



**EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN FARKLI
DOLGU GEOMETRİSİ VE YOĞUNLUĞA SAHİP
PLA ESASLI YAPILARIN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI**

Rukiye YEŞİLOĞLU

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN FARKLI DOLGU GEOMETRİSİ VE
YOĞUNLUĞA SAHİP PLA ESASLI YAPILARIN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Rukiye YEŞİLOĞLU

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**KARABÜK
Nisan 2022**

Rukiye YEŞİLOĞLU tarafından hazırlanan “EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN FARKLI DOLGU GEOMETRİSİ VE YOĞUNLUĞA SAHİP PLA ESASLI YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 28/04/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa GÜNAY (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ramazan ÖZMEN (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Harun GÖKÇE (GÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Rukiye YEŞİLOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN FARKLI DOLGU GEOMETRİSİ VE YOĞUNLUĞA SAHİP PLA ESASLI YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Rukiye YEŞİLOĞLU

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Nisan 2022, 78 sayfa

Eklemeli imalat (Eİ), geleneksel imalat yöntemiyle imalatı zor olan karmaşık şekilli parçaların üretimini kolaylaştıran bir imalat yöntemidir. Bu yöntemde, modelin 3D verileri kullanılarak malzeme katmanlar halinde üst üste yığılarak parçalar üretilmektedir. Termoplastik malzemelerden parça üretiminde Eriyik Yığma Modelleme (EYM) yöntemi en yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat yöntemidir.

Bu çalışmada, PLA malzemedan üretilen farklı dolgu geometrisi ve yoğunluğuna sahip parçaların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, EYM yöntemiyle üretilmek üzere farklı dolgu geometrilerine (Octet, Gyroid ve Cross) sahip parçalar modellenmiştir. Dolgu geometrilerinde birim hücre boyutu 5×5×5mm olacak şekilde seçilmiş olup, %50, %30 ve %20 izafi yoğunluk değerinde deney numuneleri üretilmiştir. Bu parçaların mekanik davranışlarını araştırmak amacıyla çekme, basma

ve darbe deneyleri yapılmış ve karşılaştırılan mekanik özellikler açısından en uygun birim hücre yapısı belirlenmiştir. Genel olarak, izafi yoğunluğun artmasıyla tüm dolgu geometrilerinde mekanik özelliklerin kötüleştiği görülmüştür. En yüksek çekme dayanımı Octet dolgu geometrili yapıda elde edilirken, en fazla şekil değişimi Cross dolgu geometrili numunede görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Eklemeli imalat, EYM, Dolgu geometrisi, Mekanik özellikler, Plastik malzeme

Bilim Kodu : 91438



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF PLA-BASED STRUCTURES WITH DIFFERENT INFILL GEOMETRY AND DENSITY PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Rukiye YEŐILOĐLU

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanic Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

April 2022, 78 pages

Additive manufacturing (AD) is a manufacturing method that facilitates the production of complex shaped parts that are difficult to manufacture with the traditional manufacturing method. In this method, parts are produced by stacking the material in layers using the 3D data of the model. Fusion Deposition Modeling (FDM) method is the most widely used additive manufacturing method in the production of parts from thermoplastic materials.

In this study, it is aimed to compare the mechanical properties of the parts with different infill geometry and density produced from PLA material. For this purpose, parts with different infill geometries (Octet, Gyroid and Cross) were modeled to be produced by the FDM method. In infill geometries, the unit cell size was chosen to be 5×5×5 mm, and test samples were produced with 50%, 30% and 20% relative density

values. In order to investigate the mechanical behavior of these parts, tensile, compression and impact tests were carried out and the most suitable unit cell structure was determined in terms of the compared mechanical properties. In general, it was observed that the mechanical properties of all fill geometries deteriorated with the increase of the relative density. While the highest tensile strength was obtained in the Octet infill geometry structure, the highest deformation was observed in the Cross infill geometry sample.

Key Word : Additive manufacturing, FDM, Infill geometry, Mechanical properties, Plastic material

Science Code : 91438



TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mustafa GÜNAY'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme maddi manevi hiçbir yardımı esirgemedен tüm hayatım boyunca yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
SİMGELER DİZİNİ.....	xv
KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2	3
KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. EKLEMELİ İMALAT	3
2.2. EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN YÖNTEMLER.....	4
2.2.1 Eriyik Yığıma Modelleme (Fused Deposition Modelling)	5
2.2.2. Stereolitografi (Stereolithography)	8
2.2.3. Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering)	10
2.2.4. Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting).....	11
2.2.5. Sac Laminasyonu (Sheet Lamination).....	12
2.2.6. Malzeme Püskürtme (Material Jetting).....	13
2.2.7. Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition)	14
2.3. EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN MALZEMELER	16
2.3.1. Metaller ve Alaşımlar	16
2.3.2. Polimerler ve Kompozitler.....	17

	<u>Sayfa</u>
2.3.3. Seramikler	18
2.3.4. Beton	18
2.4. HÜCRESEL MALZEMELER (DOLGU GEOMETRİLERİ)	19
BÖLÜM 3	24
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	24
3.1. LİTERATÜR ÖZETİ.....	33
BÖLÜM 4	34
MATERYAL VE YÖNTEM	34
4.1. MALZEME VE HÜCRESEL YAPI	34
4.2. NUMUNELERİN TASARIMI VE ÜRETİMİ.....	35
4.2.1. Basma Numunelerinin Tasarımı ve Üretimi	35
4.2.2. Çekme Numunelerinin Tasarımı ve Üretimi.....	36
4.2.3. Darbe Numunelerinin Tasarımı ve Üretimi	37
4.4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
4.4.1. Basma Deneyi	39
4.4.2. Çekme Deneyi.....	39
4.4.3. Darbe Deneyi	40
BÖLÜM 5	42
SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	42
5.1. BASMA DENEYİ SONUÇLARI	42
5.2. ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI	46
5.3. DARBE DENEYİ SONUÇLARI	49
BÖLÜM 6	52
SONUÇLAR	52

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	61



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. EYM sürecinin akış şeması.....	9
Şekil 2.2. Yaygın SLA yöntemleri	10
Şekil 2.3. SLS yöntemi ile üretim.	12
Şekil 2.4. Bağlayıcı püskürtme kurulumu	13
Şekil 2.5. Sac Laminasyonu.....	14
Şekil 2.6. Malzeme püskürte yöntemi.....	15
Şekil 2.7. Metal biriktirme yöntemi şematik gösterimi.....	37
Şekil 2.8. Dolgu geometrili hücresel yapılar için önerilen tasarım prosedürü.....	22
Şekil 2.9. Literatürde karşılaşılan hücre topolojilerinin bir özeti.....	24
Şekil 4.1. Kullanılan birim hücre şekilleri.	36
Şekil 4.2. Ultimaker 3D yazıcı.....	37
Şekil 4.3. Tip 1 Numune ölçüleri.....	38
Şekil 4.4. Çekme numuneleri (Cross %30).....	38
Şekil 4.5. Darbe numuneleri (Cross %20, %30, %50).....	39
Şekil 4.6. Çekme Deneyi Test Cihazı.....	40
Şekil 4.7. Çekme deneyinin uygulanması ve numunelerin son hali.....	41
Şekil 4.8. Darbe deneyi uygulama aşamaları.....	42
Şekil 5.1. Basma deneyi sonucu numuneler.....	44
Şekil 5.2. Gyroid yapılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme diyagramları	45
Şekil 5.3. Cross yapılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme diyagramları	45
Şekil 5.4. Octet yapılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme diyagramları	46
Şekil 5.5. Numunelerin yatay olarak konumlandırılması sonucunda elde edilen basma gerilme-şekil değiştirme diyagramları	46
Şekil 5.6. Numunelerin dikey olarak konumlandırılması sonucunda elde edilen basma gerilme-şekil değiştirme diyagramları	47

Şekil 5.7. Çekme deneyi sonrası numuneler (%20 gözeneklilik).....	48
Şekil 5.8. Gözeneklilik oranına göre gerilme-şekil değiştirme grafikleri	49
Şekil 5.9. Birim hücre yapısına göre gerilme-şekil değiştirme grafikleri	50
Şekil 5.10. Darbe deneyi sonrası numuneler.....	51
Şekil 5.11. Darbe dayanımı değişimi.....	52
Şekil 5.12. Darbe dayanımı değişimi.	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri.....	5
Çizelge 2.2. EYM’de kullanılan bazı malzemelerin özellikleri.....	7
Çizelge 2.3. EYM tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları.....	8
Çizelge 2.4. Metal eklemeli imalatta yaygın kullanılan malzemeler.....	18
Çizelge 2.5. Hücresel malzemelerin bazı uygulama alanları.....	7
Çizelge 2.6. Hücresel yapıların tasarımına ait standartlar ve standartlara ait değişkenler.....	23
Çizelge 4.1. Basma deney numunelerinin adetleri.....	37
Çizelge 4.2. Çekme deney numunelerinin adetleri.....	38
Çizelge 4.3. Darbe deney numunelerinin adetleri.....	39
Çizelge 5.1. Basma testi sonucu elde edilen elastisite modülleri ve akma gerilmeleri	44

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER DİZİNİ

- Al : Alüminyum
CO₂ : Karbondioksit
Si : Silisyum
Mg : Magnezyum
O : Oksijen
µm : Mikrometre
Ti : Titanyum
h : Kiriş yüksekliği
l : Kiriş uzunluğu
θ : Kiriş açısı

KISALTMALAR DİZİNİ

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
- ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
- DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
- EN : European Norm (Avrupa Normu)
- PLA : Polilaktik Asit
- ABS : Akrilonitril Bütadien Stiren
- EYM : Eriyik Yığıma Modelleme
- CAD : Comptuter Aided Design
- SLE : Seçici Lazer Ergitme
- SLS : Seçici Lazer Sinterleme
- FDM : Fused Deposition Modeling
- PC : Polikarbonat
- İHA : İnsansız Hava Aracı
- Eİ : Eklemeli İmalat
- SLA : Stereolitografi
- DLP : Dijital Işık Projeksiyonu
- LOM : Laminated Object Manufacturing
- EBM : Elektron Işın Ergitme
- RAM : Ronotic Additive Manufacturing
- AM : Additive Manufacturing
- FEA : Sonlu Elemanlar Analizi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Farklı ham maddelerin işlenerek insanların kullanımına sunan her türlü üretime imalat adı verilir. İmalat sektörü için birçok çalışma yapılmış ve ihtiyaçlar doğrultusunda çok çeşitli imalat teknolojileri geliştirilmiştir. Günümüzde imalat teknolojileri temelde talaşlı ve talaşsız imalat olarak ikiye ayrılabilir. Talaşlı imalat hammadde üzerinden talaş kaldırılarak yapılan malzeme eksiltici bir yöntemi tanımlamaktadır (tornalama, frezeleme, taşlama vb.). Talaşlı imalatın tersine malzemeler eklenerek yapılan imalat yöntemleri ise talaşsız imalat teknolojileri olarak tanımlanmaktadır (plastik şekil verme, 3B üretim, kaynak, döküm vb.).

Günümüzde nüfus artımı ve teknolojinin gelişmesine bağlı olarak, her geçen gün daha fazla sayıda ve daha özel ihtiyaçlara yönelik ürün ihtiyacı da artmaktadır. Geleneksel talaşlı imalat yöntemleri bu özelleşen ürün ihtiyaçlarını ve artan ürün isteklerini karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Bundan dolayı yeni imalat teknolojilerine yapılan yatırımlar her geçen gün artmaktadır. Bu bağlamda, gelişen teknolojiyle birlikte hayatımıza giren eklemeli imalat yöntemleri tüm endüstrilerde kullanılmaya başlamıştır. Eklemeli imalat, üç boyutlu (3B) imalat olarak bilinmekte olup, bilgisayar ortamında tasarlanan bir parçanın katmanlar halinde üretilmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Plastik, seramik, metal veya kompozit gibi çok farklı malzemeler bu teknolojiye kullanılabilir. Bu imalat teknolojilerinin birçoğunda karmaşık geometrili parçalar uygun maliyetlerde üretilebilmektedir. Bazı eklemeli imalat yöntemleri ise yüksek maliyetli olsalar da farklı bir alternatif yöntem ile üretilemeyecek parçaların üretilmesine imkân sağladığı için kullanılmaktadır. Uygun maliyet ve hızlı prototipleme özellikleri ile bazı endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bazı malzemelerin kullanım zorluğu bu yöntemin dezavantajı olarak görülmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerinde, plastik, seramik, kompozit ve metal alaşımları dışında çikolata, hamur, alçı, beton gibi spesifik malzemeler de kullanılabilir.

Bu çalışma kapsamında eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen plastik esaslı parçaların mekanik davranışlarının deneysel olarak araştırılmasına odaklanılmıştır. Bu amaçla, öncelikle endüstriyel olarak sıklıkla kullanılan PLA malzemeden farklı dolgu geometrilerinde (Octet, Gyroid ve Cross) ve farklı izafi yoğunluklarda parçalar modellenmiştir. Bu süreçte, çekme, basma, eğme deneyi standartları esas alınmış olup, Eriyik Yığılma Modelleme (EYM) yöntemi uygulanarak bir 3D yazıcıda deney numunelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, EYM esaslı üretilen plastik parçalara uygulanan mekanik özellik testleri ile en uygun dolgu geometrisinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. 1. Bölümde (Giriş) eklemeli imalat, plastik malzeme ve tez kapsamında yapılacak olan çalışmalar hakkında özet bilgiler sunulmuştur. 2. Bölümde (Kuramsal temeller) eklemeli imalat, eklemeli imalat yöntemleri, eklemeli imalatta kullanılan malzemeler detaylı olarak açıklanmıştır. Ayrıca, çalışmanın önemli bir kısmını oluşturan hücresel yapılar hakkında bilgiler verilmiştir. 3. Bölümde (Literatür araştırması), konuyla ilgili akademik çalışmalar incelenmiş olup, daha önce eklemeli imalat ve dolgu geometrileri üzerine yapılan çalışmalar paylaşılmış ve tüm bunların sonucunda literatürün bir özeti verilmiştir. 4. Bölümde (Materyal ve yöntem), çalışma kapsamında kullanılan malzeme, ekipmanlar, deneysel ve istatistiksel yöntemler, numune tasarım ve üretim aşamalarından bahsedilmiştir. Son olarak, üretilen numunelere uygulanan mekanik özellik belirleme testleri ve kullanılan cihazlar hakkında detaylı açıklamalar yapılmıştır. 5. Bölüm (Sonuçlar ve tartışma), yapılan deneylerin sonuçları ve değerlendirmeleri kapsamaktadır. 6. Bölümde (Sonuçlar), çalışmadan elde edilen sonuçlar maddeler halinde özet bir biçimde verilmiştir.

BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER

2.1. EKLEMELİ İMALAT

Üç boyutlu imalat teknolojileri kullanılarak, malzemenin katmanlar olarak üst üste sıralanmasıyla nesnelerin meydana getirdiği üretim yöntemine eklemeli imalat denir. Eklemeli imalat ile bir parça üretmek, geleneksel üretim yöntemlerine göre zamandan tasarrufu fazla olduğundan, eklemeli imalat hızlı prototipleme olarak da adlandırılmaktadır. Geleneksel tekniklerle örnek oluşturmak için farklı üretim tekniğine ve farklı becerilere sahip kişilere ihtiyaç varken, eklemeli imalat ile doğrudan CAD dosyası üzerinden ilk örnek üretimi mümkündür. Eklemeli imalat teknolojileriyle, geleneksel yöntemler ile üretilmesi zor ve karmaşık yapıdaki cisimler üretilmektedir [1,2].

Eklemeli imalat teknolojileri 1980'li yıllarda prototip üretmek amacıyla hayatımıza girmiştir. Fakat bilgisayar, malzeme ve lazer gibi teknolojilerin gelişmesiyle günümüzde prototip üretmenin dışında doğrudan üretim yapmak amacıyla da kullanılabilir. Eklemeli imalat teknolojileri temelde hızlı prototipleme ve hızlı imalat olarak ikiye ayrılmaktadır. Hızlı prototipleme, imalatı düşünülen ürünün birebir veya farklı bir ölçekte ilk örneğinin, ürünü değerlendirmek ya da tanıtmak amacıyla üretilmesidir. Hızlı imalat ise ihtiyaca yönelik ürünün doğrudan üretilerek son kullanıma sunulması işlemidir [3].

Eklemeli imalat yöntemi ile üretim yapılırken öncelikle tasarımı yapılacak olan malzemenin bilgisayar ortamında tasarımı yapılarak CAD modeli oluşturulur. Oluşturulan CAD model, farklı kaydetme yöntemiyle STL formatında kaydedilerek dönüştürülmüş olur. Dönüştürülen bu STL formatı kullanılacak olan bilgisayar ara yüz programı ile katman katman ince tabakalar halinde dilimlenir. Dilimlenen STL formatındaki malzeme 3D yazıcı sayesinde katman katman inşa edilerek üretilir. Üretimi yapılan malzemenin üretim sonunda varsa pürüzler temizlenir [4].

Günümüzde, çalışma prensibi ve kullanılan malzeme türüne göre çok çeşitli eklemeli imalat yöntemleri mevcuttur. Örneğin seçici lazer ergitme (SLE), seçici lazer sinterleme (SLS) ve eriyik yığarak modelleme bu yöntemlerden bazıları olup, her yöntemin avantajları ve dezavantajları vardır [5].

2.2. EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN YÖNTEMLER

Eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan farklı yöntemler olmasının yanı sıra ortak özellikleri, hammaddenin katmanlar halinde üst üste birikerek istenilen modelin somut bir üç boyutlu fiziksel nesneye dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. Katmanların oluşturulma tekniği ve üretim hammaddesi olarak kullanılan malzemenin özellikleri farklılıklar gösterebilmektedir. Her yöntemin diğer yöntemlere kıyasla farklı avantajları ve dezavantajları mevcuttur. ISO/ASTM 52900: 2015 standartlarına göre katmanlı imalat yöntemleri toplamda 7 grupta kategorize edilmiş ve standartlaştırılmıştır (ISO/ASTM 52900:2015). Bu kategorilerin standartlaştırılmış isimleri Çizelge 2.1' de gösterilmiştir [6].

Çizelge 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri.

• Fotopolimerizasyon (Vat Photopolymerization)
• Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)
• Malzeme Püskürtme (Material Jetting)
• Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting)
• Toz Yatağında Birleştirme (Powder Bed Fusion)
• Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition)
• Sac Laminasyonu (Sheet Lamination)

Mevcut tüm eklemeli imalat teknolojileri arasında en yaygın olanı, Fused Filament Fabrication (FFF) olarak da anılan Fused Deposition Modeling (FDM)'dir. Bunun nedeni ekonomik erişilebilirliği, kullanım kolaylığı ve ticari olarak temin edilebilen çeşitli malzemelerdir [7].

2.2.1 Eriyik Yığıma Modelleme (Fused Deposition Modelling)

Eklemeli imalat yöntemlerinin başında gelen Eriyik Yığıma Modelleme (EYM) literatürde genel olarak İngilizce ismi olan Fused Deposition Modelling (FDM) olarak anılmaktadır. EYM'de kullanılan malzemeler öncelikle polimerlerdir, örneğin, Polilaktik Asit (PLA), Akrlonitril Bütadien Stiren (ABS) ve Polikarbonat (PC) [8].

EYM parçaları, İnsansız Hava Aracı (İHA), diş hekimliği, elektrokimyasal piller, kafes ve hücresel yapılar, sandviç yapılar, doku mühendisliği ve hatta 3D yazıcılar için parçalar halinde olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Eriyik Yığıma Modelleme (EYM) yöntemi, 1989 yılında Stratasys'in kurucu ortağı Steven Scott Crump tarafından keşfedildi. Bu yöntemin patenti, A.B.D. Patent enstitüsü tarafından 9 Haziran 1992 tarihinde verilmiştir. 2007 yılında patentin sona ermesiyle birlikte EYM yönteminin yazılımları açık kaynak kodlu hale gelmiş ve bu yöntem hızla kullanılmaya başlanarak en çok tercih edilen yöntem olarak kabul görmüştür [9,10].

EYM, çok basit bir işlemle eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde filament adı verilen termoplastik polimer zıt yönlerde dönen iki merdaneden geçerek bir ısıtıcıya hareket ettirilir. İtme kuvvetinin etkisi ile eriyen polimer, meme adı verilen parçadan çapını küçülterek işleme tablasına akar. Kullanılan filamentlerin çapları genellikle 1.85 mm veya 2.85 mm iken en yaygın kullanılan meme çapları 0.2 mm ve 0.4 mm olarak bilinir. X-Y ekseninde istenilen yönde eritilerek dışarı akan polimer hareket ettirilerek bir tabaka oluşturulur. Burada, X ve Y eksenlerinde işleme hızı ve itme etkisiyle oluşan akış hızının bir sonucu olarak katman kalınlığı görünür. Bu şekilde oluşturulan katmanların Z eksenini boyunca birikmesi ile istenilen son ürün 3B olarak üretilir. EYM'de kullanılan bazı malzemelerin özellikleri Çizelge 2.2'de gösterilmiştir [11].

Çizelge 2.2. EYM’de kullanılan bazı malzemelerin özellikleri.

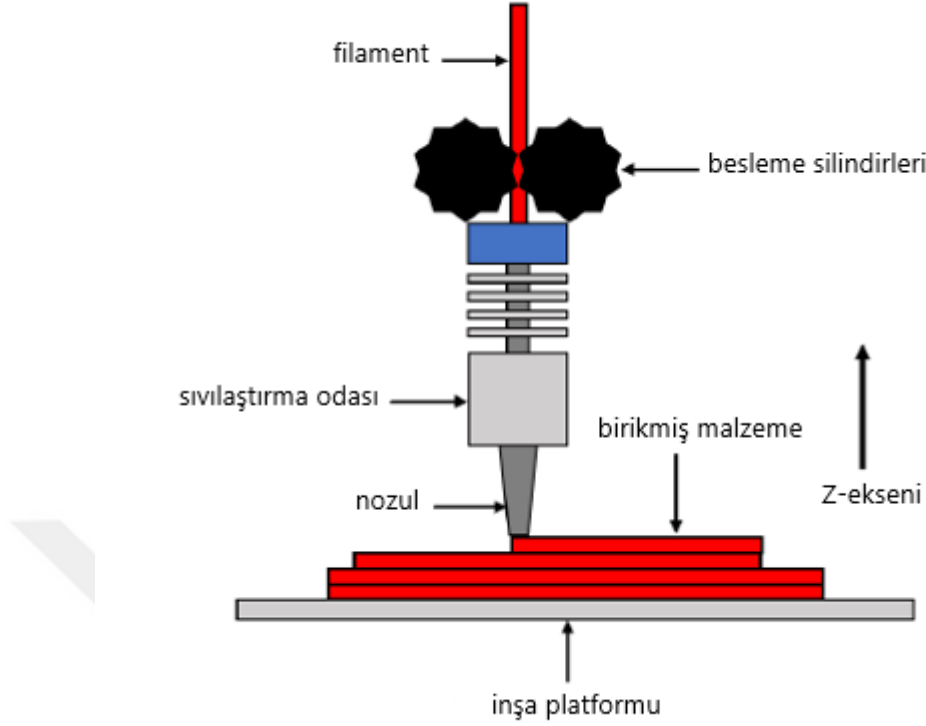
Malzeme	PLA	ABS	HIPS	FILEXIBL E	PVA	WOOD	PA
Baskı sıcaklığı	190- 220°C	220- 240°C	220- 240°C	190-210°C	190- 210°C	190- 220°C	235- 270°C
Özkütle	1.25±0.0 5g/cm ³	1.04±0.2g/ cm ³	1.04±0.2 g/cm ³	1.25±0.05g/c m ³	1.25±0.0 5g/cm ³	1.25±0.0 5g/cm ³	1.20±0.0 5g/cm ³
Eriyik akış hızı	5~7g/10 min (190°C, 2.16Kg)	2~4g/10mi n (190°C, 2.16Kg)	2~5g/10 min (200°C, 2Kg)	3~6g/10min (190°C, 2.16Kg)	4~4g/10 min (190°C, 2.16Kg)	5~7g/10 min (190°C, 2.16Kg)	19~21g/1 0min
Su absorbsiyonu	0.50%	1.0%	1.0%	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%
Çekme dayanımı	260MPa	243Mpa	230Mpa	235Mpa	210Mpa	260Mpa	260Mpa
Eğme modülü	260Mpa	260Mpa	260Mpa	235Mpa	215Mpa	260Mpa	22200M pa
Kopma uzaması	23.0%	210.0%	250%	2500%	211%	22.0%	250%

EYM, parça imal etmek için en çok termoplastik malzemeler kullanan ekstrüzyon bazlı bir eklemeli imalat yöntemidir. ABS veya PLA gibi bir termoplastik hammadde, peletler veya filament olarak bir FDM yazıcıya beslenir. Çoğu EYM yazıcısı, takım kafasını hareket ettirmek için 3 eksenli bir kızak kullanır, ancak daha karmaşık EYM yazıcılarda 6 adete kadar eksen bulunmaktadır. Şekil 2.1, FDM işleminin grafiksel bir temsilini göstermektedir. EYM tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.3’te gösterilmiştir [12].

Çizelge 2.3. EYM tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları.

Avantajlar	Üretim Kolaylığı
	Yüksek doğruluk
	Güvenli olması, zehirsiz maddelerin kullanılması, ofis ortamında çalışılabilmesi
	Ek tesisatlara ve özel parçalara ihtiyaç duymaması
	Ardıl işlemin gerekli olmaması
	Hassas döküm mumu, işlenebilir mum ve naylon benzeri plastik malzemelerin kullanılabilmesi
	Düşük maliyeti
	Hızlık, tek adımlı işlem, kısa işlem süresi
Dezavantajlar	Tek ekstrüzyon ünitesi ile yoğunluğu yüksek parçaların üretim süresinin uzunluğu
	Düşük yüzey kalitesi
	Düşük ve değişken parça yoğunluğu
	Z yönünde zayıf parça
	Nozul kesiti dairesel olduğu için keskin dış yüzeylerin yapılması zordur

Diğer Eİ yöntemleriyle karşılaştırıldığında, EYM, toz veya sıvı polimer içermediğinden "temiz" bir yöntemdir. Daha az dağınık olmasının yanı sıra, EYM, kullanıcılara bileşenleri veya diğer cihazları üretilirken bir parçaya bırakma fırsatı verir, böylece EYM'yi çok işlevli parçalar oluşturmak için iyi bir aday haline getirmektedir. EYM cihazlarının araştırmacıları ve üreticileri, EYM parçalarına takviye eklemek için yeni yöntemler geliştirmektedir. Bu, hammadde malzemelerine kısa takviye liflerinin eklenmesinden sürekli lif kırıklarının yerleştirilmesine kadar uzanır. Bazı şirketler doğrudan cam ve karbon elyafı basma yöntemleri de geliştirmektedir. Yukarıda belirtilen düşük maliyet ve teknolojinin sağlamlığı EYM'yi uzay keşif amaçları için iyi bir aday olarak göstermektedir. Mikro yerçekiminde uygulanabilir bir üretim yöntemi olduğu gösterilmiştir [12].



Şekil 1.1. EYM sürecinin akış şeması.

2.2.2. Stereolitografi (Stereolithography)

Stereolitografi (SLA) reçineyi ışık vasıtasıyla sertleştirerek çalışan 3B yazıcı teknolojisidir. Işık, fotopolimerizasyon adı verilen bir işlemle sıvı reçineyi katılaştırır ve üretilecek parçayı katman katman meydana getirir. Stereolitografi teknolojisi, 3B baskının ölçüsellığı en stabil biçimlerinden biridir. İki ana SLA teknolojisi tipi vardır: lazer bazlı (tipik SLA) veya projeksiyon temelli (Dijital Işık Projeksiyonu_DLP).

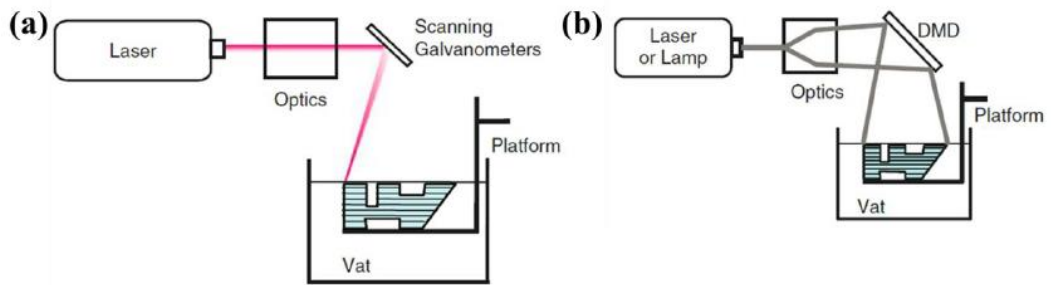
SLA, ilk uygulanabilir eklemeli imalat teknolojisi olarak kabul edilir. SLA'nın en yaygın biçimi, malzemeyi iyileştirmek için bir fotopolimer teknesi ve bir ışık kaynağı kullanır. Işık kaynağı çoğunlukla UV'dir. Ancak lazer ve elektron ışını gibi başka kaynaklar da mevcuttur.

SLA süreci tipik olarak, bir fotopolimer teknesine zar zor batırılmış bir inşa platformuyla başlar. Bir ışık kaynağı, dilimleme yazılımı tarafından oluşturulan takım yoluna karşılık gelen teknenin yüzeyinde bir model izler. Bir katman

tamamlandığında, inşa platformu tek bir katman yüksekliği kadar kazanın içine düşer, böylece bir sonraki katman iyileştirilebilir. Bu işlem parça tamamen oluşana kadar tekrarlanır. Kazan polimerizasyonunun çeşitli konfigürasyonları geliştirilmiştir, ancak en yaygın olanları vektör tarama ve maske projeksiyonudur. Yaygın kullanılan SLA yöntemleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir [13].

Vektör tarama, her katman için takım yolunu izleyen tek bir ışık kaynağından oluşur. Bu, nispeten basit ve ucuz olması nedeniyle en yaygın SLA yöntemidir. Maske projeksiyonu, tüm katmanın modelini sıvı polimer üzerine yansıtır ve böylece aynı anda tüm katmanı iyileştirir. Vektör taramasından daha hızlı olmasına rağmen, maske projeksiyonu, maskeyi oluşturmak için daha fazla optik yetenek gerektirir ve bu da daha yüksek maliyetlere neden olur. Bir eklemeli imalat yöntemi olarak, SLA, hızlı üretim ve diğer eklemeli imalat yöntemlerinden daha iyi çözünürlük avantajına sahiptir. Zararına, SLA genellikle daha pahalı bir işlemdir ve sıvı fotopolimer reçinenin kullanılması, süreci diğer teknolojilerden daha karmaşık hale getirir. Sertleştirici bir ışık kaynağına ve ayarlanabilir optiklere ihtiyaç duyulduğundan, SLA'nın maliyeti tipik olarak diğer yöntemlerden daha yüksektir.

Ek olarak, temel malzemelerin çoğu zamanla bozulmaya meyillidir ve parçanın malzeme özelliklerini azaltır.



Şekil 2.2. Yaygın SLA yöntemleri.

(a) Parça modelini izlemek için tek bir ışık kaynağının kullanıldığı vektör tarama.

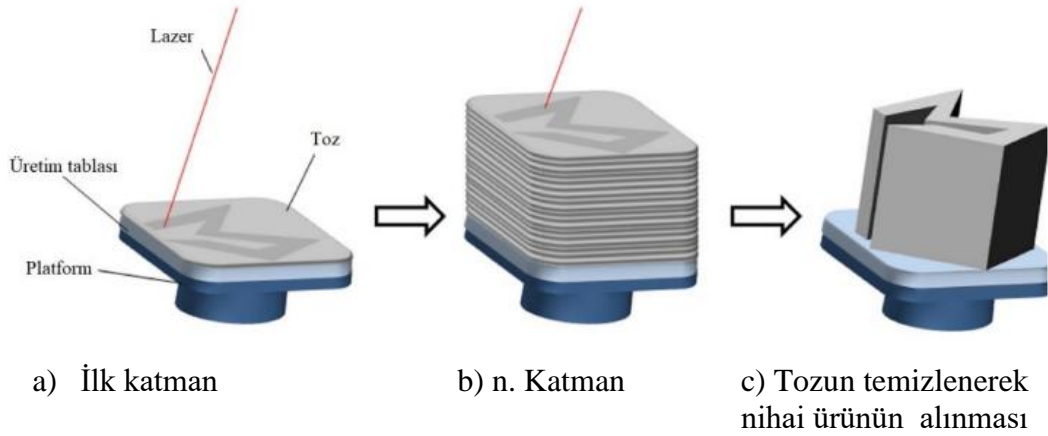
(b) Maske projeksiyonu tüm katmanı aynı anda iyileştirir.

2.2.3. Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering)

2000 yılının başlarında, yeterli mekanik mukavemete sahip biyolojik bir kompleks kullanılarak gözenekli biyomedikal yapıların imalatı için araştırmalar yapılmıştır. Endüstriyel imalat yöntemleri arasında yaygın biçimde kullanılan 3D baskı yönteminde, lazerler toz halindeki malzemeleri kat kat birleştirir. Yoğunluğu yüksek bir kızılötesi lazer, bir kat oluşturmak için toz halindeki malzemeleri eritir. Yeni toz, önceden oluşturulmuş katmanın üzerine bırakılır ve modeli birleştirmek için yeni tozu eritir. SLS'nin önemi, destek yapılarına ihtiyaç duymaz. Kesintisiz toz, parçaya gerekli tüm desteği sağlar. Böylece, SLS, başka herhangi bir yöntemle üretilmesi imkansız olan S geometriler oluşturmak için kullanılabilir.

Seçici lazer sinterleme Carl Deckard tarafından 1989 yılında geliştirilmiştir. Patenti Texas Üniversitesi'ne aittir. Bu yöntem ile 1990 yılında Manriquez-Frayre ve Brouell tarafından metal malzeme kullanılarak eklemeli imalat gerçekleştirilmiştir. Seçici lazer sinterleme yöntemi de toz yatak füzyon sisteminin üretim prensibi ile aynıdır. Üretim tablası üzerine bir silindir yardımı ile genellikle 100 µm'den ince olacak şekilde toz malzeme bir katman olarak serilir. Serilen bu toz malzeme lazer yardımı ile erime noktası altında bir sıcaklığa getirilir ve sinterlenme işlemi gerçekleştirilir. SLS yönteminde genel olarak CO₂ lazer, Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminum garnet), fiber ve diyot lazer gibi yüksek güç üreten lazer sistemleri kullanılmaktadır. Üretilen malzeme sürekli olarak nitrojen veya benzeri bir inert gaz ile sürekli beslenerek oksitlenmesi engellenmektedir [14-17].

SLS yöntemi ile yapılan eklemeli imalat sürecinde metal, seramik, polimer, cam ve pulvarize gibi herhangi bir malzeme kolaylıkla kullanılabilir. Şekil 2.3'te SLS ile üretilen bir parçanın üretim aşamaları gösterilmektedir. İlk olarak birinci katman destek katmanı olarak tablada üretilmelidir. Parça üretimi tamamlandıktan sonra geride kalan tozlar temizlenerek nihai parça elde edilmektedir. Parçanın tabladan ayrılma işlemi elektrikli bir testere yardımı ile yapılabilir. Eğer kullanılmışsa, parça üzerindeki destek yapıları da ikincil bir işlem ile alınır [18,19].

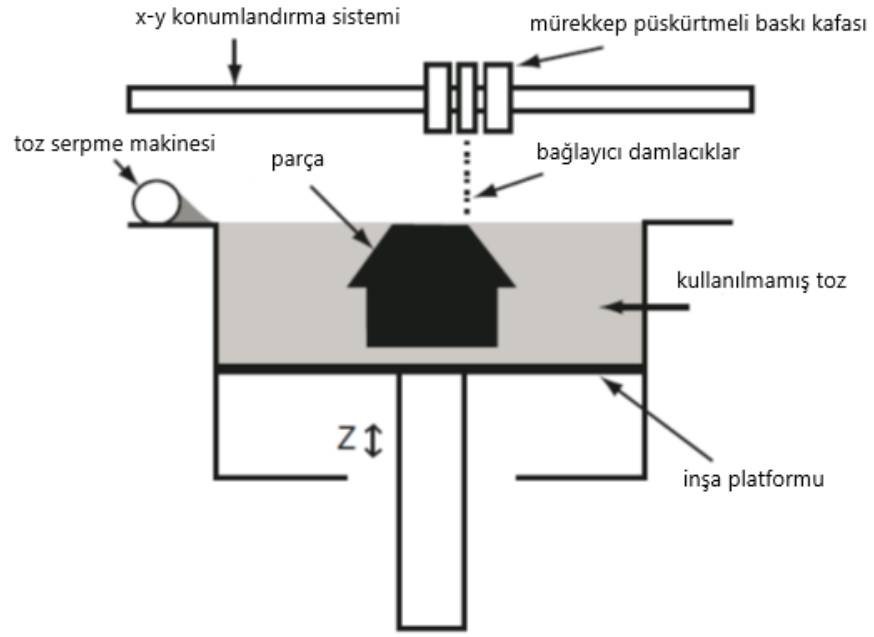


Şekil 2.3. SLS yöntemi ile üretim.

2.2.4. Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting)

Bağlayıcı püskürtme işlemi, inşa edilen bir platform üzerinde bir plastik toz tabakası ile başlar. Mürekkep püskürtmeli baskı kafaları, tabaka enine kesitine göre toz üzerine bir bağlayıcı ajan bırakarak inşa platformu üzerinde hareket eder. Belirli bir katman tamamlandıktan sonra, yeniden kaplama işlemi ilk katmanı yeni tozla kaplar ve daha fazla bağlayıcı madde biriktirilir. Parça tam olarak basıldıktan sonra, fazla toz çıkarılabilir ve ileride kullanılmak üzere geri dönüştürülebilir. Şekil 2.4, bağlayıcı püskürtme işleminin bir diyagramını göstermektedir. Kullanılmayan toz, parça için destek malzemesi görevi görür [13].

Bağlayıcı maddenin mevcudiyetine bağlı olarak, inşa edildiği haliyle bağlayıcı püskürtülen kısım, düşük yoğunluğa ve zayıf mekanik performansa sahip olacaktır. Bu, mekanik performansı iyileştirmek için sonradan işleme gerektiren yeşil bir parça olarak bilinir. Sonradan işleme, sinterlemeyi ve parça sızmasını içerebilir. Mürekkep püskürtmeli baskı kafaları nispeten ucuz bir teknoloji olduğundan, birçok baskı kafası bir bağlayıcı püskürtme uygulamasında bir arada kullanılabilir. Aslında, baskı yatağının tüm genişliği boyunca bir dizi yazıcı kafası sıralanabilir. Bu, üretim hızını önemli ölçüde artırır, ancak baskı süresindeki tasarruf, işlem sonrası için zaman maliyeti ile dengelenebilir [12].

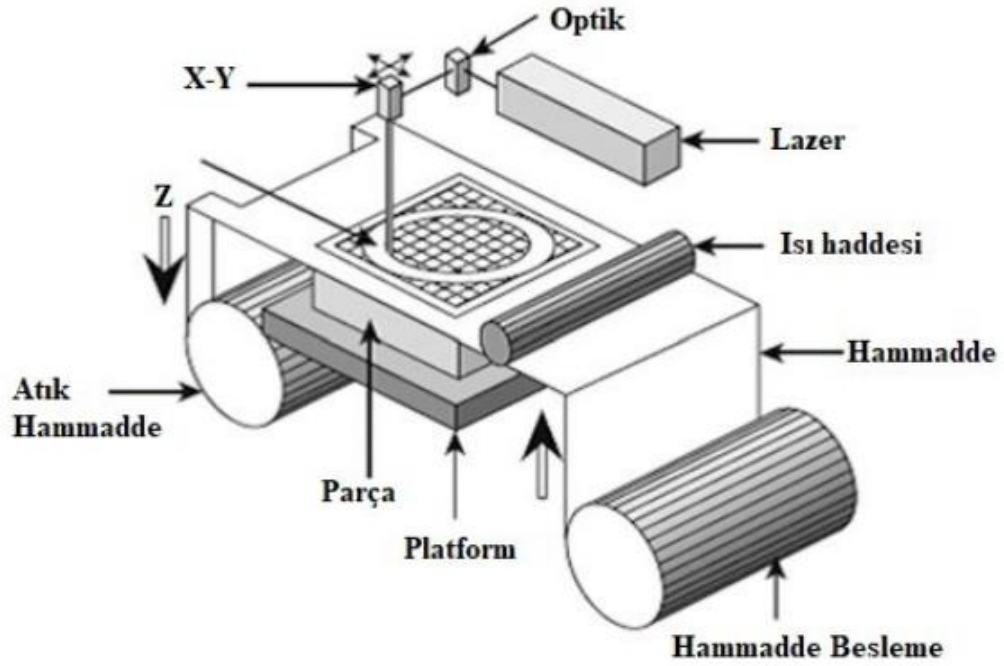


Şekil 2.4. Bağlayıcı püskürtme kurulumu.

2.2.5. Sac Laminasyonu (Sheet Lamination)

1991 yılında ilk defa ve ticari olarak kullanılan, ticari ismi Laminated Object Manufacturing (LOM) olan sac laminasyonu yöntemi, Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Lazer veya kesici takım kullanılarak, sac halindeki hammaddeden, bilgisayar ortamında tasarlanmış parçaların aynı ölçülerde kesilip daha sonrasında üzerine aynı şekilde kesilen ikinci katmanın ısı, basınç, kimyasal bağlayıcı, yapıştırıcı vb. ile bağlanması esasına dayanan hem ekleme hem de çıkarma yöntemidir. Hammadde olarak sac halindeki polimer, metal, kompozit, kâğıt vb. gibi malzemeler kullanılmaktadır [20-22].

Diğer eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla daha büyük ölçülerde parçaların üretilmesi bu yöntem ile mümkündür. Fakat karmaşık geometrilerin üretilmesi zor ve pahalıdır. Birbirinden farklı malzeme türlerinin bir arada kullanılması bir avantaj sergilerken, atık madde miktarının fazla olması dezavantaj olarak değerlendirilmektedir [21].

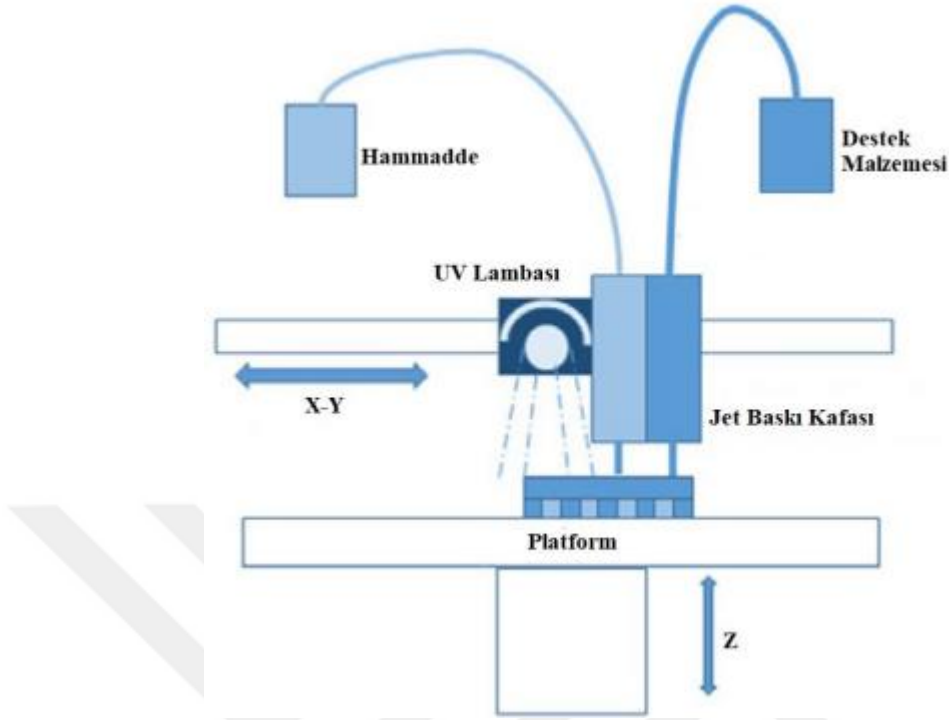


Şekil 2.5. Sac Laminasyonu.

2.2.6. Malzeme Püskürtme (Material Jetting)

1980'li yıllarda malzeme püskürtme yönteminin temelleri atılmıştır. İlk defa 1994 yılında hammaddesi balmumu olan versiyonu ticarileştirilmiş, günümüzde ise profesyonel olarak birçok sektörde kullanılmaktadır. Genellikle de masaüstü yazıcı olarak kullanımı tercih edilmektedir. Malzeme püskürtme yöntemi, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi jet kafasından periyodik olarak akıtılan malzemenin katman yüzeyine soğuk bir şekilde kaynak olması ve aynı şekilde diğer katmanın da üst üste biriktirilmesi prensibine dayanan, sıvı esaslı bir eklemeli imalat yöntemidir. Genellikle balmumu ve akrilik fotopolimer malzemeler kullanılsa da seramik (zirkonya) ve metal (lehim) gibi malzemelerin kullanıldığı uygulamalar da geliştirilmiştir [20-22].

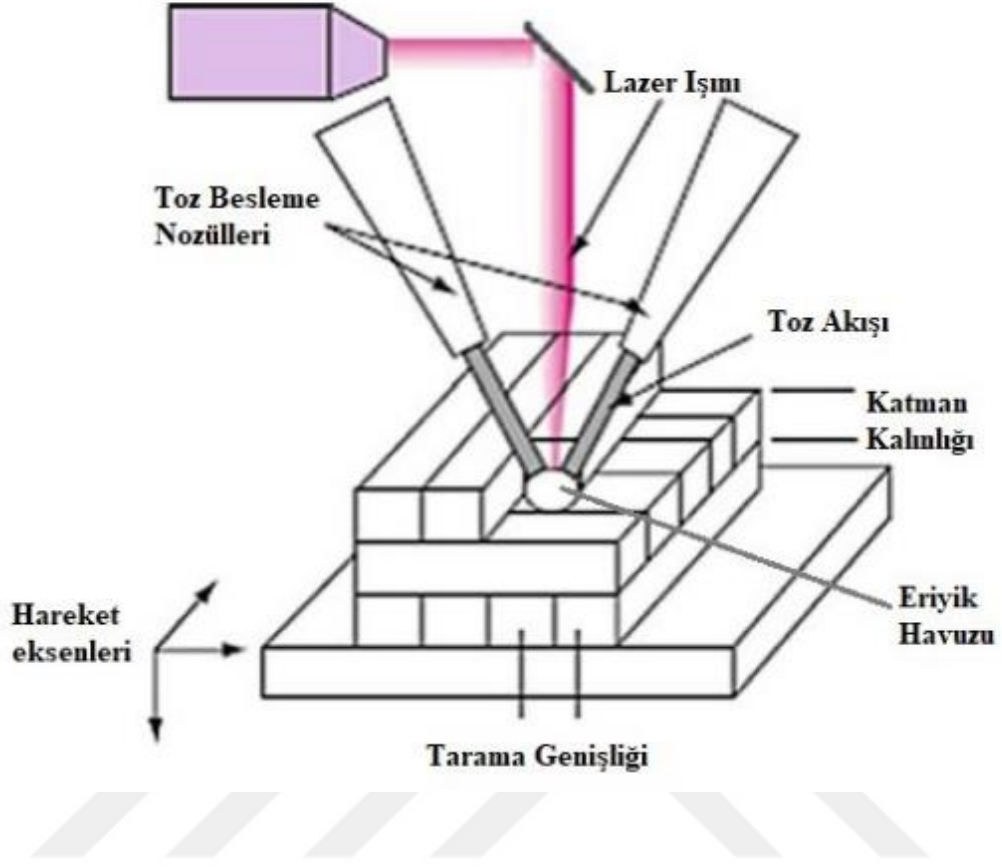
Malzeme püskürtme yöntemi tasarım firmaları tarafından tasarım ve prototipleme amacıyla kullanılmakla beraber elektronik ve medikal sektörlerindeki uygulamalarda da kullanılmaktadır. Yöntemin düşük maliyet, yüksek üretim hızı, birden fazla malzeme kullanılarak parça üretimi ve çok renkli parça üretimine imkân tanınması gibi avantajları olup, dezavantajları ise yöntem için uygun malzemenin az olması ve büyük parça üretiminde geometrik yeterliliğinin olmaması olarak belirlenmiştir [22,23].



Şekil 2.6. Malzeme püskürtme yöntemi.

2.2.7. Doğrudan Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition)

Bilgisayar ortamında tasarlanan parçanın toz veya tel halindeki hammaddeden farklı enerji kaynaklarıyla (lazer ışını, elektron ışını, ark) eritmek suretiyle, bir önceki katman ile birleştirerek üretilmesi esasına dayanan eklemeli imalat yöntemidir. Şekil 2.7'deki üretim şekli gösterilmektedir. Benzer yaklaşımlar kullanarak sistemdeki enerji tipi, lazer gücü, lazer boyutu, toz iletim metodu, geri besleme sistemi gibi noktalarda farklı tekniklerin kullanıldığı birçok ticari isim mevcuttur. Bunlardan bazıları toz püskürtme, tel püskürtme, lazer direk döküm, lazer döküm, lazer biriktirmedir. Malzeme püskürtme yönteminde lazer enerjisi kullanıldığından seçici lazer ergitme yöntemine benzemektedir [20,22,24].



Şekil 2.7. Metal biriktirme yöntemi şematik gösterimi.

Malzeme biriktirme yönteminde yüksek yoğunluklu ve proses parametreleri aracılığı ile kontrol edilebilir, değiştirilebilir mikro yapılar elde etmek mümkündür. Ek olarak malzeme besleme yönteminde, seçici lazer ergitmede sağlanamayan desteksiz yapıların üretilmesi mümkündür. Diğer yandan eriyik havuzu nedeniyle karmaşık geometrilere izin vermemesi ve küçük parçalar için uygun olmaması, boyutsal gerçeklik konusunda diğer yöntemlere kıyasla zayıf kalmaktadır [18,22].

2.3. EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN MALZEMELER

Eklemeli imalat yöntemlerinde rijit haldeki polimerlerden akışkan reçinelere kadar birçok farklı malzemeler ham madde olarak kullanılabilir.

- Metaller ve alaşımlar
- Polimerler (ABS, PLA) ve kompozitler
- Seramikler
- Beton, alçı, kum
- Laminant
- Termoplastikler
- Fotopolimerlerik reçineler
- Tahta, ağaç kabuğu, bambu
- Karbon fiber ve grafen
- Çikolata, hamur, mum, kağıt vb. spesifik malzemeler

2.3.1. Metaller ve Alaşımlar

Metal kullanılarak yapılan eklemeli imalat yöntemleri geleneksel üretim yöntemlerine nazaran özel ve karmaşık geometrilerin üretimi için büyük özgürlük sağlar. Özellikle, çok işlevli bileşenler, yapısal, koruyucu mühendislik ve yalıtım sorunlarına aynı anda çözüm sağlamak için geliştirilebilir. Paslanmaz ve takım çelikleri, bazı alüminyum alaşımları, titanyum ve alaşımları ve nikel bazlı alaşımlar gibi birçok metalik malzeme, 3D tabanlı eklemeli üretim süreçleri kullanılarak üretilebilir. 3D teknolojileri, iyi mekanik özelliklere ve karmaşık şekillere sahip bileşenleri yüksek hassasiyetle ($\pm 0,02$ mm) üretebilir. Bununla birlikte, bu sistemler oldukça yavaştır (dört lazerle 105 cm³ / saate kadar) ve bu nedenle çoğunlukla küçük parçalar için kullanılmaktadır [25,26].

Yaygın olarak kullanılan alüminyum, paslanmaz çelik, kobalt-krom, nikel, titanyum ve diğer alaşımlar Çizelge 2.4'te gösterilmiştir [27].

Çizelge 2.4. Metal eklemeli imalatta yaygın kullanılan malzemeler.

	Malzeme	DIN
Alüminyum Alaşımları	AlSi10Mg	3.2381
	AlSi7Mg	3.2371
	AlSi12	3.3581
Kobalt Alaşımları	ASTM F75	2.4723
	CoCrWC	
Takım Çelikleri	AISI420	1.2083
	Marage 300	1.2709
	H13	1.2344
	AISI D2	1.2379
	AISI A2	1.2363
	AISI S7	1.2357
Nikel Alaşımları	Inconel 718	2.4668
	Inconel 625	2.4856

2.3.2. Polimerler ve Kompozitler

Polimerler, çeşitlilikleri ve farklı 3D baskı işlemlerine adaptasyon kolaylığı nedeniyle 3D baskı endüstrisinde en yaygın kullanılan malzemeler olarak kabul edilmektedir. Eklemeli imalat için, polimerler termoplastik filamentler, reaktif monomerler, reçine veya toz formunda mevcuttur. Polimerlerin ve kompozitlerin 3D baskıyı kullanabilme yeteneği, uzay, oyuncak üretimi, mimari ve tıbbi alanlarda endüstriyel uygulamada yakın zaman içerisinde araştırılmaktadır. 3D baskı kullanarak kompozit üretmenin faydalarından bazıları, geometrinin istenen yüksek hassasiyette üretilmesine olanak vermesidir. Ek olarak, bu işlem, istenen ürünler için kalıplama ve ekstrüzyon gibi diğer geleneksel biçimlendirme yöntemlerine göre daha uygun maliyetli olabilir. Öte yandan, çoğunlukla 3D yazıcılarda oluşturulan saf polimer ürünler, yapılarındaki sağlamlık ve işlevsellik eksikliğinden dolayı genellikle kavramsal prototipler için kullanılır ve daha iyi performans gösteren gelişmiş polimer kompozitlerin üretimi için çeşitli yöntem ve malzemelerin geliştirilmesine öncülük eder. Araştırmalar, 3B baskılı polimerlerin düşük mekanik özelliklerini ortadan kaldırmaya devam ediyor. 3D baskılı

polimerlerin daha düşük mekanik özelliklerini çözümede daha iyi performans gösteren gelişmiş polimer kompozitlerin üretimi için çeşitli yöntem ve malzemelerin geliştirilmesine yol açan araştırmalar devam etmektedir. Polimer ve kompozitlerin üretimi için Stereolitografi, SLS, EYM, 3D biyolojik baskı ve mürekkep püskürtmeli baskı gibi çeşitli 3D baskı teknikleri mevcuttur. EYM, en yaygın olarak, düşük erime noktalarına sahip polimer kompozitler ve termoplastiklerin üretiminde kullanılmaktadır [28,29].

İyi fiziksel özelliklere sahip çevre dostu polimerik malzemeler, ABS ve PLA gibi 3D baskı için kullanılan yaygın ticari polimerler gerekli çıktıları karşılamadığından EYM için büyük önem taşımaktadır. ABS iyi mekanik özelliklere sahiptir, ancak işleme sırasında hoş olmayan bir koku yayar, PLA ise çevre dostudur ancak zayıf mekanik özelliklere sahiptir [30].

2.3.3. Seramikler

Eklemeli imalat teknolojileri, biyomalzemeler ve doku mühendisliği (kemik ve diş) için gelişmiş seramik üretiminin temel bir yöntemi haline gelmiştir. İstenilen şekli oluşturmak için sinterlenmiş seramik parçaların işlenmesi, zaman alıcı ve maliyetli bir işlemdir. Bu nedenle karmaşık şekillere sahip seramik üretimi için 3 boyutlu baskı teknolojileri daha dikkat çekici hale gelmiştir [31].

2.3.4. Beton

Eklemeli imalat teknolojisi, inşaat sektöründe de kullanılmaktadır. Bina yapılarının katmanlı imalatında kullanılan ana yöntem olarak, mürekkep püskürtmeli baskıya benzer bir yapı kontur çalışması olarak geliştirilmiştir [32].

2.4. HÜCRESEL MALZEMELER (DOLGU GEOMETRİLERİ)

Hücresel malzeme gözenekli ya da içi boş malzeme olarak da kabul edilmektedir. İnsanlar tarafından yapılmış veya organik olarak oluşan birçok hücresel materyaller bulunmaktadır. Çizelge 2.5'te özetlendiği gibi pek çok uygulama alanları görülmektedir. Örneğin; Sünger, balsa ağacı, mantar, trabeküler kemik gibi yapılar, doğal hücresel malzemelerdir. Hücresel materyallerin bir başka adı da meta-materyaldir. Hücresel malzemeler, fiziksel ve mekanik özelliklerin ilginç kombinasyonlarına sahiptir. Doğada yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk gerektiren uygulamalarda hücresel malzemelere sıklıkla rastlanmaktadır. Örneğin kuşların yorgunluk belirtisi olmadan uzun mesafelere uçuşması gerekmektedir, kuşların kemik yapılarına bakıldığında kemiklerinin hava cepleriyle oyuk olduğu görülmektedir ve bu sayede ağırlıkları minimuma düşürülmüştür [33].

Çizelge 2.5. Hücresel malzemelerin bazı uygulama alanları.

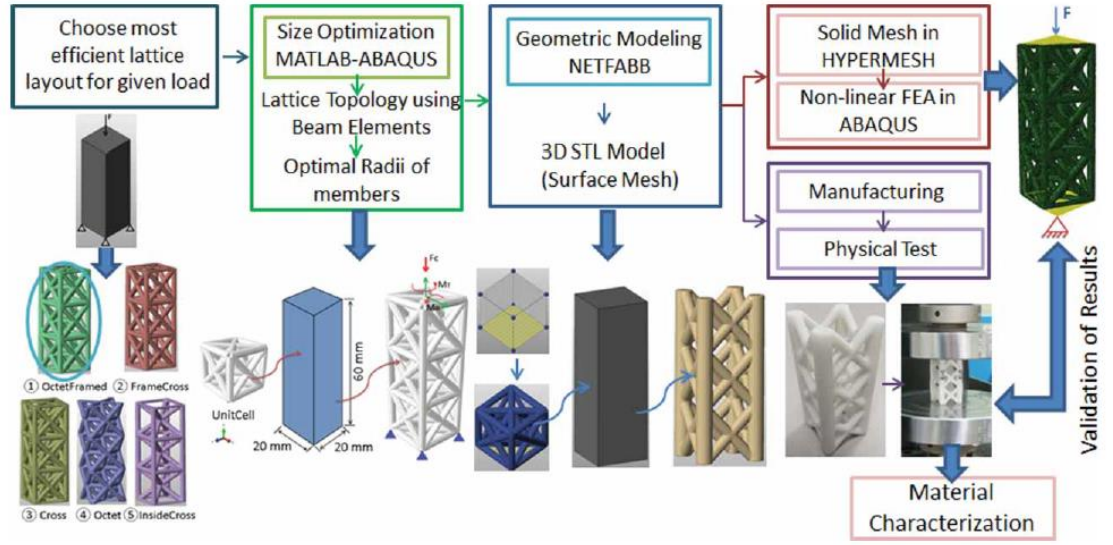
Uygulama alanı	Açıklama
Yalıtım	Kahve ve çay bardakları, uzay mekiği ateşleyicileri, modern binalar (ısı ve ses yalıtımı), transport sistemleri (özellikle soğutuculu araçlar), radar sistemlerde (elektro manyetik dalga korunması)
Filtreleme	Klimalar, Metal döküm sanayi (döküm içindeki yabancı maddelerin açık hücreli seramik köpükten geçirilerek temizlenmesi)
Paketleme	Taşımacılık sektörü (ürünlerin korunması amacıyla kaplanması)
Enerji sönmleme	Transport sistemleri (darbeyi sönmlemek için), ulaşım araçları, taşımacılık, nükleer santral vb.
Yapısal uygulama alanları	Sandviç yapılar, ince cidarlı tüpler (bu yapılarda hücreli malzemeler dolgu malzemesi olarak kullanılır)

Hücresel malzemeler genel olarak iki ana gruba ayrılır:

- 1) Stokastik yapılar (köpükler), gözeneklilik tipi açık hücre veya kapalı hücreye göre sınıflandırılır,
- 2) Stokastik olmayan yapılar, 2D kafes birimi (bal peteği) veya 3D kafes birimine göre kategorize edilir [34].

Hücresel yapılar, yapının şekline göre de düzenli (regular), sahte gelişigüzel (pseudorandom) ve gelişigüzel (random) olarak sınıflandırılmaktadır. Düzenli hücresel yapılar, tüm tasarım hacminde birim hücrenin basit bir tekrarından oluşurken, sahte gelişigüzel dağıtılmış yapılar ise hem çeşitli boyut ve geometri ile birlikte topolojinin korunmasını sağlamaktadır. Sahte gelişigüzel yapılar da kendi içerisinde çarpık ve koruyucu yapılar olmak üzere iki alt sınıfa ayrılmaktadır

Dolgu geometrisi, hacimsel bir bölge üzerinde belirli bir yinelenen düzenlemeyle kesişen payandalar ve düğümler oluşturan tekrar eden bir birim hücreye sahip kafes kiriş benzeri bir yapıdır. İçi boş, dairesel, kare veya istenen herhangi bir şekil kesiti olsun, bu dikmelerin iç tasarımı uygulamaya ve daha spesifik olarak güç ve sertlik gereksinimlerine bağlıdır. Köpükler, petekler, kafesler ve benzeri yapılar dahil olmak üzere hücresel yapılar kavramı, mukavemet ve enerji emilimi gibi yüksek spesifik mekanik özellikleri korurken hafif bir yapı elde etmek için malzemeyi sadece bir parçanın hayati bölgelerinde tutmaktan gelir. Dolgu geometrili hücresel yapılar, hafif ve daha güçlü malzemeler sağlama yetenekleri nedeniyle köpüklere göre doğal avantajlar sunmaktadır. Şekil 2.8'te dolgu geometrili hücresel yapılar için önerilen tasarım prosedürü gösterilmektedir [35-37].



Şekil 2.8. Dolgu geometrili hücresel yapılar için önerilen tasarım prosedürü.

Dolgu geometrilerinin kullanım alanı giderek artmaktadır. Otomotiv ve havacılık endüstrilerinde ağırlıkları düşürmek, ısı yalıtımını arttırmak, gürültü ve titreşimi minimize etmek, kemik dokuya benzer mekanik özellikleri karşılamak ve medikal implantların osseointegrasyonuna yardımcı olmak amacıyla kullanılmaktadır [38].

Hücresel yapı, mekanik özellikler, hafiflik ve maliyet açısından birçok endüstriyel alanda önem arz etmektedir. Yüksek mukavemet ve düşük ağırlık özelliği bu yapıların sağladığı en önemli üstünlüktür. Özellikle havacılık endüstrisinde maliyetleri düşürüp tasarruf sağlamak ve hava araçlarının performanslarını iyileştirmek amacıyla eklemeli imalat yöntemiyle üretimi mümkün olan hücresel yapılar ön plana çıkmaktadır [39].

Hücresel yapıların mekanik özellikleri 4 ana değişkene bağlıdır. Bu değişkenler tasarım ve üretim sürecinde dikkat edilmesi gereken temel unsurlardır [40]. Bunlar;

- Yapıda kullanılan birim hücre boyutu
- Kolon kalınlığı
- Kullanılan malzeme
- Hacimsel boşluk oranıdır

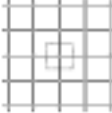
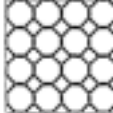

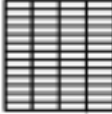


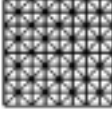



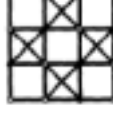




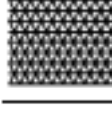
Hücresel yapıların numune şekli ve numune boyutlarının belirlenmesinde ve basma testi kriterlerinde ASTM E-09 ve ISO 13314:2011 standartları geçerlidir. Bu standartlara ait uyulması gereken sayısal veriler Çizelge 2.6’da verilmiştir [41].

Çizelge 2.6. Hücresel yapıların tasarımına ait standartlar ve standartlara ait değişkenler.







Standart	Numune Şekli	Numune boyutları oranı (Uzunluk/Çap)	Gerilme hızı (m/dk.)
ASTM E9	Silindir	1,5 veya 2	0,005
ISO 13314-2011	Silindir-Küp	1-2 aralığında	0,06- 0,6 aralığında

Hücresel yapılar birim hücrelerinin geometrilerine göre kübik, sekizli kafes, üçlü periyodik minimal yüzeyler ya da diğerleri olarak da 4 alt sınıfa ayrılmaktadır. Kübik hücresel yapıların da, basit kübik (simple cubic), gövde merkezli kübik (body-centered cubic), katkılı gövde merkezli kübik (reinforced body-centered cubic) gibi türlerinin hepsi de aynı kübik hücredeki giriş sayılarının artmasıyla elde edilmektedir. Sekizli kafes yapı ise yüzey merkezli hücreden oluşmaktadır. Diğer sık kullanılan hücreler ise Gibson-Ashby hücresi ve Wallach-Gibson hücresidir [42].

İki Boyutlu Kafes Topolojileri

Hücre Geometrisi	Hücre Adı	Referans	Hücre Geometrisi	Hücre Adı	Referans	Hücre Geometrisi	Hücre Adı	Referans
	Kare hücre	Hayes vd., 2004			Sigmund, 1994			Sigmund, 1994
	Dikdörtgen Hücre	Hayes vd., 2004			Sigmund, 1994			Sigmund, 1994
	Kare ve üçgenlerden oluşan süper kare hücreler	Hayes vd., 2004			Sigmund, 1994		Üçgen-üçgen hücreler	Hutchinson ve Fleck, 2006
	Bal petek	Christensen, 2000			Sigmund, 1994		Üçgensel Hücreler	Hutchinson ve Fleck, 2006
	Kagome	Christensen, 2000		Yıldız Hücreler	Christensen, 2000		Elmas Hücre	Fan vd., 2009
	Eşit üçgenlerden oluşan süper hücreler	Hayes vd., 2004						

Üç Boyutlu Kafes Topolojileri

	Octet-truss	Deshpande vd., 2001a		Çevresel kübik Hücre	Fischer, 2007		Radyal Kübik	Hongqing, 2005; Fischer, 2007
	Weaire-Phelan Hücreleri	Weaire ve Phelan, 1994		En basit köpük hücresi modeli	Gibson ve Ashby, 1997		Kelvin Hücreleri	Gabbielli, 2009

Şekil 2.9. Literatürde karşılaşılan hücre topolojilerinin bir özeti [43].

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hafif ve güçlü yapılar, otomotiv ve havacılık dahil olmak üzere çeşitli endüstriler için ilgi çekicidir. Hücresel malzemelerin düşük ağırlık, yüksek sertlik ve mukavemet, önemli enerji emilimi ve köpükler, dolgu geometriler ve petekler dahil olmak üzere çok çeşitli benzersiz kombinasyonlara sahip olduğu uzun zamandır gösterilmiştir. Ek olarak, uygun şekilde tasarlandığında, malzeme yapısındaki açık boşluklar aktif soğutma veya enerji depolaması için kullanılabilir ve çok işlevlik için benzersiz fırsatlar sunar. Gösterilen hücresel yapılar bağlarında, dolgu geometrili yapılar son zamanlarda potansiyeli üstün bir sınıf olarak karşımıza çıkmaktadır. Ne yazık ki, bu dolgu geometrili yapıların döküm veya kalıplama gibi geleneksel imalat tekniklerini kullanarak üretilmesi çok zordur, çünkü bunlar çok karmaşık düğüm geometrisi (Örn., köşe, yarıçap ve kalınlık varyasyonları) içerirler. Mevcut dolgu geometrili yapıları ya birden çok adımda dökülür ya da aletli bir yaklaşım kullanılarak oluşturulur, bu da üretim için zaman birimi başına yalnızca az sayıda hücreyi mümkün kılar [44-47].

Eklemeli imalat (Eİ) son gelişmeler, dolgu geometrili yapılar gibi yüksek karmaşıklığa sahip parçaların nispeten kısa zaman ölçeklerinde inşa edilmesine izin vermektedir. İlk ürün geliştirmede görsel amaçlar için üretilen eklemeli imalat parçaları, yıllarca işlevsel olmayan prototipler olarak kullanıldı. Teknoloji ilerledikçe, eklemeli imalat giderek daha fazla endüstriyel müşteriye hizmet verme potansiyel becerisinde büyük gelişmeler gördü. Eklemeli imalat teknikleriyle üretilen parçaların kalitesi, yüksek karmaşıklığa sahip parçalar için geleneksel yöntemlerle aynı veya daha iyi olmaya başlamıştır. Örneğin, seçici lazer eritme (SLM) işlemi, geleneksel üretim tekniklerinin sağlayamayacağı gelişmiş kalitede dolgu geometrili yapılar üretir. Bu nedenle, gerçek dünya uygulamalarını veya üretim gereksinimlerini karşılayan parçaları imal etmek için artık eklemeli imalat teknikleri kullanılmaktadır. Askeri jet avcı uçaklarında kullanılan hava kanalları gibi karmaşık ve hafif yapılar, geleneksel tekniklerle üretilen çoklu parçalarla birleştirilmek yerine, eklemeli imalat teknikleri kullanılarak tek bir bileşen olarak tasarlanabilir. Özel mikro yapılara sahip hücresel

bileşenler, kemik replasman implantları için yüksek bir kalite seviyesi ile eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilir [48-50].

Deshpande vd., sekizli-kafes kafes yapılarının özelliklerini araştırmak için hem deneysel hem de teorik teknikler kullanmış, bu kafes yapılarının mukavemet ve sertlik özelliklerinin esnemenin baskın olduğunu göstermişler ve sekizli kafes yapılarının hafif tasarımda önemli bir potansiyel sunduğu sonucuna varmışlardır. Eklemeli imalat teknolojisindeki gelişmeler, endüstriyel uygulamalar için karmaşık şekillere sahip kafes yapıların üretilmesine de olanak sağlamıştır. Kafes tabanlı hücresel yapıların tasarımı, yukarıda bahsedilen mekanik avantajları ve eklemeli imalat tekniklerini kullanarak üretimin ortaya çıkması nedeniyle hem araştırma hem de endüstriyel uygulamalarda son on yılda hızlı bir gelişme göstermiştir [51].

Johnston vd., sekizli kafes yapısındaki her bir dikme elemanını bir kiriş elemanı olarak ele alarak kapsamlı bir analitik model sağlamışlardır. Yazarlar ayrıca, kiriş elemanlarını kullanan sonlu eleman (FE) modellerinin, eklemeli imalat teknikleri ile üretilen kafes yapıları için deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında kabul edilebilir doğruluk sağladığını göstermişlerdir [52].

Harryson vd., kiriş elemanı tabanlı sonlu elemanlar (FE) modelleri ve deneyler arasında daha iyi bir uyum sağlamak için destekler üzerindeki geometrik kusurların da modellenmesi gerektiğini belirtmişlerdir [53].

Gorgularslan vd., kafes yapılarının daha ince ölçek seviyelerinde eklemeli imalat işleme parametrelerinin neden olduğu geometrik belirsizlikleri hesaba katmak için çok seviyeli bir ölçek büyütme yöntemi önermiştir. Elde edilen kafes yapılarının kiriş elemanı tabanlı sonlu elemanlar (FE) modelleri, deneylerle karşılaştırılabilir sonuçlar sağlamıştır [54].

Segebade vd., eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg malzemelerde birikme yöntemine bağlı anizotropik malzeme deformasyon davranışlarını belirlemek için numunelere çekme testleri uygulayarak karakterize etmişlerdir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 2B kesme simülasyonlarında da uygulamalarda bulunmuşlardır. Ek olarak,

simülasyonları doğrulamak için ortogonal kesme deneyleri yapılmıştır. Araştırmacılar sonlu elemanlar yöntemini baz alan simülasyonlarda birim şekil değişim miktarı, şekil değişim hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak akış gerilimini hesaplamak için Johnson-Cook malzeme modelini kullanmışlardır. Kullanılan Hill 1948 anizotropi modeli en basit modellerden birisi olmasına rağmen talaş geometrisinin eğilimlerini ve talaş segmentasyon davranışlarını simülasyonlarda doğru bir şekilde gözlenmesini sağlamıştır [55].

Yang vd., yaptıkları çalışmada elektron ışın ergitme (EBM) metoduyla Ti6Al4V malzemedeki, ökzetik davranış gösteren 3B re-entrant basma numuneleri üretmişlerdir. Bu basma numuneleri maksimum kapasitesi 100 kN olan basma test cihazı ile 1,27 mm/dakika'lık sabit birim şekil değişim oranı ile toplam birim şekil değişimi %50 olana dek teste tabi tutulmuşlardır. Yapılan bu çalışma sonucunda, kiriş yüksekliğinin (h), kiriş uzunluğuna (l) oranının ve kiriş açısının (Θ), yapının mekanik özelliklerini önemli düzeyde etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca aynı çalışmada, ilgili yapının poisson oranı, bağıl yoğunluğu ve efektif modülü de belirlenmiştir [56].

Panda vd., eriyik yığılma modelleme (EYM) yöntemi ile ürettikleri balpeteği yapısındaki hücresel yapıların duvar kalınlığı ve hücre boyutu gibi tasarım parametrelerinin, hücresel yapıların akma dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerine etkisini deneysel olarak incelemiştir [57].

Ingrole vd., honeycomb ve re-entrant yapıların yanı sıra her ikisinin de bir arada bulunduğu hibrit yapılar modellemiştir. Daha sonra, bu modelleri ABS malzemedeki EYM metoduyla üreterek 250 kN kapasiteye sahip basma test cihazı ile 2 mm/dakika basma hızında basma testlerini gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçları da sonlu elemanlar analizi ile desteklemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ökzetik-kiriş tasarımının re-entrant ökzetik yapıya göre %65, honeycomb yapıya göre ise %300 daha fazla basma dayanımı gösterdiği ifade edilmiştir. Toplam absorbe edilen enerji miktarına bakıldığında, ökzetik-kiriş yapının honeycomb yapıya göre %70, re-entrant ökzetik yapıya göre ise %30 daha fazla enerji absorbe ettiği görülmüştür. Ayrıca, absorbe edilen spesifik enerji bakımından da diğer geleneksel yapılara göre %13 daha fazla enerji absorbe ettiği belirtilmiştir. Elastisite modülleri incelendiğinde

ise re-entrant özkütük ve honeycomb yapının, re-entrant kiriş yapısına göre daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olduğu rapor edilmiştir. Diğer yapılarından daha önemli seviyede öne çıkacak performanslar sergilemediği ifade edilmiştir [58].

Yaman'ın yaptığı çalışmada oranları %40 PLA ve %60 ABS olarak üretilen yeni malzemeden FDM basılan numunelerden elde edilen çekme sonuçlarına göre doluluk oranının düşürülmesiyle çekme mukavemet değeri %60'a kadar düşebilmektedir [59].

Eklemeli imalat teknolojisi, yapılan çalışmalar göz önüne alındığında yeni bir teknoloji olmasının da etkisi ile bazı sınırlamalara maruz kaldığı açıkça görülmektedir. Fakat bu sınırlamalara karşın son ürüne ulaşmada ve hızlı prototip hazırlamada, zaman ve maliyet tasarrufu ile diğer imalat yöntemlerinin önüne geçmektedir. Bunun yanı sıra kompleks parça üretiminde talaşlı imalatın el verişsiz olduğu yerlere imdat niteliğinde yetişmektedir. Bu sebeplerden ötürü gelecekte vazgeçilmezimiz olacağı aşıkardır [60,61].

Bu tez kapsamının konusu ile ilgili olarak literatürdeki eklemeli imalat yöntemlerini konu alan çalışmalardan bazı örnekler aşağıda sunulmuştur.

Eriyik yığma modelleme, Fused Deposition Modelling olarak bilinmekte olup bu teknolojiye filament olarak bilinen, makara üstüne sarılı olarak piyasada mevcut olan tel şeklinde hammaddeler kullanılır. Bu hammaddeler makinenin ekstrüzyon başlığında ısıtılarak 0,2 – 1 mm çapındaki nozullardan sıvı halinde akması sonucu numune oluşturulur. Bu imalat sürecinde ısı ve hız kontrol altında tutulabilmektedir. Her bir katmanın kalınlığı bağlı olduğu etkenlere (sarf malzemesi, nozul çapı, hız, ekstrüzyon basıncı) göre değişebilir. Katman kalınlığı meme çapına göre genelde 0,15 – 0,5 mm arasında değişir, yol genişliği 0,20 – 6 mm arasında değişmektedir. Filamentlere ise 1,75 – 3 mm çaplarında ulaşabilmek mümkündür [62-64].

Saadlaoui vd., metal bir küp ele alarak topoloji optimizasyonunu yapmış ve çıkan sonuçlara bağlı kalarak farklı geometrilere tasarımı gerçekleştirmiştir. Elde edilen tasarımların bilgisayar ortamında analizleri yapıldıktan sonra SLM tekniği ile üretilmiştir. Numuneler üzerinde yapılan fiziki testler sonucunda en uygun olan

tasarım belirlenmiş, sonuç olarak elde edilen ürünün klasik imalat yöntemleri ile üretilmeyeceği ama yine eklemeli imalat yöntemleri sayesinde karmaşık geometrilerin üretiminin mümkün olduğunu bizlere göstermişlerdir [65].

Son yıllara bakıldığında inşaat sektöründeki eklemeli imalat yöntemlerinin kullanımı artış göstermektedir. Eklemeli imalat yönteminin kullanımı ile özellikle bu sektörde imalat süresinin ve kullanılan sarf malzemenin minimuma indirilmesi, geometrik şekil sınırlamalarına maruz kalmaksızın üretim yapılması gibi avantajlar sağlanmıştır. Eklemeli imalat yöntemlerinden kil eklemeli üretim yöntemi olan Robotic Additive Manufacturing (RAM) inşaat sektöründe kullanımının yaygınlaştırılması sektörün yararına olacaktır [66].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde eklemeli imalat yöntemi kullanılarak bir kalıba ihtiyaç duymaksızın üretim yapılabilmektedir. Buda kalıp maliyetlerinin ortadan kalkarak hızlı bir şekilde ürüne ulaşabilmek demektir [67].

Bu tez kapsamında elde edilen verilerden biri de eklemeli imalat yönteminin sağlık sektöründe de işe yarar bir imalat yöntemi olduğu sonucudur. Eklemeli imalat yöntemi ile deneysel ve eğitim çalışmaları için insan vücudunda bulunan yapıların modellenmesinde ucuz ve yüksek kalitede üretim yapılabilmektedir. Bu yöntemle sağlık sektöründe kişiye özel ihtiyaçlara klasik imalat yöntemlerinin aksine cevap vermektedir [68].

Ağız ve diş sağlığı kapsamında implant tedavisinde eklemeli imalat yöntemlerinin kullanılabilirliği tartışılmaktadır. Günümüzde implantların imalatında kullanılan standart ölçüler her insanın ağız yapısına uyum göstermemektedir. Bunun sonucuna bakıldığında da eklemeli imalat yöntemi ile kişiye özel implant üretiminin öncelikle kişinin ağız yapısının taranıp ardından bilgisayar destekli ortamda CAD modellenerek tasarımının yapılması mümkündür. Ve bu sayede analizler yapıp gerilme ve deformasyonların bilgisayar ortamında gözlenebilmesine imkan sağlamaktadır. Tasarımı yapılan implant uygun malzemeler kullanılarak 3B yazıcılarda eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmektedir [69].

Eklemeli imalat yöntemleri birçok alanda olduğu gibi sinemacılık sektöründe de kullanılmaya başlanmıştır. Sinema filmlerinde çevre, araç ve karakter tasarımlarında kullanılan bu imalat yöntemi bir filmin tasarlanmasında zamandan tasarruf etme avantajını sağlamıştır [70].

Atzeni ve Salmi, Piaggio P180 Avant II model uçağın iniş takımı parçasını hem geleneksel hem de eklemeli imalat yöntemleriyle üretmiş ve iki farklı üretim metodunu maliyet-etkinlik bakımından kıyaslamışlardır. İki farklı yöntemle de üretilen parçaların mukavemet değerleri birbirleriyle neredeyse aynıdır. Aynı zamanda eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçalarda hammadde ve enerji tasarrufu sağlandığı gözle görülür derecede fark edilmiştir [71].

Kam vd., eklemeli imalat teknolojisi kullanarak PET-G malzemeden farklı hücresel yapılarda 50mm/sn hızda, diğer çalışma parametrelerini sabit tutarak numuneler üretmişlerdir. Numuneler üzerinde çekme testi, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü analizleri yapmışlardır. Sonuca göre doğrusal hücre yapısına sahip numunelerin üçgen ve petek hücresel yapıları numunelere göre daha fazla gerilme mukavemeti ve yüzde uzama gösterdiği ve görülmüştür [72].

Eklemeli imalat teknolojilerinde doluluk oranı ile ilgili yapılan bir çalışmaya göre PET ve PLA (poliaktik asit) malzemeden üretilen numunelerin çekme testi ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının birbiri ile ters orantılı olduğu görülmüştür [73].

Çelebi vd., PLA polimer malzemeden 3 farklı doluluk oranında (%5, %50 ve %100) üretilmiş numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yazarlar çalışma sonunda çekme dayanımlarında %50'ye varan farklılıklar olduğu ve oluşan bu farklılıkların nedeninin yazdırma işlemi sırasında meydana gelen mikro çatlaklar olduğu sonucuna ulaşmışlardır [74].

Özdemir vd., PET ve PLA malzemeler kullanarak %10, %20, %30 ve %50 doluluk oranlarında numuneler hazırlamış ve bu numunelere tek eksenli çekme deneyi yapmış, sertlik ve yüzey pürüzlülük değerlerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda PET

ve PLA malzemelerin sertlik değerinin malzemelerin doluluk oranı arttıkça arttığı sonucuna ulaşmışlardır [75].

Çantlı vd., ABS polimer malzeme kullanarak %100 sabit doluluk oranında farklı yazdırma hızlarında (30- 70 mm/s) ve farklı işlem sıcaklıklarında (230°C, 240°C ve 250°C) numuneler üretmişlerdir. Üretilen numunelerin Shore-D sertlik değerlerini ve çekme dayanımlarını belirlemişlerdir. Çalışma sonunda baskı hızı artırıldığında parça geometrilerinde hatalar meydana geldiği ve ideal yazdırma hızının 50mm/s olduğu sonucuna ulaşmışlardır [76].

Bacak vd., FDM yöntemi ile 3B yazıcı kullanarak üretilen PLA numunelerin mekanik özelliklerden olan çekme dayanımına işlem parametrelerinin etkisi belirlenmesi amaçlamışlardır. İşlem parametrelerinde iki farklı doluluk oranı (%20 ve %100), üç farklı baskı hızı (100,150 ve 200 mm/s), üç farklı nozul sıcaklığı (180, 205 ve 220°C) ve üç farklı desen çeşidi (Cubic, Grid, Triangle) kullanmışlardır. Çalışmada, %20 doluluk oranına göre %100 doluluk oranında daha yüksek çekme gerilmesi elde etmişlerdir. %20 doluluk oranındaki numuneler kendi aralarında kıyaslandığında elde edilen en yüksek çekme gerilmesi 220 °C nozul sıcaklığında, 100 mm/s baskı hızında yapılan Gyroid desende 43,12 MPa olarak ölçmüşlerdir. % 100 doluluk oranındaki en iyi sonuç ise 220 °C de, 100 mm/s baskı hızında üretilen numune 59,21 MPa çıkmıştır. Çalışmada %20 doluluk oranındaki numuneler için istatistik analiz yapılmış, varyans analiz (ANOVA) yöntemi sonucu güven düzeyi %94,4 elde etmişlerdir [77].

Hüresel yapılar, genel olarak stokastik ve periyodik hüresel yapılar olarak sınıflandırılır. Bir birim hücre içinde katı malzemenin ve boşlukların farklı dizilimlerde bulunması ile oluşan yapılardır. Stokastik hüresel yapılar, köpük malzeme gibi rasgele bir dizilime sahiptir. Periyodik hüresel yapılar ise kafes yapılar olarak da tanımlanır ve birbirine bağlı çubuk veya plaka şeklindeki düzenli eleman ağına sahip birim hücrelerden oluşur [78,79].

Kafes yapılar, periyodik dizilimden dolayı, diğer hüresel yapılara göre daha iyi mekanik özellikler göstermektedir. Ek olarak kontrolü sağlanabilen hücre topolojisi sayesinde malzemenin nasıl davranış sergileyeceği tahmin edilebilir olup, bu durum

çalışma ortamlarına uygun parçaların imalatını mümkün kılmaktadır. Periyodik hücre malzemelerde kullanılan birim hücre topolojileri, destek, iskelet ve levha temelli olarak üç farklı sınıfa ayrılmaktadır. Kafes yapılar son dönemlerde eklemeli imalat alanındaki gelişmeler sayesinde havacılık, otomotiv ve biyomedikal endüstrilerinde kullanılmaktadır. Bunun sebebi hafif ama dayanımı, darbe sönümlemesi, ses izolasyonu veya ısı yalıtımı yüksek yapılar geliştirmek için kullanışlı olmasıdır [80-83].

Gorgularslan vd. tarafından hafif uygulamalar için hücresel tabanlı kafes yapıların tasarımı için entegre bir çerçeve önerilmiştir. Bu bağlamda, hücresel yapıların doğrusal olmayan analizini kolaylaştırmak için katı elemanlara sahip yeni bir FE modelleme tekniği ile etkili bir optimizasyon prosedürü uygulanmıştır. Önerilen metodolojinin etkinliği, hafif uygulamalar için yük taşıma performansını arttırmak üzere periyodik kafes hücreli bir basma bloğunun tasarımı ile gösterilmiştir. Özellikle, iki farklı 3D baskı işleminde kullanılan iki farklı materyalin izotropik malzeme özellikleri (SLS'de Naylor 6 ve FDM'de Naylor 12) tahmin edilmiştir. Önerilen modelleme tekniğinin uygulanabilirliği, doğrusal olmayan simülasyon sonuçlarının basma testi sonuçları ile doğrulanmasıyla gösterilmiştir [84].

Efe, yük taşıma sistemlerinde kullanılan gözlü kancayı farklı üretim parametrelerinde (doluluk oranı ve iç örme yapısı) FDM esaslı eklemeli imalat teknolojisiyle üreterek yük taşıma kabiliyetini araştırmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilen parça üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. Deneyler sonucunda kırılma başlangıcı ve sonlu elemanlar analizi ile belirlenen gerilmenin maksimum olduğu alanda iç örme yapısında iyileştirmeler yapılarak kancanın yük taşıma kapasitesindeki değişimler karşılaştırılmıştır. Çekme testleri sonucunda, doluluk oranı arttıkça kancanın yük taşıma kabiliyetinin arttığı belirlenmiştir. Ek olarak, doluluk oranına bağlı olarak Rectilinear dolgu deseninin Honeycomb dolgu desenine göre yaklaşık %20-60 oranında daha yüksek taşıma kabiliyeti sağladığı görülmüştür [85].

Habib vd., altı farklı hücre topolojisi kullanarak üretilen numuneler için sonlu elemanlar analizi (FEA) ve yarı statik basma testleri uygulayarak, yapıların elastikiyet modülü, maksimum dayanım ve enerji sönümleme kabiliyetlerini araştırmışlardır.

Deney numuneleri, Multi Jet Fusion (MJF) eklemeli imalat yöntemi ile poliamid 12 malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Bu araştırmanın sonuçları, hücresel kafes yapılarının geometrisini değiştirmenin enerji yutma miktarlarını değiştirebileceği ve kontrol edilebileceğini göstermektedir. Araştırmacılar, 3D baskı teknolojisiyle üretilen hücresel kafes yapıların enerji sönümlemede stokastik köpüklerden üstün olduğunu belirtmişlerdir [86].

Kaur vd., çekme bazlı deformasyon sergileyen octet ve octahedral kiriş birim hücrelerinden oluşturulan yapıların çekme özelliklerini, deneysel ve sonlu elamanlar yöntemi kullanarak araştırmışlardır. Numuneler, FDM esaslı eklemeli imalat yöntemi ile Nylon 618, PLA ve karbon fiber takviyeli PLA (CFRPLA) malzemelerinden üretilmişlerdir. Basma testleri ve FEA sonuçları, en yüksek akma dayanımı, elastikiyet modülü ve enerji yutma kabiliyetinin CFRPLA'dan üretilen octahedral kiriş birim hücreli yapıda olduğunu göstermiştir [87].

Chen vd., bal peteği birim hücre bağlarının içerisine üçgen kafes yapıları yerleştirerek hiyerarşik hücresel yapı meydana gelmiş olup, basma yüklemesi altında mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deney numuneleri, PJ (Polijet) eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Eşit izafi yoğunluğa erişen normal bal peteği ve hiyerarşik bal peteği yapılarının basma testleri sonucunda, hiyerarşik bal petekli yapı normal bal petekli yapıya göre 6,6 kat daha fazla rijitlik ve 7,5 kat daha fazla enerji sönümleme kabiliyeti göstermiştir [88].

Cote vd., bir sandviç yapının dolgu malzemesi olarak saç plakalardan oluşturulmuş elmas ve oluklu kafes yapının kesme ve basma davranışlarını, sayısal ve teorik yaklaşımları da katarak incelemişlerdir [89].

Tatlı, 200x200x210 mm yazdırma hacmine sahip FDM teknolojisi kullanan 3 boyutlu yazıcı tasarımı ve imalatını yapmıştır. İmalatı yapılan 3 boyutlu yazıcı ile 5 farklı iç dolgu geometrisine sahip PLA (polilaktik asit) test numunesi üretmiştir. Bu numunelere çekme, darbe ve üç nokta eğilme testi yapılarak iç dolgu geometrisinin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir [90].

Kalelioğlu, katkısız poliamid 6 (PA6) polimerinin ve farklı tipte (kırpık elyaf, cam boncuk, yassı ve koza tipi elyaf) ve %30 oranında cam esaslı katkı içeren poliamid 6 (PA6) kompozitlerinin kristallenme davranışları nonizotermal şartlarda diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile incelemiş ve kinetik parametreler Ozawa, Avrami ve Liu-Mo modelleriyle belirlemiştir. Numunelerin kristalizasyon aktivasyon enerjilerini ise Kissenger modeli ile hesaplamıştır. Çalışma sonucunda, cam esaslı katkı ilavesinin PA6'nın kristallenme işlemini kolaylaştırdığı ve kristallenme hızını arttırdığı tespit edilmiştir [91].

3.1. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatür incelendiğinde, farklı birim hücre topolojilerine göre üretilen hücresel dolgu geometrili yapıları parçaların dayanım karakteristiklerinin çekme, basma, eğme gibi mekanik testler ile araştırıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda, termoplastik malzemelerden ABS, PLA ve Naylon esaslı deney numunelerinin üretimi için FDM, SLS, SLA, MJF gibi eklemeli imalat teknolojilerinin kullanıldığı tespit edilmiştir. Araştırmalarda, standartlara bağılı olarak üretilen hücresel dolgu geometrili parçaların mekanik davranışları çoğunlukla deneysel sonuçlara dayalı değerlendirilmiştir.

Önerilen tez kapsamında, literatürden farklı olarak hem dolgu geometrisi hem de parça yoğunluğunu temel alarak mekanik özellikler açısından en uygun hücre topolojisine sahip endüstriyel parçalar üretilmesine yardımcı olmak amacıyla deneysel çalışmalar yapılacaktır. Bu bağlamda, üç farklı hücre topolojisine (Octet, Gyroid ve Cross) göre farklı yoğunluk ve dolgu geometrili çekme, basma ve eğme deneyi için standart numuneler üretilecektir. Bu çalışmada, ABS'ye nazaran daha iyi mekanik özellikler sergileyen, kolayca renklendirilebilen ve tamamen geri dönüştürülebilir PLA malzeme kullanılması planlanmıştır. Böylece, hem deneysel çalışmalar için gereken maliyet ve harcanan zaman minimize edilecek hem de farklı bir polimer için optimum geometride hücresel yapıları parçaların üretimine öncülük oluşturacak deneysel veriler elde edilecektir.

BÖLÜM 4

MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. MALZEME VE HÜCRESEL YAPI

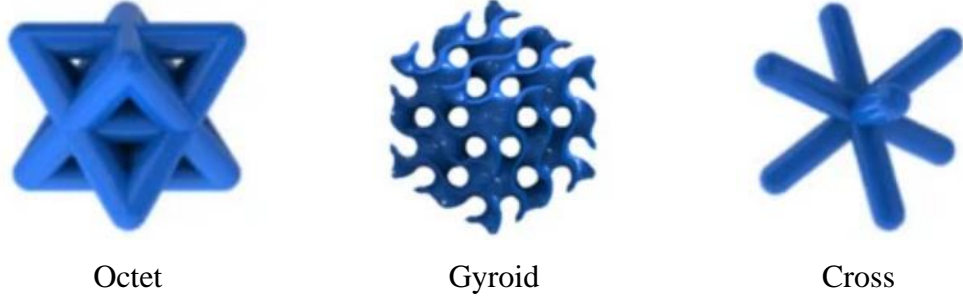
Bu tez kapsamında daha önce gerçekleştirilmiş olan çalışmalardan farklı olarak üç farklı birim hücre yapısı (dolgu geometrisi/deseni) belirlenmiştir. Bunlar Octet, Gyroid ve Cross'tur. Seçilen dolgu geometrileri ve üç farklı izafi yoğunluk oranı (%20, %30, %50) için hücresel yapılı numunelerin 3D CURA yazılımında parametrik tasarımları yapılmıştır.

Termoplastiklerden Polilaktik Asit (PLA) malzeme esaslı ile tasarlanan yapıların mekanik davranışları darbe, çekme ve basma deneyleri vasıtasıyla incelenmiştir. Bu bağlamda, standartlara göre tasarlanan numunelerin üretimi yapılırken, EYM baskı sıcaklığı sabit tutulmuştur (200 °C). EYM esaslı eklemeli imalat sürecinde, seçilen plastik malzeme için en uygun üretim parametreleri (baskı hızı, sıcaklık, inşa yönü vb.) literatürdeki çalışmalardan elde edilmiştir.

Numunelerin üretiminde kullanılan PLA filamentin çekme mukavemeti 43 MPa, darbe dayanımı 0.31 J/cm ve eğilme dayanımı 64 MPa'dır [92]. Malzemenin diğer özellikleri aşağıda verilmiştir.

- ABS'ye göre basımı oldukça kolaydır.
- Sert bir yapıya sahiptir. Dayanıklı ve darbelere karşı dirençlidir.
- Aseton ile çözümlenmesi zordur.
- Basım sıcaklığı genellikle 190°C – 220°C arasındadır.
- Soğuma esnasında kalkma ve çatlama sorunları ile karşılaşılmaz.
- Tabla sıcaklığı 50°C – 70°C arasında önerilmektedir.
- Bir kere ayarlanmış sıcaklık, tabla kalibrasyonu ve üretim hızı ile sorunsuz basım yapılabilir.

Bu çalışmada kullanılan dolgu geometrilerine ait birim hücre yapıları Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



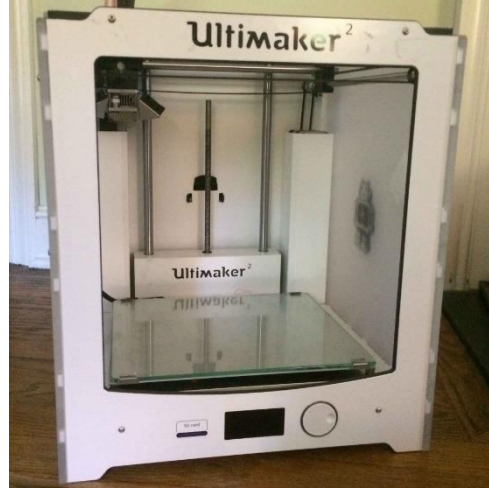
Şekil 4.1. Kullanılan birim hücre şekilleri.

4.2. NUMUNELERİN TASARIMI VE ÜRETİMİ

4.2.1. Basma Numunelerinin Tasarımı ve Üretimi

Farklı dolgu geometrili yapıların basma davranışlarının belirlenmesi için ASTM D695 standardına göre basma numuneleri üretilmiştir. ASTM D695 sert plastiklerin basma özellikleri için standart test metodudur. Basma numunelerinin çekirdek kısmında, Octet, Gyroid, Cross dolgu geometrileri kullanılmış olup, birim hücre ölçüsü 5x5x5 mm olacak şekilde modellenmiştir. Üç farklı dolgu geometrisine göre tasarlanan numunelerin her birinin dıştan dışa ölçüleri, 25mm×25mm×25mm olup, %20, %30 ve %50 olmak üzere üç farklı izafi yoğunlukta tasarlanmıştır.

Hücre malzemelerin mekanik davranışlarının karakterizasyonu için kullanılan en önemli özelliklerden biri izafi yoğunluktur. Bu çalışmada izafi yoğunluk değerleri, numunelerin ölçülerini değiştirmeden sadece hücre doluluk oranlarının değiştirilmesiyle ayarlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen basma numuneleri Ultimaker 3D baskı cihazında sabit sıcaklıkta (200 °C) PLA malzemedен EYM eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Her bir numune için 5 adet üretim yapılmıştır. Cihazın nozul çapı 0.25 mm olup, Şekil 4.2’de Ultimaker 3D yazıcı görülmektedir. Ayrıca, Çizelge 4.1’de basma deney numuneleri üretim sayısı verilmiştir.



Şekil 4.2. Ultimaker 3D yazıcı.

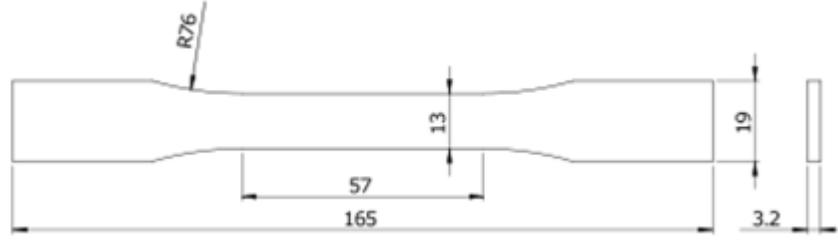
Çizelge 4.1.'de basma deney numunelerinin adetlerini göstermektedir.

Çizelge 4.1. Basma deney numunelerinin adetleri.

İzafi yoğunluk Dolgu deseni	%20	%30	%50
Octet	5 adet	5 adet	5 adet
Gyroid	5 adet	5 adet	5 adet
Cross	5 adet	5 adet	5 adet
Toplam			45 adet

4.2.2. Çekme Numunelerinin Tasarımı ve Üretimi

EYM ile üretilen numunelerin çekme özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D638'e göre numuneler tasarlanmıştır. ASTM-D638 standardı plastik malzemelerde, dikdörtgen kesitli deney numuneleri için standart bir test yöntemidir. Bu standartta takviyeli kompozitler, sert, yarı sert ve sert olmayan plastikler ve sert borular için kullanılabilecek birkaç test numunesi tipi vardır. Bunlar Tip I, Tip II, Tip III, Tip IV ve Tip V numuneleridir. Bu tez çalışmasında, çekme özelliklerinin belirlenmesi kısmında Tip I numuneye göre tasarım gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.3. Tip I Numune ölçüleri.

Ayrıca %20, %30 ve %50 farklı doluluk oranlarında numune üretimi yapılmıştır. Çekme numunelerinin çekirdek kısmında, Octet, Gyroid, Cross dolgu geometrileri kullanılmıştır. Numuneler Ultimaker marka 3B yazıcı kullanılarak, PLA malzemeden 200 °C işleme sıcaklığında üretilmiştir. Her bir numune tasarım şartı için 5 adet üretim yapılmıştır. Şekil 4.4'te örnek çekme numunesi gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Çekme numuneleri (Cross %30).

Çizelge 4.2'de çekme deney numunelerinin üretim adetleri verilmiştir.

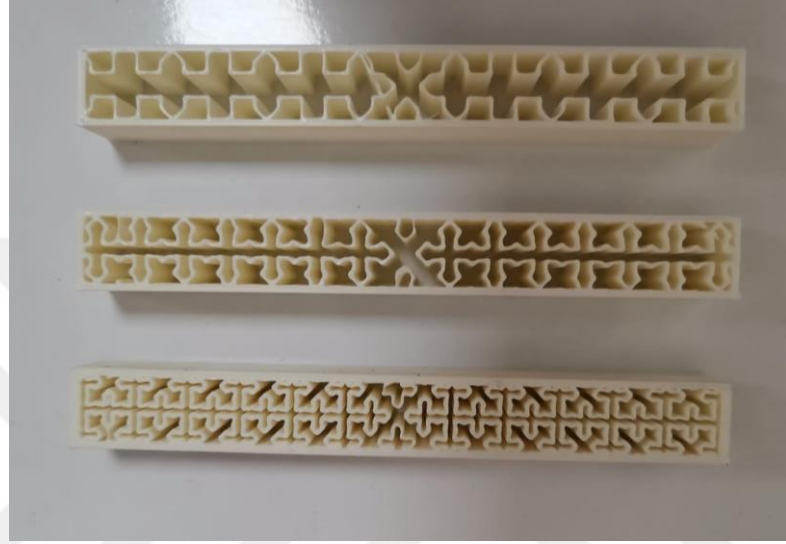
Çizelge 4.2. Çekme deney numunelerinin adetleri.

İzafi yoğunluk / Dolgu deseni	%20	%30	%50
Octet	4 adet	4 adet	4 adet
Gyroid	4 adet	4 adet	4 adet
Cross	4 adet	4 adet	4 adet
Toplam			36 Adet

4.2.3. Darbe Numunelerinin Tasarımı ve Üretimi

Numunelerin darbe davranışlarının belirlenmesi için ISO 179'a göre çentiksiz 10x10x80 mm boyutlarında %20, %30 ve %50 farklı izafi yoğunluklara sahip darbe

numuneleri üretilmiştir. ISO 179, sarkaç darbe test cihazları ile plastiklerin Charpy darbe dayanımını belirlemek için kullanılan standarttır. Darbe numunelerinin çekirdek kısmında, Octet, Gyroid, Cross birim hücre şekilleri kullanılmıştır. Numuneler Ultimaker 3B yazıcısı kullanılarak, PLA malzemedan üretilmiştir. Nozul çapı 0.25 mm olup, darbe numuneleri Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Darbe numuneleri (Cross %20, %30, %50).

Çizelge 4.3'te darbe deney numunelerinin üretim adetleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Darbe deney numunelerinin adetleri.

İzafi yoğunluk Dolgu deseni	%20	%30	%50
Octet	5 adet	5 adet	5 adet
Gyroid	5 adet	5 adet	5 adet
Cross	5 adet	5 adet	5 adet
Toplam			45 Adet

4.4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.4.1. Basma Deneyi

Farklı dolgu geometrisine sahip PLA esaslı yapıların basma testleri, katı hücreli plastiklerin basınç özelliklerinin belirlenmesi için standart test yöntemi olarak kullanılan ASTM D1621'e göre gerçekleştirilmiştir. 3D baskılı numuneler 25x25x25 mm olacak şekilde üretilmiştir. Testler, Instron çekme-basma test makinesinde sabit yükleme hızında yarı statik basma testleri olarak yapılmıştır. Yükleme hızı 2 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Testler baskı yapılan her bir numunenin baskı yönünde ve baskı yönüne göre 90° çevrilerek gerçekleştirilmiştir. Her numune için iki tekrar testi yapılmış olup, numuneler ve basma plakaları arasındaki temas yüzeylerinde yağlayıcı kullanılmamıştır.

4.4.2. Çekme Deneyi

ASTM D638 test standardına uygun olarak üretilen deney numunesi, test cihazına bağlanarak aksel olarak değişken kuvvetlere maruz bırakılmıştır. Çekme testleri, Instron Çekme cihazı kullanılarak yarı statik çekme testi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çekme cihazı, aşağı ve yukarı yönlü hareket edebilen deney numunesinin bağlandığı iki adet çene ve çenelere hareket veya kuvvet veren, şekil değişimi ve kuvvet miktarını ölçen ünitelerden oluşur. Çekme testi esnasında, çenelerden biri sabit hız ile hareket ettirilir ve çekme numunesine değişken miktarlarda çekme kuvveti uygulanır. Uygulanan bu çekme kuvvetine karşılık gelen uzama miktarı sensörler yardımıyla ölçülerek kaydedilir. Şekil 4.6'da çekme deneyi test cihazı görülmektedir.



Şekil 4.6. Çekme deneyi test cihazı.

Bu tez kapsamında daha önce yapılmış olan çalışmalardan farklı olarak test cihazında 2 mm/dk hızda aksenal çekme yükü uygulanmıştır. Elde edilen kuvvet-yüzde uzama eğrileri kullanılarak hasar yükleri tespit edilmiştir.

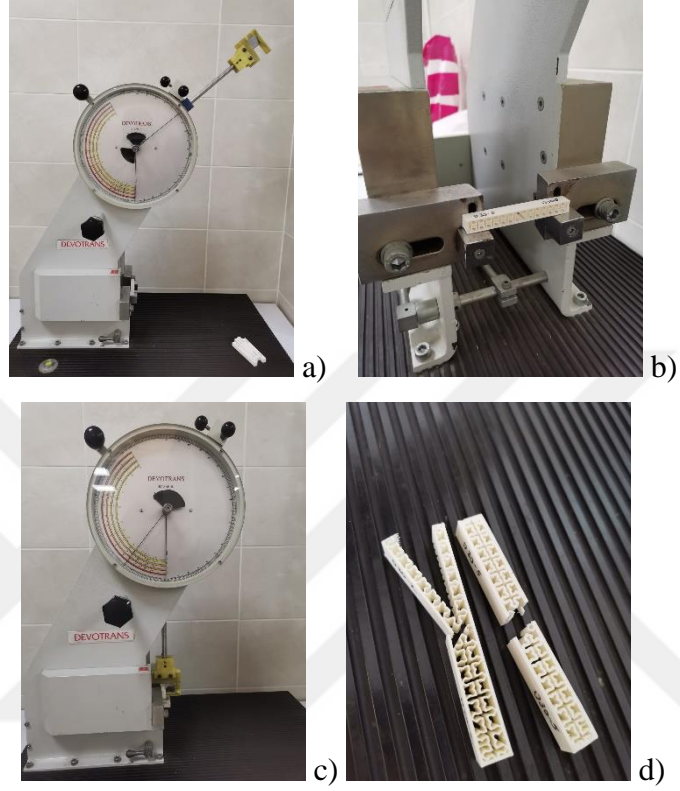


Şekil 4.7. Çekme deneyinin uygulanması ve numunelerin son hali.

4.4.3. Darbe Deneyi

EYM yöntemiyle üretilen numunelerin darbe dayanımlarının belirlenmesi için kullanılan ISO 179 standardına göre test edilmiştir. Numuneler için Charpy deneyleri, Devotrans sarkaç darbe test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Deneylerde, plastik malzeme fiziksel özelliklerine uygun 152,7 gr ağırlığında çekiç kullanılmıştır. 3D

baskılı numuneler 80x10x8 mm boyutlarında üretilmiştir. Numunelerin alt, üst ve yan yüzeylerine 0,5 mm kalınlığa sahip kabuk yapılar oluşturulmuştur. Şekil 4.8’de darbe deneyi testi işlem basamakları örnek olarak gösterilmiştir.



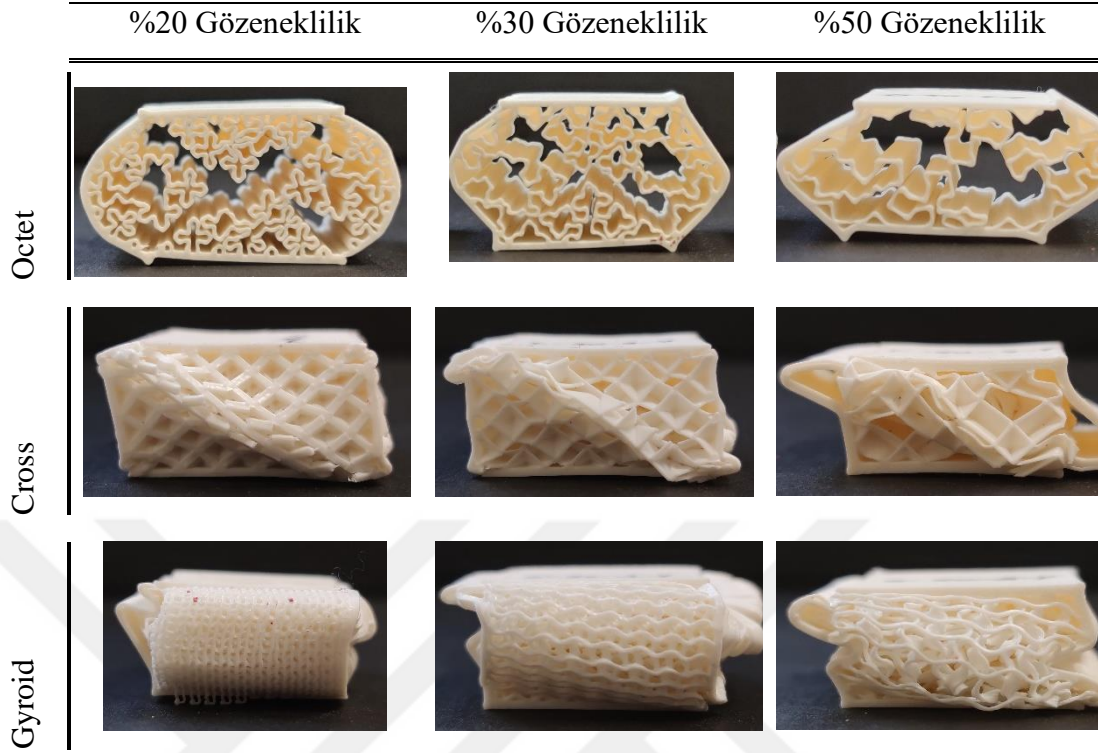
Şekil 4.8. Darbe deneyi uygulama aşamaları: a) Cihazın ilk konumu, b) Numune bağlama, c) Darbe uygulanmış konum, d) Deney sonrası numune görünümü.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. BASMA DENEYİ SONUÇLARI

Dolgu geometrisine göre numunelerin basma dayanımı değişimlerini belirlemek amacıyla her bir hücre yapısından altı numune basma testine tabi tutulmuştur. Bu işlemler için ASTM D1621 standardına göre numuneler hazırlanmış ve Instron çekme-basma test cihazı kullanılmıştır. Test esnasında numuneler baskı yönünde (yatay) ve baskı yönüne göre 90° döndürülerek (dikey) plakalar arasına yerleştirilmiştir. Numuneler ile plakalar arasına herhangi bir yağlayıcı uygulanmamıştır. Numunelerin basma testinden sonraki görünüşlerine örnekler Şekil 5.1’de verilmiştir. Octet, Gyroid ve Cross dolgu geometrisine sahip numunelerin gözenek oranlarındaki değişime bağlı olarak basma testi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramları sırasıyla Şekil 5.2-5.4’te verilmiştir. Numunelerin elastikiyet modülleri, basma gerilme-şekil değiştirme diyagramındaki elastik bölge göz önünde bulundurularak hesaplanmış ve Çizelge 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Basma deneyi sonucu numuneler.

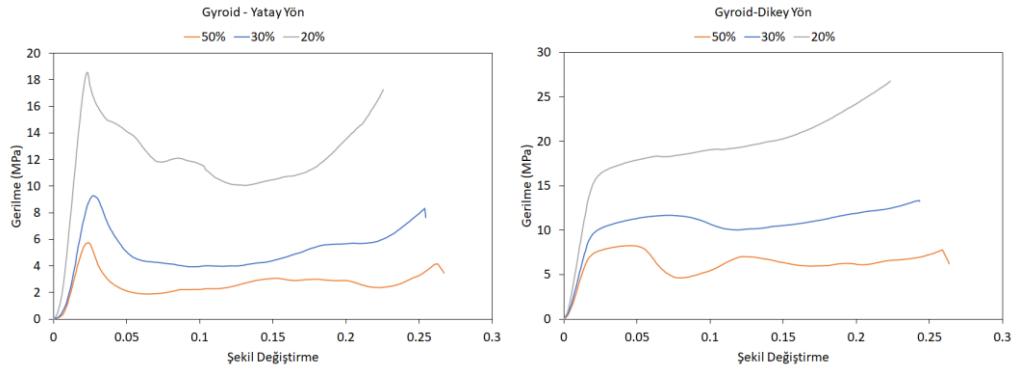
Çizelge 5.1. Basma testi sonucu elde edilen elastisite modülleri ve akma gerilmeleri.

		Elastisite Modülü (MPa)					
		Yatay			Dikey		
İzafi yoğunluk (%)		Cross	Gyroid	Octet	Cross	Gyroid	Octet
20		829.59	1107.5	135.42	874.4	926.77	1137.5
30		537.79	534.69	80.674	573.05	601.55	911.55
50		459.14	402.6	55.343	534.16	485.64	724.38
		Akma Gerilmesi (MPa)					
20		15.72	18.43	1.18	18.01	16.16	18.75
30		9.29	9.21	0.70874	10.71	9.83	13.08
50		8.18	5.58	0.64659	9.87	7.05	9.86

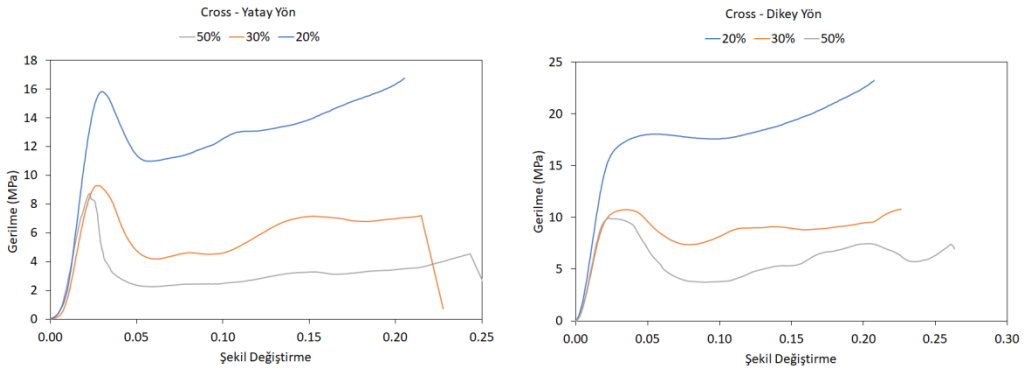
Hüresel yapıların ve malzemelerin basma testlerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramlarında yaygın olarak üç deformasyon bölgesi olduğu ifade edilmiştir. Bu üç bölge; akma öncesi aşama olarak adlandırılan elastik bölge, akma sonrası oluşan plato bölgesi ve nihai sıkışma bölgesi olarak adlandırılmıştır [93]. Şekil

5.2-5.4'te verilen gerilme şekil değiştirme diyagramlarında benzer şekilde elastik, plato ve nihai sıkışma bölgeleri elde edilmiştir. Plato bölgesindeki gerilme-şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak bu yapıların deformasyon davranışları gevrek veya sünek olarak sınıflandırılmıştır. Bununla birlikte, her bir dolgu geometrisindeki gözeneklilik oranı azaltıldığında PLA esaslı yapıların basma elastikiyet modüllerinin arttığı görülmüştür.

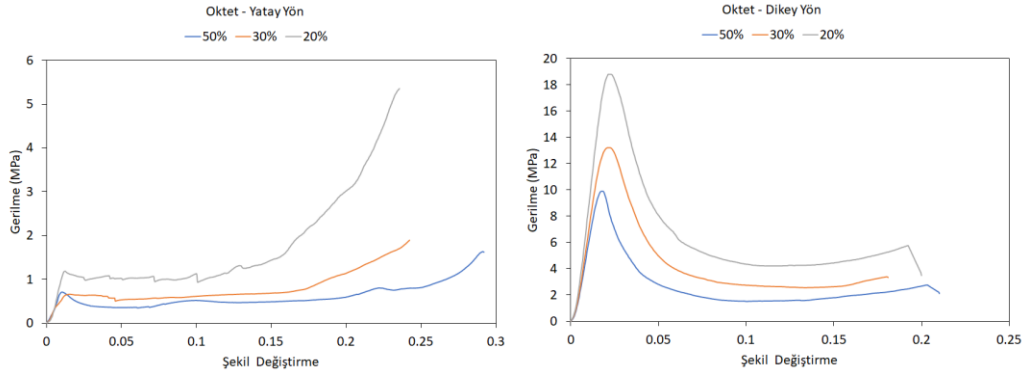
EYM ile üretilen numunelerde yapısal anizotropinin elastikiyet modülünü etkilediği ifade edilmiştir. PLA esaslı yapının birim hücre boyutunun artırılmasının yazıcının baskı hassasiyetini arttırdığı, bu durumun da kafes yapının yapısal anizotropisini azalttığı ifade edilmiştir. Bu nedenle kafes yapılarda birim hücre boyutu küçüldükçe (gözenek oranı azaldıkça) yapısal anizotropinin artması nedeniyle basma elastikiyet modülleri her bir dolgu geometrisi yapısı için daha yüksek elde edilmiştir.



Şekil 5.2. Gyroid yapıları için gerilme-şekil değiştirme diyagramları.

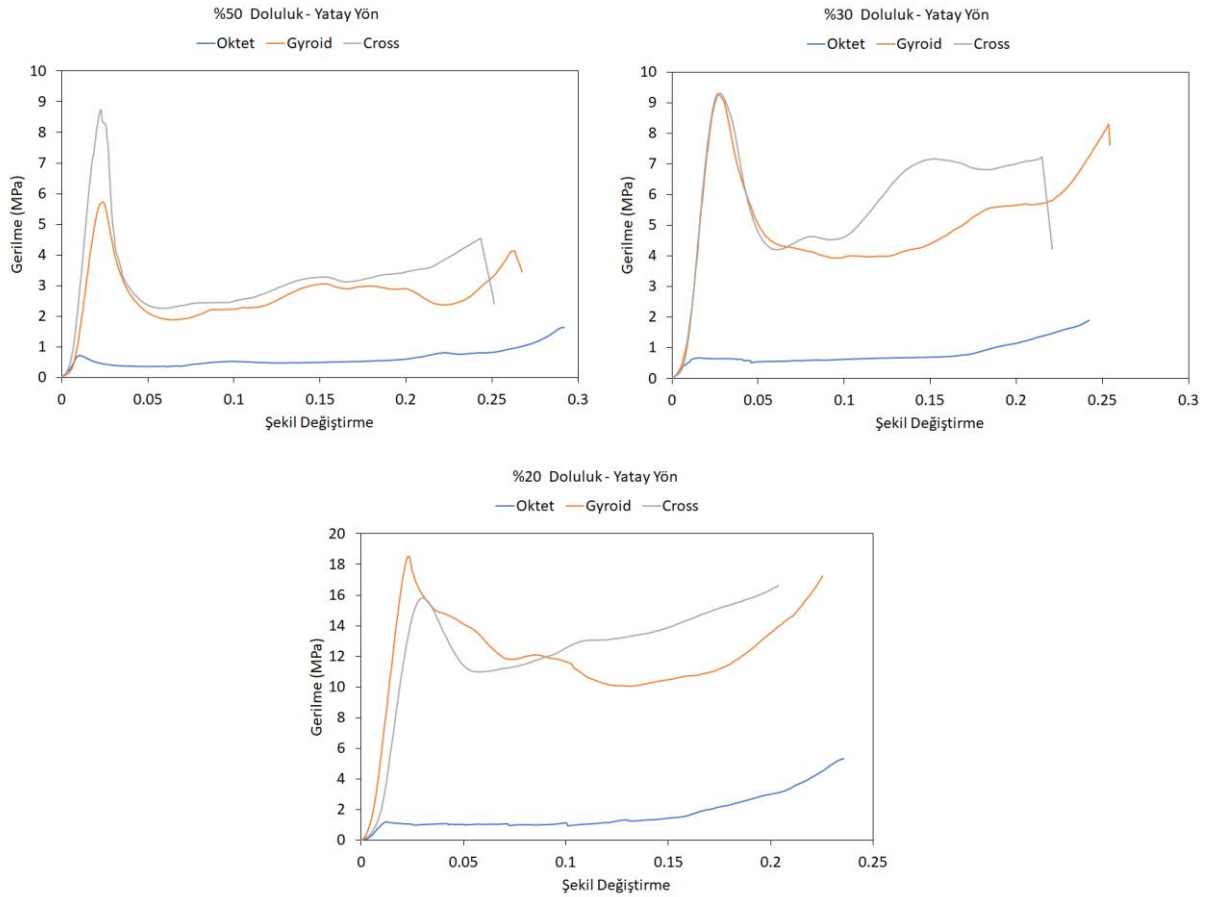


Şekil 5.3. Cross yapıları için gerilme-şekil değiştirme diyagramları.

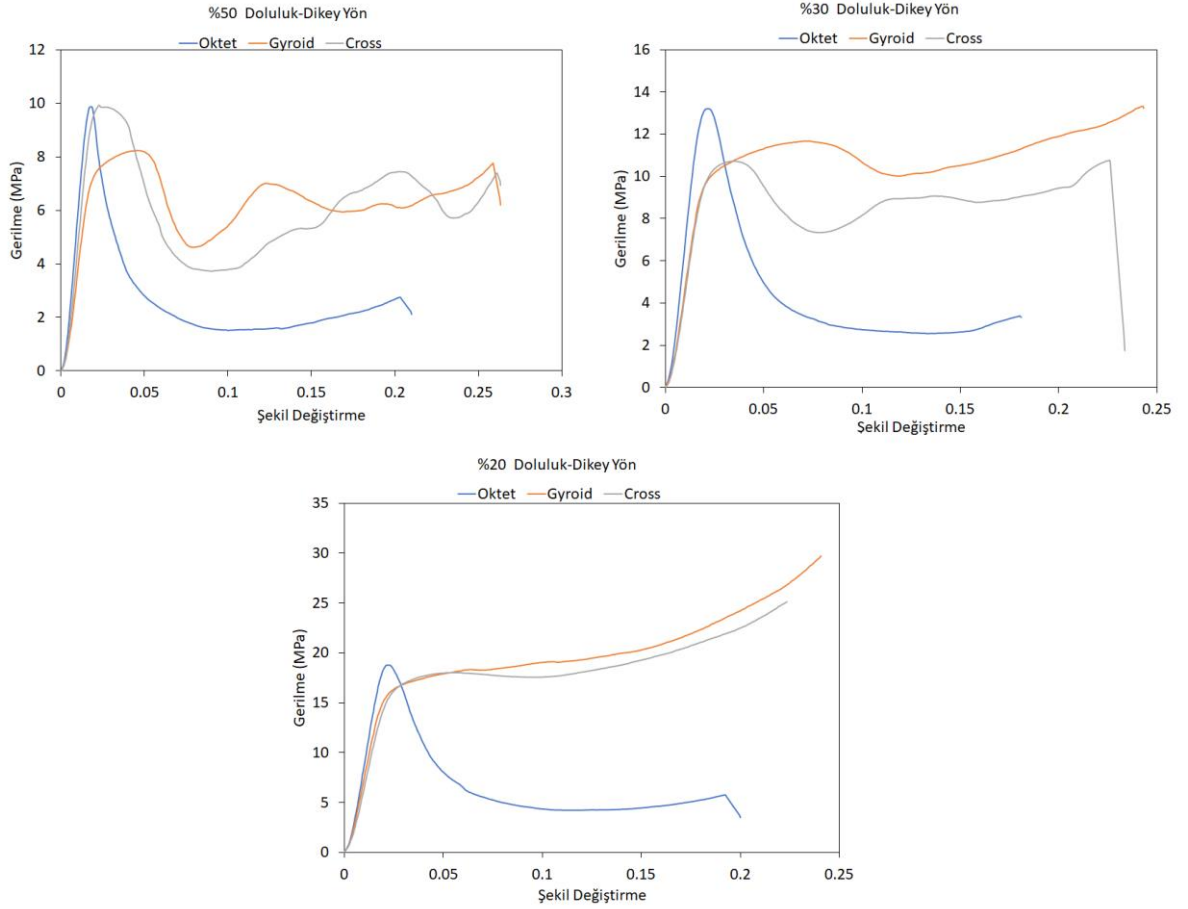


Şekil 5.4. Oktet yapılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme diyagramları.

Ayrıca, üç farklı dolgu geometri yapıda üretilen numunelerin yatay ve dikey konumlanmasında elde edilen basma davranışları sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da topluca gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Numunelerin yatay olarak konumlandırılması sonucunda elde edilen basma gerilme-şekil değiştirme diyagramları.



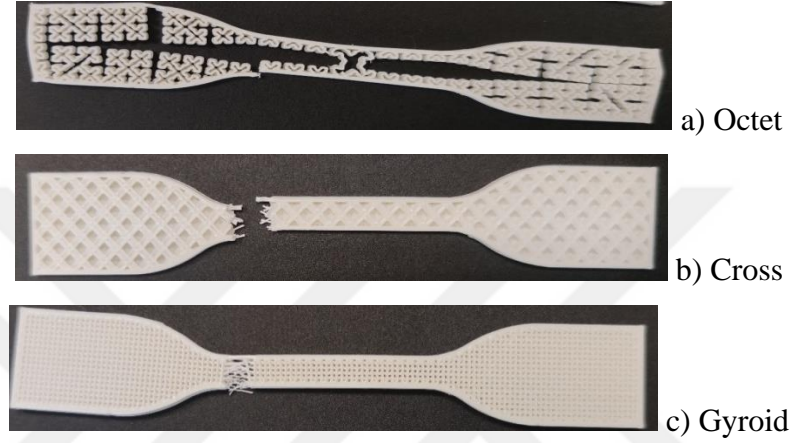
Şekil 5.6. Numunelerin dikey olarak konumlandırılması sonucunda elde edilen basma gerilme-şekil değişirme diyagramları.

5.2. ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI

Dolgu geometrisi ve izafi yoğunluk miktarının PLA esaslı numunelerin çekme dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla her bir hücre yapısından üç numune çekme testine tabi tutulmuştur. Bu işlem için numuneler ASTM D638 standardına göre hazırlanmış ve Instron çekme-basma test cihazı kullanılarak test edilmiştir. Üç numune için elde edilen sonuçların ortalaması alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Numunelerin çekme testinden sonraki görünüşlerine örnekler Şekil 5.7’de verilmiştir. EYM yöntemiyle üretilen içi dolu numunelerin çekme testlerinde yaygın olarak çap geçişlerinin oluşturduğu gerilme yığılmaları nedeniyle çenelere yakın köşe kısımlarından gevrek olarak kırıldığı ifade edilmiştir [94]. Sunulan çalışmada, Gyroid ve Octet birim dolgu geometrili yapıya sahip numunelerde deformasyonlar çap geçiş

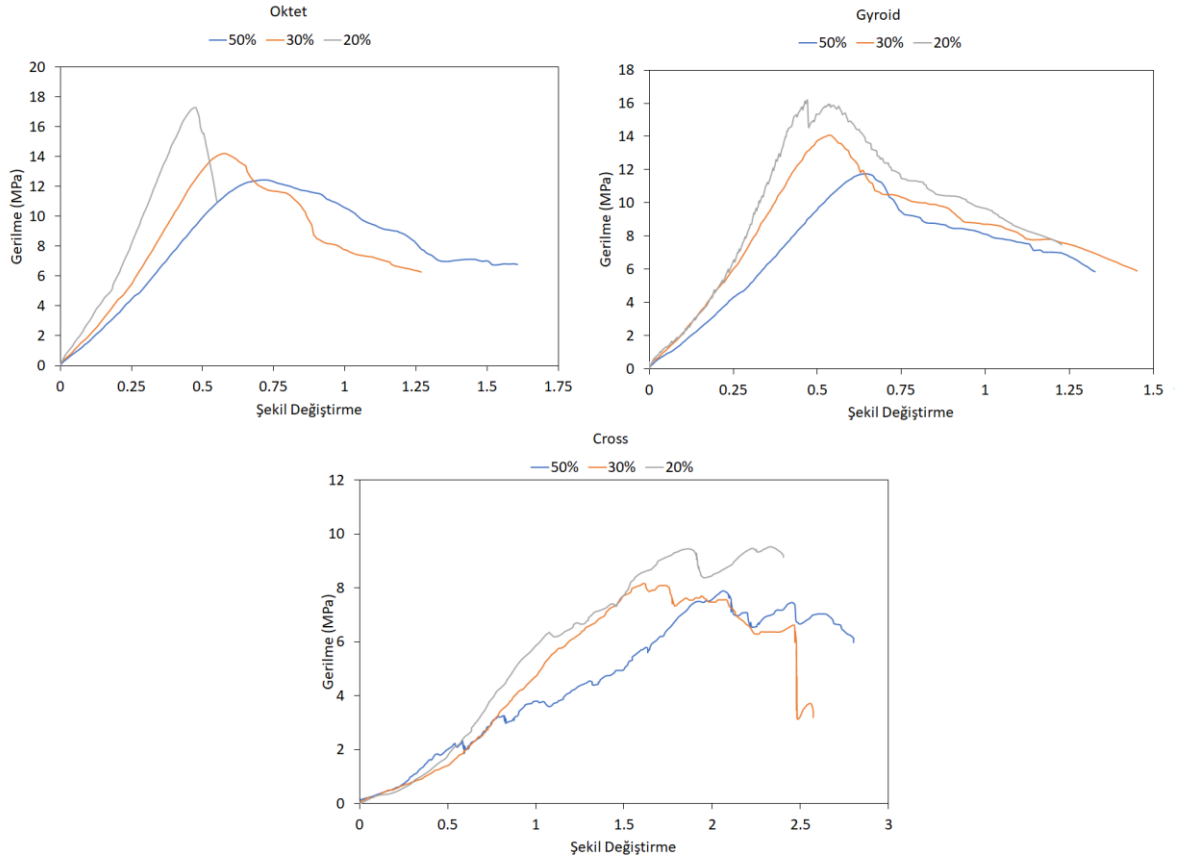
bölgesinde kırılma şeklinde meydana gelmiştir. Kırılma şekilleri incelendiğinde, hücreli yapıdan dolayı da bir miktar sünek deformasyon meydana geldiği görülmüştür. Bununla birlikte Cross birim hücre yapısına sahip numunelerde deformasyon, ilk olarak numunenin orta simetri hattı boyunca birim hücrelerin birbirinden ayrılması, sonrasında Gyroid ve Octet hücre yapılı numunelerde olduğu gibi çap geçiş bölgesinde kopma şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 5.7. Çekme deneyi sonrası numuneler (%20 gözeneklilik).

a) Gözenek oranının çekme dayanımına etkilerinin incelenmesi

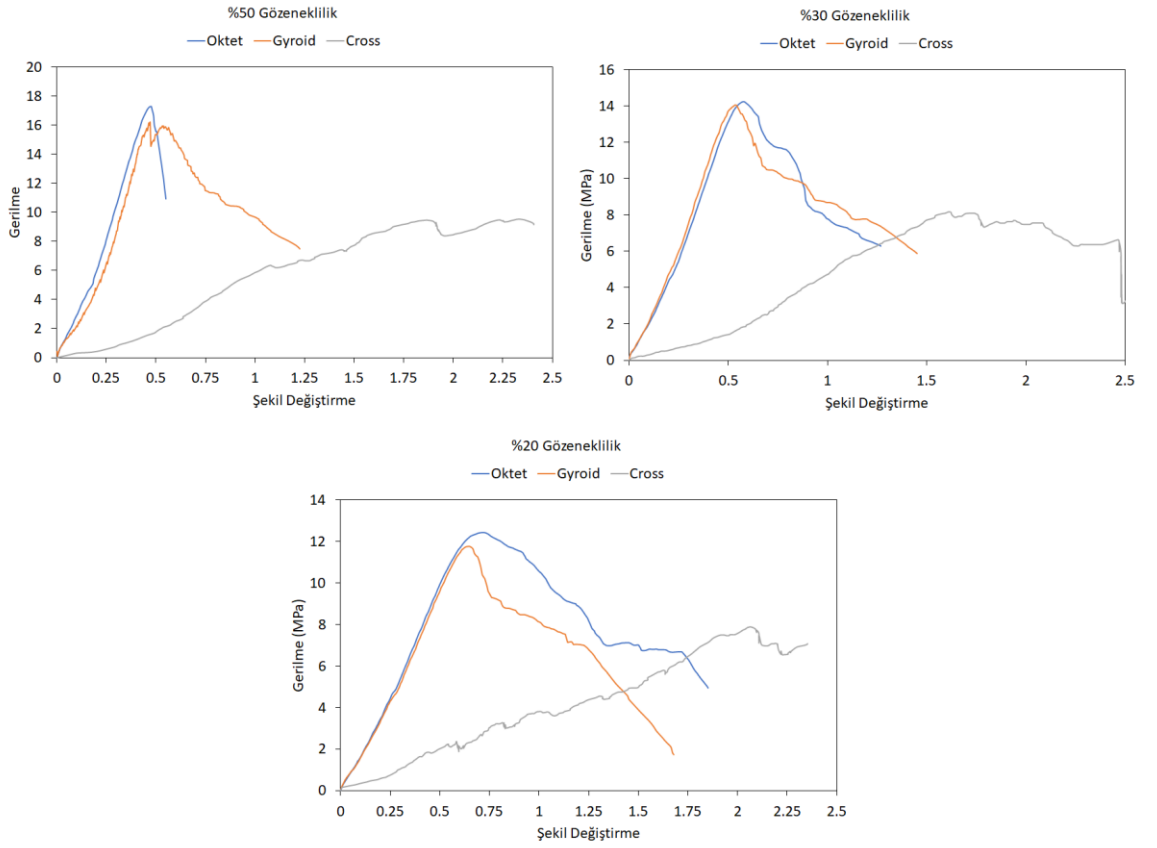
Octet, Gyroid ve Cross birim hücre yapısına sahip numunelerin izafi yoğunluk oranlarındaki değişime bağlı olarak gerilme-şekil değiştirme diyagramları sırasıyla Şekil 5.8’te verilmiştir. Bununla birlikte numunelerin elastikiyet modülleri gerilme-şekil değiştirme diyagramındaki elastik bölge göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Dolgu geometrisi ve izafi yoğunluk oranına göre elastikiyet modülleri %20, %30 ve %50 gözeneklilik oranları için Cross hücre yapısına sahip numunelerde sırasıyla 37.70 MPa, 25.55 MPa ve 19.34 MPa, Gyroid hücre yapısına sahip numunelerde sırasıyla 34.13 MPa, 26.82 MPa ve 19.26 MPa ve Octet hücre yapısına sahip numunelerde de sırasıyla 5.21 MPa, 4.87 MPa ve 3.86 MPa olarak elde edilmiştir. İzafi yoğunluk miktarının mekanik özellikler üzerindeki etkisine bakıldığında, gözenek oranı %50’den %20’ye doğru azaldıkça her dolgu geometri hücre yapısının elastisite modülü artmıştır. Bununla birlikte Cross ve Gyroid dolgu geometrisine sahip yapıların elastikiyet modüllerinin tüm gözeneklilik oranlarında Octet hücre yapısına sahip numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5.8. Gözeneklilik oranına göre gerilme-şekil değişirme grafikleri.

b) Dolgu geometrisinin çekme dayanımına etkilerinin incelenmesi

Farklı dolgu geometrili birim hücre yapısına sahip numunelerin gerilme-şekil değişirme diyagramları %50, %30 ve %20 gözeneklilik oranlarına göre sırasıyla Şekil 5.9'da verilmiştir. Birim hücre yapılarına göre karşılaştırma yapıldığında, Octet geometrili yapıya sahip numunelerin tüm izafi yoğunluk oranlarında en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Gyroid hücre yapısına sahip numunelerde ise Octet birim hücre yapısına sahip numunelere kıyasla bir miktar düşük kopma gerilmesi elde edilmiştir. Bununla birlikte, Cross birim hücre yapısında en düşük kopma gerilmeleri elde edilirken, Octet ve Gyroid hücre yapılarına kıyasla daha büyük şekil değişimlerinin olduğu söylenebilir.

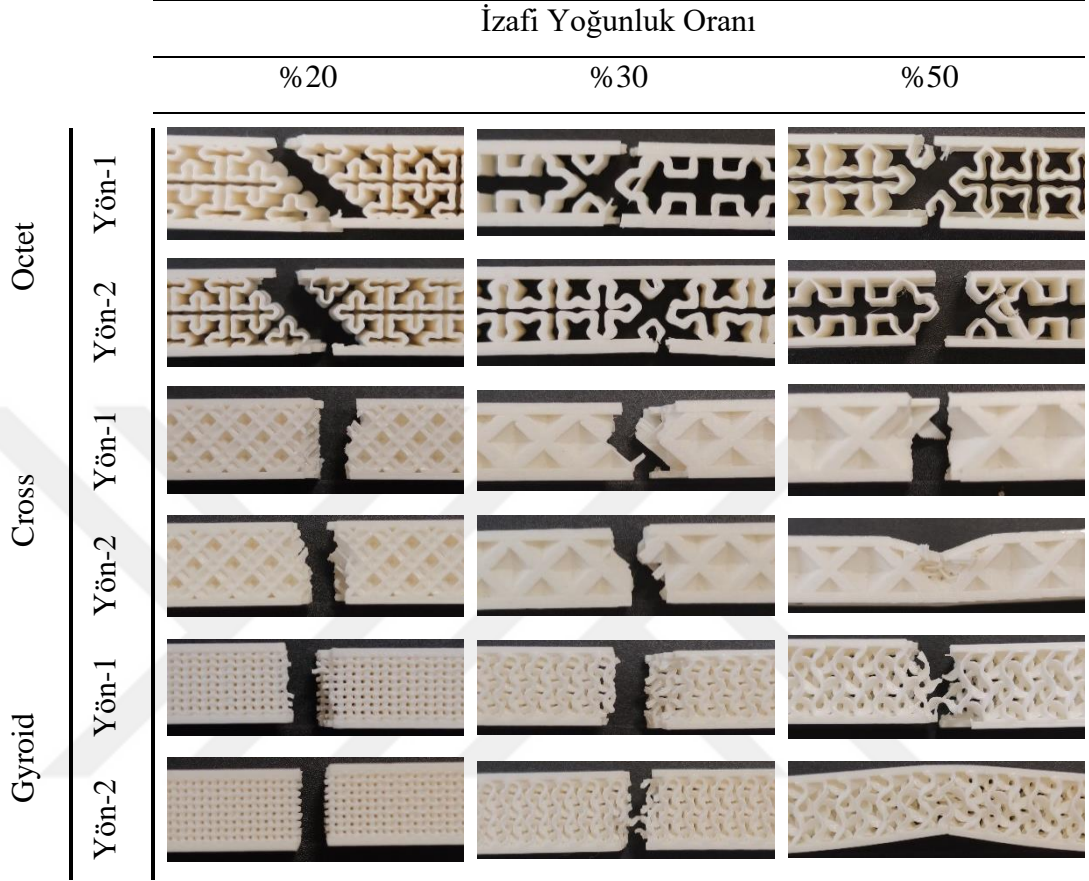


Şekil 5.9. Birim hücre yapısına göre gerilme-şekil değiştirme grafikleri.

5.3. DARBE DENEYİ SONUÇLARI

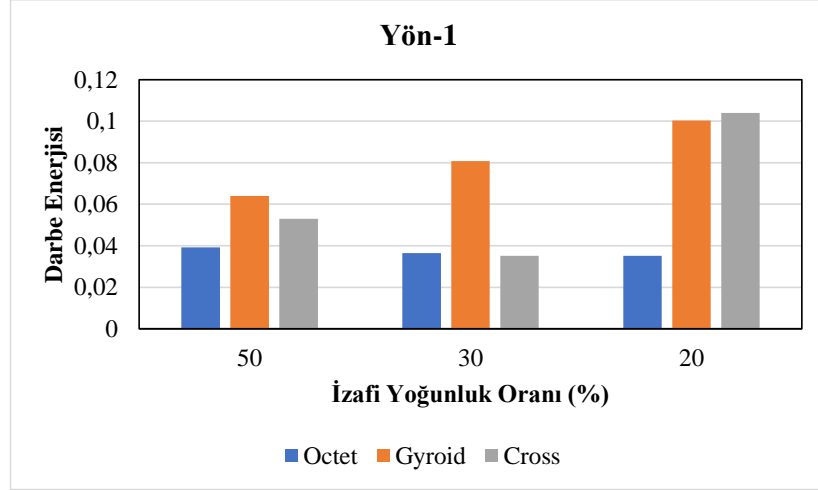
EYM üretim yöntemi ile Gyroid, Octet ve Cross dolgu geometrili birim hücre yapısına sahip numuneler PLA malzemesi kullanılarak üretilmiştir. EYM yöntemiyle üretilmiş olan numunelerin darbe davranışları, plastiklerin Charpy darbe dirençlerinin belirlenmesi için kullanılan ISO 179 standardına göre test edilmiştir. 3D baskılı numuneler 80x10x8 mm boyutlarında olacak şekilde üretilmiş olup, numunelerin alt, üst ve yan yüzlerinde 0.5 mm kalınlığa sahip kabuk yapılar bulunmaktadır. Buna göre numunenin uzunluğu boyunca iki yüzü açık olarak bırakılmıştır. Test esnasında numune, çekicinin temas durumuna göre Yön-1 ve Yön-2 şeklinde konumlandırılmıştır. Yön-1 şeklinde yapılan konumlandırmada çekicinin uyguladığı darbe yükü numunenin kabuk ile kaplı olan yüzü tarafından karşılanacak şekilde yerleştirilmiştir. Yön-2 şeklinde yapılan konumlandırmada, darbe yükü numunenin açık yüzü tarafından karşılanacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu yön konumlarına göre testler iki şekilde

gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrası numunelerin görünümlerine örnekler Şekil 5.10'da verilmiştir.



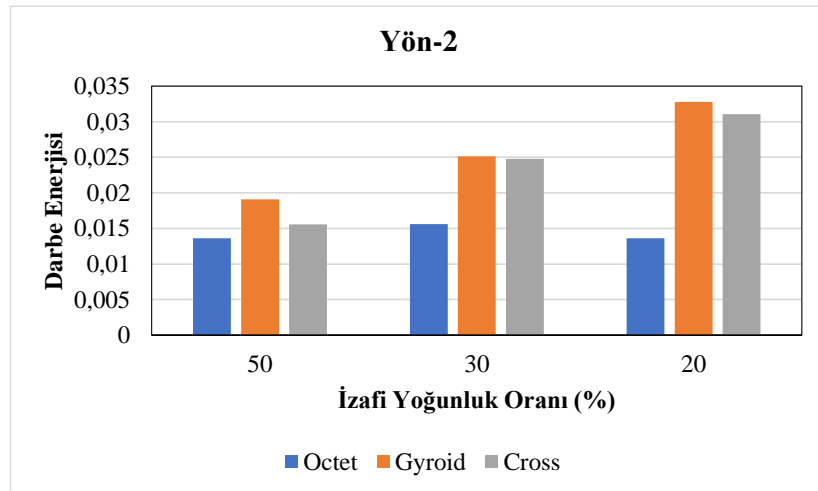
Şekil 5.10. Darbe deneyi sonrası numuneler.

Numunelerin Yön-1 şeklinde konumlandırıldığı durumdaki darbe dirençleri Şekil 5.11'de verilmiştir. Genel olarak değerlendirme yapıldığında Gyroid birim hücre yapısına sahip numunelerin darbe dirençleri gözenek oranı azaldıkça artmıştır. Octet birim hücre yapısına sahip numunelerde ise yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Bununla birlikte, Cross birim hücre yapısına sahip numunelerde gözeneklilik oranı %50'den %30'a azaltıldığında darbe dayanımı azalmış, sonrasında ise artmıştır.



Şekil 5.11. Darbe dayanımı değişimi.

Numunelerin Yön-2 şeklinde konumlandırıldığı durumdaki darbe dirençleri Şekil 5.12’de grafik olarak verilmiştir. Gyroid ve Cross birim hücre yapısına sahip numunelerin darbe dirençleri gözenek oranı azaldıkça artmıştır. Octet birim hücre yapısına sahip numunelerde ise yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Bununla birlikte, Gyroid ve Cross birim hücre yapısına sahip numunelerin darbe dirençlerinin tüm gözeneklilik oranlarında Octet dolgu geometrilili yapıya sahip numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Numunelerin Yön-1 ve Yön-2 şeklindeki konumlandırılma açısından bir karşılaştırma yapıldığında, Yön-1 şeklinde yapılan konumlandırmada daha fazla darbe enerjisinin elde edildiği belirlenmiştir. Buradan, numunelerin alt ve üst yüzeylerine yapılan kabuk tabakasının darbe direncini arttırdığı ifade edilebilir.



Şekil 5.12. Darbe dayanımı değişimi.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemlerinden Eriyik Yığılma Modelleme (EYM) yöntemi kullanılarak PLA malzemeden üç farklı dolgu geometrisinde (Gyroid, Cross, Octet) üretilen yapıların mekanik davranışları araştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Basma deneyi sonuçları incelendiğinde, numunelerin gözeneklilik oranları arttıkça (%20 > %30 > %50) basma elastite modülü ve akma dayanımı değerinin azaldığı belirlenmiştir.
- Aynı gözeneklilik oranında, farklı dolgu geometrisine sahip yapıların basmaya karşı gösterdiği tepkiler farklıdır.
- Yatay yönlü basma deneyi sonucunda, en düşük basma elastite modülüne ve en düşük akma dayanımına sahip birim hücre yapısı Octet olmuştur.
- Dikey yönlü basma deneyi sonucunda, en düşük basma elastite modülü Cross dolgu geometrisinde, en düşük akma dayanımı Gyroid dolgu geometrisine sahip numunede elde edilmiştir.
- Çekme deneyi sonucunda, gözeneklilik oranı arttıkça çekme elastikiyet modülünün arttığı görülmüştür. En düşük çekme elastikiyet modülü Octet dolgu geometrisine sahip yapıda elde edilmiştir.
- En yüksek çekme dayanımı Octet dolgu geometrili yapıda elde edilirken, en fazla şekil değişimi Cross dolgu geometrili numunede görülmüştür. Kopma dayanımı ise küçükten büyüğe doğru Cross, Gyroid ve Octet şeklinde belirlenmiştir.
- Darbe deneyleri sonucunda, Gyroid dolgu geometrisine sahip yapılarda gözeneklilik oranı azaldıkça darbe direncinin arttığı görülmüştür. En düşük darbe dayanımı Octet dolgu geometrili yapıda elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Dias, E., B., L. (2017). The Effect of Manufacturing Defects on Compressive Strength of Polymeric Lattices Fabricated via Fused Deposition Modeling, (Yüksek lisans tezi). ProQuest tezler veritabanı (UMI No. 10288890)
2. Wong, K.V. and Hernandez, A. 2012. A review of additive manufacturing. ISRN Mechanical Engineering, 1-10
3. Gebhardt, A. 2011. Understanding Additive Manufacturing. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich, 168 p.
4. Apak, K., “PLA Malzemesinden Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ürünlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü*, Isparta, 8 (2019).
5. D. T. Pham and S. S. Dimov, Rapid Manufacturing. London: Springer London, 2001.
6. Kunt, G., “Tarım Makineleri Tasarımı Ve İmalatında Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Kullanılabilirliği Ve Adaptasyonu Üzerine Bir Araştırma: Plastik Malzeme Esaslı Bazı Bağlantı Elemanlarında Hızlı Prototipleme Örneği”, Yüksek Lisans Tezi, *Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antalya, 14 (2019).
7. Tanikella, N.G.; Wittbrodt, B.; Pearce, J.M. Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. Addit. Manuf. 2017, 15, 40–47.
8. Hill, N.; Haghi, M. Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate. Rapid Prototyp. J. 2014, 20, 221–227
9. Scott_Crump. Erişim: 25 Nisan 2019, https://en.wikipedia.org/wiki/S._Scott_Crump
10. Kumar, G., P., & Regalla, S., P. (2012). Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM), In Applied Mechanics and Materials, 110, 2245-2251. Trans Tech Publications.
11. Thrimurthulu, K., P., P., M., Pandey, P., M., & Reddy, N., V. (2004). Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(6), 585-594.
12. Özyeşildağ, M., "Eklemeli Üretim Teknolojileri İçin Çok İşlevli Grafen Katkılı Nanokompozit Malzemelerin Üretilmesi ve Geliştirilmesi", Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, (2019).

13. Gibson, Ian, David W. Rosen, and Brent Stucker. "Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing." Springer, 2010.
14. R. Singh and J. P. Davim, Additive Manufacturing- Applications and Innovations, 2019.
15. D. Gu, Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials, 2015.
16. C. P. Paul, A. N. Jinoop and K. S. Bindra, Metal additive manufacturing using lasers, 2019.
17. R. Verma and G. Kaushal, State of the Art of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: A Review, 2019.
18. T. Srivatsan, Additive Manufacturing of Materials; Viable Techniques, Metals, Advances, Advantages and Applications, 2016.
19. C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang and L. E. Loh, Review of selective laser melting: Materials and applications, 2015.
20. Li Yang, Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production, 2017.
21. A. Gebhardt and J.-S. Hötter, Additive Manufacturing, 2016.
22. I. Gibson, D. Rosen and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, 2015.
23. H. Wijshoff, Drop dynamics in the inkjet printing process, 2018.
24. K. Çelik ve A. Özkan, Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Üretim ve Onarım Uygulamaları, 2017.
25. T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, no. February, pp. 172–196, 2018.
26. D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, "Additive manufacturing of metals," *Acta Mater.*, vol. 117, pp. 371–392, 2016.
27. Dursun, A. M., "Değişken Gözenekli Hücresel Yapıların Metal Eklemeli İmalat İçin Tasarımı ve Üretilen Yapıların Tasarım ile Uyumluluğunun Araştırılması", Gazi Üniversitesi, (2019).

28. X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 442–458, Feb. 2017.
29. A. Takezawa and M. Kobashi, "Design methodology for porous composites with tunable thermal expansion produced by multi-material topology optimization and additive manufacturing," *Compos. Part B Eng.*, vol. 131, pp. 21–29, Dec. 2017.
30. C.-C. Kuo et al., "Preparation of starch/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers (ABS) biomass alloys and their feasible evaluation for 3D printing applications," *Compos. Part B Eng.*, vol. 86, pp. 36–39, Feb. 2016.
31. Y. Wen et al., "3D printed porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering: a review," *Biomater. Sci.*, vol. 5, no. 9, pp. 1690–1698, 2017.
32. B. Khoshnevis, "Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies," *Autom. Constr.*, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, Jan. 2004.
33. Gibson, L. J. (2003). Cellular Solids, *MRS Bulletin*, 28(04), 270–274.
34. A. Bellini and S. Guceri, "Mechanical characterization of parts fabricated using Fused deposition modeling," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 9, pp. 252-264, 2003.
35. W. Tao and M. C. Leu, "Design of lattice structure for additive manufacturing," in *Flexible Automation (ISFA), International Symposium on*, 2016, pp. 325-332.
36. Wadley, H.N.G.; Fleck, N.A.; Evans A.: Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures, *Composites Science and Technology*, 63, 2003, 2331–2343.
37. Recep M. Gorgularslan, Umesh N. Gandhi, Raghuram Mandapati & Seung-Kyum Choi (2015): Design and fabrication of periodic lattice-based cellular structures, *Computer-Aided Design and Applications*, DOI:10.1080/16864360.2015.1059194.
38. Challis, V. J., Xu, X., Zhang, L. C., Roberts, A. P., Grotowski, J. F. ve Sercombe, T. B. (2014). High specific strength and stiffness structures produced using selective laser melting. *Materials & Design*, 63, 783-788.
39. Azman, A. H. (2017). Method for integration of lattice structures in design for additive manufacturing. Doctoral Dissertation, Université Grenoble Alpes, Fransa.

40. Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M. ve Zadpoor, A. A. (2016). Effect of mass multiple counting on the elastic properties of open-cell regular porous biomaterials. *Materials & Design*, (89), 9-20.
41. Sing, S. L., Yeong, W. Y., Wiria, F. E. ve Tay, B. Y. (2016). Characterization of titanium lattice structures fabricated by selective laser melting using an adapted compressive test method. *Experimental Mechanics*, 56(5), 735-748.
42. Luxner, M.H., Stampfl, J. & Pettermann, H.E. (2005). Finite element modeling concepts and linear analyses of 3D regular open cell structures. *Journal of Materials Science*, 40(22), 5859–5866. Doi: 10.1007/s10853-005-5020-y.
43. Elsayed, M., S., A., 2010. *Multiscale Mechanics and Structural Design of Periodic Cellular Materials*, Doktora Tezi, McGill University, Montreal.
44. Evans, A.G., Hutchinson, J.W., Fleck, N.A., Ashby, M.F. and Wadley, H.N.G. (2011), “The topological design of multifunctional cellular metals”, *Progress in Material Science*, Vol. 46, pp. 309-327.
45. Valdevit, L., Vermaak, N., Zok, F.W. and Evans, A.G. (2008), “A materials selection protocol for lightweight actively cooled panels”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 75, p. 061022. Vanderplaats, G.N.
46. Hammett, C.I., Rinaldi, R.G. and Zok, F.W. (2013), “Pyramidal lattice structures for high strength and energy absorption”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 80, pp. 041015-041021.
47. RAW Mines (2008), “On the characterization of foam and micro-lattice materials used in sandwich construction”, *Strain*, Vol. 44 No. 1, pp. 71-83.
48. Smith, M., Guan, Z. and Cantwell, W.J. (2013), “Finite element modeling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 67, pp. 28-41.
49. Hopkinson, N., Hague, R. and Dickens, P. (Eds) (2006), *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*, John Wiley, New York, NY.
50. Heintz, P., Müller, L., Körner, C., Singer, R.F. and Müller, F.A. (2008), “Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting”, *Acta Biomaterialia*, Vol. 4 No. 5, pp. 1536-1544.

51. Deshpande, V.S., Fleck, N.A. and Ashby, M.F. (2001), "Effective properties of the octet-truss lattice material", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 49 No. 8, pp. 1747-1769.
52. Johnston, S.R., Reed, M., Wang, H.V. and Rosen, D.W. (2006), "Analysis of mesostructure unit cells comprised of octet-truss structures", *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, pp. 421-432.
53. Harrysson, O.L., Cansizoglu, O., Marcellin-Little, D.J., Cormier, D.R. and West, H.A. (2008), "Direct metal fabrication of titanium implants with tailored materials and mechanical properties using electron beam melting technology", *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 28 No. 3, pp. 366-373.
54. Gorgularslan, R.M., Park, S.I., Rosen, D.W. and Choi, S.K. (2015b), "A multilevel upscaling method for material characterization of additively manufactured part under uncertainties", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 137 No. 11, 111701.
55. Segebade, E., Gerstenmeyer, M., Dietrich, S., Zanger, F., and Schulze, V., "Influence of anisotropy of additively manufactured AlSi10Mg parts on chip formation during orthogonal cutting", *Procedia CIRP*, 82: 113–118 (2019).
56. Yang, L., Harrysson, O., West, H. & Cormier, D. (2015). Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing. *International Journal of Solids and Structures*, (69–70), 475–490. Doi: 10.1016/j.ijsolstr.2015.05.005.
57. Panda, B., Leite, M., Biswal, B.B., Niu, X. & Garg, A. (2018). Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures. *Measurement*, 116, 495-506. Doi: 10.1016/j.measurement.2017.11.037.
58. Ingrole, A., Hao, A. & Liang, R. (2017). Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. *Materials and Design*, 117, 72–83. Doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.067.
59. Yaman S., A.M., 3B Yazıcı ile Üretilen PLA40/ABS60 Malzemesinin Termal ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, in Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı. 8 Ekim 2019, Düzce Üniversitesi: Düzce.
60. Melchels, F., Domingos, M., Klein, T., Malda, J., Bartolo, P. and Hutmacher, D. 2012. Additive manufacturing of tissues and organs. *Progress in Polymer Science*, 37 (8): 1079-1104.

61. Durgun, İ. ve Başaran, D. 2010. FDM katmanlı üretim teknolojisinin araç geliştirme sürecindeki uygulamaları. 5. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa.
62. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, C. M., Duysak, A. (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31, 1302 – 1355.
63. Raja, V., Fernands, K. J. (2008). *Reverse Engineering – An Industrial Perspective*. London: Springer, 123-198.
64. Apak, S. (2010). *Farklı Hızlı Prototipleme Cihazlarında Üretilen Parçaların Üretim Zamanı Ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
65. Saadlaoui, Y., Milan, J.L., Rossi, J.M. and Chabrand, P. 2017. Topology optimization and additive manufacturing: comparison of conception methods using industrial codes. *J. Manuf. Syst.*, 43: 178-186.
66. Kontovourkis, O., Tryfonos, G. and Georgiou, C. 2019. Robotic additive manufacturing (RAM) with clay using topology optimization principles for toolpath planning: the example of a building element. *Architectural Science Review*, 13 p.
67. Kazakis, G., Kanellopoulos, I., Sotiropoulos, S. and Lagaros, N.D. 2017. Topology optimization aided structural design: Interpretation, computational aspects and 3D printing. *Heliyon* 3 (10).
68. Demir, E. ve Toktaş, İ. 2016. Tıp ve Sağlık Bilimleri Eğitimi İçin İnsan Vücudundaki Anatomik Yapıların Modellenmesi ve 3 Boyutlu Baskısı. 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, İstanbul.
69. Kara, E., Buldum, B.B., Yılmaz, Ç. ve Özkaya, N. 2016. 3B Yazıcı ile Kişiyeye Özgü İmplant Tasarımı. 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, İstanbul.
70. Balcıoğlu, Y.S. 2014. 3 boyutlu yazıcı ve sinemada kullanımı. Yüksek lisans tezi, İzmir Yaşar Üniversitesi, İzmir.
71. Atzeni, E. and Salmi, A. 2012. Economics of additive manufacturing for end-use metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62, 1147-1155.
72. İpekçi, A., Kam, M. & Saruhan, H. (2017). Investigation of 3D Printing Occupancy Rates Effect on Mechanical Properties and Surface Roughness of PET-G Material Products. *Journal Of New Results In Science (JNRS)*, 7(2), 1-8.

73. Özdemir, M. A., Evlen, H. & Çalışkan, A. (2016). 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, 05-07 Mayıs 2016, İstanbul, 50-51.
74. Çelebi, A., Demirdal, S., Akbulut, M., 2017.3 Boyutlu Yazıcı İle Üretilen Polylaktikasit (PLA) Numunelerde Doluluk Oranlarının Mekanik Özelliklere Etkisi. 2. 3b Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, İstanbul.
75. Özdemir, M. A., Evlen, H., Çalışkan, A., 2016. Doluluk oranının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri, üzerine Etkisi. 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, İstanbul.
76. Çantlı,E., Aydın, M., Yıldırım , F., Günay M. , Kaya, B., 2017. Investigation of the FDM process performance at different printing parameters, 2. 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, İstanbul.
77. Bacak S., Varol Özkavak H., Tatlı M., 2021. FDM yöntemi ile üretilen PLA Numunelerin Çekme Özelliklerine İşlem Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 9(1), 209 – 216, 2021
78. Gibson L.J., Ashby M.F., Harley, B.A., Cellular Materials in Nature and Medicine, 1st ed, Cambridge Univeristy Press, 2010.
79. Nazir, A., Abate, K.M., Kumar, A., Jeng, J.Y., A stateof-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104 (9-12), 3489-3510, 2019.
80. Deshpande V.S., Fleck N.A., Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending, International Journal of Solids and Structures, 38 (36-37), 6275– 6305, 2001.
81. Schaedler T.A., Carter W.B., Architected cellular materials, Annual Review of Materials Research, 46, 187–210, 2016.
82. Gümrük R., Uşun A., Investigation of mechanical properties of electroless nickel plated micro-lattice structures, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (4), 1783-1798, 2020.
83. Al-Ketan, O., Rowshan, R., Abu Al-Rub, R., K., Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials, Additive Manufacturing, 19, 167–183, 2018.

ÖZGEÇMİŞ

Rukiye YEŞİLOĞLU 2013 yılında Safranbolu Anadolu Öğretmen Lisesi'nden mezun oldu. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği Lisans Programı Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2018 yılında onur öğrencisi olarak lisans eğitimini tamamladı. 2018 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı. 2019 Ocak – 2019 Eylül yıllarında İstanbul / Pendik ilinde özel bir firmada üretim mühendisi olarak başladığı iş hayatına daha sonra 2019 Eylül – 2021 Ocak yıllarında Karabük ilinde bulunan yine özel bir firma da proje ve yatırımlar mühendisi olarak devam etmiştir. Şu an da İstanbul / Maltepe ilinde yine özel bir firmada 2021 Ocak yılından bu yana proje mühendisliği görevini sürdürmektedir.