

**T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**3 BOYUTLU YAZICIDA KARBON FİBER FİLAMANTTEN
ÜRETİLEN FARKLI DOLGU DESENİ VE DOLGU
YOĞUNLUĞUNA SAHİP NUMUNELERİN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Burçin CENGİZ

**Danışman
Prof. Dr. Fatih TAYLAN**

ISPARTA - 2024

© 2024 [Burçin CENGİZ]

ETİK BEYANI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

30/10/2024

Burçin CENGİZ

.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Eklemeli İmalat	3
1.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	6
1.2.1. Fotopolimerizasyon.....	8
1.2.2. Malzeme ekstrüzyonu	11
1.2.3. Toz yatak füzyon.....	12
1.2.4. Malzeme püskürtme	15
1.3. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Kullanım Alanları.....	16
1.4. Eklemeli İmalatın Avantajları	21
1.5. FDM Yönteminde Kullanılan İşlem Parametreleri	22
1.6. EBY Teknolojilerinde Kullanılan Desen Tipleri ve Dolgu Oranları	23
1.6.1. Gyroid	25
1.6.2. Üçgen	25
1.6.3. Zik zak.....	26
1.6.4. Izgara.....	27
2. KAYNAK ÖZETLERİ	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1. Materyal	33
3.1.1. Deney numuneleri	33
3.1.2. Numune imalatları.....	36
3.1.3. Çekme ve basma deneyi cihazı	39
3.2. Yöntem.....	39
3.2.1. Desen tipi ve dolgu oranı	39
3.2.2. Çekme deneyi.....	42
3.2.3. Basma deneyi	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	44
4.1. Çekme Deneyi Bulguları.....	44
4.2. Basma Deneyi Bulguları	58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	85

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

3 BOYUTLU YAZICIDA KARBON FİBER FİLAMANTTEN ÜRETİLEN FARKLI DOLGU DESENİ VE DOLGU YOĞUNLUĞUNA SAHİP NUMUNELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Burçin CENGİZ

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih TAYLAN

Bu çalışmada üç boyutlu (3B) yazıcı kullanılarak üretilen karbon fiber numunelerin mekanik özelliklerini araştırmak amacıyla çekme ve basma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde 5 farklı dolgu yoğunluğu (%20, %40, %60, %80 ve %100) ve 4 farklı desen çeşidi (gyroid, üçgen, zik zak ve ızgara) kullanılmıştır. Latis yapıları tasarım programlarıyla oluşturmanın zor olmasından dolayı, kullanıcıya tasarım konusunda kolaylık sağlaması açısından cihaz kütüphanesinde bulunan desen tipleri kullanılmıştır. Ayrıca bu desenler, çalışmanın karbon fiber malzeme dışında diğer malzemelerle yapılmış çalışmalarla kıyaslanması için de seçilmiştir. Numune boyutları; çekme deneyi için ASTM D638, basma deneyi için ASTM D695 standardına göre belirlenmiştir. Deney numune malzemesi olarak ESUN marka EPA-CF 1.75 mm doğal karbon fiber katkılı elyaf filament kullanılmıştır. Numunelerin 3 boyutlu yazıcı ile imalinde, yazdırma parametreleri olarak, yazdırma sıcaklığı 265 °C, imalat tablası sıcaklığı 85 °C ve katman yüksekliği 0.2 mm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, 5 farklı dolgu oranında ve 4 farklı desen tipinde yapılan çalışmalarda çekme deneyi sonuçlarında dolgu oranı arttıkça; çekme gerilmesi, elastisite modülü, akma gerilmesi, rezilyans modülü ve kopma gerilmesi değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Dolgu oranı azaldıkça kopmadaki uzama ve çekmedeki uzama değerlerinde artış görülmüştür. Basma deneyi sonuçlarına göre %100 ve %80 dolgu oranlı numunelerin elastisite modülü, rezilyans modülü ve akma dayanımı değerlerinde %60, %40 ve %20 dolgu oranlı numunelere göre daha yüksek değerler ölçülmüştür. Çekme ve basma deneyleri kıyaslandığında basma akma gerilmelerinin çekme akma gerilmelerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Karbon fiber, Eklemeli imalat, Mekanik deneyler, Çekme deneyi, Basma deneyi, Gerilme gerinim

2024, 85 sayfa

ABSTRACT

Master's Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF SAMPLES WITH DIFFERENT FILLING PATTERN AND FILLING DENSITY PRODUCED FROM CARBON FIBER FILAMENT IN 3D PRINTER

Burçin CENGİZ

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Fatih TAYLAN

In this study, tensile and compression tests were conducted to investigate the mechanical properties of carbon fiber samples produced using a three-dimensional (3D) printer. In the experiments, 5 different filling densities (20%, 40%, 60%, 80% and 100%) and 4 different pattern types (gyroid, triangle, zig-zag and grid) were used. Due to the difficulty of creating lattice structures with design programs, pattern types found in the device library have been used to provide ease of design for the user. Additionally, these patterns were chosen for comparison with studies done with other materials besides carbon fiber. Sample sizes were determined according to ASTM D638 for tensile tests and ASTM D695 for compressive tests. For the experimental sample material, ESUN brand EPA-CF 1.75 mm natural carbon fiber infused filament has been used. The printing parameters for the production of the samples with a 3D printer have been determined as follows: printing temperature of 265 °C, build plate temperature of 85 °C, and layer height of 0.2 mm. As a result, in studies conducted with 5 different filling ratios and 4 different pattern types, it was observed that as the filling ratio increased, the values of tensile stress, elastic modulus, yield stress, resilience modulus, and breaking stress also increased in the tensile test results. As the filler ratio decreased, an increase in elongation during rupture and elongation during tensile testing was observed. According to the results of the compression tests, the elastic modulus, resilience modulus, and yield strength values of the samples with 100% and 80% filler ratios were measured to be higher than those of the samples with 60%, 40%, and 20% filler ratios. When comparing tensile and compression tests, it was observed that the compression yield stresses were higher than the tensile yield stresses.

Key Words: Carbon fiber, Additive manufacturing, Mechanical tests, Tensile test, Compression test, Stress strain

2024, 85 pages

TEŐEKKÖR

Bu tez alıőmasını tamamlamada ve tezimin baőtan sona yÖrÖtÖlmesinde bilgisini ve emeğini esirgemeyen tez danıőmanım sayın Prof. Dr. Fatih TAYLAN'a teőekkÖrlerimi sunarım.

Tezime kıymetli katkılarından dolayı Do. Dr. Kadir KIRAN'a, Arő. Gör. Dr. Fatih YİğİT'e, Do. Dr. Nihat YILMAZ'a, tezimin deneylerini yapan Öğr. Gör. Hasan ISPARTALI'ya, tezimin deneylerini gerçekleőtirdiėim YETEM Tasarım ve İmalat Birimi personeline katkılarından ve yardımlarından dolayı teőekkÖr ederim.

Ayrıca aileme destekleri için minnettarım. Bu sÖrete bana moral veren, bilgi ve deneyimleriyle bana rehberlik eden herkese teőekkÖr ederim.

Bu tez çalıőması, benim için Önemli bir Öğrenme deneyimi oldu ve bu sÖrete bana katkı sağlayan herkese teőekkÖr ediyorum.

Burçin CENGİZ
ISPARTA, 2024

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Eklemeli imalat iş akış şeması	4
Şekil 1.2. a. Geleneksel imalat yöntemi, b. Eklemeli imalat yöntemi	5
Şekil 1.3. Eklemeli imalat katmanların oluşturulması	6
Şekil 1.4. Stereolitografi işlemi.....	8
Şekil 1.5. DLP (Dijital Işık İşleme) Yöntemi için temsili şekil	9
Şekil 1.6. Sürekli dijital ışık işleme teknolojisi	10
Şekil 1.7. Eriyik biriktirme (FDM veya FFF) teknolojisi	11
Şekil 1.8. Seçici lazer sinterleme (SLS) teknolojisi	12
Şekil 1.9. Malzeme püskürtme (MJ)	13
Şekil 1.10. Elektron ışını ergitme yönteminin şematik gösterimi	14
Şekil 1.11. Seçici lazer ergitme teknolojisi şematik resmi.....	15
Şekil 1.12. Çoklu püskürtme (PolyJet/MultiJet)	16
Şekil 1.13. a) TI-6Al-4V kafatası implantı, b) 3B Medikal protez üretimi, c) Yapay organ üretimi	17
Şekil 1.14. a) Otomotiv endüstrisindeki 3 boyutlu katmanlı örnek motor imalat uygulamaları, V6 Ford motor bloğu, ZR1 V8 Chevrolet motor bloğu, b) Dahili soğutma kanallarına ve harici kafese sahip hiperorganik prototip roket nozulu, c) Sıvı hidrojen ve sıvı oksijen türbopompalarında kullanılan AM örnekleri.....	17
Şekil 1.15. (a) Dfcc, (b) Dhex, (c) BCC, (d) FCC kafes yapılarının konfigürasyonları.....	18
Şekil 1.16. Dikme tabanlı hücresel yapılar	18
Şekil 1.17. tabaka-TPMS tabanlı hücresel yapılar	19
Şekil 1.18. Eklemeli imalatın avantajları	21
Şekil 1.19. %20 dolgu oranlı desenlerin içyapısı	24
Şekil 1.20. Gyroid deseni	25
Şekil 1.21. Üçgen deseni	26
Şekil 1.22. Zik zak deseni	26
Şekil 1.23. Izgara deseni	27
Şekil 3.1. Basma deney numunesi ölçüleri (ölçüler mm'dir).....	34
Şekil 3.2. ASTM D638 standardına göre çekme deneyi numunesi (ölçüler mm'dir)	35
Şekil 3.3. TİP 2 numune boyutlarının teknik resmi (ölçüler mm'dir)	36
Şekil 3.4. Çekme deneyi numunelerinin yazdırılması	37
Şekil 3.5. Numunede duvar kalınlığı gösterimi	38
Şekil 3.6. Shimadzu çekme deneyi cihazı	39
Şekil 3.7. Üçgen desenli numunenin kullanılan dolgu oranlarındaki içyapı görüntüsü	40
Şekil 3.8. Izgara desenli numunenin kullanılan dolgu oranlarındaki içyapı görüntüsü	41
Şekil 3.9. Zik zak desenli numunenin kullanılan dolgu oranlarındaki içyapı görüntüsü	41
Şekil 3.10. Gyroid desenli numunenin kullanılan dolgu oranlarındaki içyapı görüntüsü.....	42
Şekil 3.11. Çekme deneyi cihazına numunenin bağlanması	43
Şekil 3.12. Basma deneyi cihazına numunenin bağlanması	43

Şekil 4.1. %80 dolgu oranlı üçgen desenli Matlab ile oluşturulan kuvvet-zaman, uzama-zaman ve kuvvet-uzama grafikleri	47
Şekil 4.2. %80 dolgu oranlı üçgen desenli Matlab ile oluşturulan gerilme-gerinim grafiği	47
Şekil 4.3. Numunelerin çekme gerilmesi grafiği	49
Şekil 4.4. Numunelerin çekme deneyi elastisite modülü grafiği	51
Şekil 4.5. Numunelerin çekme deneyi tokluk grafiği	52
Şekil 4.6. Numunelerin çekme deneyi akma gerilmesi grafiği	53
Şekil 4.7. Numunelerin çekme deneyi rezilyans modülü grafiği	54
Şekil 4.8. Numunelerin çekme deneyi kopma gerilmesi grafiği	55
Şekil 4.9. Numunelerin çekme uzaması grafiği	56
Şekil 4.10. Numunelerin çekme deneyi kopma uzaması grafiği	57
Şekil 4.11. Basma kuvveti ve yazdırma yönü gösterimi	59
Şekil 4.12. Basma deneyinde elde edilen tipik bir basma mühendislik gerilim-gerinim eğrisi	61
Şekil 4.13. Kuvvet-zaman, uzama-zaman, kuvvet-uzama grafikleri	62
Şekil 4.14. Gerilme-gerinim grafiği	62
Şekil 4.15. Numunelerin basma deneyi elastisite modülü grafiği	64
Şekil 4.16. Numunelerin basma deneyi akma gerilmesi grafiği	65
Şekil 4.17. Numunelerin basma deneyi rezilyans modülü grafiği	66
Şekil 4.18. Numunelerin basma deneyi akma uzaması grafiği	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması	7
Çizelge 1.2. Eklemeli imalatla üretilen çeşitli yapılar	20
Çizelge 3.1. Esun Epa CF filament için firma verileri.....	33
Çizelge 3.2. İmalat parametreleri	38
Çizelge 4.1. Çekme deneyi numune boyut değişimleri.....	45
Çizelge 4.2. Çekme deneyi sonucu elde edilen değerler.....	48
Çizelge 4.3. Basma deneyi numune boyut değişimleri	60
Çizelge 4.4. Basma deneyi sonucu elde edilen değerler	63



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

2B	İki boyut
3B	Üç boyutlu
3F	Biçim, uygunluk, işlev
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CDLP	Sürekli dijital ışık işleme
CF	Karbon fiber
CLIP	Sürekli sıvı arayüz üretimi
D	Kavramlar arasındaki mesafe
DLP	Dijital ışık işleme
DMLS	Doğrudan metal lazer sinterleme
E	Elastisite modülü
EBM	Elektron ışını eritme
Eİ	Eklemeli imalat
FDM	Eriyik yığma modelleme
G	Ölçü uzunluğu
HIPS	Yüksek etkili polistiren
L	Dar bölümün uzunluğu
LO	Genel uzunluk
MEPESS	Çok işlevli verimli polimer ve metalik sandviç yapılar
MJ	Çok jetli
MJF	Multi jet fusion
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N	Newton
P	İlkel
PC	Polikarbonat
PETG	Polietilen tereftalat glikol
PJ	Çok jetli
PLA	Polilaktik asit
R	Kavis yarıçapı
RO	Dış yarıçap
RP	Hızlı prototipleme
SFT	Katı serbest biçim teknolojisi
SLM	Seçici lazer eritme
STL	Stereolitografi
TPU	Termoplastik poliüretan
U _R	Rezilyans modülü
U _T	Tokluk
UV	Ultraviyole
ÜPMY	Üçlü periyodik minimal yüzeyler
W	Dar bölümün genişliği
WO	Genel genişlik
σ	Gerilme
ε	Gerinim
σ_A	Akma gerilmesi
σ_C	Çekme gerilmesi
σ_K	Kopma gerilmesi

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ), geleneksel takım tezgâhları ve pahalı kalıplar kullanılmadan imalat yapılabilmesine imkân sunan ve yaygın olarak 3 boyutlu (3B) baskı olarak bilinen bir imalat yöntemidir. Bu imalat yönteminde parçanın bilgisayar destekli tasarımı (Computer Aided Design, CAD) yapılır ve bir dilimleme yazılımı kullanılarak dilimler çıkarılır. Her dilimi (katmanı) oluşturmak için bir takım yolu çıkarılır. Katmanlar üst üste inşa edildikçe parçanın tamamı yavaş yavaş imal edilmiş olur (Gibson vd., 2015). Eİ teknolojileri, geleneksel yöntemlerle üretilmeyen veya en azından üretilmesi zor olan, karmaşık geometrilere sahip çok çeşitli prototiplerin veya fonksiyonel bileşenlerin oluşturulmasını mümkün kılar (Yakovlev vd., 2005; Alimardani vd., 2007).

Genellikle 3B yazıcılar ile gerekli baskı parametreleri (örneğin dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı, ayarlanan nozül sıcaklığı, tarama açısı vb.) dikkate alındığı takdirde, pürüzsüz yüzeye sahip baskılar alınabilir. Rapor edilen önemli miktarda araştırma, yüksek kaliteli parçalar basmak için ergiyik biriktirme yönteminin (EBY, Fused Deposition Modelling) üretimle ilgili parametrelerini optimize etmeye çalışmıştır (Abeykoon vd., 2020).

Eİ uygulamaları için, malzemelerdeki gelişmeler, yeni tasarım ve yenilikçi yaklaşımlara olanak sağlayan önemli bir faktördür (Tofail vd., 2017). Son çalışmalar, optimal baskı parametreleri konfigürasyonunu tanımlayarak (Koch vd., 2017; Raney vd., 2017), üretim parametreleriyle birlikte üretim yöntemlerini değiştirerek ve kompozit malzemeler kullanarak parçaları güçlendirmeye ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine odaklanmaktadır (Brooks vd., 2016; Li vd., 2016; Koch vd., 2017).

Bu hedefe ulaşmak için araştırmacılar hücresel yapıların özellikleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır (Deshpande vd., 2001; Ashby, 2006; Ullah, 2014; Krödel, 2019). Hücresel yapılar, tekrarlayan birim hücrelerden oluşan hiyerarşik malzemelerdir. Hücresel yapılar doğanın kendine özgü bir parçasıdır; örnekleri kemiklerde, ağaçlarda ve deniz kabuklarında bulunur. Bu tür malzemelerin ağırlık ve dayanıklılık arasında bir denge sağladığı bilinmektedir (Nsiempba vd., 2021).

Günümüzde, mevcut malzemelerin sınırlamaları nedeniyle kompozit malzemelerin 3B baskıda kullanılmasının uygunluğunu kontrol etmek için çok sayıda çalışma devam etmektedir. EBY için ana malzeme türleri, düşük erime noktasına sahip termoplastik polimerik malzemelerdir. Bununla birlikte, bu malzemelerin mukavemeti bazı yüksek performanslı uygulamalar için yeterli olmayabilir. Bu nedenle, kısa lifler, nanopartiküller ve diğer uygun katkı maddeleri gibi partiküller eklenerek baskı malzemelerinin özelliklerini cazip hale getirmek için iyileştirmeler yapılmıştır (Wang vd., 2017).

EBY yönteminde pek çok termoplastik filament kullanılabilir. En yaygın olanlar PLA (Polilaktik Asit), ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), PETG (Polietilen Tereftalat Glikol), TPU (Termoplastik Poliüretan), PC (Polikarbonat) ve CF (Karbon Fiber) dir. EBY baskı tercih edilmesinin sebeplerinden biri 3B baskı için en uygun fiyatlı seçeneklerden biridir. Malzemeleri ucuz olmakla birlikte ulaşımı kolaydır. Parçalarda doğrudan renkli olarak baskı alınabildiği için baskı sonrası boyama işlemine gerek kalmamaktadır. Kullanım alanı da geniş olan bu yöntem, uçak endüstrisi, otomotiv parçaları, askeri endüstride, tıp ve medikal alanlarında, aksesuar, oyuncak gibi her türlü alanda kullanılabilmektedir. Sık kullanılan bazı filamentlerin özellikleri şu şekildedir:

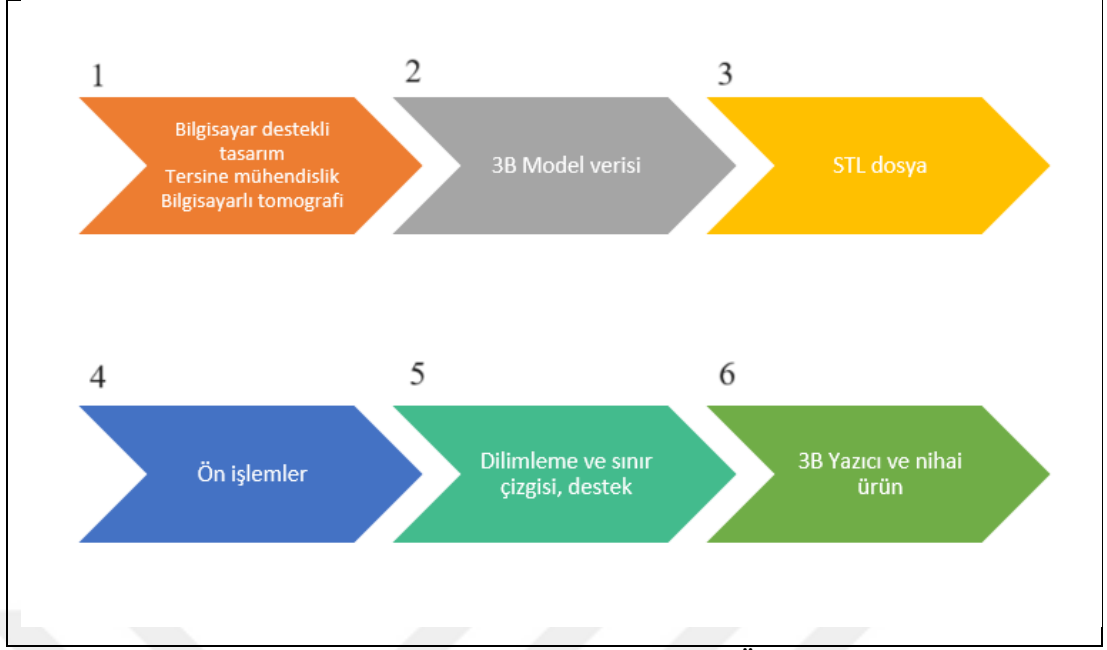
PLA, nişasta zengini olan mısır, şeker kamışı ve buğday gibi bitkisel kaynaklardan üretilen biyo bozunur bir polimerdir. Bu özelliklerin yanı sıra, doğaya zarar vermemesi ve biyo uyumluluk gibi özelliklere sahip olması; plastik uygulamalarında, paketleme alanında, ziraat ürünlerinde, tek kullanımlık ürünlerde ve medikal alanda oldukça fazla kullanım imkânı sağlamaktadır (Gupta vd., 2007). ABS, darbeye karşı yüksek direnci, hafif bir yapıda olması ve kimyasal dayanıklılık gibi özellikleri nedeniyle otomobil parçaları, elektronik bileşenler ve tüketim malları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılan bir polimerdir (Deshmukh vd., 2024). PETG, UV ışınlarına dayanıklıdır ve baskı alınması kolaydır. Kimyasallara ve yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Mekanik özellikleri iyidir. PC, yüksek mukavemete sahiptir. Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Eğilmeye karşı hassastır. Gıda kapları için kullanılır (Karimi vd., 2024). TPU, esnek ve yüksek darbe direncinden dolayı ayakkabı ve telefon kılıflarında sıklıkla tercih edilir. Aşınma direnci ve ısı dayanımı yüksektir. İnsan sağlığına ve çevreye karşı zararsızdırlar. Elektrik iletkenliği düşüktür (Evlen, 2019). CF yüksek sertlik, kimyasal

direnç ve çekme mukavemetine sahiptir. Aşırı ısıya dirençlidir. Ağırlığı düşüktür. Hafif olduğu için pek çok parçanın üretimi için idealdir. Bununla beraber uzun ömürlü olmasından dolayı da tercih sebebidir. CF malzemenin yoğunluğu çeliğe oranla düşüktür. Buna bağlı olarak CF malzeme yüksek ağırlık oranı gerektiren uygulamalar için eşsiz bir malzeme gibi görülmektedir. Otomotiv, rüzgâr türbinleri, havacılık, denizcilik, inşaat, elektrik elektronik, özel tasarım parça imalatı, sportif ekipmanlar gibi geniş kullanım alanı bulunmaktadır (Park vd., 2011).

Bu çalışmada literatürde diğer malzemelere kıyasla CF ile ilgili çalışmaların fazla olamaması sebebiyle bu malzeme tercih edilmiştir. Farklı desen (Gyroid, üçgen, zikzak ve ızgara) ve dolgu oranları (%20, %40, %60, %80 ve %100) kullanılarak, deney numuneleri üretmek ve üretilen numuneleri mekanik deneylere tabi tutarak, optimum çekme ve basma değerlerini veren, desen tipi ve dolgu oranını bulmak amaçlanmıştır. Ayrıca latis yapıları tasarım programlarıyla oluşturmanın zor olmasından dolayı, kullanıcıya tasarım konusunda kolaylık sağlaması açısından cihaz kütüphanesinde bulunan desen tipleri kullanılmıştır.

1.1. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat, malzemelerin birbirine katman katman eklenerek üç boyutlu nesnenin üretilmesi işlemidir. Bilgisayar ortamında tasarlanan parça, gerekli formata (STL stereolitografi- standart triangle language- standart tessellation language) çevrilir. Sonrasında kontrol edilir hata varsa düzeltilir, tablaya yerleşimi ayarlanır, inşa yönü belirlenir ve destek yapısı oluşturulur (ihtiyaç durumunda). Bu ön işlemler bitince 3B model katmanlara bölünür ve üç boyutlu yazıcılar bu katmanları, kendilerine has tekniğe göre, eklemeli olarak oluşturur ve birbirine kaynaştırır (Özsoy, 2021). Şekil 1.1’de eklemeli imalat iş akış şeması verilmiştir.



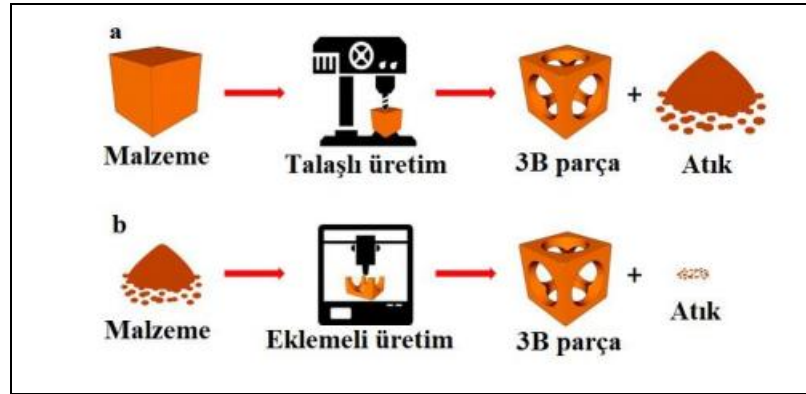
Şekil 1.1. Eklemeli imalat iş akış şeması (Özsoy, 2017)

Eklemeli imalat sistemlerinin başlıca kullanım amaçları;

- Karmaşık yapıdaki geometrilerin imalatı,
- İmalat/devreye alma sürelerinin düşürülmesi,
- Üretim yatırım maliyetlerinin azaltılması,
- Küçük çaplı üretimlere (özel üretim) uygun olması olarak sıralanabilir (Sürmen, 2019).

Eklemeli imalat ile geleneksel imalat yöntemlerine göre daha kolay, hızlı ve ucuz bir şekilde parça imal edilebilmekte ve bu parçaların modelleri oluşturulabilmektedir (Yakovlev vd., 2005; Sood vd., 2010). Eklemeli imalat ile basit bir küp şeklindeki parça veya aynı hacimdeki karmaşık yapıların üretimi benzer sürede ve uğraş ile yapılabilmektedir. Başlangıçta basit modellerin üretimi ile başlayan bu teknoloji, malzeme, hassasiyet ve parça kalitesinde iyileştirmeler ile modellerin 3F (Biçim, Uygunluk, İşlev) özellikleri bilgisini verebilir hale gelmiştir. Bu teknolojinin ürün geliştirme ve imalatta devrim niteliğinde olduğu ve en üst seviyelere ulaştığında geleneksel imalatın artık ortadan kalkacağı öngörülmektedir. Eklemeli imalata son yıllarda verilen bu denli önemle birlikte başta uzay (Williams vd., 2010), otomotiv (Vilaro vd., 2008), medikal (Webb, 2000; Rengier vd., 2010) olmak üzere mimari (Kolarevic, 2001), eğitim (Flowers, 2000) ve tekstil (Brandt vd., 1996) vb. gibi birçok

alanda kullanımı hızla artmaktadır. Geleneksel ve eklemeli imalat yöntemlerinin işlem sırası Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. a. Geleneksel imalat yöntemi, b. Eklemeli imalat yöntemi (Özer, 2020)

Eİ'nin kullanımı, çoğunlukla karmaşık geometriler üretme esnekliği nedeniyle birçok endüstride hızla genişlemektedir (Naranjo-Lozada vd., 2019). Bu, 1980'lerde üç boyutlu nesneler üretmek için ortaya çıkan nispeten yeni bir tekniktir. Bu tekniği kullanmanın ana avantajı, fiziksel bir kalıp oluşturmada, ürünün istenen şekilde neredeyse ağ gibi örülerek üretebilmesidir. 3D baskı uygulamaları için karmaşık prototipler bilgisayar yazılım paketleri kullanılarak 3D nesne olarak çizilebilir. AutoCAD ve SolidWorks endüstriyel alanda tasarım için en popüler yazılım platformlarından bazılarıdır. Daha sonra, bu 3B çizim dosyaları stereolitografiye (STL) dönüştürülebilir formatı, bir 3D yazıcıya uygun bir formattır (Gibson vd., 2015).

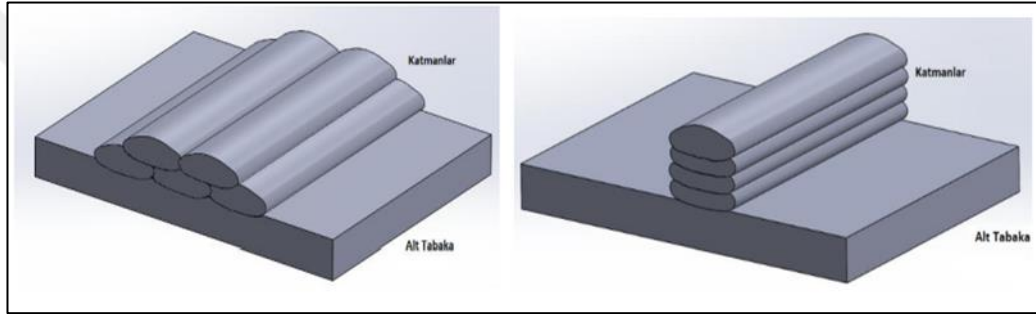
Ayrıca Eİ, benzeri görülmemiş tasarım özgürlüğünün (örneğin, geleneksel imalat yoluyla yapılması zor olan karmaşık geometriler veya içi boş yapılar) önünü açarak, ağırlığı azaltılmış yüksek performanslı parçalara dönüşür (Fitzsimons, 2020).

Eklemeli imalat yönteminin geleneksel imalat yöntemlerine oranla daha az malzeme kullanımına, karmaşık yapıdaki materyallerin üretimine olanak tanımasından dolayı eklemeli imalat birçok uygulama alanına sahiptir. Her ne kadar Eİ son zamanlarda önemli bir gelişme göstermiş olsa da hala pek çok endüstri sektörü tarafından geniş çapta benimsenmemiştir. Nihai ürünün maliyetini malzeme maliyeti, alet maliyeti ve genel gider maliyetinin bir fonksiyonu olarak düşünürsek, Eİ'nin malzeme maliyeti, donanım maliyeti ve genel gider maliyeti açısından geleneksel üretimden daha iyi

performans göstermesi için daha fazla çalışma ve ilerlemeye ihtiyaç vardır (Bourell, 2016).

1.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Bir parçanın eklemeli imalat yöntemi ile üretimi, 3 boyutlu modelleme ile başlar. Ardından veri hazırlığı yapılır ve parça deseni dolgu oranı ve modelin dilimlenmesini kapsar. Parçanın üretilmesinden sonra, son işlem gerekebilir (yüzey düzeltme, boyama, montaj gibi). Şekil 1.3'te şematik olarak katmanların oluşturulması gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Eklemeli imalatta katmanların oluşturulması (Özsolak, 2019)

Eklemlı İmalat Yöntemleri

Eklemlı imalat yöntemlerinin çeşitleri, sınıflandırılması, hangi güç kaynaklarının kullanıldığı ve avantajları ile ilgili bilgiler Çizelge 1.1’de verilmiştir.

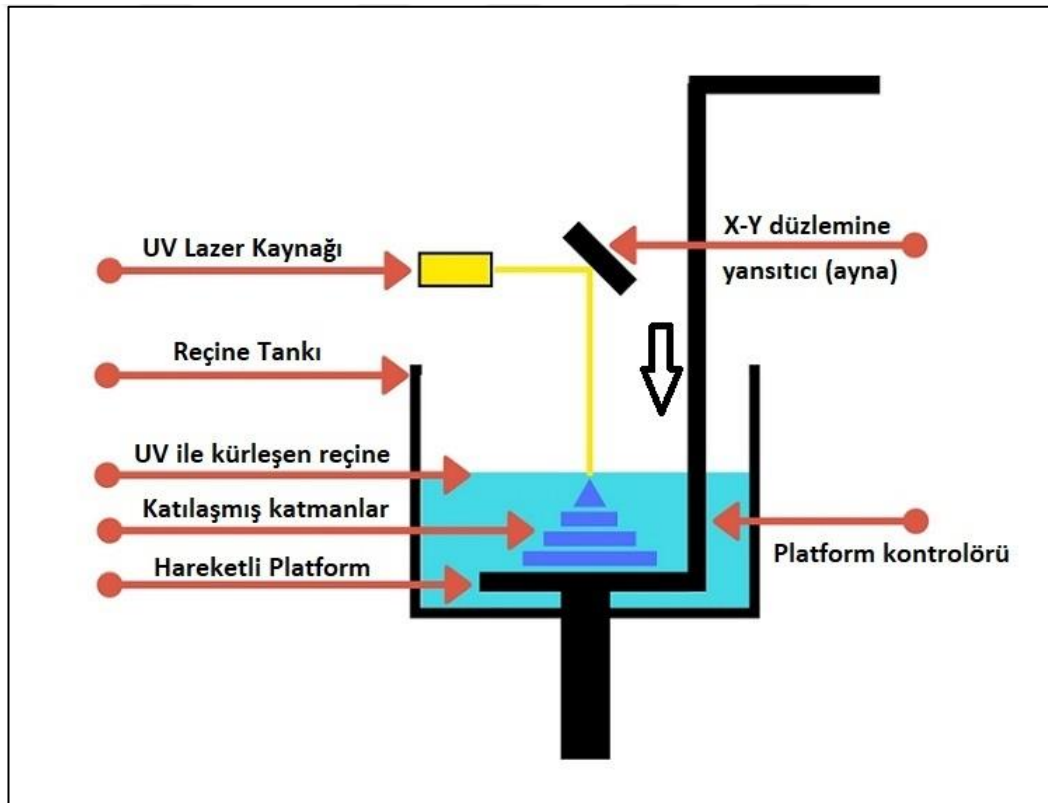
Çizelge 1.1. Eklemlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (Sürmen, 2019)

Yöntem	Teknoloji	Güç Kaynağı	Avantajları
Fotopolimerizasyon	- Stereolitografi (SLA) - Dijital Işık İşleme (DLP) - Sürekli Dijital Işık İşleme (CDLP)	- UV Işını - Projeksiyon - LED	Yüksek baskı hızı ve parça çözünürlüğü
Malzeme Ekstrüzyonu	Eriyik Yığıma Modelleme (FDM)	Termal Enerji	Düşük yazıcı maliyeti, çoklu malzeme ile baskı, Yüksek mukavemet
Sac Laminasyon	Lamine Nesne İmalatı (LOM)	Lazer Işını	İyi yüzey, malzeme, proses maliyeti düşük, büyük boyutlu malzeme basabilme
Malzeme Püskürtme	Çoklu Püskürtme (MJ/PJ)	UV Işını	Çoklu malzeme ile baskı, iyi yüzey iş-sonu, yüksek doğruluk ve detay
Toz Yataklı Eritme	- Seçici Lazer Sinterleme (SLS/DMLS) - Elektron Işınılı Eritme (EBM) - Seçici Lazer Eritme (SLM)	- Yüksek Güçlü Lazer Işını - Elektron Işını - Elektron Işını	Yüksek doğruluk-detay –mukavemet, destek yapıları gerekmez
Direkt Enerji Depolama	- Lazer Toz Şekillendirme (LENS) - Elektron Işın Eklemlı İmalat (EBAM)	- Lazer Işını - Lazer Işını	Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme
Yapıştırıcı Püskürtme	Bağlayıcı Püskürtme (BJ)	Termal Enerji	Renkli obje baskısı, destek yapıları gerekmez, geniş malzeme seçeneği

1.2.1. Fotopolimerizasyon

Fotopolimerizasyon yönteminin temelini genellikle mor ötesi ışınlar ile katılaşabilen polimer malzemelerin kullanımı oluşturmaktadır (Duman vd., 2016).

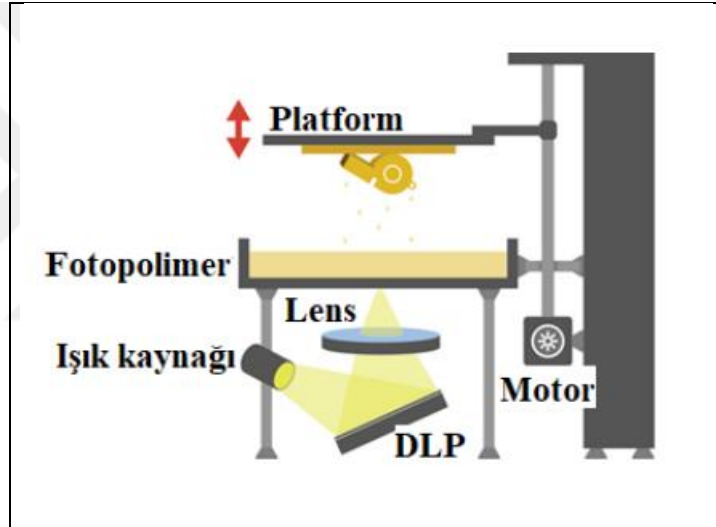
Stereolitografi (Stereolithography – SLA) teknolojisinde kullanılan temel malzeme reçinedir ve mor ötesi (ultraviyole-UV) ışınla katılaştırılarak 3B parça imal edilir. Şekil 1.4'te gösterildiği üzere lazer kaynağından çıkan mor ötesi ışın, üretilecek katmanın (3B nesnenin 2B kesiti) kesit görüntüsüne uygun olarak aynadan yansıtılarak reçine katmanının yüzeyini tarar ve katılaştırır (Budinski, 2019). Katılaştırma işlemi yukarıdan yapılmaktadır.



Şekil 1.4. Stereolitografi işlemi (Budinski, 2019)

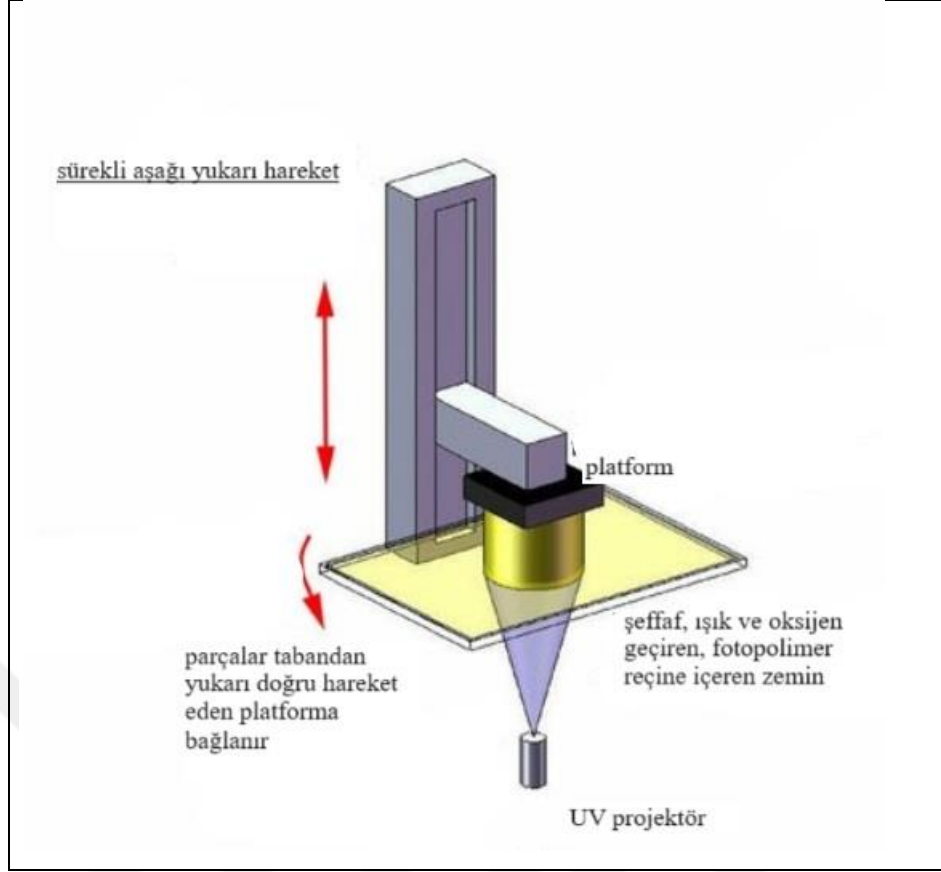
SLA’da katman kalınlıkları çoğunlukla 50 – 100 mikrometre arasında değişmektedir. Bu k değerlerdeki katmanların nokta nokta katılaştırıldığı ve bir yapı oluşturulduğu düşünülünce, bir saatte ancak birkaç milimetre katman katılaştırılabilir (Gibson vd., 2021).

DLP (Dijital Işık İşleme) (şekil 1.5) ve SLA teknolojileri birbirine oldukça benzerdir. Aralarındaki fark ise ışık kaynaklarının farklı olmasıdır. DLP baskı teknolojisinde UV lazer yerine reçine havuzunun altında bulunan bir projektör vardır. Bu projektör ile katmanın tamamı UV ile taranır ve katılaştırılır. SLA’da lazer ışını nokta nokta katılaştırma yapar. Yüksek znrlk istenen parçalarda SLA daha uygundur (Sürmen, 2019).



şekil 1.5. DLP (Dijital Işık İşleme) Yöntemi için temsili şekil (Sürmen, 2019)

Sürekli dijital ışık işleme (Continuous Digital Light Processing – CDLP) ile, DLP’ye benzer prensiple parça imalatı yapılmakta ve aralarındaki temel fark ise CDLP’de, katman imalatı sırasında imalat plakası Z yönünde yukarı doğru sürekli hareket etmektedir. Hareketli platform sürekli yukarı hareket eder; yani katılaştırma dijital ışık işlemede olduğu gibi katman katman değil süreklidir. İlk katman katı hale geldikten sonra bu katman, reçine varilinden yukarı doğru itilerek inşa edilecek sıradaki katman projektör tarafından yayılan ışığın etkisinde katılaştırılarak üretim gerçekleşmektedir (Yalçın, 2017). şekil 1.6’da sürekli dijital ışık işleme teknolojisi verilmiştir.

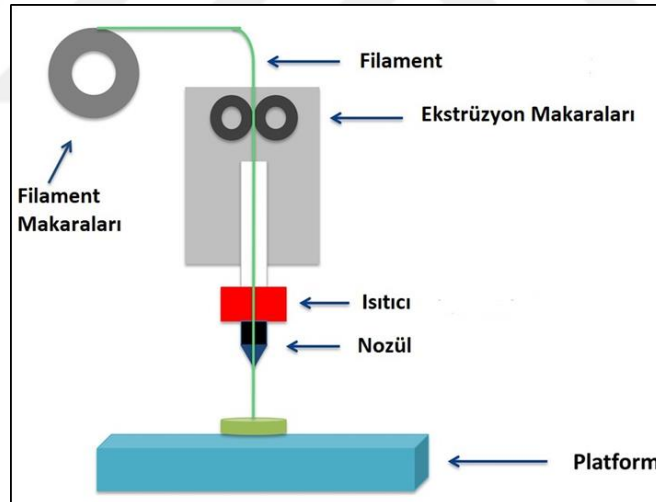


Şekil 1.6. Sürekli dijital ışık işleme teknolojisi (Karagöz, 2021)

CDLP teknolojisi oksijen yardımıyla bu baskı hızını sağlamaktadır. Şekil 1.6’da görüldüğü üzere, DLP’den ayrılan özelliği oksijen ile oluşturulan “ölü bölge”de mikrometre ölçeğinde sıvı reçine tabakası oluşmasını sağlayarak, katman temizliğine ihtiyaç duyulmasını engellemesi ve sürekli bir katılaşma sağlamasından ileri gelir. CDLP teknolojisi ile 50 mm/saat yazma hızları aşılabilmektedir (Tumbleston vd., 2015).

1.2.2. Malzeme ekstrüzyonu

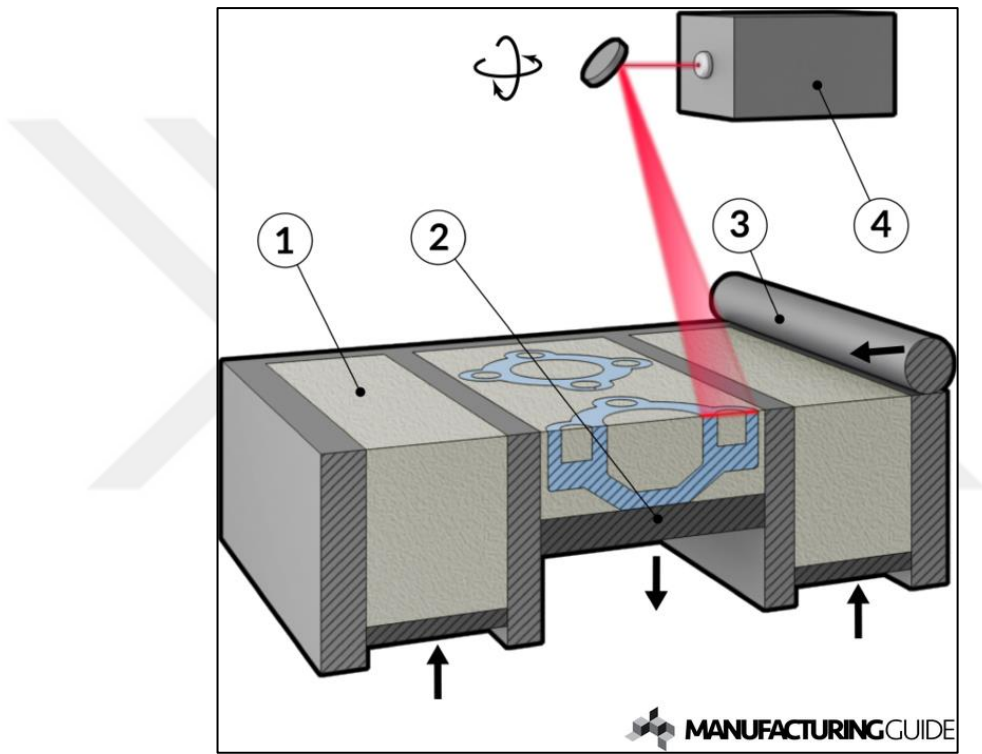
Eriyik Biriktirme Modellemesi (EBM) olarak isimlendirilen bu yöntemde; filament şeklindeki malzeme, ısıtılmış bir nozuldan çekilmekte ve nozulun sıcaklığıyla eriyen malzeme, Şekil 1.7’de görüldüğü gibi tabla/platform üzerine katman katman eklenerek parça oluşturulmaktadır. Sistemde yer alan nozul, yatay olarak hareket edebilir. Her katmanın eklenmesinden sonra platform dikey olarak yukarı ve aşağı hareket ederek diğer katmanların oluşturulmasını sağlar. Bu işlemde, üretilen parçanın kalitesini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. İstenilen özelliklerde parçanın üretilmesi, üretim aşamasında bu parametrelerin kontrol edilmesine bağlıdır. FDM yönteminde model katman katman oluşturduğundan, üretilen parçanın özellikleri, malzemenin bir nozuldan sabit basınç altında ve sürekli olarak çıkmasına göre de değişiklik göstermektedir. Başarılı bir üretim için basınç ve malzemenin çıkış hızı sabit tutulmalıdır. Nozul çapı ve uygulanan nihai işlemler parçanın yüzey kalitesini etkilemektedir (Karagöz, 2021).



Şekil 1.7. Eriyik biriktirme (FDM veya FFF) teknolojisi (Konta, 2017)

1.2.3. Toz yatak füzyon

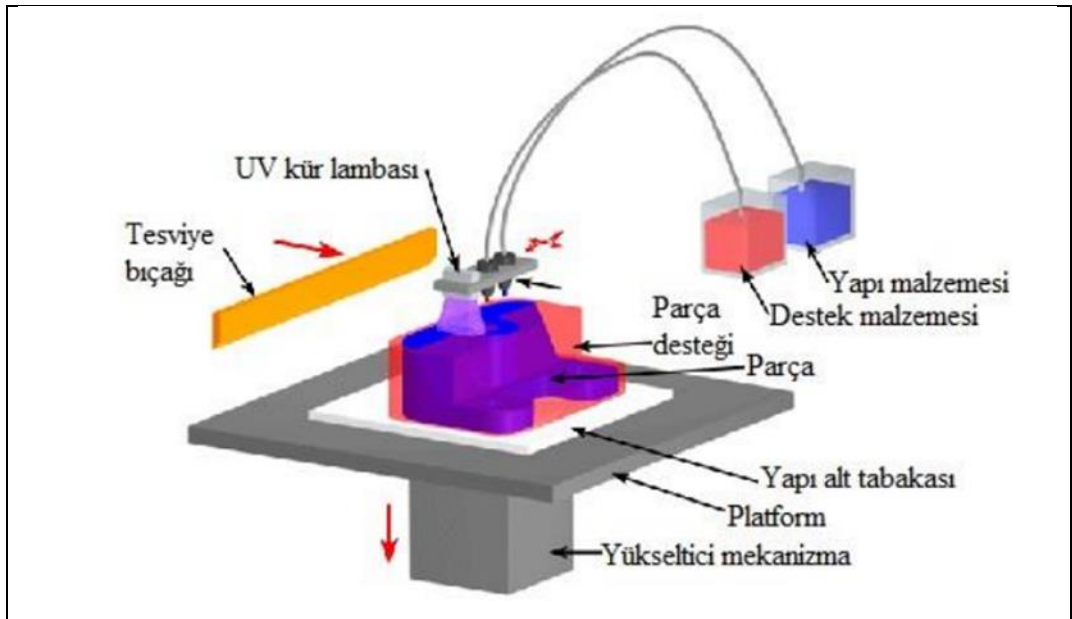
Bu üretim yönteminde, parça tamamlanincaya kadar katman katman ilerleme ile parça oluşturulur. Böylece kısa bir sürede karmaşık ve hassas olan üç boyutlu parçalar üretebilir. Şekil 1.8’de yöntemin şematik görünüşü verilmiştir. Kobalt-krom, paslanmaz çelik, titanyum, inconel vb. metal tozlarından istenilen parça imal yapılabilmektedir. Ayrıntılı ve karmaşık yapıdaki parçalar; makine parçaları, tıbbi ürünler ve sanatsal ürünler kolaylıkla üretilebilir (Özer, 2020).



Şekil 1.8. Seçici lazer sinterleme (SLS) teknolojisi (Özer, 2020)

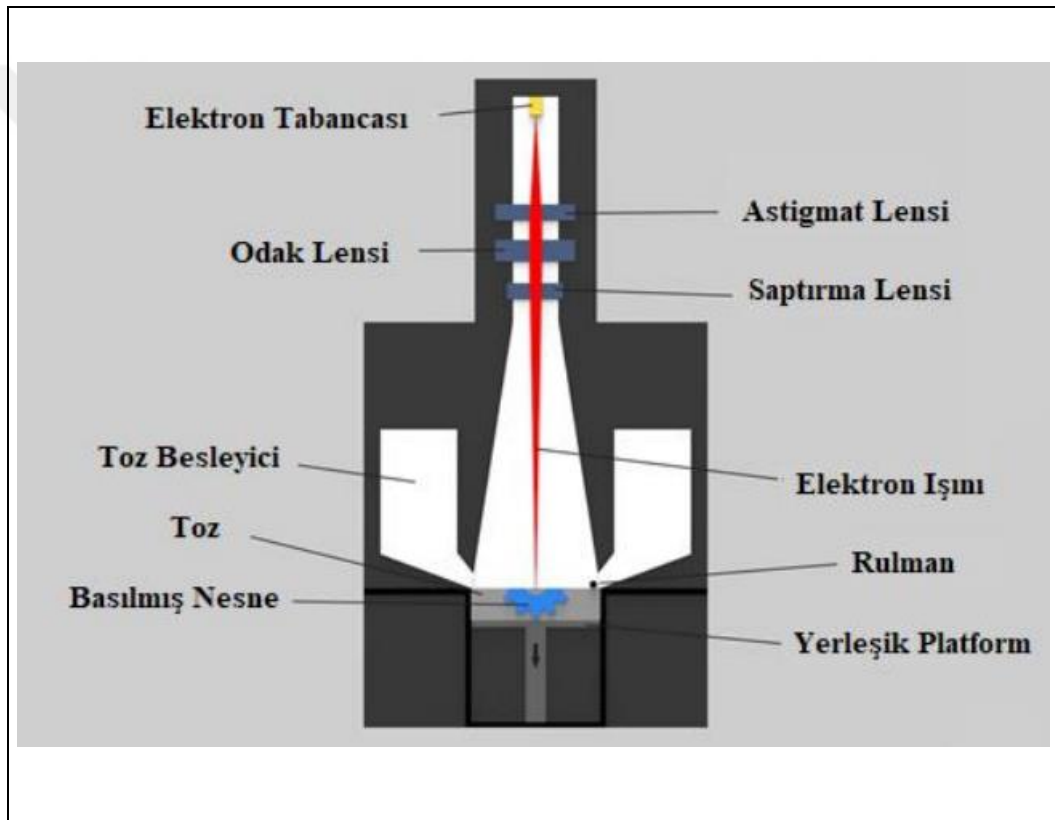
Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) teknolojisi, çok ince metal toz katmanlarının bir lazer ışın yardımı ile eritilmesi işlemidir. Parçanın 3 boyutlu modeli katmanlar şeklinde dilimlenir, lazer ışını da oluşturulmak istenilen geometriye göre metal tozlarını ergitir ve işlem tamamlanmış olur. Ürünün imalatı sırasında taban platformuna bir destek yapısı ile doğru pozisyonda sabitlenmesi gerekmektedir. Bu yöntemin avantajları; yüksek mukavemet ve tokluk değerleri, üretim süresinin kısa ve maliyetinin düşük olması, düşük malzeme tüketimi ve parçanın direkt olarak müşterilerden gelen 3B verilerinden üretilmesidir. Dezavantajları ise; ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, yüksek enerji kaynağı kullanımı, donanımına göre parça boyutunun belirlenmesi ve üretimden sonra ardıl işlemlerine ihtiyaç duyulmasıdır (Gök, 2023).

Çok püskürtmeli ergitme (Multi Jet Fusion-MFJ) teknolojisi, güç kaynağı olarak kızıl ötesi lambalar kullanmaktadır. Destek ve yapı malzemelerini püskürtme işlemi, Şekil 1.9'da şematik olarak gösterildiği gibi nozullar aracılığıyla yapılmaktadır. Malzeme (fotopolimer reçine) katılaştığı ve modelin katman katman oluşturulduğu yapı yüzeyine veya bir platforma püskürtülür. Parçanın oluşturulması esnasında, malzemeyi püskürtmek için, yapı platformu boyunca yatay olarak hareket eden bir nozul kullanılır. Malzeme katmanları UV ışığı kullanılarak sertleştirilir (Karagöz, 2021).

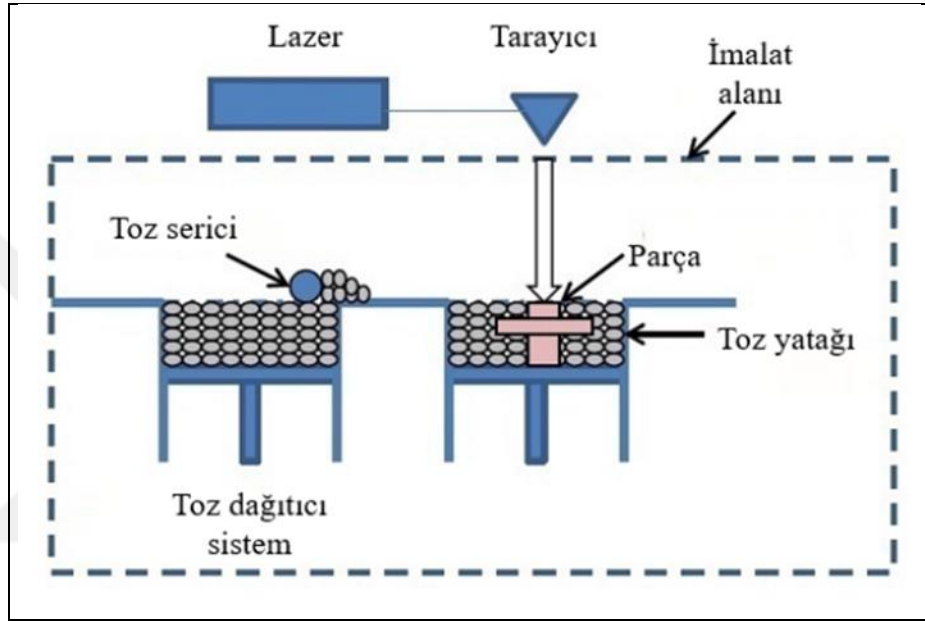


Şekil 1.9. Malzeme püskürtme (MJ) (Karagöz, 2021)

Elektron ışınli ergitme (Electron Beam Melting – EBM) teknolojisi, elektron ışınının odaklanmasıyla toz malzemenin eritilerek kaynaştırılması işlemidir. Şekil 1.10’da yöntem şematik olarak verilmiştir. Elektron Işını Erime yönteminde önceden ısıtılmış tozu ergitmek için elektron tabancası kullanılır bu da EIE'yi daha güçlü kılar çünkü üretim hızı yüksektir. Toz yatak işlemleri, genellikle karmaşık tasarımlı metalik uygulamalar için kullanılır. EIE şu anda metal üretimi için tercih edilen bir işlemdir, ancak üretilen malzemenin elektriksel iletkenlik gerektirmesi ve işlemin bir vakumda yapılması ihtiyacı nedeniyle sınırlı olmakla birlikte bu yöntemle, ortopedik implantlar, uçak parçaları, türbin kanatları gibi parçalar üretilmektedir (Özer, 2020).



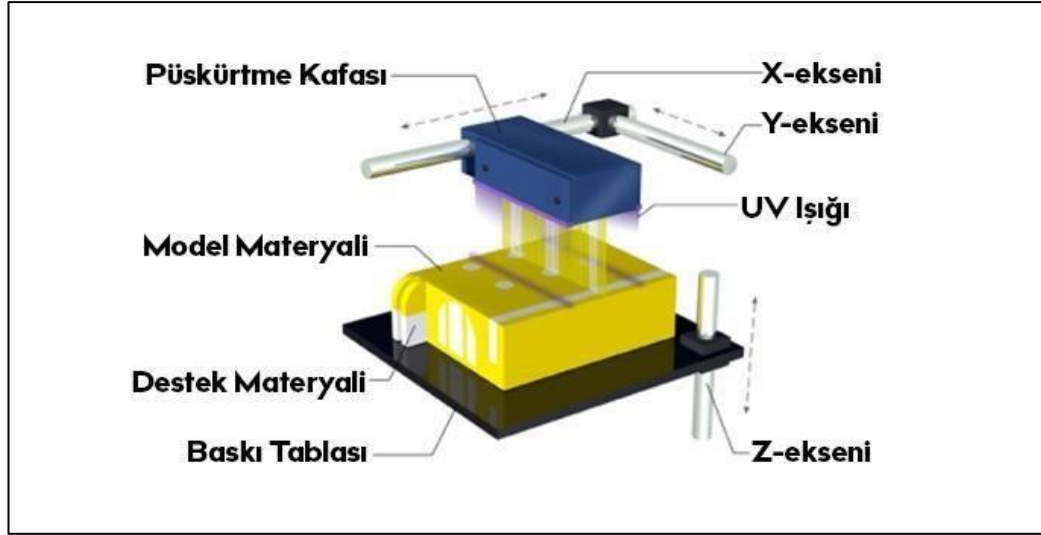
Seçici lazer eritme teknolojisi (Selective Laser Melting – SLM) (Şekil 1.11), metal tozların ergitilmesi yöntemine dayanan bir üretim şeklidir. Ergimiş toz tanelerinin birleştirilmesi iyi bir şekilde yapıldığında yüksek yoğunluğa sahip parçalar elde etmek mümkündür. Mekanik özellikleri iyi olduğu için çokça tercih edilir. Metal toz malzemenin katmanlar halinde ergitilip birleştirilmesi yoğun lazer güç kaynağı ile sağlanarak üretim gerçekleştirilir. Karmaşık geometrideki yapılar için uygun bir yöntemdir (Aydın, 2022).



Şekil 1.11. Seçici lazer eritme teknolojisi şematik resmi (Siyambaş, 2022)

1.2.4. Malzeme püskürtme

Çoklu Püskürtme (PolyJet – PJ veya MultiJet – MJ) teknolojisinde, sıvı formda iki tür fotokürlenebilir reçine, temel model malzemesi ve destek malzemesi, püskürtme kafalarında biriktirilir. Temel model malzemeleri parçayı oluşturmak için kullanılırken, destek malzemesi, temel model malzemesini geçici olarak desteklemek amacıyla temeller inşa etmek için kullanılır. Baskı kafaları hem X hem de Y yönlerinde hareket eder ve parçanın tasarımına göre seçilen malzemeleri püskürtür. X, Y ve Z eksenleri; XZ düzlemine diktir. Her katman, UV lambalarla basılıp kürlendikten sonra, yapı platformu bir katman kalınlığına eşit bir mesafe kadar aşağı iner ve bir sonraki malzeme katmanı yerleştirilir. Bu adımlar nesne tamamlanana kadar tekrarlanır (Wei, 2022). Şekil 1.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Çoklu püskürtme (PolyJet/MultiJet) (Kechagias, 2014)

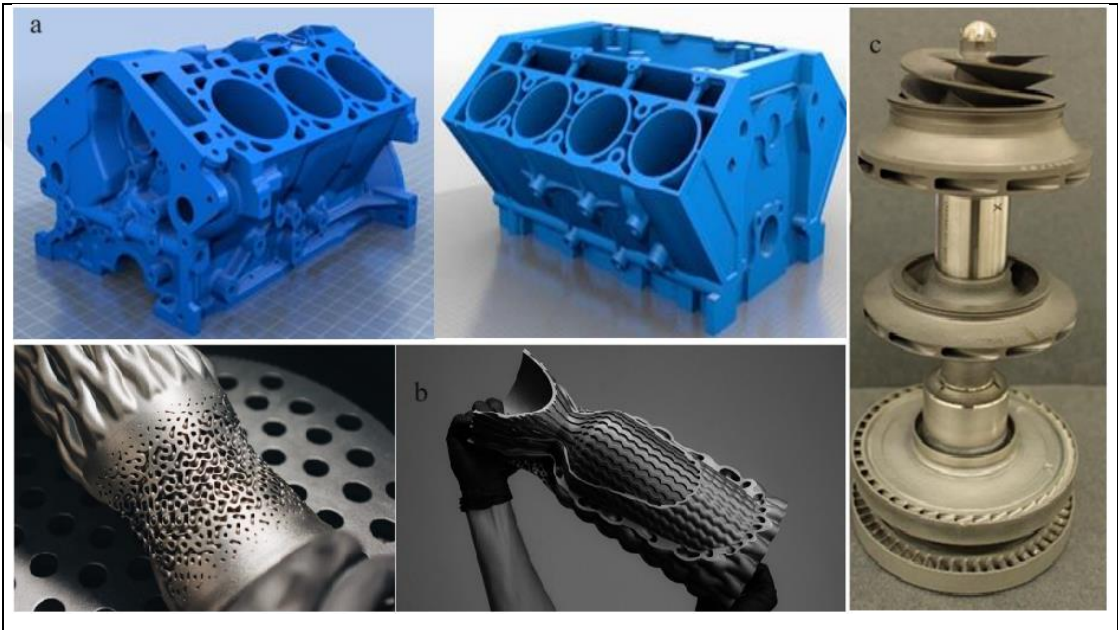
1.3. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Kullanım Alanları

3B imalat teknolojisi, bilgisayar odaklı bir üretim tekniği olması sebebiyle kullanıcıya daha minimal yazıcılarla dahi kişiselleştirilebilir kullanım imkânı sağlamaktadır. Kişiselleştirilmiş ürün ihtiyacının daha ulaşılabilir olması, özellikle sağlık sektöründeki faaliyetlerin kalitesini artırmış, kişiye özel medikal ve dental implant üretimi, yapay organ ve canlı doku baskısı gibi yaşamsal etkinlikleri destekleyici ürünlerin yapım sürecinde kolaylık sağlamıştır. Bu gelişmeler sonucunda sağlık sektörü, 3B baskı sistemleri uygulamalarında son yıllarda büyük yer edinmiştir (Erener, 2021). Bir bina tasarımındaki belirli özellikleri vurgulamak için mimari modeller oluşturulmasında da eklemeli imalat ile üretimden yararlanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde, güvenlik sağlanırken en hafif pratik arabayı yapmak önemli bir hedeftir ve bu doğrultuda Eİ teknolojileri ile bal peteği gibi karmaşık parçalar veya mukavemet/ağırlık oranını artırabilecek boşluklara ve kesiklere sahip diğer şekiller oluşturabilir. Havacılık ve uzay bileşenlerinde, boşluklu yapılar üretimi ile ağırlığın azaltılabilir olması yönünden tercih edilmektedir (Gibson, 2021a).

Şekil 1.13'te tıp alanındaki bazı uygulamalar gösterilmiştir (Yapay organ ve medikal protez üretimi). Şekil 1.14'te otomotiv ve havacılıkta kullanılan parçalardan örnekler verilmiştir.

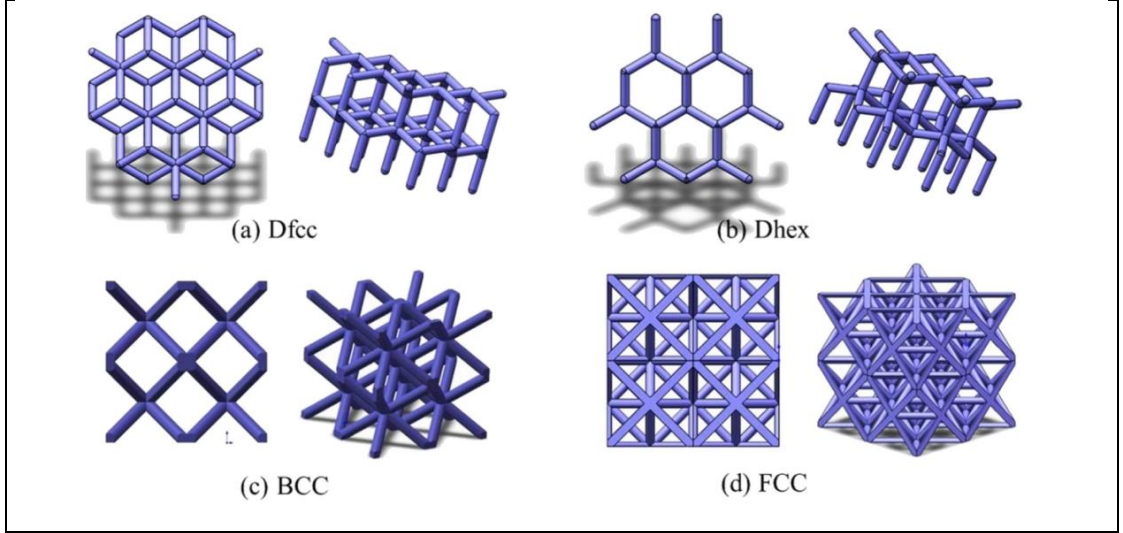


Şekil 1.13. a) Ti-6Al-4V kafatası implantı (Sanadhya, 2015), b) 3B Medikal protez üretimi (Erener, 2021), c) Yapay organ üretimi (Erener, 2021)

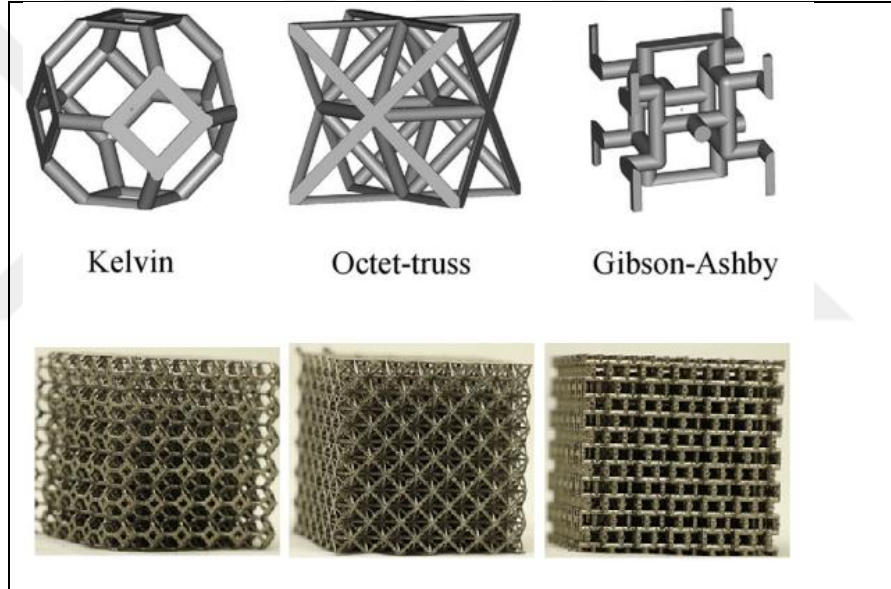


Şekil 1.14. a) Otomotiv endüstrisindeki 3 boyutlu katmanlı örnek motor imalat uygulamaları, V6 Ford motor bloğu, ZR1 V8 Chevrolet motor bloğu (Özel, 2020), b) Dahili soğutma kanallarına ve harici kafese sahip hiperorganik prototip roket nozulu (Milner, 2021), c) Sıvı hidrojen ve sıvı oksijen türbopompalarında kullanılan AM örnekleri (Milner, 2021)

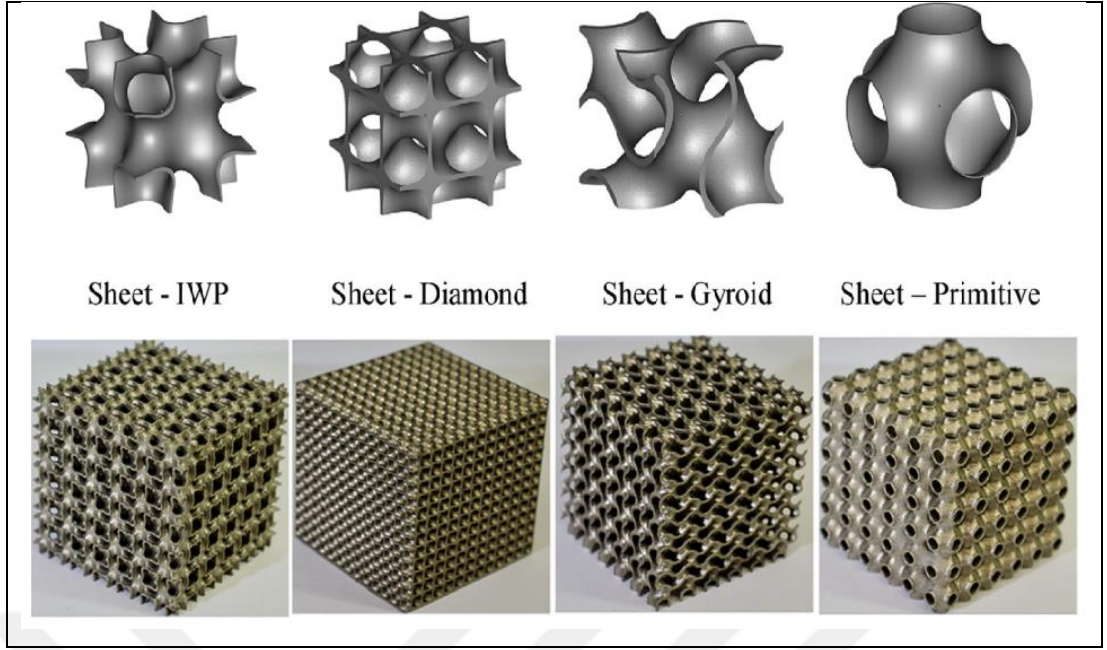
Geleneksel imalat yöntemlerinin aksine eklemeli imalat teknolojisiyle karmaşık yapıdaki parçaların üretilmesi mümkün olmuştur. Latis yapılar, atomların diziliminden ilham alınarak oluşturulmuş, birbirine bağlı küçük plaka veya çubukların tekrar etmesiyle oluşturulan kafes yapı da denilen karmaşık ve boşluklu yapılardır. Hafif ve yüksek dayanımlıdır (Gülcan, 2021). Latis yapıları Şekil 1.15, Şekil 1.16 ve Şekil 1.17’de örnekler verilmiştir.



Şekil 1.15. (a) Dfcc, (b) Dhex, (c) BCC, (d) FCC kafes yapılarının konfigürasyonları (Jin, 2019)



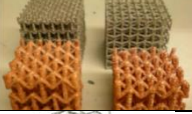
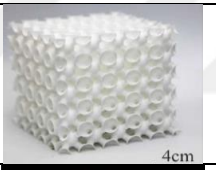
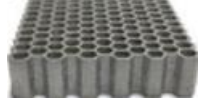
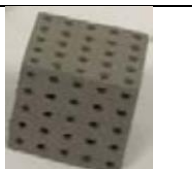
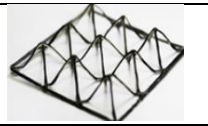
Şekil 1.16. Dikme tabanlı hücresel yapılar (Al-Ketan, 2018)



Şekil 1.17. tabaka-TPMS tabanlı hücresel yapılar (Al-Ketan, 2018)

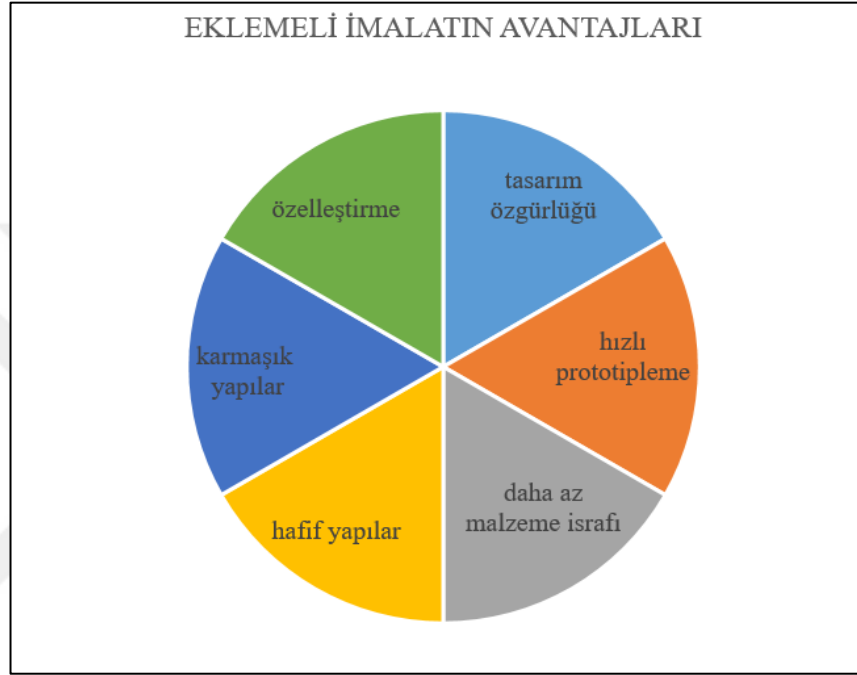
Eklemeli imalat ile çeşitli malzemeler kullanılarak birçok parça ya da yapı türleri üretilabilmektedir. Örnek olarak, yapı cinsi, kullanılan malzeme ve hangi yöntemle üretilbildiğine dair bilgilerle birlikte Çizelge 1.2’de yer verilmiştir.

Çizelge 1.2. Eklemeli imalatla üretilen çeşitli yapılar (Ergene, 2020)

Referans	Üretilen Hücresel Yapı	Malzeme	Eklemeli İmalat Yöntemi
(Yang vd., 2011)		Ti6Al4V ve Bakır	Elektron Işın Yöntemi (EBM)
(Warmuth vd., 2016)		Ti6Al4V	Elektron Işın Yöntemi (EBM)
(Yan vd., 2014)		316L Paslanmaz Çelik	Seçici Lazer Ergitme (SLM)
(Leary vd., 2016)		AlSi12Mg	Seçici Lazer Ergitme (SLM)
(Kuciewicz vd., 2018)		ABS Plus	Eriyik Yığarak Modelleme (FDM)
(Chen vd., 2020)		PA 2200 Polimer MALZEME	Seçici Lazer Sinterleme (SLS)
(Yuan vd., 2017)		Termoplastik Poliüretan	Seçici Lazer Sinterleme (SLS)
(Yalçın vd., 2019)		ABS	Eriyik Yığarak Modelleme (FDM)
(Baranowski vd., 2019)		Ti6AL4V	LENS
(Vangapally vd., 2017)		316 Paslanmaz Çelik	Binder Jetting
(Liu vd., 2018)		Fiber Takviyeli Termoplastik	FDM

1.4. Eklemeli İmalatın Avantajları

Geleneksel imalat yöntemlerine göre eklemeli imalatın pek çok avantajı bulunmaktadır. Yenilikçi ve hızlı olması, kullanım kolaylığı, tasarruf sağlaması ve üretim üstünlüğü onu ürün ve ekipman üretimi için tercih edilir hale getirmiştir. Şekil 1.18’de eklemeli imalatın avantajları tek bir görselde verilmiştir.



Şekil 1.18. Eklemeli imalatın avantajları

Tasarım özgürlüğü: Eklemeli imalat yöntemi; karmaşık geometri ve desenlerin, maliyeti yüksek kalıplar veya aletler kullanmadan esnek tasarım özgürlüğü sunarak üretilmesini sağlar. Bu işlem, geleneksel tekniklere kıyasla mekanik işlemlere gerek duyulmaksızın polimer ve elyaf katmanlarının seçiminde tasarım esnekliği ile karmaşık geometriler oluşturma gibi faydalar sunar. Hızlı prototipleme: 1980'lerden bu yana, bilgisayar destekli tasarım (CAD) dosyalarından üç boyutlu öğeler oluşturmak için çeşitli teknolojilerin de desteklediği hızlı prototiplemeden yararlanılmaktadır. Airbus, %90'ı plastik poliamid tozundan oluşan küçük ölçekli bir insansız hava aracı prototipini test etmek ve oluşturmak için hızlı prototiplemeyi kullanmıştır. Teknoloji ilerledikçe, eklemeli imalat teknikleri hızlı prototiplemeden havacılık, otomotiv, biyomedikal ve diğer endüstriler için takımların ve son kullanım bileşenlerinin hızlı üretimine doğru kaymıştır.

Daha az malzeme israfı: Eklemeli imalat yönteminde geleneksel imalat yöntemlerindeki gibi malzeme çıkarma, iç boşaltma, bütün malzemeyi işleyip esas parçaya ulaşma gibi işlemler olmadığı için malzeme israfı da yapılmamaktadır. Geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında, montaj aşamalarını ortadan kaldırır ve tasarım özgürlüğünü artırır. Hafif yapılar: Eklemeli imalat yardımıyla, kafes veya petek gibi ideal iç geometrilere sahip hafif yapılar üretilir. Bu yapılar iyi bir mukavemet-ağırlık oranına sahiptir. Bu, malzemedan tasarruf sağladığı ve ağırlığı azalttığı için havacılık, otomotiv ve tüketici ürünleri uygulamalarında faydalıdır. Karmaşık yapılar: Biyomedikalden havacılığa, otomotivden yapısal ürünlere çok geniş alanda karmaşık yapıda üretimler gereklidir ve eklemeli imalat ile mümkündür. Özelleştirme: Eklemeli imalat ile hafif ve son derece sağlam olan, makul bir birim maliyetle az sayıda yapılabilen ve aynı zamanda sürekli üretimde isteğe göre büyük ölçüde değiştirilebilen, son derece özel yapılar üretilir. Üretim teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, düşük hacimli üretimi verimli bir şekilde artırmak mümkün olmaktadır. Eklemeli imalat tıp alanında, kemik yerine özel implantlar, hibrit malzeme üretim bileşenlerinin, özellikle de kemiğe benzer mekanik niteliklere sahip kalıcı veya geçici tıbbi implantların büyük talep gördüğü önemli bir uygulamadır. Eklemeli imalat, geleneksel alçı kalıpların yerine ayak bileği ve el bileği ortezi gibi kişiselleştirilmiş ortezler oluşturmak için kullanılmıştır (Islam vd., 2024).

1.5. FDM Yönteminde Kullanılan İşlem Parametreleri

3B yazıcı ile üretim yöntemlerinde yazdırılan ürünün mekanik ve dinamik davranışlarını etkileyen birçok üretim parametresi vardır. FDM üretim yöntemi ile elde edilen ürünü etkileyen parametreler:

- Baskı hızı
- Nozul sıcaklığı
- Fan hızı
- Tarama açısı
- Desen tipi
- Doluluk oranı
- Baskı hızı
- Tabla sıcaklığı

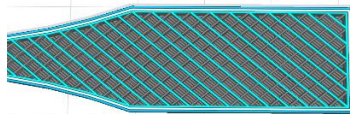
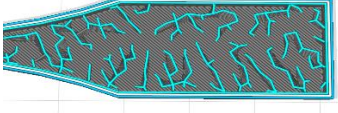
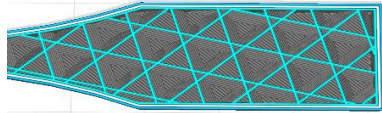
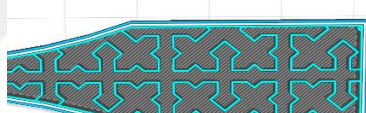
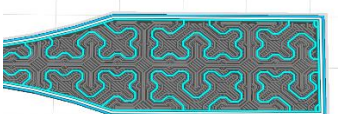
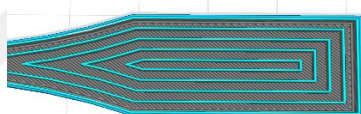
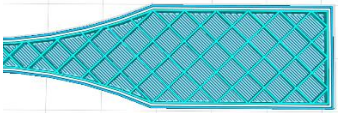
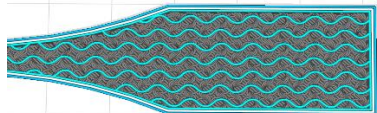
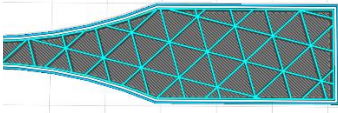
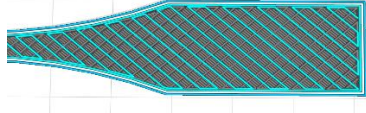
- Ortam sıcaklığı
- İşleme hızı
- Katman kalınlığı
- Filament kalınlığı
- Tarama yönü
- Nozul çapı (Temur, 2023)

1.6. EBY Teknolojilerinde Kullanılan Desen Tipleri ve Dolgu Oranları

EBY teknolojisi belirli sıcaklıklarda ayarlanmış nozul vasıtasıyla termoplastik malzemelerin eritilerek katman katman yığılmasıyla parça oluşturma işlemidir. EBY teknolojisinin karmaşık yapıların üretilmesi, farklı geometriler oluşturulabilmesi gibi avantajları bulunmaktadır.

Dolgu ifadesi, 3 boyutlu yazdırılmış bir parçanın iç yapısını ifade etmektedir. Çok sayıda dolgu deseni olmakla beraber her birinin sunduğu fayda farklıdır. Genel olarak dolgu deseninin temel amacı tam dolu bir parçanın mekanik özelliklerini taklit etmek, malzemeden ve üretim süresinden tasarruf etmektir. Hafif parça arayışı nedeniyle otomotiv ve havacılık endüstrisi daha az dolgu içeren içi boşluklu parçalara yönelmektedir. Kullanıcıların pek çok dolgu deseni içerisinde uygulama yapacakları yer için en uygununu seçmeleri önemlidir. 2B (ızgara, çizgi, üçgen, eşmerkezli, zikzak, çapraz, altıgen) ve 3B (gyroid, kübik, oktet, eşmerkezli 3B, çapraz 3B, tetrahedral) olmak üzere iki ana dolgu deseni kategorisi vardır (Pernet, 2022).

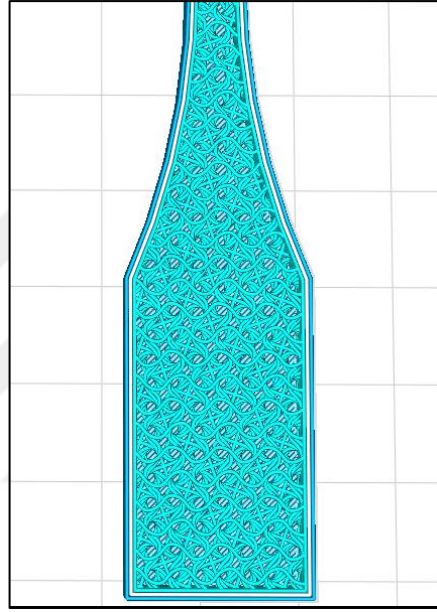
Bu dolgu desenlerinin UltiMaker Cura uygulamasının kütüphanesinde bulunan çeşitleri şekilde gösterilmiştir (Şekil 1.19). Desenlerin net görülebilmesi için dolgu oranları %20 olarak ayarlanmıştır.

	trihexagon		quarter cubic
	octet		lines
	lightning		cubic
	cubic subdivision		cross
	cross 3D		concentric
	ızgara		gyroid
	üçgen		zik zak

Şekil 1.19. %20 dolgu oranlı desenlerin içyapısı

1.6.1. Gyroid

Gyroid kafes yapısı, geometrik özelliği sayesinde içi boş bir yapı oluşturur. Gyroid kafes yapısının içindeki boşluklar, malzemenin hafif olmasını sağlarken aynı zamanda yüksek dayanıklılık sunar. Bu durum, havacılık ve uzay endüstrileri gibi uygulamalarda maliyetleri düşürken enerji verimliliğini artırma gibi önemli avantajlar sağlar ayrıca malzeme hafifliği ile dayanıklılık arasında bir denge kurulmasına olanak tanır (Emir, 2023). Gyroid deseni Şekil 1.20’de gösterilmiştir.



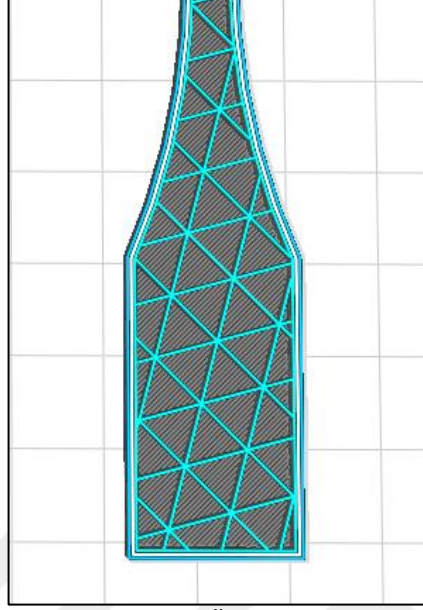
Şekil 1.20. Gyroid deseni

Gyroid, minimum yüzey alanına sahiptir ve bütün eksenlerde ardışık çoğaltılabilen kafes yapılardan biridir. Mekanik dayanımı ve işlevsel fayda sağlaması ile bilhassa sağlık alanında hücre gelişimine yarar sağlamasıyla, implantlarda genellikle tercih edilen bir kafes yapıdır (Korkmaz vd., 2022).

1.6.2. Üçgen

Üçgenlerden bir ağ oluşturan bu model, parça yüzeyine dik bir yük uygulandığında güç açısından doğal bir avantaja sahiptir. Dikdörtgen bileşenlere sahip parçalar için de uygundur (Kırmızıoğlu, 2021).

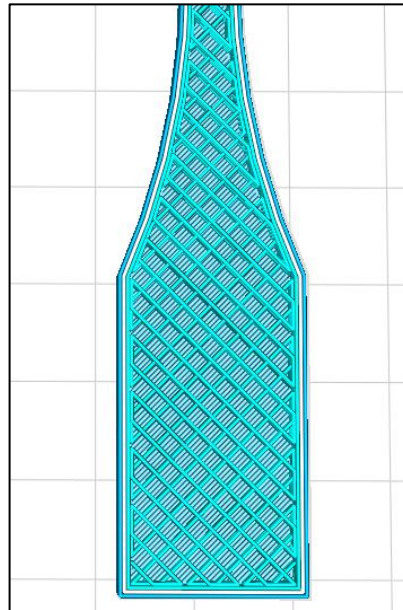
UltiMaker Cura programında elde ettiğimiz üçgen deseni, çekme deneyi numunemizde Şekil 1.21’de gösterilmiştir.



Şekil 1.21. Üçgen deseni

1.6.3. Zik zak

İki boyutlu bir baskı desendir. Görselde görüldüğü üzere çizgiler birbirini dik kesecek şekilde desen oluşturulur. UltiMaker Cura programında elde ettiğimiz zik zak deseni, çekme deneyi numunemizde Şekil 1.22’de gösterilmiştir.

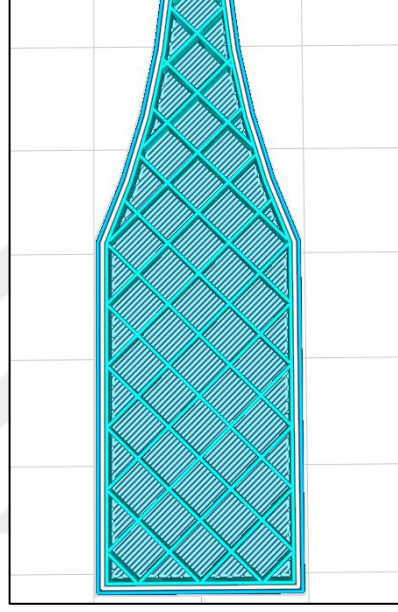


Şekil 1.22. Zik zak deseni

1.6.4. Izgara

Izgara, yaygın kullanılan 2 boyutlu dolgu türlerinden biridir. Izgara deseni, her katmanda birbirini dik kesen çizgilerden oluşan bir desen oluşturur (O'Neill, 2024).

UltiMaker Cura programında elde ettiğimiz ızgara deseni, çekme deneyi numunemizde Şekil 1.23'te gösterilmiştir.



Şekil 1.23. Izgara deseni

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bawadikji (2022) yaptığı çalışmada, saf PLA, %15 karbon fiber takviyeli PLA ve %20 karbon fiber takviyeli PLA'ya çekme testi ve yorulma testi uygulamıştır. Numuneler, %70 ve %100 olmak üzere iki farklı doluluk oranı kullanılarak tasarlanmıştır. Numuneler üzerinde çekme ve yorulma deneyleri yapılmış ve çalışma sonucunda, %15 karbon fiber takviyeli PLA kullanımının en yüksek mekanik özelliklere sahip olduğunu bulmuşlardır. Karbon fiber yüzdesi %20'ye ulaştığında, 3D baskı sırasında karbon fiberin, malzemenin katmanlarının yapışmasına neden olmasından dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde bozulmaların meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Botelho vd. (2003), karbon fiberle güçlendirdikleri kompozit malzemeler üzerinde yaptıkları çekme ve basma deneylerinde karbon fiber içeriğinin artmasıyla kompozit elastik modül, çekme ve basınç dayanımında hafif bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Patan (2019), yapmış olduğu çalışmada Akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve kırılmış karbon elyaf takviyeli ABS filamentler kullanarak, ASTM standartlarına uygun numuneler üreterek sabit baskı parametrelerini uygulamışlardır. Üretmiş olduğu numunelerin mekanik davranışlarını deneysel olarak incelemiş ve elde ettiği sonuçları sayısal olarak doğrulamıştır. Mekanik deneyler sonucunda, karbon elyaf takviyeli ABS numunelerin basma ve eğilme dayanımının, ABS numunelere göre sırasıyla %23.9 ve %14.75 daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Analitik gerilme analizlerinde mekanik deneylerin sonuçlarının girdi olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilen her iki numune türü için de çekme, basma ve eğilme davranışları minimum sapmalar ile modellenmiş ve analiz etmiştir.

Öz vd. (2018) yaptıkları çalışmada, dolgu oranının ABS, PLA, Naylon ve Polistiren filamentler kullanılarak basılan numunelerin hasar yüklerine olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Numune dolgu oranlarını %15, %50 ve %100 olarak seçmişlerdir. Sonuçlara bakıldığında, kullanılan filament çeşitlerinin tamamında dolgu oranlarındaki artışın hasar yükünü arttırdığı görülmüştür. Dolgu oranına bağlı olarak en belirgin artış polistiren filament ile yazdırılan numunelerde meydana gelmiştir.

Naylon filament için dolgu oranının hasar yüküne etkisinin, diğer filament çeşitleri ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğunu saptamışlardır.

Ghebreinsae (2019)'nin yaptığı çalışmada aldığı sonuçlar şu şekildedir: Çekme ve eğilme numuneleri, sırasıyla yaklaşık %62 ve %42 lif hacim oranına sahip olarak üretildi. Ayrıca, çekme numuneleri maksimum çekme dayanıklılığında 559.90 MPa ve çekme modülünde 25.04 GPa sağladı. Eğilme numuneleri ise maksimum eğilme dayanıklılığında 270.70 MPa ve eğilme modülünde 16.42 GPa elde etti. Elde edilen çekme dayanıklılığı ve modül sonuçları sırasıyla 17 MPa ve 2.65 GPa standart sapmaya sahipti. Eğilme dayanıklılığı ve modül sonuçları ise 28.30 MPa ve 1.35 GPa standart sapma ile geldi. Karşılaştırma amaçlı olarak, bisiklet çerçeveleri için yaygın olarak kullanılan 6061-T6 Alüminyum'un nihai çekme dayanıklılığı 310 MPa'dır. Bu çalışmadaki kompozit numunelerin çekme dayanıklılığı, Al6061-T6'nın dayanıklılığının yaklaşık %80 daha yüksektir. Ancak test edilen numuneler yüksek lif hacim oranına sahiptir.

Polat (2022) yaptığı çalışmada, sürekli karbon fiber kullanarak yapının güçlenmesini amaçlamıştır. Yazdırılan numunelere çekme testleri uygulamış ve sayısal olarak elde edilen sonuçları değerlendirmiştir. Polimer malzeme olarak Onyx ve sürekli fiber malzemesi olarak karbon fiber kullanmıştır. Fiberli numunelerin fiber katılmadan basılan Onyx numunesi ile karşılaştırmasını yapmıştır. Onyx (kıyılmış karbon fiber dolgulu naylon) ile basılan numune 16 MPa çekme dayanımına ulaşırken, yapıya sürekli karbon fiber takviyesi eklenerek basılan numunede 58 MPa çekme dayanımı değerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlarla birlikte yapıya karbon fiber katılmasının çekme dayanımını olumlu yönde etkilediğini, gözlemlemiş ve karbon fiber yoğunluğunun da çekme dayanımını etkilediğine dikkat çekmiştir.

Sezer vd. (2019), 6 mm uzunluğunda karbon elyaf takviyeli ABS kompozit filament üreterek FDM ile oluşturulan malzemelerin mekanik özelliklerini optimum seviyeye getirmek için çalışma yapmışlardır. 3B yazıcıda bu malzeme ile çekme test numuneleri üretmişler ve karbon elyaf takviyesinin ABS malzeme ile üretilen ürünlerin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. 6 mm uzunluğunda karbon elyaf takviyesi ile parça dayanımının önemli ölçüde iyileştirilmesine rağmen; esneklik ve işlenebilirliğin

artan takviye içeriği ile azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca mekanik özellikleri önemli derecede etkileyen diğer bir faktörün dolgu deseni olduğunu saptamışlardır.

Tatlı vd. (2020) çalışmalarında, FDM yazıcı tasarlayarak imal etmişlerdir. 200x200x210 mm yazdırma hacmine sahip olan bu yazıcı ile PLA malzeme kullanarak 2 farklı dolgu desenine (gyroid, ızgara) ve %20 dolgu oranına sahip test numuneleri üreterek, numunelere çekme, üç nokta eğilme ve darbe testleri uygulamışlardır. Testler sonucunda ızgara dolgu desenine sahip numuneler maksimum çekme dayanımına sahip olurken, gyroid dolgu deseni ile üretilen numunelerin maksimum eğilme dayanımına sahip olduğunu belirlemişlerdir. Bu iki dolgu deseninde de Charpy darbe dayanımı deneyinde önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır.

Wang vd. (2010) ve Kooistra vd. (2007)'ne göre hücreli yapıların artan popüleritesi, bir tasarımın eklemeli imalat ile üretimine yönelmesi ve bu işlemin benimsenmesi ile olumlu bir şekilde ilişkilidir. Bu nedenle, eklemeli imalat üretimi, kullanıcıların geleneksel üretim yöntemlerine göre daha yüksek tasarım karmaşıklığına ulaşmasını sağlar.

Alafaghani vd. (2017), işlem parametrelerinin, çeşitli işlem koşulları altında basılı parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırdı: dolgu deseni, baskı hızı, dolgu yüzdesi, yapı yönü, katman kalınlığı ve ayarlanan meme sıcaklığı bunlardan bazılarıdır. Dolgu deseninin, dolgu yoğunluğunun ve baskı hızının çekme özellikleri üzerinde yalnızca hafif bir etkisi olduğunu buldular. Ayrıca, Panda vd. (2018), bir petek deseninin duvar kalınlığı ve hücre boyutundaki farklılıkların, basılı parçaların mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceğini belirtmiştir.

Kaveh vd. (2015), ABS, PLA ve HIPS malzemelerinden imal edilen parçalar için baskı parametrelerini optimize etmeye çalıştı. Sonuçlar, ayarlanan nozul sıcaklığı, besleme hızı, akış hızı ve raster genişliği gibi parametrelerin 3D baskılı numunelerin kalitesini etkilediğini göstermiştir.

Baich vd. (2015), dolgu deseninin ve baskı süresinin ABS'den basılan parçaların mekanik performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Beklendiği gibi, en düşük dolgu yoğunluğu maliyet tasarrufu sağlamıştır. Bununla birlikte, dolgu yoğunluğu

azaldıkça mekanik özelliklerin bozulduğu görülmüştür. Ek olarak, dolgu desenleri, belirli bir parça için tüketilen malzeme miktarı ve baskı süresi nedeniyle maliyet tasarruflarıyla da doğrudan ilişkilidir.

Harpool (2016), PLA parçalarının gücünü dört farklı dolgu deseni ile incelemiştir (doğrusal, elmas, petek (altıgen) ve katı). Numuneler %15 dolgu yoğunluğu ile basılmış ve altıgen desen en yüksek mukavemeti verirken, katı desen %100 dolgu yoğunluğunda en zayıf mukavemeti göstermiştir. Sonuçlar, dolgu deseninin basılı parçaların teknik özellikleri üzerinde net bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Ning vd. (2015), FDM ile karbon fiber takviyeli ABS kullanmış ve basılı kompozit parçaların çekme ve eğilme özelliklerinin saf ABS'ye kıyasla önemli ölçüde arttığını tespit etmiştir.

Li vd. (2016), üç baskı malzemesi türünün (saf PLA, karbon fiber takviyeli PLA ve modifiye karbon fiber takviyeli PLA) davranışını incelemiştir. Bu çalışma sırasında, modifiye karbon fiber takviyeli PLA'nın çekme ve eğilme mukavemetleri, geleneksel karbon fiber takviyeli PLA'ya kıyasla sırasıyla %13.8 ve %168 oranında artmıştır.

Yeşiloğlu vd. (2022), PLA malzeme ile yaptıkları çalışmada üç farklı desen (Octet, Gyroid ve Cross) ve gözenek oranlarına (%50, %30 ve %20) sahip numunelere çekme ve basma deneyleri uygulamışlardır. Gyroid dolgu desenine sahip numunelerde, baskı yönünde numunenin sıkıştırılmasıyla elastisite modülü %50, %30 ve %20 gözeneklilik oranları için sırasıyla 926.77 MPa, 601.55 MPa ve 485.64 MPa olarak elde etmişlerdir. Ayrıca, numunenin baskı yönüne dik olarak sıkıştırılması durumunda 402.6 MPa, 534.69 MPa ve 1107.5 MPa'lık basınç elastisite modülleri elde etmişlerdir.

Ambati vd. (2022), PLA ile yaptıkları çalışmada üç farklı dolgu deseni (ızgara, üçgen ve gyroid) ve üç farklı dolgu yoğunluğuna (%60, %75, %90) sahip numunelerde çekme deneyi uygulamışlardır. Dolgu yoğunluğunun çekme mukavemeti değerlerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. Dolgu deseninden bağımsız olarak dolgu yoğunluğundaki artış, çekme mukavemeti değerlerini önemli ölçüde artırmıştır. Örneğin, ızgara desenli ve %90 dolgu yoğunluğuyla üretilen numuneler, aynı dolgu desenli ancak %60 dolgu yoğunluğuyla üretilen numunelerden daha yüksek çekme

mukavemeti göstermiştir. Benzer şekilde, üçgen dolgu desenli ve gyroid dolgu desenli numuneler, dolgu yoğunluğunun artmasıyla birlikte çekme mukavemetinde artış göstermiştir; yani %90 dolgu yoğunluğuna ve ızgara dolgu desenine sahip numuneler, 32.6 MPa çekme mukavemeti göstermiştir. Oysa aynı ızgara dolgu deseni için %60 dolgu yoğunluğuna sahip numune 25.2 MPa çekme mukavemeti göstermiştir.

Kadhum vd. (2023), PETG, PLA+ ve PLA ile yaptıkları bir çalışmada, %20 dolgu oranı ile 14 farklı desende (grid, lines, triangles, tri-hexagon, cubic, cubic subdivision, octet, quarter cubic, concentric, zigzag, cross, cross 3D, gyroid, lightening) çekme deneyi numuneleri hazırlayarak çekme testine tabi tutmuşlardır. Mekanik özellikler açısından en iyi performansı gyroid, kübik ve eş merkezli desenlerinde elde etmişlerdir. Kopma gerilmesi %'si açısından PLA+, PETG'den ve PLA'dan daha sert bulunmuştur. Maksimum ortalama mukavemet PETG (16.5 MPa) malzemede elde edilirken, PLA+ ve PLA'da 14.7 MPa, 12.4 MPa değerlerine ulaşılmıştır. PLA, PETG ve PLA+ için daha yüksek nihai çekme mukavemetleri, sırasıyla 15.6, 20.8 ve 16.5 MPa olarak kübik, jiroid ve eşmerkezli desenlerle basılarak elde edilmiştir.

Bu çalışmada karbon fiber malzeme kullanarak farklı dolgu deseni ve dolgu yoğunluğu ile yazdırılan numunelerin mekanik deneyleri yapılarak sonuçları sayısal verilerle desteklenerek açıklanmıştır. Kullanılan desen tipleri geometri ile uğraştırmayacak, kütüphaneden alınıp direkt kullanılabilecek desenler olduğundan dolgu deseni seçimi konusunda son kullanıcılara kolaylık sağlaması ve kılavuzluk yapması amaçlanmıştır

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan deney numuneleri, numune imalatında kullanılan yazıcı, çekme ve basma deneylerinin yapımında faydalanılan cihazlardan bahsedilmiştir.

3.1.1. Deney numuneleri

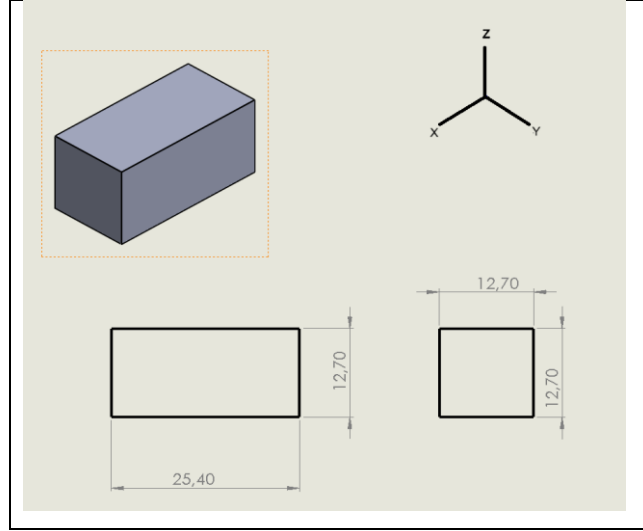
Bu çalışmada numunelerin imalatında Esun Epa CF 1.75 mm Natural Karbon fiber katkılı Elyaf filament kullanılmıştır. Naylon 6/66 kopolimer tabanlı ve buna ek olarak %20 oranında karbon fiber içeren bir filamenttir. Filament ile ilgili firma tarafından verilen değerler Çizelge 3.1’de verilmiştir (Anonim, 2024).

Çizelge 3.1. Esun Epa CF filament için firma verileri

Baskı Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Bozulma Sıcaklığı (°C, 0.45 MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Eğme Dayanımı (MPa)	Darbe Dayanımı (kJ/m ²)
260-290	1.24	155	140	10.61	140	18.67

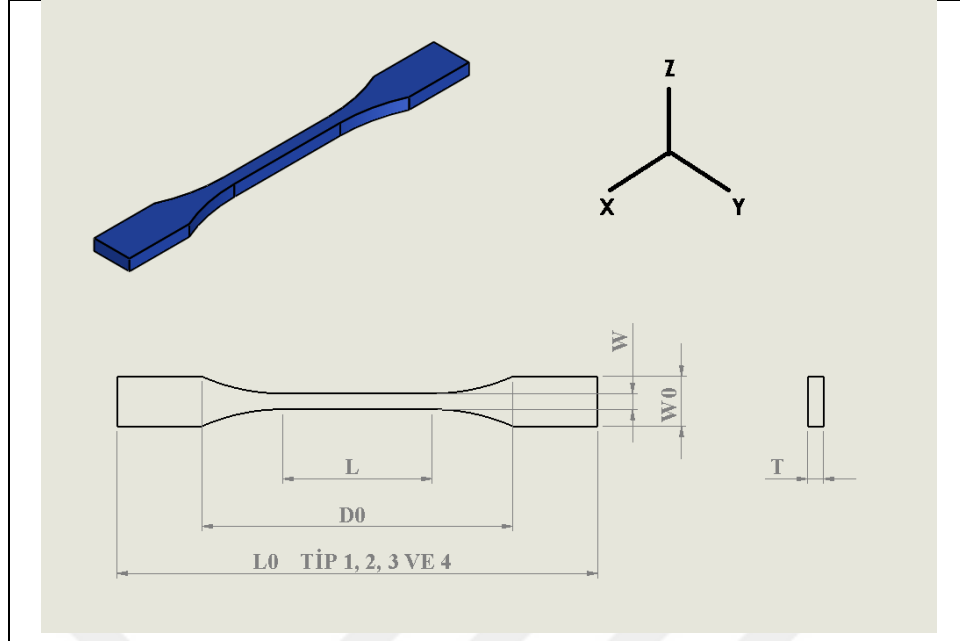
Deneyisel çalışmalar için basma ve çekme olmak üzere 2 tip numune tasarımı yapılmıştır.

Basma deneyi numuneleri ASTM D695 standardına göre 12.7x12.7x25.4 mm ölçülerinde imal edilmiştir. Numune tasarımı SolidWorks programında oluşturulmuştur. Şekil 3.1’de basma deneyi numunesinin ölçüleri verilmiştir. Numunenin imalatı şekilde görüldüğü gibi yapılmıştır. Katmanlar 25.4x12.7 kesit alanına paralel (x eksenine) olacak şekilde oluşturularak imal edilmiştir.



Şekil 3.1. Basma deney numunesi ölçüleri (ölçüler mm'dir)

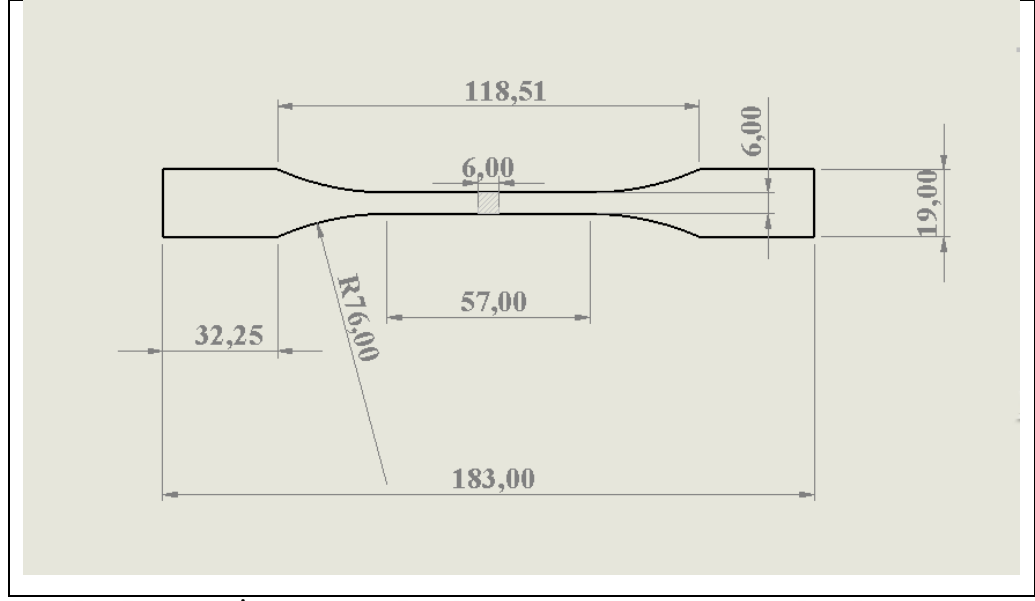
Çekme deney numunelerinin boyutları ise ASTM D638 standardına göre belirlemiştir (Şekil 3.2). Şekil 3.2'de farklı numune ölçüleri görülmektedir. Bunlar 5 tip olarak, numune kalınlığına (T) göre değişiklik göstermektedir. Çalışmada numune kalınlığı 6 mm olarak seçilmiştir. Bu kalınlık ölçüsüne göre Tip 2 boyutlarında numuneler üretilmiştir (Şekil 3.3).



Kalınlık İçin Numune Boyutları, T, mm

Boyutlar	7 ve altı		7 ile 14 arası	4 ve altı	
	TİP 1	TİP 2	TİP 3	TİP 4	TİP 5
W	13	6	19	6	3.18
L	57	57	57	33	9.53
W0	19	19	29	19	...
L0	165	183	246	115	63.5
G	50	50	50	...	7.62
D	115	135	115	65	25.4
R	76	76	76	14	12.7

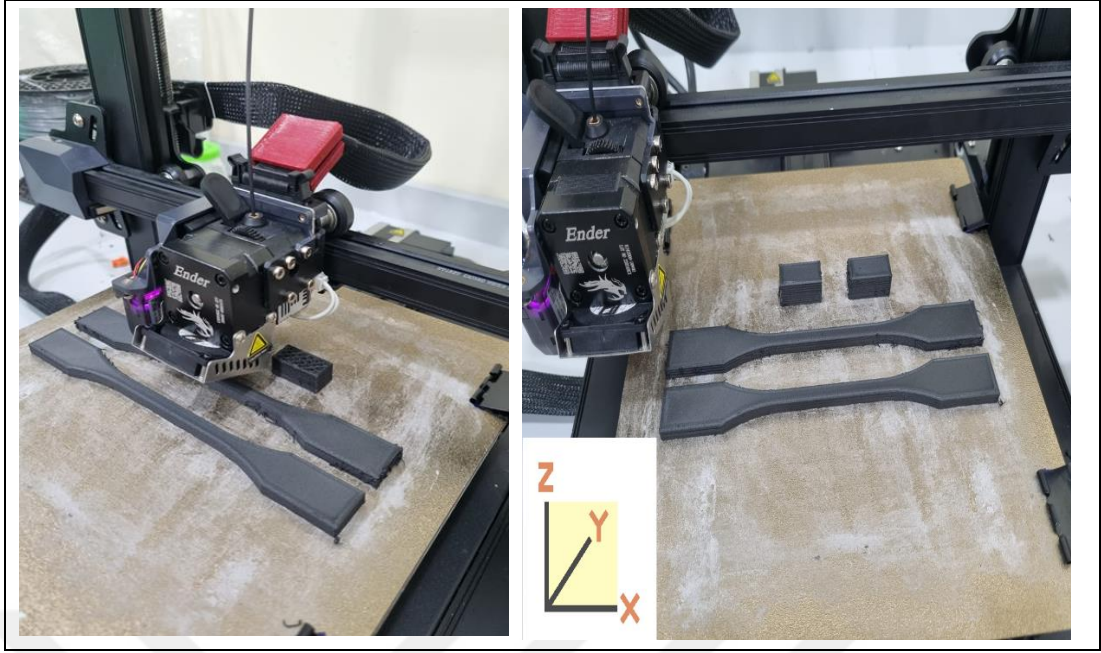
Şekil 3.2. ASTM D638 standardına göre çekme deneyi numunesi (ölçüler mm'dir)



Şekil 3.3. TİP 2 numune boyutlarının teknik resmi (ölçüler mm'dir)

3.1.2. Numune imalatları

Numunelerin imalatında 3B yazıcı olarak CREALITY marka cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.4) Yazdırma sıcaklığı 265 °C, yapı imalat tablası sıcaklığı 85 °C ve katman kalınlığı 0.2 mm'dir. Numunelerin tamamında duvar kalınlığı 0.6 mm olarak alınmıştır. Duvar kalınlıkları, katman kalınlığında olduğu gibi 0.2 mm ölçüsünde 3 pasoda verilerek 0.6 mm'ye ulaştırılmıştır (Şekil 3.5). Bu değerlerin seçiminde esun firmasının verdiği aralıklar kullanılarak seçim yapılmıştır. 3B yazıcı için program olarak UltiMaker Cura kullanılmıştır.

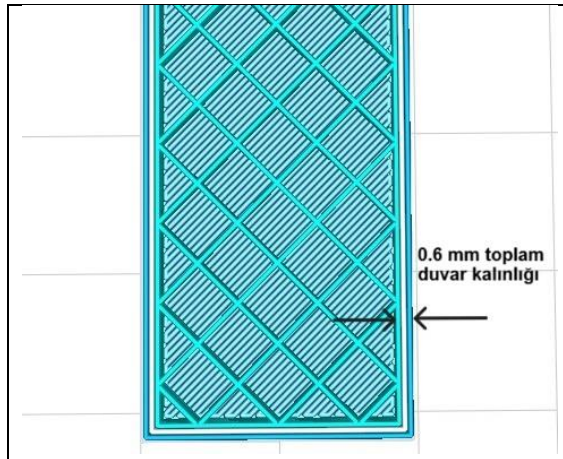


Şekil 3.4. Çekme deneyi numunelerinin yazdırılması

Numune imalatında kullanılan parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir. İmalatta, katman yüksekliği 0.2 mm, yapı levhası sıcaklığı 85 °C olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.2. İmalat parametreleri

DENEY NUMUNE NO	DOLGU ORANI	DESEN	İLERLEME HIZI (mm)	NOZÜL SICAKLIĞI
1	%100	YOK	0.2	265 °C
2	%80	ÜÇGEN	0.2	265 °C
3	%80	GRİD	0.2	265 °C
4	%80	ZİK ZAK	0.2	265 °C
5	%80	GYROİD	0.2	265 °C
6	%60	ÜÇGEN	0.2	265 °C
7	%60	GRİD	0.2	265 °C
8	%60	ZİK ZAK	0.2	265 °C
9	%60	GYROİD	0.2	265 °C
10	%40	ÜÇGEN	0.2	265 °C
11	%40	GRİD	0.2	265 °C
12	%40	ZİK ZAK	0.2	265 °C
13	%40	GYROİD	0.2	265 °C
14	%20	ÜÇGEN	0.2	265 °C
15	%20	GRİD	0.2	265 °C
16	%20	ZİK ZAK	0.2	265 °C
17	%20	GYROİD	0.2	265 °C



Şekil 3.5. Numunede duvar kalınlığı gösterimi

3.1.3. Çekme ve basma deneyi cihazı

Çekme ve basma deneyinde cihaz olarak SDÜ Yetem bünyesinde bulunan, Shimadzu AGS-X (10kN) cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.6). Söz konusu cihazda, yassı numuneler için ölçü aralığı: 0- 7mm kalınlığında ve 30 mm genişliğinde, silindirik numuneler için ölçü aralığı: Ø 4 - 9 mm boyutlarındadır. Cihazın yük kapasitesi 10 kN dir.



Şekil 3.6. Shimadzu çekme deneyi cihazı

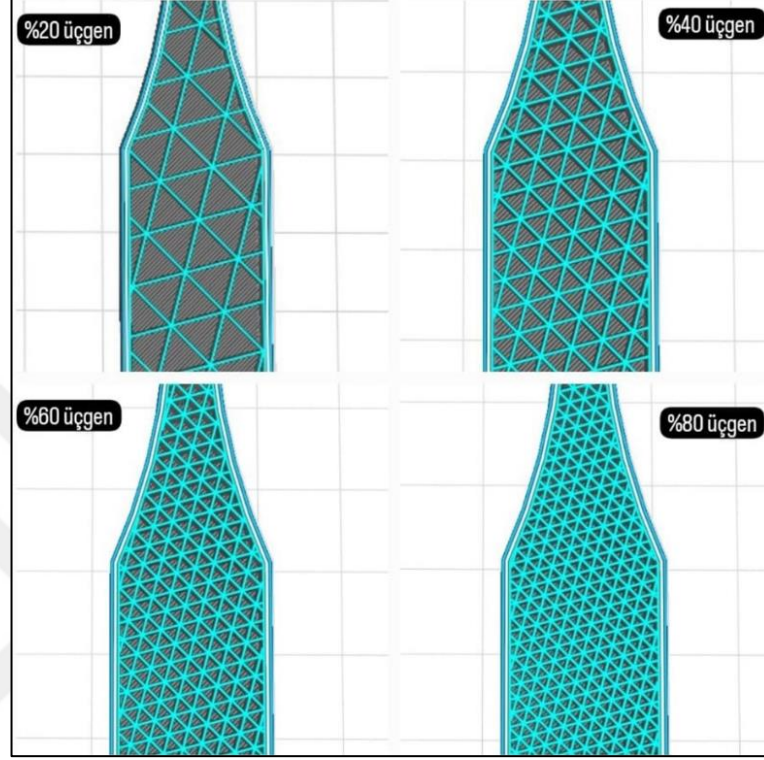
3.2. Yöntem

Bu bölümde çalışmada kullanılan desen tipleri, % dolgu oranları, yapılan mekanik deneyler detaylı olarak anlatılmış ve görsellerle açıklanmıştır.

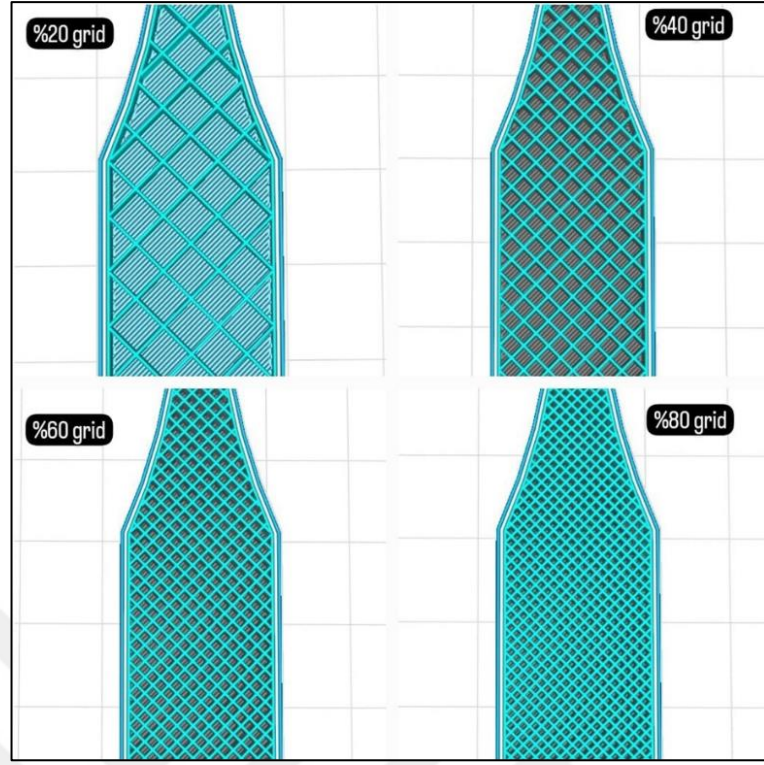
3.2.1. Desen tipi ve dolgu oranı

Bölüm 1.5'te de belirtildiği üzere desen ve dolgu oranlarının farklılıklarından faydalanarak numunelerin çekme ve basma dayanımlarını test etmek amacıyla deneyler yapılmıştır. Desen tipi olarak UltiMaker Cura programı kütüphanesinde mevcut olan desen tipleri kullanılmıştır. Çalışmada 4 farklı desen tipi (üçgen, ızgara, zik zak, gyroid) seçilmiştir. Dolgu oranı olarak 4 farklı dolgu oranında (%20, %40, %60 ve %80) çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca %100 doluluk oranında numune imalatı da yapılarak sözü edilen dolgu oranlarına göre kıyaslaması gerçekleştirilmiştir.

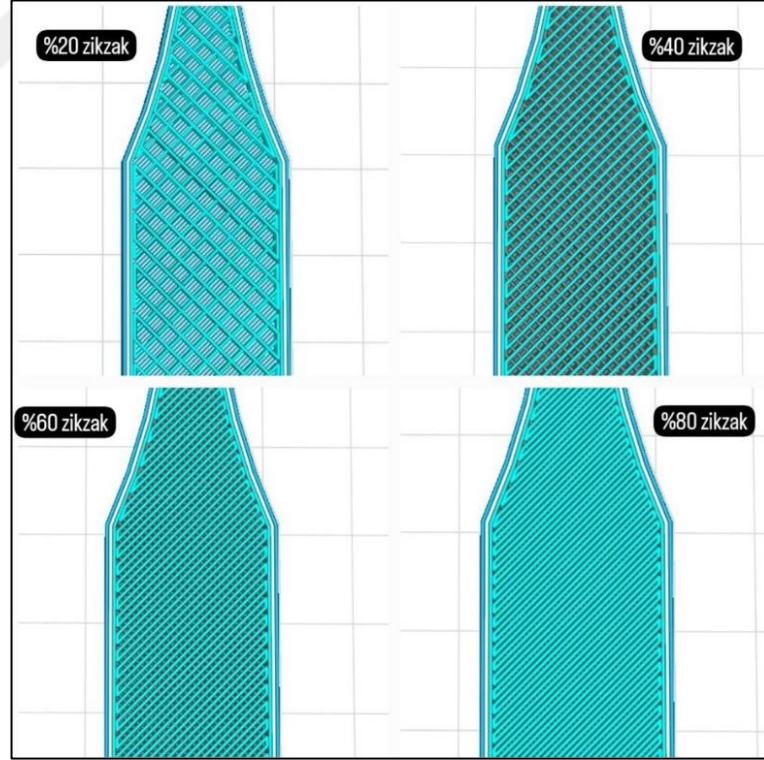
Desen tiplerinin dolgu oranlarına göre gösterimleri Şekil 3.7-Şekil 3.10’da verilmiştir. Şekil 3.7 üçgen desenli, Şekil 3.8 ızgara desenli, Şekil 3.9 zik zak desenli ve Şekil 3.10 gyroid desenli numunenin kullanılan dolgu oranlarındaki içyapı görüntüleridir.



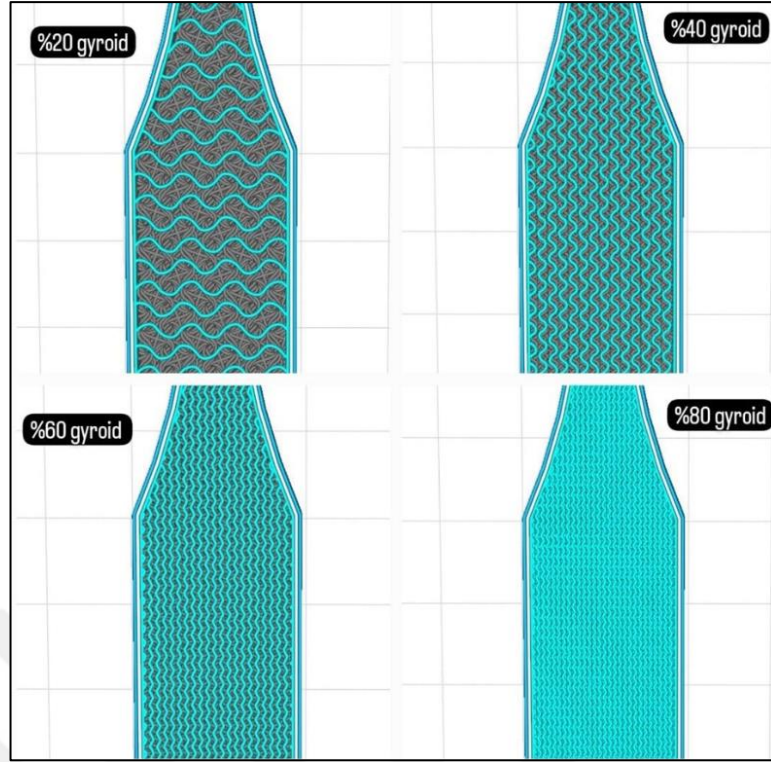
Şekil 3.7. Üçgen desenli numunenin kullanılan dolgu oranlarındaki içyapı görüntüsü



Şekil 3.8. Izgara desenli numunenin kullanılan dolgu oranlarındaki içyapı görüntüsü



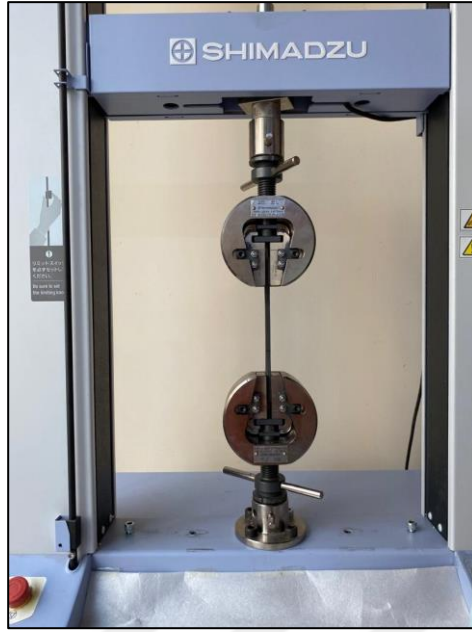
Şekil 3.9. Zikzak desenli numunenin kullanılan dolgu oranlarındaki içyapı görüntüsü



Şekil 3.10. Gyroid desenli numunenin kullanılan dolgu oranlarındaki içyapı görüntüsü

3.2.2. Çekme deneyi

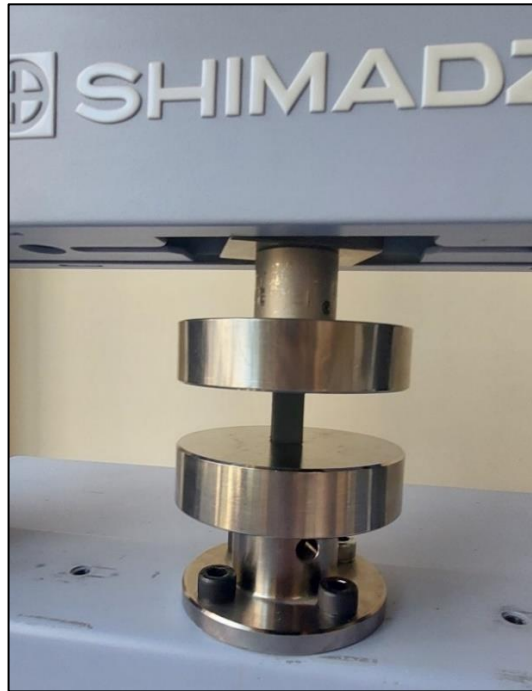
Çekme deneyi numunesinin cihaza bağlanması Şekil 3.11’de görülmektedir. Numunenin geniş kulak kısımlarından cihazın çenelerine oturtularak çeneler sıkıştırılmış ve numune sabitlenmiştir. Çekme deneyleri 1 mm/dk çekme hızıyla, numunelerde kopma gerçekleşene kadar yük uygulanarak yapılmıştır.



Şekil 3.11. Çekme deneyi cihazına numunenin bağlanması

3.2.3. Basma deneyi

Basma deneyi numunesinin cihaza bağlanması Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Numune plakanın merkezine sabitlenerek üst plaka ile kuvvet uygulanmıştır. Basma hızı 1 mm/dk’dır. Basma deneyleri basma yükü tüm numunelerde 10 kN’ye ulaşıncaya kadar yapılmıştır.



Şekil 3.12. Basma deneyi cihazına numunenin bağlanması

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada karbon fiber filamentten üç boyutlu yazıcı ile farklı dolgu oranı ve desen tiplerinde üretilen numunelerin çekme ve basma deneyleri yapılarak elde edilen sayısal veriler ile gerilme-gerinim grafikleri çizilmiş ve paylaşılmıştır. Dolgu oranı ve desen tiplerine göre paylaşılan, gerilme-gerinim grafikleri ile elde edilen mekanik özellikler yorumlanmıştır.

4.1. Çekme Deneyi Bulguları

Çekme numunelerinin 3B yazdırma işlemlerinde tasarım boyutları ile imalat boyutları arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Bu farklılıkların belirlenmesi için imalat sonrası numune ölçümleri yapılarak tasarım boyutları ile % farklar belirlenmiş ve çizelge olarak sunulmuştur (Çizelge 4.1). Kalınlık değerlerindeki değişimler %3.33-5.50 aralığında, genişlik değişimleri de %9.5-15.83 aralığında elde edilmiştir.

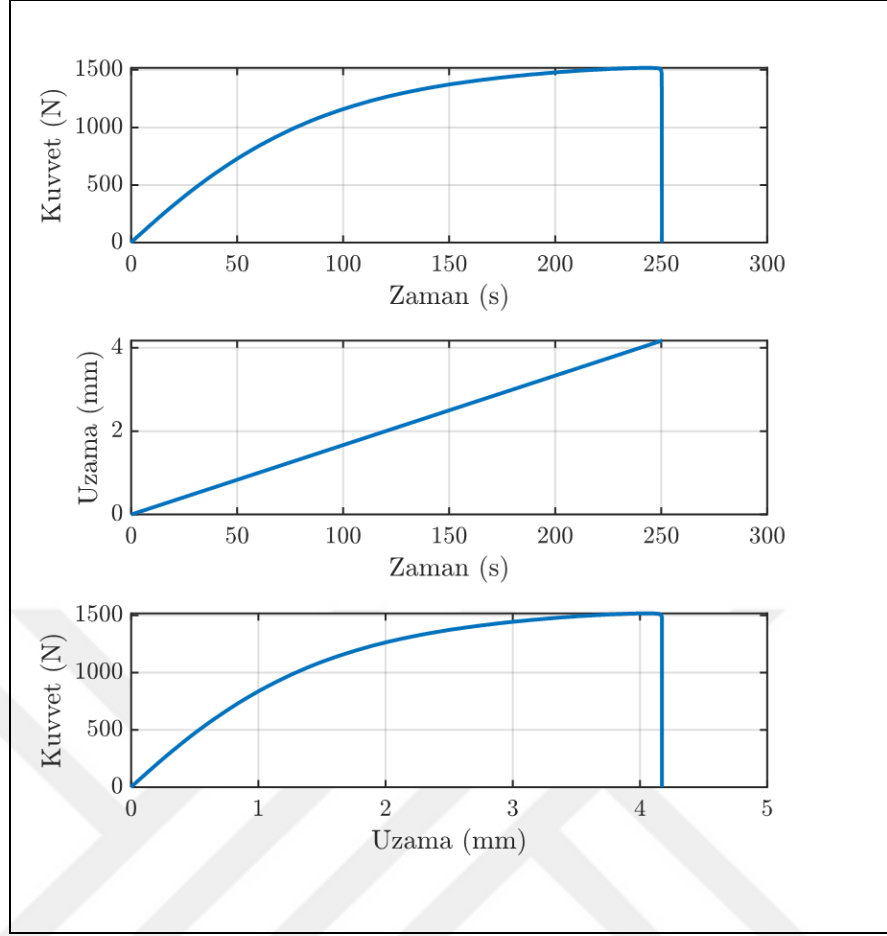
Çizelge 4.1. Çekme deneyi numune boyut değişimleri

Numune Adı	Tasarım Boyutları		İmalat Boyutları		Farklar	
	Kalınlık	Genişlik	Kalınlık	Genişlik	Kalınlık	Genişlik
Birim	mm	mm	mm	mm		
% 100	6	6	6.3	6.6	5	10
% 100	6	6	6.2	6.7	3.33	11.67
% 80 üçgen	6	6	6.28	6.72	4.67	12.00
% 80 üçgen	6	6	6.33	6.75	5.50	12.50
% 80 ızgara	6	6	6.3	6.8	5.00	13.33
% 80 ızgara	6	6	6.24	6.8	4.00	13.33
% 80 zik zak	6	6	6.28	6.75	4.67	12.50
% 80 zik zak	6	6	6.25	6.95	4.17	15.83
% 80 gyroid	6	6	6.3	6.6	5.00	10.00
% 80 gyroid	6	6	6.28	6.57	4.67	9.50
% 60 üçgen	6	6	6.3	6.65	5.00	10.83
% 60 üçgen	6	6	6.32	6.7	5.33	11.67
% 60 ızgara	6	6	6.3	6.7	5.00	11.67
% 60 ızgara	6	6	6.32	6.67	5.33	11.17
% 60 zik zak	6	6	6.27	6.62	4.50	10.33
% 60 zik zak	6	6	6.28	6.63	4.67	10.50
% 60 gyroid	6	6	6.24	6.6	4.00	10.00
% 60 gyroid	6	6	6.26	6.64	4.33	10.67
% 40 üçgen	6	6	6.2	6.64	3.33	10.67
% 40 üçgen	6	6	6.27	6.66	4.50	11.00
% 40 ızgara	6	6	6.3	6.64	5.00	10.67
% 40 ızgara	6	6	6.27	6.68	4.50	11.33
% 40 zik zak	6	6	6.24	6.61	4.00	10.17
% 40 zik zak	6	6	6.25	6.64	4.17	10.67
% 40 gyroid	6	6	6.27	6.68	4.50	11.33
% 40 gyroid	6	6	6.27	6.7	4.50	11.67
% 20 üçgen	6	6	6.23	6.62	3.83	10.33
% 20 üçgen	6	6	6.18	6.58	3.00	9.67
% 20 ızgara	6	6	6.24	6.67	4.00	11.17
% 20 ızgara	6	6	6.27	6.63	4.50	10.50
% 20 zik zak	6	6	6.25	6.71	4.17	11.83
% 20 zik zak	6	6	6.23	6.72	3.83	12.00
% 20 gyroid	6	6	6.2	6.64	3.33	10.67
% 20 gyroid	6	6	6.28	6.63	4.67	10.50

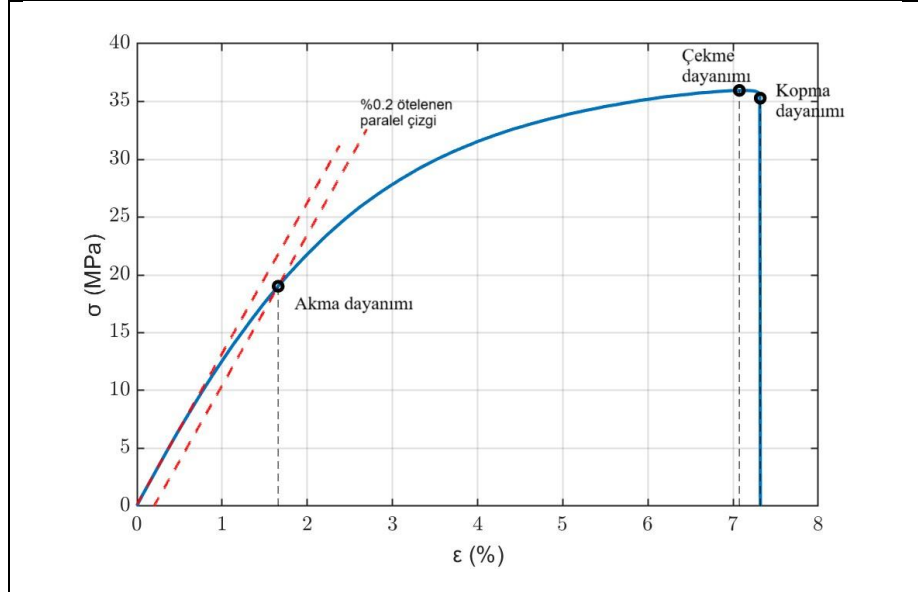
Çekme deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan bir tahribatlı muayene yöntemidir. Deney sonucunda, akma, çekme ve kopma mukavemeti; akma, çekme ve kopma uzama değerleri, elastisite modülü gibi malzemelerin mekanik özellikleri olarak bilinen değerler elde edilmektedir (Aydemir, 2015).

Bu çalışmada yapılan çekme değerleri neticesinde numunelerin akma, çekme ve kopma mukavemeti değerleri, akma, çekme ve kopma uzama değerleri, elastisite modülleri, tokluk değerleri ve rezilyans modülleri ölçümleri yapılmıştır.

%80 dolgu oranlı üçgen desenli çekme deneyi numunesine ait, Matlab programında oluşturulan, gerilme-gerinim, kuvvet-zaman, uzama-zaman ve kuvvet-uzama grafikleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Sözü edilen grafiklerden yararlanarak yine Matlab programında gerilme-gerinim grafiği elde edilmiştir (Şekil 4.2). Farklı dolgu oranına ve desen tipine sahip tüm numuneler için, benzer grafikler oluşturulmuştur. Oluşturulan grafiklerden yararlanarak deney numunelerinin tamamı için elde edilen elastisite modülü, rezilyans modülü, tokluk, akma mukavemeti, akmadaki uzama, çekme mukavemeti, çekmedeki uzama, kopma mukavemeti ve kopmadaki uzama değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2’de akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma dayanımı noktaları gösterilmiştir.



Şekil 4.1. %80 dolgu oranlı üçgen desenli Matlab ile oluşturulan kuvvet-zaman, uzama-zaman ve kuvvet-uzama grafikleri

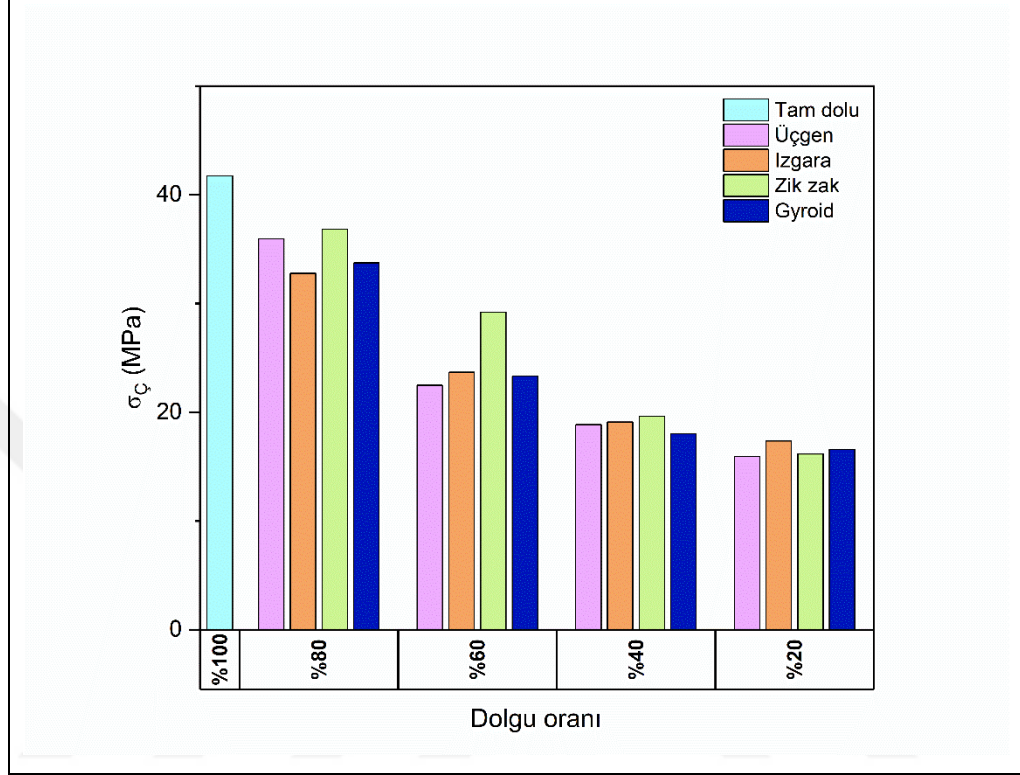


Şekil 4.2. %80 dolgu oranlı üçgen desenli Matlab ile oluşturulan gerilme-gerinim grafiği

Çizelge 4.2. Çekme deneyi sonucu elde edilen değerler

deney numune no	dolgu oranı	desen tipi	elastisite modülü	rezilyans modülü	tokluk	akna mukavemeti	aknadaki uzama	çekme mukavemeti	çekmedeki uzama	kopma mukavemeti	kopmadaki uzama
			GPa	J/m ³	J/m ³	MPa	%	MPa	%	MPa	%
1	%100	YOK	1.36	1.54E+05	5.94E+06	20.43	1.704	41.7	16.027	38.680	17.040
2	%80	üçgen	1.33	1.54E+05	1.97E+06	20.25	1.713	35.9	6.934	34.750	7.3250
3	%80	ızgara	0.95	1.12E+05	4.68E+06	14.53	1.744	32.7	16.334	31.245	17.550
4	%80	zik zak	1.05	1.30E+05	7.43E+06	16.49	1.774	36.8	21.792	35.415	23.755
5	%80	gyroid	0.92	5.89E+04	6.73E+06	10.30	1.333	33.7	23.369	32.750	24.555
6	%60	üçgen	0.57	7.40E+04	2.58E+06	9.12	1.823	22.4	14.226	21.175	15.135
7	%60	ızgara	0.73	2.21E+04	3.86E+06	5.57	0.979	23.6	19.301	22.665	20.645
8	%60	zik zak	0.81	2.12E+04	6.72E+06	5.85	0.924	29.2	27.287	28.280	28.565
9	%60	gyroid	0.71	2.28E+04	3.78E+06	5.63	1.004	23.3	19.742	22.650	20.535
10	%40	üçgen	0.55	2.12E+04	2.36E+06	4.75	1.073	18.8	16.118	17.880	16.605
11	%40	ızgara	0.50	2.30E+04	3.38E+06	4.77	1.165	19.0	21.025	17.875	22.585
12	%40	zik zak	0.63	1.20E+04	3.19E+06	3.88	0.820	19.6	19.395	18.860	20.680
13	%40	gyroid	0.47	1.38E+04	3.70E+06	3.48	0.966	18.0	24.406	17.145	26.015
14	%20	üçgen	0.38	1.57E+04	2.65E+06	3.43	1.105	15.9	21.276	14.705	21.980
15	%20	ızgara	0.38	1.55E+04	3.95E+06	3.39	1.108	17.3	27.862	15.465	29.125
16	%20	zik zak	0.37	1.40E+04	3.18E+06	3.21	1.072	16.1	24.911	14.160	25.710
17	%20	gyroid	0.37	1.66E+04	3.87E+06	3.49	1.151	16.5	28.163	14.770	29.475

Çizelge 4.2 Çekme deneyi sonucu elde edilen değerlerin görsel olarak daha net görülebilmesi ve açıklanması için grafikler oluşturulmuştur (Şekil 4.3-Şekil 4.10). Şekil 4.3'te tüm numuneler için çekme gerilmesi grafiği verilmiştir.



Şekil 4.3. Numunelerin çekme gerilmesi grafiği

Şekil 4.3'teki grafikte görüldüğü üzere maksimum çekme gerilmesi (σ_c) %100 dolgu oranlı numunede görülmektedir. %80, %60 ve %40 dolgu oranlı numunelerdeki en yüksek çekme gerilmesi değeri zik zak desenli numunede elde edilmiştir (Sırasıyla, 36.8 MPa, 29.2 Mpa, 19.6 MPa). %20 dolgu oranlı numunede ise en yüksek çekme gerilmesi ızgara desenli numunede görülmüştür (17.3 MPa). Desen grupları arasında en düşük çekme gerilmesi değeri üçgen desenli numunede elde edilmiştir. En düşük çekme gerilmeleri ise %80 dolgu oranlı numunede ızgara deseninde (32.7 MPa), %60 dolgu oranlı numunede üçgen deseninde (22.4 MPa), %40 dolgu oranlı numunede gyroid deseninde (18 MPa), %20 dolgu oranlı numunede ise üçgen deseninde (15.9 MPa) görülmüştür. Genel olarak % doluluk oranları azaldıkça çekme gerilmesi değerlerinde de azalmalar meydana gelmiştir. Desen tipleri % doluluk oranlarına göre kendi aralarında değerlendirildiğinde çekme açısından en yüksek gerilmeye dayanabilen desen tipi zik zak desen olarak elde edilmiştir.

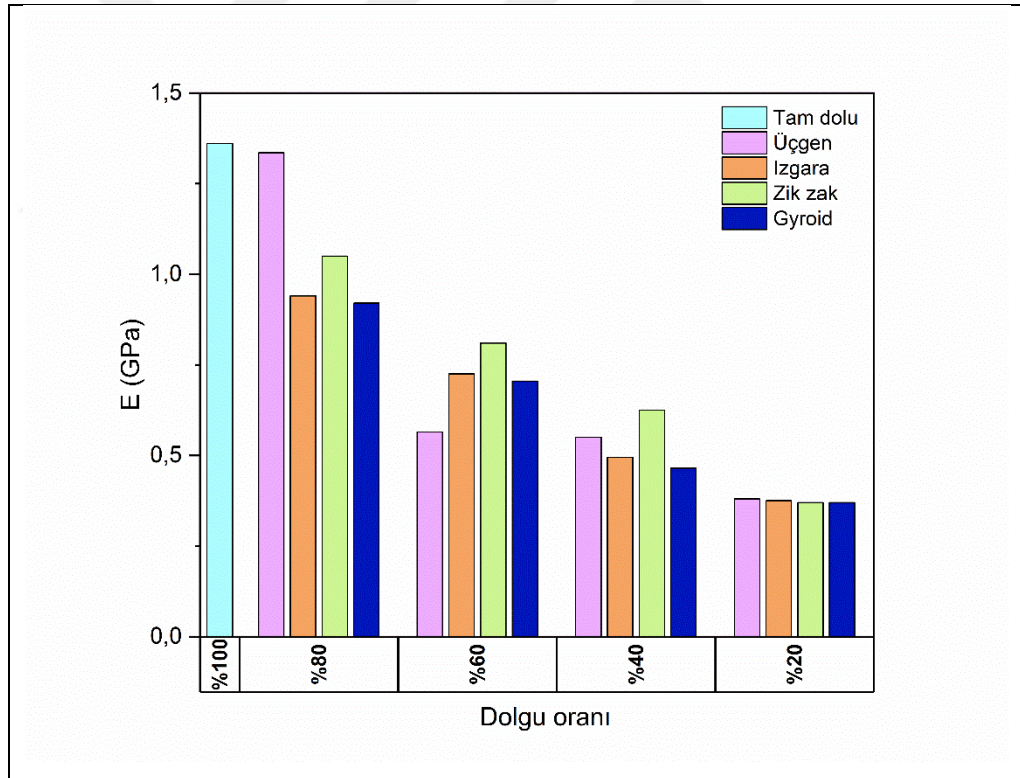
Ambati vd. (2022), PLA malzeme ile Eİ alanında, üç farklı dolgu yoğunluğunda (%60, %75 ve %90), üç farklı desen tipinde (üçgen, ızgara ve gyroid) çalışmalar yapmışlardır. Sonuçlardan, dolgu yoğunluğunun 3D yazdırılmış PLA numunelerinin çekme dayanımı değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Dolgu deseninden bağımsız olarak, dolgu yoğunluğundaki artış 3D yazdırılmış PLA numunelerinin çekme dayanımı değerlerini önemli ölçüde artırmıştır. Örneğin, dolgu ızgara deseni ve %90 dolgu yoğunluğu ile üretilen numuneler, aynı dolgu deseni ancak %60 dolgu yoğunluğu ile üretilen numunelere göre daha fazla çekme dayanımı göstermiştir. Benzer şekilde, üçgen dolgu deseni ve gyroid dolgu deseni olan numuneler, dolgu yoğunluğundaki artışla birlikte yüksek çekme dayanımı göstermiştir, yani %90 dolgu yoğunluğu ve ızgara dolgu deseni olan numuneler 32.6 MPa çekme dayanımı göstermiştir. Aynı ızgara dolgu deseni için %60 dolgu yoğunluğuna sahip numunede ise çekme dayanımı 25.2 MPa'dır. Dolgu desenlerine göre kıyaslandığı zaman, ızgara dolgu deseni ve %60 dolgu yoğunluğu ile üretilen numuneler, aynı dolgu yoğunluğu yüzdesi için üçgen ve gyroid dolgu desenine sahip numunelere kıyasla daha iyi çekme dayanımına sahip olmuştur. Sonuçlarda görüldüğü üzere, ızgara desenine sahip ve %60 dolgu yoğunluğuna sahip numune 25.2 MPa çekme dayanımı gösterirken, aynı dolgu yoğunluğuna sahip üçgen ve gyroid dolgu desenine sahip (%60) numuneler sırasıyla 23.4 MPa ve 24.5 MPa çekme dayanımı göstermiştir. Bu davranış, numunenin çekme yüklerine karşı direncini artıran ızgara dolgu deseninin doğrusal yapısından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

PLA ile yapılan bir çalışmada ızgara desenli ve dolgu oranları %25, %50 ve %75 olan numunelere uygulanan çekme deneyi sonuçlarına göre dolgu oranı arttıkça çekme özelliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. %25, %50 ve %75 dolgu oranlı numunelerden elde edilen çekme dayanımları sırasıyla; 29.7 MPa, 31.5 MPa, 35.4 MPa'dır (Rismalia vd., 2019).

PLA ile yapılan bir çekme deneyi testinde %70, %80 ve %90 dolgu yoğunluklu gyroid desenli çekme deneyi numuneleri hazırlanarak deneyler yapılmıştır. Üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilen baskıda (195-205-215 °C) %90 dolgu yoğunluklu ve 195 °C baskı sıcaklığına sahip numunenin maksimum çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir (Ahmed vd., 2023).

Literatürdeki bu çalışmada zik zak deseni hariç diğer desenler kullanılmıştır. Zik zak deseni ile yapılan çalışmalar gözardı edildiğinde benzer sonuçlar karbon fiber malzeme kullanılarak yapılan bu çalışmada da görülmektedir. %60 ve %40 dolgu oranlı numunelerde en yüksek çekme dayanımı zik zak deseninden sonra ızgara deseninde elde edilmiştir. %80 dolgu oranı ile yapılan çalışmalarda ise en yüksek çekme gerilmesi zik zak desenden sonra üçgen desende görülmüştür. %20 dolgu oranı ile yapılmış çalışmalarda ise en yüksek çekme gerilmesi yukarıda da belirtildiği üzere ızgara deseninde elde edilmiştir. Sonuç olarak %80, %60 ve %40 dolgu oranlı numunelerde en yüksek çekme gerilme değeri zik zak desenli numune mevcuttur. Zik zak desenin doğrusal yapısından dolayı numunenin çekme yüklerine karşı direncini artırdığı düşünülmektedir.

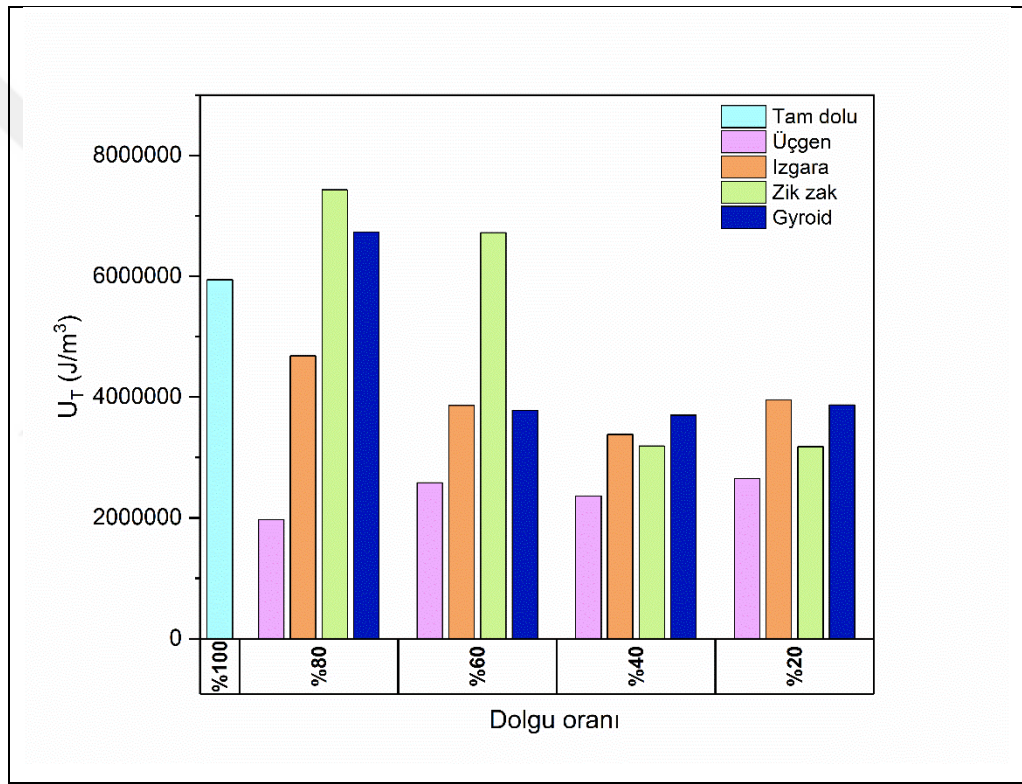
Şekil 4.4'te tüm numuneler için elastisite modülü (E) grafiği verilmiştir.



Şekil 4.4. Numunelerin çekme deneyi elastisite modülü grafiği

Şekil 4.4'te % dolgu oranı değerleri azaldıkça elastisite modüllerinde de düşüş gözlenmiştir. Şekilde elde edilen verilere göre en yüksek elastisite modülü değeri %100 dolgu oranlı numunede görülmektedir (1.36 GPa). Dayanıklılık bakımından %100 dolgu oranlı numune ile %80 dolgu oranlı üçgen desenli numune yakın

değerlerde ölçülmüştür (%80, 1.33 GPa). Buna göre tam dolu baskı yerine %80 dolgulu üçgen desenli baskı alınarak daha az malzeme kullanımı sağlanabilir. En düşük elastisite modülüne sahip grup ise %20 dolgu oranlı numunelerdir. %20 dolgu oranlı numunelerde elastisite modülü dört desen tipinde de birbirlerine yakın değerlerde elde edilmiştir (sırasıyla 0.38 GPa, 0.38 GPa, 0.37 GPa, 0.37 GPa). Elastisite modülü gerilmenin gerinmeye oranı olduğu için Şekil 4.4'teki grafik ile Şekil 4.3'teki grafik arasında dolgu desenleri ve % dolgu oranlarına göre farklılıklar görülmüştür. Bu farklar gerinim miktarları ile ilişkilidir. Şekil 4.5'te % dolgu oranları ve dolgu desenlerine göre tokluk değerleri değişimlerini gösteren grafik görülmektedir.

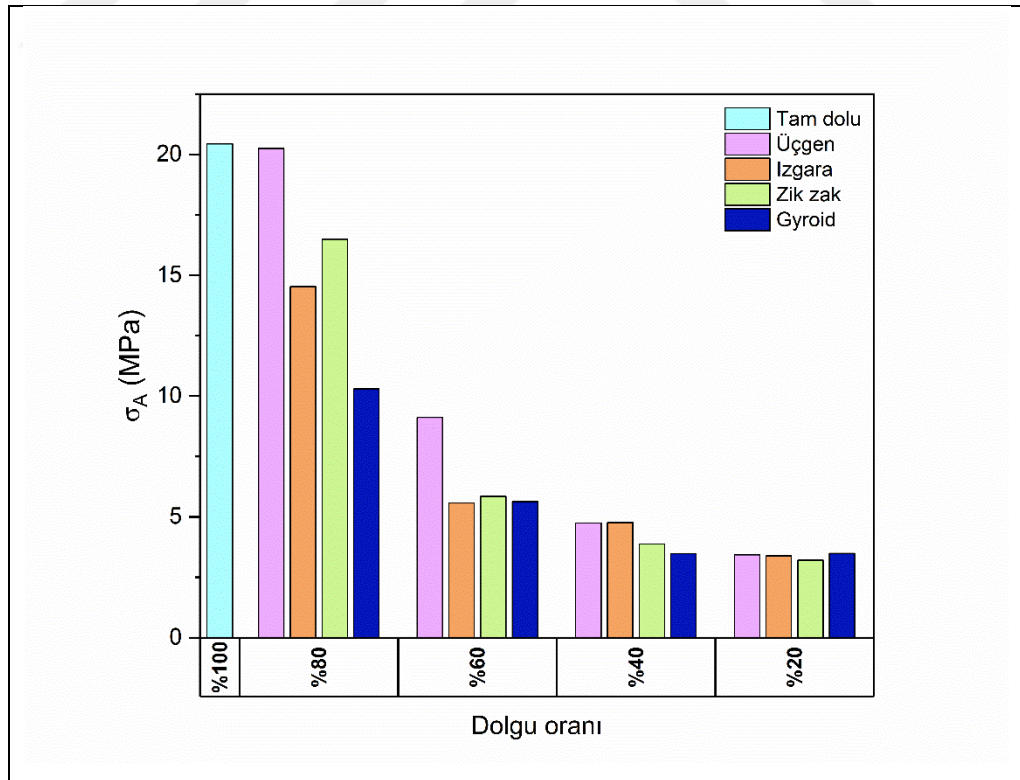


Şekil 4.5. Numunelerin çekme deneyi tokluk grafiği

Şekil 4.5'te verilen tokluk değerleri grafiğinde %80 dolgu oranlı zik zak desenli numunenin en yüksek tokluğa sahip olduğu görülmektedir (7.43×10^6 J/m³). Çekme ve elastisite modülleri grafiklerine en yüksek tokluk değerinin %100 dolgu oranlı numunede olması beklenirken, %80 ve %60 zikzak desenli numunelerdeki tokluk değeri %100 dolgu oranlı numuneye göre yüksek çıkmıştır. Bu sonuca göre tokluk gerektiren yerlerde %100 dolgu oranlı numunelerin kullanımının uygun olmadığı anlaşılmaktadır. En düşük tokluk değeri ise yine %80 dolgu oranlı üçgen desenli numunede (1.97×10^6 J/m³) elde edilmiştir. %80 dolgu oranlı zik zak desenli

numunenin tokluk değeri diğer dolgu oranlarına göre en yüksek değere sahip olmasına rağmen çekme gerilme değeri düşük çıkmıştır. %80 dolgu oranlı zik zak desenli numunenin tokluğunun yüksek olmasından dolayı diğer dolgu oranları ve desen tiplerine göre dinamik yükler altında çalışılacak yerlerde kullanılması uygundur. Dolgu oranları kendi içerisinde değerlendirildiğinde en düşük tokluk değerleri üçgen desenli numunelerde görülmüştür (%80 $1.97E+06$ J/m³, %60 $2.58E+06$ J/m³, %40 $2.36E+06$ J/m³, %20 $2.65E+06$ J/m³). %60, %40 ve %20 gyroid desenli numunelerde tokluk değerlerinin birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Buna göre bu değerlerdeki tokluk gerektiren yerlerde, üretimde malzeme tasarrufu için, %20 dolgu oranı tercih edilebilir. Genel olarak üçgen desenli numunelerin tokluk bakımından diğer desenlere göre daha az enerji absorbe ettiği söylenebilir. Bu nedenle her ne kadar üçgen desenli numunelerin çekme gerilmeleri yüksek çıkmış olsa da tokluk değerlerinin düşük olması, bu numunelerin statik yükler altında çalışabileceği sonucuna varılmıştır.

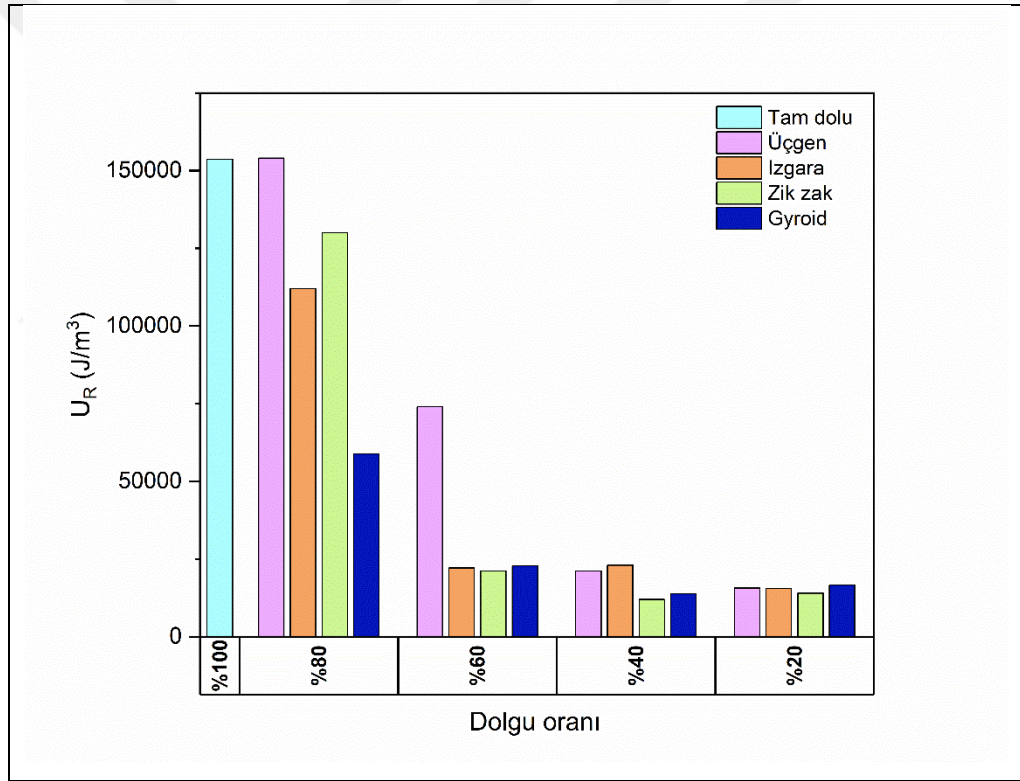
Şekil 4.6’da tüm numuneler için akma gerilmesi grafiği verilmiştir.



Şekil 4.6. Numunelerin çekme deneyi akma gerilmesi grafiği

Şekil 4.6’da verilen akma gerilmesi (σ_A) grafiğinde %100 dolgu oranlı numune ile %80 dolgu oranlı üçgen desenli numunelerin en yüksek akma gerilmesi değerine sahip oldukları görülmüştür (20.43 MPa, 20.245 MPa). %100 ve %80 dolgu oranlı üçgen desenli bu numunelerin birbirlerine çok yakın değerlerde olmaları sebebiyle daha az malzeme kullanımı açısından üretim aşamasında %80 dolgu oranı ve üçgen deseni tercih edilebilir. %20 dolgu oranlı numunelerde ise en düşük akma gerilmesi değerleri elde edilmiş ve bu değerlerin farklı desen tiplerinde bile birbirlerine yakın değerlerde olduğu gözlenmiştir (üçgen 3.43 MPa, ızgara 3.385 MPa, zik zak 3.205 MPa, gyroid 3.49 MPa).

Rezilyans modülü sonuçlarını veren grafik Şekil 4.7’de paylaşılmıştır.

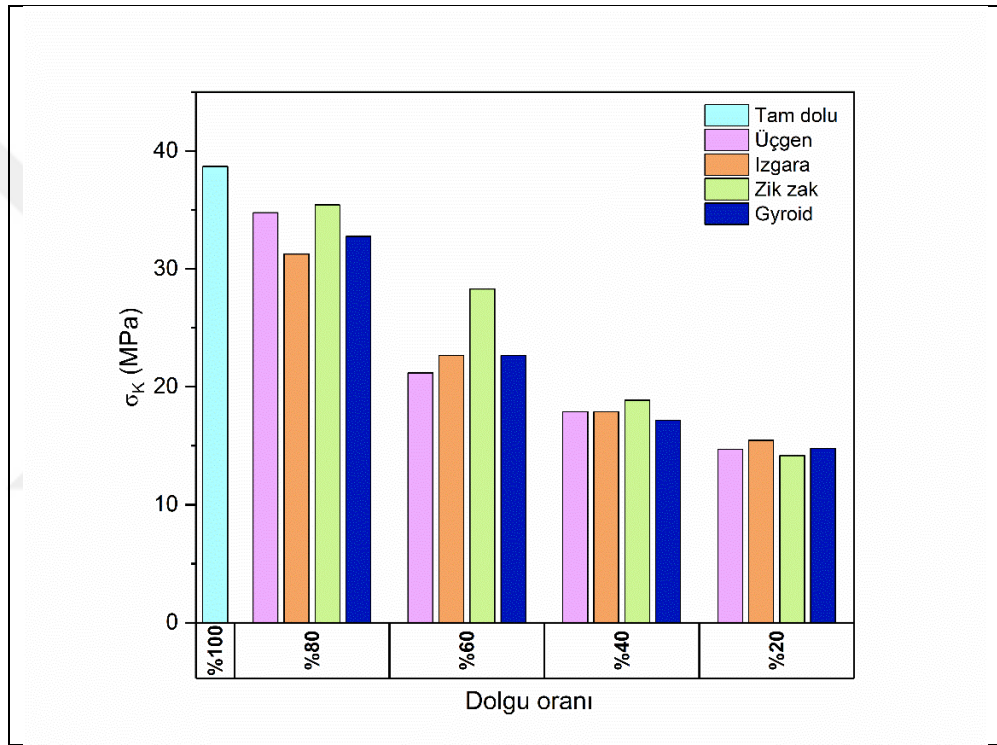


Şekil 4.7. Numunelerin çekme deneyi rezilyans modülü grafiği

Şekil 4.7’deki grafikte verilen rezilyans modülü (U_R) değerlerine göre en yüksek değere sahip numuneler tam dolu ($1.54E+05 \text{ J/m}^3$) ve %80 dolgu oranlı üçgen desenli ($1.54E+05 \text{ J/m}^3$) numuneler olup, rezilyans modülü en düşük numune %40 dolgu oranlı zik zak desenli ($1.20E+04 \text{ J/m}^3$) numunedir. Rezilyans modülü değerlerine bakıldığında %100 ve %80 dolgu oranlı numuneler ile %60, %40 ve %20 dolgu oranlı numuneler arasında bariz farklar görülmüştür. %40 ve %20 dolgu oranlı numuneler

%60 dolgu oranlı numunelere göre enerji absorbe edebilme yeteneği bakımından düşük değerlere sahip oldukları görülmüştür (%40 üçgen $2.12E+04 \text{ J/m}^3$, %40 ızgara $2.30E+04 \text{ J/m}^3$, %40 zik zak $1.20E+04 \text{ J/m}^3$, gyroid $1.66E+04 \text{ J/m}^3$). Her ne kadar çekme gerilmesi bakımından zikzak desenli numuneler tüm dolgu oranlarında en iyi desen olarak görülse de enerji absorbe edebilme özelliğinin yüksek olması beklenen yerlerde bu desen üçgen desen olarak görülmektedir.

Şekil 4.8’de tüm numuneler için kopma gerilmesi grafiği verilmiştir.



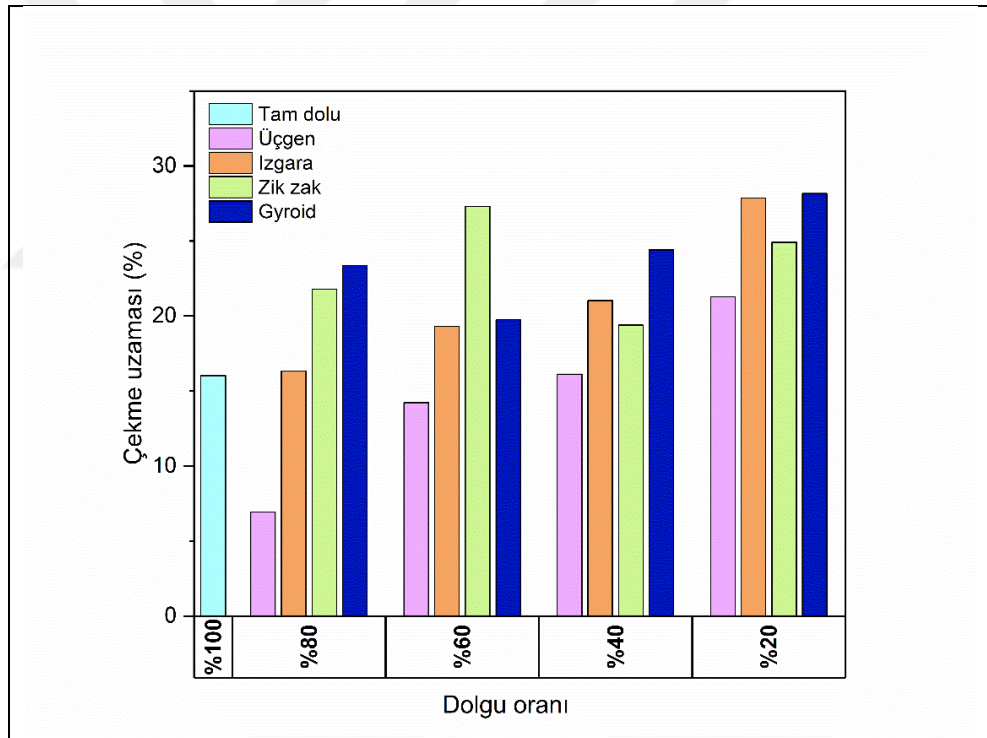
Şekil 4.8. Numunelerin çekme deneyi kopma gerilmesi grafiği

Şekil 4.8’deki kopma gerilmesi (σ_K) grafiği ile Şekil 4.3’deki çekme gerilmesi grafiği değerler hariç görsel olarak benzerlik göstermektedir. % dolgu oranı azaldıkça kopma gerilmelerinde de düşüş meydana gelmiştir. Şekil 4.8’de verilen kopma gerilmesi grafiğinde kopmaya karşı en yüksek dayanıma sahip numune %100 dolgu oranlı numune olup ona en yakın değerlerdeki numune ise %80 dolgu oranlı zik zak desenli numunedir. Ölçülen değerler sırasıyla; 38.680 MPa ve 35.415 MPa’dır. %80, %60 ve %40 dolgu oranlı numunelerdeki en yüksek kopma gerilmesi değeri zik zak desenli numunede elde edilmiştir. En düşük değerlere sahip grup burada da %20 dolgu oranlı numuneler olmuştur (%20 üçgen 14.705 MPa, %20 ızgara 15.465 MPa, %20 zik zak 14.16 MPa, %20 gyroid 14.77 MPa). Kopma gerilmesinin malzemenin sünekliği

hakkında bilgi veren bir mekanik özellik olması sebebiyle %100 ve %80 dolgu oranlı numunelerin diğerlerine göre daha sünek olduğu belirlenmiştir.

Literatürde yapılan bir çalışmada, PLA, ABS ve PLA+CF malzemelerden ve %20, %50, %80 dolgu oranlı üçgen desenli üretilen çekme deney numunelerine yapılan testler sonucunda dolgu miktarındaki artışa bağlı olarak çekme dayanımı ve süneklik yüzdesi açısından en iyi sonuçlar PLA+CF kompozitlerde, ardından PLA ve ABS numunelerinde bulunmuştur (Tandon vd., 2021). Benzer durum karbon fiber malzeme kullanılarak yapılan bu çalışmada da gözlenmiştir. Dolgu oranı azaldıkça malzemenin sünekliğinde artış gözlenmiştir.

Şekil 4.9’da tüm numuneler için çekmedeki uzama grafiği verilmiştir.



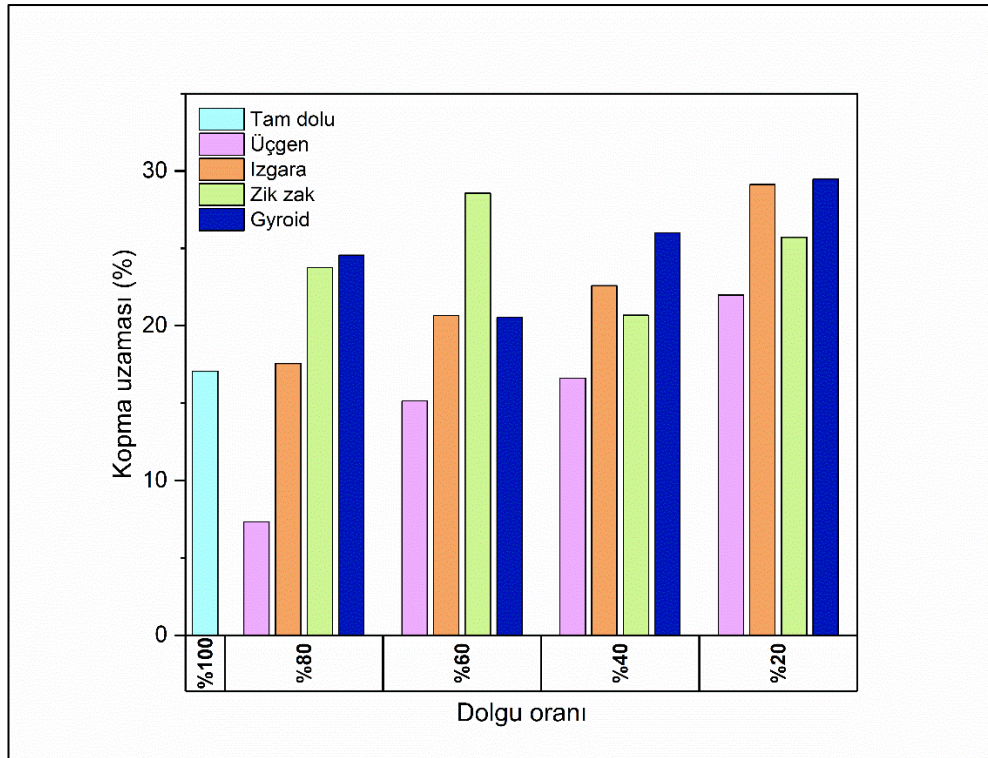
Şekil 4.9. Numunelerin çekme uzaması grafiği

En yüksek çekme uzaması %20 dolgu oranlı gyroid desenli numunede (%28.163), en düşük çekme uzaması %80 dolgu oranlı üçgen desenli numunede (%6.934) görülmüştür. % dolgu oranları desen tiplerine göre kendi içlerinde değerlendirildiğinde %80 dolgu oranlı numunelerde en yüksek çekme uzaması gyroid desenli numunede elde edilmiştir. Dolgu oranı azaldıkça genel olarak çekme uzamasında da artış gözlemlenmiştir.

Karbon fiber takviyeli polyamid-6 (PA6) ile yapılan çalışmada; üçgen, altıgen ve dörtgen desenleri kullanılarak, %18, %28, %40, %55 ve %62 dolgu oranlı numuneler üretilmiş ve mekanik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek dolgu yoğunluğunda kuvvetlerin de arttığı gözlenen deneylerde, %18 dolgu oranlı dikdörtgen desende maksimum yük 779.77 N iken %62 dolgu oranlı dikdörtgen desenli numunede maksimum yük 1278.5 N olarak ölçülmüştür. %28 dolgu oranlı üçgen desenli numunede uzama değeri 22.64 mm iken %55 dolgu oranlı numunede uzama değeri 12.78 mm ölçülmüştür. Üçgen ve altıgen desenli %18-40 dolgu oranlı numunelerin diğer numunelere göre daha yüksek yüklere dayandığı gözlemlenmiştir (Rashid vd., 2022).

Literatüre bakıldığı zaman dolgu oranı arttıkça çekme gerilmesinin arttığı, buna bağlı olarak dolgu oranı azaldıkça çekme uzamasında artış olduğu görülmektedir. Çalışmamızda da buna benzer durum bulunmaktadır. Dolgu oranı azaldıkça parçanın esnekliğinde artış gözlenmiştir.

Şekil 4.10'da tüm numuneler için kopmadaki uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.10. Numunelerin çekme deneyi kopma uzaması grafiği

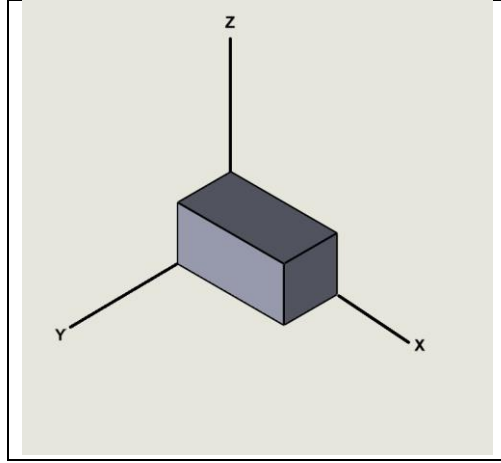
En yüksek kopma uzaması %20 dolgu oranlı gyroid desenli numunede (%29.475), en düşük kopma uzaması %80 dolgu oranlı üçgen desenli numunede (%7.325) ölçülmüştür. % dolgu oranları desen tiplerine göre kendi içlerinde değerlendirildiğinde %80, %40 ve %20 dolgu oranlı numunelerde en yüksek çekme uzaması gyroid desenli numunede elde edilmiştir. Burada kopma gerilmesi ve kopma uzaması arasındaki ilişkiyi tokluk değerlerine bakarak açıklamak gerekirse, %40 ve %20 dolgu desenli numunelerde en yüksek tokluk değeri yine gyroid deseninde bulunmuştur. %60 dolgu oranlı zik zak desenli numunede en yüksek kopma uzaması değerine ve en yüksek tokluk değerine ulaşılmıştır.

%20 dolgu oranlı ızgara ve gyroid desenli numuneler, %40 dolgu oranlı gyroid desenli numuneler, %60 dolgu oranlı zik zak desenli numuneler ve %80 zikzak ve gyroid desenli numuneler diğer numunelere göre daha sünektir ve grafikte görüldüğü üzere yakın değerlerdedir. Üretimde malzeme tasarrufu için, kopma uzaması göz önünde bulundurulduğunda kopma gerilmesi yaklaşık 15 MPa değerine kadar olan yerlerde %60 dolgu oranlı zik zak desen yerine, %20 dolgu oranlı ızgara veya gyroid desen kullanılabilir.

4.2. Basma Deneyi Bulguları

Basma deneyi çekme deneyinin tersi denilebilir ve malzeme üzerine yük ile baskı uygulayarak deney sonucuna ulaşılır. Bu deney sonucunda malzeme kalıcı olarak şekil değiştirir yani plastik şekil değişimine uğrar. Malzemenin hangi kuvvetler altında kalıcı şekil değişimine uğrayacağı bilgisine, deney sonucunda aldığımız sonuçlarla ulaşabiliriz.

Bu çalışmada 12.7x12.7x25.4 mm boyutlarında imal edilen basma numuneleri, Shimadzu AGS-X cihazında 10 kN kuvvetine ulaşıncaya kadar basma deneyine tabi tutulmuştur. Deney numunelerine uygulanan kuvvet, imal edilen numunenin katman yönlerine dik olarak seçilmiştir (Şekil 4.11). İmalatta katmanlar Z yönünde yapılmış ve basma kuvveti 12.7x12.7 mm kesit alanına dik yönde (X yönünde) uygulanmıştır.



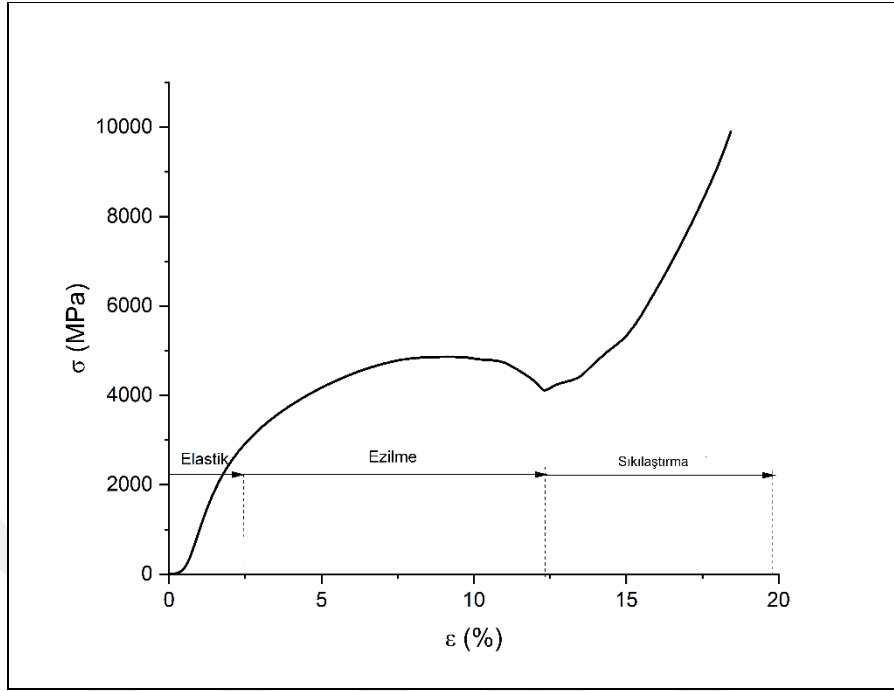
Şekil 4.11. Basma kuvveti ve yazdırma yönü gösterimi

Basma numunelerinin 3B yazdırma işlemlerinde tasarım boyutları ile imalat boyutları arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Bu farklılıkların belirlenmesi için imalat sonrası numune ölçümleri yapılarak tasarım boyutları ile % farklar belirlenmiş ve çizelge olarak sunulmuştur (Çizelge 4.3). Kalınlık değerlerindeki değişimler %0.94-6.69 aralığında, genişlik değerlerindeki değişimler %1.57-6.54, uzunluk değişimleri ise %1.42-4.69 aralığında elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. Basma deneyi numune boyut değişimleri

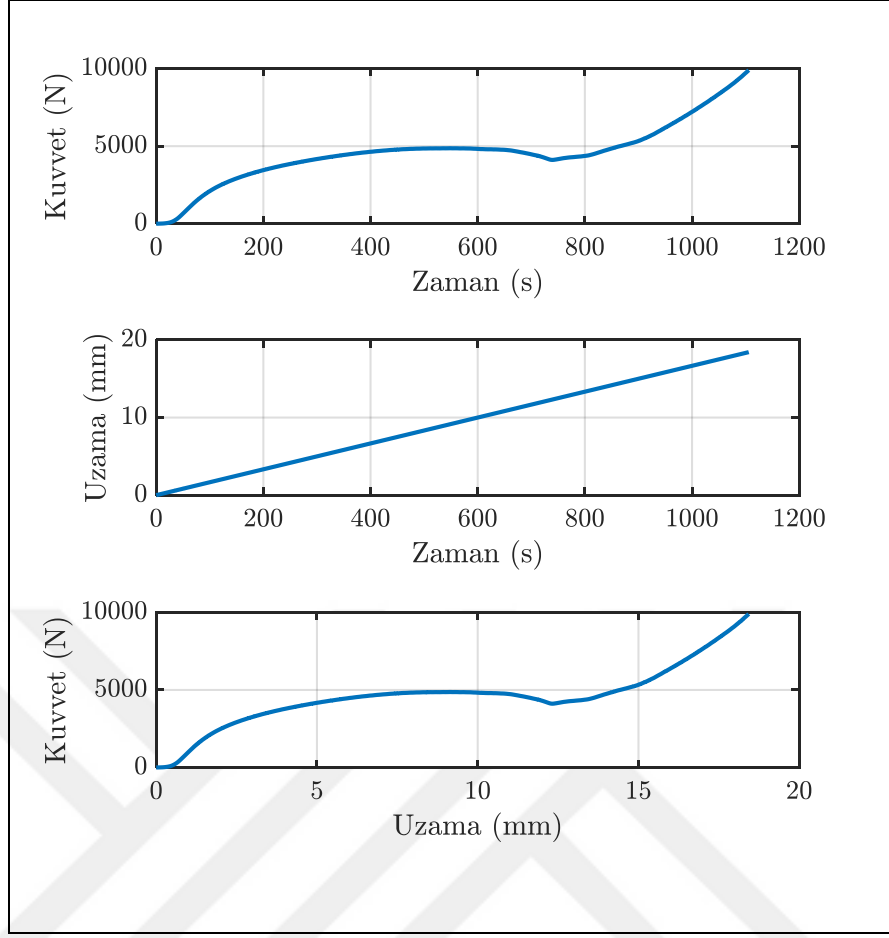
Numune Adı	Tasarım Boyutları			İmalat Boyutları			% Farklar		
	Kalınlık	Genişlik	Uzunluk	Kalınlık	Genişlik	Uzunluk	Kalınlık	Genişlik	Uzunluk
Birim	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
%100	12.7	12.7	25.4	13.54	13.5	26.5	6.61	6.23	4.3
%100	12.7	12.7	25.4	13.55	13	26.48	6.69	2.36	4.25
%80 üçgen	12.7	12.7	25.4	12.96	13.47	26.38	2.05	6.06	3.86
%80 üçgen	12.7	12.7	25.4	12.99	13.53	26.28	2.28	6.54	3.46
%80 ızgara	12.7	12.7	25.4	13.05	13.5	26.25	2.76	6.30	3.35
%80 ızgara	12.7	12.7	25.4	13.09	13.47	26.59	3.07	6.06	4.69
%80 zik zak	12.7	12.7	25.4	13.47	12.93	26.25	6.06	1.81	3.35
%80 zik zak	12.7	12.7	25.4	13.36	12.95	26.18	5.20	1.97	3.07
%80 gyroid	12.7	12.7	25.4	13.15	13.05	26	3.54	2.76	2.36
%80 gyroid	12.7	12.7	25.4	13.52	12.96	26.13	6.46	2.05	2.87
%60 üçgen	12.7	12.7	25.4	13.47	13	26.19	6.06	2.36	3.11
%60 üçgen	12.7	12.7	25.4	13.37	13.19	26.31	5.28	3.86	3.58
%60 ızgara	12.7	12.7	25.4	13.44	12.91	26.05	5.83	1.65	2.56
%60 ızgara	12.7	12.7	25.4	13.32	12.9	26.15	4.88	1.57	2.95
%60 zik zak	12.7	12.7	25.4	13.2	12.97	25.92	3.94	2.13	2.05
%60 zik zak	12.7	12.7	25.4	13.4	13.13	25.91	5.51	3.39	2.01
%60 gyroid	12.7	12.7	25.4	13.18	12.94	26.05	3.78	1.89	2.56
%60 gyroid	12.7	12.7	25.4	13.29	12.98	26	4.65	2.20	2.36
%40 üçgen	12.7	12.7	25.4	13.14	12.85	25.9	3.46	1.18	1.97
%40 üçgen	12.7	12.7	25.4	13.36	12.93	26.08	5.20	1.81	2.68
%40 ızgara	12.7	12.7	25.4	13.22	12.95	25.9	4.09	1.97	1.97
%40 ızgara	12.7	12.7	25.4	12.91	13.45	25.87	1.65	5.91	1.85
%40 zik zak	12.7	12.7	25.4	12.85	13.15	25.93	1.18	3.54	2.09
%40 zik zak	12.7	12.7	25.4	12.88	13.05	25.87	1.42	2.76	1.85
%40 gyroid	12.7	12.7	25.4	13.08	12.96	25.77	2.99	2.05	1.46
%40 gyroid	12.7	12.7	25.4	12.9	13.13	25.78	1.57	3.39	1.50
%20 üçgen	12.7	12.7	25.4	12.93	13.07	26	1.81	2.91	2.36
%20 üçgen	12.7	12.7	25.4	13.11	12.91	25.87	3.23	1.65	1.85
%20 ızgara	12.7	12.7	25.4	13.31	12.9	25.8	4.80	1.57	1.57
%20 ızgara	12.7	12.7	25.4	12.82	13.26	25.97	0.94	4.41	2.24
%20 zik zak	12.7	12.7	25.4	13.09	12.98	25.87	3.07	2.20	1.85
%20 zik zak	12.7	12.7	25.4	13.02	12.95	25.81	2.52	1.97	1.61
%20 gyroid	12.7	12.7	25.4	12.82	13.16	26	0.94	3.62	2.36
%20 gyroid	12.7	12.7	25.4	13.1	12.99	25.76	3.15	2.28	1.42

Basma deneyinde elde edilen tipik bir basma eğrisi ve uygulanan yük ile eğrinin değişimi Şekil 4.12’de örnek olarak gösterilmiştir.

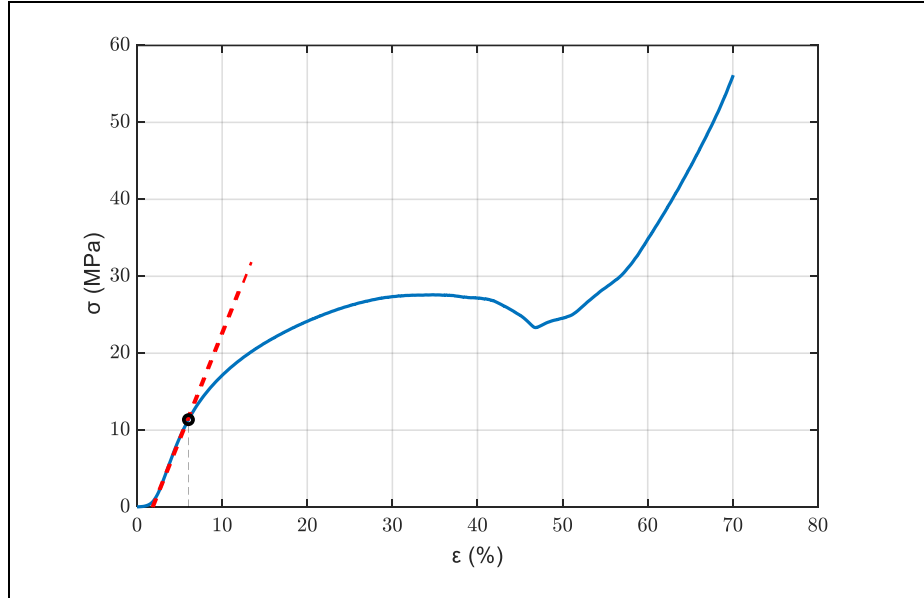


Şekil 4.12. Basma deneyinde elde edilen tipik bir basma mühendislik gerilim-gerinim eğrisi (Rajput, 2017)

%60 dolgu oranlı üçgen desenli basma deneyi numunesine ait, Matlab programında oluşturulan, gerilme-gerinim (σ - ϵ), kuvvet-zaman, uzama-zaman ve kuvvet-uzama grafikleri Şekil 4.13’te verilmiştir. Sözü edilen grafiklerden yararlanarak yine Matlab programında gerilme-gerinim grafiği elde edilmiştir (Şekil 4.14). Farklı dolgu oranına ve desen tipine sahip tüm numuneler için, benzer grafikler oluşturulmuştur. Oluşturulan grafiklerden yararlanarak deney numunelerinin tamamı için elde edilen elastisite modülü, rezilyans modülü, basma akma dayanımı, akmadaki uzama, değerleri Çizelge 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.13. Kuvvet-zaman, uzama-zaman, kuvvet-uzama grafikleri



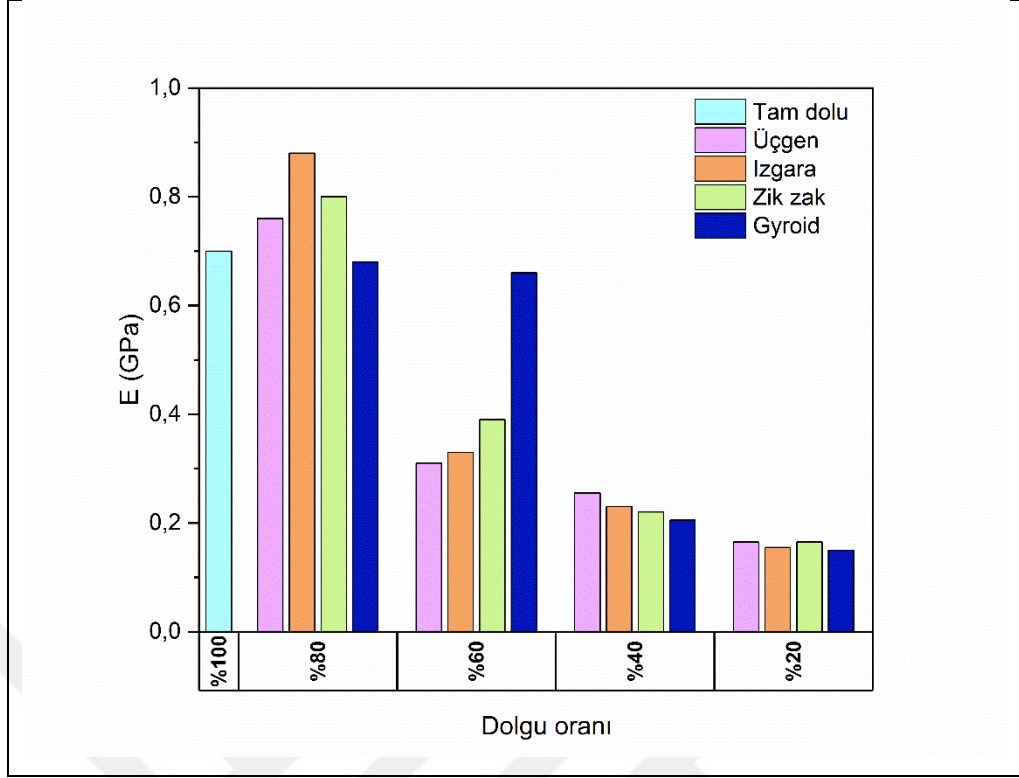
Şekil 4.14. Gerilme-gerinim grafiği

Basma deneyi sonucu elde edilen değerler izelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Basma deneyi sonucu elde edilen değerler

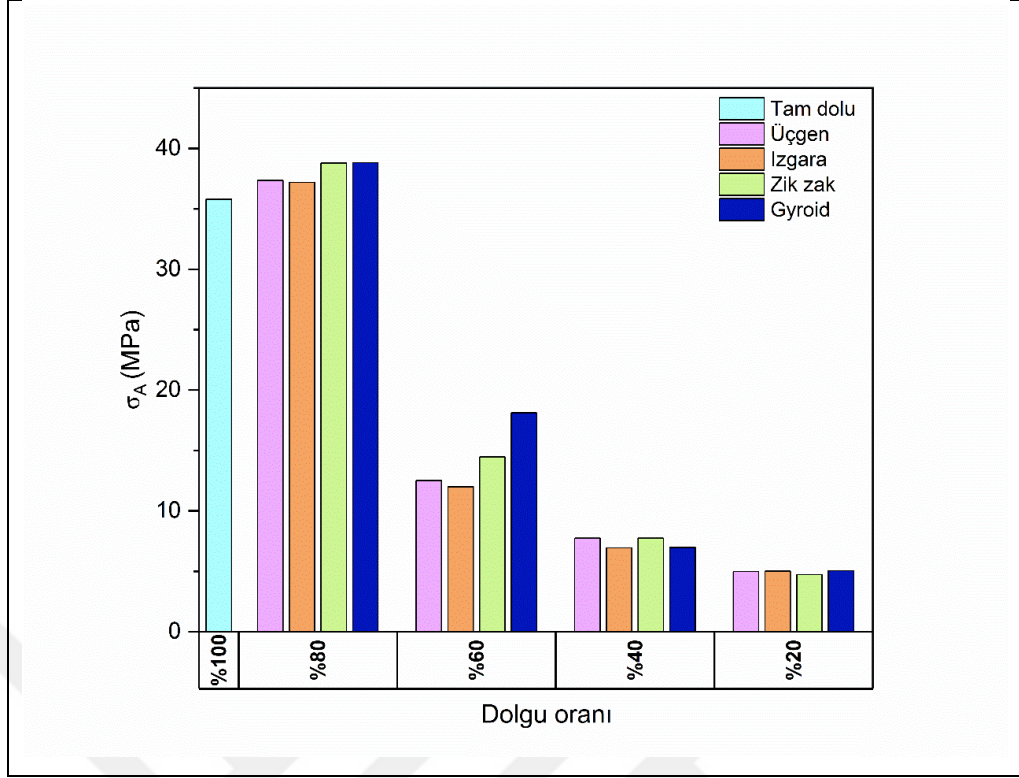
Numune	Elastisite Modülü	Rezilyans Modülü	Akma Gerilmesi	Akmadaki Uzama
	GPa	J/m ³	MPa	%
tam dolu	0.7	9.15E+09	35.780	8.740
%80 gen	0.76	9.17E+09	37.350	5.110
%80 ızgara	0.88	7.86E+09	37.180	4.610
%80 zik zak	0.8	9.46E+09	38.790	5.250
%80 gyroid	0.68	1.10E+10	38.820	6.100
%60 gen	0.31	2.45E+09	12.510	5.820
%60 ızgara	0.33	2.20E+09	12.000	5.750
%60 zik zak	0.39	2.69E+09	14.455	5.450
%60 gyroid	0.66	2.49E+09	18.110	3.660
%40 gen	0.255	1.19E+09	7.735	4.485
%40 ızgara	0.23	1.05E+09	6.935	4.210
%40 zik zak	0.22	1.36E+09	7.740	4.720
%40 gyroid	0.205	1.23E+09	6.970	4.555
%20 gen	0.165	7.46E+08	4.980	3.955
%20 ızgara	0.155	8.00E+08	5.005	4.145
%20 zik zak	0.165	6.95E+08	4.720	4.565
%20 gyroid	0.15	8.36E+08	5.050	4.470

Çizelge 4.4'te verilen değerlerin daha detaylı görülebilmesi adına grafikler düzenlenmiştir (şekil 4.15-şekil 4.18).



Şekil 4.15. Numunelerin basma deneyi elastisite modülü grafiği

Basma deneyi sonucunda elde edilen % dolgu oranı ve desen tipine göre elastisite modülü (E) değerleri Şekil 4.15'te verilmiştir. %80 dolgu oranlı ızgara desenli numunenin maksimum değere sahip olduğu (0.88 GPa) ve en dayanıksız grubun %20 dolgu oranlı numuneler (üçgen 0.165 GPa, ızgara 0.155 GPa, zik zak 0.165 GPa, gyroid 0.15 GPa) olduğu görülmüştür. %100, %80 ve %60 dolgu oranlı gyroid desenli numunelerin elastisite modülleri birbirlerine çok yakın değerlerde bulunmuştur. Dolayısıyla daha az malzeme kullanımı için, yaklaşık olarak 17 MPa gerilme değerine maruz kalabileceği yerlerde %100 ve %80 dolgu oranı yerine %60 dolgu oranlı gyroid deseni kullanılabilir (Şekil 4.16). Şekil 4.16'da basma deneyi akma gerilme grafiği verilmiştir.



Şekil 4.16. Numunelerin basma deneyi akma gerilmesi grafiği

Dolgu oranı arttıkça akma dayanımının arttığı gözlenmiştir. %80 dolgu oranlı numunelerin diğer numunelere göre basma deneyindeki akmaya karşı daha dirençli olduğu görülmektedir (%80 dolgu oranlı zik zak desenli 38.79 MPa, gyroid desenli 38.82 MPa). En dayanıksız grup %20 dolgu oranlı numunelerdir ve değerler sırasıyla şu şekildedir: (4.98 MPa, 5.005 MPa, 4.72 MPa ve 5.05 MPa).

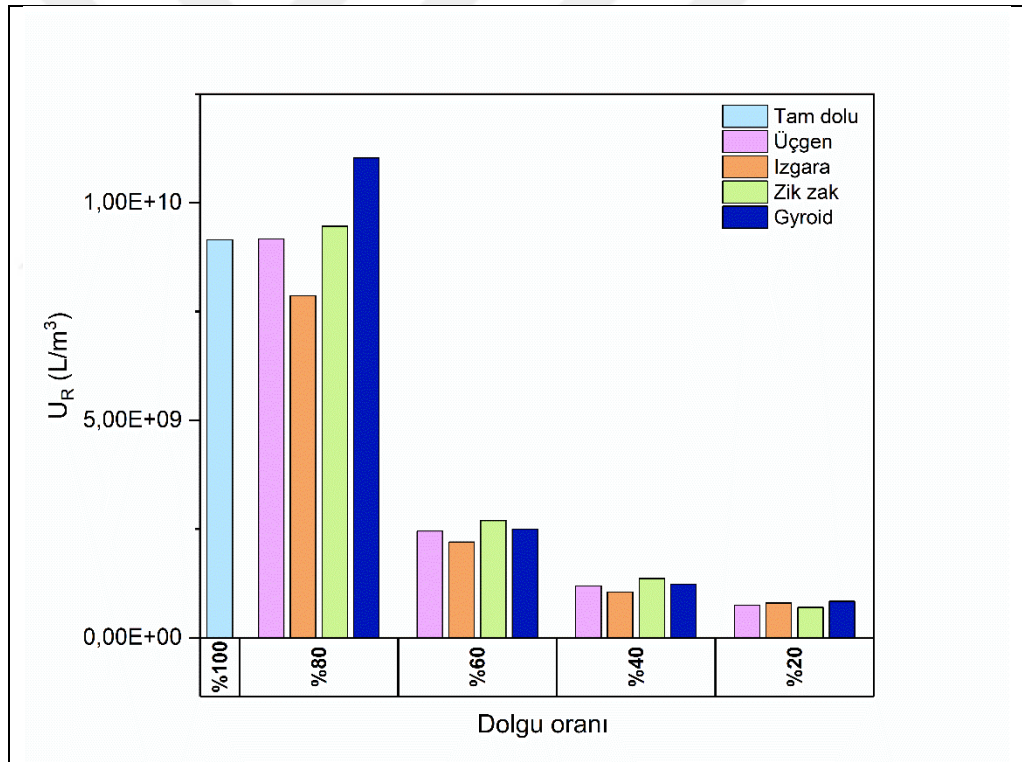
Kaya vd. (2024), PLA ile yaptıkları çalışmada %25, %50, %75 ve %100 dolgu oranlarında, üçgen malzeme ile çekme ve basma deneyleri yapmışlardır. Dolgu oranı arttıkça mekanik özelliklerin de arttığını gözlemlemişlerdir. %25 dolgu oranlı numunede basma dayanımı 19.52 MPa, uzama %9.181, %50 dolgu oranlı numunede basma dayanımı 27.51 MPa, uzama %8.126, %75 dolgu oranlı numunede basma dayanımı 53.56 MPa ve uzama %14.953 ve %100 dolgu oranlı numunede 107.52 MPa basma dayanımı ile % 35.165 uzama sonuçlarına ulaşmışlardır.

Dakhil vd. (2023), PLA filament ile üç boyutlu yazıcıda üçgen, üç altıgen ve çizgi desenli numuneler üreterek yaptıkları çalışmada, numunelere basma testi uygulamışlardır. Üç farklı dolgu oranı ile (%30, %50, %70) üretilen numunelerde

dolgu oranının artmasıyla basma dayanımının arttığını ve çizgi desenli numunenin en yüksek basma dayanımına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Oudah vd. (2022), ABS filament ile yaptıkları çalışmada, üç altıgen, zik zak ve gyroid desenlerini kullanarak numuneler üretmişlerdir (dolgu oranları %25, %50 ve %75). Dolgu oranı arttıkça basma dayanımının arttığını ve %75 dolgu oranlı gyroid desenli numunenin en yüksek değere sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

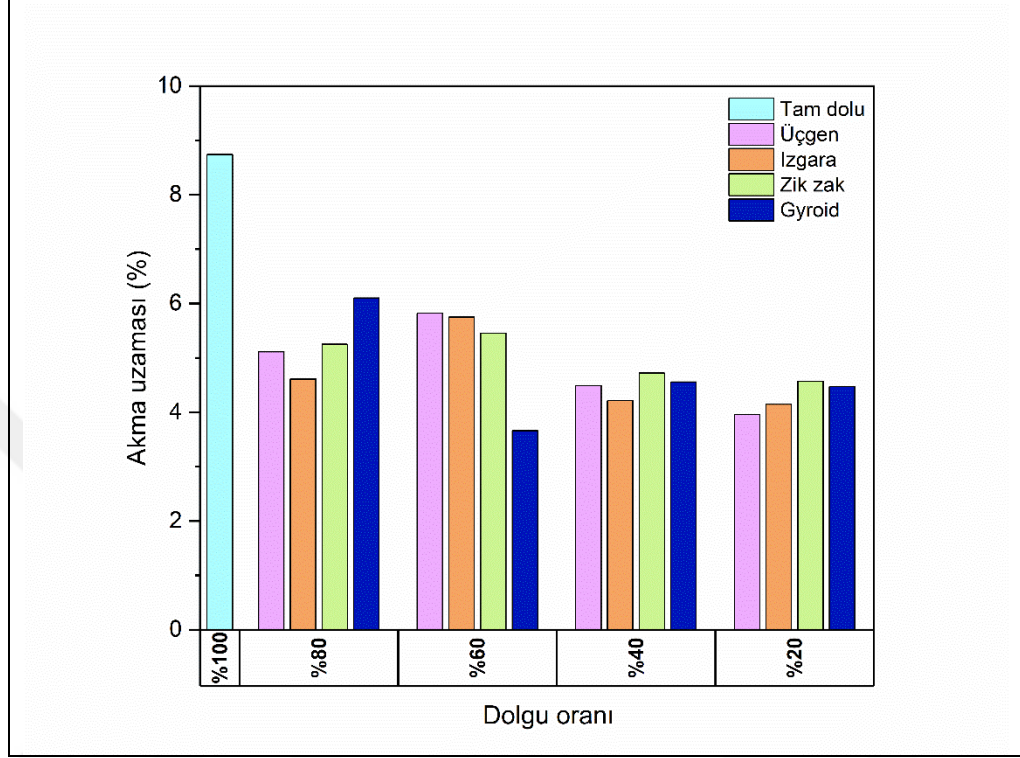
Literatüre bakıldığında dolgu oranları arttıkça basma akma dayanımında da artış gözlenmiştir. Bu çalışmada da elde edilen sonuç literatürle paraleldir. Grafikten görüldüğü üzere dolgu oranındaki artışla beraber akma dayanımında da artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.17. Numunelerin basma deneyi rezilyans modülü grafiği

Rezilyans modülü (U_R) grafiğinde (Şekil 4.17) %80 dolgulu gyroid desenli numunenin maksimum değerde ($1.10E+10 \text{ J/m}^3$) olduğu görülmektedir. %80 dolgulu numunelerin ve tam dolu numunenin diğer numunelere göre daha dayanıklı olduğu, %20 dolgu oranlı numunelerin ise daha çabuk deforme olduğu gözlemlenmiştir (üçgen $7.46E+08 \text{ J/m}^3$, ızgara $8.00E+08 \text{ J/m}^3$, zik zak $6.95E+08 \text{ J/m}^3$, gyroid $8.36E+08 \text{ J/m}^3$). Grafiğe

bakıldığında rezilyans modülünün bir göstergesi olarak elastikiyet özelliği bakımından %100 ve %80 dolgu oranlı numuneler avantajlı olarak görülmektedir. Elastiklik istenen bir çalışmada %80 dolgu oranlı gyroid desen kullanılması uygun olacaktır.



Şekil 4.18. Numunelerin basma deneyi akma uzaması grafiği

Basma deneyi sonucuna göre numunelerin akmadaki uzama grafiği Şekil 4.18’de verilmiştir. %100 dolgu oranlı numunenin maksimum değerde olduğu grafikte görülmektedir (%8.74). En düşük uzama değeri %60 dolgu oranlı gyroid desenli numunede %3.66 olarak ölçülmüştür.

Basma akma uzaması sonuçlarına bakıldığı zaman %80 dolgu oranlı ızgara desenli numune, %40 dolgu oranlı zik zak ve gyroid desenli numuneler ve %20 dolgu oranlı zik zak desenli numunede yakın sonuçlar görülürken; basmadaki akma gerilmesinde %80 dolgu oranlı ızgara desenli numunede, %40-%20 dolgu oranlı numunelere kıyasla daha yüksek bir değer ölçülmüştür. Buradan %40 dolgu oranlı (zik zak, gyroid) ve %20 dolgu oranlı (zik zak) numunelerin basmaya göre esnek bir yapıda olduğu sonucuna ulaşmak mümkündür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı dolgu oranları ve desen tipleri kullanılarak karbon fiber katkılı filamentten üretilen numunelerin mekanik testler sonucu elde edilen çekme dayanımı, basma dayanımı, elastisite modülü, rezilyans modülü, tokluk, akma gerilmesi, kopma gerilmesi, çekme uzaması ve kopma uzaması değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar da bu bölümde paylaşılmıştır.

Çekme deneyinde

Çekme deneyinde % dolgu oranlarına göre desen tipleri kendi aralarında değerlendirildiğinde;

%80 dolgu oranında maksimum çekme gerilmesi ve çekme uzaması zik zak desenli numunede elde edilmiştir. Bu sonuca göre %80 dolgu oranlı numuneden çekme gerilmesi bakımından en iyi sonucu veren desen tipi zik zak desen olarak belirlenmiştir.

Aynı dolgu oranında maksimum akma gerilmesi üçgen desenli numunede, akma uzaması zik zak desenli numunede ve rezilyans modülü üçgen desenli numunede bulunmuştur. Akma uzaması bakımından zik zak desenli numune ile üçgen desenli numunenin uzama miktarları arasında küçük bir fark olduğu ($1.7742 - 1.7135 = 0.0607$) görülmüştür. Buna göre elastik bölge için %80 dolgu oranlı numunede optimum dolgu deseni üçgen deseni olarak tespit edilmiştir.

%80 dolgu oranında maksimum kopma gerilmesi zik zak desenli numunede, kopma uzaması gyroid desenli numunede ve tokluk değeri zik zak desenli numunede bulunmuştur. Kopma uzaması bakımından her ne kadar gyroid desenli numune uzama miktarı olarak maksimum elde edilmiş olsa da zik zak desenli numunenin kopma uzama miktarına göre aralarındaki fark küçük bir değerdedir ($24.5550 - 23.7550 = 0.8$). Bu sonuca göre elastik ve plastik bölgeler için optimum dolgu deseni zik zak desen olarak belirlenmiştir.

%60 dolgu oranında maksimum çekme gerilmesi ve çekme uzaması zik zak desenli numunede elde edilmiştir. Bu sonuca göre %60 dolgu oranlı numuneden çekme gerilmesi bakımından en iyi sonucu veren desen tipi zik zak desen olarak belirlenmiştir.

Aynı dolgu oranında maksimum akma gerilmesi, akma uzaması ve rezilyans modülü üçgen desenli numunede bulunmuştur. Buna göre elastik bölge için %60 dolgu oranlı numunede optimum dolgu deseni üçgen desen olarak tespit edilmiştir.

%60 dolgu oranında maksimum kopma gerilmesi, kopma uzaması ve tokluk değeri zik zak desenli numunede bulunmuştur. Bu sonuca göre elastik ve plastik bölgeler için optimum dolgu deseni zik zak desen olarak belirlenmiştir.

%40 dolgu oranında maksimum çekme gerilmesi zik zak desenli numunede ve çekme uzaması gyroid desenli numunede elde edilmiştir. Bu sonuca göre %40 dolgu oranlı numuneden çekme gerilmesi bakımından en iyi sonucu veren desen tipi zik zak desen olarak belirlenmiştir.

Aynı dolgu oranında maksimum akma gerilmesi, akma uzaması ve rezilyans modülü ızgara desenli numunede ölçülmüştür. Buna göre elastik bölge için %40 dolgu oranlı numunede optimum dolgu deseni ızgara deseni olarak tespit edilmiştir.

%40 dolgu oranında maksimum kopma gerilmesi zik zak desenli numunede, kopma uzaması ve tokluk değeri gyroid desenli numunede bulunmuştur. Kopma gerilmesi sonuçlarına göre zik zak desenli ve gyroid desenli numunelerin uzamaları arasında az bir fark bulunmaktadır ($\%18.86-17.875=0.985$). Bu sonuca göre elastik ve plastik bölgeler için optimum dolgu deseni zik zak desen olarak belirlenmiştir.

%20 dolgu oranında çekme gerilmesi, akma gerilmesi, akma uzaması ve rezilyans modülü, kopma gerilmesi ve tokluk değerleri kendi aralarında değerlendirildiğinde desen tipleri arasında çok fark olmadığı görülmüştür. Bu sebeple %20 dolgu oranlı numuneler için bu mekanik özelliklerde desen tipinin bir etkisinin olmadığı kanaatine varılmıştır.

Basma deneyinde

Basma deneyinde % dolgu oranlarına göre desen tipleri kendi aralarında değerlendirildiğinde;

%80 dolgu oranında maksimum basma akma gerilmesi, basma akma uzaması ve rezilyans modülü değerleri gyroid desenli numunede elde edilmiştir. Bu sonuca göre %80 dolgu oranlı numunelerde en iyi sonucu veren desen tipi gyroid desen olarak belirlenmiştir.

%60 dolgu oranında maksimum basma akma gerilmesi gyroid desenli numunede, basma akma uzaması üçgen desenli numunede ve rezilyans modülü değeri zik zak desenli numunede elde edilmiştir. Akma uzama değerleri büyükten küçüğe sıralandığında, sırasıyla üçgen, ızgara, zik zak ve gyroid şekline oluşmuştur. Üçgen, ızgara ve zik zak desenler arasındaki akma uzama değerleri birbirlerine yakın değerler olarak elde edilmiştir. Basmadaki akma uzaması değeri gyroid desenden sonra zik zak desende elde edilmiştir. Dolayısıyla rezilyans modülü de maksimum zik zak desenli numunede görülmüştür. Bu sonuca göre %60 dolgu oranlı numunelerden en iyi sonucu veren desen tipi enerji absorbe etmesi bakımından zik zak desen olarak belirlenmiştir.

%40 dolgu oranında maksimum basma akma gerilmesi, basma akma uzaması ve rezilyans modülü değerleri zik zak desenli numunede elde edilmiştir. Bu sonuca göre %40 dolgu oranlı numunelerden en iyi sonucu veren desen tipi zik zak desen olarak belirlenmiştir.

%20 dolgu oranlı numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde basma akma gerilmesi, basma akma uzaması ve rezilyans modülü değerleri için desen tipleri arasında çok fark olmadığı görülmüştür. Bu sebeple %20 dolgu oranlı numuneler için bu mekanik özelliklerde desen tipinin bir etkisinin olmadığı kanaatine varılmıştır.

Çekme deney sonuçları ile basma deney sonuçları kendi aralarında değerlendirildiğinde ise;

%80 dolgu oranı için,

Üçgen deseninde çekmedeki akma gerilmesi 20.245 MPa iken basmadaki akma gerilmesi 37.35 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %80 dolgu oranı ve üçgen desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Izgara desenli numunede çekme akma gerilmesi 14.53 MPa iken basma akma gerilmesi 37.18 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %80 dolgu oranı ve ızgara desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Zik zak desenli numunede çekme akma gerilmesi 16.49 MPa iken basma akma gerilmesi 38.79 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %80 dolgu oranı ve zik zak desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Gyroid desenli numunede çekme akma gerilmesi 10.295 MPa iken basma akma gerilmesi 38.82 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %80 dolgu oranı ve gyroid desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre %80 dolgu oranında basmaya en dayanıklı desen tipi gyroid olarak bulunmuştur.

%60 dolgu oranı için,

Üçgen deseninde çekmedeki akma gerilmesi 9.115 MPa iken basmadaki akma gerilmesi 12.51 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %60 dolgu oranı ve üçgen desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Izgara desenli numunede çekme akma gerilmesi 5.57 MPa iken basma akma gerilmesi 12 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %60 dolgu oranı ve ızgara desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Zik zak desenli numunede çekme akma gerilmesi 5.845 MPa iken basma akma gerilmesi 14.455 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %60 dolgu oranı ve zik zak desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Gyroid desenli numunede çekme akma gerilmesi 5.63 MPa iken basma akma gerilmesi 18.11 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %60 dolgu oranı ve gyroid desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre %60 dolgu oranında basmaya en dayanıklı desen tipi gyroid olarak bulunmuştur.

%40 dolgu oranı için,

Üçgen deseninde çekmedeki akma gerilmesi 4.745 MPa iken basmadaki akma gerilmesi 7.735 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %40 dolgu oranı ve üçgen desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Izgara desenli numunede çekme akma gerilmesi 4.765 MPa iken basma akma gerilmesi 6.935 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %40 dolgu oranı ve ızgara desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Zik zak desenli numunede çekme akma gerilmesi 3.875 MPa iken basma akma gerilmesi 7.74 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %40 dolgu oranı ve zik zak desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Gyroid desenli numunede çekme akma gerilmesi 3.475 MPa iken basma akma gerilmesi 6.97 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %40 dolgu oranı ve gyroid desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre %40 dolgu oranında basmaya en dayanıklı desen tipi zik zak olarak bulunmuştur.

%20 dolgu oranı için,

Üçgen deseninde çekmedeki akma gerilmesi 3.43 MPa iken basmadaki akma gerilmesi 4.98 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %20 dolgu oranı ve üçgen desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Izgara desenli numunede çekme akma gerilmesi 3.385 MPa iken basma akma gerilmesi 5.005 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %20 dolgu oranı ve ızgara desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Zik zak desenli numunede çekme akma gerilmesi 3.205 MPa iken basma akma gerilmesi 4.72 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %20 dolgu oranı ve zik zak desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Gyroid desenli numunede çekme akma gerilmesi 3.49 MPa iken basma akma gerilmesi 5.05 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %20 dolgu oranı ve gyroid desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre %20 dolgu oranında basmaya en dayanıklı desen tipi gyroid olarak bulunmuştur.

Çekme ve basma gerilmeleri sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, %80 dolgu oranında basma için optimum desen tipi gyroïd, %60 dolgu oranında çekme için optimum desen tipi üçgen, %40 dolgu oranında çekme ve basma için optimum desen tipi sırasıyla, ızgara ve zik zak olarak belirlenmiştir.

Genel olarak bakıldığında,

Tüm dolgu oranı ve desenindeki numunelerin basma kuvvetine daha dayanıklı oldukları görülmektedir. Çekme kuvvetinden ziyade basma kuvvetine maruz kalacakları yerlerde kullanılmalarının daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır.

Yapılan bu çalışmadaki % doluluk oranları ve desen tiplerine göre elde edilen optimum sonuçlardan yola çıkılarak makine elemanları üretilebilir. Parçaların, kullanım yerleri ve maruz kalacakları yükler göz önünde bulundurularak, uygun desen tipi ve dolgu oranları seçimleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abeykoon, C., Sri-Amphorn, P., & Fernando, A. (2020). Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3(3), 284-297. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.03.003>
- Ahmed, B. A., Nadeem, U., Hakeem, A. S., Ul-Hamid, A., Khan, M. Y., Younas, M., & Saeed, H. A. (2023). Printing parameter optimization of additive manufactured PLA using taguchi design of experiment. *Polymers*, 15(22), 4370. <https://doi.org/10.3390/polym15224370>
- Alafaghani, A., Qattawi, A., & Ablat, M. A. (2017). Design consideration for additive manufacturing: fused deposition modelling. *Open Journal of Applied Sciences*, 7(6), 291-318. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2017.76024>
- Alimardani, M., Toyserkani, E., & Huissoon, J. P. (2007). Three-dimensional numerical approach for geometrical prediction of multilayer laser solid freeform fabrication process. *Journal of Laser Applications*, 19(1), 14-25. <https://doi.org/10.2351/1.2402518>
- Al-Ketan, O., Rowshan, R., & Al-Rub, R. K. A. (2018). Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials. *Additive Manufacturing*, 19, 167-183. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.006>
- Ambati, S. S., & Ambatipudi, R. (2022). Effect of infill density and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed PLA parts. *Materials Today: Proceedings*, 64, 804-807. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.312>
- Anonim (2024). ePA-CF. <https://www.esun3d.com/tr/epa-cf-product/> (Son erişim tarihi: 07 Mayıs 2024)
- Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 15-30.
- ASTM F2792e12a (2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies, West Conshohocken: ASTM International, ABD.
- Aydemir, B., Taşcan, H., & Camyurdu, C. (2015). Çekme deneyinde farklı uzama ölçme yöntemlerinin etkilerinin incelenmesi. *Metal Dünyası*, 266, 44-50.
- Aydın, D. S., Özsoy, A. L., & Yıldırım, Ç. V. (2022). Optimization of process parameters using taguchi method in production of Ti6Al4V alloy by SLM method. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 6(2), 230-236. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1099019>

- Baich, L., Manogharan, G., & Marie, H. (2015). Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts. *International Journal of Rapid Manufacturing*, 5(3-4), 308-319.
- Baranowski, P., Platek, P., Dudka, A. A., Sarzynski, M., Kucewicz, M., Durejko, T., Malachowski, J., Janiszewski, J., & Czujko, T. (2019). Deformation of honeycomb cellular structures manufactured with Laser Engineered Net Shaping (LENS) technology under quasi-static loading: Experimental testing and simulation. *Additive Manufacturing*, 25, 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.018>
- Bawadikji, H. (2022). *Investigation of Fatigue Behavior of 3D Printed PLA Beam. Reinforced With Carbon Fibers*. (Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- Botelho, E. C., Rezende, M. C., & Lauke, B. (2003). Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites. *Composites Science and Technology*, 63(13), 1843-1855.
- Bourell, D. L. (2016). Perspectives on additive manufacturing. *Annual Review of Materials Research*, 46(1), 1-18.
- Brandt, J., Drechsler, K., & Arendts, F. J. (1996). Mechanical performance of composite based on various three dimensional woven-fibre preforms. *Institute for Aircraft Design*, 56, 381-386. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(95\)00135-2](https://doi.org/10.1016/0266-3538(95)00135-2)
- Brooks, H., & Molony, S. (2016). Design and evaluation of additively manufactured parts with three dimensional continuous fibre reinforcement. *Materials & Design*, 90, 276-283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.123>
- Budinski, N., Lavicza, Z., Vukić, N., Teofilović, V., Kojić, D., & Erceg, T. & Simendić, J. B. (2019). Interconnection of materials science, 3d printing and mathematic in interdisciplinary education. *STED Journal*, 1(2), 21-30. <https://doi.org/10.7251/STED1902021B>
- Chen, X., Ji, Q., Wei, J., Tan, H., Yu, J., Zhang, P., Laude, V., & Kadic, M. (2020). Light-weight shell lattice metamaterials For mechanical shock absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*, 169, 105288. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105288>.
- Dakhil, G. Y., Salih, R. M., & Hameed, A. M. (2023). 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), 1-7. <https://doi.org/10.53293/jasn.2022.4745.1141>
- Deshmukh, D., Kulkarni, H., Sai Srivats, D., Bhanushali, S., & More, A. P. (2024). Recycling of acrylonitrile butadiene styrene (ABS): a review. *Polymer Bulletin*, 81, 1-38. <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05269-y>

- Deshpande, V. S., Fleck, N. A., & Ashby, M. F. (2001). Effective properties of the octet-truss lattice material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49(8), 1747-1769. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(01\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(01)00010-2)
- Duman, B., & Kayacan, M. C. (2016). Seçmeli lazer sinterleme tezgâhı için imalat yazılımı geliştirilmesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 8(3), 27-45.
- Emir, E., Akbay, Ö. C., & Bahçe, E. (2023). Fonksiyonel Derecelendirilmiş TPMS Bazlı Gyroid Kafes Yapısının Eklemeli İmalat ile Üretilebilirliğinin Nümerik Analiz ile İncelenmesi. *3 rd International Conference on Scientific and Academic Research*. December 25-26, Konya, Turkey.
- Erener, Ş., & Boz, S. (2021). Modern üretim tekniklerinde eklemeli imalat sistemlerinin yeri ve kullanım alanları. *Turkish Journal of Fashion Design and Management*, 3(1), 47-56.
- Ergene, B. (2020). *Eklemeli İmalat ile Titanyum ve Polimer Esaslı Malzemelerden Üretilen Hücresel Yapıların Mekanik Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması*. (Doktora Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- 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. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2019216310>
- Fitzsimons, L., McNamara, G., Obeidi, M., & Brabazon, D. (2020) The circular economy: additive manufacturing and impacts for materials processing. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. (pp. 81-92)
- Flowers, J. (2000). 3D laser scanning in technology education. *Technology and Engineering Teacher*, 60(3), 27-30.
- Ghebretinsae, F., Mikkelsen, O., & Akessa, A. D. (2019). Strength Analysis of 3D Printed Carbon Fibre Reinforced Thermoplastic Using Experimental and Numerical Methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 27-29 November, Stavanger, Norway, 1-12.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies: Third Edition*. New York: Springer.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Direct digital manufacturing. In *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. (pp. 375-397)
- Gök, D. A., Kılıçtek, S., Gök, S., & Yakut, N. (2023). Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 517-537. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1251130>

- Gupta, B., Revagade, N., & Hilborn, J. (2007). Poly(lactic acid) fiber: An overview. *Progress in Polymer Science*, 32(4), 455-482. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.01.005>
- Gülcan, O. (2021). Eklemeli imalatla üretilen kafes yapılar. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 19(2), 53-63.
- Harpool, T. D. (2016) *Observing the Effects of Infill Shapes on the Tensile Characteristics*. (Master's Thesis, Wichita State University)
- İbram, E. (2022). *Üç Boyutlu Yazıcı İle Üretilen Farklı İç Geometrilere Sahip PLA Esaslı Plakların Serbest Titreşim Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- Islam, M. A., Mobarak, M. H., Rimon, M. I. H., Al Mahmud, M. Z., Ghosh, J., Ahmed, M. M. S., & Hossain, N. (2024). Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications. *Polymer Testing*, 132, 108364. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108364>
- Jin, N., Wang, F., Wang, Y., Zhang, B., Cheng, H., & Zhang, H. (2019). Failure and energy absorption characteristics of four lattice structures under dynamic loading. *Materials and Design*, 169, 107655. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107655>
- Kadhum, A. H., Al-Zubaidi, S., & Abdulkareem, S. S. (2023). Effect of the infill patterns on the mechanical and surface characteristics of 3D printing of PLA, PLA+ and PETG materials. *Chem Engineering*, 7(3), 46. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7030046>
- Karagöz, İ., Bekdemir, A. D., & Tuna, Ö. (2021). 3B yazıcı teknolojilerindeki kullanılan yöntemler ve gelişmeler üzerine bir derleme. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(4), 1186-1213. <https://doi.org/10.29130/dubited.877423>
- Karimi, A., Rahmatabadi, D., & Baghani, M. (2024). Various FDM mechanisms used in the fabrication of continuous-fiber reinforced composites: a review. *Polymers*, 16(6), 831. <https://doi.org/10.3390/polym16060831>
- Kaveh, M., Badrossamay, M., Foroozmehr, E., & Etefagh, A. H. (2015). Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 226, 280-286.
- Kaya, E., Bayar, İ., & Akpınar, A. F. (2024). Dolgu desenlerinin ve oranlarının ergiyik biriktirme modellemede PLA malzemesinin mekanik performansına olan etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(3), 792-798. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.1442158>
- Kechagias, J. D., Lakovakis, V., Giorgio, E., Stavropoulos, P., Koutsomichalis, A., & Vaxevanidis, N. M. (2014). Surface roughness optimization of prototypes

produced by polyjet direct 3D printing technology. *OPTI 2014 An International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization*. 4-6 January, Kos Island, Greece, 2877-2888.

- Kırmızıoğlu, F. (2021). İhtiyaca göre cura dolgu şekilleri. <https://blog.3dortgen.com/ihtiyaca-gore-cura-dolgu-sekilleri/> (Son erişim tarihi: 20 Ağustos 2024)
- Koch, C., Van Hulle, L., & Rudolph, N. (2017). Investigation of mechanical anisotropy of the fused filament fabrication process via customized tool path generation. *Additive Manufacturing*, 16, 138-145.
- Kolarevic, B. (2001). Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age. In *Proceedings of the Twenty First Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture*. (pp. 268-278)
- Konta, A. A., García-Piña, M., & Serrano, D. R. (2017). Personalised 3D printed medicines: which techniques and polymers are more successful? *Bioengineering*, 4, 79. <https://doi.org/10.3390/bioengineering4040079>
- Kooistra, G. W., & Wadley, H. N. (2007). Lattice truss structures from expanded metal sheet. *Department of Materials Science and Engineering*, 28, 507-514. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.08.013>
- Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Robak, G., Moj, K., Krolczyk, G. M., & Kuntoğlu, M. (2022). Development of lattice structure with selective laser melting process: A state of the art on properties, future trends and challenges. *Journal of Manufacturing Processes*, 81, 1040-1063. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.051>
- Krödel, S., Delpero, T., Bergamini, A., Ermanni, P., & Kochmann, D. M. (2014). 3 D auxetic microlattices with independently controllable acoustic band gaps and quasi-static elastic moduli. *Advanced Engineering Materials*, 16(4), 357-363. <https://doi.org/10.1002/adem.201300264>
- Kucewicz, M., Baranowski, P., Malachowski, J., Poplawski, A., & Platek, P. (2018). Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures. *Materials & Design*, 142, 177-189.
- Leary, M., Mazur, M., Elambasseril, J., McMillan, M., Chirent, T., Sun, Y., Qian, M., Easton, M., & Brandt, M. (2016). Selective laser melting (slm) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials & Design*, 98, 344-357. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.127>
- Li, N., Li, Y., & Liu, S. (2016). Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 218-225. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025>

- Liu, S., Li, Y., & Li, N. (2018). A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures. *Materials & Design*, 137, 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.007>
- Milner, B. B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., Leary, M., Berto, F., & Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, 209, 110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
- Naranjo-Lozada, J., Ahuett-Garza, H., Orta-Castañón, P., Verbeeten, W. M., & Sáiz-González, D. (2019). Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 26, 227-241. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.020>
- Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369-378.
- Nsiempba, K. M., Wang, M., & Vlasea, M. (2021). Geometrical degrees of freedom for cellular structures generation: a new classification paradigm. *Applied Sciences*, 11(9), 3845. <https://doi.org/10.3390/app11093845>
- O'Neill, B. (2024). Cura infill patterns: what they are and when to use them. <https://www.wevolver.com/article/cura-infill-patterns>. (Son erişim tarihi: 25 Temmuz 2024)
- Oudah, S. A., Al-Attraqchi, H. B., & Nassir, N. A. (2022). The effect of process parameters on the compression property of acrylonitrile butadiene styrene produced by 3D printer. *Engineering and Technology Journal*, 40(01), 189-194. <https://doi.org/10.30684/etj.v40i1.2118>
- Öz, Ö., Aydın, M., Kara, A. S., & Sancak, M. S. (2018). Üç boyutlu yazıcılarda kullanılan doluluk oranının hasar yüküne olan etkisinin belirlenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(1), 32-39.
- Özel, Ş., Zeren, M., & Alp, N. Ç. (2020). 3D yazıcılar ile katmanlı imalat teknolojisinin otomotiv endüstrisinde uygulanması. *Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi*, 4(1), 18-31.
- Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606-621. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.626011>
- Özsolak, O. (2019). Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler. Department of manufacturing engineering. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1), 9-14.

- Özsoy, K., Erçetin, A., & Çevik, Z. A. (2021). Comparison of mechanical properties of PLA and ABS based structures produced by fused deposition modelling additive manufacturing. *European Journal of Science and Technology*, 27, 802-809. <https://doi.org/10.31590/ejosat.983317>
- Özsoy, K., & Duman, B. (2017). Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği. In *International Journal of 3d Printing Technologies And Digital Industry*. (pp. 36-48)
- Park, S. J., & Seo, M. K. (2011). Element and processing. In *Interface Science and Technology*. (pp. 431-499)
- Pernet, B., Nagel, J. K., & Zhang, H. (2022). Compressive strength assessment of 3d printing infill patterns. *Procedia Cirp*, 105, 682-687. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.114>
- Panda, B., Leite, M., Biswal, B., Niu, X., & Garg, A. (2018). Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures. *Department of Industrial Design*, 116, 495-506. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.037>
- Patan, Z. Y. (2019). *Karbon Fiber Takviyeli ABS Kompozitlerin FDM Yazıcı ile Üretimi ve Ansys ile Modellenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Polat, Y. F. (2022). *Eriyik Biriktirme Yöntemi ile Üretilen Karbon Fiber Katkılı Malzemelerde Fiber Katman Konumlarının Mekanik Özelliklere Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Rajput, M. S., Burman, M., Köll, J., & Hallström, S. (2017). Compression of structural foam materials – Experimental and numerical assessment of test procedure and specimen size effects. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 21(1), 260-288. <https://doi.org/10.1177/1099636217690500>
- Raney, K., Lani, E., & Kalla, D. K. (2017). Experimental characterization of the tensile strength of ABS parts manufactured by fused deposition modeling process. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 7956–7961. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.132>
- Rashid, A. A., Ikram, H., & Koç, M. (2022). Additive manufacturing and mechanical performance of carbon fiber reinforced Polyamide-6 composites. *Materialstoday: Proceedings*, 62(12), 6359-6363.
- Rengier, F., Mehndiratta, A., Von Tengg-Kobligk, H., Zechmann, C. M., Unterhinninghofen, R., Kauczor, H. U., & Giesel, F. L. (2010). 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5, 335-341.
- Rismalia, R., Hidajat, S. C., Permana, G. R., Hadisujoto, B., Muslimin, M., Triawan F., & Rismalia, M. (2019). Infill pattern and density effects on the tensile

properties of 3D printed PLA material. *Department of Mechanical Engineering*, 1402(4), 044049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/4/044041>

Sanadhya, S., Vij, N., Chaturvedi, P., Tiwari, S., Arora, B., & Modi, Y. K. (2015). Medical applications of additive manufacturing. *International Journal of Scientific Progress And Research*, 12(01), 2349-4689.

Sezer, H. K., Eren, O., Börklü, H. R., & Özdemir, V. (2019). 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. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416523>

Siyambaş, Y., & Turgut, Y. (2022). Defects, mechanical properties and surface roughness of AlSi10Mg alloy parts produced by selective laser melting (SLM) method-a review. *Gazi University Journal of Science, Part C10(2)*, 368-390. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1130098>

Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Department of Mechanical Engineering*, 31, 287-295. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>

Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3b baski): teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392. <https://doi.org/10.17482/uumfd.519147>

Tandon, S., Kacker, R., & Sudhakar, K. G. (2021). Experimental investigation on tensile properties of the polymer and composite specimens printed in a Triangular pattern. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 706-715. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.074>

Tatlı, O., Güler, H., & Özgül, H. (2020). Üç Boyutlu Üretim Tekniği Kullanılarak Üretilen Numunelerin Çekme ve Eğilme Kuvvetleri Açısından Karşılaştırılması. *International Icontech Symposium on Innovative Surveys in Positive Sciences*. 02 Mayıs 2020, Türkiye.

Temur, T. (2023). *Eriyik Yığma İle Modelleme (Fdm) Yönteminde Filament Kalınlığının Üretilen Plakaların Mekanik Özellikleri Ve Dinamik Davranışı Üzerindeki Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)

Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>

Tumbleston, J. R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Janusziewicz, R., Johnson, A. R., Kelly, D., Chen, K., Pinschmidt, R., Rolland, J. P., Ermoshkin, A., Samulski,

- E. T., & DeSimone, J. M. (2015). Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*, 347(6228), 1349-1352. <https://doi.org/10.1126/science.aaa3304>
- Ullah, I., Elambasseril, J., Brandt, M., & Feih, S. (2014). Performance of bio-inspired Kagome truss core structures under compression and shear loading. *Composite Structures*, 118, 294-302. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.07.036>
- Vangapally, S., Agarwal, K., Sheldon, A., & Cai, S. (2017). Effect of lattice design and process parameters on dimensional and mechanical properties of binder jet additively manufactured stainless steel 316 for bone scaffolds. *Procedia Manufacturing*, 10, 750-759. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.069>
- Vilaro, T., Abed, S., & Knapp, W. (2008). Direct Manufacturing of Technical Parts Using Selective Laser Melting: Example of Automotive Application. *12th European Forum on Rapid Prototyping*. 5-6 March, Paris, France.
- Wang, B., Wu, L., Ma, L., Sun, Y., & Du, S. (2010). Mechanical behavior of the sandwich structures with carbon fiber-reinforced pyramidal lattice truss core. *Materials & Design (1980-2015)*, 31(5), 2659-2663.
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442-458.
- Warmuth, F., Osmanlic, F., Adler, L., Lodes, M. A., & Körner, C. (2016). Fabrication and characterisation of a fully auxetic 3D lattice structure via selective electron beam melting. *Smart Materials and Structures*, 26(2), 025013. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/26/2/025013>
- Webb, P. A. (2000). A review of rapid prototyping (RP) techniques in the medical and biomedical sector. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 24(4), 149-153. <https://doi.org/10.1080/03091900050163427>
- Wei, X., Zou, N., Zeng, L., & Pei, Z. (2022). PolyJet 3D printing: Predicting color by multilayer perceptron neural network. *Annals of 3D Printed Medicine*, 5, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2022.100049>
- Williams, J. V., & Revington, P. J. (2010). Novel use of an aerospace selective laser sintering machine for rapid prototyping of an orbital blowout fracture. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 39(2), 182-184. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2009.12.002>
- Yalçın, B., & Ergene, B. (2017). Endüstride yeni eğilim olan 3B eklemeli imalat yöntemi ve metalürjisi. *SDU International Journal of Technological Science*, 9(3), 65-88.
- Yalçın, B., Ergene, B., & Şekeroğlu, İ. (2019). Characterization and Manufacturing of Cellular Compression Test Specimens From ABS Material by Using 3D Printing Method. *4th International Congress on 3D Printing (Additive*

Manufacturing) Technologies and Digital Industry. 11-14 April, Antalya-Turkey, 1059-1067.

- Yakovlev, A., Trunova, E., Grevey, D., Pilloz, M., & Smurov, I. (2005). Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects. *Surf Coatings Technology*, 190(1), 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.070>
- Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Bubb, S. L., Young, P., & Raymont, D. (2014). Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4), 856-864. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.004>.
- Yang, L., Harrysson, O., West, H., Cornier, D., & Fitts, E. P. (2011). Design and characterization of orthotropic re-entrant auxetic structures made via EBM using Ti6Al4V and pure copper. 464-474. <https://repositories.lib.utexas.edu/server/api/core/bitstreams/0b0f48ff-c5e6-4f88-8fec-9b282bc660b9/content> (Son erişim tarihi: 23 Ocak 2024)
- Yeşiloğlu, R., Özmen, R., & Günay, M. (2023). The effects of infill geometry and porosity ratio on mechanical properties of PLA structures produced by additive manufacturing. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 291-303.
- Yuan, S., Shen, F., Bai, J., Chua, C. K., Wei, J., & Zhou, K. (2017). 3D soft auxetic lattice structures fabricated by selective laser sintering: TPU powder evaluation and process optimization. *Materials & Design*, 120, 317-327. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.098>.

ÖZGEÇMİŞ

