



Dolgu desenlerinin ve oranlarının ergiyik biriktirme modellemede PLA malzemesinin mekanik performansına olan etkisi

The effect of filling patterns and ratios on the mechanical performance of PLA materials in fused deposition modeling

Esad Kaya^{1,*}, İsmail Bayar², Ali Fuat Akpınar³

^{1,3} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, Türkiye

² Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

Öz

Bu çalışmada üç boyutlu ergiyik biriktirmeli modelleme (EBM) yöntemi kullanılarak Polilaktik Asit (PLA) filament malzemesi ile farklı dolgu oranları ve dolgu desenlerinin çekme, basma ve eğme deformasyon davranışının mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırmada, %25, %50, %75 ve %100 dolgu oranlarında, üçgen ve üçlü-altıgen desenler kullanılarak standart testlere uygun parçalar üretilmiştir. Üretilen parçaların mekanik özellikleri, çekme, basma ve üç nokta eğme testleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, dolgu oranı artışı ile tüm test türlerinde mekanik özelliklerin arttığını göstermektedir. Çekme, basma ve eğme mukavemeti davranışları gözlemlenerek en uygun üretim deseni ve dolgu oranları belirlenmiştir. Ayrıca kasıtlı boşluklandırma kullanılarak özgül mukavemet değerleri kapsamında üretime olan etkisi gözlemlenmiştir. Çekme yükleri için %25 dolgu oranına sahip üçgen desenli numunelerde daha yüksek özgül mukavemet sağlanmıştır. Basma yükleri için optimum dayanım %50 dolgu oranına sahip üçlü-altıgen desenli üretilen numunelerde ve eğme yükleri için ise %75 dolgu oranına sahip üçlü-altıgen desenli olarak üretilen numunelerde gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, Ergiyik biriktirme yöntemi, Üretim parametreleri, PLA

1 Giriş

Son yıllarda üretim teknolojilerindeki hızlı ilerlemeler, farklı endüstri dallarında kullanılan malzemelerin üretim yöntemlerini değiştirmiştir. Bu kapsamda otomotiv, havacılık, inşaat, medikal, enerji, spor endüstrileri [1-3] gibi alanlarda faaliyet gösteren üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojileri önemli bir etki yaratarak karmaşık ve özgün nesnelerin iyi bir hassasiyetle oluşturulmasını sağlamıştır. Mevcut birçok uygulama arasında, ergiyik biriktirmeli modelleme (EBM) alanında dikkat çeken bir potansiyele sahiptir. EBM yöntemi, katı model verilerinin tabakalar halinde biriktirilmesi prensibi ile çalışan bir 3B baskı tekniğidir. Bu yöntem, ekstrüzyon tekniğine dayanmaktadır ve kullanılan malzemenin ısıtılarak nozuldan çıkan ince tabakalar halinde birleştirilmesi suretiyle istenilen geometrideki nesnelerin üretimini mümkün kılar. Bu sayede,

Abstract

In this study, the effect of Polylactic Acid (PLA) filament material and different filling ratios and filling patterns on its mechanical properties on tensile, compression and bending deformation behavior was investigated using the three-dimensional melt fused deposition modeling (FDM) method. In the research, parts were produced using triangular and triple-hexagonal patterns at 25%, 50%, 75% and 100% infilling ratios. The mechanical properties of the produced parts were evaluated by tensile, compression and three-point bending tests. The results show that mechanical properties increase in all test types with increasing infilling ratio. Optimum processes were determined by considering the mechanical properties of the selected production patterns and filling ratios. The results of mechanical tests were used to determine the best filling patterns and ratios. Samples produced with a triangular pattern and a 50% infilling ratio are predicted to exhibit optimal specific tensile strength; samples produced with a triple hexagonal pattern and a 50% infilling ratio are predicted to exhibit ideal specific compressive strength; and samples produced with a triple hexagonal pattern and a 75% infilling ratio are predicted to exhibit optimal specific bending strength.

Keywords: Additive manufacturing, Fused deposition modelling, Production parameters, PLA

hızlı prototipleme, üretim süreçlerinde esneklik ve maliyet tasarrufu gibi avantajlar elde edilmektedir [3-5]. EBM yönteminde kullanılan temel termoplastik malzemeler arasında polilaktik asit (PLA), asetronitril butadien stiren (ABS), polikarbonat (PC), poliamid (PA) ve poliüretan (TPU) gibi polimerler yer almaktadır [6-9]. Biyobozunur, biyoyumlu ve uygun maliyetli olduğu bilinen PLA ise, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ve çevre dostu olan bir malzemedir. Bu nedenle, PLA'nın EBM yöntemi ile kullanımını, çeşitli endüstrilerde sürdürülebilir ve çevreci üretim çözümleri sunma potansiyeline sahiptir [10]. EBM ile baskı işleminde nozul sıcaklığı, baskı hızı, katman yüksekliği, dolgu oranı ve dolgu deseni gibi parametreler mekanik özellikleri etkilemektedir [11, 12]. Dolgu oranı katmanın iç alanını doldurmak için tüketilen malzeme miktarıdır. Dolgu yoğunluğu %25, %50, %75 veya %100

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: esatkaya@ogu.edu.tr (E. Kaya)

Geliş / Received: 23.02.2024 Kabul / Accepted: 04.04.2024 Yayınlanma / Published: 15.07.2024

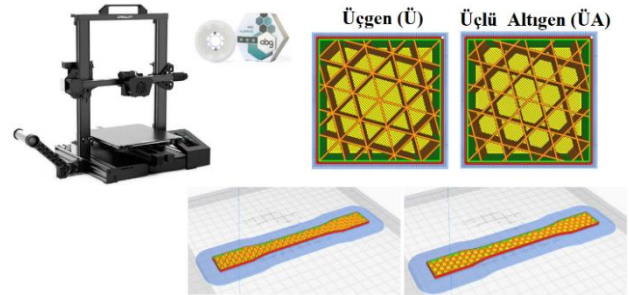
doi: 10.28948/ngumuh.1442158

gibi yüzdeler şeklinde verilir. Üretilen parçaların yapım süresini, tüketilen malzeme miktarını ve mekanik özelliklerini etkiler [13]. Dolgu deseni nozulun ilerleme hareketi kontrol edilerek 3B baskılı numunelerin iç kısmını doldurma şeklidir. Farklı dolgu oranları üretilen parçaların yapım süresini, tüketilen malzeme miktarını ve mekanik özelliklerini etkiler [13, 14]. Bu kapsamda proses parametreleri ile mukavemeti özelliklerini arasındaki ilişkinin anlaşılması için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Atakok, vd. [10] çalışmalarında üç farklı katman kalınlığı (0.15–0.20–0.25 mm) ve üç farklı doluluk oranları (%30, %50 ve %70) kullanarak numuneler üretmişlerdir. Üç nokta eğme ve darbe mukavemetlerini iyileştirmede etkili parametrenin tabaka kalınlığı olduğunu açıklamışlardır. PLA filament kullanılan çalışmada optimum sonuçları 0.25 mm katman kalınlığı, %70 doluluk oranında elde etmişlerdir. Mani, vd. [15] en iyi gerilme mukavemeti için optimum işlem parametrelerini katman kalınlığı ~0.35 mm, dolgu yoğunluğu ~%65 ve nozul sıcaklığı ~220°C olarak belirlemişlerdir. Kumar, vd. [16] EBM yöntemi ile polilaktik asit/karbon fiber kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kompozitlerin çekme mukavemeti 33.78 ile 40.78 N/mm² arasında, eğilme mukavemeti 3.16 ile 4.12 N/mm² arasında değiştiğini açıklamış ve numunelerin kırılma mekanizması boşluk, çatlak, dolgu boşlukları ve arayüzeyden etkilendiği ifade edilmiştir. Mishra, vd. [17] araştırmalarında dolgu yoğunluğu, katman yüksekliği, dolgu deseni ve baskı hızı parametrelerinin çekme ve eğilme mukavemeti üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu açıklamış ve en yüksek çekme ve eğilme mukavemetininin 0.3 mm katman yüksekliği, %80 dolgu yoğunluğu ve üçlü altıgen dolgu deseninde elde edildiği belirtilmiştir. Venkateswar Reddy, vd. [11] karbon fiber takviyeli PLA malzemede maksimum çekme mukavemetini elde etmek için uygun parametrelerin %100 dolgu yoğunluğu, 80 mm/saniye baskı hızı ve 0.3 mm katman kalınlığı olduğu belirlenmiştir.

Dolguda kullanılan üretim deseni parçanın dayanımında önem arz etmektedir. Literatür incelendiğinde genellikle basit olan üretim desenleri çokça kullanılmaktadır. Bu şekiller, petek, çaprazlamalar, dikdörtgen, zikzak desenleridir [18-20]. Bu dolgu desenlerinden olan dikdörtgen, ergiyik biriktirme modeli için standart dolgu türüdür. Diğer desenlere göre daha hızlı şekilde üretilebilir. Yapılan bir çalışmada EBM ile dikdörtgen formda üretilen PLA numunelerine baskı açısı ve düşük katman kalınlığının (0.1mm) etki ettiği görülmüştür [18]. Bahsedilen literatür taramasından görüleceği üzere yapılan çalışmalar temel desenler kullanılarak farklı dolgu oranlarının mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. EBM parçalarında mukavemet/ağırlık oranı üzerine fazla çalışma bulunmamaktadır. Yapılan çalışma ile iki farklı üretim deseninde ve farklı dört dolgu yoğunluğunda numune üretimi yapılmıştır. Üretilen numunelere çekme, basma ve eğme mukavemeti testleri yapılmıştır. Farklı endüstriyel uygulamalarda önemli olan mukavemet/ağırlık etkisidir. Bu çalışma ile bu kısım açıklığa kavuşturulması planlanmaktadır. Özgül mukavemet değerleri hesaplanmış ve her bir mekanik yük için en uygun desen ve dolgu yoğunluğu belirlenmeye çalışılmıştır.

2 Materyal ve metot

Deneyisel çalışmalarda kullanılan üretim parametreleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Katman yüksekliği standart olarak 0.2 mm olarak seçilmiştir. Üretimde kullanılan duvar kalınlığı 1.0 mm olarak alınmıştır. Üretilen numunelerin başlama ve bitiş kalınlıkları 0,8 mm olarak seçilmiştir. İlk ve en son katmanlar 4 adet olarak alınmıştır. Deneylerde ABG marka 1.75 mm çapında filamentler kullanılmıştır. PLA malzemeden beyaz renkli filamentler kullanılmıştır. Kullanılan filamentin hassasiyeti +/- 0.01 mm’dir. Kullanılan filamentler ROHS standartlarına uygundur. EBM yöntemi kullanılarak Creality Ender 6 Se yazıcısıyla 3B baskılar gerçekleştirilmiştir. Üretim aşamasında ayrıca Ultimaker Cura programı da kullanılmıştır. Sistemin şematik olarak gösterimi Şekil 1’de verilmiştir. Farklı dolgu desenleri ve farklı dolgu yoğunluklarının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Ekstrüzyon nozulunun iç yapıyı doldurmak için izlediği yola dolgu deseni denir. Baskıların iç dolgusu, mekanik dayanıklılığı ve malzeme kullanımını etkileyen önemli bir faktördür. Bu çalışmada, üçgen ve üçlü altıgen dolgu desenleri (Şekil 1), kullanılmıştır. Dolgu yoğunluğu, parçanın içinde katman katman doldurulan ergimiş malzeme miktarına denilir, yüzde (%) olarak ifade edilir, mekanik dayanıklılığı ve malzeme kullanımını etkilen diğer bir faktördür. Çalışmada %25, %50, %75 ve %100 dolgu yoğunlukları kullanılmıştır. Üçgen desenli numuneler dolgu yoğunluklarına göre Ü25, Ü50, Ü75 ve Ü100 olarak, üçlü altıgen numuneler ise ÜA25, ÜA50, ÜA75 ve ÜA100 olarak isimlendirilmiştir.



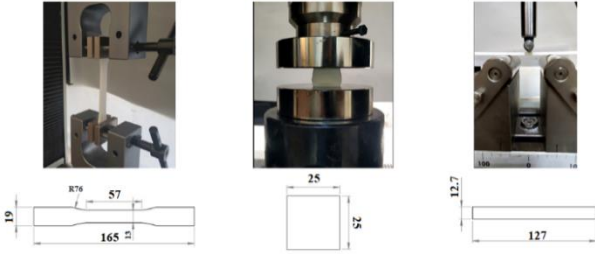
Şekil 1. EBM cihazı ve üretilen desen türleri

Tablo 1. EBM baskı parametreleri

Parametre	Değer
Ekstruder nozul sıcaklığı	200°C
Baskı hızı	50 mm/s
Yazdırma platform sıcaklığı	60°C
Duvar kalınlığı	1.0 mm
Nozul çapı	0.4 mm
Katman yüksekliği	0.2 mm
Filament çapı	1.75±0.01 mm

Üretilen malzemeler ile çekme, basma ve üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Testler 5 kN Shimadzu AG-IC Universal test cihazında 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Her üretim parametresi seti için en az üç numune test edilmiştir. Belirtilen sonuçlar ortalama değer olarak raporlanmıştır. Çekme, basma ve üç nokta eğme test numunelerinin boyutları Şekil 2’de verilmiştir. Çekme numunelerinin tasarımı ASTM D638 standartları kullanılarak yapılmıştır.

Çekme testleri ASTM D638 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Çekme mukavemeti, maksimum yükün çekme kesit alanına bölünmesiyle elde edilmiştir. Çekme hızı 1 mm/dk'dır. Basma numuneleri ASTM D695 standartlarına göre üretilmiştir. Boyutları 25x25x25 mm³ ve basma hızı 2 mm/dk'dır. Üretilen polimer numunelerin basma testleri ASTM D695 standartlarına göre yapılmıştır. Üretilen numunelerin mekanik özelliklerini belirlenmek için kullanılan diğer test ise üç nokta eğme testidir ve ASTM D790 standardına göre üretilmişlerdir. Bu testte uygulanan kuvvet sonucu olarak numunelerin kuvvetle temas eden tarafı çekiye zorlanırken, kuvvet temasının arkasında kalan kısım ise bası gerilmesine maruz kalmaktadır. Çekme bölgesinde oluşan ilk çatlağın ardından numune hasara uğrar ve bükülür. Eğme testleri ASTM D790 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneyler için destekler arası mesafe 62 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan deneylerde destek açıklık oranı 16:1 olarak belirlenmiştir. Yapılan eğme testi için 1.66 mm/dk kesit hızı kullanılmıştır.



Şekil 2. Deney düzenek gösterimi ve numune boyutu

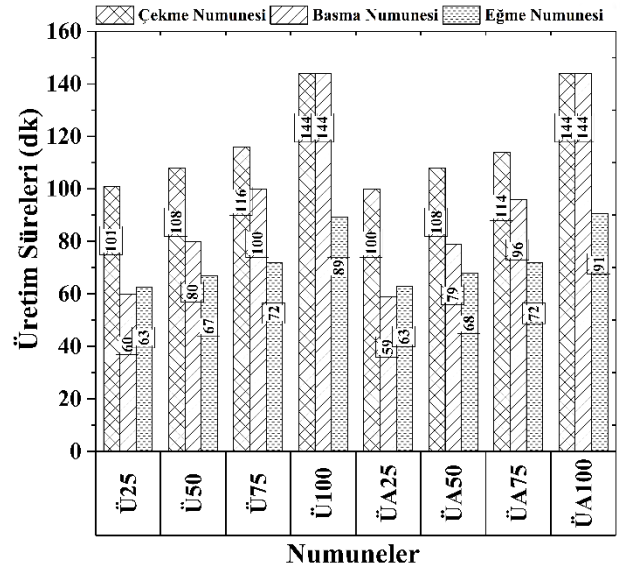
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Üretim ve mikroyapı analizi

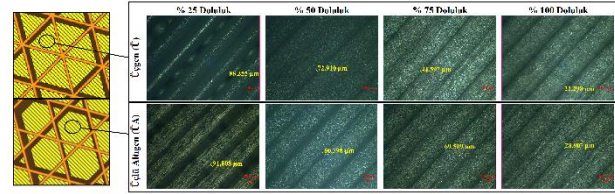
Şekil 3, üretilen numunelerin üretim sürelerini göstermektedir. Malzeme içerisindeki dolgu oranı arttıkça tahmin edileceği üzere üretim süresi artmaktadır. Bu durum yüksek dolulukta üretim yapmanın daha uzun süre işçilik ve ekipman kullanıma yol açacağını göstermektedir. Üretim süresi açısından karşılaştırma yapıldığında farklı desenlerin kullanımı çarpıcı değişimlere neden olmamaktadır. Üretim sürelerinde çarpıcı değişim beklenildiği üzere malzeme dolgu oranlarının artmasıyla ortaya çıkmaktadır. Her iki üretim deseni için de %25 dolgu oranından %100 dolgu oranına göre kıyaslandığında üretim süresi yaklaşık %42 artmıştır. %25 ile %75 dolgu oranları kıyaslandığında üretim sürelerinde çarpıcı artış görülmektedir. Bu durum mukavemet ve maliyet açısından düşünüldüğünde %100 doluluk oranı ile karşılaştırıldığında eğer yeterli dayanım gösterebilirse tam dolu malzemelerin kullanımının gerekli olmadığını bir göstergesidir.

Şekil 4, üretilen numunelerin optik mikroyapı analizini göstermektedir. Üretim yönteminden dolayı katmanlar, katmanlar arası geçiş bölgeleri ve katmanlar arası boşluklar açıkça görülmektedir. Katmanlar arası boşluklar açısından optik mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde en fazla boşluk miktarının her iki desende de %25 doluluk oranına sahip numunelerde olduğu görülmektedir. Artan dolgu miktarı ile katmanlar arası boşluğun ortadan kalktığı ve katmanların sıklaştığı görülmektedir. Elde edilen görüntü

yapılan kasıtlı boşluklandırma işleminin efektif ve tutarlı olduğunu bir göstergesidir.



Şekil 3. Numunelerin üretim süreleri



Şekil 4. Üretilen numunelerin optik mikroyapı fotoğrafı

3.2 Çekme testi sonuçları

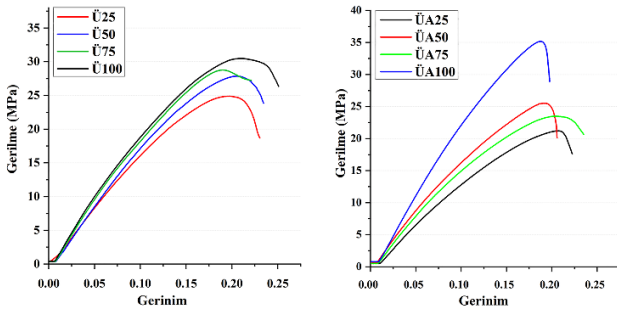
Ergiyik biriktirmeli modelleme ile üretilen PLA numunelerinin çekme testlerinin ardından maksimum çekme kuvveti, uzama miktarı, numunelerin kesit alanı ile maksimum çekme dayanımı ve yüzde uzama miktarı hesaplanmıştır (Tablo 2). Tüm numunelerde en iyi çekme dayanımı ÜA100 numunesinde 35.18 MPa olarak belirlenmiştir. İki dolgu deseninde de en yüksek çekme dayanımı %100 dolu numunelerde elde edilmiştir. İki dolgu deseninde de dolgu yoğunluğu arttıkça çekme dayanımı da artmıştır, ÜA dolgu deseninde bu oran daha fazladır. Dolgu yoğunluğundaki artış kesit alanını arttırdığı için maksimum kuvvet değerleri de artmıştır. Ü100 numunesinin çekme dayanımı Ü25 numunesinden ~%22 fazladır. ÜA numunelerinde ise bu oran ~%65'dir. Aynı dolgu oranları karşılaştırıldığında, ÜA100 numunesinin çekme dayanımı Ü100 numunesinden ~%15 fazladır. %25, %50 ve %75 dolgu oranlarında ise üçgen dolgu desenine sahip numunelerin çekme dayanımları daha fazladır.

Farklı dolgu oranlarına sahip üçgen ve üçlü altıgen desenli numunelerin gerilme ve gerinim eğrilerini Şekil 5'de verilmiştir. Üretim desenleri kendi içlerinde dolgu oranına göre incelendiğinde, beklenildiği üzere dolgu oranı arttıkça, numunelerin maksimum çekme gerilmesi artmıştır. Üretilen desenler birbiri ile karşılaştırıldığında ise maksimum çekme gerilmesi ve dolaylı olarak yüke dayanımın üçgen

yapılarında daha yüksek olduğu görülmektedir. %100 doluluğa sahip üçgen yapıların çekme dayanımının %100 doluluğa sahip üçlü altıgen yapılar ile eşdeğer olduğu görülmektedir. Maksimum yüke karşılık gelen deformasyon ise üçgen %100 dolgu deseninde (Ü100), üçlü-altıgen dolgu deseninde ise %100 dolgu deseninde (ÜA100) numunesinde elde edilmiştir. Bu durum üçlü altıgen yapıların süneklik açısından daha üstün olduğu göstermektedir.

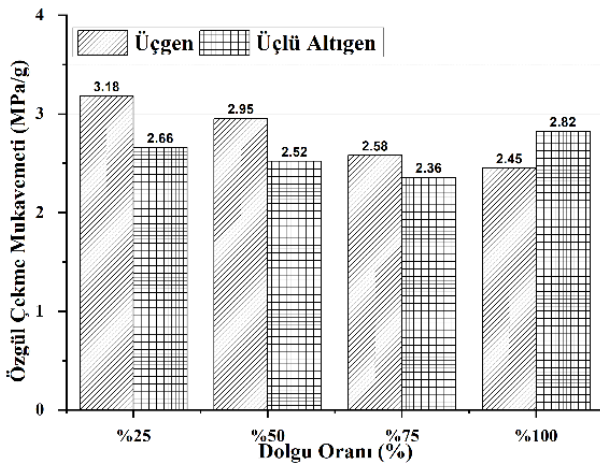
Tablo 2. Çekme testi genel sonuçları

Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Numune Ağırlığı (gr)
Ü25	24.90	4.45	7.83
Ü50	27.85	4.67	9.43
Ü75	28.77	4.34	11.15
Ü100	30.49	4.79	12.44
ÜA25	21.22	4.69	7.98
ÜA50	25.52	4.39	9.64
ÜA75	23.49	4.64	11.41
ÜA100	35.18	4.28	13.09



Şekil 5. Farklı desenlerde üretilen numunelerin çekme testi gerilme-gerinim diyagramı

Çekme testinden önce numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür (Tablo 2). Numune ağırlığı tüketilen malzeme miktarı olarak da değerlendirilebilir. Dolgu yoğunluğu ve deseni tüketilen malzeme miktarını dolayısıyla maliyeti etkilemektedir. Ü25 numunesinde tüketilen malzeme miktarı 7.83 gr iken Ü100 numunesinde bu miktar %59 daha fazladır.



Şekil 6. Farklı desenlerde üretilen numunelerin özgül çekme mukavemeti

Ağırlık olarak tüketilen malzemelerin artış oranı, çekme dayanımının artış oranından daha fazladır. Maliyet ve mukavemet açısından optimum dolgu yoğunluğu ve desenini belirlemek için numunelerin maksimum çekme mukavemeti, numune kütlesine bölünerek özgül maksimum çekme mukavemetleri hesaplanmıştır (Şekil 6). Optimum değerler üçgen desende Ü25 numunesinde ~3.18 MPa/g olarak, üçlü-altıgen desende ise ÜA50 numunesinde ~2.95 MPa/g olarak hesaplanmıştır. Kullanılacak parçanın %100 dolu olması istenmediği koşullarda optimum parametreler belirlenerek maliyet azaltılabilir. Şekil 6'dan görüleceği üzere birim kütle başına dayanımda boşluklu yapılarla daha yüksek olarak elde edilebilmektedir.

3.3 Basma testi sonuçları

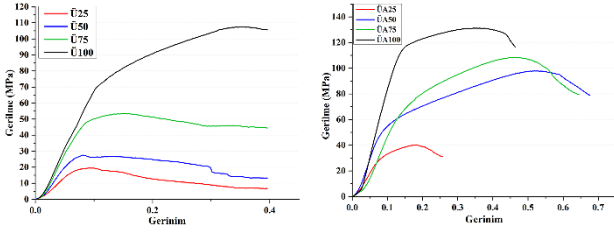
Basma testinden elde edilen deney sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Çekme dayanımlarına benzer davranışta en yüksek basma dayanımları %100 dolgu yoğunluğuna sahip numunelerde elde edilmiştir. Dolgu yoğunluğu artışı ile maksimum basma dayanımının arttığı görülmektedir. %25, %50 ve %75 dolgu oranlarında üçlü altıgen numunelerin basma dayanımı üçgen desenli numunelerden en az iki kat daha fazladır. %100 dolgu oranlarındaki basma dayanımında ise ÜA100 numunesi Ü100 numunesinden ~%22 yüksektir. Üçlü altıgen desene sahip numunelerin sıkıştırmaya karşı absorbe ettiği enerji tüm üçgen dolgu desenli dolgu oranlarındakilerdeki numunelerde fazladır. Sonuç olarak numunelerin basma dayanımlarının dolgu yoğunluğu ile birlikte dolgu deseninden etkilendiği söylenebilir.

Tablo 3. Basma testi sonuçları

Numune	Max. Basma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Numune Ağırlığı (gr)
Ü25	19.52	9.181	13.927
Ü50	27.51	8.126	20.318
Ü75	53.56	14.953	27.399
Ü100	107.52	35.165	32.668
ÜA25	40.39	17.898	14.136
ÜA50	97.89	51.953	20.948
ÜA75	108.35	45.921	28.124
ÜA100	131.21	36.205	33.155

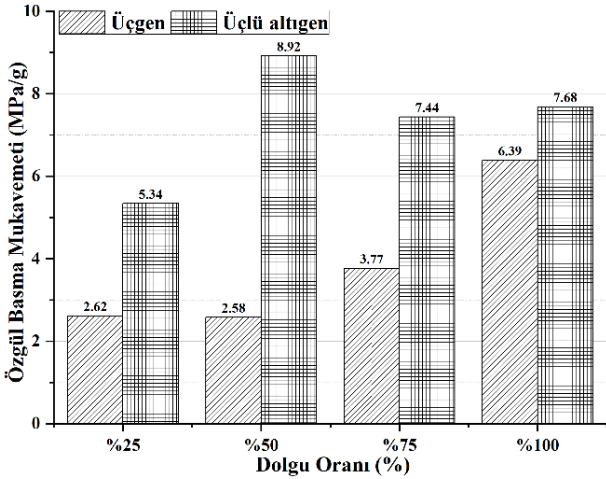
Basma testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri Şekil 7'de verilmiştir. Görüleceği üzere en yüksek basma mukavemet değerlerine %100 dolgu oranına sahip numunelerde elde edilmiştir. Malzeme dolgu oranı düştükçe basma dayanımı düşmüştür. Desenler birbiri ile kıyaslandığında en yüksek dayanım üçlü altıgen yapılarda olduğu görülmektedir. Bu yapılarda oluşan basma performansının üçgen yapılara göre daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca üçgen yapılarda dolgu oranına bağlı olarak basma mukavemetinde çarpıcı bir düşüş gözlemlenmiştir. Üçlü altıgen yapılarda bu kritik eşik ise %25 dolgu oranına sahip olan numunelerde gözlenmiştir. Süneklik açısından kıyaslandığında artan dolgu oranı ile sünekliğin her iki üretim deseninde de düştüğü görülmüştür. Üçgen yapılar için tüm dolgu oranları benzer süneklik davranışı göstermiştir. Üçlü altıgen yapılarda ise %75 ve %50 dolgu oranlarında malzemenin daha yüksek süneklik

davranışı (%30-40) olduğu görülmektedir. Bu durumda dayanımda yapılacak bir miktar tasarıfa karşılık kütle ve süneklikten kazanım elde edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 7. Farklı desenlerde üretilen numunelerin basma testi gerilme-gerinim diagramı

Şekil 8, basma numuneleri için hesaplanan özgül basma mukavemeti değerlerini göstermektedir. Üçgen desenli yapılarda en yüksek özgül basma mukavemet değerleri %100 dolgu oranına sahip Ü100 numunesinde gözlemlenmiştir. Üçgen yapılar için özgül basma mukavemet değerleri dolgu oranı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu nedenle üçgen yapıların basma mukavemetine maruz kalacak iş parçası üretiminde kasıtlı boşluklu üretilmesinin çok mantıklı olmadığını göstermektedir. Üçlü altıgen desenli yapılar kıyaslandığında ise en yüksek özgül basma mukavemet %50 dolgu oranına sahip numunelerde elde edilmiştir. Tüm desenler ve farklı dolgu oranları kıyaslandığında en yüksek özgül basma mukavemet değeri %50 dolgu oranına sahip ÜA50 numunesinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum üçlü altıgen yapının basma kuvvetlerine daha dayanımlı olduğunun bir göstergesidir.



Şekil 8. Farklı desenlerde üretilen numunelerin özgül basma mukavemeti

3.4 Eğme testi sonuçları

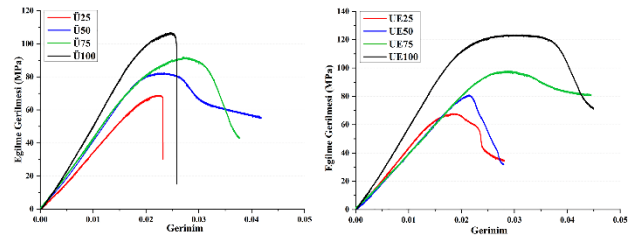
Tablo 4’de maksimum eğme mukavemeti (σ), eğme elastisite modülü (Eğme) ve üretilen numunelerin ağırlıkları verilmiştir. Numunelerin eğme mukavemetleri karşılaştırıldığında en yüksek ÜA100 numunesinde (123.49 MPa), en düşük ise ÜA25 numunesinde (68.77) belirlenmiştir. İki dolgu deseninde de dolgu oranı arttıkça eğme mukavemeti artmaktadır. Üçgen desenli numunelerde

dolgu oranı %25’den %100’e çıktığında eğme mukavemeti %55 artmıştır. Üçlü- altıgen numunelerde ise bu oran %83’tür. Farklı desenlerin aynı dolgu oranlarında eğme mukavemetleri birbirine yakındır, fakat %75 ve %100 dolgu oranlarında, üçlü altıgen desenli numunelerin maksimum yük taşıma dayanımı, üçgen desenli numunelere göre biraz daha fazladır. %25 ve %50 dolgu oranlarında ise üçgen desenli numunelerin maksimum eğme mukavemetleri daha fazladır. Numunelerin eğme rijitliği de eğme mukavemetine benzer durumda artan dolgu oranı miktarı ile artmaktadır. %100 dolgu oranlarında eğme mukavemeti artmıştır fakat kullanılan malzeme miktarı ve üretim süresi de artmıştır.

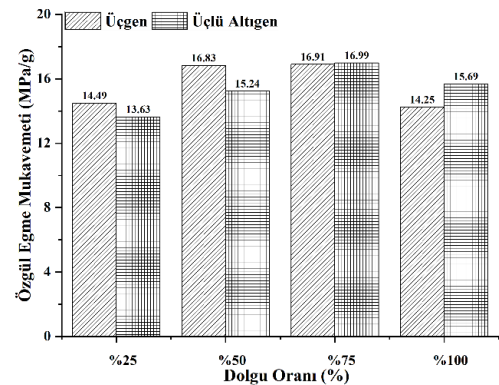
Tablo 4. Eğme testi sonuçları

Numune	Eğme gerilmesi σ (MPa)	Eğilme Rijitliği (GPa)	Ağırlık (gr)
Ü25	68.77	3.106	4.747
Ü50	82.39	3.649	4.895
Ü75	91.96	3.406	5.438
Ü100	106.84	4.329	7.498
ÜA25	67.37	3.717	4.942
ÜA50	80.91	3.796	5.308
ÜA75	97.75	3.456	5.754
ÜA100	123.49	4.318	7.872

Numunelerin eğilme gerilmesi-gerinim eğrileri Şekil 9’da verilmiştir. Görüleceği üzere maksimum eğilme gerilmesi dayanımı her iki desen grubu içinde artan dolgu oranında ve en yüksek dayanım değerleri %100 dolulukta malzemelerde elde edilmektedir. Üretim desenleri birbirleri ile kıyaslandığında ise üçlü altıgen desen yapıların daha yüksek dayanım performansı sağladığı görülmektedir. Benzer yaklaşım süneklik açısından da üçlü altıgen desenlerin daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Farklı desenlerde üretilen numunelerin eğme testi gerilme-gerinim diagramı



Şekil 10. Farklı desenlerde üretilen numunelerin özgül eğme mukavemeti

Çekme ve basma testlerinde olduğu gibi maksimum eğme mukavemeti numune kütlesine oranlanarak özgül eğme mukavemeti değerleri hesaplanmıştır (Şekil 10). Her iki desen grubunda en yüksek özgül eğme mukavemet değerleri %75 dolgu deseninde görülmüştür. Ü75 ve ÜA75 numunelerinde sırasıyla ~16.91 MPa/g ve 16.99 MPa/g olarak hesaplanmıştır. Her iki üretim desen grubu içinde %75 doluluk oranına sahip malzeme grubunun tam dolu duruma göre daha üstün performans sağladığı görülmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada PLA filament malzemeden EBM yöntemi ile farklı desen türüne ve dolgu oranına sahip malzemeler efektif olarak üretilmiştir. Üretilen numuneler üretim parametreleri, mikroyapısal ve mekanik testler (çekme, basma ve eğme) ile performansları incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda raporlanmıştır.

- Üretim süresinin malzeme dolgu miktarı ile orantılı olarak arttığı ve dolaylı olarak maliyeti arttırdığı görülmüştür.

- Yapılan optik mikroyapı analizi ile kasıtlı boşluklu üretimin başarılı gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Yapılan tüm mekanik testlerde en yüksek mukavemet değerleri %100 dolgu oranlarında elde edilmiştir.

- Yapılan çekme testlerinde üçgen desen grubu için %25 dolgu oranına sahip numuneler tam dolgulu malzemeye kıyasla eşdeğer özgül mukavemet sağlarken üçlü altıgen desenli numunelerde çarpıcı performans düşmeleri tespit edilmiştir. Çekme mukavemeti açısından, üretim zamanı ve dolaylı olarak maliyet gözönüne alınarak %50 dolgu oranına sahip üçgen desenli üretilen numunelerin optimum olduğu söylenebilir.

- Uygulanan basma testleri içinse, farklı dolgu oranlarına sahip üçgen desenli üretilmiş numunelerde dolgu oranını düşümü sonrası mekanik performans keskin düşmüştür. Bu nedenle üçgen desenli numunelerin basma yükleri için efektif olmadığı düşünülmektedir. %50 dolgu oranlı üçlü altıgen desenli numune (ÜA50) en yüksek özgül basma mukavemet performansı sağlamıştır. Üretim zamanı da baz alınarak %50 dolgu oranına sahip üçlü altıgen numunenin basma mukavemeti açısından optimum olduğu söylenebilir.

- Eğme mukavemeti açısından, üçgen desenli numunelerin performansının üçlü altıgen desenli üretilmiş numunelere göre düşük olduğu gözlemlenmiştir. Her iki desen grubu için de %75 dolgu oranına sahip numunelerin en yüksek benzer özgül basma mukavemeti sergilediği görülmüştür. Maliyet açısından da düşünüldüğünde %75 dolgu oranlı numunenin (ÜA75) optimum olduğu düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %1

Kaynaklar

[1] Y. Mohseni, M. Mohseni, S. Suresh, M. Riotto, A. Jaggesar, J. Little, M. Wille and P. Yarlagaadda, Investigating impacts of FDM printing parameters and

geometrical features on void formation in 3D printed automotive components, *Materials Today: Proceedings*, 2214-7853, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.078>

[2] A. Yadav, B. Prakash, K. Dileep, S. Rao and G. Kumar, An experimental examination on surface finish of FDM 3D printed parts, *Materials Today: Proceedings*, 2214, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.088>

[3] L. Marşavina, C. Vălean, M. Mărghitaş, E. Linul, S. Razavi, F. Berto and R. Brighenti, Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens, *Engineering Fracture Mechanics*, 274, 108766, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108766>

[4] Y. Zhao, Y. Chen and Y. Zhou, Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses, *Materials & Design*, 181, 108089, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108089>

[5] O. Mohamed, S. Masood and J. Bhowmik, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, *Advances in Manufacturing*, 3, 42-53, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>

[6] M. Singh, B. Singh, M. Singla and R. Kumar, Investigation of melt flow index of dual metal reinforced ABS polymer for FDM filament fabrication, *Materials Today: Proceedings*, 2214-7783, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.188>

[7] P. Singhal, R. Sujithra and D. Saritha, Effect of alternate fill pattern on mechanical properties of FDM printed PC-PBT alloy, *Materials Today: Proceedings*, 62, 3791-3799, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.470>

[8] L. Feroz, R. Raghul, M. Yogesh, V. Harshavardhan Reddy and N. Shakil, Evaluation of the polyamide's mechanical properties for varying infill percentage in FDM process, *Materials Today: Proceedings*, 68, 2509-2514, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.227>

[9] P. Romero, J. Arribas-Barrios, O. Rodriguez-Alabanda, R. González-Merino and G. Guerrero-Vaca, Manufacture of polyurethane foam parts for automotive industry using FDM 3D printed molds, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 32, 396-404, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.01.019>

[10] G. Atakok, M. Kam and H. Koc, Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation, *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 1542-1554, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.013>

[11] M. Venkateswar, B. Hemasunder, P. Mahadevapa Chavan, N. Dish and A. Savio, Study on the significance of process parameters in improvising the tensile strength of FDM printed carbon fibre reinforced PLA, *Materials Today: Proceedings*, 2214-7853, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.330>

- [12] E. Urquizo, E. Barocio, V. Ortigoza, R. Pipes, C. Rodriguez and A. Flores, Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches. *Materials*, 12, 895, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12060895>
- [13] M. Tanveer, G. Mishra, S. Mishra and R. Sharma, Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts- a current review, *Materials Today: Proceedings*, 62, 100-108, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.310>
- [14] G. Dakhil, R. Salih and A. Hameed, Hameed, Influence of Infill Pattern, Infill Ratio on Compressive Strength and Hardness of 3D Printed Polylactic Acid (PLA) Based Polymer, *Journal of Applied Sciences and Nanotechnology*, 3, 1-7, 2023. <https://doi.org/10.53293/jasn.2022.4745.1141>
- [15] M. Mani, A. Karthikeyan, K. Kalaiselvan, P. Muthusamy and P. Muruganandhan, Optimization of FDM 3-D printer process parameters for surface roughness and mechanical properties using PLA material, *Materials Today: Proceedings*, 66, 1926-1931, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.422>
- [16] K. Kumar, V. Mohanavel and K. Kiran, Mechanical Properties and Characterization of Polylactic Acid/Carbon Fiber Composite Fabricated by Fused Deposition Modeling, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31, 4877-4886, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06566-7>
- [17] A. Mishra, V. Srivastava and N. Gupta, Additive manufacturing for fused deposition modeling of carbon fiber–polylactic acid composites: the effects of process parameters on tensile and flexural properties, *Functional Composites and Structures*, 3, 045007, 2021. <https://doi.org/10.1088/2631-6331/ac3732>
- [18] Y. Zhao, Y. Chen and Y. Zhou, Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: experimental and theoretical analyses, *Materials & Design*, 181, p 108089, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108089>
- [19] L. Yang, S. Li, Y. Li, M. Yang and Q. Yuan, Experimental investigations for optimizing the extrusion parameters on FDM PLA printed parts, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28, p 169–182, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3784-x>
- [20] J. Floor, B. Deursen and E. Tempelman, Tensile strength of 3D printed materials: Review and reassessment of test parameters, *Materials Testing*, 60, p 679-686, 2018. <https://doi.org/10.3139/120.111203>

