymuş olduğunu görülmektedir. Dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı parametrelerinin darbe dayanımına katkı yüzdeleri sırasıyla %92,65, %0,01, %0,64 ve %5,89 olduğu tabloda verilmiştir.

Tablo 7'de PLA-Çelik malzeme için baskı parametrelerinin darbe dayanımına olan etkisinin ANOVA analizi sonuçları yer almaktadır. ANOVA analizinde, kaynak faktörlerinin etkisinin anlamlı olabilmesi için P değerinin 0,05 sayısından küçük olması gerekmektedir. En yüksek F değerine sahip olan kaynak faktörü de en önemli etkiyi göstermektedir [34]. Tablo 3.2'yi incelediğimizde, dolgu oranı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin P değeri 0,05 sayısından küçük olduğu için darbe dayanımı değerlerine anlamlı bir etki göstermiştir. Baskı sıcaklığı ve baskı hızı parametrelerinin P değeri 0,05 sayısından büyük olduğu için darbe dayanımı değerlerine olan etkisi önemsizdir. Darbe dayanımı değerlerine en büyük etkiyi F değerine bakarak dolgu oranı baskı parametresinin ortaya koymuş olduğunu görülmektedir. Dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı parametrelerinin darbe dayanımına katkı yüzdeleri sırasıyla %83,05 %0,98, %0,04 ve %14,45 olduğu tabloda verilmiştir.

Şekil 10'a grafiğinde verilen Sinyal/Gürültü (S/N) oranlarında PLA malzeme için dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin çekme dayanımı değerlerine olan etkisi gösterilmektedir. Sinyal/Gürültü oranları, en büyük en iyi tipinde hazırlanmıştır. Böylelikle her parametre için hesaplanan Sinyal/Gürültü oranının en yüksek olduğu değer en iyi deney sonucunu (çekme dayanımı değerinin en yüksek olduğu deney sonucu) vermektedir [28]. Dolgu oranı için en iyi çekme dayanımı değeri 3. seviyede (%100) olmuştur. Dolgu oranının artırılması ile çekme dayanımı değerleri yükselmektedir [35]. Baskı sıcaklığı için en iyi çekme dayanımı değeri 3. Seviyede (210°C) olmuştur. Baskı sıcaklığının artırılması ile çekme dayanımı değerleri yükselmektedir [36]. Baskı hızı için en iyi çekme dayanımı değeri 1. seviyede (40 mm/s) olmuştur. Artan baskı hızı değeri ile çekme dayanımı değerlerinde düşüşler görülmektedir [37]. Katman kalınlığı için en iyi çekme dayanımı değeri 1. seviyede (0,2 mm) olmuştur. Artan katman kalınlığı değeri ile çekme dayanımı değerlerinde düşüşler görülmektedir [38]. PLA malzemede S/N oranlarından yola çıkarak çekme dayanımı için optimum baskı parametre değerleri %100 dolgu oranı, 210°C baskı sıcaklığı, 40 mm/s baskı hızı ve 0,2 mm katman kalınlığıdır.

Şekil 10'b grafiğinde verilen Sinyal/Gürültü (S/N) oranlarında PLA-Çelik malzeme için dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin çekme dayanımı değerlerine olan etkisi gösterilmektedir. Dolgu oranı için en iyi çekme dayanımı değeri 3. seviyede (%100) olmuştur. Dolgu oranının artırılması ile çekme dayanımı değerleri yükselmektedir [39]. Baskı sıcaklığı için en iyi çekme dayanımı değeri 3. Seviyede (210°C) olmuştur. Baskı sıcaklığının artırılması ile çekme dayanımı değerleri yükselmektedir



Şekil 9. a) PLA malzemeye sahip deney numunelerinde baskı parametrelerinin darbe dayanımı için Sinyal/Gürültü oranları (Signal/Noise ratios for impact strength of printing parameters on test specimens with PLA material) b) PLA-Çelik malzemeye sahip deney numunelerinde baskı parametrelerinin darbe dayanımı için Sinyal/Gürültü oranları (Signal/Noise ratios for impact strength of printing parameters on test specimens with PLA-Steel material)

[40]. Baskı hızı için en iyi çekme dayanımı değeri 1. seviyede (40 mm/s) olmuştur. Artan baskı hızı değeri ile çekme dayanımı değerlerinde düşüşler görülmektedir [41]. Katman kalınlığı için en iyi

çekme dayanımı değeri 1. seviyede (0,2 mm) olmuştur. Artan katman kalınlığı değeri ile çekme dayanımı değerlerinde düşüşler görülmektedir [42]. PLA-Çelik malzemede S/N oranlarından yola

Tablo 6. PLA malzemede darbe dayanımı için ANOVA sonuçları (ANOVA results for impact strength in PLA material)

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Katkı Oranı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F değeri	P değeri
Dolgu Oranı	1	21,4647	%92,65	21,4647	10,7323	451,86	0,00003
Baskı Sıcaklığı	1	0,0014	%0,01	0,0014	0,0007	0,03	0,87077
Baskı Hızı	1	0,1476	%0,64	0,1476	0,0738	3,11	0,15277
Katman Kalınlığı	1	1,3650	%5,89	1,3650	0,6825	28,73	0,00584
Hata	4	0,1900	%0,82	0,1900	0,0950		
Toplam	8	23,1686	%100				

S = 0,2179, R² = %99,18, R² (adj.) = %98,36

Tablo 7. PLA-Çelik malzemede darbe dayanımı için ANOVA sonuçları (ANOVA results for impact strength in PLA-Steel material)

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Katkı Oranı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F değeri	P değeri
Dolgu Oranı	1	68,9951	%83,02	68,9951	34,4975	221,32	0,00012
Baskı Sıcaklığı	1	0,8182	%0,98	0,8182	0,4091	2,62	0,18053
Baskı Hızı	1	0,0366	%0,04	0,0366	0,0183	0,12	0,74912
Katman Kalınlığı	1	12,0049	%14,45	12,0049	6,0024	38,51	0,00343
Hata	4	1,2470	%1,5	1,2470	0,6235		
Toplam	8	83,1019	%100				

S = 0,5583, R² = %98,50, R² (adj.) = %97

çıkarak çekme dayanımı için optimum baskı parametre değerleri %100 dolgu oranı, 210°C baskı sıcaklığı, 40 mm/s baskı hızı ve 0,2 mm katman kalınlığıdır.

Dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin çekme dayanımına olan etkisi için ANOVA analizi yapılmıştır. ANOVA analizi Minitab programı ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 8'de PLA malzeme için baskı parametrelerinin çekme dayanımına olan etkisinin ANOVA analizi sonuçları yer almaktadır. ANOVA analizinde, kaynak faktörlerinin etkisinin anlamlı olabilmesi için P değerinin 0,05 sayısından küçük olması gerekmektedir. En yüksek F değerine sahip olan kaynak faktörü de en önemli etkiyi göstermektedir [34]. Tablo 3.3'ü incelediğimizde, dolgu oranı baskı parametresinin P değeri 0,05 sayısından küçük olduğu için çekme dayanımı değerlerine anlamlı bir etki göstermiştir. Baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı parametrelerinin P değeri 0,05 sayısından büyük olduğu için çekme dayanımı değerlerine olan etkisi önemsizdir. Çekme dayanımı değerlerine en büyük etkiyi F değerine bakarak dolgu oranı baskı parametresinin ortaya koymuş olduğunu görmektedir. Dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı parametrelerinin çekme dayanımına katkı yüzdeleri sırasıyla %81,20, %5,85, %3,79 ve %4,05 olduğu tabloda verilmiştir.

Tablo 9'da PLA-Çelik malzeme için baskı parametrelerinin çekme dayanımına olan etkisinin ANOVA analizi sonuçları yer almaktadır. ANOVA analizinde, kaynak faktörlerinin etkisinin anlamlı olabilmesi için P değerinin 0,05 sayısından küçük olması gerekmektedir. En yüksek F değerine sahip olan kaynak faktörü de en önemli etkiyi göstermektedir [34]. Tablo 3.4'ü incelediğimizde, dolgu oranı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin P değeri 0,05 sayısından küçük olduğu için çekme dayanımı değerlerine anlamlı bir etki göstermiştir. Baskı sıcaklığı parametresinin P değeri 0,05 sayısından büyük olduğu için çekme dayanımı değerlerine olan etkisi önemsizdir. Çekme dayanımı değerlerine en büyük etkiyi F değerine bakarak dolgu oranı baskı parametresinin ortaya koymuş olduğunu görmektedir. Dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman

kalınlığı parametrelerinin çekme dayanımına katkı yüzdeleri sırasıyla %73,47, %3,84, %6,02 ve %13,57 olduğu tabloda verilmiştir.

Deneylerde kullanılan dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametreleri ile darbe dayanımı ve çekme dayanımı arasında bir ilişki kurmak için regresyon analizi gerçekleştirilmiştir [43]. Gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçlarına göre ortaya çıkan eşitlikler Eş. 3, Eş. 4, Eş. 5 ve Eş. 6'da verilmiştir.

$$PLA I_{CN} = 11,07 + 0,04953(I_P) - 0,00154(T_P) - 0,00784(S_P) - 4,770(t_L) \quad (3)$$

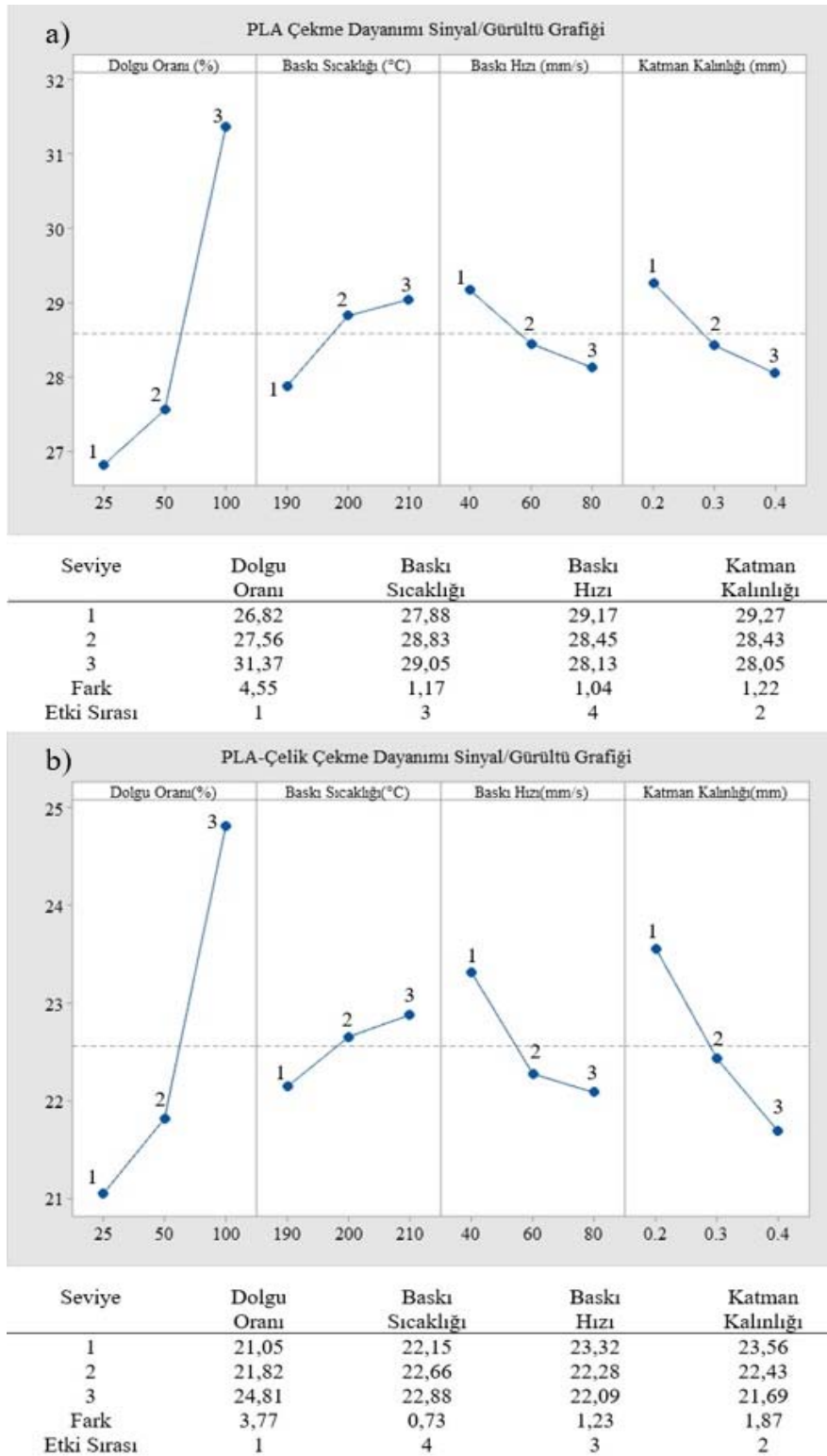
$$PLA \text{ Çelik } I_{CN} = 2,36 + 0,08377(I_P) + 0,0149(T_P) - 0,00207(S_P) - 12,31(t_L) \quad (4)$$

I_{cn} : Charpy çentikli darbe dayanımı (kJ/m²)
I_p : Dolgu oranı (%)
T_p : Baskı sıcaklığı (°C)
S_p : Baskı hızı (mm/s)
t_L : Katman kalınlığı (mm)

Eş. 3: (R²= %99,18; R²(adj)= %98,36), Eş.4: (R²= %99,31; R²(adj)= %98,61)

Eş. 3'te PLA malzeme için, Eş. 4'te PLA-Çelik malzeme için verilen regresyon denklemlerinde dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin istenilen seviyeleri uygun yerlere yazılarak darbe dayanımı değeri yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

Tablo 10'da gerçekleştirilen darbe deneyleri sonuçlarından elde edilen darbe dayanımı değerleri ile Eş. 3 ve Eş. 4'te verilen regresyon denklemlerinden hesaplanan darbe dayanımı değerleri birlikte verilmiştir. Regresyon analizi ile edilen darbe dayanımı sonuçları, fiziksel deneylerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve regresyon analizi sonuçlarının, fiziksel deney sonuçları karşısındaki



Şekil 10. a) PLA malzemeye sahip deney numunelerinde baskı parametrelerinin çekme dayanımı için Sinyal/Gürültü oranları (Signal/Noise ratios for tensile strength of printing parameters on test specimens with PLA material) b) PLA-Çelik malzemeye sahip deney numunelerinde baskı parametrelerinin çekme dayanımı için Sinyal/Gürültü oranları (Signal/Noise ratios for tensile strength of printing parameters on test specimens with PLA-Steel material)

hata oranları ortaya konmuştur. PLA malzemeye sahip 1 numaralı deney numunesinin darbe dayanımı değerinin regresyon denklemi ile hesaplanması örnek olarak aşağıda verilmiştir. 1 numaralı deney

numunesi için dolgu oranı değeri %25, baskı sıcaklığı değeri 190°C, baskı hızı değeri 40 mm/s ve katman kalınlığı değeri 0,2 mm'dir. Bu baskı parametre değerlerini Eş. 3'te verilen regresyon denklemi

Tablo 8. PLA malzemede çekme dayanımı için ANOVA sonuçları (ANOVA results for tensile strength in PLA material)

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Katkı Oranı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F değeri	P değeri
Dolgu Oranı	1	396,07	%81,20	396,07	198,03	63,60	0,00134
Baskı Sıcaklığı	1	28,54	%5,85	28,54	14,27	4,58	0,09901
Baskı Hızı	1	18,47	%3,79	18,47	9,23	2,97	0,16010
Katman Kalınlığı	1	19,78	%4,05	19,78	9,89	3,18	0,14934
Hata	4	24,91	%5,11	24,91	12,45		
Toplam	8	487,77	%100				

$S = 2,4955, R^2 = \%94,89, R^2 (adj) = \%89,79$

Tablo 9. PLA-Çelik malzemede çekme dayanımı için ANOVA sonuçları (ANOVA results for tensile strength in PLA-Steel material)

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Katkı Oranı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F değeri	P değeri
Dolgu Oranı	1	62,457	%73,47	62,457	31,228	94,93	0,00062
Baskı Sıcaklığı	1	3,266	%3,84	3,266	1,633	4,96	0,08980
Baskı Hızı	1	5,117	%6,02	5,117	2,558	7,78	0,04937
Katman Kalınlığı	1	11,540	%13,57	11,540	5,770	17,54	0,01383
Hata	4	2,632	%3,10	2,632	1,316		
Toplam	8	85,011	%100				

$S = 0,8111, R^2 = \%96,90, R^2 (adj) = \%93,81$

Tablo 10. Darbe deneyi ve regresyon analizi sonuçları (Impact test and regression analysis results)

Numune No.	PLA		PLA-Çelik			
	Darbe Deneyi Sonuçları (kJ/m ²)	Regresyon Analizi Sonuçları (kJ/m ²)	% Hata	Darbe Deneyi Sonuçları (kJ/m ²)	Regresyon Analizi Sonuçları (kJ/m ²)	% Hata
1	10,81	10,74	%0,65	4,97	4,74	%4,63
2	9,76	10,09	%3,38	3,16	3,61	%14,24
3	9,52	9,44	%0,84	2,73	2,49	%8,79
4	11,00	10,87	%1,18	4,56	4,33	%5,04
5	11,83	11,65	%1,52	6,87	6,90	%0,44
6	11,48	11,47	%0,09	5,71	5,90	%3,33
7	13,54	13,67	%0,96	9,52	9,70	%1,89
8	13,53	13,49	%0,30	8,68	8,71	%0,35
9	14,27	14,27	0	11,51	11,27	%2,09

üzerinde uygun yerlere yazarak darbe dayanımı değerine ulaşılabilmektedir. Regresyon denkleminde I_p ile ifade edilen yere dolgu oranı değerini, T_p ile ifade edilen yere baskı sıcaklığı değerini, S_p ile ifade edilen yere baskı hızı değerini ve t_L ile ifade edilen yere katman kalınlığı değeri yazılacaktır. Eş. 5'te PLA malzemeye sahip 1 numaralı deney numunesi için regresyon denklemi hesabı yapılmıştır.

$$PLAI_{cn}(\text{Numune no: 1}) = 11,07 + 0,04953(25) - 0,00154(190) - 0,00784(40) - 4,770(0,2) = 10,74 \quad (5)$$

Tablo 10'u incelediğimizde regresyon analizinden elde edilen denklemler ile darbe dayanımı hesabı yapıldığında oluşan sonuçlar fiziksel deney sonuçlarına yakın bir değerdedir. Regresyon analizi sonuçlarının fiziksel deney sonuçlarına göre hata oranları da hesaplanmıştır. PLA malzeme için %hataların aritmetik ortalaması %0,99 ve standart sapması 1,02 değerindedir. PLA-Çelik malzeme için %hataların aritmetik ortalaması %4,53 ve standart sapması 4,49 değerindedir. Regresyon analizinden elde edilen darbe dayanımı sonuçları PLA malzemedeki numunelerde PLA-Çelik malzemeye göre fiziksel deneylere daha yakın sonuçlar vermiştir. PLA malzeme için gerçekleştirilen regresyon analizi hesaplamalarının hata oranı ortalama olarak %1, PLA-Çelik malzeme için ortalama olarak %4,53 değerindedir. Standart sapma değerlerini incelediğimizde de PLA-Çelik malzeme için ortaya çıkan regresyon analizi sonuçları daha dağınık sonuçlar ortaya koymuştur. PLA malzemeye sahip 9 numaralı numunede regresyon analizi ile fiziksel deney aynı sonucu vermiştir.

PLA-Çelik malzemeye sahip 2 numaralı deney numunesinde regresyon analizi, fiziksel deneye göre en yüksek hata oranına sahip olan sonuç olmuştur.

Regresyon analizinin yapılma amacı, ara değerler için fiziksel deney gerçekleştirilmeden elde edilecek sonuçların teorik olarak hesaplanabilmesidir. Örneğin PLA malzemeye sahip %75 dolgu oranı, 195°C baskı sıcaklığı, 70 mm/s baskı hızı ve 0,25 mm katman kalınlığı ile üretilmiş bir darbe deneyi numunesinin regresyon analizi ile darbe dayanımı değeri hesaplanabilir ve bu değer fiziksel deney sonucuna göre yakın bir sonuç verecektir. Eş. 6'da ara değerler kullanılarak PLA malzemeye sahip bir numune için regresyon denkleminde yararlanılarak darbe dayanımı hesabı yapılmıştır.

$$PLAI_{cn} = 11,07 + 0,04953(75) - 0,00154(195) - 0,00784(70) - 4,770(0,25) = 13,04 \text{ kJ/m}^2 \quad (6)$$

$$PLA\sigma_{max} = -17,6 + 0,2128(I_p) + 0,218(T_p) - 0,0877(S_p) - 18,2(t_L) \quad (7)$$

$$PLA\text{Çelik}\sigma_{max} = 1,01 + 0,08449(I_p) + 0,0738(T_p) - 0,0462(S_p) - 13,87(t_L) \quad (8)$$

σ_{max} : Maksimum çekme dayanımı (MPa)

I_p : Dolgu oranı / T_p : Baskı sıcaklığı

S_p : Baskı hızı / t_L : Katman kalınlığı

Eş. 7: ($R^2 = \%94,89$; $R^2(\text{adj}) = \%89,79$), Eş. 8: ($R^2 = \%96,90$; $R^2(\text{adj}) = \%93,81$)

Eş. 7'de PLA malzeme için, Eş. 8'de PLA-Çelik malzeme için verilen regresyon denklemlerinde dolgu oranı, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı baskı parametrelerinin istenilen seviyeleri uygun yerlere yazılarak çekme dayanımı değerleri yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

Tablo 11'de gerçekleştirilen çekme deneyleri sonuçlarından elde edilen çekme dayanımı değerleri ile Eş. 7 ve Eş. 8'de verilen regresyon denklemlerinden hesaplanan çekme dayanımı değerleri birlikte verilmiştir. Regresyon analizi ile edilen çekme dayanımı sonuçları, fiziksel deneylerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve regresyon analizi sonuçlarının, fiziksel deney sonuçları karşısındaki hata oranları ortaya konmuştur.

PLA-Çelik malzemeye sahip 1 numaralı deney numunesinin çekme dayanımı değerinin regresyon denklemi ile hesaplanması örnek olarak Eş. 9'da verilmiştir. 1 numaralı deney numunesi için dolgu oranı değeri %25, baskı sıcaklığı değeri 190°C, baskı hızı değeri 40 mm/s ve katman kalınlığı değeri 0,2 mm'dir. Bu baskı parametre değerlerini Eş. 6'da verilen regresyon denklemi üzerinde uygun yerlere yazarak çekme dayanımı değerine ulaşılabilir. Regresyon denkleminde I_p ile ifade edilen yere dolgu oranı değeri, T_p ile ifade edilen yere baskı sıcaklığı değeri, S_p ile ifade edilen yere baskı hızı değeri ve t_p ile ifade edilen yere katman kalınlığı değeri yazılacaktır.

$$PLA \text{ Çelik } \sigma_{max} (\text{Numune no: 1}) = 1,01 + 0,08449(25) + 0,0738 (190) - 0,0462 (40) - 13,87 (0,2) = 12,52 \quad (9)$$

Tablo 11'i incelediğimizde regresyon analizinden elde edilen denklemler ile çekme dayanımı hesabı yapıldığında oluşan sonuçlar fiziksel deney sonuçlarına yakın bir değerde olmaktadır. Regresyon analizi sonuçlarının fiziksel deney sonuçlarına göre hata payları da hesaplanmıştır. PLA malzeme için %hataların aritmetik ortalaması %5,73 ve standart sapması 3,2 değerindedir. PLA-Çelik malzeme için %hataların aritmetik ortalaması %3,61 ve standart sapması 2,6 değerindedir. Regresyon analizinden elde edilen çekme dayanımı sonuçları PLA-Çelik malzemedeki numunelerde PLA malzemeye

göre daha yakın sonuçlar vermiştir. PLA malzeme için gerçekleştirilen regresyon analizi hesaplamalarının hata oranı ortalama olarak %5,73, PLA-Çelik malzeme için ortalama olarak %3,61 değerindedir. Standart sapma değerlerini incelediğimizde de PLA malzeme için ortaya çıkan regresyon analizi sonuçları daha dağınık sonuçlar ortaya koymuştur. Regresyon analizi ile fiziksel deney arasında hata oranı en düşük olanı numune PLA-Çelik malzemeye sahip 2 numaralı deney numunesidir. Regresyon analizi ile fiziksel deney arasında hata oranı en yüksek olan numune ise PLA malzemeye sahip 6 numaralı deney numunesidir.

Örneğin PLA-Çelik malzemeye sahip %75 dolgu oranı, 195°C baskı sıcaklığı, 70 mm/s baskı hızı ve 0,25 mm katman kalınlığı ile üretilmiş bir çekme deneyi numunesinin regresyon analizi ile çekme dayanımı değeri hesaplanabilir ve bu değer fiziksel deney sonucuna göre yakın bir sonuç verecektir. Eş. 10'da ara değerler kullanılarak PLA-Çelik malzemeye sahip bir numune için regresyon denkleminde yararlanılarak çekme dayanımı hesabı yapılmıştır.

$$PLA \text{ Çelik } \sigma_{max} = 1,01 + 0,08449 (75) + 0,0738 (195) - 0,0462 (70) - 13,87 (0,25) = 15,03 \text{ MPa} \quad (10)$$

Malzemeler üzerinde gerçekleştirilen termal iletkenlik deneyinde numuneler farklı dolgu oranlarında üretilmiştir. Böylelikle dolgu oranının termal iletkenlik değerleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Tablo 12'de deney numunelerinin termal iletkenlik değerleri verilmiştir.

Gerçekleştirilen termal iletkenlik deneyleri sonucunda çelik tozu katkısının kullanılması PLA malzemenin termal iletkenliğini artırmıştır [44]. Bu artış tüm dolgu oranlarında yaklaşık olarak %100 oranında gerçekleşmiştir. Aynı zamanda dolgu oranının artırılmasıyla birlikte termal iletkenlik değerleri de artmıştır [45].

Baskı sıcaklığı ve baskı hızı parametrelerinin değişimiyle mekanik özelliklerde meydana gelen değişimleri yorumlayabilmek için numuneler üzerinde taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntülemesi yapılmıştır. Numuneler farklı baskı sıcaklığı ve baskı hızı ile üretilmiştir. Baskı sıcaklığı ve baskı hızı parametreleri için 2 farklı seviye kullanılmıştır. Baskı sıcaklığı için 190°C ve 210°C, baskı

Tablo 11. Çekme deneyi ve regresyon analizi sonuçları (Tensile test and regression analysis results)

Numune No.	PLA			PLA-Çelik		
	Çekme Deneyi Sonuçları (MPa)	Regresyon Analizi Sonuçları (MPa)	% Hata	Çekme Deneyi Sonuçları (MPa)	Regresyon Analizi Sonuçları (MPa)	% Hata
1	23,41	21,99	%6,07	13,17	12,52	%4,94
2	21,81	20,59	%5,59	10,88	10,95	%0,64
3	20,63	19,20	%6,93	10,02	9,37	%6,49
4	20,39	21,91	%7,45	10,29	10,93	%6,22
5	25,21	25,98	%3,05	13,24	13,52	%2,11
6	26,48	29,85	%12,73	13,75	14,72	%7,05
7	31,84	32,62	%2,45	15,48	15,62	%0,90
8	38,32	36,49	%4,78	17,37	16,82	%3,17
9	41,62	40,55	%2,57	19,60	19,41	%0,97

Tablo 12. Deney numunelerinin termal iletkenlik değerleri (Thermal conductivity values of test specimens)

No.	Malzeme	Dolgu Oranı (%)	Termal İletkenlik (W/mK)		
			En Düşük	En Yüksek	Ortalama
1	PLA	25	0,07825	0,0788	0,0785
2	PLA-Çelik	25	0,1537	0,1542	0,1539
3	PLA	50	0,1042	0,1044	0,1043
4	PLA-Çelik	50	0,2168	0,2192	0,2180
5	PLA	100	0,1364	0,1364	0,1364
6	PLA-Çelik	100	0,2732	0,2785	0,2758

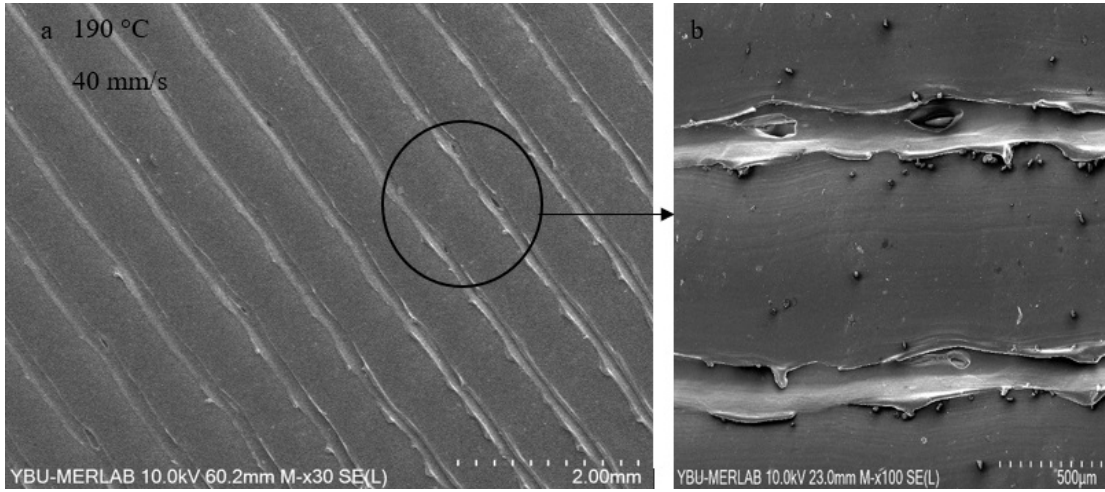
hızı için 40 mm/s ve 80 mm/s değerleri kullanılmıştır. Dolgu oranı ve katman kalınlığı parametreleri sabit tutulmuştur. Dolgu oranı için %100, katman kalınlığı için 0,2 mm değeri kullanılmıştır. SEM incelemeleri numunelerin üst katmanında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 11 ve Şekil 12'de PLA malzemeye sahip numunelerin üst katmanında gerçekleştirilen SEM incelemesi sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12'de SEM görüntüsü verilen numunelerde sırasıyla 190°C ve 210°C baskı sıcaklığı kullanılmıştır. Baskı sıcaklığının değiştirilmesiyle ortaya çıkan farklılar incelenmiştir. Baskı sıcaklığının artırılması ile nozul hat çizgilerinin arasında oluşan boşlukların azaldığı ve hat çizgilerinin birbirine daha iyi yapıştığı görülmektedir. Üst katmanda oluşan bu boşlukların iç yapıda da aynı şekilde oluştuğu düşünülmektedir. Baskı sıcaklığı artırıldıktan sonra yapıdaki boşlukların azalması ile parçaların yoğunluğunun yükseldiği ve gerilim yığılmasına sebebiyet verecek hataların giderildiği görülmektedir. Bu sebeple baskı sıcaklığının artması ile parçaların dayanım değeri yükselmiştir [46].

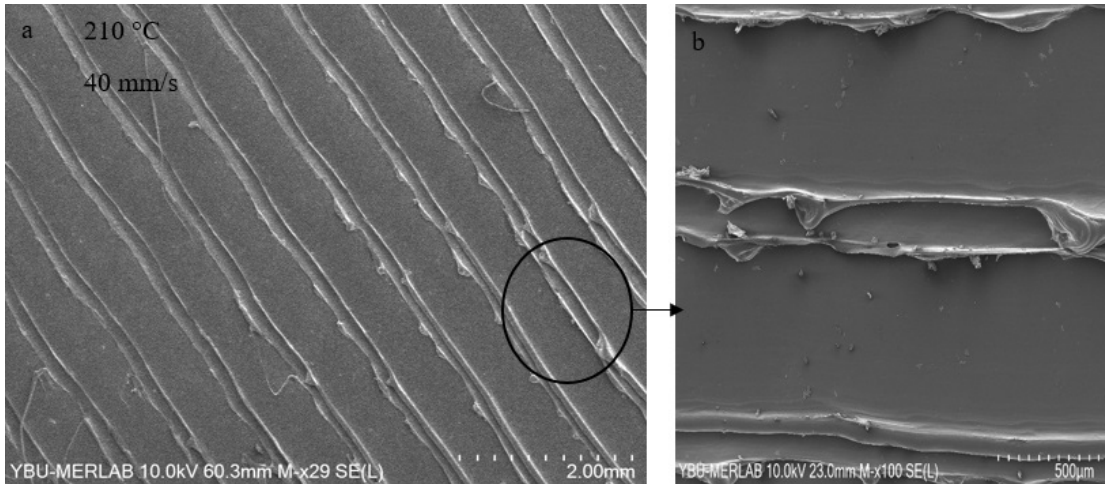
Şekil 12 ve Şekil 13'te PLA malzemeye sahip numunelerin üst katmanında gerçekleştirilen SEM incelemesi sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 12 ve Şekil 13'te SEM görüntüsü verilen numunelerde sırasıyla 40 mm/s ve 80 mm/s baskı hızı kullanılmıştır. Baskı hızının değiştirilmesiyle ortaya çıkan farklılar incelenmiştir.

Baskı hızının artırılması ile nozul hat çizgilerinin arasında oluşan boşlukların sayısının ve boyutunun arttığı, hat çizgilerinin birbirine daha iyi yapıştığı görülmektedir. Üst katmanda oluşan bu boşlukların iç yapıda da aynı şekilde oluştuğu düşünülmektedir. Baskı hızı artırıldıktan sonra yapıdaki boşlukların artması ile parçaların yoğunluğunun düştüğü ve gerilim yığılmasına sebebiyet verecek hataların fazlaştığı görülmektedir. Bu sebeple baskı hızının artması ile parçaların dayanım değeri düşmüştür [47].

Şekil 14 ve Şekil 15'te PLA-Çelik malzemeye sahip numunelerin üst katmanında gerçekleştirilen SEM incelemesi sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 14 ve Şekil 15'te SEM görüntüsü verilen numunelerde sırasıyla 190°C ve 210°C baskı sıcaklığı kullanılmıştır. Baskı sıcaklığının değiştirilmesiyle ortaya çıkan farklılar incelenmiştir. PLA malzemeye sahip numunelerde ortaya çıkan sonuçlar gibi PLA-Çelik malzemede de baskı sıcaklığının artırılması ile nozul hat çizgilerinin arasında oluşan boşlukların azaldığı ve hat çizgilerinin birbirine daha iyi yapıştığı görülmektedir. Üst katmanda oluşan bu boşlukların iç yapıda da aynı şekilde oluştuğu düşünülmektedir. Baskı sıcaklığı artırıldıktan sonra yapıdaki boşlukların azalması ile parçaların yoğunluğunun yükseldiği ve gerilim yığılmasına sebebiyet verecek hataların giderildiği görülmektedir. Bu sebeple baskı sıcaklığının artması ile parçaların dayanım değeri yükselmiştir [46].



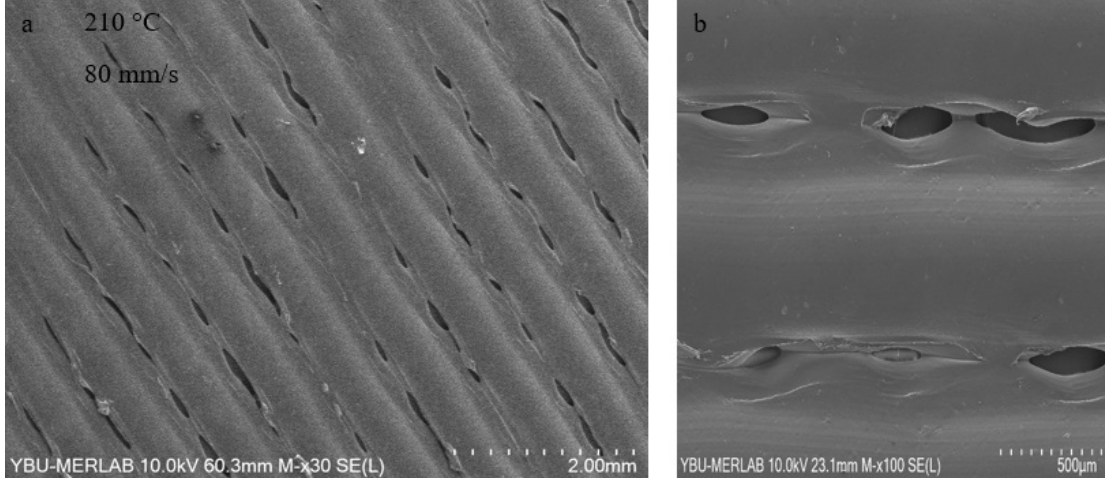
Şekil 11. PLA malzemeye sahip 1 numaralı SEM deney numunesi (No.1 SEM test specimen with PLA material) (a)30x (b)100x



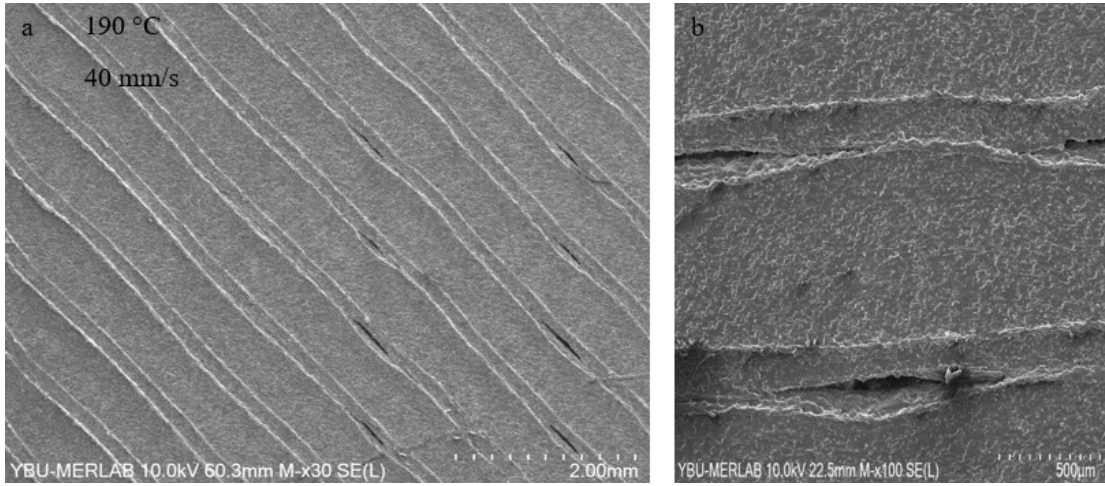
Şekil 12. PLA malzemeye sahip 2 numaralı SEM deney numunesi (No.2 SEM test specimen with PLA material) (a)30x (b)100x

Şekil 15 ve Şekil 16'da PLA-Çelik malzemeye sahip numunelerin üst katmanında gerçekleştirilen SEM incelemesi sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 15 ve Şekil 16'da SEM görüntüsü verilen numunelerde sırasıyla 40 mm/s ve 80 mm/s baskı hızı kullanılmıştır.

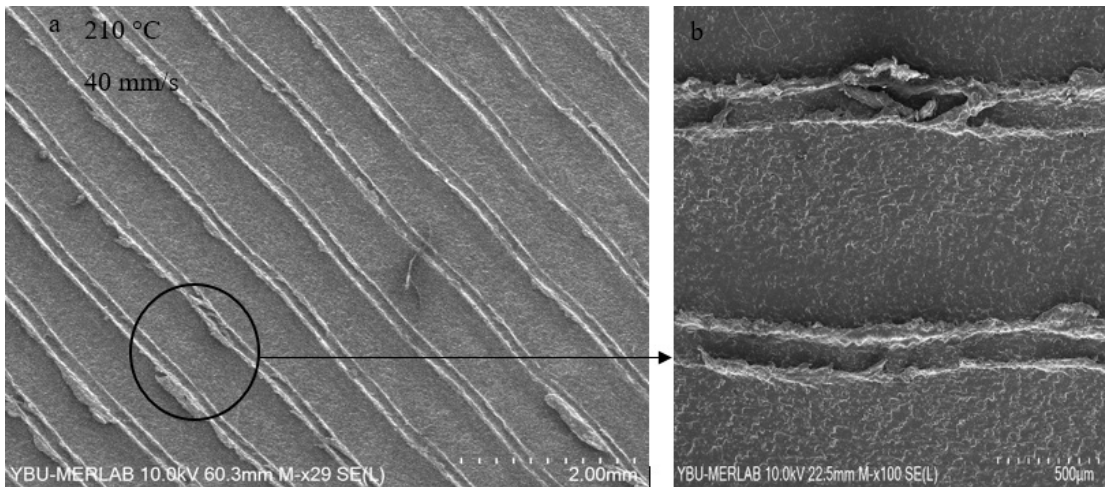
Baskı hızının değiştirilmesiyle ortaya çıkan farklılar incelenmiştir. PLA malzemeye sahip numunelerde ortaya çıkan sonuçlar gibi PLA-Çelik malzeme de baskı hızının artırılması ile nozul hat çizgilerinin arasında oluşan boşlukların sayısının ve boyutunun arttığı, hat



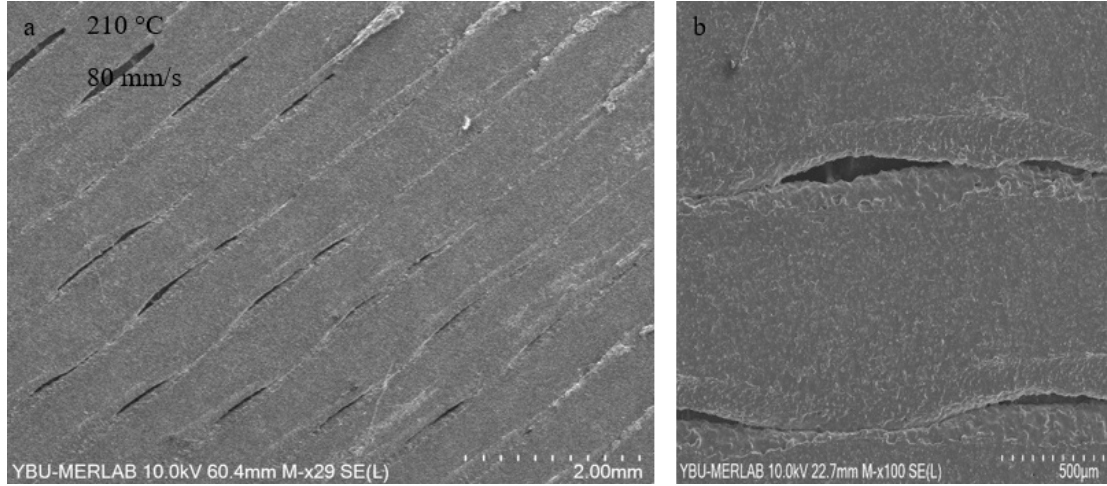
Şekil 13. PLA malzemeye sahip 3 numaralı SEM deney numunesi (No.3 SEM test specimen with PLA material) (a)30x (b)100x



Şekil 14. PLA-Çelik malzemeye sahip 1 numaralı SEM deney numunesi (No.1 SEM test specimen with PLA-Steel material) (a)30x (b)100x



Şekil 15. PLA-Çelik malzemeye sahip 2 numaralı SEM deney numunesi (No.2 SEM test specimen with PLA-Steel material) (a)30x (b)100x



Şekil 16. PLA-Çelik malzemeye sahip 3 numaralı SEM deney numunesi (No.3 SEM test specimen with PLA-Steel material) (a)30x (b)100x

çizgilerinin birbirine daha iyi yapıştığı görülmektedir. Üst katmanda oluşan bu boşlukların iç yapıda da aynı şekilde oluştuğu düşünülmektedir. Baskı hızı artırıldıktan sonra yapıdaki boşlukların artması ile parçaların yoğunluğunun düştüğü ve gerilim yığılmasına sebebiyet verecek hataların fazlaştığı görülmektedir. Bu sebeple baskı hızının artması ile parçaların dayanım değeri düşmüştür [47].

Baskı sıcaklığı ve baskı hızının, dayanım değerlerine olan etkilerin sebepleri SEM incelemesi ile ortaya konmuştur. Dolgu oranı ve katman kalınlığı parametrelerinin de dayanım değerlerine olan etkilerinin sebepleri benzer şekildedir. Dolgu oranının artırılmasıyla parçaların iç yoğunluğu artmakta ve gerilim yığılmasına sebebiyet verecek hatalar giderilmektedir. Bu sebeple dolgu oranının artırılmasıyla parçaların dayanım değerleri yükselmektedir [47]. Katman kalınlığı artırıldığında dayanım değerlerinde düşüşler olmaktadır. Artan katman kalınlığı ile üretilen parçaların yoğunlukları azalmakta ve katmanların birbirine yapışma davranışları düşmektedir [48].

4. Simgeler (Symbols)

G	: Çekiç ağırlığı (N)
g	: Yer çekimi ivmesi (m/s ²)
I _{cn}	: Charpy çentikli darbe dayanımı (kJ/m ²)
I _p	: Dolgu oranı (%)
l	: Sarkaç boyu (m)
m	: Çekiç kütlesi (kg)
S _p	: Baskı hızı (mm/s)
t _L	: Katman kalınlığı (mm)
T _p	: Baskı sıcaklığı (°C)
α	: Düşme açısı (°)
β	: Yükselme açısı (°)
σ _{max}	: Maksimum çekme dayanımı (MPa)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Her iki malzemeye ait darbe ve çekme dayanımı değerleri incelendiğinde tüm deney numunelerinde PLA malzemenin darbe ve çekme dayanımı değerleri daha iyi seviyededir. PLA malzeme için en yüksek darbe dayanımı 14,27 kJ/m², en yüksek çekme dayanımı 41,62 MPa değerindedir. PLA-Çelik malzeme için en yüksek darbe dayanımı 11,51 kJ/m², en yüksek çekme dayanımı 19,06 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek değerler iki malzeme için 9 numaralı numunelerde olmuştur. Baskı parametrelerinin darbe dayanımına etkisini incelediğimizde PLA ve PLA-Çelik malzemede dolgu

oranının artırılması darbe dayanımı değerlerini yükseltmiştir. Katman kalınlığının artırılması ise iki malzeme için de darbe dayanımı değerlerini düşürmüştür. PLA malzemede baskı sıcaklığının darbe dayanımına etkisi ihmal edilebilecek bir seviyededir. Baskı hızının artırılması ise PLA malzemede darbe dayanımı değerlerini düşürmüştür. PLA-Çelik malzemede baskı sıcaklığı ve baskı hızı parametrelerinin darbe dayanımına olan etkisi doğrusal sonuçlar vermemiştir.

Baskı parametrelerinin çekme dayanımına etkisini incelediğimizde iki malzemede de dolgu oranı ve baskı sıcaklığının artırılması çekme dayanımına olumlu yönde etki ederken, baskı hızı ve katman kalınlığının artırılması çekme dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. 410L paslanmaz çelik tozu takviyesi ile PLA malzemenin termal iletkenlik değeri yaklaşık olarak %100 oranında artmıştır. Dolgu oranının artırılmasıyla termal iletkenlik değerleri artmaktadır.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile deney numunelerinin üst katmanından alınan görüntüler incelendiğinde baskı sıcaklığının artırılması ve baskı hızının azaltılması ile nozul hat çizgileri arasında oluşan boşlukların azaldığı, hat çizgilerinin birbirine daha iyi yapıştığı görülmüştür.

Kaynaklar (References)

- Bahnini I., Rivette M., Rechia A., Siadat A., Elmesbahi A., Additive Manufacturing Technology: The Status, Applications, And Prospects, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 97, 147–161, 2018.
- Gebhardt A., Hötter Jan-S., Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing, Hanser Publishers, Munich, 2016.
- Scott J., Gupta N., Weber C., Newsome S., Wohlers T., Caffrey T., Additive Manufacturing: Status and Opportunities. Science and Technology Policy Institute, 2012.
- Özer G., A Review on Additive Manufacturing Technologies, *NOHU J. Eng. Sci.*, 9 (1), 606-621, 2020.
- Çevik Ü., Kam M., A Review Study on Mechanical Properties of Obtained Products by FDM Method and Metal/Polymer Composite Filament Production, *J. Nanomater.*, 2020.
- Alfaiy A., Saleh M., Abdullah F. M., Al-Ahmari A. M., Design for Additive Manufacturing: A Systematic Review, *Sustainability*, 12 (19), 7936, 2020.
- Hasanov S., Alkunte S., Rajeshirke M., Gupta A., Huseynov O., Fidan I., Alifui-Segbaya F., Rennie A., Review on Additive Manufacturing of Multi-Material Parts: Progress and Challenges, *J. Manuf. Mater. Process.*, 6 (4), 2022.
- Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G., Additive Manufacturing Methods and Modelling Approaches: A Critical Review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 83, 389-405, 2016

9. Abdulhameed O., Al-Ahmari A., Ameen W., Mian S. H., Additive Manufacturing: Challenges, Trends, And Applications, *Adv. Mech. Eng.*, 2019.
10. Mercado Rivera F.J., Rojas Arciniegas A.J., Additive Manufacturing Methods: Techniques, Materials, and Closed-Loop Control Applications. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 109, 17–31, 2020.
11. Sürmen H. K., Additive Manufacturing (3D Printing): Technologies and Applications, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24 (2), 373-392, 2019.
12. Rajan K., Samykano M., Kadirgama K., Wan Harun W. S., Rahman M., Fused Deposition Modeling: Process, Materials, Parameters, Properties, and Applications, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 120, 1531-1570, 2022.
13. Dey A., Yodo N. A., Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *J. Manuf. Mater. Process.*, 3 (3), 64, 2019.
14. Kristiawan R. B., Imaduddin F., Ariawan Arifin Z., A Review on The Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing: Filament Processing, Materials, and Printing Parameters, *Open Eng.*, 11 (1), 639-649, 2021.
15. Wickramasinghe S., Do T., Tran P., FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments, *Polymers*, 12 (7), 1529, 2020.
16. Sezer H.K., Eren O., Börklü H.R., Özdemir V., Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites by Fused Deposition Modelling: Effect of Fiber Content and Process Parameters on Mechanical Properties, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 663-674, 2019.
17. Güleç C., Determination of Bond Strength of Parts Printed with 3 Dimensional Printer Using Particle Fiber Reinforced, Master Thesis. Karabük University, Institute of Science, Karabük, 2019.
18. Ayrılmış N., Kariz M., Kwon J. H., Kuzman M. K., Effect of Printing Layer Thickness on Water Absorption and Mechanical Properties of 3D-Printed Wood/PLA Composite Materials, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 102, 2195-2200, 2019.
19. Lee D., Wu G-Y., Parameters Affecting the Mechanical Properties of Three-Dimensional (3D) Printed Carbon Fiber-Reinforced Poly lactide Composites. *Polymers*, 12, 2456, 2020.
20. Reverte J. M., Caminero M. A., Chacón J. M., Garcia-Plaza E., Núñez P.J., Becar J.P., Mechanical and Geometric Performance of PLA-Based Polymer Composites Processed by the Fused Filament Fabrication Additive Manufacturing Technique, *Materials*, 13, 1924, 2020
21. Oksiuta Z., Jalbrzykowski M., Mystkowska J., Romanczuk E., Osiecki T., Mechanical and Thermal Properties of Poly lactide (PLA) Composites Modified with Mg, Fe, and Polyethylene (PE) Additives. *Polymers*, 12, 2939, 2020.
22. Bulanda K., Oleksy M., Oliwa R., Budzik G., Markowski T., Polymer Composites Used in Rapid Prototyping Technology, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 44 (1), 15-20, 2020.
23. Jiang D., Ning F., Fused Filament Fabrication of Biodegradable PLA/316L Composite Scaffolds: Effect of Metal Particle Content, *Procedia Manuf.*, 48, 755-762, 2020.
24. Selvamani S. K., Ngui W. K., Rajan K., Samykano M., Kumar R., Badadhe A. M., Investigation of Bending and Compression Properties on PLA-Brass Composite Using FDM, *Phys. Chem. Earth.*, 128, 103251, 2022.
25. Pentek A., Nyitrai M., Schiffer A., Abraham H., Bene M., Molnar E., Told R. Maroti P., The Effect of Printing Parameters on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of PLA and ABS Based Carbon Composites in Additive Manufacturing of Upper Limb Prosthetics, *Crystals*, 10, 398, 2020.
26. Murugan R., Mitilesh R. N., Singamneni S., Kiran, K., Bayhan M., Influence of Process Parameters on the Mechanical Behaviour and Processing Time of 3d Printing, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, X, 1, 69-75, 2018.
27. Vakharia V.S., Kuentz L., Salem A., Halbig M.C., Salem J.A., Singh M., Additive Manufacturing and Characterization of Metal Particulate Reinforced Poly lactide Acid (PLA) Polymer Composites. *Polymers*, 13, 3545, 2021.
28. Toprak İ. B., Çağlar M. F., Çolak O., Kiran K., Bayhan M., Optimization of Surface Roughness by Using Taguchi Method in Milling of Ti-6Al-4V Super- Alloy at High Pressure Cooling Conditions, *SDU International Technologic Science*, 4 (2), 30-39, 2012.
29. Atakok G., Kam M., Koc H. B., Tensile, Three-Point Bending and Impact Strength of 3D Printed Parts Using PLA and Recycled PLA Filaments: A Statistical Investigation, *J. Mater. Res. Technol.*, 18, 1542-1554, 2012.
30. Natarajan S. M., Senthil S., Narayanasamy P., Investigation of Mechanical Properties of FDM-Processed Acacia concinna-Filled Poly lactide Acid Filament, *Int. J. Polym. Sci.*, 2022.
31. Abbas T. F., Othman F. M., Ali H. B., Tensile, Influence of Layer Thickness on Impact Property of 3D-Printed PLA, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5 (2), 2018.
32. Kumar K. R., Mohanavel V., Kiran K., Mechanical Properties and Characterization of Poly lactide Acid/Carbon Fiber Composite Fabricated by Fused Deposition Modeling, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2021.
33. Lee D., Wu G.-Y., Parameters Affecting the Mechanical Properties of Three-Dimensional (3D) Printed Carbon Fiber-Reinforced Poly lactide Composites, *Polymers*, 12, 2456, 2020.
34. Ersoy S. C., Experimental Investigation of The Effect of Process Parameters of Fused Filament Fabrication on The Efficient Elastic Material Properties of The Lattice Structures Produced, Master Thesis. TOBB University of Economics and Technology, Institute of Science, Ankara, 2021
35. Dobos J., Hanon M. M., Oldal I., Effect Of Infill Density and Pattern on the Specific Load Capacity of FDM 3D-Printed PLA Multi-Layer Sandwich, *J. Polym. Eng.*, 42 (2), 2021.
36. Hikmat M., Rostam S., Ahmed Y. M., Investigation of Tensile Property-Based Taguchi Method of PLA Parts Fabricated by FDM 3D Printing Technology, *Results Eng.*, 11, 2021.
37. Günay M., Modeling of Tensile and Bending Strength for PLA Parts Produced by FDM, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3 (3), 204-211, 2019.
38. Szust A., Adamski G., Using Thermal Annealing and Salt Remelting to Increase Tensile Properties of 3D FDM Prints, *Eng. Fail. Anal.*, 132, 2022.
39. Ghiban B., Pascu N.E. Antoniac I.V., Jiga G., Milea C., Petre G., Gheorghe C., Munteanu C., Istrate B., Surface Characterization of Fracture in Poly lactide Acid vs. PLA + Particle (Cu, Al, Graphene) Insertions by 3D Fused Deposition Modeling Technology, *Coatings*, 11, 633, 2021.
40. Godec D., Cano S., Holzer C., Gutierrez J.G., Optimization of the 3D Printing Parameters for Tensile Properties of Specimens Produced by Fused Filament Fabrication of 17-4PH Stainless Steel, *Materials*, 13 (3), 774, 2020.
41. Huynh L. P. T., Nguyen H. A., Nguyen H. Q., Phan L. K. H., Tran T. T., Effect of Process Parameters on Mechanical Strength of Fabricated Parts using the Fused Deposition Modelling Method, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 36 (8), 705-712, 2019.
42. Mohammadzadeh M., Lu H., Fidan I., Tantawi K., Gupta A., Hasanaov S., Zhang Z., Segbaya F. A., Rennie A., Mechanical and Thermal Analyses of Metal-PLA Components Fabricated by Metal Material Extrusion, *Inventions*, 5, 44, 2020.
43. Çelik U., Özlü B., Demir H., Experimental and Statistical Evaluation of the Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness in Milling of Freeform Thin-Walled AA 5083-H11 Alloy, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 23, 512-522, 2023.
44. Laureto J., Tomasi J., King J.A., Pearce J. M., Thermal Properties of 3-D Printed Poly lactide Acid-Metal Composites, *Prog. Addit. Manuf.*, 2, 57-71, 2017.
45. Bahar A., Belhabib S., Guessasma S., Benmahiddine F., Hamami A. E. A., Belarbi R., Mechanical and Thermal Properties of 3D Printed Polycarbonate, *Energies*, 15, 3686, 2022.
46. Kaygusuz B., Özeriç S., Investigation of the Mechanical Properties of 3D Printed PLA-Based Structures, *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16 (1), 2018.
47. Kamer M.S., Temiz S., Yaykışlı H., Kaya A., Akay O.E., Comparison of Mechanical Properties of Tensile Test Specimens Produced with ABS and PLA Material at Different Printing Speeds in 3D Printer, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (3), 1197-1211, 2022.
48. Frunzaverde D., Cojocaru V., Bacescu N., Ciubotariu C.-R., Miclosina C.-O., Turiac R.R., Marginean G., The Influence of the Layer Height and the Filament Color on the Dimensional Accuracy and the Tensile Strength of FDM-Printed PLA Specimens. *Polymers*, 15, 2377, 2023.

