



Araştırma Makalesi- Research Article

Fdm Yöntemiyle Üretilen Pla Malzemelerde Dolgu Deseninin Mekanik Özelliklere Etkisi

Effect Of The Infill Pattern On Mechanical Properties Of Pla Materials Manufactured By Fdm Method

Ömer Adanur¹, Oğuz Koçar², Ahmet Serdar Güldibi^{3*}

Geliş / Received: 02/08/2023

Revize / Revised: 16/01/2024

Kabul / Accepted: 16/01/2024

ÖZ

Bu çalışmada PLA (poly lactic acid) malzemeler ile %15 doluluk oranlarında üretilen numunelerde farklı baskı desen ve açılarının malzemelerin üretim sürelerine, ağırlıklarına ve mekanik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla tam dolu numune ile toplam 14 adet çekme numunesi ve 12 adet basma numuneleri üretilmiş ve çekme ve basma testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, geometrik desenin karmaşıklığının baskı süresini uzattığı, %15 dolu numunenin tam dolu numuneye oranla çok daha kısa baskı süresi ve malzeme sarfiyatı verdiği tespit edilmiştir. Baskı açısının malzemenin mukavemetine etkisi olduğu görülmüştür. Çekmeye dayanıklı numunelerin basma testlerinde daha zayıf performans sergilediği, basmaya dayanıklı numunelerin ise çekme testlerinde daha zayıf dayanım sergilediği görülmüştür. Her iki testte de benzer dayanımı gösteren numuneler ise bal peteği, jiroid ve grid desenleri olmuştur. Dolgu desen ve açısının uzama ve şekil değiştirme davranışlarında da etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Dolgu Deseni, PLA, FDM, 3B Yazıcı

ABSTRACT

In this study, the effects of different printing patterns and angles on the production times, weights, and mechanical properties of samples produced with PLA (poly lactic acid) materials at a 15% fill density were investigated. For this purpose, a total of 14 tensile specimens and 12 compression specimens were produced, along with a fully filled specimen, and subjected to tensile and compression tests. According to the obtained results, it was determined that the complexity of the geometric pattern extended the printing time, and the 15% filled specimen had much shorter printing time and material consumption compared to the fully filled specimen. The printing angle was found to affect the material's strength. Tensile-resistant specimens showed weaker performance in compression tests, while compression-resistant specimens exhibited weaker resistance in tensile tests. Samples with similar strength in both tests were honeycomb, gyroid, and grid patterns. It was also observed that the fill pattern and angle affected elongation and deformation behaviors.

Keywords- Infill Rate, PLA, FDM, 3B Printer

¹İletişim: oadanur@subu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5591-9661>)

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Karasu MYO, Karasu/Sakarya

²İletişim: oguz.kocar@beun.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-1928-4301>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak

^{3*}Sorumlu yazar iletişimi: aserdarguldibi@karabuk.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-7021-060X>)

İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Karabük

I. GİRİŞ

3B (üç boyutlu) yazıcılar eşsiz üretim kabiliyetleri, tasarımı kısa sürede ürüne dönüştürebilme özellikleri ve geleneksel üretim tekniklerine göre sağladıkları eşsiz avantajlar nedeniyle birçok sektör tarafından kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına ve kullanılan üretim malzemelerine göre birçok farklı 3B yazıcı türü vardır. ASTM 3B yazıcı teknolojisini, bağlayıcı püskürtmeli (binding jetting), direk enerji biriktirme (direct energy deposition), malzeme ekstrüzyon (material extrusion), malzeme püskürtmeli (material jetting), toz yatağı ergitme (powder bed fusion), sac lamine (sheet lamination) ve foto polimerizasyon (photopolymerization) olarak 7 farklı guruba ayırmaktadır [1]. Bu guruplarda da ergiterek yığıma modeli (FDM-Fused Deposition Modeling), sterolitografi (SLA-), Lazer Sinterleme (SLS-Service Level Agreement), elektron ışınli ergitme (EBM-Electro Beam Melting) gibi kendi içinde farklı yöntem ve teknolojilerde makineler sayılabilir [2].

3B yazıcılar içerisinde en çok kullanılanı, maliyet ve tedarik açısından sağladığı kolaylıklar nedeniyle FDM 3B yazıcılarıdır. Bu yazıcılar malzeme olarak ergitilebilir ve filament formdaki herhangi bir malzemeyi yazdırabilir. FDM tipi yazıcılarda kullanılan ve ticari olarak sunulan filament malzemeleri PLA, PETG, ABS, ASA, PC/ABS, TPU tipi malzemelerdir. Bu malzemeler haricinde, akademik çalışmalarda üretilen ve filament özelliklerini geliştiren katkılı filamentler de mevcuttur [3,4]. Kullanılan filamentlerin özelliklerine ve baskı kriterlerine göre, baskı kalitesi ve ürün kalitesi elde etmek mümkündür. Kullanılan filament özelliklerine göre baskı süresi, baskı sıcaklığı ve diğer parametreler farklılık göstermekte, çıkan ürün de bu parametrelere ve kullanılan filamentte bağlı olarak farklı mekanik özellikler göstermektedir [5].

Dünyada artan nüfus ve beraberinde gelen enerji ve ürün tüketimi, daha tasarruflu ve ekonomik ürünlerin üretilmesi için çalışmalarını teşvik etmektedir. 3B yazıcılar da gerek prototip üretimler için gerekse düşük sayıdaki imalatlar için kalıp ihtiyacını ortadan kaldırmasıyla bu gereksinimlere cevap verebilmektedir. 3B yazıcılar ile yapılan üretimlerde numunelerin tam dolu olarak üretilmesine de gerek yoktur ve numuneler arzu edilen doluluk oranlarında gerekli kalite ve dayanım göz önünde bulundurularak üretilir. Bu imkân sayesinde de hem malzeme hem de zaman ve enerjiden tasarruf edilmesi mümkündür. FDM tipi yazıcıların kullanımının yaygınlaşması ile bu yöntem ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yapılan çalışmalar da yaygınlaşmıştır. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalar da filamentlere katkı ilavesi ile kompozit filament üretimi [6,7], dolgu deseni [8] ve sandviç yapılar [9], doluluk oranları [10,11] gibi farklı çalışmalar yer almaktadır.

3B yazıcılardan elde edilen ürünlerin baskı kalitesini arttırmak amacıyla kullanılan yöntemlerden birisi de sandviç yöntemidir. Bu yöntemde, farklı polimer malzemeler, katmanlar halinde birbiri üzerinde yazdırılır ve elde edilen ürün birden fazla polimerin birleşimidir. ABS, PLA ve HIPS polimerleri ile yapılan çalışmanın sonuçlarına göre, çekme mukavemeti açısından en yüksek değer PLA katmanları arasında ABS dolgusu ile elde edilmiştir. En düşük çekme performansı ise dış katmanın HIPS, iç dolgunun ABS olduğu çalışmada elde edilmiştir [12].

Nikhil ve arkadaşları FDM yöntemiyle farklı dolgu desenlerinde üretilmiş 3B malzemelere darbe dayanımını incelemişlerdir. Çalışmada üç farklı dolgu yoğunluğu (40, 60 ve 80), üç farklı desen (düz, kübik ve grid) ve üç farklı yazdırma yönü (yatay, köşe ve dik) seçmişlerdir. Sonuçlara göre optimum değer dolgu yoğunluğu 40 olarak seçilen numunede, düz baskı ve köşe yönünde olan baskıda elde edildiği bildirilmiştir [13].

Kain ve arkadaşları [14], dolgu deseninin ağaç katkılı PLA malzeme ile yapılan üretimlerde mekanik özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan filamentlerin gevrek geçiş sıcaklığı 55-60 °C aralığında ve 1.24 g/cm³ yoğunluğundadır. Katkı olarak kullanılan ağaç fiberlerinin tane boyutları 30-200 µm aralığındadır ve %15 ve %25 katkılı olarak iki tür filament üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, numunelerin çekme, basma, eğme ve darbe çentik özelliklerini incelemişlerdir. Numune üretiminde 7 farklı açı (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, en yüksek çekme dayanımı beklenenin aksine 0° açı ile yapılan üretimde değil, odun katkı oranına bağlı olarak 15° ila 30° açı ile üretilen numunelerde elde edilmiştir. En yüksek basma dayanımı ise 0° ve 15° açılarda üretilen numunelerde elde edilmiştir. Darbe çentik testi sonuçlarına göre, baskı açısının darbe çentik değerlerine bir etkisi olmadığı ancak artan ağaç fiber katkısının darbe dayanımını arttırdığı bildirilmiştir.

Kumar ve arkadaşları [15] yaptıkları çalışmada PLA malzemeye PEG (ethylene glycol) ilavesinin fiziksel, mekanik ve yazdırılabilirlik üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla %1, 3 ve 5 oranlarında PEG ilave ettikleri PLA filamentleri üretmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, PEG ilavesi eriyik akış oranı olan MFR değerini arttırmıştır. PEG ilavesi üretilen malzemelerin çekme dayanımlarında düşüşe neden olurken, uzama miktarlarını arttırmıştır. Darbe dayanımı test sonuçlarına göre ise PEG ilavesi plastiklik özelliğini artırarak darbe dayanımında artış sağlamıştır.

Khan ve arkadaşları [16] PLA malzemelerin üretiminde dolgu deseninin çekme ve eğme mukavemetine olan etkilerini incelemiştir. Çalışmada elde edilen verilere göre, dolgu deseni numunelerin elastikiyet modülü üzerinde etkili olduğu görülmüştür. En yüksek elastikiyet modülü “doğrusal” numunede ölçülmüştür, en düşük ise

“hilbert eğrisi” deseninde elde edilmiştir. Dayanım değerlerine bakıldığında ise, en yüksek çekme ve eğme mukavemeti “Doğrusal” desende ölçülürken, en düşük değerler “Hilbert Eğrisi” deseninde ölçülmüştür.

Rismalia ve arkadaşları [17] baskı deseni ve baskı yoğunluğunun PLA malzemelerin çekme dayanıma olan etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada 6 farklı desen ve üç farklı doluluk oranları değerlendirilmiştir. Farklı baskı yoğunlukları ve desenlerinde yapılan çalışma sonuçlarına göre, en yüksek çekme dayanımı (UTS) eşmerkezli desenlerde elde edilirken, en düşük çekme dayanımı altıgen desende elde edilmiştir.

Vicente ve arkadaşları [18] farklı baskı desen ve oranlarında ABS malzemelerin mukavemet değişimlerini incelemiştir. Ürettikleri numunelerde açık kaynak yazılımı kullanmış ve altı farklı desen ve üç farklı doluluk oranlarını (%20, %50 ve %100) değerlendirilmiştir. Elde ettikleri veriler incelendiğinde, en yüksek çekme dayanımı “bal peteği” deseninde elde edilirken, en düşük dayanım “doğrusal” baskı şeklinde elde edilmiştir.

Yukarıdaki literatür araştırmalarından da görüleceği üzere, baskı desen ve doluluk oranları ile kullanılan yazıcı ve dilimleme yazılımı gibi farklı yöntemler farklı sonuçlar vermiştir. Bunun en temel nedeni, her bir yazılım ve yazıcının kendine özgü baskı kalitesinden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada ise, Prusa marka 3B yazıcı ve “Prusa Slicer” dilimleme programı kullanılmıştır. Bu programın dilimleme özelliklerinde yer alan desen düzeni, yazıcı baskı kalite ve hassasiyeti ve tabla sıcaklığı uygulaması ile yazdırma kalitesini arttırmaktadır. Aynı zamanda “Prusa Slicer” yazılımının diğer yazılımlardan farklı olarak sunduğu “3B Petek” gibi çalışma da kullanılan baskı desenleri mevcuttur. Her ne kadar literatürde benzer çalışmalar yer alsa da kullanılan ekipman ve yazılımın etkileri nedeniyle sonuçlar değişebilmektedir. Nitekim Marşavina ve arkadaşları [19] Prusa ve WN400 3B Platform marka ve model bir yazıcı ile farklı baskı açılarındaki üretilen numuneleri kıyaslamıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, Young modülü 3B platform yazıcısında yüksek çıkarken, çekme dayanımı Prusa marka yazıcıda daha yüksek sonuçlar vermiştir. 3B yazıcı ile yapılan üretimler artarak devam etmekte ve bu konu üzerinde yapılan çalışmalar da giderek yaygınlaşmaktadır [20,21].

Bu çalışmada, Prusa Mini 3B yazıcı ile en sık kullanılan 6 farklı desen seçilmiştir ve %15 doluluk oranlarında üretilen bu desenlerin, malzemelerin mekanik özelliklerine olan etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada seçilen baskı deseni (3B Petek ve Jiroid) Prusa Slicer yazılımının sunduğu ve birçok markada yer almayan bir desen olması nedeniyle diğer çalışmalardan farklılaşmaktadır. Bu iki desen 3B formda olması nedeniyle hem çekme hem de basma deneylerinde daha stabil sonuçlar vereceği düşünülmüştür.

II. MATERYAL METOT

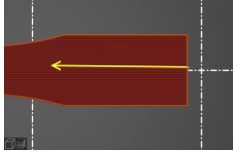
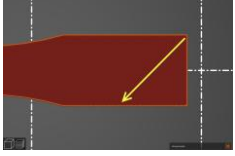
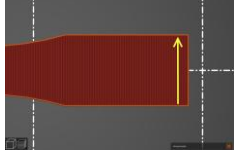
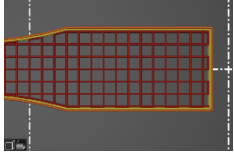
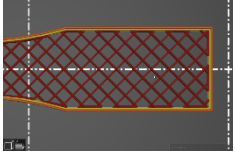
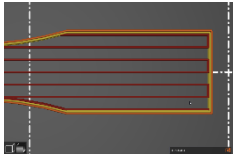
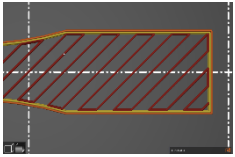
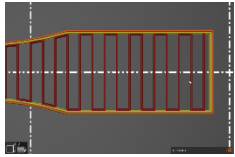
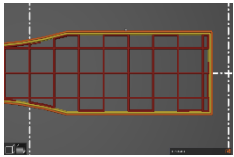
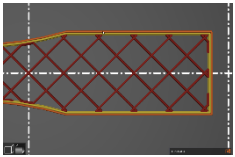
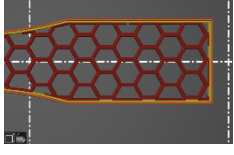
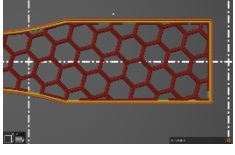
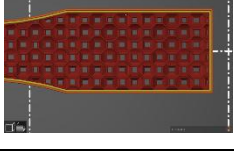
Farklı desen ve açıların ürünün mekanik özelliklerine olan etkilerini belirlemek için yapılan bu çalışmada, tam dolu numune ile toplamda 7 farklı desen ve 3 farklı açı ile ürünler üretilmiştir. ESUN marka PLA+ filament kullanılarak yapılan üretimlerde çekme numuneleri ve basma numuneleri ASTM standartlarına göre üretilmiştir.

A. Dolgu Desen ve Açıları

Numuneler Prusa marka 3B yazıcı ile 7 farklı desende ve desenlere göre seçilen 3 farklı açıda (0°, 45°, 90°) basılmıştır. Desenlerin mekanik özelliklere olan etkilerini daha detaylı görebilmek adına, numunelerin yüzeyleri boş bırakılmış, üst ve alt tabakalara herhangi bir yüzey baskısı yapılmamıştır. Katman kalınlığı 0,15 mm olarak seçilmiş ve yan duvarlar tek katmanlı olacak şekilde üretilmiştir. Üretimi yapılan desen ve açılar Tablo 1’de verilmiştir.

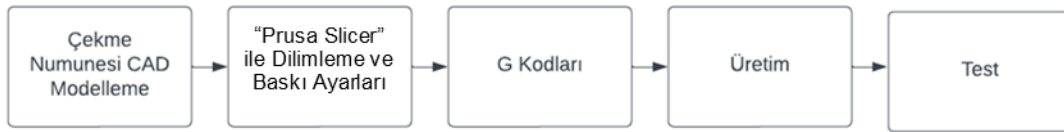
Kullanılan desenlerden 3B Petek ve Jiroid desenleri 3 boyutlu olmaları nedeniyle, basılan açıdan bağımsız olarak aynı deseni almaktadır. Bu numunelerde açının değiştirilmesi geometrik olarak herhangi bir değişikliğe neden olmadığı için, bu numuneler tek açı seçeneğinde basılmıştır. Benzer şekilde “Hızalanmış Doğrusal” şekil haricindeki numuneler 0° ile 90° dolgu açısı seçeneklerinde aynı geometrik yapıya sahip olması nedeniyle bu numunelerden sadece birisi üretilmiştir. 90° dolgu açısında geometrisi değişen iki farklı numune vardır. Bunlar “Hızalanmış Doğrusal” numunesi ve %100 doluluğa sahip “DOLU-90” numunesidir. “Doğrusal” desen ile “Kafes” desen geometrik olarak birbirine benzemesine rağmen, desen şeklindeki farklılık olarak birbirinden ayrılmaktadır. Numunelerde seçilen doluluk oranları, en sık kullanılan ve “Prusa Slicer” yazılımında da varsayılan olarak önerilen %15 doluluk oranı olarak tercih edilmiştir. Bu oran aynı zamanda, üretim zamanından ve malzemenin tasarruf edilmesi açısından önemli bir orandır. Numunelerin mukavemet değerlerini kıyaslayabilmek için %100 doluluk oranlarında da numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Açısal yönlendirilmeler Tablo-1’de verilmiştir ve açıların daha net görülebilmesi amacıyla oklarla yönler işaretlenmiştir.

Tablo 1. PLA filament özellikleri

Desen	Açı Değerleri		
	0°	45°	90°
Numune Kodu	X-0 ↑	X-45 ↗	X-90 ←
Farklı Açılarda Basılmış Tam Dolu Numuneler			
Numune Kodu	A0	A45	-
Rectilinear (Doğrusal)			A0 ile aynı (0° ve 90° aynı)
Numune Kodu	B0	B45	B90
Aligned Rectilinear (Hizalanmış Doğrusal)			
	C0	C45	-
Grid (Kafes)			C0 ile aynı (0° ve 90° aynı)
	D0	D45	-
Honeycomb (Petek)			D0 ile aynı (0° ve 90° aynı)
	E	-	-
3B Honeycomb (3B Petek)		3 Boyutlu Desen (0°, 45° ve 90° aynı)	
	F	-	-

Gyroid (Jiroid)		3 Boyutlu Desen (0°, 45° ve 90° aynı)
--------------------	---	--

Numuneler çekme testi için ASTM D638-14 standardına göre ve Tip 1 ölçülerinde, basma testi için ise, ASTM D-695 standartlarına göre üretilmiştir. Bu standarda göre çekme deneyleri için numune kalınlıkları plastik numuneler için 1 mm ile 14 mm aralığında değişebilmektedir [22]. Bu çalışmada üretilen numune kalınlıkları ise, zaman ve maliyet kayıplarını azaltmak amacıyla 3 mm olarak seçilmiştir. 3B baskıda, seçilen doluluk oranları ile oluşturulan desenin boyutu değiştiğinden, Tip-1'den daha küçük standartlarda numune hazırlanması desenin yeterince oluşmasını engellediği için 165 mm boyunda tip-1 numuneler üretilmiştir.



Şekil 1. Üretim adımları.

Baskı için Esun marka PLA+ filament kullanılmıştır ve baskı sıcaklığı Prusa'nın varsayılan değeri olan 215 °C ve 60 °C tabla sıcaklığı değerleri kullanılmıştır bu değerler PLA üreticisi Esun firmasının tavsiye ettiği 210-230 °C değerleri arasındadır. Esun marka filamentin üretici firmadan temin edilen özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. PLA filament özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm ³	1,23
Çekme Dayanımı	MPa	63
Uzama	-	20
Eğme Mukavemeti	MPa	74
Eğme Modülü	MPa	1973
Izod Testi	kJ/m ²	9

Numunelerin üretimi için Prusa Slicer yazılımı kullanılmıştır. Yazılım gelişmiş moda ayarlanarak yazdırma seçeneklerinin tümüne müdahale edilebilir hale getirilmiştir ve böylece baskı özelliklerinden alt ve üst kaplama katmanları tek katman olarak ayarlanmış ve böylece desenlerin mukavemete olan etkilerinin net olarak belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Diğer baskı değerleri ise üretilen bütün numuneler için aynı değerlerde seçilerek değerler Tablo 3'te verilmiştir.

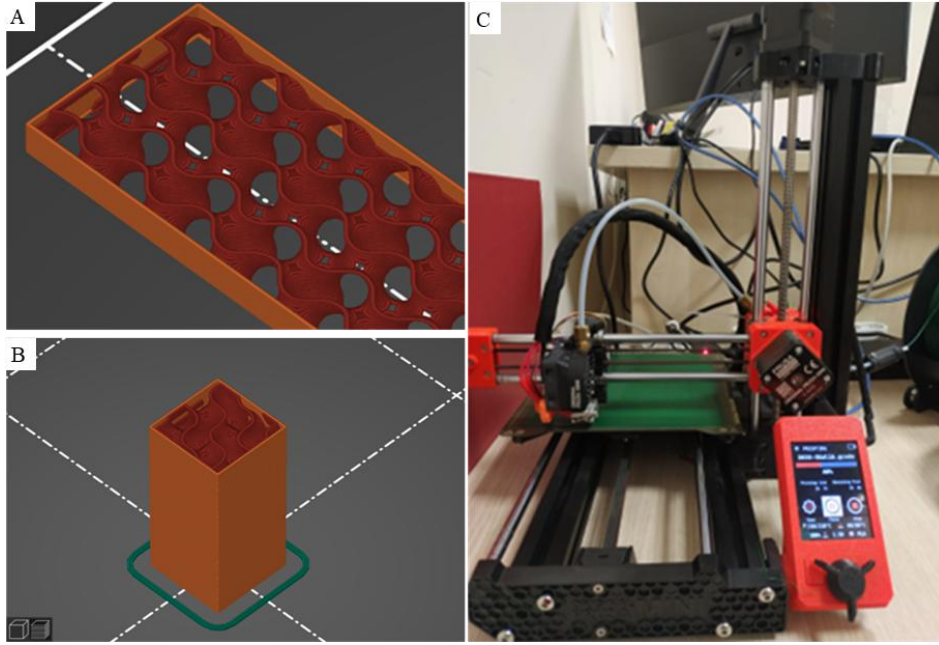
Tablo 3. Yazdırma parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Katman Yüksekliği	mm	0.15
İlk Katman Değeri	mm	0.20
Yan Duvar Sayısı	mm	1
Alt Katman Kalınlığı	mm	0.5
Üst Katman Kalınlığı	mm	0.5
Yazma Hızı	mm/s	40
Dolgu Yazma Hızı	mm/s	80

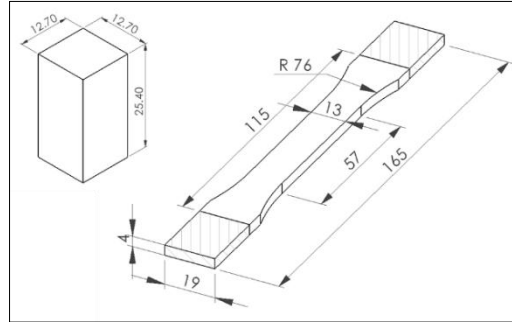
B. Çekme ve Basma Testleri

Tam dolu numune ile 7 farklı desen ve 3 farklı açı içerisinde yapılan kombinasyon ile toplamda çekme testi için 14 farklı ürün üretilmiştir. Testler için her bir numuneden en az 3 adet test gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması çekme testinin sonucu olarak alınmıştır. Çekme testleri ASTM D638-14 plastik malzemeler

İçin çekme testi standartlarında verilen değerlere uygun olarak 5 mm/dk çekme hızında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Basma testi için ise, X-90 ve B-90 numuneleri aynı desenin 0° açılı ile üretileni ile aynı geometride olması nedeniyle bu numuneler hariç diğer numuneler ile toplamda 12 numune üretilmiş ve ASTM D-695 standartlarında testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Numune üretimi ve Prusa 3B yazıcı, A) Jiroid desende çekme numunesi B) Jiroid desende basma numunesi C) 3B yazıcı ve baskı süreci



Şekil 3. Çekme ve basma numuneleri.

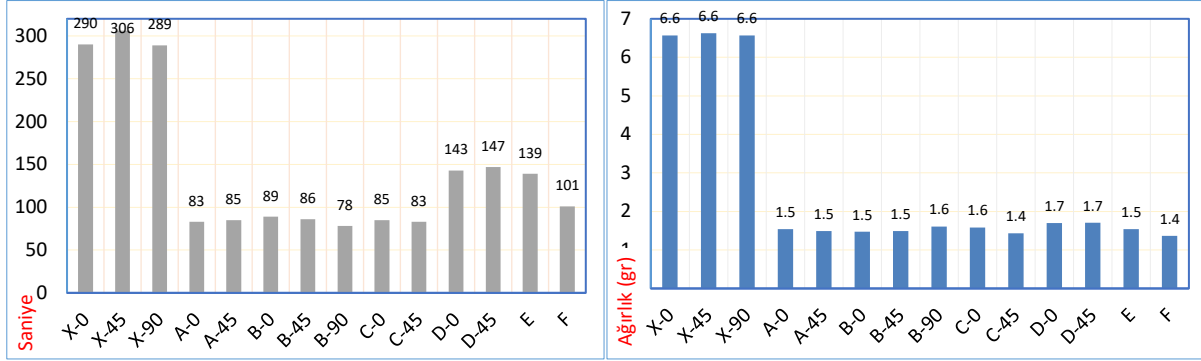
Numuneler çekme testlerine tâbi tutulduğunda, çekme çenelerinin baskısı ile numune kulaklarında meydana gelen ufak çaplı deformasyonlar nedeniyle kopmaların bu bölgelerden veya bu bölgelere yakın bölgelerden meydana geldiği tecrübe edilmiştir. Bu sorunu çözmek amacıyla numunelerin kulakları önce sıcak silikon ile kaplanmış, ancak daha sonra sıcak silikonun ısı etkisi ile sıcaklıktan etkilenen bölgeler oluşturarak kırılmaların bu bölgelerden oluşmasına neden olduğu fark edilmiştir. Bu nedenle, sıcak silikonlama yönteminden vazgeçilerek soğuk RTV-2 kalıp silikonu ile numunelerin kulakları korumaya alınmış ve kulakların deforme olması engellenerek çekme testlerinin verimliliğinin artması sağlanmıştır. Ancak yapılan bu uygulamanın da yeterli olmadığı görülmüş ve bunun üzerine, PLA malzemeden %100 doluluk oranlarında kulakları tutacak aparatlar üretilmiş ve çekme testlerini yaparken, bu aparatlar kulaklar üzerindeki baskıyı korumak amacıyla kullanılmıştır.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Üretimi ekonomik kılan en temel unsur verimlilik ve bu genellikle birim zamanda üretilen kusursuz parça sayısı olarak hesaplanır. Bu bakımdan, üretim süresi önem arz etmektedir. Şekil 4'te baskı desenlerine göre 3B yazıcının harcadığı baskı süreleri saniye cinsinden verilmiştir. Desenler arası farklılıkların daha net görülebilmesi amacıyla bir tabloda 7 farklı ürün (tabloda sığan maksimum ürün sayısı) üretilecek şekilde yerleştirilmesi ile simülasyon yapılarak zaman farklılıklarının daha net görülmesi amaçlanmıştır. Verilere bakıldığında, %100 dolulukta yapılan üretim, en uzun üretim süresi olarak görülmektedir. %100 doluluk oranlarında fakat farklı açılardaki üretimler kıyaslandığında ise, en uzun süreli üretim 45° açılıya sahip üretimde

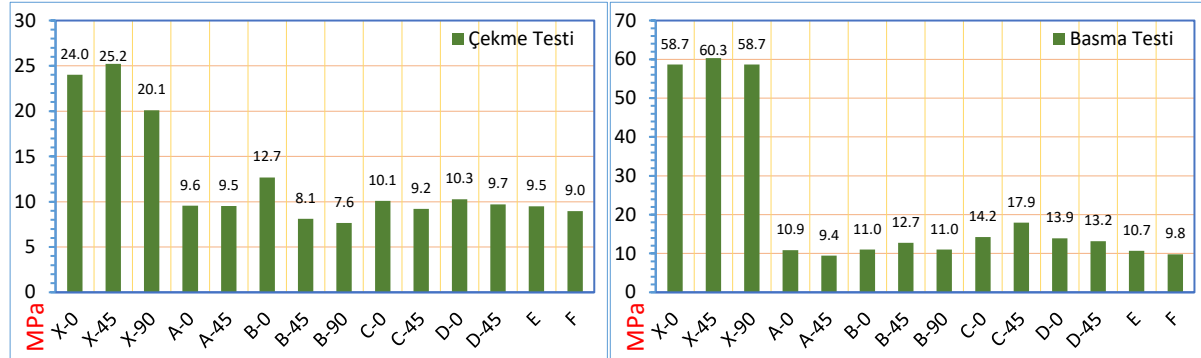
gerçekleşmektedir. Bunun nedeni 3B yazıcının hem X hem de Y eksenlerinde hareket etmek zorunda olmasından kaynaklanmaktadır.

3B yazıcıların birçoğunda varsayılan üretim oranı olarak %15 oranı ayarlı seçilmiştir. Bu oran, ürün mukavemeti, üretim zamanı ve malzeme tasarrufu açısından önerilmektedir. Ancak daha mukavemetli malzemeler üretilmek istenmesi durumunda bu oran değiştirilebilmektedir. %15 doluluk oranında yapılan üretimlerde üretim zamanının tam dolu orana kıyasla 1/4 oranında azaldığı görülmektedir. Kısaca, %100 dolulukta 1 tam parça üretmek yerine, %15 doluluk oranlarında yaklaşık 4 parça üretilmektedir.



Şekil 4. Farklı dolgu desen ve açılara göre imalat süreleri ve ağırlıkları.

Üretilen numunelerin ayrıca ağırlık değerleri de "Prusa Slicer" uygulaması ile hesaplanmış ve Şekil 4'te verilmiştir. En yüksek ağırlık Dolu-45° numunesinde ölçülürken en düşük ağırlık değeri ise jiroid desenle üretilmiş olan F numunesinde ölçülmüştür. %15 doluluk oranına sahip numuneler içerisinde en yüksek ağırlık değerleri ise "bal peteği" formunda üretilen D numunelerinde ölçülmüştür.



Şekil 5. Çekme ve basma testi sonuçlarına göre ölçülen mukavemet (UTS) değerleri.

Numunelerin çekme testi sonucu mukavemet değerlerine bakıldığında, en yüksek mukavemet değerinin tam dolu numunelerde elde edildiği görülmektedir. Tam dolu numuneler kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise, en yüksek mukavemet değeri 45° baskı açısı ile üretilen numuneden elde edilmiştir. 45° baskı açısında en yüksek mukavemet değerinin elde edilmiş olmasının nedeni şöyle açıklanabilir: 45° açıda üretilen numunelerde PLA lifleri daha uzundur ve açılı olması nedeniyle yük altında numune lifleri esneyerek, üzerine gelen yükü diğer liflere dağıtarak stresin tek bir noktada yoğunlaşmasını engellemektedir. Bu geometrik baskı farklılığı nedeniyle, PLA lifler hem yay gibi davranarak üzerindeki yükü bütün malzemeye dağıtabilmekte, hem de daha uzun olan PLA liflerinin birbiri ile olan temas yüzey alanları artmaktadır. Bu her iki faktör beraber yük altında mukavemet artışının nedenleri olarak düşünülmektedir. Bu nedenlerle en yüksek mukavemet değeri bu numunede elde edilmiştir. Şekil 6'da görülen kopma şekillerinden de 45° açı ile üretilmiş numunenin hem çekme hem de kayma gerilmelerine maruz kaldığı görülmektedir. Baskı yönü, boyuna olan X-0 numunesi ise, en yüksek ikinci mukavemet değerini vermiştir; bunun nedeni de çekme testinde uygulanan kuvvet yönü ile baskı yönünün aynı olması sonucu, PLA liflerinin doğrudan çekmeye karşı direnç göstermiş olmasıdır. 90° açı ile basılan X-90 numunesi ise dolu numuneler içerisinde en düşük çekme değerlerini vermiştir. 90° açı ile üretilen tam dolu numunede dolu numuneler içerisinde en düşük çekme mukavemetinin ölçülmüş olmasının nedeni, numunenin baskı yönü nedeniyle PLA liflerinin çekme testi esnasında kayma gerilmesine maruz kalması nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Malzeme bu durumda kesmeye maruz kalmış olur ve daha düşük mukavemet sergiler.



Şekil 6. Tam dolu numunelerde kırılma şekilleri.

Benzer bir sonuç, %15 doluluk oranına sahip numunelerde de görülmektedir. B-0 numunesi numune yönüne doğru 0° açı ile üretilmiş numunedir ve %15 doluluk oranına sahip numuneler içerisinde en yüksek mukavemet değerini göstermiştir. A-0 numunesi de benzer şekilde %15 doluluk oranına sahip ikinci en yüksek mukavemet değerinin ölçüldüğü numunedir. A-0 numunesinin B-0 numunesinden daha düşük mukavemet değeri göstermesinin nedeni yatay yönde de baskı yapılmış olması nedeniyle dikey yönde yer alan yapının zayıflamasıdır. Yatay yöndeki baskı kayma gerilmesine mukavemet göstermek üzere tepki verirken, dikey yöndeki baskı çekme yönündeki kuvvetlere mukavemet göstermektedir. Sonuç olarak, çekme testinde baskı yönünün büyük etkisi olduğu görülmektedir [11].

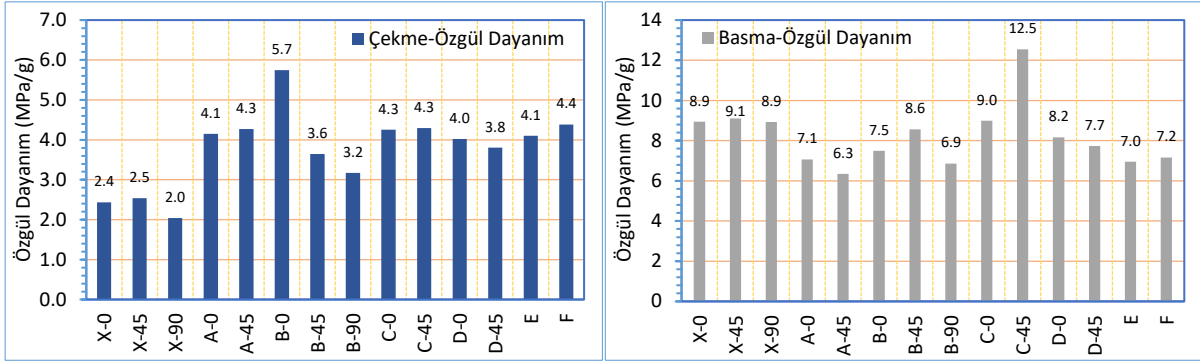
Doluluk oranı %15 olan numunelerden en yüksek çekme dayanımı gösteren üç numune ise, A-0, B-0 ve D-0 numuneleri çıkmıştır. Bunun nedeni, çekme işleminde uygulanan kuvvetin doğrusal yönde olması ve bu numunelerin de üretim açılarının 0° olması ve boyuna yönde çekme kuvvetlerine karşı daha mukavemetli olması nedeniyle bir miktar daha fazla mukavemet gösterdikleri düşünülmektedir. Nitekim, B-0 numunesi sadece boyuna yönde doluluk ile üretilmiş olması sonucu en yüksek mukavemet değerini göstermiştir.



Şekil 7. Numunelerin kopma davranışları.

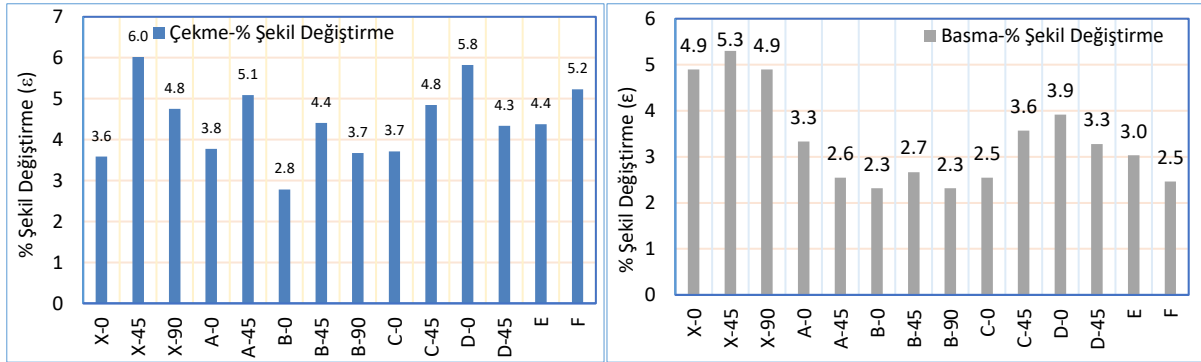
Üretilen numunelerin özgül dayanımı olarak isimlendirilen kütle-mukavemet oranlarına bakıldığında ise, en yüksek değer B-0 numunesinde elde edilmiştir. Bunun nedeni, B-0 numunesinin tamamen dikey (boyuna) yönde imal edilmiş olması nedeniyle çekme yönünden gelen kuvvetlere gösterdiği yüksek mukavemetten kaynaklanmaktadır. İkinci en yüksek dayanım ise, A-0 numunesinde ölçülmüştür. Dolu malzemelerden olan X-45

ise en yüksek üçüncü özgül dayanım değerini vermiştir. Basma test sonuçlarına göre hesaplanan özgül dayanım değerlerine bakıldığında, en yüksek değer C-45 numunesinde ölçülmüştür. En yüksek ikinci özgül dayanım değeri ise X-45 numunesinde ve en yüksek üçüncü değer ise C-0 numunesinde ölçülmüştür.



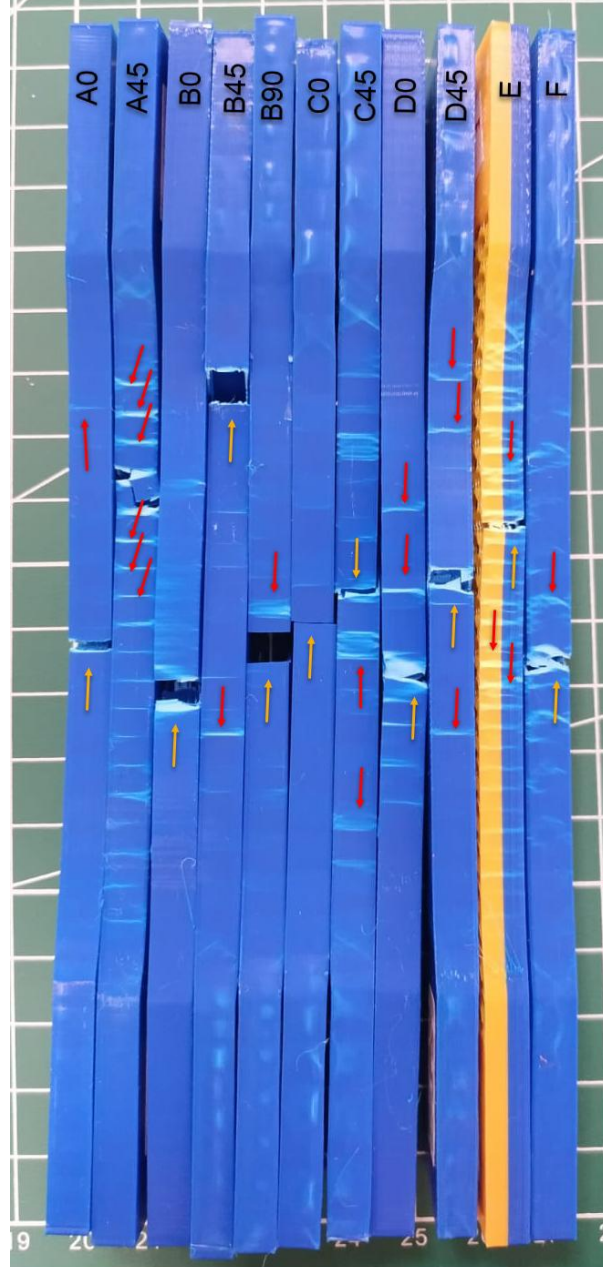
Şekil 8. Çekme ve basma test sonuçlarına göre özgül dayanım değerleri.

Genel olarak bakıldığında, çekme değerleri yüksek çıkan numunelerin basma değeri düşük çıkmıştır. Bunun nedeni, çekme yönünde üretilen numuneler basma yönünde zayıf mukavemet göstermeleri nedeniyledir. Örneğin B-0 numunesi boyuna PLA malzemelerden üretilmiştir ve aksel herhangi bir destek yoktur. Bu numune basmaya maruz kaldığında, aksel yönde herhangi bir destek olmaması nedeniyle flambaj oluşması sonucu daha düşük kuvvetler altında deforme olmaktadır. Bu nedenle, aksel destekleri olan numunelerin hem çekme hem de basma değerlerinde daha kararlı davranışlar sergilediği görülmektedir.



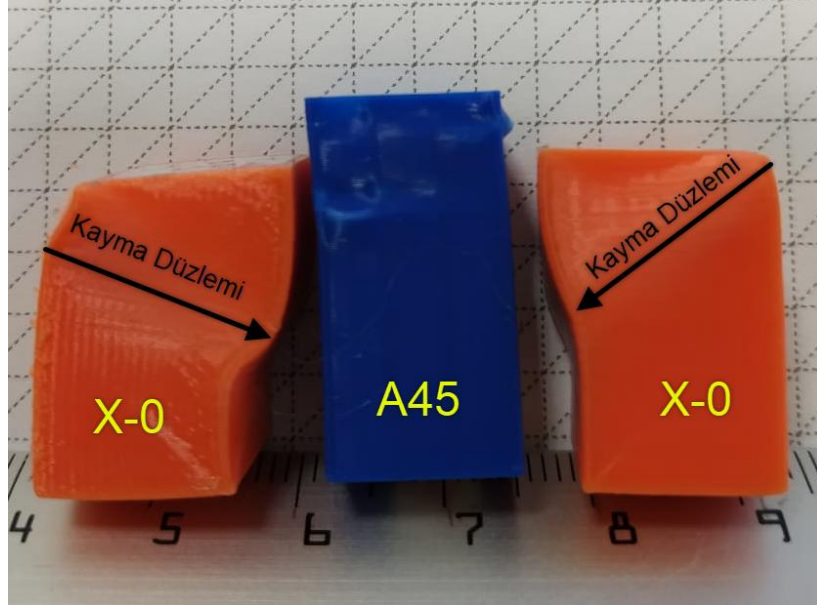
Şekil 9. Basma testi sonuçlarına göre % şekil değiştirme oranları.

Çekme testi sonuçlarında görülen uzama değerlerine bakıldığında en çok uzama tam dolu ve 45° baskı açısı ile üretilmiş olan X-45 numunesinde görülmüştür. İkinci en büyük uzama değeri ise D0 numunesinde görülmüştür. Şekil 10'da yer alan numune dış çeperinde oluşan kayma bantlarına bakıldığında, numunelerin dolgu desenlerine göre deformasyonun yoğunlaştığı bölgeler hakkında bilgi vermektedir. Uzama oranlarının yüksek olduğu numunelerde bu plastik deformasyon bölgeleri daha fazla ve sık görülmektedir. Bu durum aynı zamanda deformasyonun numune boyunca dağıldığını da göstermektedir. Hiç kayma bandı oluşmayan C0 ve A0 numuneleri en düşük uzama değerlerini vermiştir. D0 numunesi bal peteği formu sayesinde, yüksek esneme özelliği göstererek %15 doluluk oranına sahip numuneler içerisinde en yüksek uzama değerini gösteren numune olmuştur. Kayma bantlarına bakıldığında en yüksek gerilim dağılımı 3B bal peteği formu olan E numunesinde, doğrusal desene sahip A45 numunesinde ve F numunelerinde görülmüştür.



Şekil 10. %15 dolulukta üretilen numunelerde kayma bantları

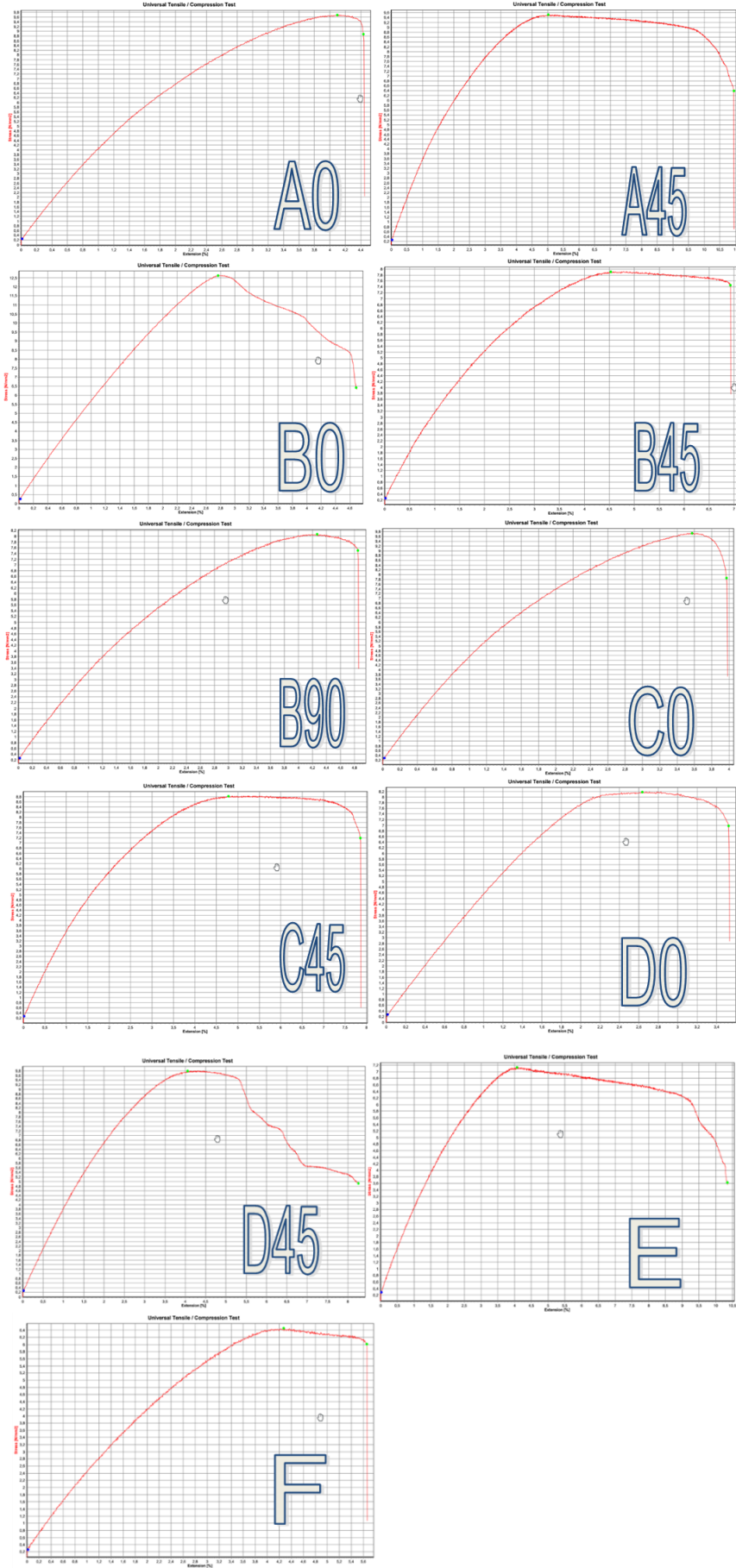
Basma testi sonuçlarından ölçülen % şekil değiştirme oranlarına bakıldığında, dolgu desenlerinin şekil değiştirme oranlarına önemli oranda etki ettiği görülmektedir. En yüksek şekil değiştirme oranları tam dolu numunelerden 45° açı ile üretilen numunede elde edilmiştir. Bunun nedeni, 45° açı ile üretilen numunede çekme ve kayma mekanizmalarının beraber gerçekleşmesi ve böylece malzeme iç yapısında bir miktar daha fazla esnemeye olanak tanınması olduğu düşünülmektedir. Tam dolu numunelerin daha yüksek şekil değiştirme göstermesinin nedeni ise, tam dolu olarak üretilmiş olmaları nedeniyle birbiri üzerinde kayma yaparak şekil değişikliği oranını artıran daha fazla lif olması ve bu liflerin birbiri üzerinde esneyerek daha fazla uzamaya olanak sağlaması olduğu düşünülmektedir. Şekil 8’de gösterildiği gibi, dolu malzemede, akma noktasına kadar meydana gelen şekil değiştirme daha fazladır.



Şekil 11. Basma testinde meydana gelen şekil değiştirmeler.

Şekil değiştirme oranının en düşük çıktığı numunelerde, iç dolgu deseni uygulanan basınca en az mukavemet gösterebilmiş dolgu desenine sahip numunelerdir. Bu nedenle, akma noktasına kadar sadece yan duvar çeperleri mukavemet göstermiş ve akma noktasına hızla ulaşılmıştır. Basma testinde en yüksek mukavemet gösteren dolgu desenleri ise, petek desenine sahip D-0 numunesi ve grid desenli C-45 numuneleridir. D-45 numunesinde şekil değiştirmenin D-0'a göre bir miktar daha az olmasının nedeni, 45° üretim açısı nedeniyle, basma numunesi içerisinde sadece 2 tane tam bir altıgen petek formu oluşurken, D-0 numunesinde 3 adet tam altıgen petek formu elde edilmiştir. Bu durum D-0 numunesini yapısal olarak bir miktar daha mukavemetli hale getirmiştir. Jiroid deseni de basma testinde en düşük şekil değişimi gösteren numuneler arasında yer almaktadır. Bunun nedeni, jiroidin 3 boyutlu bir desen olması nedeniyle, her bir katmanın kendisinden bir önceki katmanın tam olarak üzerine oturmaması, bir miktar dönme hareketi ile kayarak 3B desen oluşturmasıdır. Bunun sonucu olarak, PLA lifleri arası temas daha azdır ve yükün katmanlar arası aktarımı zayıflamıştır.

Numunelerin testlerden elde edilen çekme grafikleri şekil 12'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, geometrik farklılığın numunelerin kopma davranışı üzerinde ciddi etkisi olduğu görülmektedir. Özellikle karmaşık geometriye sahip D, E ve F geometrileri ile, yatayda dolgu açısına sahip numuneler maksimum çekme dayanımı sonrası kopma noktasına kadar bir miktar daha uzama davranışı sergilemiştir.



Şekil 12. Numunelerin testlerden elde edilen çekme grafikleri.

Birçok alanda sıklıkla PLA filament ile kullanılan 3B yazıcıların, dolgu desenlerinin malzemenin mekanik özelliklerine olan etkilerinin incelendiği bu çalışmada, tam dolu ile %15 doluluk oranına sahip 6 farklı desen ile 3 farklı baskı açısında toplam 14 farklı numune üretilmiştir. Seçilen desenlerden 5 tanesinde kullanılan baskı açılarından 0° ile 90° açılarında üretilen numunelerin aynı geometriye sahip olmaları nedeniyle, sadece birisi üretilmiştir. %15 doluluk oranına sahip numunelerin yanı sıra, tam dolulukta üretim yapılarak ürünler arası kıyas sağlanmıştır. Üretilen numuneler çekme ve basma testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre,

- Dolgu deseninin imalat sürelerini etkilediği ve en yüksek imalat süresi tam dolu numunelerde görülmüştür. %15 doluluk oranına sahip numunelerde desen karmaşıklıklaştıkça üretim süresi artmıştır. En yüksek üretim süresi D-45 numunesi olan bal peteği formunda ve 45° baskı açısında elde edilmiştir.

- Seçilen baskı desen ve açısının ürünün ağırlığı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. %15 doluluk oranına sahip numunelerde en yüksek ağırlık bal peteği deseninde ve en düşük ağırlık ise jiroid deseninde ölçülmüştür. Tam dolu numunelerde ise ağırlık değerleri benzerdir.

- Çekme testi sonuçlarına göre, en yüksek mukavemet tam dolu numunede ölçülmüştür. Tam dolu numunelerde en yüksek çekme mukavemeti sırasıyla 45°, 0° ve 90° baskı açılarında elde edilmiştir. %15 doluluk oranlarına sahip numunelerden en yüksek mukavemet değeri ise, B-0 numunesinde ölçülmüştür ve sırasıyla en yüksek üç mukavemet B-0, A-0 ve D-0 numunelerinde elde edilmiştir.

- Basma testlerinde ölçülen en yüksek mukavemet değerleri tam dolu numunelerden 45° baskı açısında üretilen numunede elde edilmiştir. İkinci en yüksek değer ise, 0° ve 90° baskı açısında üretilen numunelerden elde edilmiştir. Bu her iki açı baskı testi numunesinde geometrik olarak aynı ürünü vermesi nedeniyle aynı sonuç elde edilmiştir. %15 doluluk oranına sahip numunelere bakıldığında ise, en yüksek basma mukavemeti değerleri sırasıyla C-45, C-0 ve D-0 numunelerinde ölçülmüştür.

- Hem basma hem çekme testlerinde yüksek mukavemet gösteren numuneler ise, D-0, D-45, E ve F numuneleri olmuştur.

- Baskı geometrisi ve açısı malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği görülmüştür. Çekmeye mukavemetli numuneler, basmaya karşı zayıf, basmaya karşı mukavemetli numunelerin ise çekmeye karşı daha mukavemetsiz olduğu görülmüştür. Ancak karmaşık geometri baskı desenlerinde ise (bal peteği, 3B bal peteği, jiroid) hem çekme de hem de basmaya karşı olan mukavemetleri beraber değerlendirildiğinde daha stabil sonuçlar verdiği görülmüştür.

- Dolgu deseninin malzemenin uzama miktarını doğrudan etkilediği belirlenmiştir.

- Malzemelerin ağırlık-mukavemet ilişkilerine bakıldığında, çekme testlerinde en yüksek özgül dayanımı sırasıyla B-0, A-0, X-45, X-0 ve D-0 numunelerinde görülmüştür. Çekme testinde en yüksek değerlerin 0° açısında gerçekleşmesi, baskı yönü ile çekme doğrultusunun aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Basma testlerinde en yüksek özgül dayanım değerleri ise sırasıyla C-45, X-45, C-0, X-0=X-90 ve B-45 numunelerinde ölçülmüştür. Özgül dayanım değerlerine bakıldığında, tam dolu numunelerin performansının ciddi şekilde düştüğü görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia manufacturing*, 35, 1286-1296.
- [2] Özmen, Ö., Sürmen, H. K., & Sezgin, A. (2023). 3 Boyutlu Baskıda Dolgu Biçiminin Çekme Dayanımına Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 336-348.
- [3] Yemişçi, F. (2016). *Plastikleştirilmiş poli (laktik asit)'in alev dayanımının fosfor bazlı katkı maddeleri ile geliştirilmesi* Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- [4] Kangallı, E. (2022). *Poli (laktik asit)(PLA)/bor oksit (B2O3) nanokompozit sentezi ve karakterizasyonu* Ankara Üniversitesi (Turkey)
- [5] Parmaksız, F., Anaç, N., Koçar, O., & Erdogan, B. (2023). Investigation of mechanical properties and thermal conductivity coefficients of 3D printer materials. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 7(3), 146-156.
- [6] Dey, A., Roan Eagle, I. N., & Yodo, N. (2021). A review on filament materials for fused filament fabrication. *Journal of manufacturing and materials processing*, 5(3), 69.
- [7] Çevik, Ü., & Kam, M. (2020). A review study on mechanical properties of obtained products by FDM method and metal/polymer composite filament production. *Journal of nanomaterials*, 2020(1), 6187149.
- [8] Li, T., & Wang, L. (2017). Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Composite Structures*, 175, 46-57.

- [9] Sugiyama, K., Matsuzaki, R., Ueda, M., Todoroki, A., & Hirano, Y. (2018). 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113, 114-121.
- [10] Evlen, H. (2019). Doluluk oranının 3B yazıcıda üretilen TPU ve TPE numunelerinin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(63), 793-804.
- [11] Evlen, H., Özdemir, M. A., & Çalışkan, A. (2019). Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri. *Politeknik Dergisi*, 22 (4): 1031–1037. [12] Baca Lopez, D. M., & Ahmad, R. (2020). Tensile mechanical behaviour of multi-polymer sandwich structures via fused deposition modelling. *Polymers*, 12(3), 651.
- [12] Raut, N. P., Bhosale, S., & Kolekar, A. B. (2022). Application of Taguchi methodology in evaluating the IZOD impact strength of FDM 3D printed component. *Materials Today: Proceedings*.
- [13] Kain, S., Ecker, J., Haider, A., Musso, M., & Petutschnigg, A. (2020). Effects of the infill pattern on mechanical properties of fused layer modeling (FLM) 3D printed wood/polylactic acid (PLA) composites. *European journal of wood and wood products*, 78, 65-74
- [14] Kumar, R., Alex, Y., Nayak, B., & Mohanty, S. (2023). Effect of poly (ethylene glycol) on 3D printed PLA/PEG blend: A study of physical, mechanical characterization and printability assessment. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 141, 105813.
- [15] Khan, S., Zakaria, H., Chong, Y., Saad, M., & Basaruddin, K. (2018). Effect of infill on tensile and flexural strength of 3D printed PLA parts. *IOP conference series: materials science and engineering and engineering*, 429: 012101 (2018).
- [16] Rismalia, M., Hidajat, S. C., Permana, I. G. R., Hadisujoto, B., Muslimin, M., & Triawan, F. (2019). Infill pattern and density effects on the tensile properties of 3D printed PLA material. *Journal Of Physics: Conference Series*, 1402 (4): 044041.
- [17] Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing. *3D printing and additive manufacturing*, 3(3), 183-192.
- [18] Marşavina, L., Vălean, C., Mărghitaş, M., Linul, E., Razavi, N., Berto, F., & Brighenti, R. (2022). Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 274, 108766.
- [19] Bergonzi, L., Vettori, M., Stefanini, L., & D'Alcarno, L. (2021). Different infill geometry influence on mechanical properties of FDM produced PLA. *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 1038 (1): 012071.
- [20] Cuan-Urquizo, E., Álvarez-Trejo, A., Robles Gil, A., Tejada-Ortigoza, V., Camposeco-Negrete, C., Uribe-Lam, E., & Treviño-Quintanilla, C. D. (2022). Effective stiffness of fused deposition modeling infill lattice patterns made of PLA-wood material. *Polymers*, 14(2), 337.
- [21] Committee, D. (2010). Test method for tensile properties of plastics. *ASTM International*.