

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

3 BOYUTLU (3D) YAZICI TEKNOLOJİSİNİN YAPI
SEKTÖRÜNDE KULLANIM POTANSİYELİNE YÖNELİK BİR
ARAŞTIRMA

ŞEVVAL KAPLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI: PROF. DR. NİLAY COŞGUN

ŞUBAT 2025

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

3 BOYUTLU (3D) YAZICI TEKNOLOJİSİNİN YAPI
SEKTÖRÜNDE KULLANIM POTANSİYELİNE
YÖNELİK BİR ARAŞTIRMA

ŞEVVAL KAPLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI: PROF. DR. NİLAY COŞGUN

ŞUBAT 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**A STUDY ON THE POTENTIAL USE OF THREE-
DIMENSIONAL (3D) PRINTING TECHNOLOGY IN
THE CONSTRUCTION INDUSTRY**

ŞEVVAL KAPLAN

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ARCHITECTURE**

ADVISOR: PROF. DR. NİLAY COŞGUN

FEBRUARY 2025

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 03/02/2025 tarih ve 2025/08 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/02/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Şevval KAPLAN'ın tez çalışması Mimarlık Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Nilay COŞGUN

ÜYE

: Prof. Dr. Cahide AYDIN İPEKÇİ

ÜYE

: Doç. Dr. Ferhat PAKDAMAR

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Aileme...

ÖZET

Teknolojik gelişmeler, farklı alanlardaki dönüşüme yön verirken, yapı sektöründe de önemli bir rol oynamaktadır. Gelişmekte olan bir teknoloji olarak üç boyutlu (Three-dimensional- 3D) yazıcı teknolojisi, mimarlık eğitimi, mobilya tasarımı, yapı malzemesi geliştirilmesi ve yapı üretimi gibi pek çok farklı alanda uygulanmaktadır. Bu teknoloji; esnek tasarım, malzeme çeşitliliği, hızlı üretim, inşaat hatalarının azaltılması, iş gücünün verimli kullanılması, maliyetlerin düşürülmesi ve çevresel etkilerin azaltılması gibi çeşitli faydalar sunmaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, 3D yazıcı teknolojisinin yapı malzemesi, yapı bileşeni, yapı elemanı ve yapı üretimi bağlamında yapı sektöründeki potansiyelini belirlemek ve bu teknolojinin mevcut inşaat süreçlerine nasıl entegre edilebileceğini anlamaktır. Araştırma kapsamında ulusal ve uluslararası tezler, makaleler, bildiriler, kitaplar, dergiler ve diğer yayınlar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, Türkiye’de 3D yazıcı teknolojiyle üretim yapan bir tesis ziyaret edilmiş, uygulama örnekleri yerinde gözlemlenmiş ve uzmanlarla gerçekleştirilen görüşmelerle saha çalışması yapılmıştır.

Tez altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm olan giriş kısmında, çalışmanın problemi tanımlanmış; amacı, kapsamı, yöntemi ve özgün değeri açıklanmıştır. İkinci bölümde, teknolojik gelişmelerin yapı sektörüne etkileri ele alınmış; Endüstri Devrimlerinden dijital teknolojilere, otomasyon ve robotik sistemlerin sektöre entegrasyonuna kadar geniş bir çerçevede literatür taraması yapılmıştır. Bu bölümde, teknolojik gelişmelerin yapı sektöründeki dönüşüm süreçlerine ve katkılarına yer verilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde, 3D yazıcı teknolojisi detaylı bir şekilde incelenmiş; bu teknolojinin temel ilkeleri, üretim teknikleri, kullanılan malzemeler ve uygulama alanları ele alınmıştır. Dördüncü bölümde, 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründeki kullanımı yapı malzemesi, yapı bileşeni, yapı elemanı ve genel yapı üretimi bağlamında incelenmiştir. Beşinci bölümde, 3D yazıcı teknolojiyle üretimin Türkiye’de bir üretim tesisinde gerçekleştirilen saha çalışmaları ele alınarak, uzmanlarla yapılan görüşmeler ve uygulama örnekleri ışığında, 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründeki kullanımı ve gözlemler yer almaktadır. Altıncı ve son bölüm olan değerlendirme ve sonuç kısmında ise, araştırma bulguları doğrultusunda 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründeki kullanım potansiyeli değerlendirilmiştir. Teknolojinin sağladığı hız, maliyet, tasarım esnekliği ve çevresel etki gibi önemli faydaların yanı sıra, malzeme ve yazılım, teknik ve yönetmelik gibi konularda bazı kısıtlamaların da olduğu tespit edilmiştir. Kısıtlamaların olduğu alanlarda bu teknolojinin sektöre entegrasyonu için öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Endüstri Devrimleri, Dijital Teknolojiler, Otomasyon ve Robotik, Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi, Yapı Bileşeni/Yapı Elemanı Üretimi, Yapı.

ABSTRACT

Technological advancements play a pivotal role in shaping transformative actions across various domains, including the construction industry. As an emerging field, three-dimensional (3D) printing technology finds applications in numerous areas such as architectural education, furniture design, the development of building materials, and construction processes. This technology offers several advantages, including flexible design, material diversity, rapid production, reduction of construction errors, efficient use of labor, cost savings, and minimized environmental impact. The aim of this thesis is to identify the potential of 3D printing technology in the context of building materials, building components, building elements, and construction processes, as well as to explore how this technology can be integrated into existing construction workflows. To achieve this, a comprehensive review of national and international theses, articles, conference proceedings, books, journals, and other publications was conducted. Additionally, a production facility in Turkey utilizing 3D printing technology was visited, application examples were observed on site and fieldwork was carried out through interviews with experts.

This thesis consists of six chapters. The first chapter, the introduction, defines the research problem and explains the aim, scope, methodology, and original contribution of the study. The second chapter examines the impact of technological advancements on the construction industry, offering a comprehensive literature review that spans from the Industrial Revolution to digital technologies and the integration of automation and robotics into the sector. This chapter covers contributions of technological advancements and their transformative impact on the construction industry. The third chapter provides an in-depth examination of 3D printing technology, discussing its fundamental principles, production techniques, materials used, and areas of application. In the fourth chapter, the use of 3D printing technology in the construction industry is analyzed in the context of building materials, components, elements, and overall construction processes. The fifth chapter presents observations and the use of 3D printing technology in the construction industry, based on fieldwork conducted at a production facility in Turkey. It includes interviews with experts and practical examples to highlight the application of 3D printing technology in the sector. In the sixth and final chapter—the evaluation and conclusion section—the potential for utilizing 3D printing technology in the construction industry was assessed based on the research findings. In addition to significant benefits such as enhanced speed, cost efficiency, design flexibility, and reduced environmental impact, certain limitations were identified in areas such as materials, software, technical aspects, and regulatory compliance. Recommendations have been provided to facilitate the integration of this technology into the sector where these limitations exist.

Keywords: Industrial Revolutions, Digital Technologies, Automation and Robotics, Three-Dimensional Printing Technology, Production of Building Components/ Elements, Building.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın hazırlanması ve yüksek lisans eğitimim süresince bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle bana rehberlik eden değerli danışman hocam Prof. Dr. Nilay Coşgun'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez çalışmam kapsamında gerçekleştirilen akademik çalışmalarda bilgi ve deneyimleriyle katkı sağlayan Doç. Dr. Ferhat Pakdamar'a ve çalışmamın son haline ulaşmasında değerli yorumlarıyla destek veren Prof. Dr. Cahide Aydın İpekçi'ye teşekkürlerimi iletmek isterim.

Bu süreçte, değerli katkıları ve destekleriyle yanımda olan arkadaşlarım İrem Tomakin Turhan, Elif Bahar Okuyucu ve İlayda Bucak'a; her türlü desteğiyle bana güç veren sevgili ailem, öncelikle annem Sama Kaplan ve babam Murat Kaplan'a, kardeşlerim Yasin Kaplan ve Ömer Kaplan'a, beni sevgiyle büyüten kıymetli anneannem Ayşe Arman'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, varlığıyla her zaman motivasyonumu arttıran, desteği ve anlayışıyla her aşamada yanımda olan sevgili hayat arkadaşım Emre Karabudak'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. TEKNOLOJİK GELİŞMELERİN YAPI SEKTÖRÜNE ETKİSİ	7
2.1. Endüstri Devrimleri	7
2.2. Dijital Teknolojiler	14
2.3. Otomasyon ve Robotik	18
3. ÜÇ BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİSİ	22
3.1. Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisinin Temel İlkeleri ve Üretim Teknikleri	25
3.2. Üç Boyutlu Teknolojisinde Kullanılan Malzemeler	42
3.3. Üç Boyutlu Teknolojisinin Uygulama Alanları	52
4. ÜÇ BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİSİNİN YAPI SEKTÖRÜNDE KULLANIMI	60
4.1. Yapı Malzemesi Üretiminde Üç Boyutlu Yazıcı Kullanımı	61
4.2. Yapı Bileşeni Üretiminde Üç Boyutlu Yazıcı Kullanımı	66
4.3. Yapı Elemanı Üretiminde Üç Boyutlu Yazıcı Kullanımı	76
4.4. Yapı Üretiminde Üç Boyutlu Yazıcı Kullanımı	86
5. ALAN ÇALIŞMASI: İSTON ÜÇ BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİSİ UYGULAMALARI	96
5.1. Çalışma ve Alanın Tanımı	96
5.2. Kullanılan Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi ve Yapı Malzemesi	97
5.3. Yapı Bileşeni ve Yapı Elemanı Üretimi	101
5.4. Uygulanan Yapılar ve Kent Mobilyaları	106
6. DEĞERLENDİRME ve SONUÇ	119
KAYNAKLAR	123
ÖZGEÇMİŞ	141
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR	142
EKLER	143

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

2D	: Two-Dimensional (İki Boyutlu)
3D	: Three-Dimensional (Üç Boyutlu)
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Ar-Ge	: Araştırma ve Geliştirme
ARCS	: Autonomous Robotic Construction System (Otonom Robotik İnşaat Sistemi)
AutoCAD	: Auto Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Otomatik Tasarım)
BAS	: Building Automation System (Bina Otomasyon Sistemi)
BIM	: Building Information Modeling (Yapı Bilgi Modellemesi)
CAD	: Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAM	: Computer-Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli Üretim)
CATIA	: Aided Three-dimensional Interactive Application (Üç Boyutlu Etkileşimli Destekli Uygulama)
CC	: Contoured Crafting (Konturlu Üretim)
CDW	: Construction and Demolition Waste (Yapısal Atık)
dB	: Decibel (Desibel)
DED	: Direct Energy Deposition (Doğrudan Enerji Biriktirme)
DLP	: Digital Light Processing (Dijital Işık İşleme)
DMLS	: Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Metal Lazer Sinterleme)
DTM	: Desk Top Manufacturing (Masaüstü Üretim)
EBM	: Electron Beam Melting (Elektron Işınıyla Eritme)
EC	: European Commission (Avrupa Komisyonu)
EOS	: Electro Optical Systems (Elektro Optik Sistemler)
FDM	: Fused Deposition Modeling (Eriyik Yığılma Modelleme)
FEM	: Finite Element Models (Sonlu Eleman Modelleri)
HIPS	: Yüksek Darbeli Polistiren
İHA	: İnsansız Hava Aracı
İSTON	: İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları
LCD	: Liquid Crystal Display (Sıvı Kristal Ekran)
LED	: Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
LENS	: Laser Engineering Net Shaping (Lazer Mühendisliği ile Şekillendirme)
LLM	: Lamination Manufacturing (Laminasyon Üretimi)
LOM	: Laminated Object Production (Lamine Nesne Üretimi)
m ²	: Metrekare
Mikro-SLA	: Mikro Stereolitografi (Mikro Stereolitografi)
MIT	: Massachusetts Institute of Technology (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü)
MPa	: Megapascal
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
PC	: Polikarbonat
PEEK	: Polieter Eter Keton
PET	: Polietilen Tereftalat
PLA	: Polilaktik Asit

Pa/s	: Pascal/ Saniye
PVC	: Polyvinyl Chloride (Polivinil Klorür)
SGC	: Solid Ground Curing (Katı Zemin Sertleştirme)
SLA	: Stereolitografi
SLM	: Selective Laser Melting (Seçici Lazer Eritme)
SLS	: Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)
TUM	: Technical University of Munich (Münih Teknik Üniversitesi)
TPC	: Termoplastik Polyester
UAM	: Ultrasonic Additive Manufacturing (Ultrasonik Katmanlı Üretim)
UV	: Ultraviyole
VR	: Virtual Reality (Sanal Gerçeklik)
WASP	: World's Advanced Saving Project (Dünyanın Gelişmiş Tasarruf Projesi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen ilk konut.	2
Şekil 2.1: Endüstri Devrimleri.	8
Şekil 2.2: Kristal Saray – Joseph Paxton.	9
Şekil 2.3: Eiffel Kulesi yapım aşaması.	9
Şekil 2.4: İngiltere’deki ilk çimento döner fırını.	11
Şekil 2.5: İlk üretilen beton taşıma amaçlı transmiksler.	12
Şekil 2.6: Akıllı bir fabrika oluşturan üç ana prosedür şeması.	13
Şekil 2.7: Sketchpad: a) Ivan Sutherland'ın Sketchpad ile çalışması; b) ekran görüntüsü.	15
Şekil 2.8: AutoCAD yazılımı ile yapılan izometrik çizim.	16
Şekil 2.9: BIM süreçleri.	17
Şekil 2.10: VR gözlükleri proje tasarımı alanında kullanımı.	19
Şekil 2.11: Dron veri işleme sonucu.	20
Şekil 2.12: Hafif ahşap yapı üretiminde kullanılan robot.	20
Şekil 2.13: Hadrian X inşaat robotu.	21
Şekil 3.1: Üç boyutlu yazıcı çalışma prensibi.	25
Şekil 3.2: Eklemeli imalat teknolojisi işlem akış şeması.	25
Şekil 3.3: Polimerizasyon üretim teknolojisi ve üretim örneği.	27
Şekil 3.4: Stereolitografi (SLA).	28
Şekil 3.5: Polimer Jet teknolojisi.	29
Şekil 3.6: SLA, DPL ve LCD yöntemlerinin şeması.	29
Şekil 3.7: Katı Zemin Kürleme (SGC) sistemi.	30
Şekil 3.8: Lamine Nesne Üretimi (LOM).	31
Şekil 3.9: Ultrasonik Eklemeli Üretim (UAM) üretim süreci şeması.	32
Şekil 3.10: LENS tekniği ile Hollanda’da metal köprü inşası.	33
Şekil 3.11: Bir “Toz Bağlayıcı Üretim” 3D yazıcının şeması.	34
Şekil 3.12: Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS)	36
Şekil 3.13: Seçmeli Lazer Ergitme (SLM) ve Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS).	36
Şekil 3.14: Elektron Işığı ile Ergitme (EBM).	37
Şekil 3.15: Enrico Dini tarafından geliştirilen D-Form.	38
Şekil 3.16: Eriyik Yığılma Modelleme (FDM).	39
Şekil 3.17: Kontür Üretim (CC) tekniği.	40
Şekil 3.18: Üç boyutlu (3D) yazıcı ile beton duvar üretimi.	41
Şekil 3.19: 3D yazıcı teknolojisinde kullanılan malzemeler.	43
Şekil 3.20: PLA filamenti ile basılmış ürünler.	44
Şekil 3.21: Plastik (sol) ve reçine (sağ) baskılar.	45
Şekil 3.22: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş metal baskı	46
Şekil 3.23: Cam fiber takviyeli polimer kompozit baskı parçaları	47
Şekil 3.24: Cam baskı nesneleri.	47
Şekil 3.25: Sıkıştırılmış bir şekil hafızalı polimerin, ısıya maruz kalmasıyla orijinal boyutlarına dönüşme aşamaları.	48
Şekil 3.26: Ahşap filamentten yapılmış nesneler.	49
Şekil 3.27: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen seramik nesneler.	50
Şekil 3.28: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen beton yüzey.	51
Şekil 3.29: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş protez kolu.	53

Şekil 3.30: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş koroner arter.	53
Şekil 3.31: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş diş modeli.	53
Şekil 3.32: Foodini gıda üretimi.	54
Şekil 3.33: 3D yazıcı teknolojisi üretilmiş cheesecake.	55
Şekil 3.34: 3D yazıcı teknolojisi üretilmiş ilk elbise.	56
Şekil 3.35: 3D yazıcı teknolojisi üretilmiş “Adidas Futurecraft” ayakkabı.	56
Şekil 3.36: 3D yazıcı teknolojisi üretilmiş takılar.	57
Şekil 3.37: 3D yazıcı teknolojisi üretilmiş ilk insansız hava aracı.	57
Şekil 3.38: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş oyuncak tekne.	58
Şekil 4.1: Yapıyı oluşturan katmanlar.	60
Şekil 4.2: Oluşturulan ahşap lamine.	62
Şekil 4.3: Ahşap tozu ile 3D yazıcı teknolojisiyle üretim.	62
Şekil 4.4: Ambalaj atıkları: a) ayrıştırma aşaması, b) selüloz filament silindiri, c) basılmış ıslak selüloz.	63
Şekil 4.5: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş metal numuneler.	63
Şekil 4.6: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen biyoplastik bileşenin üstten kesiti.	64
Şekil 4.7: SA/çimento ve su/çimento oranlarının işlenebilirliğe ve taşınabilirliğe etkisi.	65
Şekil 4.8: Yapısal atıklarla oluşturulan geopolimer harçların üretimi.	66
Şekil 4.9: 6 Bevis Marks binası: a) çatı kanopisi, b) bağlantı bileşeni modeli.	67
Şekil 4.10: Nematox cephe bağlantısı: a) cephe bileşeni modeli, b) alüminyum prototip nematox cephe düğümü.	68
Şekil 4.11: 3D cephe prototipi: a) cephe paneli üretimi, b) yarı saydam plastik dokusu, c) test için üretilen cephe elemanı.	68
Şekil 4.12: Tensegrity Yapısı: a) yapının tasarımı, b) geleneksel üretilen çelik düğüm, c) 3D teknoloji ile üretilen düğüm.	69
Şekil 4.13: 3D Baskı Ev 1.0: a) geliştirilen model, b) kabuk birleşimi.	69
Şekil 4.14: Picoroco Duvarı: a) blokların yerleştirilmesi, b) şeffaf duvar yapısı, c) blokları birleştirmek için kullanılan klips sistemi	70
Şekil 4.15: Sawdust Ekranı: a) doğal ahşap dokusu, b) “Sawdust Ekranı” Yapısı.	70
Şekil 4.16: Seramik köşe tuğlalar.	71
Şekil 4.17: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen duvar: a) üst üste istiflenmiş üretilmiş tuğlalar, b) 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş tuğla.	71
Şekil 4.18: Seramik tuğla: a) tuğla modülü, b) modüler seramik sistem.	72
Şekil 4.19: Soğuk tuğla: a) duvar sistemi şeması, b) 3D soğuk tuğla.	72
Şekil 4.20: Duvar kaplama: a) karonun yandan kesiti, b) duvar yüzeyi.	73
Şekil 4.21: Fusion tasarımı: a) seramik karolar, b) karo birleşimleri.	73
Şekil 4.22: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen ev projesi: a) 3D yazıcısı, b) 3D yazıcı teknolojisi ile üretilmiş yapı bloğu	74
Şekil 4.23: Quake Column: a) birleştirilmiş yapı, b) inka kesme taş yapısı, c) numaralandırılmış bloklar	74
Şekil 4.24: Keating'in çift duvarlı kubbe yapısı üretimi.	75
Şekil 4.25: BatiPrint projesi üretimi.	75
Şekil 4.26: Enerji santrali için düşük karbonlu temel.	76
Şekil 4.27: ARCS yazıcı kullanılarak üretilen temel.	77

Şekil 4.28: Toyosu 6-Chome: a) 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş kolonlar, b) şantiyede birleştirilen taç yaprağı şeklindeki kolon.	77
Şekil 4.29: Organik kafes destek yapısı: a) kolon yapısı, b) kolon üretimi.	78
Şekil 4.30: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş prekast giriş.	79
Şekil 4.31: Akıllı döşemenin 11 segmenti.	79
Şekil 4.32: Akıllı döşeme projesi: a) parçaların montaj aşaması, b) döşemede yer alan aydınlatma ve yangın söndürme sistemi.	80
Şekil 4.33: Dubai’de üretilen bir ofis yapısının inşası.	81
Şekil 4.34: Kapı yerlerinin oluşturulması.	81
Şekil 4.35: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen merdiven: a) merdiven elemanı, b) merdivenlerin sahada yerleştirilmiş hali.	82
Şekil 4.36: Cadenza Merdiveni: a) beton merdiven, b) 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş basamak kalıbı.	83
Şekil 4.37: 3dpod projesi merdiveni: a) inşası, b) tamamlanmış merdiveni.	83
Şekil 4.38: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen gömülü merdivenli toprak duvar: a) basamak detayı, b) duvar prototipi.	83
Şekil 4.39: 3dpod projesi çatısı: a) içten görünümü, b) birleşim detayı.	84
Şekil 4.40: Ahşap çatı uygulaması.	85
Şekil 4.41: Çelik çatı uygulaması.	85
Şekil 4.42: Kabuk yapı uygulaması.	85
Şekil 4.43: NASA’nın açtığı proje yarışmalara katılan proje örnekleri.	86
Şekil 4.44: Winsun 3D villa: a) ön cephesi, b) yan cephesi, c) prefabrike Üretimi.	87
Şekil 4.45: Winsun 6 katlı apartman yapısı: a) yapının inşa hali, b) yapının tamamlanmış hali, c) yapının merdiveni.	87
Şekil 4.46: GAIA Evi Üretim Prensibi ve Kullanılan Malzemeler.	88
Şekil 4.47: GAIA Evi: a) dıştan görünümü, b) iç mekânı.	89
Şekil 4.48: BioHome3D: a) yapının üretimi, b) tamamlanmış yapı.	89
Şekil 4.49: House Zero: a) dıştan görünüm, b) içten görünüm.	90
Şekil 4.50: TECLA: a) ev prototipi, b) duvar yapısı.	91
Şekil 4.51: TECLA’nın havalandırma şeması.	91
Şekil 4.52: TECLA ile üretilebilecek eko-habitatların şeması.	91
Şekil 4.53: Housing 05: a) yapısının planı, b) bahçe konsepti.	92
Şekil 4.54: Floating House: a) üretim aşaması, b) yapının su üstündeki hali.	92
Şekil 4.55: Urban Cabin: a) yapısı, b) cephe doğraması, c) dış mekân küveti.	93
Şekil 4.56: Da Vinci's Bridge: a) köprü yapısı, b) inşası.	94
Şekil 4.57: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen mağaza: a) yapısı, b) duvar işlenen Cannage motifi, c) çelik çatı detayı.	94
Şekil 5.1: İSTON Tuzla tesisi: a) üretim alanı, b) örnek üretimler.	96
Şekil 5.2: Üretim sırasında eklenen destek yapısı.	97
Şekil 5.3: İSTON tarafından geliştirilen 3D mobil yazıcı.	98
Şekil 5.4: Malzemenin hazırlanması ve üretim aşaması: a) betonun hazırlanması, b) 3D mobil yazıcı ile kolon üretimi.	100
Şekil 5.5: Prefabrike üretilmiş pergola yapıları: a) bileşenlerine ayrılmış pergola, b) yapı elemanları ayrı ayrı üretilmiş pergola.	101

Şekil 5.6: Montaj için tasarlanmış duvar içinde yer alan bağlantı yeri.	101
Şekil 5.7: 3D yazıcı teknolojisiyle yapı üretimi öncesinde oluşturulan temel.	102
Şekil 5.8: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen kolon.	103
Şekil 5.9: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen taşıyıcı olmayan duvar.	103
Şekil 5.10: 3D mobil yazıcı ile üretilen taşıyıcı duvar: a) duvar basımı, b) donatıları eklenmiş duvar.	104
Şekil 5.11: 3D yazıcı teknolojisiyle üretimde tesisat sistemi: a) elektrik tesisatı detayı, b) sıhhi tesisat detayı, c) duvardaki tesisat çıkışları.	105
Şekil 5.12: Konut inşası: a) plan şeması, b) 8 taşıyıcı kolon, c) duvar üretimi.	107
Şekil 5.13: Konutun duvarları: a) duvarın üretim aşaması, b) birleşim detayı.	108
Şekil 5.14: Türkiye'de inşa edilen ilk konut: a) dıştan genel görünüm, b) bükümlü kolon ve yağmur zinciri detayı.	108
Şekil 5.15: İçten görünüm: a) bir odanın görünümü, b) holün görünümü, c) dairesel köşe detayı şeması.	109
Şekil 5.16: İç Mekân Tasarımları: a) Mutfak tasarımı, b) Islak Hacim.	110
Şekil 5.17: İBB Park ve Bahçeler Müdürlüğü Üsküdar Şeflik Ofisi.	111
Şekil 5.18: Ofisin duvar üretim: a) duvar ve kolon planları, b) duvarda boş bırakılan yerler.	111
Şekil 5.19: Tiny House yapım şeması.	112
Şekil 5.20: Tiny House: a) Tiny House yapısı b) duvar birleşim izleri, c) örülen duvardaki tesisat çıkışları.	113
Şekil 5.21: Tiny House: a) duvar-çatı birleşimi, b) içten görünümü.	114
Şekil 5.22: Tiny House: a) modellemesi, b) içten görünümü.	115
Şekil 5.23: Prefabrike konut/ofis yapısı: a) yapı elemanlarının sahaya taşınması, b) duvarın sahada montajlanması, c) saha alanı.	116
Şekil 5.24: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen kent mobilyaları: a) geri dönüşüm kutusu, b) şezlong, c) hayvan evleri.	118
Şekil 5.25: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen banklar: a) beton ve metal kombinasyonu, b) beton ve ahşap kombinasyonu, c) beton ile ahşap/metal kombinasyonu	118

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1: 3D yazıcıların tarihsel gelişimi.	23
Tablo 3.2: Eklemeli imalat teknolojileri ve teknikleri.	26
Tablo 3.3: Yapı üretiminde kullanılan teknikler	42
Tablo 5.1: İSTON tarafından üretilen yapılar.	117

1. GİRİŞ

Teknoloji insanların sosyal, kültürel, ekonomik ve çevresel gereksinimlerini karşılayan bir araçtır. Teknolojik yenilikler, birçok sektörü etkilediği gibi yapı sektörünün gelişimini de etkilemiştir. Yapı sektörü, süre, maliyet ve kalite gibi temel boyutların yanı sıra rekabetin dördüncü boyutu olarak kabul edilen teknolojik yenilik olgusuyla giderek daha fazla şekillenen bir sektördür. Teknolojik yenilikler, yapı sektörüne yeni ürünlerin etkisini belirlerken, mevcut üretim kaynaklarının hem nicelik hem de nitelik açısından taleplere uyum sağlaması gerekliliğini vurgulamaktadır. Teknolojik ilerlemelerin yapı sektöründeki etkileri, teknolojik ürünlerin kendileriyle birlikte getirdiği sistemik düzenlemelerle birlikte şekillenmektedir. Yapı sektörünün stratejik önemi, teknolojik yeniliklerin benimsenmesi ve bu yeniliklerin sektörde yaygınlaştırılmasıyla doğrudan ilişkilidir [1].

Yapı sektöründe teknoloji; kullanılan malzeme, araç, yöntem ve teknik bilgi süreçleri, yönetsel bir sistem ile oluşan bir ürünün, yani yapının oluşmasını sağlayan aşamaları içermektedir [2]. Teknoloji, yapı sektöründe tasarım, malzeme seçimi, yapım aşamaları gibi konularda gelişmeler sağlanmıştır. Endüstri Devrimleri ile geliştirilen malzeme ve teknik bilgiler ile geniş açıklıklar, yüksek binalar ve farklı formlara sahip yapı tasarımları gerçekleştirilmiştir [3]. Yapı sektöründe teknoloji kullanımı, sadece yapıların inşasını değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve çevresel etkilerin azaltılması gibi konularda da önemli gelişmelere yol açmıştır. Günümüzde, yapı sektöründe dijitalleşme ve otomasyonun artması, akıllı binalar ve yeşil yapıların yaygınlaşmasını sağlamaktadır [4]. Özellikle, Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modeling- BIM) gibi dijital araçlar, projelerin tasarım aşamasından inşaat, bakım geri dönüşüm süreçlerine kadar tüm aşamalarında daha verimli bir yönetim sağlamaktadır [5]. Bunun yanı sıra, yeni malzemelerin geliştirilmesi ve kullanımı, yapıların dayanıklılığı, enerji verimliliği ve estetik değerlerini artırmaktadır.

Teknolojik yeniliklerin geliştirilmesi ile dijital tasarım sürecine geçilmiş ve dijital ortamda hazırlanan tasarım modelleri 3 boyutlu (3D) yazıcı teknolojisi yardımıyla

uygulanmaya başlanmıştır. 3D yazıcı teknolojisi, yapı sektöründe oldukça önemli bir yere sahip olup, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla daha verimli, ekonomik ve hızlı bir yapı üretim süreci sunmaktadır. Karmaşık geometrili yapıların üretimini mümkün kılan 3D yazıcı teknolojisi, yapı sektöründe sadece yapıların üretiminde değil, aynı zamanda yapı elemanlarının üretiminde de kullanılabilmektedir. İnşaat sektöründe yapı ve yapı elemanlarının 3D yazıcılar tarafından üretilebileceği düşünülürse, bu teknoloji son derece inovatif bir yaklaşımdır [6].

Dünyadaki ilk 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen konut projelerinden biri 2015 yılında Çin merkezli WinSun firması tarafından gerçekleştirilmiş olsa da izinli olarak üretilen ilk 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen konut, 2018 yılında ICON adlı teknoloji firması tarafından Austin, Teksas'ta hayata geçirilmiştir **Şekil 1.1** [7], [8].



Şekil 1.1: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen ilk konut [9].

3D yazıcı teknolojisine yönelik bilimsel çalışmalara bakıldığında, yapı sektöründe 3D yazıcı teknolojisine yönelik uluslararası bilimsel araştırmaların 2016 yılında başlamış olduğu, ulusal çalışmalarda ise bu konunun 2018 itibarıyla ele alınmaya başlandığı görülmüştür. Bunun sebebi, 3D yazıcı teknolojisinin, günümüze yakın ve gelişmeye devam bir teknoloji olmasıdır.

Uluslararası çalışmalar bakıldığında, 2016 yılında yapılan bir araştırmada sandviç kompozitlerin üretimi için 3D yazıcı teknolojisi kullanılmasını incelenmiştir [10]. Konut üretimi açısından Albuquerque'de gerçekleştirilen bir yüksek lisans

çalışmasında ise, 3D yazıcı teknolojisi ile uygun fiyatlı konut inşası incelenmiştir [11]. 2019 yılında yapılan bir araştırma makalesinde 3D yazıcı teknolojisinin türleri, uygulama alanları ve üretim endüstrisinde kullanılan malzemeler hakkında genel bir araştırma yapılmıştır [12]. 2020 yılında Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yapılan bir yüksek lisans tez çalışması, ekstrüzyon tabanlı seramik üretimine odaklanmış ve dijital olarak döküm kalıbı üretimi için ekstrüzyon tabanlı bir seramik 3D yazıcı teknolojisi kullanarak bir üretim süreci modeli geliştirmiştir [13]. Hafif beton malzemeler kullanılarak yapılan çalışmada, 3D yazıcı teknolojisiyle içi boş beton yapılar üretmek amaçlanmış ve beş farklı hafif seramik kum oranıyla hazırlanan beton karışımlarının 3D yazıcı teknolojisiyle üretime uygunluğu incelenmiştir [14]. 2020 yılında gerçekleştirilen bir başka çalışma, 3D yazıcı teknolojisiyle beton baskı ve beton malzemelerinin geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Bu araştırma, 3D yazıcı teknolojisiyle beton üretiminin potansiyel etkilerini ve sonuçlarını incelerken, bu yenilikçi teknolojinin yapı sektörüne entegrasyonunu etkileyen faktörleri değerlendirmiştir [15]. 2021 yılında yapılan bir çalışmada 3D yazıcı teknolojisiyle üretimde ahşap tozunun kullanımını, bu kullanımın ürün özelliklerini ve gelecekteki uygulama potansiyelini değerlendirilmiştir [16]. 3D yazı teknolojisiyle üretimde binalardaki termal performans üzerine yapılan bir çalışmada 3D yazı teknolojisiyle üretilen binaların termal verimliliğine odaklanarak, yapı sektöründeki uygulamaları ve gelişmeleri değerlendirilmiştir [17]. 2021 yılında yapılan 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen duvarların yangın performansını incelemek üzere, farklı özelliklerde üretilen beton duvar türlerinin yangın dayanımını “Sonlu Eleman Modelleri (FEM)” kullanarak araştırmıştır [18]. 2021 yılında, geri dönüştürülebilir bir malzeme olan yapısal atıkları, 3D yazıcı teknolojisiyle üretim için akış ve deformasyon özellikleri açısından incelenmiş; bu kapsamda, ortam sıcaklığında kürlenmiş yapısal atık bazlı geopolimerler değerlendirilmiştir [19]. 2022 yılında, aynı çalışmanın devamı olarak, basınç dayanımı, mekanik performans ve bağlanma özellikleri açısından değerlendirmeler yapan ek çalışmalar gerçekleştirilmiştir [20], [21]. 2023 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, betonun 3D yazıcı teknolojisiyle üretimindeki gelişmeler ve ilerlemeler ele alınmış; ayrıca bu teknolojinin sürdürülebilir inşaat bağlamındaki zorlukları ve gelecekteki potansiyeli incelenmiştir [22]. Benzer bir çalışmada ise, 3D yazıcı teknolojisinin temel faydaları ve zorlukları vurgulanarak, yapı sektöründe katkı maddesi üretimi uygulamasının temel yönlerini ele alınmıştır

[23]. Aynı yıl gerçekleştirilen başka bir çalışmada, inşaatlarda kullanılan 3D yazıcı teknolojisinin makine öğrenimi uygulamaları araştırılmıştır [24]. 2024 yılında yapılan güncel bir çalışmada ise beton yapılarda 3D yazıcı teknolojisinin çevresel faydalarını araştırılmıştır [25].

Ulusal çalışmalara bakıldığında 2018 yılında 3D yazıcı teknolojisi ile yapı üretiminde son dönem yenilikleri incelenmiştir. Çalışmada, yüksek katlı yapıların inşası, ihtiyaç duyulan malzemeler üzerine gerçekleştirilen araştırmalar, çelik köprü üretimi ve uzay yapıları gibi temel konular incelenmiştir. Ayrıca, söz konusu teknolojinin gelecekteki potansiyeli ve gelişim süreci üzerine değerlendirmeler yapılmıştır [26]. 2019 yılında gerçekleştirilen bir yüksek lisans tez çalışmasında, Türkiye'deki tüm üniversitelerin mimarlık bölümleri araştırma kapsamına alınarak, 3D yazıcı teknolojisinin mimarlık eğitimindeki kullanım potansiyeli ve ders içeriklerine entegrasyon durumu incelenmiştir. Yeni teknolojilerin mimarlık eğitim programlarına entegrasyonunu geliştirmek amacıyla çeşitli öneriler sunulmuştur [27]. Aynı yıl, mobilya tasarım ve üretiminde 3D yazıcı teknolojisinin uygulanabilirliği üzerine yapılan bir yüksek lisans tezi, 3D yazıcı teknolojisini kullanarak tasarım ve üretim yapan tasarımcıların yaklaşımlarını ele almıştır [28]. 3D yazıcı teknolojinde kullanılan malzemeler hakkında yapılan bir derleme makalesinde, yapının inşasında kullanılan tuğla, demir ve beton gibi yapı malzemelerinin 3D yazıcı teknolojisi ile üretilme yöntemleri ve özellikleri ele alınmıştır [29]. Benzer iki çalışmada da 3D yazıcı teknolojisinin mimari alanda kullanımına yönelik araştırma yapılmıştır. Bina üretiminde kullanımı inceleyen çalışmada literatürdeki örnek çalışmalar derlenerek, mimari yapılarda kullanımı üzerine yapılan çalışmada ise 3D yazıcı teknolojiyle üretime uygun yazıcılar ve kullanılan malzemeler kapsamında analiz edilmiştir [30], [31]. 2019 yılında gerçekleştirilen bir başka tez çalışmasında, Eriyik Yığma Modelleme (Fused Deposition Modeling- FDM) tipi yazıcı ile üretilen iki katlı konut prototip modeli üzerinden üç boyutlu beton üretim süreci analiz edilmiş, geleneksel beton döküm yöntemleriyle maliyet, zaman ve işçilik açısından karşılaştırılmış ve az katlı konutlarda 3D yazıcı teknolojiyle beton üretiminin Türkiye'deki uygulanabilirliği incelenmiştir [32]. Aynı yıl yapılan bir diğer çalışma, 3D yazıcı teknolojilerinin mimarlık ve mimari koruma alanındaki kullanım potansiyelini araştırmıştır. Bu çalışmada mimari korumada alanında çalışan ve 3D yazıcı teknolojisini kullanan mimarlık ofisleri ve mimarların görüşlerine yer verilmiştir

[33]. 2019 yılında yapılan bir yüksek lisans çalışması, 3D yazıcı teknolojilerinin mimarlık alanındaki potansiyellerini ve geleceğini sosyal, ekonomik ve çevresel bir perspektiften değerlendirmiştir. Bu tez çalışmasında, son dönem mimarlık ürünleri arasında 3D yazıcıların kullanımıyla literatüre giren yapılar ve yapım teknikleri üzerinden değerlendirilmiştir [34]. 2020 yılında yapılan bir araştırmada, 3D yazıcıların günümüz mimarisinde kullanımını ele alınmıştır. Bu çalışmada, literatür taraması, analitik inceleme ve karşılaştırmalı analiz yöntemleri kullanılmıştır [35]. 2022 yılında gerçekleştirilen bir tez çalışmasında, konut tasarım ve üretim süreçlerinde 3D yazıcı teknolojisinin kullanımını araştırmıştır. Bu araştırma, 3D yazıcı teknolojisinin konut üretimi bağlamındaki kullanım alanlarını ve örnek konut yapıları ele almıştır [36]. Aynı yıl, endüstriyel tasarım mühendisliği bölümünde yapılan bir yüksek lisans tez çalışması, 3D yazıcı teknolojiyle kompozit gaz beton üretiminde nasıl kullanılabileceğini incelemiştir [37]. Aynı yıl gerçekleştirilen bir başka tez çalışmasında, afet sonrası geçici konut üretiminde 3D yazıcı teknolojisinin kullanımı ele alınmış ve Türkiye’de afet ve acil yardım süreçlerinde faaliyet gösteren kurumların mevcut geçici konut üretim teknikleri; yapı üretimi, kalite ve sürdürülebilirlik açısından incelenmiştir [38]. 2023 yılında gerçekleştirilen bir çalışma, mimari aydınlatma elemanlarının üretiminde geri dönüştürülmüş PET malzemenin kullanımı ve bu süreçte 3D yazıcı teknolojisinin rolünü incelemiştir [39]. 2023 yılında gerçekleştirilen güncel bir çalışmada, 3D yazıcı teknolojiyle yapı malzemelerinin gelişimi ve yapı malzemelerinin üretim süreçleri literatürdeki örnek yapılar üzerinden araştırılmıştır [40]. Yapılan farklı bir çalışmada, 3D yazıcı teknolojiyle üretimdeki katmanlar arası davranışları incelemek amacıyla, basılan bir yapının en alt katmandan en üst katmana kadar olan katmanlar arası bağ dayanımı analiz edilmiştir [41]. Bu çalışmalar, 3D yazıcı teknolojisinin mimarlık ve yapı sektöründe geniş bir kullanım yelpazesine sahip olduğunu göstermekte ve gelecekte bu teknolojinin daha yaygın bir şekilde benimsenerek sektörde önemli değişimlere yol açacağını öngörmektedir.

Yapılan çeşitli bilimsel çalışmalar incelendiğinde, gelişen yeni bir teknoloji olan 3D yazıcı teknolojisinin mimarlık eğitiminde kullanım potansiyelleri, mobilya tasarımı, konut üretimi, yapı malzemesi geliştirilmesi ve uygulanması gibi konuların ele alındığı görülmektedir. Ancak, 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründe yapı malzemesi, yapı bileşeni, yapı elemanı ve yapı üretimine bağlamındaki katkılarını

içeren bir araştırmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışması, 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründeki potansiyelini bu bağlamda belirlemeyi ve mevcut inşaat süreçlerine entegrasyonunu analiz etmeyi amaçlamaktadır. Araştırma yöntemi kapsamında, ulusal ve uluslararası tezler, makaleler, bildiriler, kitaplar, dergiler ve diğer yayınlar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, Türkiye’de 3D yazıcı teknolojisiyle üretim yapan bir üretim tesisi ziyaret edilerek uygulama örnekleri yerinde gözlemlenmiş ve Ek-A’da verilen röportaj soruları doğrultusunda uzmanlarla görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, yapı sektöründe 3D yazıcı teknolojisinin etkin kullanımı için tasarım ve üretim süreçleri, kullanılan malzemeler, sürdürülebilirlik, maliyet değerlendirmesi, nitelikli iş gücü ihtiyacı, üretim süresi, yapıların boyut ve yükseklik sınırları gibi teknik konulara yer verilmiştir. Bu bağlamda, yapılan tez çalışmasının 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründe hangi alanlarda etkili olduğu, nasıl kullanılabileceği ve gelecekte nasıl gelişebileceği gibi konular üzerinde durularak, gelecekte yapılacak araştırmalara rehberlik edeceği düşünülmektedir.

2. TEKNOLOJİK GELİŞMELERİN YAPI SEKTÖRÜNE ETKİSİ

Teknoloji, insanların ihtiyaçlarını karşılamak, sorunlara çözüm bulmak ve yaşam kalitesini artırmak amacıyla bilimsel bilgi ve yöntemleri uygulayarak geliştirilen araçlar, makineler, sistemler ve süreçler bütünüdür. Teknoloji, sadece mekanik ve elektronik cihazları değil, aynı zamanda yazılım, bilgi yönetimi ve organizasyonel yapılar gibi insan faaliyetlerini daha verimli hale getiren yenilikleri de kapsar. Temel amacı, insan etkinliklerini kolaylaştırmak, daha hızlı, etkili ve sürdürülebilir çözümler sunmaktır. Teknolojik gelişmeler, toplumsal yapılar, kültürel süreçler ve ekonomi üzerinde derin etkiler yaratmaktadır [42].

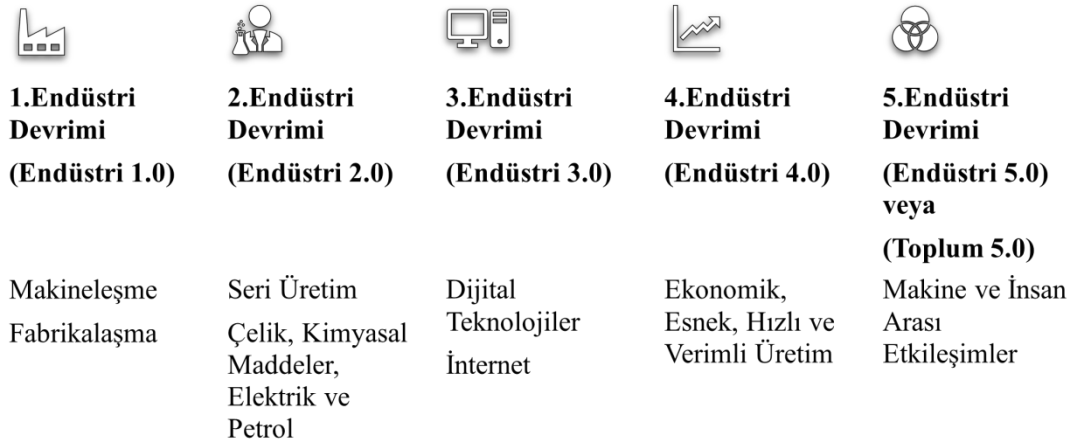
Günümüz ekonomileri, toplumları ve şirketleri açısından, ortaya çıkan teknolojilerin ve bu teknolojilerin uygulanmasının potansiyel sonuçlarını incelemek büyük önem taşımaktadır. Son on yıllarda, gelecekteki teknolojik gelişmeleri anlamak, öngörmek ve yönlendirmek amacıyla çeşitli araçlar ve yöntemler geliştirilmiş, teknolojinin ve toplumun birlikte evrimleştiği ve geliştiği kabul edilmiştir [43].

Teknolojik yenilikler, birçok sektörde olduğu gibi yapı sektörünün gelişimine de katkılarda bulunmuştur. Tarihsel süreç incelendiğinde, yapı sektörünün teknoloji ile önemli değişimler yaşadığı gözlemlenmektedir. Teknolojinin ilerlemesi, yapı malzemelerinden inşaat tekniklerine kadar pek çok alanda dönüşümlere yol açmış ve bu durum mimari stiller ile yapıların evrimini etkilemiştir. Ayrıca, Endüstri Devrimleriyle birlikte ortaya çıkan fabrikalaşma, seri üretim, dijitalleşme gibi faktörler, yapı ve yapısal katmaların gelişimini önemli ölçüde değiştirmiştir [44].

2.1. Endüstri Devrimleri

18. yüzyılın sonları ile 19. yüzyılın başlarında İngiltere'de başlayan ve ardından Hollanda, Fransa gibi diğer Avrupa ülkelerine yayılan Endüstri Devrimi, teknolojik ilerlemeler, endüstriyel üretim ve ulaşım olanaklarındaki gelişmelerle her alanda meydana gelen köklü değişiklikler olarak tanımlanmaktadır [45].

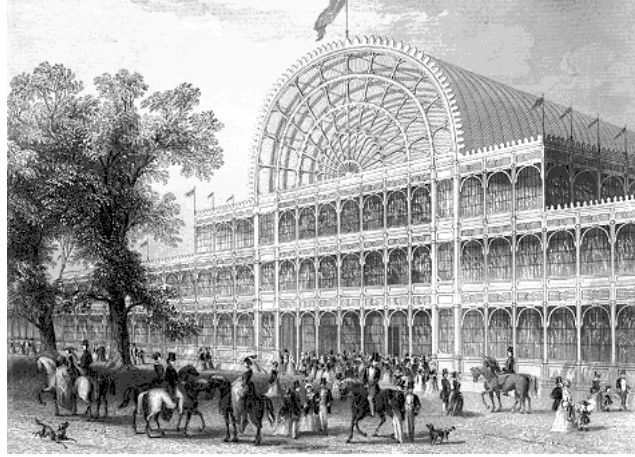
Endüstri Devrimi'nin ilk aşaması olarak bilinen Endüstri 1.0, 18. yüzyılın ortalarında İngiltere'de buhar gücünün kullanılmaya başlanmasıyla başlamış ve hızla yaygınlaşmıştır. Bu dönemin başlangıcı, insanlık tarihindeki en önemli dönüm noktalarından biri olarak kabul edilmektedir. Buhar gücünün benimsenmesi, yalnızca sanayi ve üretim süreçlerini değil, aynı zamanda sanat ve mimarlık alanlarını da derinden etkilemiştir [46]. 1765 yılında James Watt tarafından geliştirilen buharlı makinelerin kullanımı, endüstrileşme sürecinin başlangıcını işaret etmiştir. Bu buluşun ardından, üretim süreçlerinde verimliliği artırmak amacıyla makinelerin kullanımı yaygınlaşmış ve küçük imalathaneler fabrikalara dönüşmüştür **Şekil 2.1**. Bu fabrikalarda makineler, maden ocaklarının çevresinde yoğunlaşarak endüstriyel kurumları desteklemiş, ulaşımın geliştirilmesi ve üretim çabalarının artmasıyla işçi sınıfı ortaya çıkmış ve sermaye büyük ölçüde anonim şirketlerde toplanmıştır. 19. yüzyıl ortalarına gelindiğinde, buhar gücünün bulunması endüstri devrimini tüm alanlarda etkisi altına almış ve bu dönemde modern büyük ölçekli endüstriyel yapılar kurulmuştur [47].



Şekil 2.1: Endüstri Devrimleri [44].

Endüstri 1.0'ın mimarlık üzerindeki en önemli etkilerinden biri, yeni malzemelerin kullanılmaya başlanmasıydı. Bu dönemde demir, çelik ve cam gibi malzemeler mimarlıkta daha önce görülmemiş biçimlerde kullanılmıştır. Buhar gücüyle çalışan makineler, bu malzemelerin üretimini ve işlenmesini kolaylaştırdı ve mimarlar bu yeni malzemeleri kullanarak daha cesur ve yenilikçi tasarımlar geliştirebildiler. Örneğin, dökme demir ve çelik, daha büyük açıklıklar ve daha yüksek yapılar inşa edilmesine olanak tanıdı. Bu da mimari tasarımda yeni estetik ve işlevsel olanakların

keşfedilmesine yol açtı [27]. Bu dönemde inşa edilen en dikkat çekici yapılardan biri, 1851 yılında Londra’da düzenlenen Büyük Sergi için Joseph Paxton tarafından tasarlanan Kristal Saray’dır. Kristal Saray, cam ve dökme demirin birlikte kullanıldığı ilk büyük ölçekli yapı olarak, Endüstri 1.0’ın mimarlık üzerindeki etkisinin bir simgesi haline gelmiştir **Şekil 2.2**. Yapının büyük ölçüde prefabrik bileşenlerden oluşması ve inşaatının hızlı bir şekilde tamamlanması, fabrikasyonun ve seri üretimin mimarlık üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir [27], [48]. Bir diğer önemli yapı ise, 1889 yılında Paris’te tamamlanan Eiffel Kulesi’dir. Mühendis Gustave Eiffel tarafından tasarlanan bu kule, demirden inşa edilmiştir ve özel teknikler sayesinde sağlamlığını korumaktadır. Eiffel Kulesi, yüksekliği ve estetik yapısıyla Endüstri 1.0’ın getirdiği teknolojik ve malzeme yeniliklerinin mimarlıkta nasıl uygulanabileceğinin en iyi örneklerinden biridir **Şekil 2.3** [49].



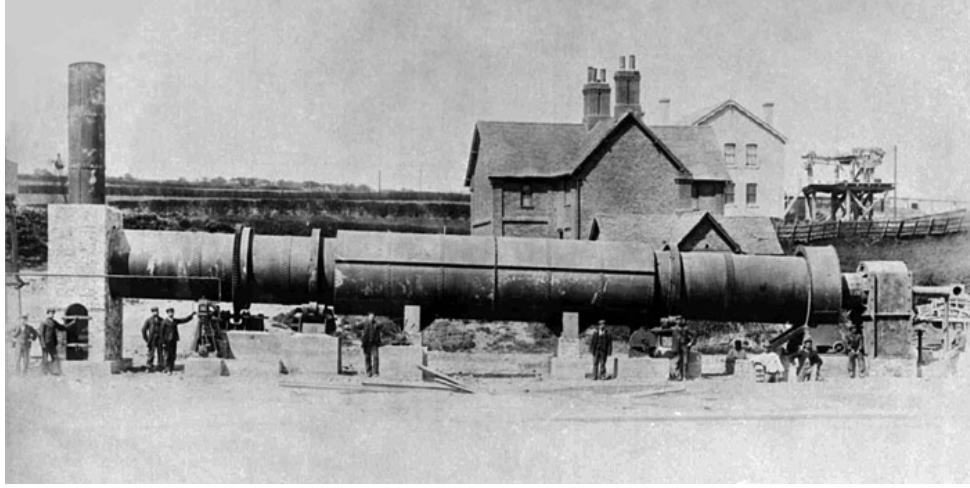
Şekil 2.2: Kristal Saray – Joseph Paxton [27], [48].



Şekil 2.3: Eiffel Kulesi yapım aşaması [49].

Endüstri 1.0 ile gelen bu yenilikler, mimarlık pratiğini köklü bir şekilde değiştirdi. Geleneksel yapı malzemeleri olan taş, ahşap ve tuğlanın yanı sıra, demir, çelik ve cam gibi malzemelerin kullanımı mimarların tasarım olanaklarını genişletti. Yeni yapım teknikleri ve malzemeler, mimarların daha büyük, daha yüksek ve daha karmaşık yapılar inşa etmesine olanak tanıdı [3], [27], [44]. Buhar gücünün kullanımı ayrıca, inşaat süreçlerinde mekanizasyonun başlamasına da yol açtı. İnşaat makinelerinin kullanımı, yapıların daha hızlı ve daha verimli bir şekilde inşa edilmesini sağladı. Bu da büyük ölçekli projelerin ve kentsel gelişimin hızlanmasına katkıda bulundu [50], [51]. Endüstri 1.0'ın mimarlık üzerindeki etkileri, sadece malzeme ve yapım teknikleriyle sınırlı kalmamış, aynı zamanda mimari tasarımcının estetik ve işlevsel boyutlarını anlayışını etkilemiştir [52]. Bu dönemde geliştirilen yenilikler, modern mimarlığın temellerini atmış ve gelecekteki sanayi devrimlerine zemin hazırlamıştır.

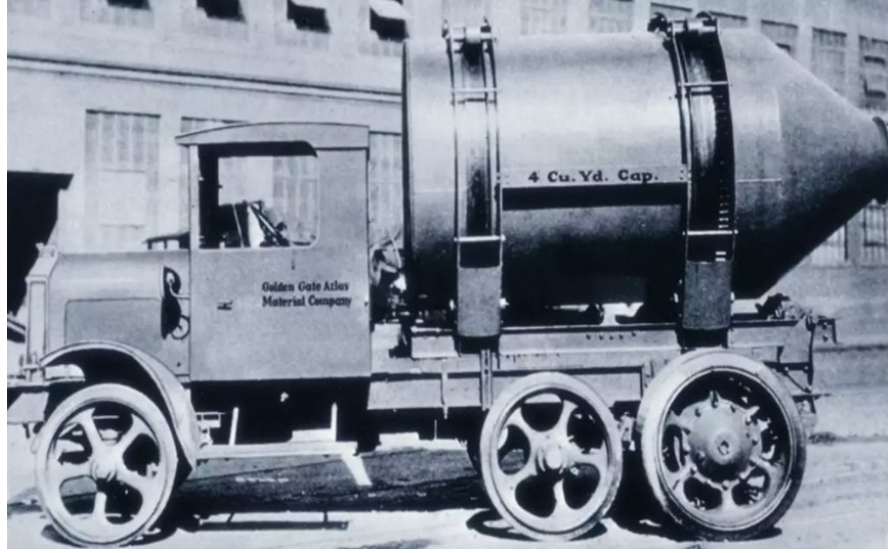
İkinci Sanayi Devrimi olarak bilinen Endüstri 2.0, endüstriyel ürünlerin miktar ve çeşitlilik açısından büyük bir gelişim gösterdiği bir dönemi temsil etmektedir. Bu dönemdeki teknolojik yenilikler arasında elektrik, elektronik sistemler, mekanik cihazlar ve otomobiller önemli yer tutmaktadır [53]. Endüstri 2.0 aynı zamanda bazı kaynaklarda “Teknoloji Devrimi” olarak da adlandırılan devriminin temeli, üretimin ihtiyaç duyduğu enerjiyi elektrik sistemleri ile yapılmaya başlanmasıdır [44]. Buhar gücü, makinelerin çalıştırılmasında ve demiryolu gibi yeni ulaşım sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu dönemde demiryolları başta olmak üzere birçok ulaşım olanaklarının gelişmesi ham madde temini kolaylaştırmış, üretilen ürünlerin farklı ve uzak pazarlara ulaştırılması sağlanmıştır. Çelik endüstrisinin temelleri, 1856'da Henry Bessemer tarafından çeliğin geliştirilmesiyle atılmıştır. Demir çağı 1850 yılı itibarıyla yerleşmişti, ancak demir, çeliğe kıyasla daha az dayanıklıydı. Demirden yapılan makine parçaları ve raylar aşınma ve yıpranma nedeniyle yüksek maliyetli hale gelmişti. Demir, özellikle makineler ve inşaat alanlarında yeterli dayanıklılığa ve elastikiyete sahip değildi. Çeliğin icadıyla birlikte çelik endüstrisi hızla ilerlemiş ve İkinci Sanayi Devrimi'nin sembolü haline gelmiştir [52], [53]. Bu dönemde ucuz çelik üretim yöntemleri ve çimento inşaat teknolojilerini geliştirmiştir **Şekil 2.4** [54].



Şekil 2.4: İngiltere’deki ilk çimento döner fırını [55].

Endüstri 3.0 devrimi 20. yüzyılın ilk yarısı İkinci Dünya savaşı ile şekillenmiştir. Savaş sırasında teknolojik gelişmeler duraksamıştır. 3. Sanayi Devrimi'nin temel unsurlarından biri İnternet olmuştur. Bu dönem, üretimin dijitalleştiği ve bilişim teknolojilerinin ön plana çıktığı bir çağdır. Bilgisayar donanımı, yazılım ve telekomünikasyondaki ilerlemeler sayesinde mümkün hale gelen “İnternet”, şirketlerin iş yapış biçimlerini ve kendilerini yeniden yapılandırmalarına yol açmıştır. Bu dönüşüm, verimliliğin artması ve yeni pazarların ortaya çıkmasıyla birlikte, üretkenlikte önemli kazanımlar sağlamıştır. Bu dönemde, imalatla geleneksel olarak elle yapılan birçok operasyon, planlama ve izleme dahil olmak üzere, mühendislik, elektronik ve bilgi teknolojileri ile bütünleşmiş bir şekilde merkezleştirilmiştir. 1980'lerde yaygınlaşan bu yenilikler "İleri İmalat Teknolojisi (AMT)" olarak adlandırılmaya başlanmış ve Bilgisayarla Bütünleşik İmalat (CIM), Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD), Bilgisayar Destekli Üretim (CAM) gibi teknolojileri kapsamaktadır. Daha kısa üretim süreleri, özelleştirilmiş ürünler ve tüketici taleplerine hızlı yanıt verebilmek için Esnek İmalat Sistemleri (FMS) kullanılmaya başlanmıştır [53]. Savaş sonrası geliştirilen teknolojiler otomasyon, yazılım sektörünün gelişmesiyle de lazer, fiber optik, mikro elektronik, bilgisayar gibi kaynakların gelişmesi üretimi çok üst düzeye çıkarmıştır [44], [46], [53]. Bu dönemde yapı üretiminde hazır beton geliştirilmesi ve kullanımı görülmektedir **Şekil 2.5**. Hazır beton üretimi, dünyada ilk kez bu yüzyıl başında (1903) Almanya'da ortaya çıkmış, sonraki birkaç yıl içerisinde de Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) üretilmeye başlanmıştır [56]. Endüstri 3.0 devrimiyle birlikte, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynakları, yenilenemez kaynakların tükenmesi ve

çevresel kaygıların artmasıyla birlikte daha fazla önem kazanmıştır. Birinci Sanayi Devrimi'nde buhar, İkinci Sanayi Devrimi'nde ise petrol başrolde iken, Üçüncü Sanayi Devrimi yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanmıştır [53].



Şekil 2.5: İlk üretilen beton taşıma amaçlı transmikser [56].

Endüstri 4.0 kavramı, ilk olarak 2011 yılında Hannover Fuarı'nda tanıtılmış, 2013 yılında ise, üretim sektöründe büyük bir devrim yaratmayı hedefleyen ve Almanya'nın öncülüğünde geliştirilen stratejik bir girişim olarak resmî bir şekilde ilan edilmiştir [57]. Bu girişimin temel hedefi, Hindistan ve Çin gibi hızla büyüyen ekonomilerle rekabet edebilmek ve Avrupa Birliği ile Amerika Birleşik Devleti gibi gelişmiş bölgelerden sermaye kaybını durdurmaktır. Endüstri 4.0, Endüstri 3.0 üzerine inşa edilen, bünyesinde hız, kapsam ve sistem etkisi unsurlarını barındıran cihazların hem kendi aralarında hem de insanlarla iletişim kurabildiği, uzaktan erişim sağlanarak müdahale edilebildiği, aynı zamanda iyileştirici adımlar atılabildiği oldukça karmaşık ve otomatikleştirilmiş üretim sistemlerini, hizmetleri ve iş süreçlerini ifade eden geniş kapsamlı bir dönüşüm süreci olarak tanımlamıştır [58]. Bu dönemde, daha önce görülmemiş düzeyde işlem gücü ve depolama kapasitesi ile bilgiye erişimde sınırsız olanaklar sunulmaktadır. Bu olanaklar, yapay zekâ, robotik, otonom araçlar, malzeme bilimi, nanoteknoloji, biyoteknoloji, üç boyutlu baskı teknolojileri, enerji ve kuantum gibi alanlarda büyük ilerlemelerin önünü açmaktadır [44]. Gerçek dünyanın dijital olarak modellenmesi ve sanal ortama aktarılması, akıllı üretim araçları ve akıllı ürünler içeren "akıllı fabrikalar" gibi yeni teknolojilerin sunduğu fırsatları kullanmayı hedeflenmiştir **Şekil 2.6**. Bu yaklaşım, endüstriyel

süreçlerin daha verimli ve esnek bir hale getirilmesini sağlamayı amaçlamaktadır [57], [58].



Şekil 2.6: Akıllı bir fabrika oluşturan üç ana prosedür şeması [59].

Endüstri 5.0 gündemimizde merkezinde insan olan, sanal alan ile fiziksel alan arasında gelişmiş ve güçlü bir bağlantı kuran yeni bir kavramdır. Avrupa Komisyonu (EC) tarafından ortaya atılan bu kavram EC'ye göre Endüstri 5.0, sürdürülebilirlik, insan odaklılık ve dayanıklılık ilkeleri doğrultusunda Avrupa sanayisinin dönüşümünü hedeflemektedir [60]. Teknolojinin bir tehdit unsuru olarak değil de insan yaşamı için yardımcı olduğu bir temel anlayışı savunmaktadır. İnsanların bu yeni dönüşüm sürecinde şu ana kadar yaptıkları işlerde artık birer temsilci veya aracı görevi üstlenmesini ve bu konuda desteklenmesini içermektedir. Aynı zaman da Toplum 5.0 olarak da adlandırılan bu kavram ilk defa Aralık 2015'te Japonya'nın 5. Bilim ve Teknoloji Temel Planı'nda temel bir kavram olarak tanımlanmıştır [44]. Endüstri 4.0, endüstriyel sürdürülebilirlik ve çalışanların refahı yerine, öncelikle endüstrinin verimliliği ve esnekliğine odaklanırken, Endüstri 5.0 endüstriyi daha sürdürülebilir, insan merkezli ve dayanıklı bir yapıya kavuşturmayı amaçlayan bir kavramdır [61], [62]. Bazı uzmanlar bunu, Endüstri 4.0'ın kavram ve uygulamaları üzerinde gelişen evrimsel bir ilerleme olarak değerlendirirken, diğerleri ise Endüstri 5.0'ı Endüstri 4.0 paradigmasının bir devamı olarak görmektedir. Ancak, Endüstri 5.0'ın temel eğilimleri arasında insan-robot iş birliği ortamlarının kurulması ve akıllı bir toplumun inşa edilmesi ön plana çıkmaktadır [62].

Sanayi devrimleri, teknolojik, ekonomik, sosyal ve kültürel alanlarda kalıcı etkiler yaratarak insanlık tarihinin en önemli dönüm noktalarından birini oluşturmaktadır. Bu devrimler, toplumları tarım toplumundan sanayi ve bilgi odaklı çağlara taşıyan eşine az rastlanır teknolojik ilerlemelerin öncüsüdür. Ayrıca, ekonomik yapıları yeniden şekillendirerek küresel ticaret dinamiklerini değiştirmiş ve modern

kapitalizmin temel taşlarını oluşturmuştur. Bunun yanı sıra, toplumsal yapıda kırsal yaşamdan kentsel hayata geçiş, endüstriyel iş gücünün artışı ve sosyal hiyerarşilerdeki değişiklikler gibi önemli dönüşümlere yol açmıştır [53].

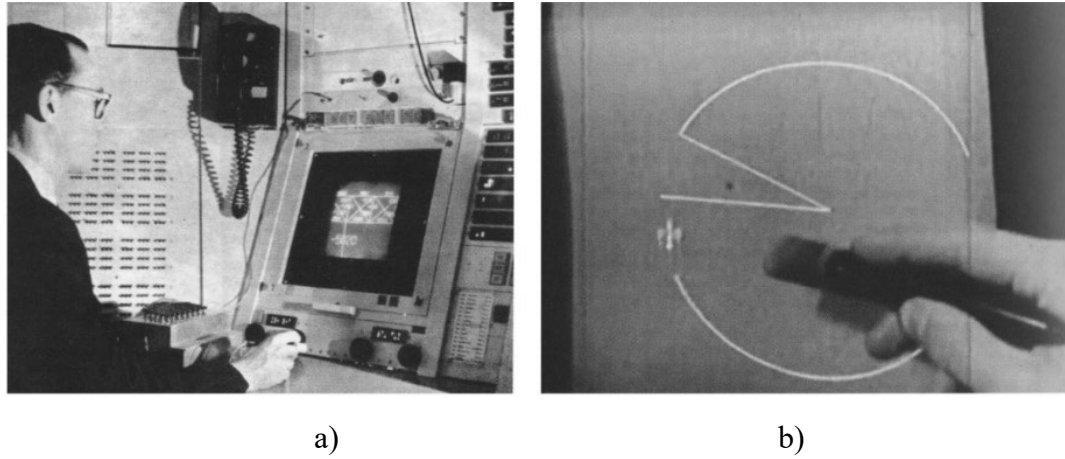
Günümüzde bu devrimlerin etkileri, sürekli evrilen teknolojik gelişmelerle birlikte sürmektedir; her bir dönem, bir sonraki dönemin habercisi ve devamı niteliğindedir. Dördüncü ve Beşinci Sanayi Devrimi gibi kavramlar, teknolojinin iş ve üretim süreçleri üzerindeki sürekli etkisini ve değişimi gözler önüne sermektedir. Bu bağlamda, mimari uygulamaların da bu değişime uyum sağlaması beklenmektedir. Yapı sektörünün dinamik yapısı ve yeni nesil mimarların teknolojiye olan yakınlıkları, bu uyumun sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Sanayi devrimlerinin sonuçları çok yönlüdür ve bu dönemlerin bugünkü yaşamımızı ve geleceğimizi nasıl etkilediği, teknolojinin toplumsal yapılar üzerindeki derin etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Aynı zamanda insan odaklı yaklaşımların ve sürdürülebilirlik ilkelerinin önem kazandığı yeni bir döneme geçiş yapıldığı da gözlemlenmektedir [53].

2.2. Dijital Teknolojiler

Son 32 yılda dijital iletişim teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, bireylerin ve toplumsal yapının pek çok yönünü köklü bir şekilde dönüştürmüştür. Dijital dünyanın hızla erişilebilir ve kullanışlı hale gelmesi, bireylerin iletişim alışkanlıklarını, pratiklerini ve farkındalıklarını yeniden şekillendirmiştir [63]. Endüstri 3.0 ile başlayan dijitalleşme süreci, yapı sektöründe teknolojinin entegrasyonu ile tasarım ve planlama süreçlerinde önemli bir dönüşümü tetiklemiştir. Bu dönüşümün temel aşamalarından biri, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) sistemlerinin devreye girmesi ve ardından daha geniş kapsamlı modelleme teknolojisi olan Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) sistemlerinin gelişmesidir [64].

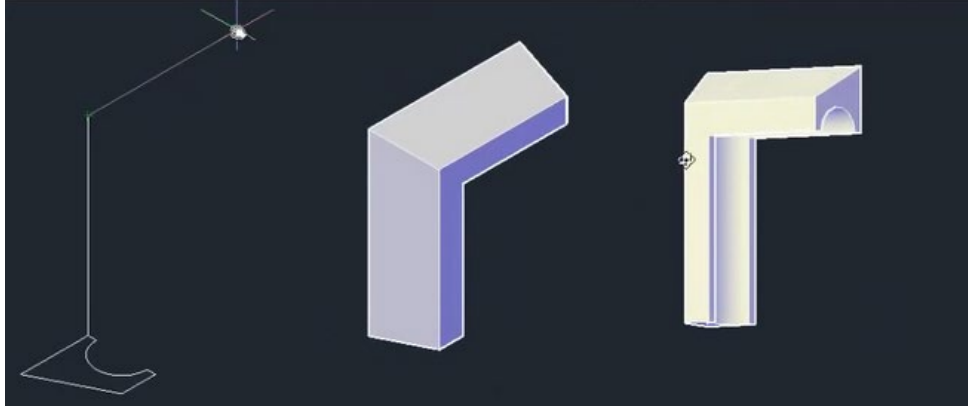
Bilgisayar bilimcisi Ivan Sutherland, 1962 yılında “SketchPad” adı verilen ve insanların özel bir kalem yardımıyla doğrudan ekrana basit şekiller çizmesine olanak tanıyan ilk bilgisayar grafik programını geliştirmiştir **Şekil 2.7**. Bu program, gelecekteki tüm CAD yazılımlarının temelini oluşturmaktadır [65]. CAD ile ilgili ilk makaleler 1961 ve 1962 yıllarında yayımlanmış olup, bu çalışmalar planlar ve çeşitli çizimler üretmeye yönelik programları ele almıştır. Mimari çizim paketleri olarak

değerlendirilebilecek bu yaklaşımların temel amacı, bir binayı veya planı grafiksel bir obje olarak tanımlamaktır. CAD programları, 1967 yılında Avustralya'da eğitimde kullanılmaya başlanmıştır. 1970'lerin sonlarına gelindiğinde ise mimarlar, yazılım geliştirme süreçlerinde aktif rol alarak dünya genelinde çeşitli mimarlık ofisleri CAD yazılımlarını kullanmaya başlamıştır [66]. Başlangıçta CAD sistemleri yalnızca araştırma amaçlı kullanılmış fakat 1970'lerde büyük otomotiv ve havacılık şirketleri kendi CAD yazılımlarını geliştirmeye başlamasıyla bu teknolojiyi 1980'lerde diğer endüstrilere de yaygınlaştırmıştır [67]. Bu gelişim, 1990'lı yıllarda bilgisayar destekli üç boyutlu etkileşimli uygulama olan CATIA ve AutoCAD gibi araçların ortaya çıkmasına yol açmış ve birçok profesyonel sektörün CAD yazılımlarını kullanmasını mümkün hale getirmiştir [68].



Şekil 2.7: Sketchpad: a) Ivan Sutherland'ın Sketchpad ile çalışması; b) ekran görüntüsü [69].

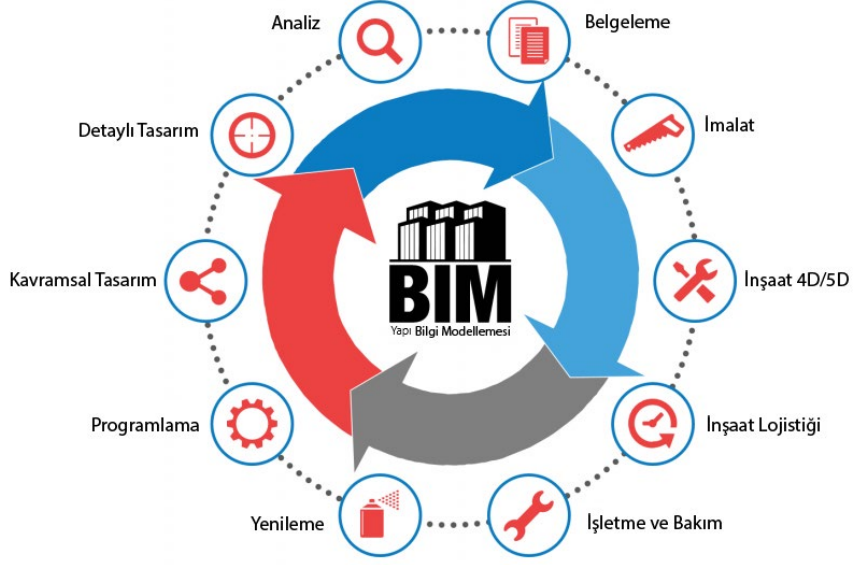
1980'lerin başında kullanılmaya başlanan CAD yazılımları, mühendisler ve mimarlar için kâğıt üzerinde yapılan çizim süreçlerini dijital ortama taşıyarak projelerin daha hızlı, daha hassas ve daha verimli bir şekilde oluşturulmasını sağlamıştır. Geleneksel elle çizimlerdeki kısıtlamaları ortadan kaldıran bu sistemler, tasarım sürecine büyük bir esneklik kazandırmıştır. Başlangıçta iki boyutlu (2D) tasarımlarla sınırlı olan CAD programları, zamanla üç boyutlu (3D) modelleme özellikleri kazanmış, tasarımların daha gerçekçi, detaylı ve görsel olarak güçlü hale gelmesini sağlarken, projelerin analiz edilmesi, hataların erken aşamada tespit edilmesi ve daha iyi görselleştirilmesi gibi konularda büyük kolaylıklar sunmuştur **Şekil 2.8** [66].



Şekil 2.8: AutoCAD yazılımı ile yapılan izometrik çizim [70].

BIM sistemi, CAD yazılımlarından sonra gelişen ve CAD sistemlerinden farklı olarak yalnızca yapının geometrik verilerini değil, aynı zamanda yapının yaşam döngüsü boyunca ihtiyaç duyulan her türlü bilgiyi içeren bir tasarım platformudur **Şekil 2.9** [71]. Bu sistem, tasarım aşamasında enerji analizi, ışık ve gölge simülasyonları, yeşil bina üretim yöntemleri, sanal şantiye teknikleri, yalıtım projeleri, akustik detaylar, otopark düzenlemeleri ve çevresel etki değerlendirmeleri gibi birçok parametrenin hesaplanabilmesine olanak tanımaktadır [72].

Tek bir model üzerinde çok sayıda farklı parametre ile çalışma imkânı sunan bu teknoloji, 3D modelden istenilen her açıdan plan, kesit ve perspektif çıktılarının elde edilmesine olanak sağlar. Ayrıca, modelde yapılan değişikliklerin anında tüm çıktılara yansıtılabilmesi, BIM'in esnekliğini ve kullanım kolaylığını artıran önemli bir kazanımdır. Ayrıca BIM, birçok disiplini bünyesinde toplayabilmekte ve aynı anda yönetilebilmektedir [72]. BIM, bir süre önce yalnızca sınırlı sayıda firma tarafından bilinen ve kullanılan bir sistemken, günümüzde rapido ve "T" cetvelleri ile yapılan geleneksel proje çizimlerinden bilgisayar destekli tasarıma geçişin ardından, mühendislik, inşaat yönetimi, planlama ve koordinasyon alanlarında en hızlı büyüyen ve en yaygın kullanılan araçlardan biri haline gelmiştir [73]. BIM sistemlerine örnek olarak Autodesk Revit ve Bimsoft Archicad yazılımları verilebilir [72], [74].



Şekil 2.9: BIM süreçleri [71].

BIM ve CAD sistemleri, günümüzde akıllı bina teknolojilerine de zemin hazırlayarak yapı sektöründe köklü değişimlere yol açmıştır. Bu teknolojiler, sadece projelendirme aşamalarını değil, aynı zamanda yapım süreçlerini de yeniden şekillendirmiş, proje paydaşlarının iş birliği ve çalışma yöntemlerinde de önemli yenilikler doğurmuştur [75]. Ayrıca 1970'lerdeki enerji krizi sonrasında, 1980'lerde fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olduğu ve çevre kirliliği nedeniyle ortaya çıkan ekolojik sorunların ciddiyeti anlaşılmaya başlanmıştır. Bu farkındalık sayesinde, enerji ve ekoloji arasındaki kesişim noktasındaki araştırmaların uzun yıllardır yavaş ilerleyen sürecini hızlandırılarak özellikle 1980'lardan itibaren akıllı bina teknolojileri daha fazla ön plana çıkmıştır [76].

Akıllı binalar, Amerika'da etkin enerji kullanımını sağlama düşüncesiyle ortaya çıkan belirlenen hedeflerine ulaşabilmek için birçok bilgisayar destekli sistemi entegre bir şekilde kullanılan bir sistemdir [77]. Bina komplekslerinde yer alan ısıtma, soğutma, iklimlendirme, su üretimi ve dağıtımı gibi sistemlerin yanı sıra, zayıf akım sistemleri ve asansörler gibi teknik hizmetler de merkezi bir kontrol sistemiyle yönetilmektedir. Bu sisteme Bina Otomasyon Sistemi (BAS) denir. BAS kavramı 1950'lerde ortaya çıkmış olup, elektronik teknolojisindeki hızlı ilerlemelerle günümüze kadar büyük değişimlerden geçmiştir. İlk BAS sistemleri, tüm bilgi ve kontrol noktalarının kablolarla merkezi bir kontrol paneline bağlandığı ve operatörlerin bu panel üzerinden sistemi yönetebildiği kablolu sistemlerdir [78].

1980'lerin ortalarında bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler, saha bilgi toplama panellerini daha akıllı hale getirmiştir. Bu paneller, verileri topladıktan sonra kendi değerlendirmelerini yaparak gerekli işlemleri gerçekleştirip bilgiyi ana merkeze izlenmek üzere göndermeye başlamış böylece maliyetler önemli ölçüde düşmüştür. Günümüzde ise bina otomasyon sistemleri, akıllı ev sistemleriyle birlikte evlere kadar yayılmış durumdadır [79].

2.3. Otomasyon ve Robotik

Teknolojik gelişimlerin getirdiği bir teknoloji otomasyon ve robotik teknolojisidir. Otomasyon insan müdahalesini en aza indirmek amacıyla bir sürecin veya bir sistemin, makineler veya bilgisayar sistemleri kullanılarak otomatik hale getirilmesi işlemidir. Otomasyon araştırması, genellikle uzun süreler boyunca yapılandırılmış ortamlarda otonom olarak çalışan sistemlere ve bu tür ortamların açıkça yapılandırılmasına odaklanarak verimlilik, üretkenlik, kalite ve güvenilirliği vurgulamaktadır. Örneğin, fabrikalardaki üretim hatlarında makinelerin belirli işlemleri otomatik olarak gerçekleştirmesi otomasyona örnektir [80].

Robotik, robotların tasarımı, üretimi, çalışması ve kullanımı ile ilgilenen mühendislik disiplini. Robotlar, fiziksel görevleri yerine getiren mekanik cihazlardır ve genellikle otomasyon süreçlerinde kullanılırlar. İnsanlarla iş birliği içinde olan otonom veya yarı otonom olarak çalışan sensörler ve aktüatörler içeren sistemlere odaklanır. Robotik araştırması, yapılandırılmamış ortamlarla başa çıkmak için zekâ ve uyarlanabilirliği vurgular. Örneğin, bir üretim bandında yer alan robotik kollar, belirli görevleri tekrar eden bir şekilde yapar [80].

Otomasyon ve robotik arasındaki bağ, bu iki disiplinin birbiriyle iç içe geçmiş olması ve birbirlerini tamamlamasıyla ortaya çıkar. Özellikle endüstriyel uygulamalarda, otomasyon ve robotik birlikte çalışarak üretim süreçlerini daha hızlı, verimli ve güvenli hale getirir. Robotlar, otomasyonun sağladığı yazılım ve kontrol sistemleri tarafından yönlendirilir ve fiziksel dünyada bu komutları yerine getirirler. Sonuç olarak, robotik otomasyonun fiziksel uzantısıdır ve her iki alan da endüstriyel süreçlerin iyileştirilmesinde birbirine bağlıdır [80], [81]. Otomasyon ve robotik teknolojisinin birçok ürün teknolojisi geliştirilmiştir. Yapı sektöründe de kullanılan bu ürünler örnek olarak Sanal Gerçeklik (Virtual Reality-VR) Gözlükleri, Otonom

İnşaat Robotları, İnsansız Hava Araçları (Dronlar), Endüstriyel Robotik Kollar, Otonom Araçlar, Exoskeleton (Dış İskelet) Teknolojisi, Robotik Kaynak Sistemleri, Modüler Yapı Sistemleri ve Prefabrikasyon ve 3D Yazıcı Teknolojisi verilebilir [82].

1990'lı yılların başında ilk defa piyasaya çıkan sanal gerçeklik teknolojisi, ticari olarak ilk defa sürülmeye başlanmıştır. Oyun şirketleri için geliştirilen VR gözlükleri, günümüzde eğitim, mimarlık ve inşaat sektörlerinde de entegre bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat mühendisleri ve mimarlar, sanal gerçeklik kullanarak bir yapıyı tamamlanmadan önce üç boyutlu ortamda görebilmekte ve robotik inşaat süreçlerini planlayabilmektedir **Şekil 2.10**. Ayrıca, robotik operatörler için eğitim simülasyonlarında kullanılabilir olması, işçiler için gerçek ortamda risk almadan eğitim alabilmelerini sağlamaktadır [83].



Şekil 2.10: VR gözlükleri proje tasarımı alanında kullanımı [84].

Dron, uzaktan kontrol edilebilen veya otonom bir şekilde çalışabilen insansız hava araçlarıdır (İHA). Genellikle sensörler, kameralar ve konum bilgisi gibi gelişmiş teknolojilerle donatılan dronlar, çok çeşitli alanlarda farklı görevleri yerine getirmek için kullanılır. Askeri, ticari, endüstriyel ve hobi amaçlı uygulamalarda tercih edilen bu araçlar, özellikle havadan görüntüleme, veri toplama, lojistik destek, haritalama ve güvenlik denetimleri gibi işlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İnşaat alanında kullanılan dronlar, inşaat sahalarının havadan gözlemlenmesi, taranması ve haritalanması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır **Şekil 2.11**. Robotik kamera sistemleri ve yapay zekâ ile entegre olan bu dronlar, projelerin ilerleyişini takip etme, malzeme kontrolünü hızlandırma ve güvenlik denetimlerini daha etkin bir şekilde gerçekleştirme imkânı sunmaktadır. Ayrıca, insanların girmesinin tehlikeli olduğu

bölgelerde incelemelerin insansız olarak yapılmasına olanak tanıyarak güvenliği arttırmaktadır [85].



Şekil 2.11: Dron veri işleme sonucu [85].

İnşaat sektöründe kullanılan endüstriyel robotik kollar, özellikle otomasyon süreçlerinin yaygın olduğu fabrikalarda önemli bir rol oynamaktadır. Montaj, kaynak, boyama ve paketleme gibi tekrarlayan ve zorlu işler için kullanılan bu robotik kollar, ağır iş yüklerini insan müdahalesine gerek kalmadan üstlenmektedir **Şekil 2.12** [82]. Fabrika ortamında üretilen modüler yapı sistemleri, bu robotlar tarafından büyük bir hassasiyetle üretilip inşaat sahasında birleştirilir. Bu sayede, iş gücü ihtiyacı ve sahada geçirilen süre azalırken, yüksek kaliteli ve hızlı yapıların ortaya çıkması sağlamaktadır. Özellikle kaynak gerektiren yapı sistemlerinde robot kolların kullanılması, hem daha iyi bir kalite sağlar hem de iş kazalarını minimuma indirir [86].



Şekil 2.12: Hafif ahşap yapı üretiminde kullanılan robot [87].

İnsanlarla iş birliği içinde çalışan otonom inşaat robotları, üretim süreçlerinde esneklik, kalite ve verimliliği artıran, tehlikeli ve riskli işleri üstlenerek güvenli bir çalışma ortamı sağlayan bir teknolojidir [88]. Bu robotlar, inşaatlarda tuğla döşeme, beton dökme işlerini otonom bir şekilde yaparak inşaatte verimliliği arttırmaktadır. Örneğin, Hadrian X adlı bir tuğla örme robotu, bir saatte binlerce tuğla döşeyebilmekte, bu da inşaat süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır **Şekil 2.13** [89].



Şekil 2.13: Hadrian X inşaat robotu [89].

Teknolojik yenilikler, yapı sektörünün gelişimine büyük katkılar sağlamış ve sektörde önemli dönüşümlere neden olmuştur. Tarih boyunca, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte yapı malzemeleri ve inşaat tekniklerinde büyük değişiklikler yaşanmış, bu da mimari stillerin ve yapıların evrimine doğrudan etki etmiştir. Fabrikalaşma, seri üretim ve dijitalleşme gibi sanayi devrimleriyle ortaya çıkan gelişmeler, yapı sektöründe yapısal katmanların ve üretim süreçlerinin önemli ölçüde değişmesine yol açmıştır. Bu dönüşümler, sektörde daha verimli ve modern bir yaklaşımın önünü açmıştır. Dijital teknolojiler ile otomasyon ve robotik sistemler, yapı sektörünü ileriye taşıyarak bu alandaki uygulamalarda köklü değişikliklere yol açmıştır. Bu yenilikler arasında dikkat çeken ve henüz keşfedilmeye başlanan teknolojilerden biri de 3D yazıcı teknolojisidir. 3D yazıcı teknolojisiyle üretim, inşaat projelerinde yeni bir yöntem olarak, yapı malzemelerinin üretiminden bina inşasına kadar birçok süreci daha verimli ve yenilikçi hale getirme potansiyeli taşımaktadır [26].

3. ÜÇ BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİSİ

Üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojisinin temelleri, 1970'lerin sonlarına kadar uzansa da katı bir nesnenin ilk kez yazdırma çalışmaları 1982 yılında Hideo Kodama tarafından gerçekleştirilmiştir [90]. 1984 yılında ise, Charles Hull tarafından ilk üç boyutlu yazıcıyı üretilmiştir. Ancak o dönemin teknolojik kısıtlamaları nedeniyle bu yazıcılar oldukça büyük boyutlarda olup, yüksek maliyetleri nedeniyle daha çok prototip üretiminde kullanılmıştır. 1988 yılında, ilk renkli baskılar yapabilen üç boyutlu yazıcılar geliştirilmiştir. Bu gelişmelerle birlikte, 1995 yılında üç boyutlu yazıcıların ticari pazara girişi gerçekleşmiştir. Ardından, 1996 yılında daha yüksek çözünürlükte ürünler üretebilen üç boyutlu yazıcıları tasarlayarak bu alandaki bir başka önemli adımı atmıştır. 21. yüzyıla gelindiğinde, teknolojinin hızlı gelişimi ve üretim maliyetlerinin düşmesi sayesinde üç boyutlu yazıcılar daha yaygın hale gelmiştir. 2007 yılında, ilk açık kaynak kodlu yazıcı piyasaya sürülmüş ve bu durum üç boyutlu yazıcıların daha fazla gelişmesini sağlamıştır. 2008'de Object Geometries Şirketi, aynı anda birden fazla malzemeye ürün üretebilen modelini tanıtmıştır. 2009'dan itibaren ise, Makerbot ve 3D Systems gibi firmalar, üç boyutlu yazıcıları ev kullanımına uygun hale getirerek bu teknolojiyi geniş kitlelere ulaştırmıştır [91]. Üç boyutlu yazıcıların tarihsel gelişimi **Tablo 3.1**'de verilmiştir.

21. yüzyılda tasarımı dönüştüren 3D yazıcı teknolojileri, küçük ölçekli prototip ve model üretiminden otomobil, yapı parçaları ve hatta binalar gibi büyük ölçekli üretim alanlarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle yapı sektöründe yapım süreçlerini yeniden şekillendirdiği için büyük bir önem kazanmış, diğer robotik sistemler gibi 3D yazıcılar da maliyet, zaman ve enerji tasarrufu sağlamakta; inşaat süresini kısaltarak kesintisiz ve yüksek doğrulukta detaylar sunduğu görülmektedir. [34].

Tablo 3.1: 3D yazıcıların tarihsel gelişimi [7], [8], [91].

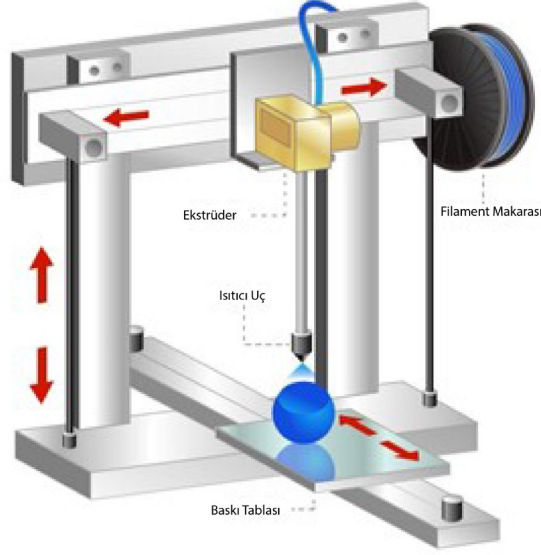
İLK 3D YAZICILAR VE ÜRETİMLER		
Yıl	Gelişmeler	Uygulama Alanı
1984	Charles Hull, Stereolithography teknolojisini kullanarak ilk 3D yazıcıyı geliştirdi.	Nesne Üretimi
1986	Charles Hull, Stereolithography teknolojisi için kullanım haklarını aldı.	Nesne Üretimi
1988	Charles Hull, 3D Systems şirketini kurarak ilk ticari 3D yazıcıyı tanıttı.	Nesne Üretimi
	3D Systems, Stereolithography 250 adlı ilk ticari modelini piyasaya sürdü.	Nesne Üretimi
	Seçmeli Lazer Sinterleme ve Ekstrüzyon-Ergitilmiş Katman Modelleme gibi yeni 3D yazıcı teknolojileri geliştirildi.	Havacılık
1989	Scott ve Lisa Crump, Stratasys adlı 3D yazıcı üretim firmasını kurdu.	Otomotiv, Havacılık, Endüstriyel, Elektronik ve Sağlık
1990	Helisis firması ilk ticari 3D yazıcı teknolojisini piyasaya sundu.	Otomotiv, Havacılık, Ürün Geliştirme, Sağlık, Mimarlık
1991	Stratasys, ilk Ekstrüzyon- Ergitilmiş Katman Modelleme cihazını satmaya başladı.	Sanayi, Ürün Geliştirme, Eğitim
1993	Desk Top Manufacturing (DTM) şirketi, Seçmeli Lazer Sinterleme sistemi ile piyasaya giriş yaptı.	Havacılık, Otomotiv, Endüstriyel, Sağlık, Ürün Geliştirme
	Mürekkep ekstrüde etme teknolojisine dayalı bir 3D yazıcı teknolojisi geliştirme amacıyla bir firma kuruldu.	Elektronik, Sağlık, Biyoteknoloji, Gıda, Eğitim
	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (Massachusetts Institute of Technology- MIT), 2D yazıcılarda kullanılan mürekkep ekstrüde tekniğini 3D yazıcı teknolojisine uyarlayarak patent aldı.	Elektronik, Biyoteknoloji, Sağlık, Malzeme Araştırmaları, Mikro-İmalat, Eğitim
	İlk renkli 3D yazıcı teknolojisiyle baskı gerçekleştirildi.	Ürün Geliştirme, Endüstriyel, Mimarlık, Eğitim, Sağlık, Sanat ve Görsel İletişim
1995	Z Corporation, MIT'nin patentini kullanarak 3D yazıcı satışına başladı.	Ürün Geliştirme, Mimarlık, Eğitim, Endüstriyel, Sanat ve Görsel İletişim
1996	Stratasys, "Genisys" modelini pazara sundu.	Otomotiv, Havacılık, Endüstriyel, Ürün Geliştirme, Eğitim, Mühendislik
	Z Corporation, "Z402" modelini tanıttı.	Mimarlık, Endüstriyel, Ürün Geliştirme, Eğitim, Prototip Üretimi, Sanat ve Görsel İletişim

Tablo 3.1: Devam.

1996	3D Systems, "Actua 2100" modelini çıkardı ve "3D yazıcı" terimi kullanılmaya başlandı.	Prototipleme, Ürün Geliştirme, Endüstriyel, Havacılık, Otomotiv, Eğitim, Sağlık
1997	Electro Optical Systems (EOS), kendi stereolithografi firmasını 3D Systems'e sattı.	Havacılık, Otomotiv, Endüstriyel, Sağlık, Ürün Geliştirme, Prototip Üretimi
2007	Açık kaynak kodlu 3D yazıcılar, RepRap projesi ile yaygınlaştı ve kişisel kullanıma açıldı.	Kişisel Üretim, Eğitim, Prototip Üretimi
	3D Systems, fiyatı 10.000 doların altına inen ilk 3D yazıcıyı satışa sundu.	Eğitim, Kişisel Prototipleme, Endüstriyel, Ürün Geliştirme
2008	RepRap'ın ilk modeli tamamlandı ve bu cihaz kendi parçalarının yarısını üretebiliyordu.	Kişisel Üretim, Eğitim, Prototip Üretimi
	Objet Geometries, farklı malzemeler kullanabilen Connex500 modelini piyasaya sürdü.	Endüstriyel, Otomotiv, Havacılık, Ürün Geliştirme, Prototip Üretimi, Sağlık
2009	Erimiş Tabaka Modelleme teknolojisine ilişkin 25 yıllık patent süresi doldu, böylece firmalar bu teknolojiyi serbestçe kullanmaya başladı.	Endüstriyel, Otomotiv, Havacılık, Ürün Geliştirme, Eğitim, Sağlık, Prototip Üretimi
	Makerbot ve 3D Systems, ev kullanımı için uygun 3D yazıcı modellerini satışa sundu.	Kişisel Üretim, Eğitim, Prototip Üretimi
2011	Southampton Üniversitesi mühendisleri, 3D yazıcı teknolojisi ile üretilmiş ilk uçağı geliştirdi.	Havacılık, Uzay, Endüstriyel, Otomotiv, Ürün Geliştirme, Mühendislik
2012	Kişiyeye özel tasarımlar ve karmaşık yapılar için 3D yazıcılar ile eklem protezi üretildi.	Sağlık, Biyoteknoloji, Kişiyeye Özel Ürün Üretimi
2014	Stratasys, Makerbot şirketini satın aldı.	Kişisel Üretim, Eğitim, Prototip Üretimi, Endüstriyel, Ürün Geliştirme
	Natural Machines tarafından üretilen "Foodini" adlı 3D yazıcı üretildi.	Gıda
2015	İlk kez uzayda, deney amaçlı olarak 3D yazıcı kullanılarak çeşitli küçük parçalar üretildi. NASA, uzay ortamında 3D yazıcı ile üretime başladı.	Yapı Üretimi
	Çin merkezli WinSun firması tarafından ilk 3D yazılı teknolojiyle ev gerçekleştirildi.	Yapı Üretimi
2016	Adidas, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen ayakkabı tabanları üreteceğini duyurdu.	Moda
2017	New Balance, 3D yazıcı teknolojisi tabanlı bir ayakkabıyı piyasaya sürdü.	Moda
	ICON adlı teknoloji firması tarafından Austin, Teksas'ta izinli 3D yazıcı teknolojiyle üretilen ev hayata geçirilmiştir.	Yapı Üretimi

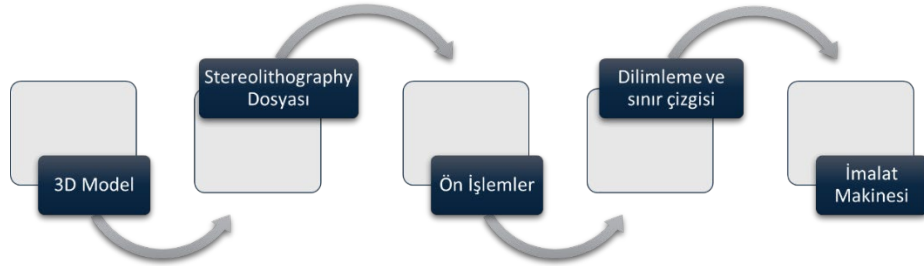
3.1. Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisinin Temel İlkeleri ve Üretim Teknikleri

Üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojisi, bilgisayar destekli programlar yardımıyla dijital olarak elde edilen modelleri plastik, metal gibi malzemeleri kullanarak katmanlar halinde inşa eklemeli imalat teknolojilerinden biridir. **Şekil 3.1 [90]**.



Şekil 3.1: Üç boyutlu yazıcı çalışma prensibi [92].

Eklemeli imalat teknolojisiyle yapılan üretimlerin tasarımlarında Autocad, SketchUP, 3DS MAX, Autodesk123D, Thinkercad, Solid gibi yazılımlar kullanılmaktadır [93], [94]. Yazdırılacak nesnenin üç boyutlu modeli, bilgisayarda bir tasarım yazılımı veya tarayıcı yardımıyla hazırlanır. Hazırlanan bu model, dosya formatında üç boyutlu yazıcıya aktarılır. Sonrasında, özel dilimleme yazılımları kullanılarak model katmanlara ayrılır. İnce filament adı verilen malzeme ile dijital modeller katmanlar halinde fiziksel nesnelere dönüştürülür **Şekil 3.2 [90]**.



Şekil 3.2: Eklemeli imalat teknolojisi işlem akış şeması [90].

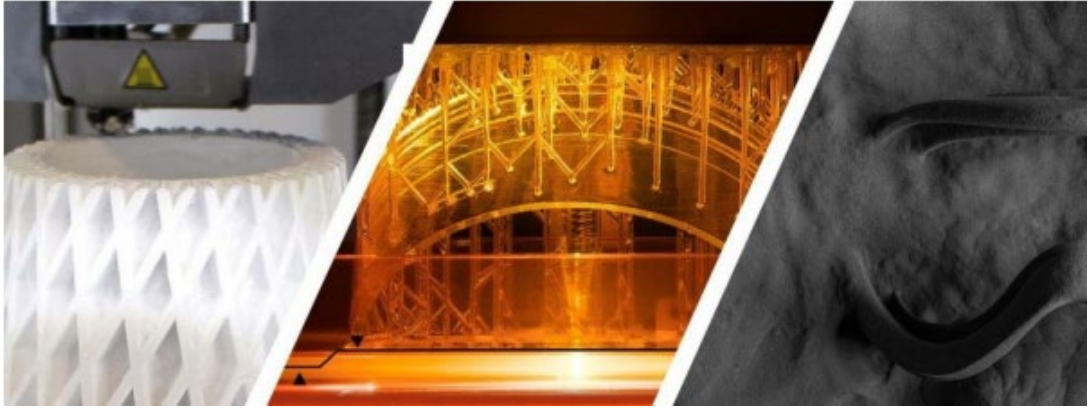
Eklemeli imalat teknolojisi, çeşitli tekniklerle üretim gerçekleştirmektedir. Üretim sürecinin gerçekleşme şekli üzerine yapılan gruplamalarda ise eklemeli imalat teknolojileri polimerizasyon, toz yataklı sistemler, tabaka/katman laminasyonu, bağlayıcı püskürtme (ekstrüde etme), malzeme ekstrüzyonu ve doğrudan enerji depolama gibi başlıklar altında incelenmektedir. **Tablo 3.2**'de üretim sürecine göre eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan bazı eklemeli imalat teknikleri görülmektedir.

Tablo 3.2: Eklemeli imalat teknolojileri ve teknikleri [6] .

EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ		
	Teknolojiler	Eklemeli İmalat Teknikleri/ Yöntemleri
ÜRETİM SÜRECİNE GÖRE	Polimerizasyon	• Stereolitografi (SLA), • Polimer Jet, • Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing - DLP), • Mikro Stereolitografi (Mikro-SLA), • Katı Zemin Kurlama (Solid Ground Curing - SGC) ...
	Katman Laminasyonu (Layer Lamination Manufacturing- LLM)	• Lamine Nesne Üretimi (Laminated Object Production -LOM), • Ultrasonik Eklemeli Üretim (Ultrasonic Additive Manufacturing-UAM) ...
	Doğrudan Enerji Depolama (Direct Energy Deposition-DED)	• Lazer Enerjisi ile Doğrudan Şekillendirme (Laser Engineering Net Shaping -LENS) ...
	Bağlayıcı Püskürtme	• Toz Bağlayıcılı Üretim...
	Toz Yataklı Sistemler	• Seçmeli Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering -SLS), • Seçmeli Lazer Ergitme (Selective Laser Melting -SLM), • Elektron Işığı ile Ergitme (Electron Beam Melting- EBM), • Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering -DMLS), • D-Form (D-Shape)...
	Malzeme Ekstrüzyonu	• Eriyik Yığılma Modelleme (Fused Deposition Modeling -FDM), • Kontur Üretimi (Contoured Crafting- CC), • Üç Boyutlu (Three-Dimensional-3D) Yazıcı, ...

- Polimerizasyon

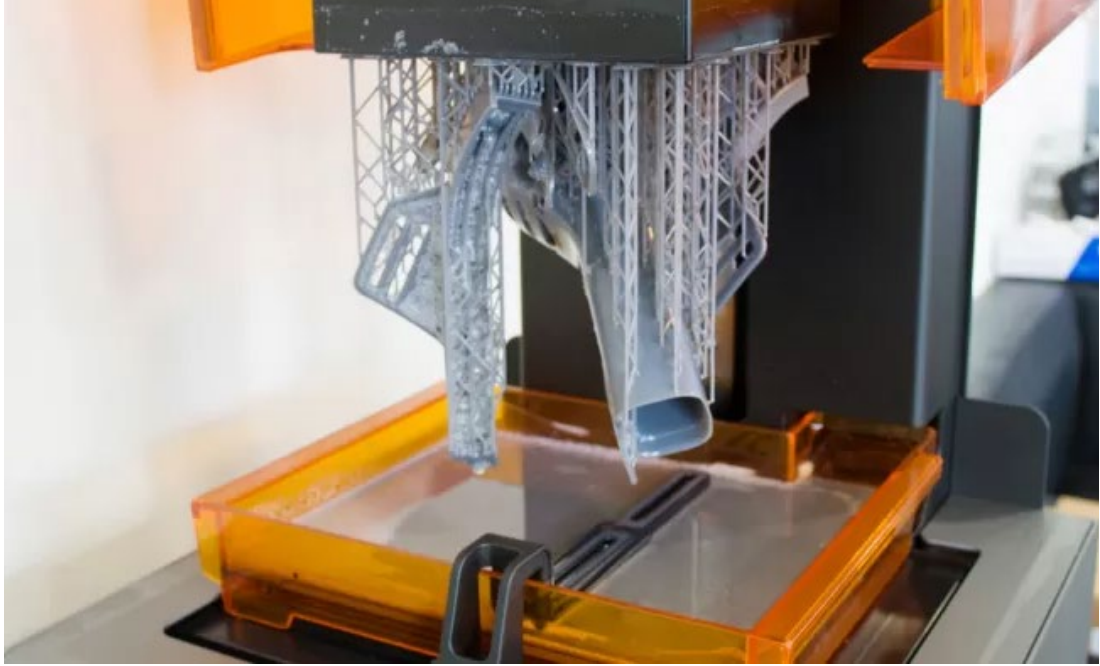
Polimerizasyon teknolojisi, katı tabakaların elde edilmesinde kullanılan, sıvı monomer reçineleri ultraviyole (UV) ışınları yardımıyla katı hale dönüştürülerek kontur ve katmanlar oluşturulmasıdır. Bazı polimerizasyon tekniklerinde, yerel bölgelerde katılaşma sağlanırken, üretilen yeşil parçalar, genellikle tamamen sertleşmeden önce ek kürleşme yöntemlerine ihtiyaç duyar. Bu ek kürleşme işlemi, ön kürleme fırınlarında UV ışınlarının kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Böylece, parçaların mekanik özellikleri güçlendirilir ve istenen dayanıklılık elde edilir [90]. Bu yöntem, hassas detaylar gerektiren uygulamalarda ve yüksek kaliteli parçaların üretilmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir **Şekil 3.3** [6]. Polimerizasyon teknikleri, malzeme türü, kullanılan ışık türü ve üretilen ürünün detay oranına göre Stereolitografi (SLA), Polimer Jet Yöntemi, Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing -DLP) ve Mikro Stereolitografi (Mikro- SLA), Katı Zemin Kürleme (Solid Ground Curing -SGC) olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 3.3: Polimerizasyon üretim teknolojisi ve üretim örneği [6].

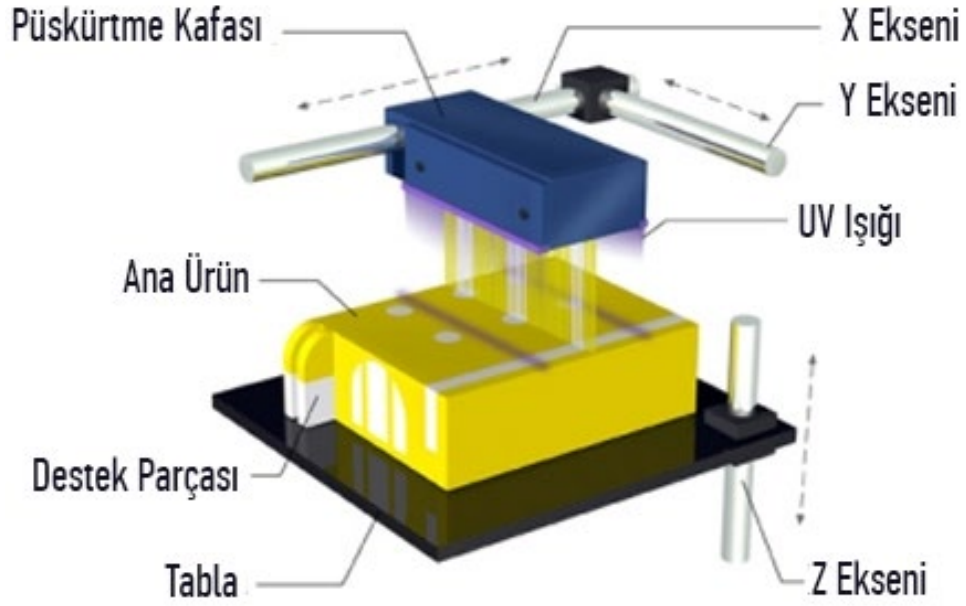
“Stereolitografi (SLA)”, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçine tabakasının belirli bölgelerinin noktasal bir morötesi lazer ışını ile kürleştirilmesi işlemidir. Bu süreçte, bilgisayarla kontrol edilen bir tarama sistemi, lazer ışınını reçine tabakası üzerinde hareket ettirerek parçanın ilk katmanını oluşturur. Daha sonra, parçanın bulunduğu platform katman aralığı kadar aşağı indirilir ve bir kanat yardımıyla sıvı fotopolimer ilk katmanın üzerine yayılır. Kürleştirme işlemi bu şekilde sırasıyla devam ederek parçanın üretimini gerçekleştirir **Şekil 3.4**. Ancak, fotopolimer malzemelerin kararlılığının düşük olması ve mekanik özelliklerinin

değişkenlik göstermesi nedeniyle, genellikle kalıp uygulamaları ve hızlı prototipleme süreçlerinde tercih edilmektedir [34].



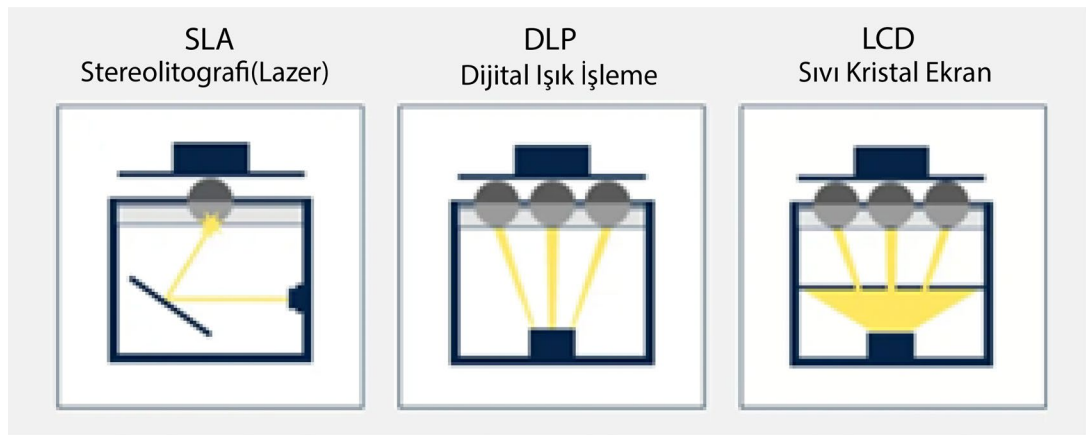
Şekil 3.4: Stereolitografi (SLA) [95].

“Polimer Jet Yöntemi”, yazıcı kafasındaki sıcaklıkla eritilmiş inşa malzemesini ekstrüde edilerek 3D modeller oluşturan bir sistemdir **Şekil 3.5** [90]. Polimer Jet yönteminde, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçine, her bir enjeksiyon kafası üzerindeki küçük çaplı nozullardan ekstrüde edilerek ilk katman oluşturulur. Ekstrüde edilen malzeme, tahliye edilirken morötesi lambalar aracılığıyla dondurulur ve bu sayede katılaşma gerçekleşir. Parça, katmanlar halinde inşa edilirken, enjeksiyon kafalarının bir kısmı ana malzemeyi, diğer kısmı ise destek malzemesini ekstrüde etmek için kullanılır. Üretim tamamlandığında, parça tabladan mekanik yöntemlerle çıkarılır [96], [97].



Şekil 3.5: Polimer Jet teknolojisi [96].

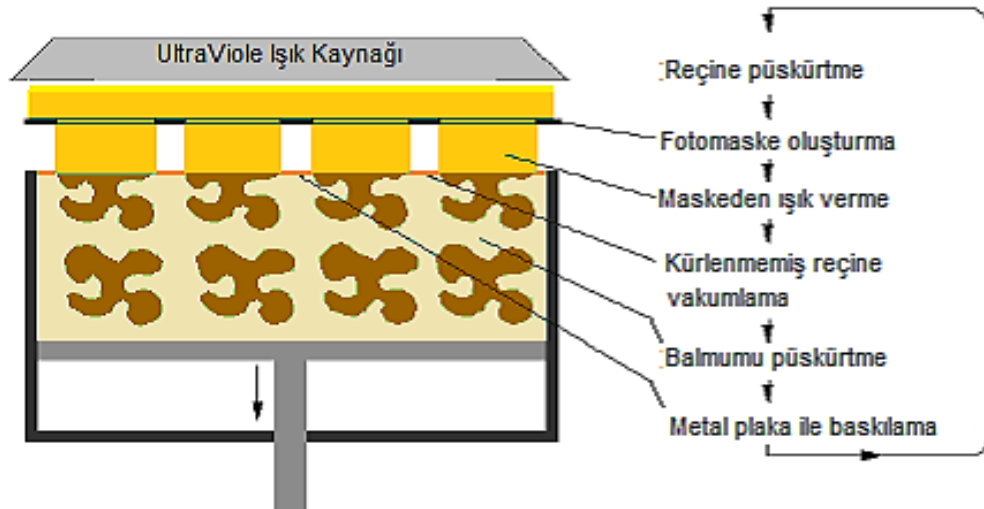
“Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing -DLP)” yönteminde anlık katılaşma için enerji kaynağı olarak dijital ışık kullanılır. Makinenin alt kısmında bir projektör bulunur ve projektörün üzerinde cam bir hazne içerisinde reçine yer alır. Işığın geçebilmesi amacıyla alt platform şeffaf bir yapıya sahiptir. Platformun yukarı ve aşağı hareketi ile katmanlar oluşturulur [98]. Bu yöntem SLA ile benzer bir mantıkla çalışmasına rağmen, kullanılan reçine ve enerji kaynakları farklıdır. Işık kaynağı olarak sıvı kristal ekran (Liquid Crystal Display- LCD) ve ışık yayan diyot (Light Emitting Diode-LED) kullanılan yazıcılara, LCD yöntemiyle üretim denilmektedir **Şekil 3.6** [99].



Şekil 3.6: SLA, DPL ve LCD yöntemlerinin şeması [99].

“Mikro Stereolitografi (Mikro-SLA)” yöntemi de SLA yöntemi ile aynı üretim şeklinde sahiptir. Bu yöntem, mikroskobik boyutlardaki yapılar oluşturma yeteneği sunar ve yüksek düzeyde detay ve hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılır [100].

“Katı Zemin Kürleme (Solid Ground Curing -SGC)” sisteminde yüzeye ince bir fotopolimer tabakası ekstrüde edilirken, cihazın farklı bir bölümünde, cam plaka üzerine elektro-fotografi yöntemiyle toner kullanılarak maske oluşturulur. Her bir katman için ayrı bir maske hazırlanır ve kullanılan toner, sonraki maskeler için yeniden kullanılmaktadır. Fotopolimer tabakası üzerine yerleştirilen maskeye güçlü bir ultraviyole ışık veren ampul ile ışık uygulanır, bu sayede maskelenmemiş tüm alanlar kürlenir. Sıvı halde kalan fotopolimer, elektrikli süpürge benzeri bir vakum kafasıyla emilerek temizlenir ve destek malzemesi olarak kullanılan erimiş mum, vakumla temizlenmiş boşluklara ekstrüde edilir **Şekil 3.7**. Mumun hızlı sertleşmesi için soğutulmuş metal bir plaka üzerine bastırılır ve bir sonraki işlemde ise yüzey düzgünleştirilmesi için freze çakısı ile tıraşlanır [101].



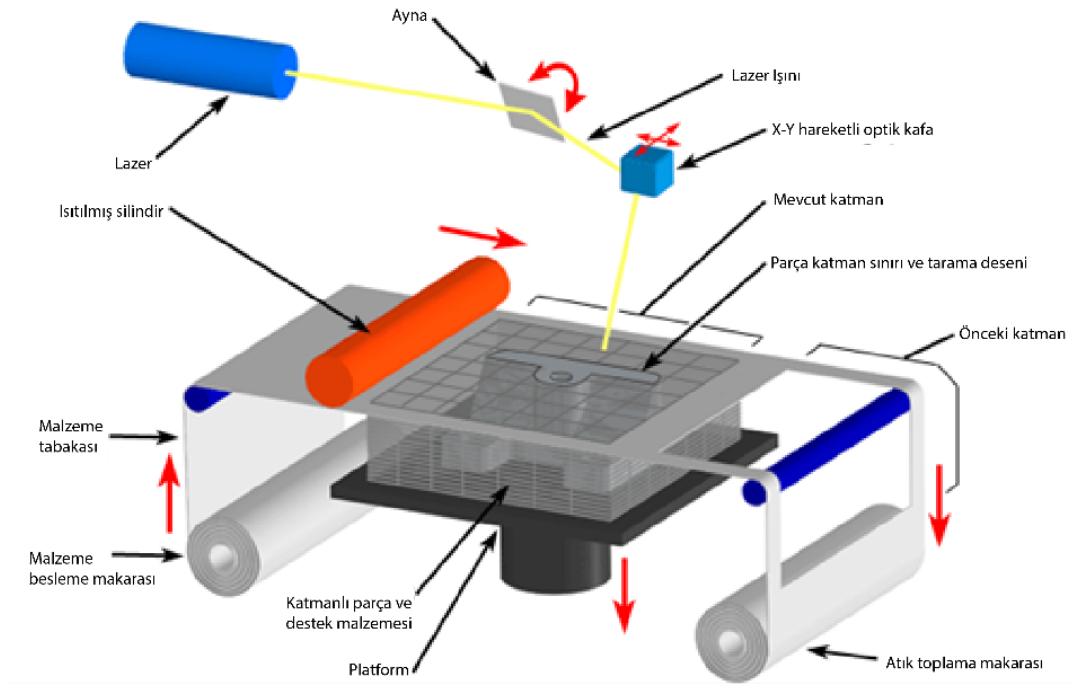
Şekil 3.7: Katı Zemin Kürleme (SGC) sistemi [102].

- Katman Laminasyonu (Layer Lamination Manufacturing- LLM)

Katman Laminasyonu (Layer Lamination Manufacturing- LLM), ince tabakaların üst üste birleştirilmesiyle gerçekleşen bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu süreçte, folyo veya saç şeklindeki kâğıt, plastik, metal ya da seramik malzemeler ultrasonik kaynak veya yapıştırıcı yardımıyla birleştirilir ve lazer, bıçak veya freze kullanılarak

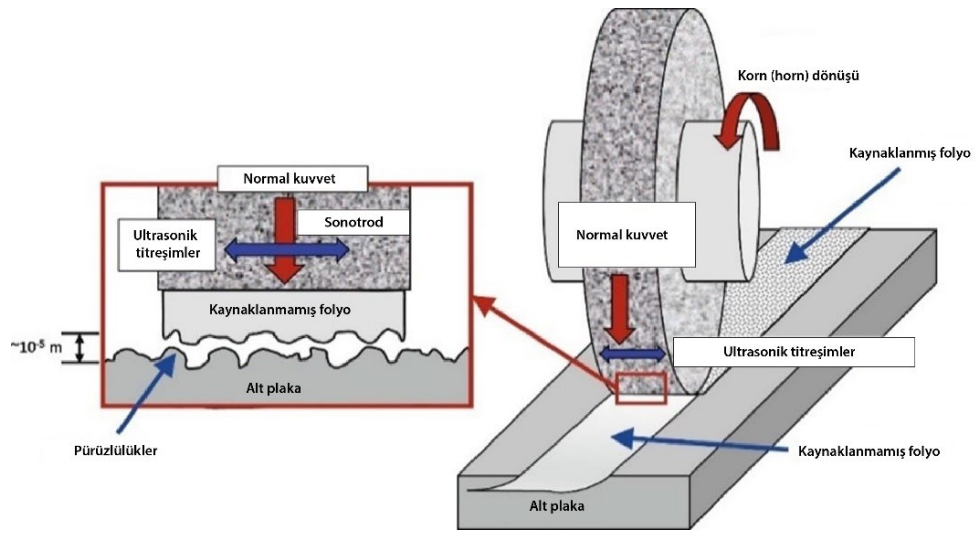
istenilen geometriye göre kesilir. Her bir katman, parçanın nihai şeklini alacak şekilde şekillendirilip eklenir. LLM yöntemi, masif ve büyük parçaların hızlı üretimi açısından önemli ve düşük maliyetle hızlı prototipleme sağlamaktadır. Ayrıca, bu teknik düşük ısı işlem gerektirdiğinden, bazı malzemelerde oluşabilecek gerilme veya deformasyon riskini de azaltmaktadır [103]. LLM yöntemine örnek olarak Lamine Nesne Üretimi (Laminated Object Production -LOM) ve Ultrasonik Eklemeli Üretim (Ultrasonic Additive Manufacturing-UAM) verilebilir.

“Lamine Nesne Üretimi (Laminated Object Production -LOM)”, LLM ile nesne üreten yöntemlerden biri olan ilk olarak 1991 yılında Helisys tarafından geliştirilip ticari olarak piyasaya sunulmuştur [103]. Bu yöntemde, besleme mekanizması, platform üzerine bir levha malzeme yerleştirir ve her katmanda parçanın dış hatlarını kesmek için bir lazer kullanılır **Şekil 3.8**. Alttaki katmanla birleşmesi için yapışkan kaplı levha, bir önceki katman üzerine serilip ısıtılmış bir silindirin basıncıyla yapıştırılır. Ardından lazerle dış hatları kesilir ve yeni bir katman olarak başka bir levha yerleştirilir. Bu süreçte platform hafifçe yükselir, böylece ısıtılmış silindir yardımıyla yeni katmanların yapıştırılması için gereken basınç uygulanır. İşlem, katmanlar sıralı bir şekilde üst üste yerleştirilerek parça tamamlanana kadar tekrarlanır [103].



Şekil 3.8: Lamine Nesne Üretimi (LOM) [102].

“Ultrasonik Eklemeli Üretim (Ultrasonic Additive Manufacturing-UAM)”, ultrasonik enerji kullanarak katmanlı üretim sürecini gerçekleştiren bir yöntemdir. Bu yöntem, ince metal tabakalarının ultrasonik enerji aracılığıyla birbirine kaynaştırılması prensibine dayanır. Süreç, yüksek frekanslı ultrasonik titreşimler kullanarak malzeme yüzeyini ısıtır ve plastikleştirir, böylece her katman birbirine bağlanarak nesnenin tamamlanmasını sağlar **Şekil 3.9**. UAM, hızlı prototipleme ve üretim süreçleri için avantajlıdır çünkü malzeme israfını minimize eder, karmaşık geometrilerin üretilmesine olanak tanır ve düşük sıcaklıklarla işlem yaparak ısıl deformasyona karşı dayanıklıdır [104].



Şekil 3.9: Ultrasonik Eklemeli Üretim (UAM) üretim süreci şeması [104].

- Doğrudan Enerji Depolama (Direct Energy Deposition- DED)

Doğrudan Enerji Depolama (Direct Energy Deposition- DED), eklemeli imalat süreçlerinde kullanılan bir yöntemdir ve malzeme birikimi ile enerjinin doğrudan bir yüzeye iletilmesi esasına dayanır. Bu teknik, genellikle metal veya seramik malzemelerin işlenmesinde tercih edilmektedir. DED, birçok yöntemle uygulanabilir; bu yöntemler arasında lazer, elektron ışını, plazma veya alev kullanarak enerji depolama bulunmaktadır. Temel çalışma prensibi malzeme tozunun veya telinin bir enerji kaynağı ile eritilerek bir yüzeye uygulanmasıdır. Enerji kaynağı, metal toz veya telin eritilmesi ve bir araya getirilmesi için gereken sıcaklığı sağlar. Malzeme, genellikle bir robot kol veya CNC makinesi gibi otomatik bir sistem tarafından yönlendirilir. Enerji kaynağı, belirli bir alana odaklanarak malzemenin hızlı bir şekilde eritilmesini ve katmanlar halinde birikmesini sağlar. DED, özellikle büyük

parçaların üretiminde, onarım süreçlerinde ve prototiplemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi, bu teknikle daha verimli hale gelmektedir [105]. DED yönetimine örnek olarak Lazer Enerjisi ile Doğrudan Şekillendirme (Laser Engineering Net Shaping -LENS) tekniği verilebilir.

“Lazer Enerjisi ile Doğrudan Şekillendirme (Laser Engineering Net Shaping - LENS)”, katmanlı bir tabakayı ergitmek ve katılaştırmak için lazer optiği, toz ağızlığı ve inert gaz bileşenlerinden oluşan sistematiğe sahiptir. Bu yöntemde, imalatın yapılacağı metal bir plaka kullanılır ve lazer ile bu plaka üzerine eriyik havuzu oluşturulduktan sonra bu eriyik havuzunun üzerine ağızlık vasıtasıyla tozlar püskürtülerek tozların eritilmesi ve katılaştırılması ile katmanlar halinde imalat yapılmaktadır Şekil 3.10 [105].



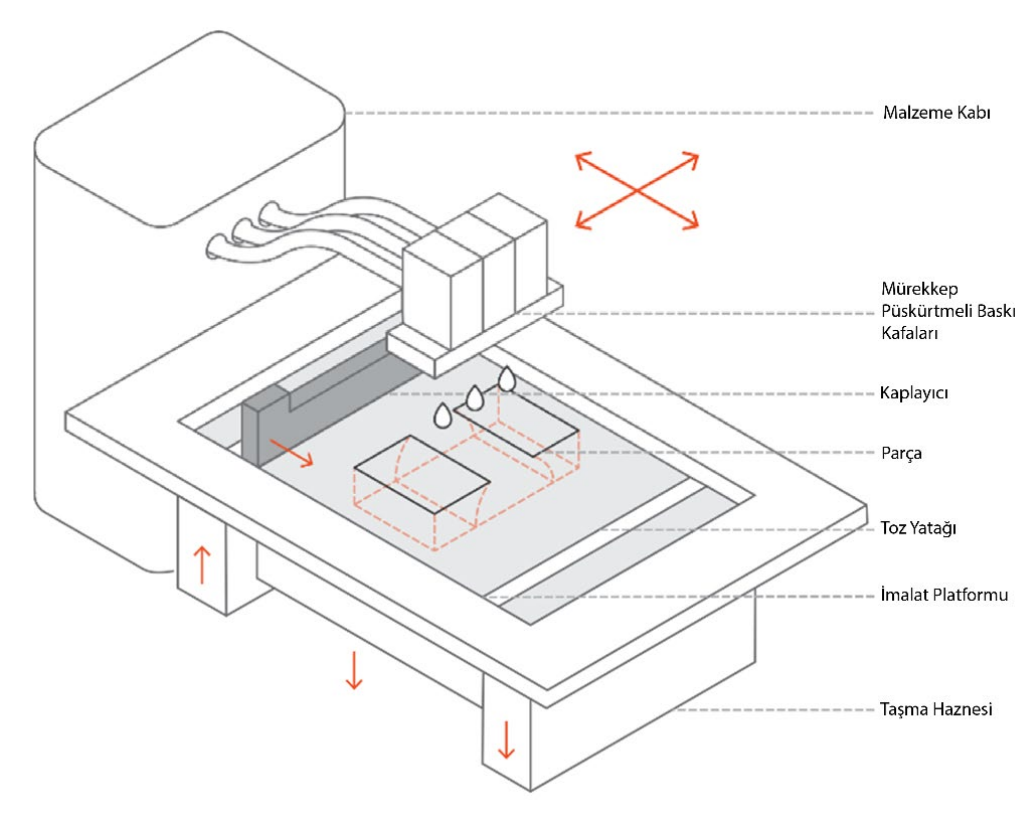
Şekil 3.10: LENS tekniği ile Hollanda’da metal köprü inşası [6].

- Bağlayıcılı Püskürtme

Bağlayıcılı Püskürtme, granül formundaki metal, kum ve seramik malzemelerin kullanılabildiği bu üretim yöntemi, oda büyüklüğünde objeler üretme imkânı da sunmaktadır. Temel olarak, toz malzemenin bağlayıcı yardımıyla birleştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Toz Bağlayıcılı Üretim, Bağlayıcılı Püskürtme teknolojisinin tekniklerinden biridir.

“Toz Bağlayıcılı Üretim”, toz halindeki malzemenin katmanlar arası bağlayıcı bir sıvı ile birleştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde, ince bir toz tabakası yayıldıktan sonra, yazıcı kafasından belirlenen şekli oluşturmak için bağlayıcı sıvı püskürtülür. Bu sıvı, toz taneciklerini bir araya getirerek her bir katmanı oluşturur.

Her katman tamamlandığında üzerine yeni bir toz tabakası serilir ve bağlayıcı uygulanarak süreç tekrar edilir; parça tümüyle oluşana kadar bu döngü devam eder **Şekil 3.11**. Üretim tamamlandıktan sonra parçalar, son mekanik özelliklerini kazandırmak amacıyla sinterleme veya fırınlama gibi işlemlerden geçirilir. Toz Bağlayıcılı Üretim; yüksek üretim hızı, düşük maliyet ve büyük parçaları verimli bir şekilde işleyebilmesiyle öne çıkar ve özellikle hızlı prototipleme, metal döküm kalıpları ile seri üretim bileşenleri için yaygın olarak tercih edilir [106]. Toz Bağlayıcılı Üretim, metal ve seramik parçaların yanı sıra kum döküm kalıpları ve medikal implantlar gibi birçok uygulamada kullanılan gelişmiş bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu teknik, metal tozlarının kullanımıyla otomotiv ve havacılık sektörlerinde dayanıklı parçaların üretilmesini sağlar. Örneğin, çelik, paslanmaz çelik veya titanyumdan üretilen parçalar, bu sektörlerde yüksek performans ve dayanıklılık gereksinimlerini karşılar. Ayrıca, seramik malzemeler kullanılarak yapılan parçalar, yüksek ısıya dayanıklılıkları sayesinde elektronik ve biyomedikal alanlarda tercih edilir. Toz Bağlayıcılı Üretim, kum malzemelerinin döküm işlemlerinde kalıp ve çekirdek üretimi için kullanılmasına da olanak tanır [106], [107].

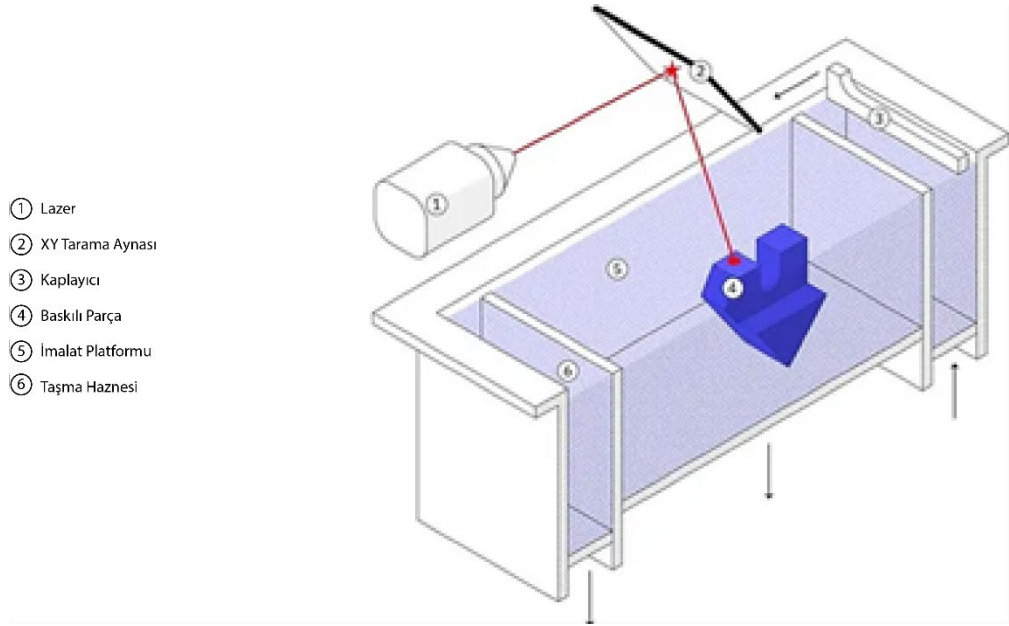


Şekil 3.11: Bir “Toz Bağlayıcılı Üretim” 3D yazıcının şeması [107].

- Toz Yataklı Sistemler

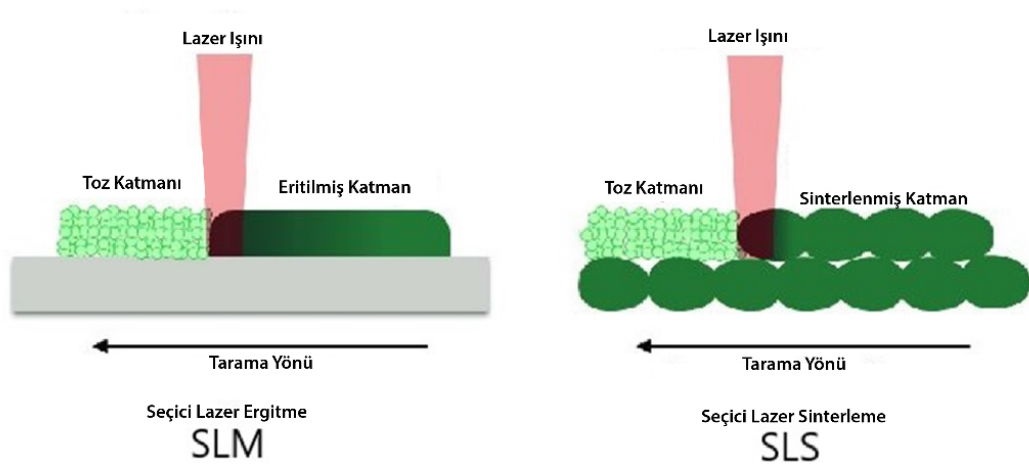
Toz Yataklı Sistemlerde, polimer ve metal malzemelerin kullanıldığı, toz malzemenin sinterlenmesi veya farklı güç kaynakları ile bağlanması esasına dayanan sintirleme ve ergitme yöntemi, malzemenin eritilmesi, konturlanması ve katılaştırılması prensibine dayanan hızlı prototipleme yöntemlerinden biridir [108]. Seçmeli Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering -SLS), Seçmeli Lazer Ergitme (Selective Laser Melting -SLM), Elektron Işığı ile Ergitme (Electron Beam Melting-EBM), Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering -DMLS) ve D-Form (D- Shape) bu süreçte kullanılan eklemeli imalat teknikleri arasında yer almaktadır [109].

“Seçmeli Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering -SLS)” yöntemiyle parça üretimi sürecinde malzeme olarak toz malzeme ve lazer demeti kaynak olarak kullanılmaktadır. Bir inşa havuzunda, toz malzeme ile dolu bir tabla bulunmakta ve bu tablanın yukarı ve aşağı hareketi, katmanın oluşturulacağı hacmi sağlanmaktadır **Şekil 3.12**. Tabla aşağı indiğinde, üzerinde kalan toz malzemeye lazer uygulanarak hızlı bir ergime işlemi gerçekleştirilir. Eriyen malzemenin boyutu, lazer demetinin çapı ve lazer kaynağının hareket hızı ile ilişkilidir. Ergiyip katılan katman tamamlandığında, platform bir kez daha aşağı indirilir ve böylece ilk katmanın üzerine, silindir yardımıyla yeni bir toz tabakası serilir. Lazer ışını, bu yeni katmanın katılmasını ve önceki katmana bağlanmasını sağlamaktadır. Bu işlem, nihai parça elde edilene kadar devam eder. Fazla tozun ayrılması işlemi "break out" olarak adlandırılır ve bu süreç kumlama veya fırçalama ile gerçekleştirilir. Bu yöntem yalnızca plastik değil, aynı zamanda alüminyum, paslanmaz çelik, titanyum, nikel alaşımı, kobalt krom, seramik ve poliamid gibi malzemeler için de uygulanabilir [110], [111].



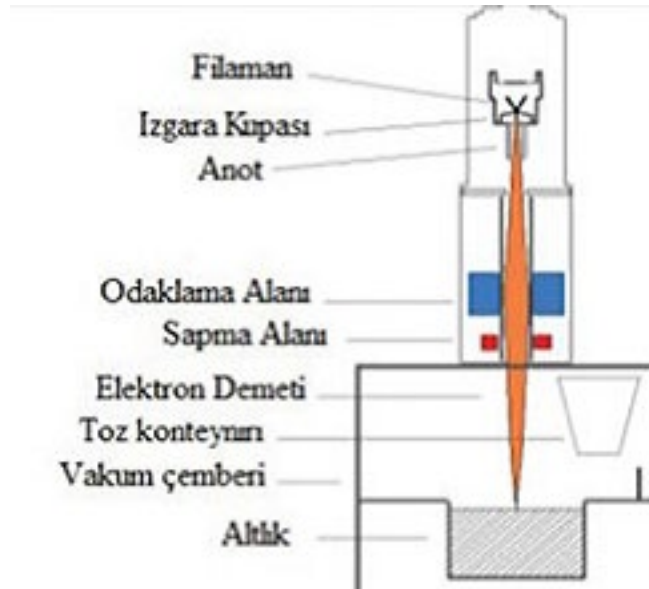
Şekil 3.12: Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS) [112].

“Seçmeli Lazer Ergitme (Selective Laser Melting -SLM)”, SLS yönteminden farklı olarak, toz parçacıklarının eriyerek birbirine yapışması ile gerçekleştirilir. SLS yönteminde lazer kaynağı, toz partiküllerinin bağlanmasına odaklanırken, SLM yönteminde tam bir ergitme sağlanarak saf metal elementler elde edilir **Şekil 3.13**. Tam yoğunlukta malzeme üretimi için SLM tercih edilir ve bu tezgahlar, SLS tezgâhları ile benzer özellikler taşır. Yanıcı ve tutuşucu gazların oluşumunu önlemek amacıyla iç ortamda gaz tahliyesi yapılır veya titanyum ve magnezyum gibi koruyucu maddeler kullanılır [113].



Şekil 3.13: Seçmeli Lazer Ergitme (SLM) ve Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS)[113].

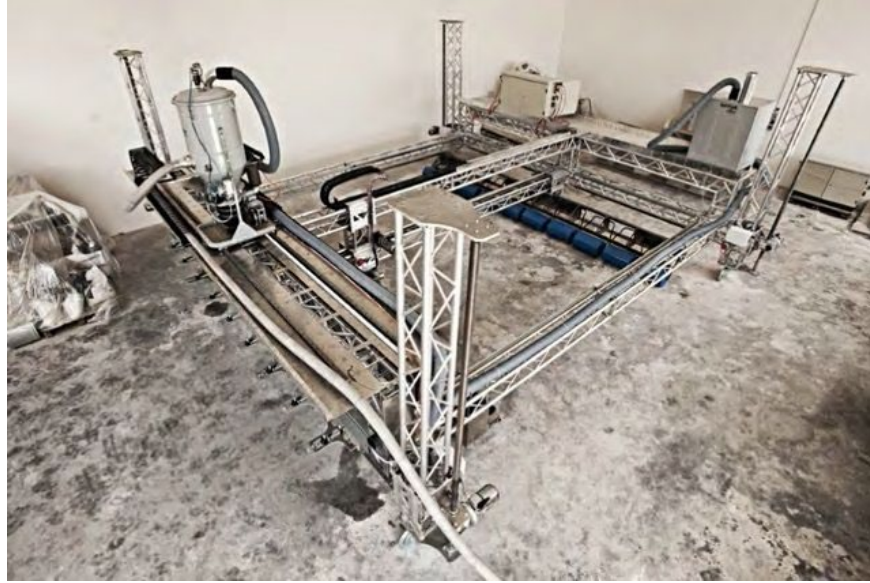
“Elektron Işığı ile Ergitme (Electron Beam Melting- EBM)” yöntemi, üretim süreci açısından SLS ile benzerlik gösterir ancak bu yöntemde güçlü bir elektron ışını kullanılarak işlem yapılır. Bu sayede, yüksek yoğunlukta metal parçalar üretmek mümkün hale gelir. EBM cihazı, 3D CAD model verilerini okuyarak metal tozlarını ardışık katmanlar halinde oluşturur **Şekil 3.14**. Yaklaşık 1000 °C sıcaklıkta ve vakum ortamında bulunan hareketli bir platform üzerine yayılan metal tozları, bilgisayar kontrollü bir elektron ışını ile bombardımana tutulur ve bu süreçte 0,1 milimetre kalınlığında katmanlar oluşturulur. Elektronlar, yaklaşık 2800 °C sıcaklıkta hızlandırılır ve ışık hızının yarısına yakın bir hızla toz yüzeyine çarpar. Elektronların kinetik enerjisi sayesinde metal eriyerek bir sonraki katmanla kaynaşır. Ergitme işlemi tamamlandığında, platform dikey olarak hareket eder ve yeni bir toz katmanını serilerek işlem tekrarlanır [114] .



Şekil 3.14: Elektron Işığı ile Ergitme (EBM) [102].

“Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering -DMLS)”, hemen hemen her metal alaşımından nesneler oluşturmak için toz metalleri mikro kaynaklamak için hassas, yüksek watt’lık bir lazer kullanan başka bir 3D metal baskı yöntemidir. Bu yöntemin SLS yönteminden farkı metal tozları ile çalışması ve DMLS ile üretilen parçalar daha yoğun ve dayanıklı olmasıdır. SLS daha geniş bir uygulama yelpazesine sahipken, DMLS genellikle yüksek dayanıklılık ve hassasiyet gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir [108].

D-Form üretim sistemi, yapı inşaatında sıkça kullanılan yenilikçi bir üretim tekniğidir ve magnezyum esaslı bağlayıcılar kullanarak beton nesneler ileri-geri sağa-sola hareket ederek katmanlar halinde beton yapılar üretmeye olanak tanır. İtalyan bilim adamı Enrico Dini tarafından geliştirilen bu sistem, dönemin en büyük 3D yazıcılarından birine sahip olma özelliğini taşır. D-Form, özellikle büyük, karmaşık amorf yapılar için uygun olan beton ve diğer malzemeleri kullanarak, 3D yazıcılar aracılığıyla yapıların hızlı bir şekilde inşa edilmesini sağlar **Şekil 3.15** [6].



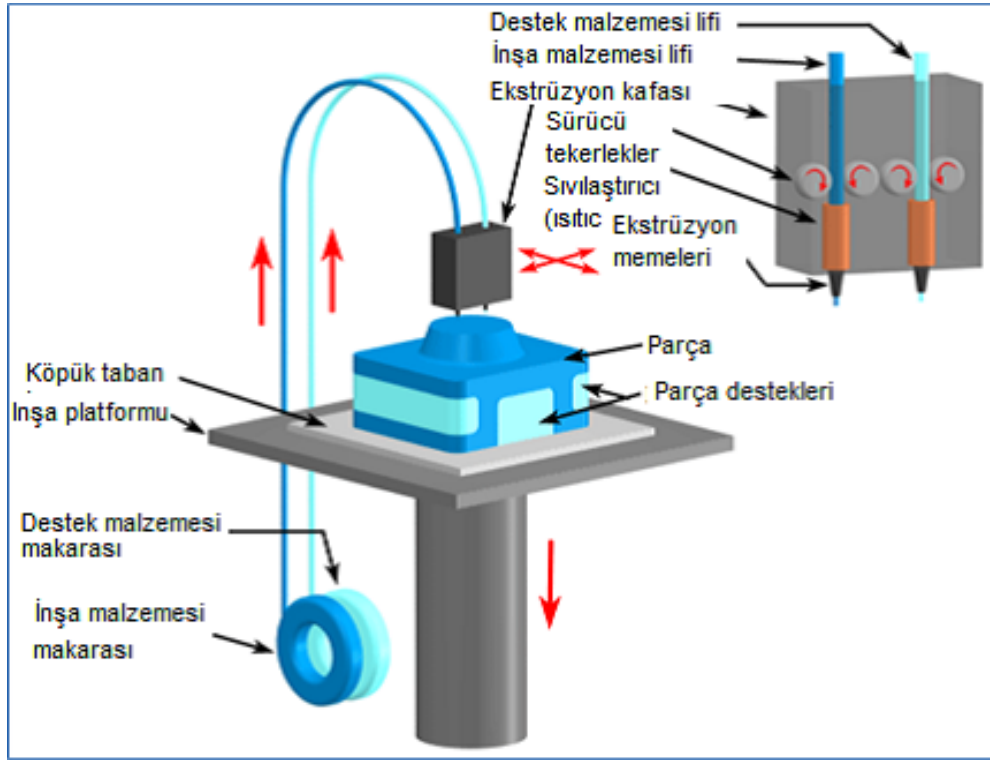
Şekil 3.15: Enrico Dini tarafından geliştirilen D-Form [6].

- Malzeme Ekstrüzyonu

Malzeme Ekstrüzyonu, bir malzemenin özel bir nozul aracılığıyla, belirli bir şekil ve katman yapısına uygun olarak biriktirilmesiyle gerçekleştirilen bir üretim sürecidir. Bu süreçte, malzeme genellikle erimiş halde olup, her bir katman bir öncekinin üzerine eklenerek üç boyutlu bir nesne oluşturulmaktadır. Eriyik malzeme, her katman tamamlandığında soğuyarak sertleşir ve bu şekilde nesnenin yapısı katmanlar halinde inşa edilir [6]. Bu teknoloji, genellikle Fused Deposition Modeling (FDM), Kontur Üretimi (Contour Crafting-CC) ve Üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojisi gibi sistemler kullanılarak gerçekleştirilir.

“Eriyik Yığılma Modelleme (Fused Deposition Modeling -FDM)”, eklemeli imalat yöntemleri arasında yer alan ve yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Bu yöntem, bir nesnenin katmanlar halinde oluşturulmasını sağlar ve genellikle termoplastik

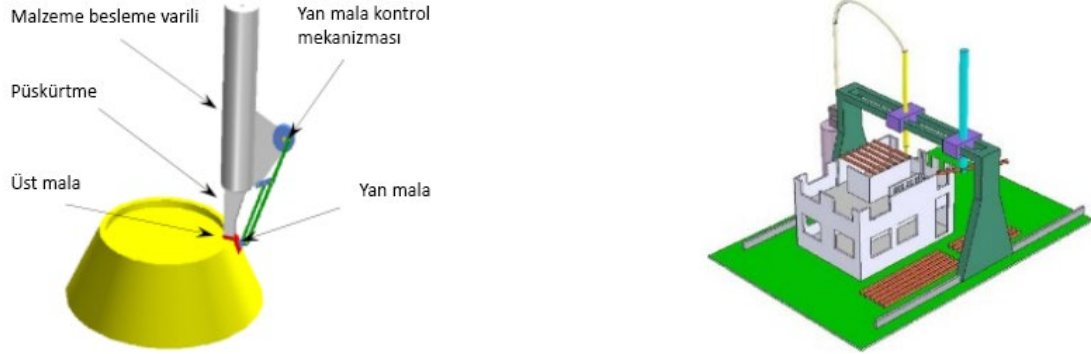
filamentlerin kullanımı ile gerçekleştirilir. Süreç, ilk olarak filamentin bir dizi farklı malzemeden yapılması ile başlar. Filament, yazıcının sıcaklık kontrolüne sahip ekstrüzyon kafası (nozül) tarafından ısıtılır ve eritilir, bu da malzemenin akışkan hale gelmesini sağlar. Daha sonra erimiş malzeme, nozul aracılığıyla ekstrüde edilerek yazıcının hareketli platformu üzerinde istenen şekle göre katmanlar halinde dökülür. Her katman, önceki katmanın üzerine eklenir ve soğuduktan sonra katılır. **Şekil 3.16 [115]**. Yazıcı, katmanları oluştururken, katman kalınlığı ayarlarına göre ilerler, bu da daha yüksek detay ve hassasiyet sağlayabilir. FDM'nin avantajları arasında maliyet etkinliği, kullanıcı dostu olma özelliği ve geniş malzeme yelpazesi yer alır [115].



Şekil 3.16: Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) [102].

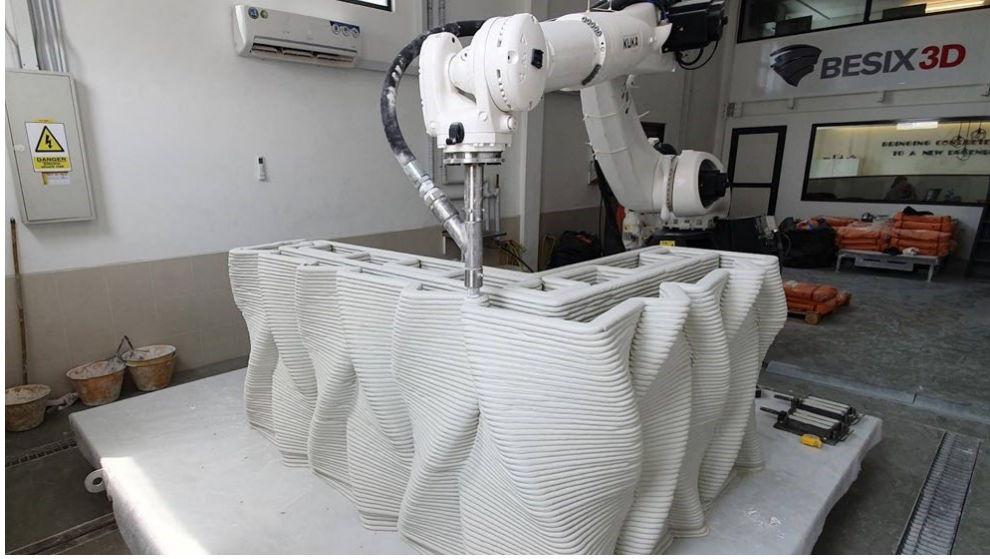
“Kontur Üretimi (Contour Crafting-CC)” sistemi, yapıların hızlı, verimli ve daha az manuel emekle inşa edilmesine olanak tanır. Bu inşaat yöntemi, bir vinç veya köprü tarafından hızlı sertleşen beton benzeri bir malzeme kullanarak yapının duvarlarını katmanlar halinde oluşturulur ve yan mala ile düzeltilir. **Şekil 3.17**. Başlangıçta, endüstriyel parçaların kalıplarını üretmek amacıyla geliştirilen bu teknoloji, doğal afetler sonrasında, özellikle İran’daki yıkıcı depremlerden sonra acil ev inşası için uyarlanmıştır. Khoshnevis’in bu yenilikçi yaklaşımı, inşaat sürecini

otomatikleştirirken aynı zamanda tasarım esnekliğini artırarak modern mimari için yeni bir ufuk açmıştır [116].



Şekil 3.17: Kontür Üretim (CC) tekniği [26].

“Üç Boyutlu (3D) Yazıcı Teknolojisi”, klasik bir üretim sistemi olan kontür üretimine benzemekte ve daha küçük ölçeklerde karmaşık geometrili yapılarda kullanılabilir. Yapı inşaatında yenilikçi bir eklemeli imalat yöntemi olarak öne çıkan bu teknik, beton ile diğer yapı malzemelerini katmanlar halinde inşa ederek istenilen mimari formların oluşturulmasını sağlamaktadır **Şekil 3.18**. Bu süreç, öncelikle bilgisayar ortamında tasarlanan üç boyutlu bir modelin yazıcıya uygun hale getirilmesi ile başlar [6]. Beton karışımının kullanılabilen bu yöntemde, belirli bir hız ve basınçta hareket ederek beton malzemesini istenilen alana bırakır ve her katmanın üzerine bir sonraki katmanın eklenebilmesi için bekleme süreleri uygulanır. Katmanlar, belirli bir süre içinde sertleşerek dayanıklılık kazanır ve inşaat süreci tamamlandıktan sonra, yapı bileşenleri temizlenir ve gerekli son işlemler yapılır. Bu kavramsal yaklaşım, katmanlar inşa edilirken yapı içindeki sıhhi tesisat, elektrik kabloları, kamu hizmetleri ve görsel-işitsel sistemler gibi çeşitli bileşenlerin entegre edilmesini gerektirir. Böylece, inşaat süreci daha sistematik hale gelirken, yapının işlevselliği ve konforu artırılır [117]. 3D yazıcı teknolojisi, hızlı inşaat, karmaşık tasarımların gerçekleştirilmesi, malzeme tasarrufu sağlama ve esneklik gibi avantajları ile dikkat çekmekte; konut inşaatı, kamu projeleri ve sanat eserleri gibi geniş bir yelpazede uygulanmaktadır [118].



Şekil 3.18: Üç boyutlu (3D) yazıcı ile beton duvar üretimi [118].

Eklemeli imalat yöntemleri, çeşitli uygulama alanları ve malzeme türlerine göre farklı güçlü ve zayıf yönler taşımaktadır. 3D yazıcılar, endüstriyel üretimden hızlı prototiplemeye kadar geniş bir yelpazeye sahiptir. Her bir yöntem, belirli ihtiyaçlara uygun özel çözümler sunmaktadır. Örneğin, toz yataklı sistemler, karmaşık geometrilere sahip metal parçaların yüksek hassasiyetle üretilmesini sağlarken, malzeme ekstrüzyonu, düşük maliyetli ve hızlı bir üretim süreci sunar. Diğer yandan, polimerizasyon, yüksek ayrıntı gerektiren bileşenlerin hızlı bir şekilde elde edilmesine olanak tanırken, yapı alanındaki uygulamalarda beton baskı gibi teknikler, büyük ölçekli yapılar için hızlı ve etkili çözümler üretir. Her yöntem, belirli kolaylıkları ve zorlukları ile gelirken, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre en uygun teknolojiyi seçmelerini gerektirmektedir. Bu çeşitlilik, eklemeli imalatın sanayi ve mühendislik alanlarında daha geniş bir uygulama alanına sahip olmasını sağlar.

Eklemeli imalat teknolojileri, özellikle inşaat ve mimarlık alanında kullanılan, genellikle hızlı prototipleme ve özelleştirilmiş yapı ve yapı elemanları üretmek için kullanılır. Yapı alanında kullanılan eklemeli imalat teknolojileri incelendiğinde, üretimin genellikle Toz Yataklı Sistemler ve Malzeme Ekstrüzyonu yöntemleriyle yapıldığı gözlemlenmektedir [6]. Bu iki temel yöntem, yapı sektöründe çeşitli malzemelerin üç boyutlu üretiminde yaygın olarak kullanılır ve farklı üretim ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş çözümler sunar. Toz Yataklı Sistemler, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren ve karmaşık geometrilere sahip yapı elemanlarının

üretiminde tercih edilirken; Malzeme Ekstrüzyonu yöntemi, daha hızlı ve düşük maliyetli bir üretim süreci sunduğu için büyük ölçekli yapıların inşasında avantaj sağlamaktadır. Bu teknolojilerde kullanılan başlıca teknikler arasında “Kontur Üretim, Üç Boyutlu Yazıcı ve D-Form” gibi uygulamalar yer alır. Her ne kadar bu teknikler birbirine benzer üretim süreçlerine sahip olsa da aralarında bazı temel farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar **Tablo 3.3**'te detaylı olarak sunulmaktadır.

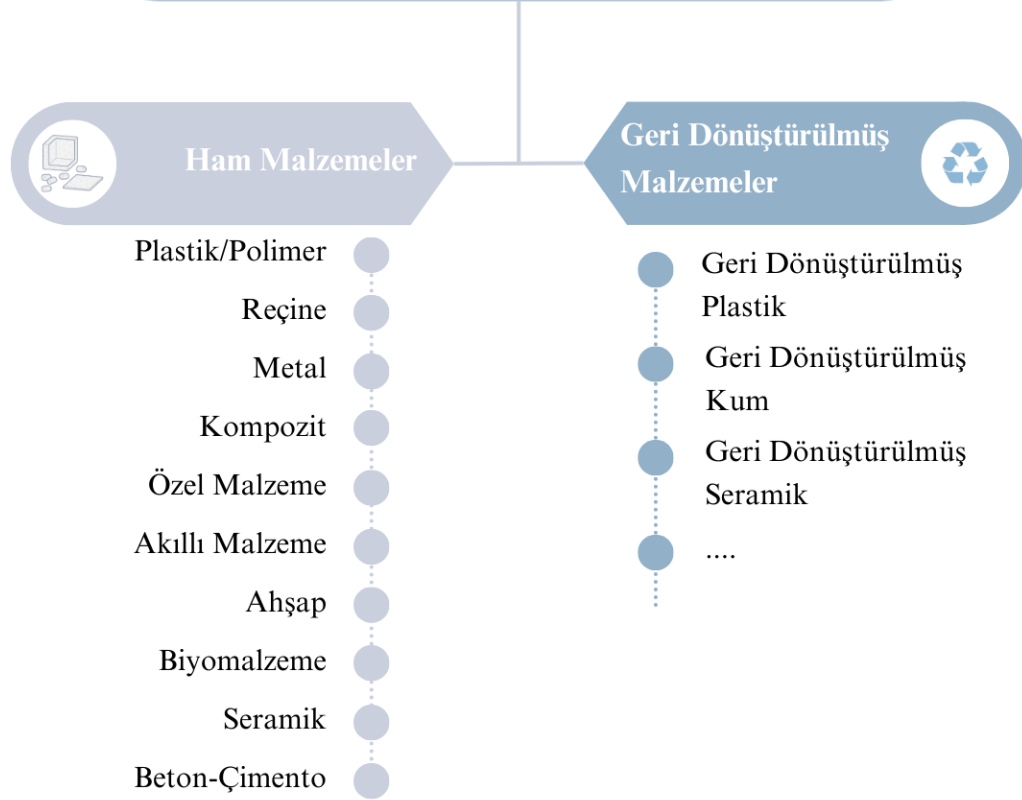
Tablo 3.3: Yapı üretiminde kullanılan teknikler [6], [116], [118].

YAPI ÜRETİMİNDE KULLANILAN TEKNİKLER			
Özellikleri	Malzeme Ekstrüzyonu		Toz Yataklı Sistemler
	Kontur Üretim (CC)	Üç Boyutlu (3D) Yazıcı Teknolojisi	D-Form
Geliştirici	Dr. Behrokh Khoshnevis	Farklı Firmalar	Enrico Dini
Prensip	Katmanlar Halinde	Katmanlar Halinde	Kum ve Bağlayıcılar Kullanarak Katmanlar Halinde
Ana Kullanım Alanı	Yapı	Yapı, Yapı Bileşeni, Yapı Elemanı	Mimari Projeler, Heykeller ve Kompleks Geometrilili Yapılar
Detay	Orta Düzey	Orta Düzey	Yüksek Düzey
Yüzey Özellikleri	Pürüzsüz Yüzey Sağlar	Pürüzlü Yüzey	Doğal Taş Benzeri Dokulu Yüzey
Öne Çıkan Farklar	Pürüzsüz Yüzey Elde Eder	Esnek Uygulama	Sanatsal ve Detaylı Yapılar

3.2. Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisinde Kullanılan Malzemeler

3D yazıcı teknolojisinde kullanılan malzemeler, yazıcının türüne, uygulama alanına ve baskı yapılacak ürünün özelliklerine göre çeşitlilik göstermektedir. Farklı malzemeler, baskının sağlamlığını, esnekliğini, dayanıklılığını ve yüzey kalitesini etkiler. 3D yazıcılarda, ham malzeme olarak kullanılan plastik/polimer, reçine, metal, seramik, beton-çimento, kompozit, akıllı malzeme, biyomalzeme, ahşap ve diğer özel malzemelerdir **Şekil 3.19**. Bunun yanı sıra, birçok malzemenin geri dönüştürülmüş halleri de 3D yazıcılarda kullanılabilir [6].

3D Yazıcı Teknolojisinde Kullanılan Malzemeler



Şekil 3.19: 3D yazıcı teknolojisinde kullanılan malzemeler [119].

3D yazıcı teknolojisinde kullanılan en yaygın ve gerekli malzeme, geniş bulunabilirliği, mükemmel mekanik özellikleri, düşük maliyeti ve çeşitli 3D yazıcı teknolojisi tekniklerine uyarlanması basitliği nedeniyle polimerlerdir. Naylon, Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), Polietilen Tereftalat (PET), Yüksek Darbeli Polistiren (HIPS), Polikarbonat (PC), Polilaktik Asit (PLA), Termoplastik Polyester (TPC) ve Polieter Eter Keton (PEEK) gibi polimerler, karmaşık geometriler üretmek için kullanılan bazı polimer baskı malzemeleridir [119]. PLA, özellikle hobi ve eğitim alanında en yaygın kullanılan mısır nişastası bazlı bir bioplastik çeşididir **Şekil 3.20**. En çok tercih edilmesinin nedeni, kolay işlenebilirliği, düşük maliyeti ve çevre dostu özellikleridir. Geri dönüşüm süreci sayesinde gübre olarak da kullanılabilir. PLA'nın erime sıcaklığı 180- 220 °C olsa da ideal işleme sıcaklığı 180-200 °C arasında tavsiye edilmektedir. Ayrıca, bu malzemenin renk yelpazesi eflatundan deniz mavisine kadar geniş bir seçeneğe sahiptir. Ayrıca, ABS

ve Naylon gibi malzemeler de endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır, ancak PLA'nın yaygınlığı onu lider konuma getirmektedir [120].



Şekil 3.20: PLA filamenti ile basılmış ürünler [120].

3D yazıcı teknolojisiyle üretilen reçine, popülaritesi sayesinde hem akademik hem de endüstriyel alanlarda aktif bir araştırma ve geliştirme sektörü haline gelmiştir. Reçineler, polimerizasyon teknolojisinde kullanılır. Reçinelerin iki ana temel malzeme ailesi vardır. Her aile farklı bir polimerizasyon sürecine dayanmaktadır. Akrilik ve metakrilik bazlı reçineler, genellikle radikal polimerizasyon sürecine dayanır. Bu süreç, UV ışığı veya diğer ışık kaynakları aracılığıyla serbest radikallerin oluşturulmasıyla başlar ve bu radikaller akrilat veya metakrilat monomerlerini birleştirerek polimer zincirleri oluşturur. Bu tür reçineler, hızlı sertleşme, yüksek şeffaflık ve geniş bir kullanım yelpazesi ile öne çıkar. Öte yandan, epoksi ve vinil eter bazlı reçineler ise katyonik polimerizasyon sürecine dayanır. Bu süreç, UV ışığı veya başka bir enerji kaynağı ile tetiklenen katyonik reaksiyonlar aracılığıyla gerçekleşir ve genellikle daha yüksek dayanıklılık ve kimyasal direnç sunar. Reçinelerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için belirli kriterlere uyması gerekmektedir; bunlar arasında viskozitenin 5 Pa/s'den düşük olması, kürlenebilirlik ve uygun bir kür derinliği yer alır. Düşük viskozite, reçinenin 3D yazıcıda düzgün bir şekilde akmasını sağlarken, yeterli kürlenme süreci ve uygun derinlik, istenen dayanıklılık ve ürün kalitesinin sağlanmasında kritik öneme sahiptir. Reçine baskılar genellikle insan saçının kalınlığından daha az veya ona eşit katman kalınlıklarıyla çalışarak inanılmaz derecede ince detaylar üretme kabiliyetiyle bilinir **Şekil 3.21** [121].



Şekil 3.21: Plastik (sol) ve reçine (sağ) baskılar [122].

Metal malzemelerin bazı belirgin özellikleri vardır; bu malzemeler mükemmel fiziksel özellikler sunar ve karmaşık parçaların imalatında kullanılabilirler. Bu tür metal malzemelerin örnekleri arasında alüminyum alaşımları, kobalt bazlı alaşımlar, nikel bazlı alaşımlar, paslanmaz çelikler ve titanyum alaşımları yer almaktadır. Özellikle kobalt bazlı alaşımlar, diş uygulamaları için 3D yazıcı teknolojisiyle üretimde kullanıma uygundur **Şekil 3.22**. Bu alaşımların yüksek özgül sertliği, esnekliği, yüksek geri kazanım kapasitesi ve ısıl işlem görmüş koşullarda uzama özellikleri, onları bu uygulamalar için ideal hale getirir [12], [119]. Nikel bazlı alaşımlar ile üretilen 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen nesneler, tehlikeli ortamlarda kullanılabilme avantajına sahiptir. Bunun nedeni, bu alaşımların yüksek korozyon direnci göstermesi ve yüksek sıcaklıklarda dayanıklılık sunabilmesidir [12].



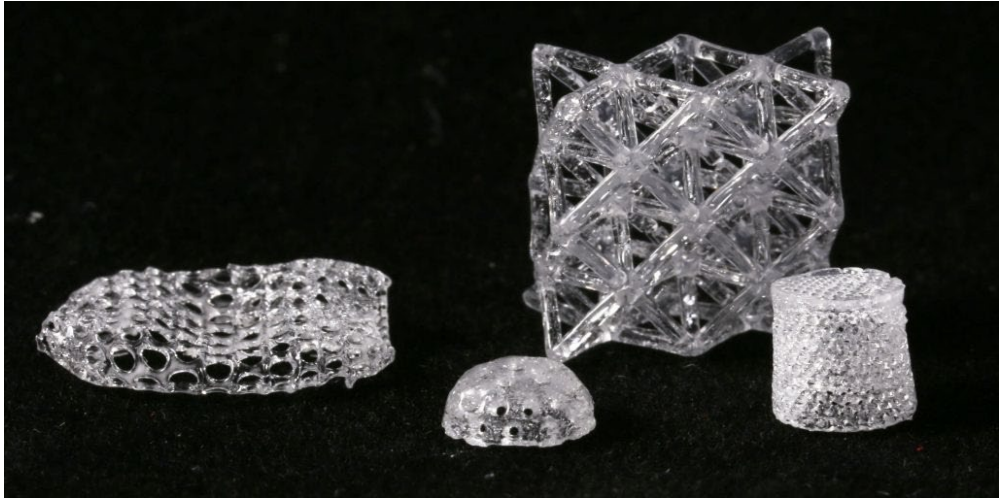
Şekil 3.22: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş metal baskı [123].

Kompozit malzemeler, olağanüstü çok yönlülükleri, hafiflikleri ve uyarlanabilir özellikleri ile yüksek performans gerektiren sektörlerde kullanılan farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip birden fazla bileşenden oluşan malzemelerdir. Kompozitler, tek malzemeye kıyasla üstün kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir [124]. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, kompozitlerin yüksek hassasiyetle daha iyi özellikler sunması, ekonomik özelleştirme imkânı sağlaması ve ulaşılabilirliği nedeniyle katkı üretiminde popülerlik kazanmaktadır. Kompozit malzemelere örnek olarak karbon fiber takviyeli polimer kompozitler ve cam fiber takviyeli polimer kompozitler verilebilir **Şekil 3.23**. Karbon fiber takviyeli polimer yapılar, yüksek özgül sertlik, dayanıklılık, iyi korozyon direnci ve yorgunluk dayanımı özelliklerinden dolayı havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [125]. Aynı zamanda, cam fiber takviyeli polimer kompozitler, 3D yazıcı teknolojisiyle üretim uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir ve maliyet etkinliği ve yüksek performans özellikleri nedeniyle büyük bir potansiyele sahiptir. Cam fiber takviyeli polimer kompozitler yüksek ısı iletkenliğine ve nispeten düşük ısıl genişleme katsayısına sahiptir. Ayrıca, yanmaz ve üretim süreçlerinde kullanılan kürlleme sıcaklıklarından etkilenmez; bu nedenle, yazıcı teknolojisi üretim uygulamaları için çok uygundur [126], [127].



Şekil 3.23: Cam fiber takviyeli polimer kompozit baskı parçaları [128].

3D yazıcı teknolojisi üretimde kullanılan özel malzemeler arasında gıda malzemeleri, tekstil malzemeleri ve cam malzemeleri örnek olarak verilebilir **Şekil 3.24**. Bu malzemeler, 3D yazıcılarda sık kullanılan malzemeler olmasa da moda, gıda ve cam endüstrisi alanlarında 3D yazıcı teknolojisi üretimde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [129], [130], [131].

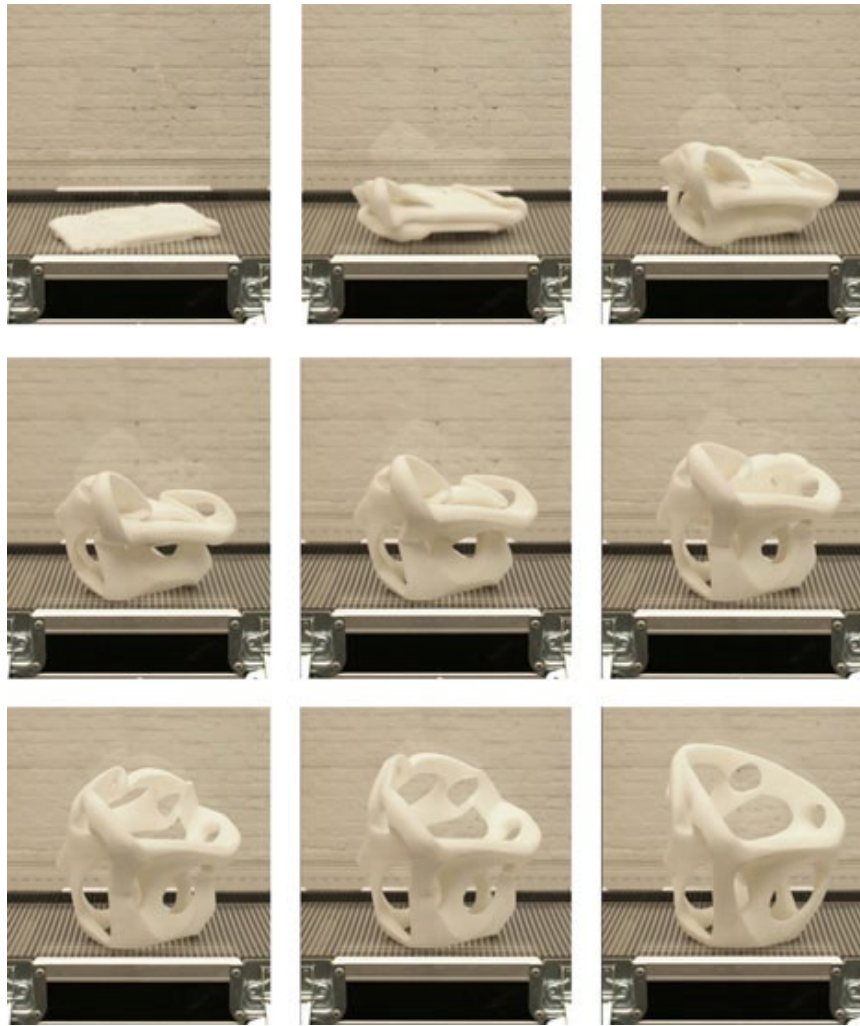


Şekil 3.24: Cam baskı nesneleri [131].

Akıllı malzemeler, ısı ve su gibi dış koşulların etkisiyle nesnelerin geometri ve şekillerini değiştirme potansiyeline sahip olan malzemeler olarak tanımlanır [132]. Akıllı malzemelerle yazıcı teknolojisi üretim kullanılarak üretilen nesnelere örnek olarak kendi kendini geliştiren yapılar ve yumuşak robotik sistemler verilebilir. Akıllı malzemeler aynı zamanda 4D baskı malzemeleri olarak da sınıflandırılabilir. Akıllı malzeme gruplarına örnek olarak şekil hafızalı alaşımlar ve şekil hafızalı polimerler gösterilebilir [133], [134]. Örneğin nikel-titanyum gibi bazı şekil hafızalı alaşımlar biyomedikal implantlarda ve mikro-elektromekanik cihaz uygulamalarında

kullanılabilir. Nikel-titanyum kullanılarak 3D yazıcı teknolojisiyle üretim dönüşüm sıcaklıkları, mikro yapı tekrar edilebilirliği ve yoğunluk önemli konulardır [133].

Şekil hafızalı polimer (SMP) ise ışık, elektrik, ısı ve bazı kimyasal türler gibi uyarıcılara yanıt veren bir tür fonksiyonel malzemedir. **Şekil 3.25**'te sıkıştırılmış bir şekil hafızalı polimerin ısıya maruz kalmasıyla orijinal boyutlarına dönüşme aşamaları görülmektedir. 3D yazıcı teknolojisi üretim sayesinde, şekil hafızalı polimerlerin karmaşık şekilleri kolay ve pratik bir şekilde üretilebilir. Bu malzemenin kalite değerlendirmesi boyutsal hassasiyet, yüzey pürüzlülüğü ve parça yoğunluğuna göre yapılır [134].



Şekil 3.25: Sıkıştırılmış bir şekil hafızalı polimerin, ısıya maruz kalmasıyla orijinal boyutlarına dönüşme aşamaları [135].

Ahşap malzemeler, ahşap tozu ve talaş filament formunda kullanılabildiği gibi, ahşap takviyeli biyopolimerle ve ahşap esaslı biyokompozit formlarında üretilebilir. Bu

farklı çeşitler, kullanıcıya malzeme seçiminde esneklik sağlar ve 3D yazıcı teknolojisi üretim projelerine ahşabın görünümünü veya dokusunu kazandırırken aynı zamanda farklı performans özellikleri sunar. En yaygın olarak kullanılan ahşap tozu ve talaş filamentlerdir **Şekil 3.26**. Ahşap bazlı filamentler, ahşap tozu veya talaşın bir polimer (genellikle PLA gibi biyobozunur plastikler) ile karıştırılmasıyla elde edilir. Bu tür malzemeler doğal ahşap hissi verir ve zımpara ya da boyama gibi işlemlerle şekillendirilebilir [136]. Ahşap lif takviyeli polimer filamentler, ahşap liflerinin (selüloz ya da lignin bazlı lifler) biyopolimerlerle karıştırılması sonucu oluşturulur. Ahşap lif takviyeli polimer filamentler, mekanik dayanımı artırabilir ve daha sağlam baskılar yapmayı sağlar. Örneğin, selüloz veya bambu lifleri gibi çeşitli doğal lifler, biyopolimerlerle harmanlanarak daha yüksek dayanıklılık sağlanır [137]. Ahşap esaslı biyokompozit malzemeler, bazı 3D yazıcı teknolojisi üretim uygulamalarında, ağaç kabuğu veya bitki bazlı reçineler gibi doğal malzemelerle birlikte kullanılan biyokompozit filamentler tercih edilir. Bu tür biyokompozitler, ahşap kaynaklarını sürdürülebilir bir şekilde değerlendirmeyi amaçlar ve genellikle düşük çevresel etkiye sahiptir. Ağaç kabuğu veya organik katkıları eklenerek ahşap benzeri dokular ve farklı mekanik özellikler kazandırılabilir [138].



Şekil 3.26: Ahşap filamentten yapılmış nesneler [139].

Biyomalzemeler, canlı organizmalarla uyumlu olacak şekilde tasarlanmış, biyolojik sistemlerle etkileşime girebilen malzemelerdir. Bu malzemeler, doğrudan veya dolaylı olarak insan vücudunda kullanılmak üzere geliştirilmiş olup biyoyumluluk, biyobozunurluk ve mekanik dayanıklılık gibi özelliklere sahiptir. Biyomalzemeler doğal veya sentetik kaynaklardan elde edilebilir. Biyomalzemeler polimerler, seramikler, metaller ve hidrojeller gibi geniş bir yelpazeyi kapsar. Canlı dokularla uyum içinde çalışarak tedavi, onarım veya destek sağlama amacıyla kullanılan biyomalzemeler, insan sağlığı ve tedavi süreçlerinde devrim niteliğinde yenilikler

sunmaktadır. En yaygın kullanılan biyomalzeme gruplarından biri biyopolimerlerdir [140]. Biyoseramik olan hidroksiapatit (HA), kemik yapısına olan benzerliği ile kemik onarımı ve rejenerasyonunda oldukça faydalıdır [141]. Hidrojeller ise özellikle yumuşak doku mühendisliğinde önemli bir yer tutar [142].

Seramikler kırılğan, sert, ısıya dayanıklı ve korozyona dirençli maddelerdir. Günümüzde 3D yazıcı teknolojisi üretim teknikleri, süreç parametrelerini ayarlayarak çatlaklar veya belirgin gözenekler içermeyen yüksek mekanik özelliklere sahip seramiklerden 3D yazıcı teknolojisiyle üretebilmektedir. Seramikler, kürlenme öncesi akışkan durumda oldukları için karmaşık geometri ve şekillerde ürünler üretmek için uygundur ve bu özellikleriyle gelecekteki mimari ve inşaat projeleri için idealdir. Ayrıca, seramik malzemeler diş hekimliği ve havacılık uygulamaları açısından da önemlidir [143]. Bu malzemelere örnek olarak alümina, biyolojik olarak aktif camlar ve zirkonya verilebilir. Alümina tozu, 3D yazıcı teknolojisi üretim teknikleri kullanılarak işlenebilir kimya, adsorbanlar, katalizörler, havacılık, mikroelektronik gibi çeşitli yüksek teknoloji sektörlerinde kullanılan dayanıklı bir seramik oksittir. 3D yazıcı teknolojisi üretim tekniği, yüksek yoğunlukta ve karmaşık şekillerde alümina ürünler üretebilir [144]. SLA teknolojisi ile homojen mikro yapılara, yüksek yoğunluklara, mükemmel basınç dayanımına ve daha iyi eğilme özelliklerine sahip katı seramik kütleler üretilir [145]. **Şekil 3.27**'de 3D yazıcı teknolojisi üretim kullanılarak seramiklerden yapılmış nesneleri göstermektedir. Sınırlı miktarda 3D yazıcı teknolojisi üretim yapılması için uygun seramik bulunması, boyutsal doğruluktaki yetersizlikler ve yüzey düzgünlüğündeki eksiklikler, önemli sorunlar arasında yer almaktadır [119].



Şekil 3.27: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen seramik nesneler [146].

3D yazıcılarda yapı üretiminde sık kullanılan bir diğer malzeme betondur. Baskı yapılacak beton karışımı tasarımı, taze ve sertleşmiş betonun performans gereksinimlerini karşılayacak şekilde oluşturulmaktadır. 3D yazıcılarda kullanılabilen betonlar standart beton özelliklerinden farklı olarak, yüksek performans sağlarken, aynı zamanda işlenebilirlik, çalışabilirlik süresi, ekstrüde edilebilme ve katmanlar arasında kendini taşıyabilme gibi özelliklere sahip olmalıdır **Şekil 3.28 [147]**.



Şekil 3.28: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen beton yüzey [148].

Geri dönüştürülmüş malzemeler, malzeme alternatifi olarak, yazıcı teknolojisi üretim süreçlerinde enerji ve kaynak tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu süreç, doğal kaynakların korunmasına yardımcı olurken, atık miktarını da önemli ölçüde azaltmaktadır. Geri dönüştürülmüş plastikler, 3D yazıcı teknolojisi üretim uygulamalarında en yaygın kullanılan malzemelerdendir. Özellikle plastik şişelerden elde edilen geri dönüştürülmüş PET, 3D yazıcı filamentleri üretmek için sıklıkla tercih edilmektedir. Bu malzeme, dayanıklılığı ve esnekliği sayesinde çeşitli nesne basımında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş PET filamentleri hem düşük maliyetli hem de çevre dostu bir seçenek sunmaktadır [149].

Geri dönüştürülmüş beton ve çimento karışımlarına örnek olarak, beton karışımının içine ham malzeme kum yerine geri dönüştürülmüş kumun eklenmesi ile ilgili çalışmalar, yapılan bazı çalışmalarda ise seramik atıklarının mermer tozuyla birlikte kullanılması ilgili çalışmalar bulunmaktadır [150], [151]. Beton ve çimento karışımlarında, doğal kum yerine geri dönüştürülmüş kumun eklenmesi veya seramik

atıklarının mermer tozuyla birleştirilmesi gibi çalışmalar, maliyetlerin düşürülmesine ve çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bu tür yenilikçi yaklaşımlar, atık malzemelerin yeniden kullanılması sayesinde kaynakların etkin yönetimine katkı sağlamaktadır [151]. Ayrıca, geri dönüştürülmüş malzemelerin 3D yazıcı teknolojisi üretiminde kullanılması da sürdürülebilirlik açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Çevresel ve ekonomik avantajlar sunan bu uygulamalar, endüstriyel süreçlerin daha az atıkla yeniden şekillenmesine yardımcı olur. Böylece, gelecekteki üretim yöntemlerinin daha çevre dostu ve sürdürülebilir hale gelmesi sağlanabilir. Bu tür süreçlerin yaygınlaşması, yalnızca bireysel projelerde değil, genel endüstriyel üretim uygulamalarının dönüşümünü de desteklemektedir [152].

3.3. Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisinin Uygulama Alanları

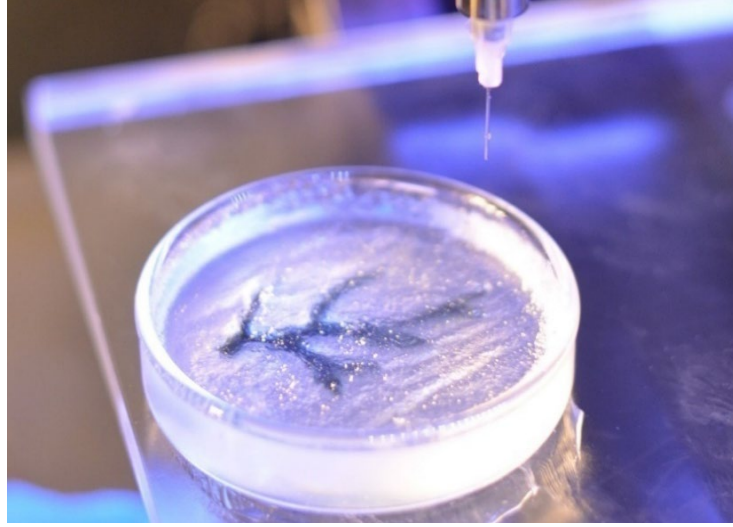
Malzemelerdeki ve teknolojiadaki değişiklikler, beraberinde kullanım alanlarının da genişlemesine katkı sağlamıştır. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi, günümüzde pek çok sektörde yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Tıp ve diş hekimliğinden pastacılığa, tekstil ve aksesuar üretiminden havacılık, otomotiv ve mimarlığa kadar uzanan bu teknoloji, endüstriyel ürün tasarımı, heykeltçilik, eğitim ve yapı üretimi gibi farklı alanlarda da önemli bir yenilik sağlamaktadır. Geniş kullanım yelpazesi ile 3D yazıcı teknolojisi hem tasarım olanaklarını zenginleştirmekte hem de üretim süreçlerine esneklik ve hız kazandırmaktadır [34].

3D yazıcılar, sağlık sektöründe devrim niteliğinde uygulamalara olanak tanıyarak, hasta bakımını iyileştirmek ve tedavi süreçlerini hızlandırmak için kullanılmaktadır [153]. İngiltere'deki Leeds Üniversitesi'nde tasarım öğrencisi, maddi imkânları kısıtlı olan bireylere dokunsal geri bildirim sağlayabilecek bir protez kol icat etmiştir. 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş plastik kol, titreşimli dokunsal geri bildirim özelliği sayesinde, kullanıcının bir nesneyi ne kadar sıkı kavradığı veya dokunduğu hakkında bilgiyi titreşimler yoluyla cilde iletmektedir **Şekil 3.29** [154]. Ayrıca, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş deri ve kemik greftleri, implantlar ve hatta tam 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş organlar gibi ürünler, araştırmaların merkezinde yer almaktadır **Şekil 3.30** [155]. Tıp öğrencileri ve sağlık profesyonelleri için eğitim materyalleri ve simülasyon modelleri üretimi de karmaşık cerrahi işlemlerin daha gerçekçi bir ortamda öğrenilmesini sağlamakta ve eğitim süreçlerini hızlandırmaktadır [153]. Kişiye özel implantlar, diş hekimliğinde kullanılan dental

implantlar ve ortodontik apareylerin üretiminde de 3D yazıcılar önemli bir rol oynamaktadır. 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş diş modeli, verimlilik elde etmek amacıyla dijital diş hekimliği uygulamalarında, diş hekimleri, ortodontistler ve laboratuvarlar tarafından kullanılmaktadır **Şekil 3.31** [156].



Şekil 3.29: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş protez kolu [154].



Şekil 3.30: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş koroner arter [157].



Şekil 3.31: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş diş modeli [156].

Üç boyutlu yazıcıların şaşırtıcı bir başka kullanım alanı ise gıda sektörüdür. Bu teknoloji sayesinde kullanıcılar, pasta ve benzeri gıdaların dekorasyonunda kendi tasarımlarını yapabilmektedir. Ayrıca sanat alanında da ön modelleme aşamasında kullanılarak, eserin nihai niteliğinin önceden belirlenmesine katkı sağlamaktadır. 2006 yılında Cornell Üniversitesindeki bir grup öğrencinin öncülük ettiği bir projede, çikolata, kurabiye hamuru ve peynir gibi gıda malzemelerini basabilen ilk çok malzemeli 3D yazıcı geliştirilmiştir. İlk çok malzemeli baskıların bazılarını üretimini mümkün kılan bu teknoloji gıda sektöründeki 3D yazıcı teknolojisi üretim gelişmelerine hızlanmasını sağlamıştır [158]. Eindhoven Teknoloji Üniversitesi mezunu Elzelinde van Doleweerd, Çin merkezli bir teknoloji şirketiyle iş birliği yaparak, gıda artıklarından 3D yazıcı kullanarak yenilebilir ürünler üretmiştir. Bu yazıcı sayesinde, artık pirinç ve sebzelerden bir macun elde edilmiş ve bu macun, atıştırmalık krakerlere dönüştürülmüştür [159]. Natural Machines tarafından, “Foodini” adlı farklı gıdaları basan bir 3D yazıcı geliştirilmiştir. **Şekil 3.32** [160]. 3D yazıcı teknolojisinin gıda alanındaki gelişmeler, araştırmacıların yeni gıdalar üretmesine olanak tanımış; doku ve tat deneyleri yaparak kişiye özel gıdaların geliştirilmesine katkıda bulunmuştur. Bu alanda önemli bir çalışma, Columbia Üniversitesi'nden Prof. Hod Lipson ve ekibi tarafından, sağlıklı yemek ve gurme kültürüne yönelik yenilikçi bir girişim olarak, 3D yazıcı teknolojisiyle üretim yaparak çeşitli vegan cheesecake tarifleri denemiştir **Şekil 3.33** [161].



Şekil 3.32: Foodini gıda üretimi [160].



Şekil 3.33: 3D yazıcı teknolojisi üretilmiş cheesecake [161].

Moda ve tekstil alanlarında kullanılan 3D yazıcı teknolojisi, malzeme, tasarım ve üretim süreçlerini bir araya getiren yenilikçi bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu teknoloji sayesinde tasarımlar kişisel tercihlere göre uyarlanabilir ve buna uygun ürünler geliştirilebilir. Henüz yaygın olarak kullanılmasa da giyilebilir teknoloji ve sanatsal-özgün ürünlerin yanı sıra hazır giyim koleksiyonlarında da kendine yer bulmaya başlamaktadır [162]. Moda sektöründe 3D yazıcılar farklı biçimlerde kullanılmaktadır. Örneğin, kıyafetlerin tamamı tek parça halinde üretilebildiği gibi, dokuma ve örme detaylar da yazıcılar aracılığıyla oluşturulabilmektedir. Ayrıca, 3D yazıcılarla kullanılan çeşitli ara yüz programları sayesinde özgün ve benzersiz kumaş desenleri tasarlanarak 3 boyutlu olarak üretilebilmektedir. 2013 yılında, tasarımcı Michael Schmidt ve mimar Francis Bitonti, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş ilk elbiseyi ortaya koyarak moda ve teknolojiyi bir araya getiren önemli bir projeye yapmıştır **Şekil 3.34**. Elbise, Siyah reçine malzemeden üretilen 17 parça olarak tasarlanmıştır. Bu parçalar, birbirine entegre edilen esnek bir yapıyla birleştirilmiştir [163]. 2015 yılında ise spor ayakkabı devi Adidas, 3D yazıcı teknolojisi spor ayakkabısı üretimine taşıyarak ilk 3D yazıcı teknolojisi üretilmiş ayakkabısını piyasaya tanıtmıştır **Şekil 3.35**. Bu ayakkabının tabanı, kullanıcıların ayak yapısına ve hareket tarzına uyum sağlayacak şekilde özelleştirilmiştir. Ayrıca çevresel sürdürülebilirlik açısından geri dönüştürülmüş plastik malzemeden yapılmış olması, projeyi çevre dostu bir ürün olarak öne çıkarmıştır [164]. 3D yazıcı teknolojisi ile üretilen örnekler, takı tasarımlarında da görülmektedir. 2016'da tasarımcı Lionel T. Dean, FutureFactories projesi ile ilk yazıcı teknolojisi üretilmiş takı koleksiyonunu

sunduğu bu koleksiyon; altın, gümüş ve platin gibi değerli metallere yapılmış kolye, küpe ve yüzük gibi parçaları içermektedir **Şekil 3.36**. Takılar, geometrik ve organik formları bir araya getirerek geleneksel mücevher tasarımına yenilikçi bir bakış açısı kattı ve bu tasarımlar, kişiselleştirilebilirliği ve yaratıcı formlarıyla takı dünyasında yeni bir dönem başlatmıştır [165].



Şekil 3.34: 3D yazıcı teknolojisi üretilmiş ilk elbise [163].



Şekil 3.35: 3D yazıcı teknolojisi üretilmiş “Adidas Futurecraft” ayakkabı [164].



Şekil 3.36: 3D yazıcı teknolojisi üretilmiş takılar [165].

Havacılık sektöründe bu teknoloji, hafif ve karmaşık yapıdaki parçaların üretimini sağlayarak enerji ve kaynak tüketiminde azalmaya katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. 3D yazıcı teknolojisi üretim, özellikle sık sık değiştirilmesi gereken motor gibi bazı havacılık bileşenlerinin yedek parçalarının üretiminde etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [12]. Havacılık sektöründe Boeing ve Bell, 1990'ların ortalarında tamamladıkları helikopter projelerinde, geleneksel üretim yöntemleriyle yapılamayan bazı özel parçaları yazıcı teknolojiyi üretim kullanarak polimer bazlı malzemelerden üretmeyi başarmıştır. Bu süreçte 200'den fazla özel parçayı tasarlayıp sergileyerek, bu parçaları toplamda 16 farklı ticari ve askeri hava aracında kullanmışlardır [166]. Southampton Üniversitesi tarafından tasarlanan dünyanın ilk 3D yazıcıyla basılmış uçağı, tamamen insansız hava aracı (UAV) olarak geliştirilmiştir Şekil 3.37. Bu uçağın tüm yapısı, plastik veya metal parçaların ardışık katmanlar halinde eklendiği 3D yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilmiştir [167].



Şekil 3.37: 3D yazıcı teknolojisi üretilmiş ilk insansız hava aracı [167] .

Otomotiv sektöründe, üreticiler 3D yazıcı teknolojilerine yatırım yaparak motorlu araçların hızlı prototiplerini üretmeye devam etmektedir [168].

Tüketici ürünleri ve elektronik sektöründe ise cep telefonları, ev aletleri, bilgisayarlar ve oyuncaklar gibi çeşitli ürünler 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmektedir. Endüstriyel ürün tasarımı, kişiselleştirmiş nesnelerden, heykellerin tasarımına kadar birçok nesne tasarımı yapılabilmektedir. Evlerde 3D yazıcılar, kompakt boyutları ve kullanıcı dostu tasarımları sayesinde kolaylıkla kullanılabilir. Bu yazıcılar, kişisel projelerden hobi amaçlı çalışmalara kadar geniş bir yelpazede nesneler üretmek için idealdir **Şekil 3.38**. Kullanıcılar, özel tasarımlar yaparak, ihtiyaçlarına uygun ürünler üretebilir, kişisel hediyeler tasarlayabilir veya ev dekorasyonuna yönelik özgün parçalar oluşturabilmektedir [169].



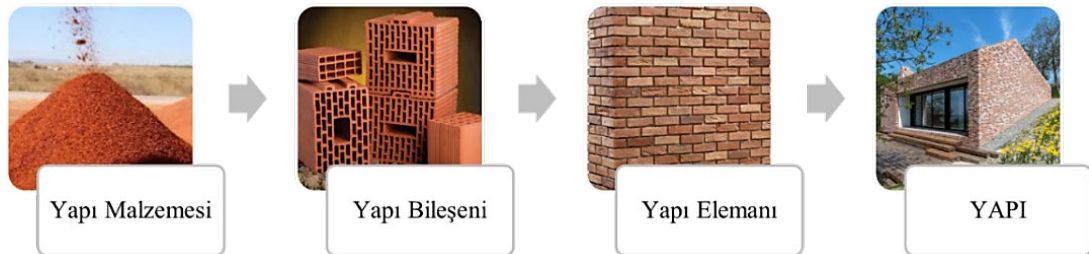
Şekil 3.38: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş oyuncak tekne [170].

3D yazıcılar, eğitim alanında stratejik bir öneme sahip olup, özellikle interaktif, mekanik ve teknik derslerde yaratıcılığı artıran önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu teknoloji, eğitim ortamında etkili bir şekilde kullanıldığında, çeşitli alanlarda öğrencilere farklı deneyimler kazandırabilmektedir. Eleştirel düşünme becerilerini destekleyen bu teknoloji, öğrencilerin mantık yoluyla problemlere çözüm üreten fiziksel nesneler tasarlamalarına da olanak tanımaktadır. Mimarlık, sanat, biyoloji, kimya, jeoloji, tarih, matematik, bilim ve mühendislik gibi çok çeşitli alanlarda da 3D yazıcıların eğitim süreçlerine katkı sağladığı görülmektedir [171]. Tasarım eğitimi verilen bölümlerde, her tasarımın birebir ölçekte üretilmesi ve test edilmesi, maliyet, zaman ve ekipman gibi kısıtlayıcı faktörlerden dolayı çoğu zaman mümkün olamamaktadır. Bu nedenle, derslerde tasarımların 3D yazıcılarla üretilmesi, öğrencilerin ürünlerin detaylarını incelemelerine yardımcı olmaktadır. Özellikle fütüristik tarzda, karmaşık formlara sahip tasarımların üretimi öğrenciler için fiziksel olarak üretilmiş örnekleri görmek, tasarımların üretilirliği açısından tasarımcılara önemli katkılar sağlamaktadır [172].

3D yazıcıların aktif olarak kullanıldığı bir diğer önemli alan ise yapı sektörüdür. 3D yazıcılar yalnızca küçük ölçekli obje ve modellerin üretiminde değil; aynı zamanda büyük ölçekli mobilyalar, dekoratif yapılar ve hatta tam boyutlu bina yapılarının inşasında da kullanılabilmektedir. Beton, çelik ve polimer gibi çeşitli malzemeleri kullanarak yapı elemanlarını hızlıca üretme imkânı sağlayan bu teknoloji, düşük maliyetli ve yenilikçi çözümler sunmaktadır [26]. 4. Bölüm 'de, 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründeki kullanım alanları detaylandırılarak yapı malzemesi, yapı bileşeni, yapı elemanı ve yapı ölçeğinde ayrıntılı açıklamalara yer verilmiştir.

4. ÜÇ BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİSİNİN YAPI SEKTÖRÜNDE KULLANIMI

Üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojisi, mimarlık ve inşaat sektörlerinde tasarım, yapım süreçleri ve yapı kültürü üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır [173]. Malzeme kayıplarını en aza indirerek atık üretimini azaltmakta ve geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımını teşvik etmektedir. [174]. 3D yazıcı teknolojisi, inşaat süreçlerinde organizasyonel verimliliği artırarak önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Yapı tasarımlarının dijital ortamda oluşturulup doğrudan yazıcılarla üretilmesi, üretim süreçlerini standartlaştırmakta ve dijital ortamda koordinasyonu kolaylaştırmaktadır [175]. Ayrıca, üretim yerinin belirlenmesi ve sistemin açık ya da kapalı olması gibi faktörler, proje yönetimini merkezi hale getirerek süreçleri sadeleştirmektedir. Yapım aşamalarının entegrasyonu ve standartlaşmasıyla uygulanabilirliğini arttırmakta, karmaşık geometrik şekillerin, organik formların ve yenilikçi yapı tasarımlarının hayata geçirilmesini de kolaylaştırmaktadır [6]. 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründe uygulanabilirliği, ekonomik, çevresel sürdürülebilirlik, iş gücü verimliliği, tasarım esnekliği ve daha az atık üretimi gibi pek çok farklı açıdan da önemli olduğu gibi, en önemli katkılardan biri, yapı bileşenlerini, yapı elemanlarını ve yapının bütünü hızla yerinde üretilmesidir [30]. Yapı, temel olarak yapı malzemeleri, yapı bileşenleri ve yapı elemanlarının bir araya gelmesiyle meydana gelen bütünsel bir üründür **Şekil 4.1** [176]. 3D yazıcı teknolojisiyle yapı malzemesinden yapıya sürdürülebilir ve yüksek teknolojiye dayalı yenilikçi ürünler üretilmektedir.



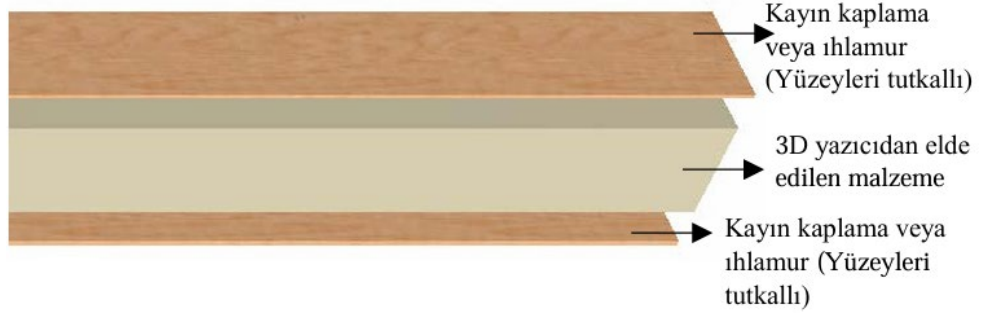
Şekil 4.1: Yapıyı oluşturan katmanlar [177], [178], [179], [180].

4.1. Yapı Malzemesi Üretiminde Üç Boyutlu Yazıcı Kullanımı

Yapı malzemesi, doğal veya yapay kaynaklardan elde edilen ve yapıların inşasında kullanılan temel hammaddedir. Doğal malzemeler genellikle az işlem görerek veya işlenmeden kullanılırken, yapay malzemeler çeşitli fiziksel ve kimyasal süreçlerle üretilir. Bu malzemeler, fabrika veya atölyelerde standartlara uygun şekilde üretilmekte ve teknik özellikleri, dayanımları ve şekillerine göre sınıflandırılabilir [181]. Yapı malzemeleri, sadece işlevsel değil, aynı zamanda yapının görsel, estetik, renk, doku ve yüzey özelliklerine de katkıda bulunmalıdır [182].

Üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojisi ile yapı üretiminde kullanılan malzemeler, yüksek dayanıklılık, iyi pompalanabilirlik ve şekil koruma özelliklerinin yanı sıra, katmanlar arasında güçlü bağlar kurarak deformasyonu engelleyecek akışkanlık seviyesine sahip olmalıdır. Ayrıca, bu malzemelerin ısı ve çevresel etmenlere karşı dirençli, esnek, sürdürülebilir ve çevre dostu özellikler taşıması gerekmektedir. Bu nitelikler, yapıların güvenliğini ve verimliliğini artırarak uzun ömürlü ve işlevsel yapılar elde edilmesini sağlamaktadır. 3D yazıcı teknolojisi, yapı malzemesi üretiminde, yapıların gereksinimlerine en uygun malzemenin seçilmesine olanak tanıyarak hem yapısal hem de estetik hedeflerin karşılanmasını mümkün kılar. Kullanılan malzemeler, yazıcının türü, üretim süreci ve yapının amacına bağlı olarak farklılık göstermektedir [29]. 3D yazıcı teknolojiyle yapı üretiminde, genellikle beton tabanlı malzemeler hammadde olarak tercih edilmekle birlikte ahşap, metal, seramik, polimer ve çeşitli geri dönüştürülmüş malzemeler de kullanılmaktadır [40], [183].

3D yazıcılar özellikle ahşap kaplama malzemesi üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alanda yapılan bir çalışmada, ahşap kaplamaların laminasyon işleminin eğilme direncine etkisi incelenmiştir. Çalışmada, 10x10x180 milimetre boyutlarında ara katman parçaları 3D yazıcı teknolojiyle üretilmiş ve bu parçalar, ıhlamur ve kayın kaplamalarla lamine edilmiştir **Şekil 4.2**. Bu çalışma, 3D yazıcıyla üretilen ahşap katkılı veya katkısız filamentlerden yapılan malzemelerin, ahşap kaplama laminasyonu ile mukavemetlerinin artırılabilirliğini göstermiştir. Elde edilen bu lamine malzemelerin, mobilyalar, lambri ve iç dekorasyon gibi çeşitli alanlarda kullanılabilecek bir alternatif olabileceği belirtilmiştir [184].



Şekil 4.2: Oluşturulan ahşap lamine [184].

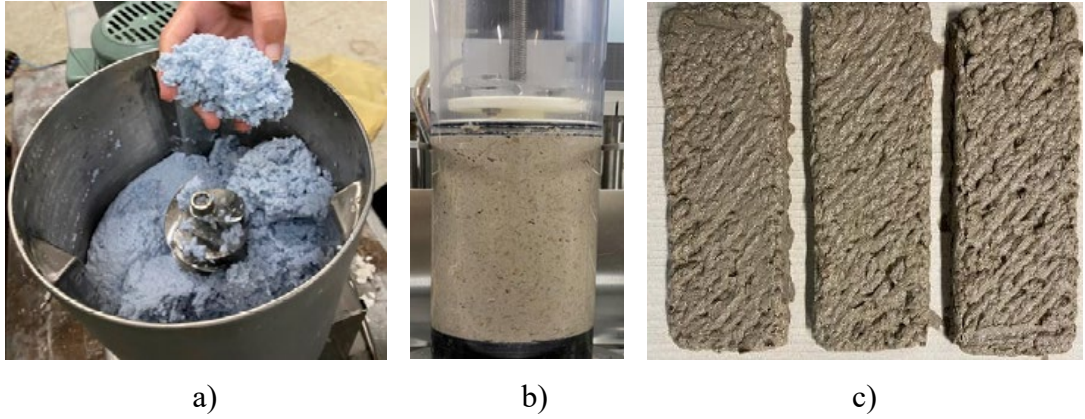
Ahşap atıkların yeniden kullanımına yönelik bir çalışmada, endüstriyel atık malzemeler olan ahşap ve talaş, 3D yazıcılarda katkı maddesi veya filament olarak kullanılarak obje tasarımlarında değerlendirilmiştir [16], [185], [186]. Ahşap tozunun 3D yazıcılarla üretilen objelerdeki kullanımını inceleyen bir çalışmada farklı türde ahşap tozları ve çeşitli oranlarda deneyler gerçekleştirilmiştir **Şekil 4.3**. Testler, ahşap tozundan üretilen objelerin fiziksel ve mekanik zayıflıklar gösterebildiğini ve yapısal olmayan uygulamalar için uygun olduğunu ortaya koymuştur [16].



Şekil 4.3: Ahşap tozu ile 3D yazıcı teknolojisiyle üretim [16].

Ambalaj atıklarının geri dönüştürülmesinden yapı malzemeleri geliştirmeyi amaçlayan bir çalışmada ise, atık kâğıttan elde edilen selüloz filamentleri 10 milimetrelik bir nozul aracılığıyla püskürtülerek örneklerin basılmasıyla, üretilen malzemenin standardizasyonunu homojenlik ve yangına karşı performansı değerlendirilmiştir **Şekil 4.4**. Bu çalışma, ambalaj atıklarından elde edilen

malzemenin yangın yayılımını önleyebilecek çevre dostu ve özelleştirilmiş yapı malzemelerinin geliştirilmesinde kullanılabileceğini ortaya koymuştur [187].



Şekil 4.4: Ambalaj atıkları: a) ayrıştırma aşaması, b) selüloz filament silindiri, c) basılmış ıslak selüloz [187].

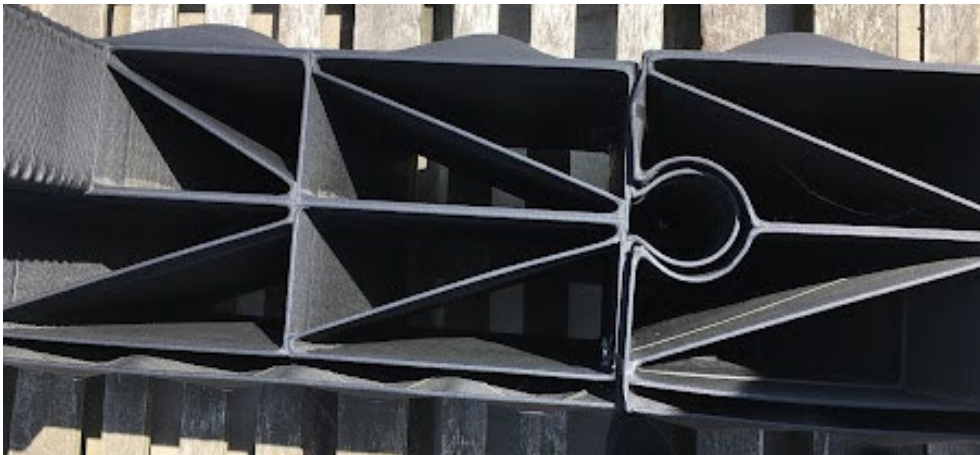
Metal üzerine yapılan bir araştırmada, düşük karbonlu çelik ve paslanmaz çelik kullanılarak bir dizi basit şekil oluşturulmuş; yüzey bitişi, mikro yapı ve artık gerilmeler incelenmiştir **Şekil 4.5** [188]. Test sonuçları, düşük karbonlu çelik numunelerde üretim yönüne bağlı olarak akma dayanımında belirgin bir fark olmadığını, paslanmaz çelik numunelerde ise hafif bir yönelime göre farklılık gösteren malzeme davranışı gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, yorulma ve burkulma testleri, bu yöntemle üretilen malzemelerin geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha büyük bir varyasyon gösterdiğini ve üretim sürecinin malzeme özellikleri üzerindeki etkisinin dikkate değer olduğunu göstermiştir [189].



Şekil 4.5: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş metal numuneler [189].

Yapı sektöründe seramikler, geleneksel yüzey kaplama malzemesi rolünün ötesine geçerek, çok işlevli ve estetik bir sınır katmanı olarak önem kazanmıştır. 3D yazıcı teknolojisi, seramik üretiminde serbest form geometriler, ince cidarlı yapı elemanları, iç boşluklu hafif sistemler ve parametrik tasarıma dayalı özel şekiller oluşturma imkânı sunmaktadır. Katmanlı üretim, seramik bileşenlerde hava geçirgenliği, ısı yalıtımı ve akustik kontrol gibi çok işlevli özelliklerin birleştirilmesini sağlamaktadır. Bir çalışmada, serbest form seramik tuğlaların bina kabuklarında kullanımı incelenmiş; baskı için seramik macunun plastiklik ve nem oranı gibi özellikleri optimize edilmiştir. Baskı parametrelerinin geometrik doğruluk ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiş, parametrik tasarım araçlarıyla özelleştirilen tuğlaların performansı değerlendirilmiştir. Çalışma, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen seramiklerin, geleneksel yöntemlere kıyasla daha fazla tasarım esnekliği ve optimizasyon olanağı sunduğunu ortaya koymuştur [190].

Polimerler, düşük maliyetleri, yüksek mukavemetleri ve geniş kullanım alanları nedeniyle 3D yazıcı teknolojisinde yaygın olarak tercih edilen malzemeler arasındadır. Polimer malzemelerin mekanik ve fonksiyonel özelliklerini iyileştirmek amacıyla, bu malzemelere parçacık, fiber ya da nanomalzeme gibi takviyeler eklenerek polimer kompozitler elde edilmektedir [40]. Polimer malzemelerin sürdürülebilirlik potansiyelini vurgulayan bir örnek, Hollanda'da geliştirilmiş bir biyoplastik türüdür **Şekil 4.6**. Bu malzeme, ana bileşeni keten tohumu yağı olan ve geri dönüştürülebilir özellikte bir malzeme olarak dikkat çekmektedir [191].



Şekil 4.6: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen biyoplastik bileşenin üstten kesiti [191] .

Beton, mukavemetinin yüksek olması, düşük üretim maliyeti, yerel kaynaklardan temin edilebilmesi, çeşitli şekillere kolayca kalıplanabilmesi ve yüksek termal direnci gibi özellikleri sayesinde, günümüzde pek çok yapı projesinde en yaygın kullanılan inşaat malzemelerinden biri olarak öne çıkar [40]. Agregalar, yapının yük taşıma kapasitesi ve yüzey estetiği açısından önemlidir. Nozul çapına uygun olarak agrega boyutlarının 4-6 milimetreden büyük olmaması tercih edilmesi gerektiği, aksi halde tıkanıklık ve yüzeyde pürüzlülük sorunları yaşanabildiği belirtilmektedir [192], [193], [194]. Harcın işlenebilirliğini artırmak ve akışkanlığını sağlamak için su/çimento oranının kontrol edilmesi gereklidir; ancak bu oran artırıldığında dayanım düşebilir. Bu nedenle, istenilen işlenebilirlik seviyesine ulaşmak için karışıma süper akışkanlaştırıcı katkıları eklenmektedir. Araştırmalar, 0.25-0.44 aralığındaki su/çimento oranının yazdırılabilirliği artırdığını göstermektedir [195]. 3D yazıcı teknolojisiye uygun, sürdürülebilir ve yenilikçi betonların geliştirilmesine yönelik bir araştırmada, yüksek dayanımlı silis kumu ve bağlayıcı olarak farklı oranlarda çimento kullanılmıştır. 3D teknolojisiyle beton baskıyı taze halde değerlendirmek amacıyla su/çimento oranı ve süperakışkanlaştırıcı/çimento oranı değiştirilerek işlenebilirlik özelliklerinin incelendiği bu çalışmada, betonda hem işlenebilirliğin hem de erken yaş dayanımının sağlanması için su/çimento oranının düşük tutulmasının kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir Şekil 4.7 [196].



Şekil 4.7: SA/çimento ve su/çimento oranlarının işlenebilirliğe ve taşınabilirliğe etkisi [197].

Yapısal atıkların (Construction and Demolition Waste - CDW) geri dönüştürülmesine dayalı bir çalışmada, tuğla, kiremit, beton ve cam atıkları kullanılmış ve yapısal atık içerikli geopolimer harçların 3D yazıcı teknolojisiyle üretim sürecine uygunluğu incelenmiştir. Karışımların akış, deformasyon özellikleri ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Geliştirilen malzemenin ekstrüzyon sırasında kusursuz bir şekilde üst üste katmanlar oluşturabildiği ve basılı yapıların

tasarıma uygun şekilde şeklini koruduğu belirlenmiş **Şekil 4.8**. Elde edilen sonuçların, yapısal atık içerikli geopolimer harçların, herhangi bir kimyasal katkı maddesi kullanılmaksızın, 3D yazıcı teknolojisiyle üretim için güçlü bir alternatif üretim yöntemi olduğunu ortaya koyduğu ifade edilmiştir [19], [20].



Şekil 4.8: Yapısal atıklarla oluşturulan geopolimer harçların üretimi [20].

İnşaat sırasında kazılan toprak, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen yapılar için doğal kum talebini azaltmak amacıyla kullanılabilmektedir. Bunla ilgili bir çalışmada, kil karışımların akış yayılması ile ekstrüzyon uygunluğu test edilmiştir. Bu çalışmada, kullanılan toprak bazlı karışımların performansının, malzeme içeriği ve oranlarına bağlı olarak farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, dengeli bir akışkanlık ve dayanım sağlamak için malzeme kompozisyonunun titizlikle optimize edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. [198]. Beton üretiminde çimento yerine alternatif malzemelerin kullanımını inceleyen bir diğer çalışma, seramik atık tozu ve mermer tozunun çimentoya kısmen ikame edilmesinin betonun basınç dayanımını olumlu etkileyebileceğini göstermiştir [150]. Buna benzer bir çalışma, betonun içindeki kum bileşeni yerine geri dönüştürülmüş kum kullanılarak 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen beton ürünlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Geri dönüştürülmüş kumun yüksek su emme kapasitesi nedeniyle beton dayanımında kısmi bir azalma gözlemlenirken, uygun oranlarda kullanıldığında basınç ve eğilme dayanımı açısından olumlu sonuçlar elde edilmiştir [151].

4.2. Yapı Bileşeni Üretiminde Üç Boyutlu Yazıcı Kullanımı

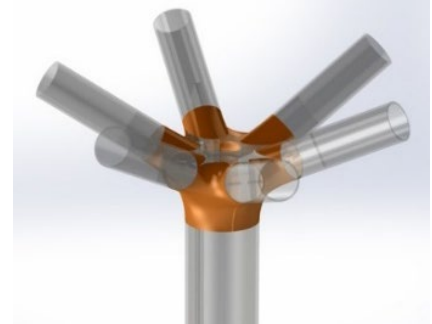
Yapı bileşenleri, bir yapının işlevsel parçalarını oluşturan ve genellikle farklı yapı malzemelerinden meydana gelen temel unsurlardır. Belirli görevleri yerine getirmek üzere tasarlanan bu bileşenler, yapı içinde bir araya getirilerek yapıların işlevselliğini ve dayanıklılığını sağlar [199]. 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen yapı bileşenleri,

yüksek mukavemet, şekil koruma ve katmanlar arası güçlü bağ oluşturma gibi özelliklere sahip olmalıdır. Hafif, kolay monte edilebilir ve taşıyıcı elemanlarla uyumlu yapıları, enerji verimliliği ve gürültü kontrolüne katkıda bulunurken, çevresel dayanıklılıkları sayesinde uzun ömürlü ve düşük bakım gerektirir. 3D yazıcı teknolojisiyle üretim, farklı geometriler, yüzey dokuları ve estetik çeşitlilik sunarak yenileme ve genişletme projelerinde modüler kullanım kolaylığı sağlar [200].

2014 yılında Londra'nın merkezinde yer alan 6 Bevis Marks binasının çatı terasında, çatı kanopisinde kullanılmak üzere tasarlanan bağlantı bileşeni, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen ve cephe bileşenine örnek bir uygulama olarak değerlendirilen ilk "yapı bileşeni" olarak tanımlanmıştır **Şekil 4.9** [200]. Projede, karmaşık bağlantı noktaları oluşturarak binanın kolonları ile kanopi arasında işlevsel bir bağ kurulmuştur. İnşaatı yapan firma, bu projede 3D yazıcı teknolojisi kullanımının geleneksel dökme çelik bağlantılara kıyasla hem maliyetlerin düşürüldüğünü hem de üretimin kolaylaştırıldığını belirtmiştir [201]. 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen yapı bileşenine başka bir örnek de 3D yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilen Nematox cephe bağlantı noktasıdır **Şekil 4.10**. Bu tasarım, katmanlı üretim sürecinin daha optimize ve karmaşık geometrilere olanak sağlama potansiyelini göstermek amacıyla geliştirilmiştir [202].

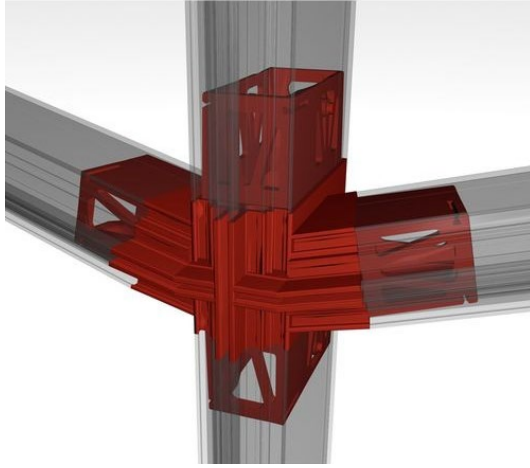


a)

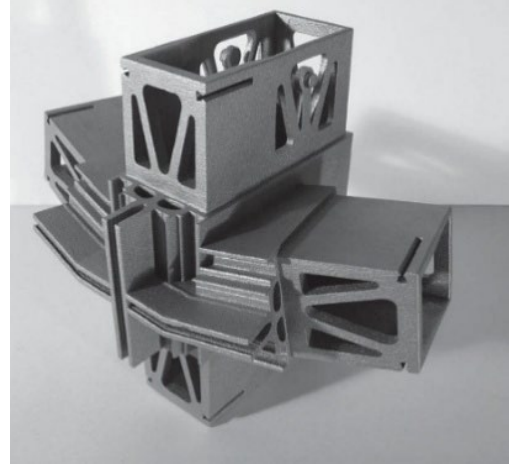


b)

Şekil 4.9: 6 Bevis Marks binası: a) çatı kanopisi, b) bağlantı bileşeni modeli [203].



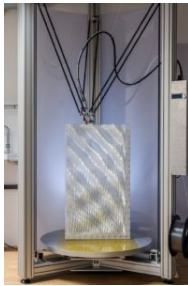
a)



b)

Şekil 4.10: Nematox cephe bağlantısı: a) cephe bileşeni modeli, b) alüminyum prototip nematox cephe düğümü [202].

Cephe bileşeni üzerine yürütülen bir araştırmada, 3D yazıcıyla yarı saydam plastikten üretilen 60 santimetre genişliğinde ve 1 metre yüksekliğinde bir yapı bileşeni prototipi geliştirilmiştir. **Şekil 4.11a**. Hava dolu hücresel boşluklar yalıtım ve stabilite sağlarken, dalga formundaki yüzey optimum havalandırma ve gölgeleme sunmuştur **Şekil 4.11b**. Mikro yapılandırılmış yüzeyler akustik performansı artırmıştır. Münih Teknik Üniversitesinin (TUM) ana kampüsündeki güneş enerjisi istasyonunda bir yıl boyunca test edilen bu yenilikçi cephe tasarımının müze, kütüphane ve alışveriş merkezleri gibi alanlarda kullanılabileceği öngörülmüştür **Şekil 4.11c** [204].



a)



b)

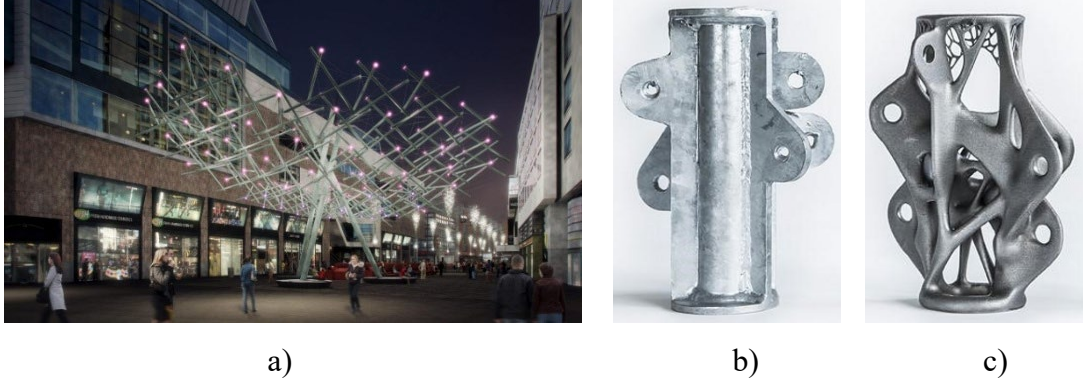


c)

Şekil 4.11: 3D cephe prototipi: a) cephe paneli üretimi, b) yarı saydam plastik dokusu, c) test için üretilen cephe elemanı [204].

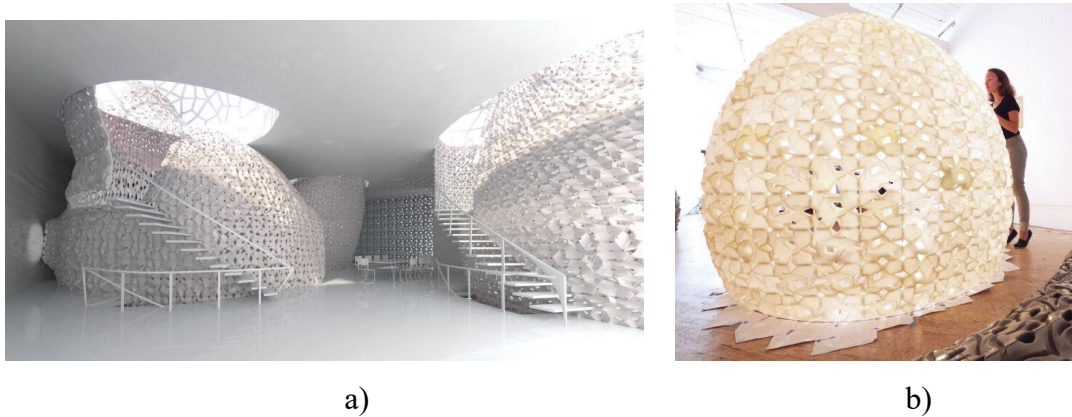
Hollanda'nın Lahey kentinde sokak aydınlatma yapılarının (Tensegrity) tasarımı için yapı bileşeni üretilmiştir **Şekil 4.12**. Geleneksel yöntemlerle üretilen düğümlerin yüksek iş gücü gerektirmesi üzerine, 3D yazıcı teknolojisiyle üretimle daha hızlı ve

optimize üretim gerçekleştirilmiştir. Bu yenilikçi yöntem, malzeme kullanımını ve ağırlığı azaltarak yorulma sorunlarını minimize etmiş ve kablo kuvvetlerini iyileştirmiştir [205].



Şekil 4.12: Tensegrity Yapısı: a) yapının tasarımı, b) geleneksel üretilen çelik düğüm, c) 3D teknoloji ile üretilen düğüm [205].

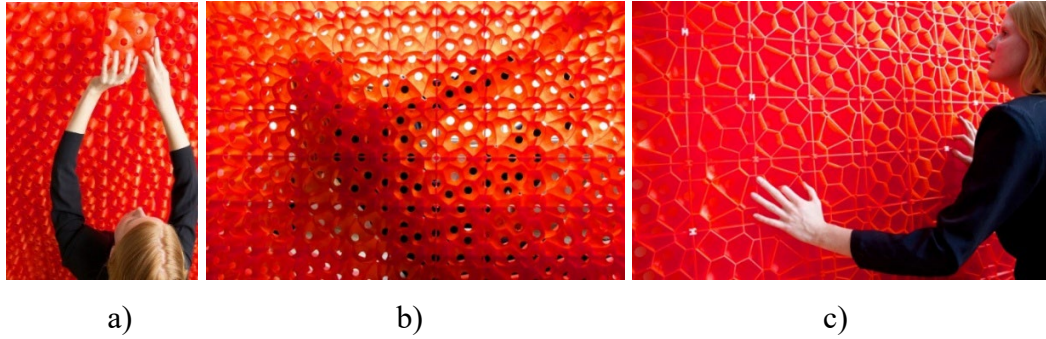
ABD Kaliforniya’da Emerging Objects firması tarafından inşa edilen binanın (3D Baskı Ev 1.0) bazı yapı bileşenleri 3D yazıcı teknolojiyle üretilmiş, böylece geleneksel üretim teknikleri ile modern yazıcı teknolojisi bir araya getirilmiştir. Çimento, tuz polimeri ve fiber beton gibi yenilikçi ve hafif malzemeler kullanılarak dayanıklı, su geçirmez ve yarı saydam yapı bileşenleri üretilmiştir **Şekil 4.13**. Böylece doğal ve geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı teşvik edilmiştir. Yüksek hassasiyet sağlayan yazıcı teknolojiyle kesintisiz üretim gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamanın 3D yazıcıların inşaat sektöründeki potansiyelini gösterirken, sürdürülebilir ve verimli çözümler sunduğu belirtilmiştir [34].



Şekil 4.13: 3D Baskı Ev 1.0: a) geliştirilen model, b) kabuk birleşimi [206].

Picoroco Duvarı, polimer malzeme kullanılarak 3D yazıcı teknolojiyle üretilen modüler yapı bloklarından oluşturulmuştur **Şekil 4.14**. Blokların şeffaflığı, duvar

boyunca görsel geçirgenlik katmanları oluşturarak, hücresel geometri içinde hareket eden figürlerin algılanmasını ve dinamik bir görsel etki yaratılmasını sağlamaktadır. Bloklar, aynı malzemeden üretilmiş 3D yazıcı teknolojiyle üretilen klipsler ile birleştirilmiştir [207]. Bloklar halinde üretilen ve birbiri ile kenetlenen bir diğer duvar bileşeni örneği ise Sawdust Ekranıdır. Sawdust Ekranı, 3D yazıcı teknolojiyle üretilen bileşen ceviz malzemesinden üretilmiş olup, yüzeyi katmanlı üretim sürecinden kaynaklanan ve doğal ahşap damarlarını taklit eden bir dokuya sahiptir **Şekil 4.15**. Her bir damarın hafif eğriliği, açıklıkları dışbükey veya içbükey biçimde vurgulayarak ekranın hem görsel hem de dokunsal bir deneyim sunmasına olanak tanımaktadır [208].



Şekil 4.14: Picoroco Duvarı: a) blokların yerleştirilmesi, b) şeffaf duvar yapısı, c) blokları birleştirmek için kullanılan klips sistemi [207].



Şekil 4.15: Sawdust Ekranı: a) doğal ahşap dokusu, b) "Sawdust Ekranı" yapısı [208].

Tuğla üretiminde 3D yazıcı teknolojisi, dış form ve iç yapının performans odaklı tasarlanmasını sağlayarak geleneksel varsayımları yeniden tanımlamaktadır **Şekil 4.16** [190]. İtalya'nın Faenza kentinde gerçekleştirilen bir projede, seramik ve tuğla gelenekleri, 3D yazıcı teknolojiyle birleştirilerek geçmiş ve geleceği buluşturan

yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur. Yerel kil ve çömlek mirasını temel alan proje, geleneksel ve modern üretim tekniklerini harmanlamıştır **Şekil 4.17**. Yerel kilden üretilen istiflenebilir tuğlalar hem dayanıklılık hem de estetik açıdan dikkat çeken heykelsi duvarlar oluşturmuştur [209]. Seramik tuğla tasarımlarına bir diğer örnek, içleri toprakla doldurulabilen ve birbirine geçirilerek istiflenebilen modüler seramik bir sistemdir **Şekil 4.18**. Bu tasarım, bahçe alanlarının özelleştirilmesine ve kolay taşınabilirliğe olanak tanırken, seramik yapı bileşenleri için üretim verimliliği ve tasarım esnekliği sağlayan yenilikçi bir çözüm sunmaktadır [210]. Pasif soğutma tekniğinden esinlenerek geliştirilen "soğuk tuğla" tasarımı, gözenekli seramik malzemeden üretilmiş bir yapı bileşeni olup, sıcak iklimlerde iç mekanları soğutmak için tasarlanan bu sistem, suyu emen ve havanın geçişine izin veren 3D teknolojisiyle üretilen seramik tuğlalardan oluşmaktadır **Şekil 4.19** [211].



Şekil 4.16: Seramik köşe tuğlalar [190].



a)

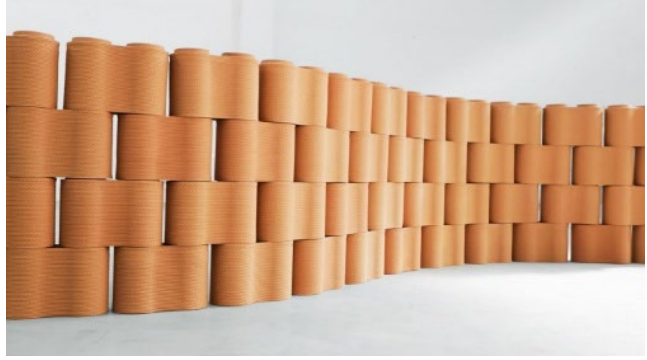


b)

Şekil 4.17: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen duvar: a) üst üste istiflenmiş üretilmiş tuğlalar, b) 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş tuğla [209].

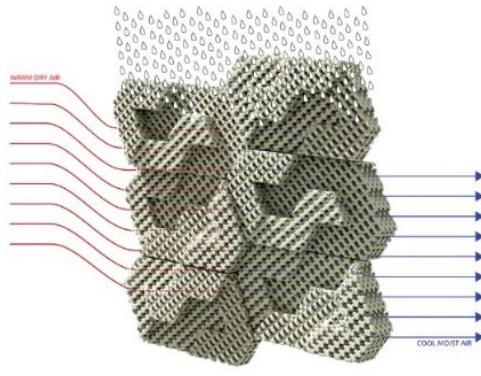


a)

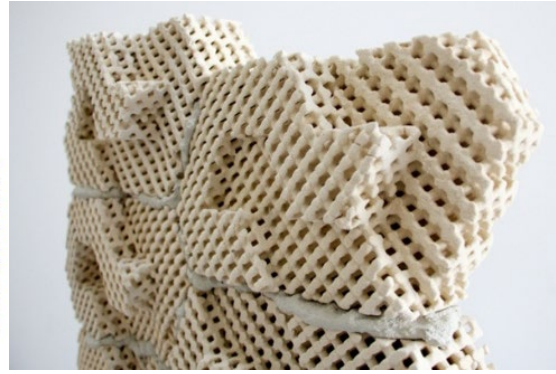


b)

Şekil 4.18: Seramik tuğla: a) tuğla modülü, b) modüler seramik sistem [210].



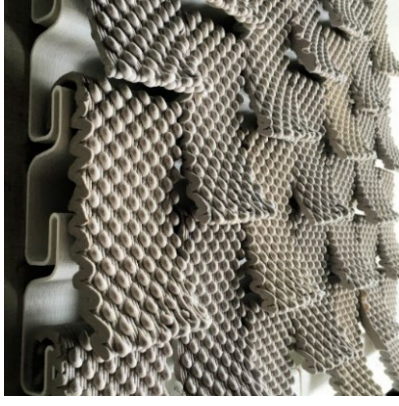
a)



b)

Şekil 4.19: Soğuk tuğla: a) duvar sistemi şeması, b) 3D soğuk tuğla [211].

3D yazıcı teknolojisiyle üretilen Seed Stitch Wall tasarımı, yenilikçi tasarımıyla dikkat çeken seramik bir duvar kaplama sistemidir **Şekil 4.20**. Yatay ve dikey yönlerde sıralanan örgü deseniyle şekillendirilen seramik karolar, yazıcının hareketiyle oluşan doğal dokulara ve dinamik bir yüzey yapısına sahiptir. Sert, dayanıklı ve düşük gözenekli seramikten üretilen karolar, akıcı bir görsel kalite sunmaktadır. Eğrisel yapısı sayesinde kolay montaj imkânı sunmaktadır. Yarı saydam destekler, arkadan aydınlatma ve yalıtım için ek işlevsellik sunarak estetik ve performans gereksinimlerini karşılamaktadır [212]. Milano Tasarım Haftası için tasarlanan “Fusion” ise, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş yenilikçi bir seramik duvar kaplamasıdır. Bu seramik duvar kaplama, parça parça basılarak modüler bir yapıda üretilmiş **Şekil 4.21a** ve hassas birleştirme ile kusursuz bir bütünlük sağlanmıştır **Şekil 4.21b** [213].



a)

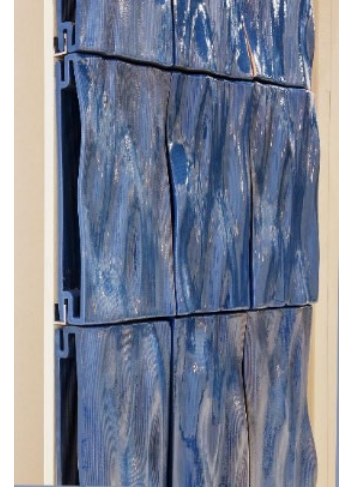


b)

Şekil 4.20: Duvar kaplama: a) karonun yandan kesiti, b) duvar yüzeyi [212].



a)



b)

Şekil 4.21: Fusion tasarımı: a) seramik karolar, b) karo birleşimleri [213].

3D yazıcı teknolojiyle üretilen ev (3D Print Canal House) projesi, mimaride 3D yazıcı teknolojiyle üretiminin potansiyelini araştırmayı amaçlayan bir çalışmadır [200]. 3D yazıcı teknolojiyle parçalar halinde üretilen yapı bileşenlerinde bitkisel yağ içeren geri dönüştürülebilir bioplastik malzeme kullanılmıştır **Şekil 4.22**. Duvar bileşenleri içlerine, beton doldurularak yapısal dayanım artırılmıştır [214].



a)



b)

Şekil 4.22: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen ev projesi: a) 3D yazıcısı, b) 3D yazıcı teknolojisi ile üretilmiş yapı bloğu [191].

3D yazıcı teknolojisiyle üretilen kolon bileşeni olarak Deprem Kolonu (Quake Column) çalışması öne çıkmaktadır **Şekil 4.23a**. Geleneksel İnka kesme taş tekniklerinden esinlenerek geliştirilen bu modüler tasarım, deprem kuvvetlerini dağıtarak sismik dayanımı yüksek yapılar oluşturma potansiyeline sahiptir **Şekil 4.23b**. Hafif ve içi boş modüler taşlar, komşu bloklarla kenetlenecek şekilde ve yerleştirme kolaylığı için tutacaklı ve numaralı biçimde tasarlanmıştır **Şekil 4.23c**. Bu yenilikçi tasarım, 3D yazıcı teknolojisiyle üretimin geleneksel yapı prensiplerini birleştirerek modern sismik dayanımlı yapı çözümleri sunmaktadır [215].



a)



b)



c)

Şekil 4.23: Quake Column: a) birleştirilmiş yapı, b) inka kesme taş yapısı, c) numaralandırılmış bloklar [215].

Yapılarda yalıtım amacıyla kullanılan yapı bileşenlerine yönelik olarak, inşaat sektöründe 3D yazıcı teknolojiyle köpük yalıtımı üretim süreçleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu teknolojiyle üretilen, Keating'in 14,6 metre genişliğindeki çift duvarlı kubbesi ve Nantes Üniversitesi'nin 95 m² büyüklüğündeki beş odalı BatiPrint projesi en büyük projeler arasında yer almaktadır **Şekil 4.24**, **Şekil 4.25**. Keating'in yapısı 13,5 saatte, BatiPrint yapısı ise 54 saatte tamamlanmıştır. Her iki proje de mobil robotik platformlar ile yerinde üretimi gerçekleştirilmiştir [216]. 3D yazıcı teknolojiyle üretilen köpük yalıtımları üzerine yapılan araştırmalar, havalandırılmış beton ve seramik köpük gibi inorganik malzemelerin yalıtım ve taşıyıcı yapı üretimindeki potansiyelini ortaya koymaktadır [216].



Şekil 4.24: Keating'in çift duvarlı kubbe yapısı üretimi [216].



Şekil 4.25: BatiPrint projesi üretimi [216].

4.3. Yapı Elemanı Üretiminde Üç Boyutlu Yazıcı Kullanımı

Yapı elemanları, çeşitli malzeme veya bileşenlerin belirli yöntemlerle birleştirilmesiyle oluşan, mekânı tanımlayan ve işlevsel özelliklere sahip büyük yapı parçalarıdır [217]. Ana yapı elemanları arasında temeller, duvarlar, döşemeler ve çatılar yer alırken, yardımcı yapı elemanları olarak ışıklıdırma, havalandırma, tesisat, kapı, pencere ve merdivenler gibi unsurlar yer alabilir [199].

3D yazıcı teknolojisi temel üretiminde yaygın olarak kullanılmamakla birlikte, çelik yapı gibi farklı yapı sistemlerinde kullanılan betonarme temellerin 3D yazıcı teknolojisiyle üretilbildiği örnekler mevcuttur. Bu alanda dikkat çeken yenilikçi bir örnek, 2021 yılında gerçekleştirilen dünyanın ilk 3D yazıcıyla üretilmiş temel sistemi projesidir **Şekil 4.26**. 3D yazıcı teknolojisiyle temel üretimi sayesinde, geleneksel temellere kıyasla %75 oranında malzeme tasarrufu sağlandığı belirtilmiştir [218]. 2022 yılında SQ4D firması tarafından geliştirilen Otonom Robotik İnşaat Sistemi (Autonomous Robotic Construction System - ARCS) ile üretilen bir ev, diğer 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen evlerden farklı olarak, temelini de 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş olmasıyla öne çıkmaktadır **Şekil 4.27** [219]. Bu çalışma, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen yapıların temel inşasında teknolojik bir ilerlemeyi temsil etmektedir.



Şekil 4.26: Enerji santrali için düşük karbonlu temel [218].



Şekil 4.27: ARCS yazıcı kullanılarak üretilen temel [219].

3D yazıcı teknolojisiyle kolon üretiminde, kolonun kalıp görevini üstlenen katmanlar halinde basılan yapılar kullanılmaktadır. Kalıcı beton kolon kalıpları, 3D yazıcı teknolojisiyle üretim yöntemiyle bütün olarak ya da parçalar halinde üretilmektedir. Bu yöntemle, Shimizu'nun Toyosu 6-Chome projesinde, 4,2 metre yüksekliğindeki dört kolonun üretimini başarıyla gerçekleştirilmiştir. Projede, kolon kalıpları üç yatay ve iki dikey bölüme ayrılarak üretilmiş ve şantiyede birleştirilerek betonla doldurulmuştur **Şekil 4.28** [220]. Beton kolon kalıplarının donatı ihtiyacı olmadan üretilmesine yönelik dikkat çekici bir örnek, bir anaokulu oyun alanı için tasarlanan yaklaşık 4 metre yüksekliğindeki organik kafes tarzı kolon yapısıdır **Şekil 4.29a**. Kolonun dış yüzeyini oluşturan boş kalıp, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş ve ardından yüksek performanslı fiber takviyeli betonu ile doldurulmuştur **Şekil 4.29b**. Baskı katmanlarının izlerini gidermek için yüzey son işlemlerle pürüzsüz hale getirilmiştir [221].



a)



b)

Şekil 4.28: Toyosu 6-Chome: a) 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş kolonlar, b) şantiyede birleştirilen taç yaprağı şeklindeki kolon [220].



a)



b)

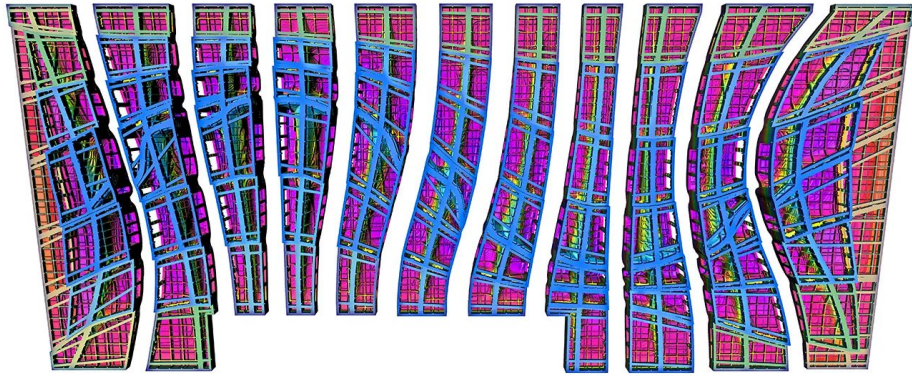
Şekil 4.29: Organik kafes destek yapısı: a) kolon yapısı, b) kolon üretimi [221].

3D yazıcı teknolojisi, inşaat sektörüne önemli yenilikler sunsa da kiriş üretiminde teknik zorluklar nedeniyle sınırlı uygulanmaktadır. Kirişlerin yatay üretim gereksinimi, kesme kuvvetleri ve yerçekimi etkisi nedeniyle destek veya kalıp ihtiyacı, üretim sürecini karmaşıktır. Bu sebeplerle doğrudan 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen kirişler nadiren kullanılmaktadır. Ancak, prekast sistemlerde 3D yazıcı teknolojisiyle kiriş üretimi mümkün olmuş ve belirli projelerde uygulanmıştır. Bir çalışmada, dikey olarak üretilen ve sonradan gerilim uygulanarak güçlendirilen beton kirişlerin yapısal performansı incelenmiştir. Ara katmanlarda kullanılan liflerle takviye edilen ve edilmeyen kirişler karşılaştırmalı olarak test edilmiş, lif takviyesi yük taşıma kapasitesini arttırdığı, kirişlerin deformasyon davranışını iyileştirdiği görülmüştür. Ancak, donatı ile beton arasındaki bağlantıyı sağlayan harcın yetersizliği, kesme dayanımında istenen performansın elde edilmesini sınırladığı belirtilmiştir. [222]. Bir diğer prekast kiriş üretimi örneğinde, beton elemanların düşük çekme dayanımı, prefabrik kiriş elemanlarının dış yüzeylerine çelik donatılar eklenerek giderilmiştir **Şekil 4.30**. Geometrik olarak optimize edilen bu elemanların, yük altındaki çeşitli testlerden sonra büyük açıklıkların geçilmesinde kullanılabileceği öngörülmektedir [223].

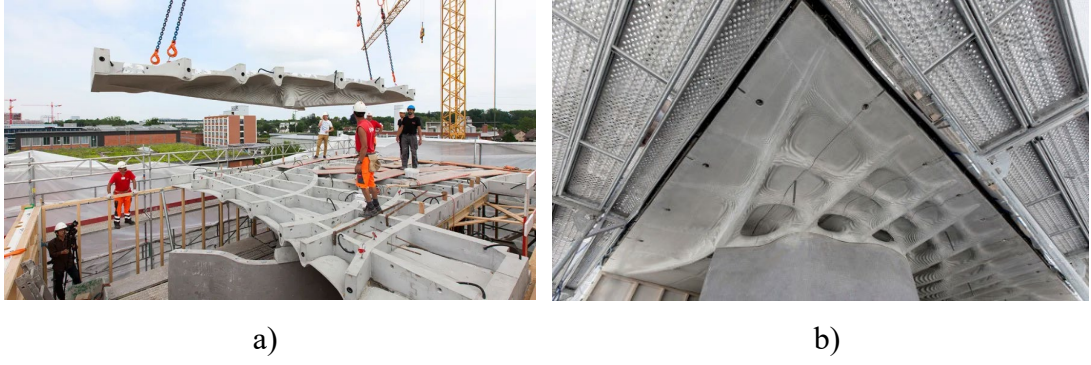


Şekil 4.30: 3D yazıcı teknolojiyle üretilmiş prekast kiriş [223].

3D yazıcı teknolojiyle döşeme üretimi, kirişlerde olduğu gibi yaygın bir kullanım alanına sahip değildir. Geleneksel betonarme döşemelerde çelik donatılar, çekme ve basınç yüklerini dengelemekte kritik bir rol oynarken, 3D yazıcı teknolojinin bu donatıları entegre etme potansiyeli sınırlı kalmıştır. Ayrıca, geniş yatay döşemelerde yerçekimi etkisiyle destek gereksinimi, mühendislik açısından önemli zorluklar yaratmaktadır. Bu nedenle, 3D yazıcı teknolojiyle üretilen yapılarda döşemeler genellikle geleneksel yöntemlerle üretilmektedir. Bununla birlikte, 3D yazıcıyla üretilen kalıpların kullanımı, döşeme inşasında yeni yöntemlerin geliştirilmesini sağlamıştır. Bu kalıplar, geleneksel yöntemlerin geometrik kısıtlamalarını aşarak serbest biçimli ve detaylı yüzeylerin oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Bir projede, 78 metrekarelik beton döşeme, sahada kolayca birleştirilebilecek şekilde 11 parçaya ayrılarak üretilmiştir **Şekil 4.31**. Elektrik, su ve yangın söndürme sistemleri, döşeme içine entegre edilerek şantiye montaj işlemleri büyük ölçüde kolaylaştırılmıştır **Şekil 4.32**. Prefabrikasyon sürecinde gerçekleştirilen bu entegrasyon, nakliye ve montaj sırasında yüksek hassasiyet sağlamış ve inşaat toleranslarını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür [224].



Şekil 4.31: Akıllı döşemenin 11 segmenti [224].



Şekil 4.32: Akıllı döşeme projesi: a) parçaların montaj aşaması, b) döşemede yer alan aydınlatma ve yangın söndürme sistemi [224].

3D yazıcı teknolojisi, özellikle duvar elemanlarının tasarım ve üretiminde önemli olanaklar sunmaktadır. Bu teknoloji ile üretilen duvarlar, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Taşıyıcı olmayan duvarlar genellikle mekânsal bölümlendirme amacıyla kullanılırken, taşıyıcı duvarlar yapısal yüklerin taşınmasında kritik bir rol oynar. Taşıyıcı duvarların üretiminde, kolonlarda olduğu gibi, 3D yazıcı teknolojisiyle öncelikle duvarın kalıbı oluşturulmaktadır. Daha sonra bu kalıbın içine uygun donatılar yerleştirilip beton dökülerek, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş taşıyıcı duvar elde edilmektedir. Bu yöntemin kullanıldığı bir örnek, Dubai'de bir ofis yapısında gerçekleştirilmiştir **Şekil 4.33**. 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen beton (3DPC) duvarlar üzerine yapılan bir çalışmada, taşıyıcı olmayan panellerin yangın performansı açısından boşluksuz, boşluklu ve boşluklu olup içi yalıtım malzemesiyle doldurulmuş paneller analiz edilmiştir. Sonuçlar, boşluksuz duvarların yapı kütlesini artırarak yalıtım performansını iyileştirdiğini, boşluklu duvarların ise yapı kütlesini azaltırken yalıtım performansını düşürdüğünü göstermiştir. İçi yalıtım malzemesiyle doldurulmuş boşluklu paneller ise hem yapı kütlesini azaltmış hem de yalıtım performansını artırarak daha iyi yalıtım özellikleri sağladığını görülmüştür [18].



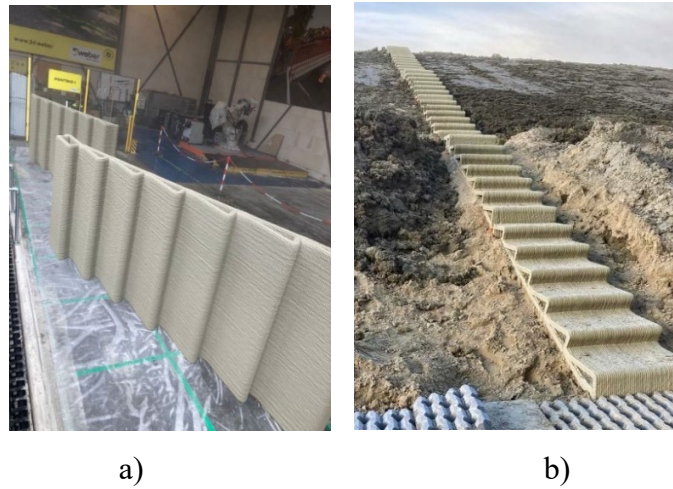
Şekil 4.33: Dubai’de üretilen bir ofis yapısının inşası [225].

3D yazıcı teknolojisiyle üretilen yapılarda, kapı ve pencere doğramalarının 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen örnekler sınırlı sayıda olup, genellikle projenin türüne ve kullanıcı tercihinine bağlı olarak geleneksel yöntemlerle üretilen Polyvinyl Chloride (PVC), ahşap veya alüminyum doğramalar kullanılmaktadır. Bu sistemde, kapı ve pencere boşlukları, üretim sürecinin bir parçası olarak önceden planlanmakta ve yazıcının çalışma sırasında bırakacağı boşluklar destek elemanları yardımıyla oluşturulmaktadır **Şekil 4.34** [225].

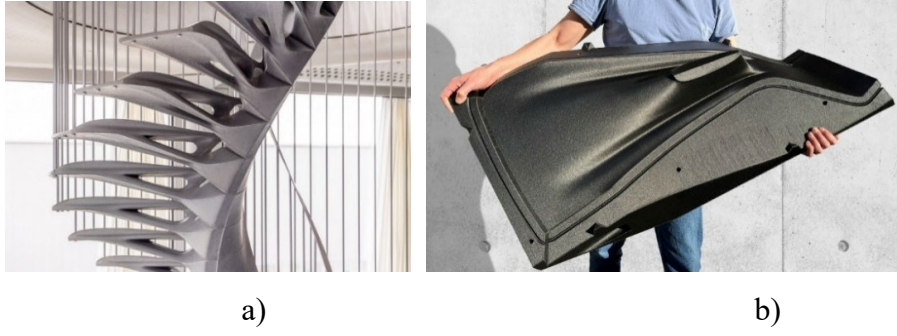


Şekil 4.34: Kapı yerlerinin oluşturulması [225].

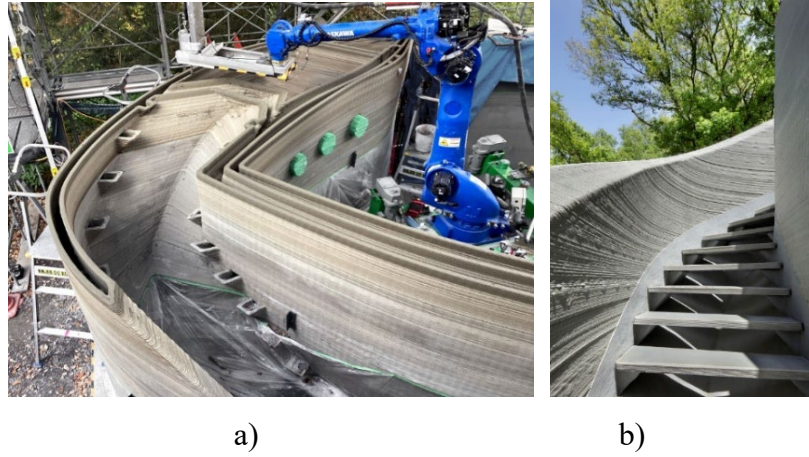
Merdivenler, kiriş ve döşemeler gibi yatay çalışan elemanlar arasında yer aldığından, doğrudan 3D yazıcı teknolojisiyle üretim yöntemiyle üretilmeleri teknik açıdan karmaşık bir süreç gerektirmektedir. Bu nedenle, merdiven üretiminde genellikle 3D yazıcı teknolojisiyle prefabrike olarak üretilen elemanlar, baskı kalıpları veya 3D yazıcıyla üretilen duvarlarda önceden tasarlanmış birleşim yerleri tercih edilmektedir. 3D yazıcı teknolojisiyle üretiminin merdiven yapımında kullanımına dair dikkat çeken bir örnek, 2022 yılında Hollanda’da özel bir beton harcı ve parametrik modelleme kullanılarak gerçekleştirilen bir projedir. Bu proje kapsamında, merdiven elemanları yatay pozisyonda 3D yazıcı teknolojisiyle üretim yöntemiyle üretilmiş ve eğimli doğal bir ortama tam uyum sağlayacak şekilde tasarlanmıştır **Şekil 4.35** [226]. Cadenza merdiveni ise, 16 prefabrike beton basamaktan oluşan yenilikçi bir yapıdır **Şekil 4.36a**. Spiral formda tasarlanan bu basamaklar, tek bir 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen basamak kalıbı kullanılarak üretilmiştir **Şekil 4.36b** [227]. Obayashi Tasarım Grubu tarafından geliştirilen "3dpod" projesinde ise, merdiven basamakları, taşıyıcı duvar elemanlarına entegre edilen özel pabuçlarla desteklenmiştir. Bu pabuçlar, merdiven basamaklarının yerleştirilmesine olanak tanıyacak şekilde, taşıyıcı duvarın 3D yazıcı teknolojisiyle üretim sürecinde oluşturulmuştur. Her bir merdiven basamağı kalıp şeklinde üretilerek, taşıyıcı duvar üzerindeki pabuçlara hassas bir şekilde yerleştirilerek montaj işlemi tamamlanmıştır **Şekil 4.37** [228]. Benzer bir çalışma, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen toprak duvar prototipine odaklanmıştır. Bu projede, merdiven basamakları üretim sırasında basılı duvar elemanına sabitlenmiştir **Şekil 4.38**.



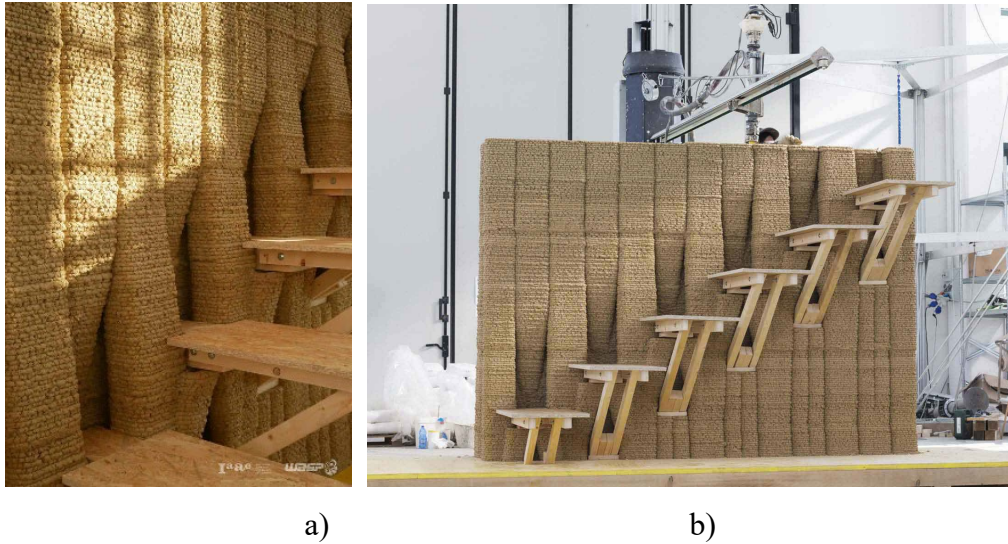
Şekil 4.35: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen merdiven: a) merdiven elemanı, b) merdivenlerin sahada yerleştirilmiş hali [226].



Şekil 4.36: Cadenza Merdiveni: a) beton merdiven, b) 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş basamak kalıbı [227].



Şekil 4.37: 3dpod projesi merdiveni: a) inşası, b) tamamlanmış merdiveni [228].



Şekil 4.38: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen gömülü merdivenli toprak duvar: a) basamak detayı, b) duvar prototipi [229].

3D yazıcı teknolojisiyle çatı elemanlarının üretimi, genellikle prefabrike, modüler veya hibrit yöntemlerle gerçekleştirilmekte olup, geniş açıklıklar ve karmaşık yapısal gereksinimler nedeniyle doğrudan üretim sınırlıdır. Çoğunlukla, 3D yazıcıyla

Üretilen duvarlara monte edilmek üzere prefabrike çatı elemanları tasarlanmaktadır. Örneğin, 3dpod yapısında çatı elemanı, elik liflerle güçlendirilmiş harç kullanılarak prefabrike bir bileşen olarak üretilmiş ve yüksek mukavemetli betonla kaplanarak bütünleşik bir kabuk yapısı oluşturulmuştur **şekil 4.39 [228]**. Alternatif bir yöntem olarak, çatı elemanı üretimlerinde hibrit yaklaşımlar yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, 3D yazıcıyla üretilen duvarlar, elik, ahşap veya prefabrike beton gibi geleneksel malzemelerden üretilmiş çatı elemanlarıyla desteklenmektedir **şekil 4.40, şekil 4.41**. Bazı yapılar ise, Tecla rneğinde olduğu gibi, çatı elemanlarını yapının bir parçası olarak bütünleşik şekilde tasarlanıp üretilmektedir **şekil 4.42**. Bu yaklaşım, çatının ayrı bir eleman olarak üretilip monte edilmesi yerine, duvarlarla birlikte basılarak yapının entegre bir parçası haline gelmesini sağlar. Bütünleşik tasarımlarda, çatı genellikle organik bir formda tasarlanarak yük taşıma ve yalıtım gereksinimlerini karşılar. atı elemanı, duvarlarla kesintisiz bir bağlantı oluşturarak ek montaj ihtiyacını ortadan kaldırır ve yapıyı daha dayanıklı hale getirir Bütünleşik atı tasarımı, özellikle küçük ölçekli konut projelerinde veya minimal tasarıma sahip yapılarda etkili bir çözüm sunmaktadır **[230]**.



a)



b)

şekil 4.39: 3dpod projesi çatısı: a) içten görünümü, b) birleşim detayı **[228]**.



Şekil 4.40: Ahşap çatı uygulaması [231].



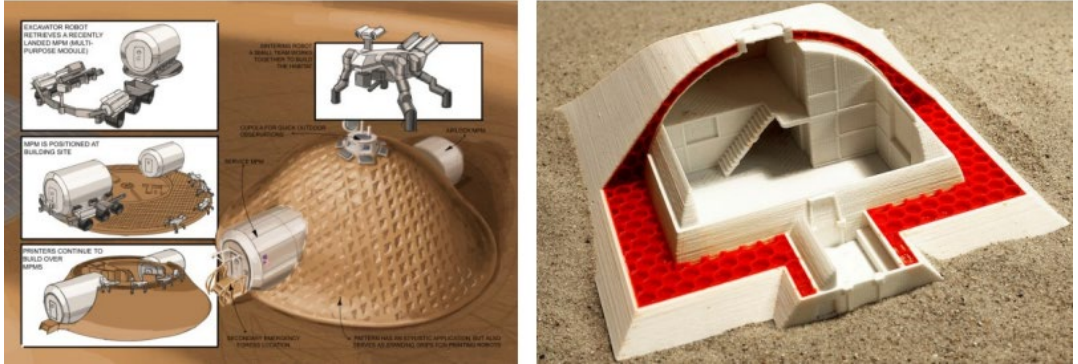
Şekil 4.41: Çelik çatı uygulaması [232].



Şekil 4.42: Kabuk yapı uygulaması [230].

4.4. Yapı Üretiminde Üç Boyutlu Yazıcı Kullanımı

Üç boyutlu yazıcı teknolojisiyle üretilen yapılar, bireysel konutlardan toplu barınma projelerine, ticari ve kamu binalarına kadar uzanan yenilikçi ve sürdürülebilir tasarımları içermektedir. 3D yazıcı teknolojisinin barınma ihtiyacına yönelik ilk uygulamaları bilimsel çalışmalarda başlamış olup, bu alandaki öncü projelerden biri NASA tarafından yürütülmüştür. Güney Kaliforniya Üniversitesi'nden Dr. Behrokh Khoshnevis, geliştirdiği yenilikçi teknolojilerle, kısa sürede mimari yapıların yazdırılmasını mümkün hale getirerek bu sürece önemli katkılar sağlamış ve NASA'nın yapı üretiminde 3D yazıcı kullanımına yönelik ilk adımlarına zemin hazırlamıştır [6]. Ay ve Mars gibi gök cisimlerinde kurulacak kolonilerde, dünyada üretilmiş modüllerin taşınması yerine yerel toprak malzemeleriyle yüzeyde yapı üretimi veya yeraltı yapıların inşası planlanmaktadır. Bu doğrultuda, NASA tarafından çeşitli yarışmalar düzenlemekte ve bu alanda yoğun araştırmalar yürütülmektedir **Şekil 4.43** [26], [233].



Şekil 4.43: NASA'nın açtığı proje yarışmalara katılan proje örnekleri [26] .

İlk yapı denemeleri, 2015 yılında WinSun inşaat firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Firma, Çin'in Suzhou şehrinde 24 saat içinde 10 adet villa inşa etmiş ve devasa boyutlarda, 6,6 metre yüksekliğinde, 10 metre genişliğinde ve 32 metre uzunluğundaki bir 3D yazıcı kullanarak prefabrik yapı elemanlarını katmanlar halinde basmıştır **Şekil 4.44**. Bu projede, geri dönüştürülmüş inşaat atıkları, cam elyaf ve özel beton karışımı gibi sürdürülebilir ve düşük maliyetli malzemeler kullanılmıştır [234]. Duvar baskısı bir gün sürmüştür; üç işçi ve bir vinç yardımıyla yapılar üç gün içinde tamamlanmıştır. Boşluklu olarak tasarlanan duvarlara yalıtım malzemeleri eklenerek enerji tasarrufu, malzeme verimliliği ve çevre koruma sağlanmıştır. Binalar, betonarme yapı standartlarına uygun şekilde, geleneksel giriş,

döşeme ve kolon tasarımlarına entegre edilmiştir [235]. Başarılı yapı üretimlerinin ardından WinSun inşaat firması, 2015 yılında 5 katlı ve toplamda 1.100 metrekare (m²) büyüklüğünde bir apartman inşa etmeyi başarmıştır **Şekil 4.45**. Bu yapı, 3D yazıcı ile üretilmiş ilk çok katlı yapı olarak kaydedilmiş ve 3D yazıcı teknolojisinin daha büyük ve karmaşık yapıların inşasında da uygulanabilir olduğunu göstermiştir [234].



a)



b)



c)

Şekil 4.44: Winsun 3D villa: a) ön cephesi, b) yan cephesi, c) prefabrike üretimi [234].



a)



b)

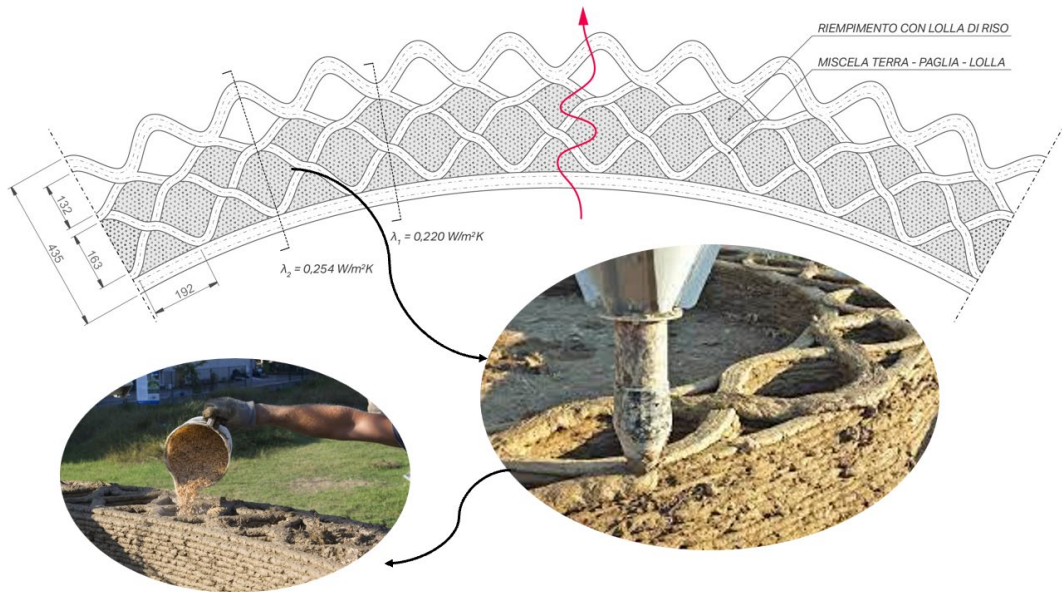


c)

Şekil 4.45: Winsun 5 katlı apartman yapısı: a) yapının inşa hali, b) yapının

tamamlanmış hali, c) yapının merdiveni [234].

2018 yılına World's Advanced Saving Project (WASP) firması tarafından üretilen 3D yazıcı teknolojisiyle konut örnekleri arasında yer alan “GAIA”, enerji verimliliği ve iç mekân sağlığı açısından yüksek performans sunan ve neredeyse sıfır çevresel etkiye sahip bir yapı modülü olarak öne çıkmaktadır. Yapının tasarımı, yaz ve kış aylarında iç mekânda doğal olarak dengeli bir sıcaklık sağlayarak ısıtma veya soğutma sistemlerine ihtiyaç duymayacak şekilde optimize edilmiştir. İnşasında kullanılan malzeme bileşimi sahadan alınan toprak, pirinç samanı, pirinç kabuğu ve hidrolik kireçten oluşan bir karışımdan meydana gelmiştir **Şekil 4.46**. Yapının enerji performansını artırmak amacıyla kireç ve saman izolasyonuna sahip ahşap çatı kullanılmıştır. İç mekân yüzeyleri, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen monolitik duvarların üzerine uygulanan tıraşlanmış kil ile sıvalanmış ve yüzeyler keten tohumu yağı ile kaplanarak korunmuştur **Şekil 4.47**. 3D yazıcı teknolojisiyle üretim, 40 santimetre kalınlığında ve toplam 30 m²'lik bir duvar yapısının 10 gün içerisinde tamamlanmasına olanak tanımıştır GAIA, bir hektarlık çeltik tarlasından 100 m²'lik bir yapı alanı üretme potansiyelini ortaya koymaktadır [236].



Şekil 4.46: GAIA Evi Üretim Prensibi ve Kullanılan Malzemeler [236].



a)



b)

Şekil 4.47: GAIA Evi: a) dıştan görünümü, b) iç mekânı [236].

“BioHome3D”, tamamen biyolojik bazlı ve geri dönüştürülebilir malzemeler kullanılarak üretilmiş, dünyadaki ilk %100 biyolojik bazlı 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş evdir **Şekil 4.48**. Maine Üniversitesi İleri Yapılar ve Kompozitler Merkezi tarafından geliştirilen bu yenilikçi yapıda, yerel olarak temin edilen ahşap lifleri ve biyolojik reçineler kullanılmış, bu malzemeler çevresel etkiyi en aza indirmek ve kullanım ömrü sonunda geri kazanımı sağlamak için seçilmiştir. Evin tüm bileşenleri, dünyanın en büyük polimer 3D yazıcısı kullanılarak tek bir üretim sürecinde basılmış, bu da inşaat süresini ve işçilik maliyetlerini önemli ölçüde azaltmıştır. Yapının yalıtımı, ahşap lifi izolasyonu ve püskürtme selüloz izolasyonu kombinasyonu ile sağlanmış ve enerji verimliliği artırılmıştır [237].



a)

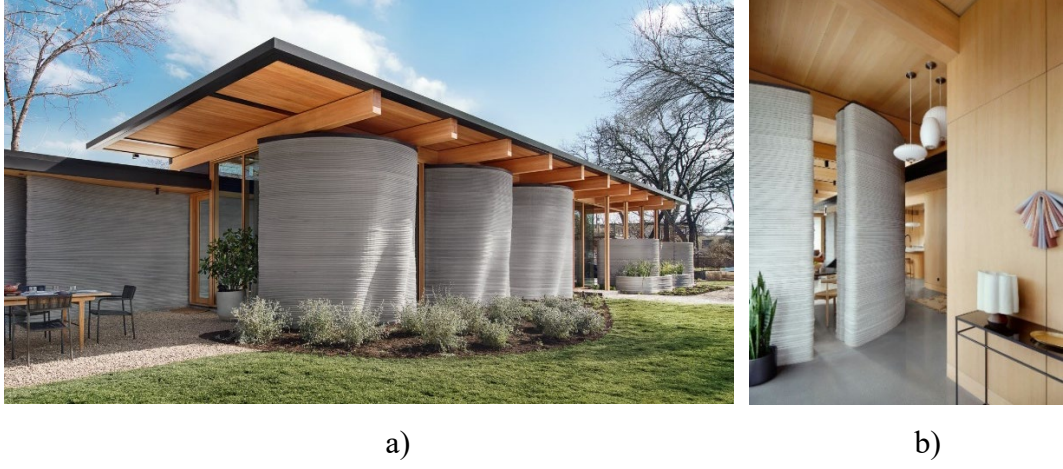


b)

Şekil 4.48: BioHome3D: a) yapının üretimi, b) tamamlanmış yapı [236].

“House Zero”, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş yenilikçi bir konut prototipidir. Austin, Teksas’ta yer alan yapı, 186 m²’lik ana ev ve 32,5 m²’lik ek bir birimden oluşmaktadır. İnşasında çimento bazlı harç, çelik takviyeler ve yalıtım katmanları kullanılmıştır. Duvarlar, iki haftadan kısa bir sürede 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş, böylece zaman, malzeme ve maliyet tasarrufu sağlanmıştır [231]. House Zero, enerji verimli ve biyofilik tasarım ilkelerine uygun olarak geliştirilmiştir.

Kavisli duvarlar, yapısal verimliliği artırırken, yuvarlatılmış köşeler doğal hareket akışları ve daha konforlu iç mekânlar sunmaktadır **Şekil 4.49** [231].



Şekil 4.49: House Zero: a) dıştan görünüm, b) içten görünüm [231].

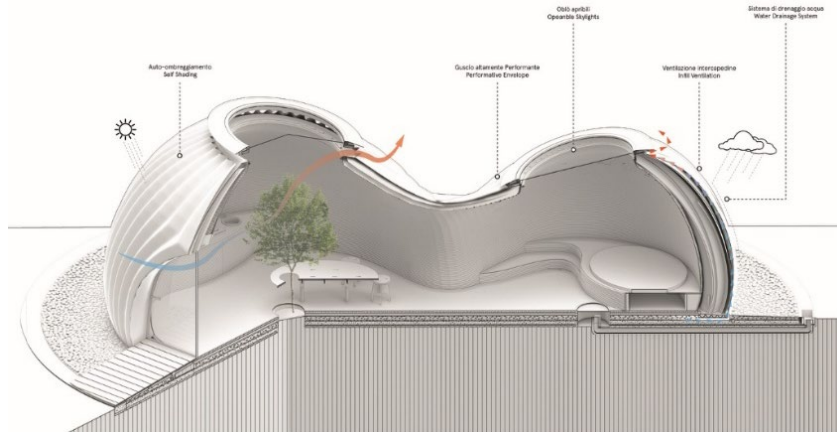
“TECLA”, toplumsal fayda amacıyla tasarlanmış ve 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen bir eko-sürdürülebilir konut prototipidir. Yerel kaynaklardan elde edilen geri dönüştürülebilir ve yeniden kullanılabilir malzemelerle inşa edilen yapı, düşük karbon salınımına sahip çevre dostu bir model olarak öne çıkmaktadır. Proje, yerel nehir yatağından elde edilen ham toprak malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir [238], [239]. TECLA’nın duvarları, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş 350 katmandan oluşan nervürlü kil formlarından ve çift kubbeli bir tasarımdan oluşmaktadır. **Şekil 4.50**. Duvarların kalın yapısı, yalıtım ve havalandırmayı destekleyen bir termal bariyer görevi görmektedir **Şekil 4.51**. Duvar dolguları, yerel iklim koşullarına uyum sağlayacak şekilde düzenlenmiş, böylece farklı coğrafyalara uygun bir tasarım yaklaşımı benimsenmiştir [238]. Yapı, 4,2 metre yüksekliğinde ve 60 m² büyüklüğünde bir yaşam alanına sahiptir. Tasarımı ve baskı süreci boyunca herhangi bir iskeleye ihtiyaç duyulmayan TECLA, 200 saatlik baskı süresinde 60 m³ doğal malzeme kullanılarak üretilmiştir. Firma ekibine göre, TECLA, düşük gelirli topluluklar veya küresel acil durumlar için seri üretilebilecek yeşil barınma çözümleri geliştirilmesi açısından büyük bir potansiyele sahiptir **Şekil 4.52** [238].



a)

b)

Şekil 4.50: TECLA: a) ev prototipi, b) duvar yapısı [238].



Şekil 4.51: TECLA'nın havalandırma şeması [230].



Şekil 4.52: TECLA ile üretilebilecek eko-habitatların şeması [230].

“Housing 05”, 2018 Milano Tasarım Haftası’nda sergilenen ve 3D yazıcı teknolojisiyle sürdürülebilir mimaride üretim potansiyelini araştıran yenilikçi bir sosyal konut projesidir. Piazza Cesare Beccaria’da yerinde üretilen, 100 m² alana sahip yapı; oturma odası, yatak odası, mutfak, banyo ve teraslı çatı gibi işlevsel

alanlardan oluşmaktadır. Ana malzeme olarak beton kompozit kullanılan yapı, doğal bitkilerin büyüyebileceği yüzeyler oluşturarak çatıda kentsel bahçe konsepti sunmaktadır **Şekil 4.53**. Bunun yanı sıra, Housing 05, barınma ihtiyacı olan topluluklar için ekonomik çözümler sunmayı hedeflemekte ve afet bölgelerinde hızlı barınma birimleri üretimi için bir model olarak öngörülmektedir [240].



Şekil 4.53: Housing 05: a) yapısının planı, b) bahçe konsepti [241].

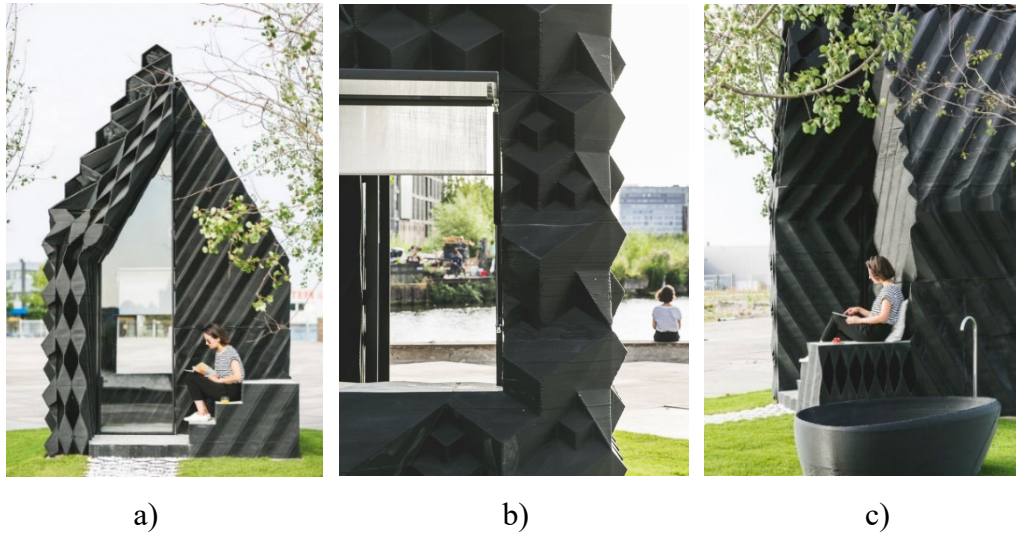
Yüzen ev (Floating House) olarak tasarlanan “Prvok”, Çek Cumhuriyeti’nden bir tasarım ekibi tarafından 3D yazıcı teknolojisiyle geliştirilen bir yapı prototipidir. Kara ve su üzerinde kullanılabilen tasarımı, farklı yaşam ortamlarına uyum sağlama esnekliği sunmaktadır **Şekil 4.54**. Robotik kol ile 32 saatte basılan yapı, yaklaşık 43 m² yaşam alanında yatak odası, mutfaklı oturma odası ve banyodan oluşmaktadır. Dayanıklılığı artırılmış özel bir beton karışımı kullanılarak 100 yıl sağlam kalacak şekilde tasarlanmıştır [242].



Şekil 4.54: Floating House: a) üretim aşaması, b) yapının su üstündeki hali [242].

Kamusal alanlarda 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen yapılara örnek bir çalışma olan “Urban Cabin” projesi, Amsterdam’ın merkezinde inşa edilen küçük bir inziva evi

olarak tasarlanmıştır **Şekil 4.55a**. 3D yazıcı teknolojiyle üretimin afet yardımı ve geçici işlevsel konut projeleri için sunduğu potansiyeli göstermeyi hedefleyen bu proje, insanlara sahil ve gün batımının keyfini çıkarabilecekleri bir alan sağlayarak bireysel mahremiyet ve sosyal alanların yeniden düşünülmesini amaçlamaktadır. Yapı, tamamen siyah renkli biyoplastik malzeme ile 3D yazıcı teknolojiyle üretilmiş olup, tasarımda farklı cephe süslemeleri, form optimizasyon teknikleri ve yalıtım ile malzeme tüketimini azaltan akıllı çözümler sergilenmiştir **Şekil 4.55b**. Zemin ve basamaklar, beton bir kaplama ile tamamlanmıştır. Ayrıca, dış mekânda estetik obje amaçlı yer alan bir küvet 3D yazıcı teknolojiyle üretilmiştir. **Şekil 4.55c** [243] .



Şekil 4.55: Urban Cabin: a) yapısı, b) cephe doğraması, c) dış mekân küveti [243].

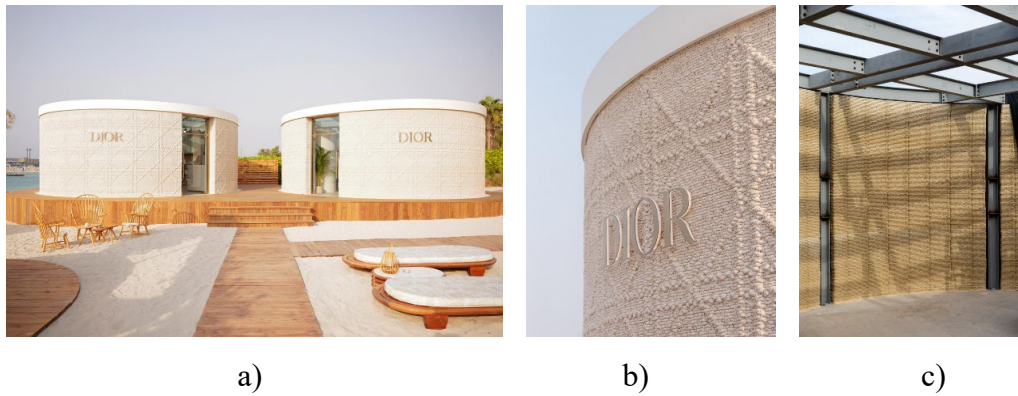
Kamusal alanlarda 3D yazıcı teknolojisinin bir diğer dikkat çeken uygulaması köprülerdir. 3D yazıcı teknolojiyle üretilen köprüler hem mühendislik hem de tasarım açısından yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu köprüler, genellikle sürdürülebilir malzemeler kullanılarak çevresel etkiyi azaltmayı hedeflerken, üretim sürecinde hız ve maliyet avantajı sağlamaktadır. Özellikle şehir içi yaya trafiğine yönelik estetik ve işlevsel tasarımlar, 3D yazıcı teknolojiyle yapı üretiminin potansiyelini göstermektedir. İtalya’da WASP inşaat firması tarafından 3D yazıcı teknolojiyle inşa edilen ilk köprü olan "Da Vinci's Bridge", Leonardo da Vinci’nin Haliç için tasarladığı kendi kendini destekleyen köprü konseptinden esinlenerek tasarlanmıştır **Şekil 4.56a**. Yaklaşık 6 metre açıklığa sahip bu yaya köprüsü üretiminde mermer atıklarından elde edilen taş tozları ve kireç bazlı bir bağlayıcı içeren düşük çevresel etkiye sahip özel bir harç kullanılmıştır. Kendi kendini

destekleyebilme özelliğine sahip olan bu köprü, 3D yazıcıyla üretilen 13 bloktan oluşturulmuş ve bloklar geçici kalıp sistemleriyle birleştirilmiştir. **Şekil 4.56b [244].**



Şekil 4.56: Da Vinci's Bridge: a) köprü yapısı, b) inşası [244].

WASP ve Dior iş birliğiyle Dubai'nin Jumeirah Plajı'nda inşa edilen, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen geçici perakende mağaza, ticari yapılarda bu teknolojinin kullanımına yönelik yenilikçi bir örnek sunmaktadır. İki dairesel modülden oluşan yapı, doğal malzemelerle tasarlanmış ve ilk kez dijital bir terzi gibi işlev gören yaşanabilir bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Mağazanın duvarlarında Dior'un ikonik cannage motifi, 3D yazıcı teknolojisiyle dikkat çekici bir şekilde uygulanmıştır **Şekil 4.57**. Yapının üretiminde, Crane WASP adlı büyük ölçekli 3D yazıcı teknolojisi kullanılmış ve malzeme olarak kil, kum ve doğal liflerden oluşan bir karışım tercih edilmiştir. Çatısı, 3D baskılı duvarlarla uyumlu çelik bir sistemden oluşmaktadır. Bu projede, 3D yazıcı teknolojisinin sadece yenilikçi tasarımlar yaratmak için değil, aynı zamanda moda ve mimariyi birleştirerek markaların hikâyelerini anlatabilecekleri platformlar oluşturma potansiyelini de ortaya koymaya çalışılmıştır [245].



Şekil 4.57: 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen mağaza: a) yapısı, b) duvar işlenen Cannage motifi, c) çelik çatı detayı [245].

İncelenen yapı örneklerinde, 3D yazıcı teknolojisiyle yapı üretimi, geri dönüştürülebilir malzemeler ve yerel kaynakları kullanarak çevresel etkileri azaltmakta, geleneksel yöntemlere kıyasla daha az iş gücü ve enerji gerektirdiği için inşaat süreçlerini hızlandırdığı görülmektedir. Bu teknoloji, hızlı barınma çözümleri sağlamada önemli bir potansiyele sahip olup, aynı zamanda uzayda yapı üretimi gibi geleceğe yönelik projelerde kritik bir araç olarak değerlendirilmiştir.

5. ALAN ÇALIŞMASI: İSTON ÜÇ BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİSİ UYGULAMALARI

Üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojisi, uluslararası alanda yapı sektöründe hızla gelişmekte ve çeşitli uygulama alanlarıyla yaygınlaşmaktadır. Türkiye’de de bu teknolojiyle üretim yapılmaya başlanmış ve önemli ilerlemeler kaydedilmiştir.

5.1. Çalışma ve Alanın Tanımı

İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları (İSTON) San. ve Tic. A.Ş., Türkiye’de 3D yazıcı teknolojisiyle beton üretimini gerçekleştiren öncü kuruluşlardan biridir. Tez çalışmasının amacı doğrultusunda, 3D yazıcı teknolojisinin yapı malzemesi, yapı bileşeni, yapı elemanı ve yapı üretimi açısından yapı sektöründeki potansiyelini belirlemek için İSTON’un Tuzla tesislerinde bir alan çalışması gerçekleştirilmiştir **Şekil 5.1**. İSTON’un Tuzla tesislerinde 2023 Nisan ayında gerçekleştirilen alan çalışması kapsamında, üretim süreçleri ve 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen örnek ürünler yerinde incelenmiştir. Bu çalışma sırasında, firmanın Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) Direktörü ve aynı zamanda Kimya Mühendisi olan uzman ile projelerin tasarım ve çiziminde rol alan Mimar çalışanıyla, Ek-A’da belirtilen röportaj sorularına dayalı görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Görüşmelerde, 3D baskı tekniğinin tasarım ve üretim süreçlerindeki rolü, kullanılan malzemelerin geliştirilme süreçleri, sürdürülebilirlik unsurları, maliyet analizi, nitelikli iş gücü ihtiyacı, üretim süresi, yapıların boyut ve yükseklik sınırları gibi teknik konular ele alınmıştır.



a)



b)

Şekil 5.1: İSTON Tuzla tesisi: a) üretim alanı, b) örnek üretimler [246].

5.2. Kullanılan Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi ve Yapı Malzemesi

3D yazıcı teknolojisiyle üretim süreçlerinde, tasarım ve modelleme aşamalarında “Rhinoceros 3D” adlı yazılım kullanılmaktadır. Tasarım çizimleri, daha sonra 3D yazıcının kendi bilgisayar destekli üretim (CAM) programına aktarılmaktadır. Bu aşamada, üretim simülasyonları gerçekleştirilmekte ve sonuçlar kontrol edilmektedir. Ancak, kullanılan yazılımın, diğer 3D yazıcılarda kullanılan programlardan farklı olarak destek yapıların nereye yerleştirileceği gibi bilgileri sağlamadığı ifade edilmiştir. Destekler, üretim sırasında ihtiyaçlara göre manuel olarak işçiler tarafından yerleştirilmektedir **Şekil 5.2**. Bunun yanı sıra, yazılımın kullanılan beton harcının kıvamını ve kalitesini tespit edemediği, bu nedenle 3D yazıcının sadece "belirli bir şekilde, kalınlıkta ve yükseklik baskı al" gibi komutlarla çalıştığı belirtilmiştir. Üretim sürecinde ortaya çıkabilecek olası hatalar veya uyarılar yazılım tarafından sağlanmamakta, bu tür sorunlar genellikle deneyim ve gözlem yoluyla tespit edilmektedir.



Şekil 5.2: Üretim sırasında eklenen destek yapısı [246].

İSTON’un geliştirdiği 3D yazıcı, 6 eksenli bir robotik kola sahip olup, paletli yürüyen bir mekanizma ile mobil hale getirilmiştir **Şekil 5.3**. 3D mobil yazıcı, taşınabilirlik ve esneklik gibi faydalar sunmakta ve 4 ayaklı kartezyen sistemde (x, y, z eksenlerinde hareket eden) çalışan klasik 3D yazıcılardan farklı olarak, herhangi bir

sabit baskı alanı kısıtlaması olmaksızın hareket edebilmesini sağlamaktadır. Bu yazıcı ile, tek seferde en fazla 3 metre yüksekliğe ve 4,5 metre genişliğe sahip yapıların üretimini gerçekleştirebilmektedir. Ancak, estetik açıdan bazı sınırlamaları bulunduğu, özellikle parça parça üretim sırasında birleşim detaylarının oluştuğu ve bu durumun yapının bütünlüğünü etkileyebileceği belirtilmiştir.

3D mobil yazıcı, bir kumanda aracılığıyla kontrol edilmekte olup, bellek üzerinde yüklü programları kullanarak çalışmaktadır. Kumanda üzerinden, yazıcıyı başlangıç konumuna getirme, üretim sürecini başlatma ve tamamlanan ürünün ardından bitiş programını uygulama gibi temel yönlendirme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, teknik elemanın 3D yazıcının kumanda işlemlerini doğru bir şekilde yönetme ve hareketleri kontrol etme konusunda yetkin olmaları gerekmektedir. Teknik elemanın, bu teknolojiyi etkin bir şekilde kullanabilmesi için özel eğitimlere tabi tutulmaktadır. Bu eğitimler, üretim sürecinin sorunsuz bir şekilde ilerlemesi ve verimliliğin artırılması açısından kritik önem taşımaktadır.



Şekil 5.3: İSTON tarafından geliştirilen 3D mobil yazıcı [246].

3D yazıcı teknolojisiyle üretimde, İSTON tarafından geliştirilen beton, geleneksel üretim tekniğinde kullanılan betona göre daha katı kıvamda hazırlanmakta ve 3D yazıcı aracılığıyla katmanlar halinde uygulanarak kısa sürede sertleşip kendi ağırlığını taşıyabilecek mukavemete ulaşmaktadır **Şekil 5.4**. Mevcut durumda, 3D yazıcı teknolojisiyle inşa edilen beton yapılar için özel bir yönetmelik bulunmadığı belirtilmiştir. Bu nedenle, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen yapıların statik hesaplamaları, betonarme yapılar için geliştirilmiş mevcut yönetmelikler esas alınarak yapılmaktadır.

Başlangıçta, güvenlik gereksinimlerini karşılamak ve yapısal dayanımı garanti altına almak amacıyla 50-60 MPa basınç dayanımına sahip C50 ve C60 sınıfı betonlar tercih edilmiştir. Ancak, bu beton sınıflarının çimento oranının yüksek olması hem maliyet hem de çevresel etkiler açısından olumsuz sonuçlar doğurmuştur. 3D yazıcı teknolojisiyle üretimde kullanılan beton malzeme ile geleneksel üretim tekniğinde kullanılan betonun karbon ayak izi karşılaştırıldığında, betonun daha katı kıvamda hazırlanması için daha fazla çimento kullanılması gerektiği görülmektedir. Bu durum, 3D yazıcı teknolojisiyle üretimde karbon ayak izini olumsuz yönde etkileyen bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) çalışmaları kapsamında, daha sürdürülebilir ve ekonomik bir malzeme geliştirilmesine yönelik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 30 MPa basınç dayanımına sahip C30 sınıfı beton hem çevresel sürdürülebilirliği sağlamak hem de daha ekonomik olması ve betonarme yapıların üretiminde yaygın olarak kullanılan bir malzeme olması sebebiyle tercih edilmeye başlanmıştır. Ancak, C30 beton ile üretilen yapılarda zamanla ufak çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu sorunun çözülmesi amacıyla beton karışımına 3 santimetre boyutunda propilen makro lifler ve 1,2 santimetre boyutunda propilen mikro lifler eklenmiştir. Lif katkıları, beton yüzeyinde kıl benzeri çıkıntıların oluşmasına neden olsa da malzemenin dayanıklılığını önemli ölçüde artırmış; böylece C30 beton, C50 sınıfına yakın dayanım özellikleri kazanmıştır. Ayrıca, bu yöntemle betonun eğilme ve çekme dayanımı da iyileştirilmiştir. Bu durum, betonun dayanıklılık özelliklerinin hem maliyet hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından optimize edilebileceğini ve farklı malzeme bileşimleriyle geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır.



a)



b)

Şekil 5.4: Malzemenin hazırlanması ve üretim aşaması: a) betonun hazırlanması, b) 3D mobil yazıcı ile kolon üretimi [246].

3D yazıcı ile beton üretiminde kullanılan malzemelerin doğaya karışabilmesi, betonun bileşimindeki maddelere bağlıdır. Geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılan beton gibi, 3D yazıcıyla üretilen betonun da doğrudan doğaya karışması oldukça zordur. Ancak, yapı ömrünü tamamlandıktan sonra beton uygun işlemlerden geçirilerek yeniden agrega olarak kullanılabilir. Geri dönüştürülmüş agregaların doğal agregalara kıyasla daha düşük mekanik dayanım ve yüksek su emme kapasitesine sahip olması, betonun dayanıklılık özelliklerini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca, bu agregaların yüzeylerindeki eski çimento kalıntıları bağlanma performansını zayıflatırken, kalite kontrol süreçlerini zorlaştırdığı, kimyasal reaksiyonlara yatkınlıkları ve fiziksel bozulma riskleri ise uzun vadeli dayanıklılık için ek önlemler gerektirdiği ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra, geri dönüştürülmüş agregaların işlenmesi için gerekli enerji ve maliyetler ekonomik verimliliği azalttığı görülmüştür. Bu nedenlerle, geri dönüştürülmüş agregaların kullanıldığı betonun, yapı ve eleman üretiminde tercih edilmediği görülmüştür. Ancak, geri dönüştürülmüş agregaların mekanik dayanımın ön planda olmadığı kent mobilyaları gibi uygulamalarda kullanılabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, betonda kimyasalların dozajının doğru ayarlanmaması durumunda betonun mekanik dayanımında düşüşler, priz süresinde dengesizlikler ve çatlama gibi sorunlar meydana gelebileceği ifade edilmiştir. Bu tür etkilerin önüne geçebilmek için doğru

formülasyonların seçilmesi, kalite kontrol süreçlerinin titizlikle uygulanması ve çevre dostu kimyasalların tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

5.3. Yapı Bileşeni ve Yapı Elemanı Üretimi

İSTON, 3D yazıcı teknolojiyle prefabrike ve yerinde üretim yöntemlerini kullanarak yapıyı bileşenlerine ayırarak veya yapı elemanlarını ayrı ayrı üretebilmektedir **Şekil 5.5**. Prefabrike üretimde, yapı bileşenleri veya elemanları üretim tesisinde imal edilmekte ve montaj işlemleri için gerekli bağlantı noktalarıyla birlikte şantiyeye sevk edilmektedir **Şekil 5.6**. Yerinde üretim yönteminde ise 3D yazıcı, doğrudan inşaat alanında çalışarak yapı bileşenlerini veya elemanlarını yerinde oluşturmaktadır. Bu esnek üretim yöntemleri, 3D yazıcı teknolojisinin farklı tasarım ve uygulama ihtiyaçlarına etkin bir şekilde uyum sağlamasına olanak tanımaktadır.



a)



b)

Şekil 5.5: Prefabrike üretilmiş pergola yapıları: a) bileşenlerine ayrılmış pergola, b) yapı elemanları ayrı ayrı üretilmiş pergola [246].



Şekil 5.6: Montaj için tasarlanmış duvar içinde yer alan bağlantı yeri [246].

Tesiste incelenen örnek yapılarda, temel sistemlerinin henüz 3D baskı yöntemiyle üretilmediği gözlemlenmiştir **Şekil 5.7**. Temel sistemi olarak genellikle, zemin üzerindeki yükleri homojen bir şekilde dağıtarak yapısal stabiliteyi artırdığı için radye temel tercih edilmekte olup, bu sistemlerin geleneksel yöntemlerle inşa edildiği tespit edilmiştir. Bu durumun başlıca nedenleri arasında, taşıyıcı döşemelerin gerektirdiği yüksek çekme dayanımını sağlayabilecek malzeme sınırlamaları ve çelik donatıların entegrasyonundaki teknik zorluklar bulunduğu ifade edilmiştir.



Şekil 5.7: 3D yazıcı teknolojisiyle yapı üretimi öncesinde oluşturulan temel [247].

3D yazıcı teknolojisiyle üretilen kolonlar, kolon kalıplarının oluşturulması ve bu kalıpların içerisine ihtiyaca göre belirlenen donatı kafesi yerleştirilip beton ile doldurulmasıyla, geleneksel betonarme yapı üretimine benzer bir sistem sunmaktadır **Şekil 5.8**. Bu yöntemde, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen kolonun dış yüzeyi kalıcı kalıp işlevi görerek üretim sürecini kolaylaştırmakta ve geleneksel kalıp kullanımını ortadan kaldırarak yapısal atık oluşumunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Bununla birlikte, bu üretim sisteminde geleneksel betonarme üretimden farklı olarak, tek katlı olarak inşa edilen yapılarda kiriş elemanının kullanılmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, 3D yazıcı teknolojinin tasarım ve üretim süreçlerindeki yeni bir yaklaşımı yansıtmaktadır.



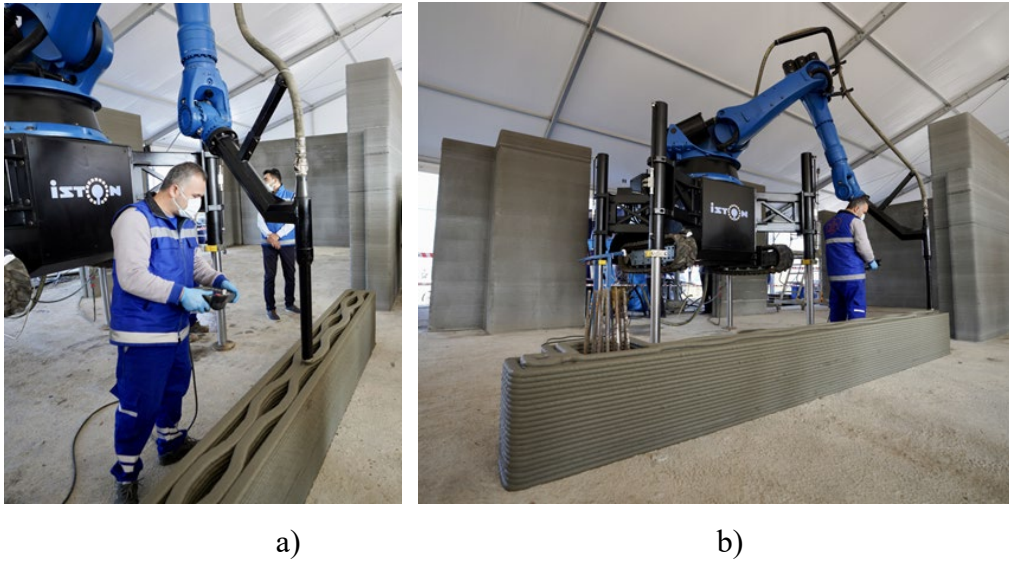
Şekil 5.8: 3D yazıcı teknolojiyle üretilen kolon [246].

3D yazıcı teknolojiyle üretilen duvarlar, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan duvar şeklinde üretilabilmektedir. Taşıyıcı olmayan duvarlar, içi boşluklu bir yapıya sahip istenilen tasarımda üretilabilmektedir **Şekil 5.9**. Bu tür duvarlar, yapıların mahal bölümlendirilmesinde veya kentsel alanlarda duvar yapısı olarak üretilmektedir. Duvarların içindeki boşluklar, hem duvar kütlesini azaltarak taşıma maliyetlerini düşürmekte hem de ısı ve ses yalıtımı gibi performans kriterlerini iyileştirmektedir. Proje gereksinimlerine bağlı olarak, bu boşluklar beton veya yalıtım malzemesi ile doldurulabilmektedir.



Şekil 5.9: 3D yazıcı teknolojiyle üretilen taşıyıcı olmayan duvar [246].

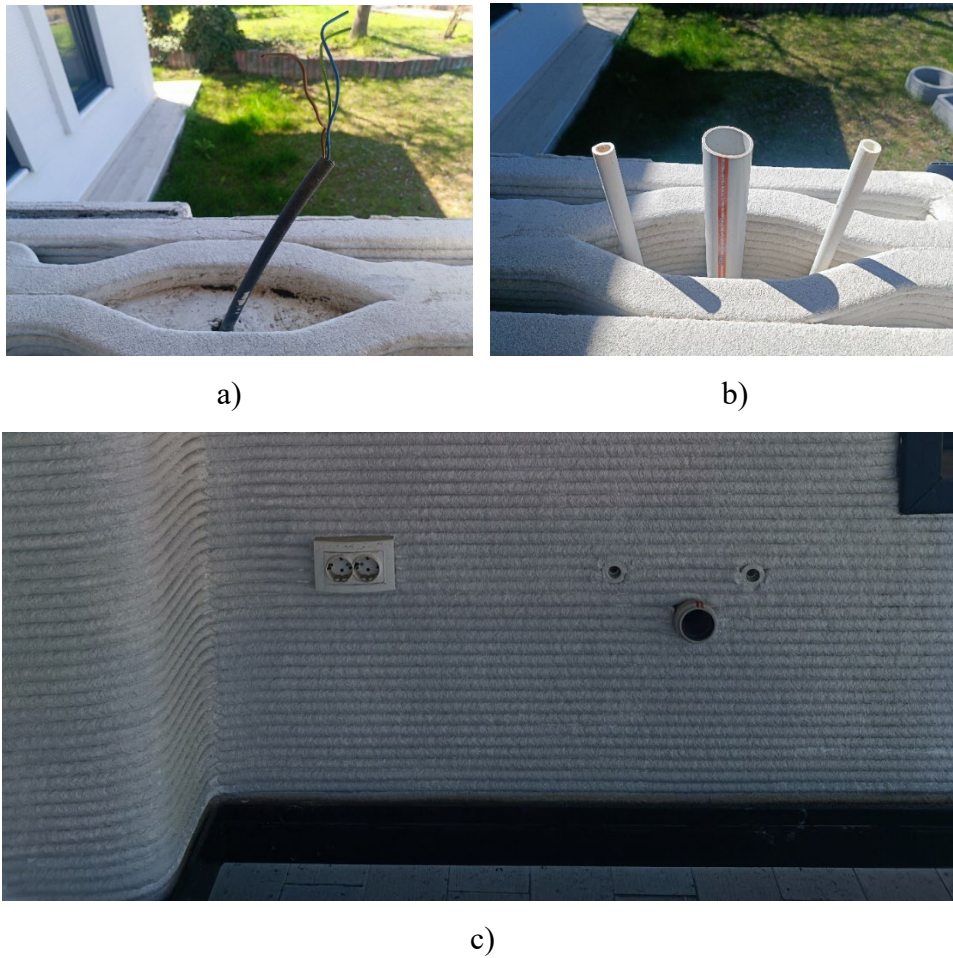
Taşıyıcı duvarlar, taşıyıcı olmayan duvarlara kıyasla daha karmaşık bir tasarım ve üretim yaklaşımı gerektirmektedir. Bu duvarlar, yapı yüklerini taşımak üzere özel olarak tasarlandıktan sonra, dış ve iç katmanları üretilmektedir **Şekil 5.10a**. Üretimde genellikle yüksek mukavemetli beton veya lif katkılı kompozit beton kullanılmaktadır. Tasarlanan dış ve iç katmanlar arasına, kolonlarda olduğu gibi donatı elemanları yerleştirilerek sağlam bir çerçeve oluşturulmakta ve kalıp şekli tamamlanmaktadır **Şekil 5.10b**. Üretim sürecinin son aşamasında ise bu kalıbın orta bölgesi beton ile doldurularak nihai taşıyıcı duvar elde edilmektedir. 3D yazıcıların, her bir katmanı detaylı ve hassas bir şekilde işleyebilme kabiliyeti sayesinde, duvar elemanları arasında yüksek uyum ve geometrik tutarlılık sağlanabilmektedir. Bu teknoloji, duvar elemanlarının yalnızca yapı elemanı olarak değil, aynı zamanda kalıp sisteminin bir parçası olarak işlev görmesini mümkün kılmaktadır. Böylece, geleneksel üretim yöntemlerinde karşılaşılan karmaşık kalıp montaj işlemleri büyük ölçüde sadeleştirilmektedir. 3D yazıcı teknolojisinin sunduğu yüksek düzeyde esneklik ve hassasiyet, üretim süreçlerinde verimlilik sağlarken aynı zamanda yapı tasarımında daha yenilikçi ve sürdürülebilir yaklaşımların benimsenmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 5.10: 3D mobil yazıcı ile üretilen taşıyıcı duvar: a) duvar basımı, b) donatıları eklenmiş duvar [246].

3D yazıcı teknolojisi, duvar elemanlarının üretim sürecinde yalıtım veya kablolama gibi ek özelliklerin entegre edilmesine olanak tanımaktadır. Bu teknoloji ile üretilen yapıların duvarlarında, genellikle zikzak desenli kontrollü boşluklar oluşturulmaktadır. Boşluklar, ses ve ısı yalıtımını optimize etmek amacıyla

tasarlanmıştır. Ayrıca, elektrik ve sıhhi tesisat sistemleri, tasarım aşamasında planlanarak bu boşluklara entegre edilebilmektedir **Şekil 5.11a**, **Şekil 5.11b**. Tesisat çıkış noktaları ise üretim sırasında, beton delme panç cihazları kullanılarak açılmaktadır **Şekil 5.11c**. Bu yaklaşım, duvarlar arasındaki boşlukların sağladığı esneklik sayesinde tesisat hatlarının üretim sürecinde hızlı ve verimli bir şekilde yerleştirilmesine olanak tanıyarak, geleneksel yapı üretiminde duvarların tamamlanmasının ardından gerçekleştirilen tesisat döşeme işlemi ile bu işlem sonrası yapılan sıva, alçı ve boya gibi zaman alıcı ve maliyetli süreçlere olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır.



Şekil 5.11: 3D yazıcı teknolojiyle üretimde tesisat sistemi: a) elektrik tesisatı detayı, b) sıhhi tesisat detayı, c) duvardaki tesisat çıkışları [246].

3D yazıcı teknolojiyle duvar üretimi sırasında, doğrama boşluklarının yer alacağı alanlara taşıyıcı ve sabitlenebilir destek elemanları yerleştirilmektedir. Bu destek elemanları, hem baskı sırasında duvarın stabilitesini sağlamakta hem de doğrama montajını kolaylaştıracak şekilde tasarlanmaktadır. Bu yöntemle, 3D mobil yazıcı,

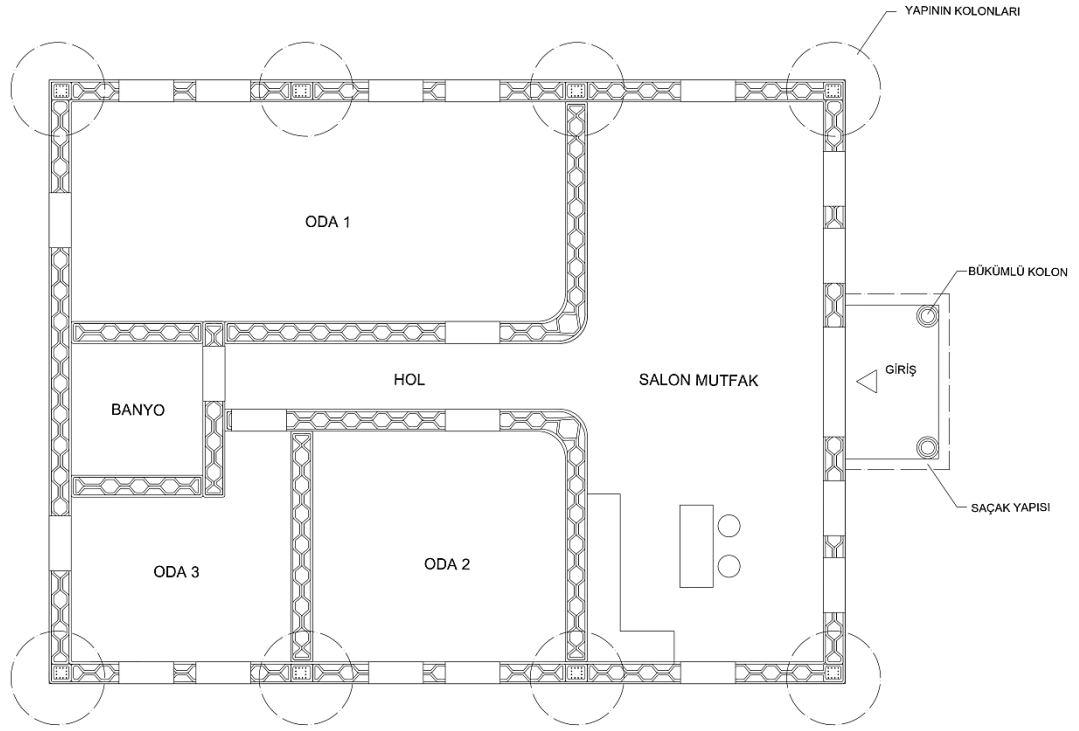
duvar elemanlarını tek seferde üretirken kapı ve pencere boşluklarını da hassas bir şekilde bırakabilmektedir. Böylece, kapı ve pencere doğramalarının doğru ve kolay montajlanmasına olanak tanınmaktadır.

Isıtma ve soğutma sistemleri olarak yerden ısıtma veya radyatör gibi geleneksel betonarme yapılarda kullanılan yöntemler tercih edilebilmektedir. Bu yapılarda, iç ve dış duvar yüzeylerinde genellikle sıva, alçı veya boya gibi işlemlere ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak, kullanıcı taleplerine bağlı olarak, bu yüzeylere boya veya seramik kaplama uygulamaları yapılabilmektedir. Islak hacimlerde ise, geleneksel betonarme yapılarda olduğu gibi seramik veya mermer kaplama gibi dayanıklı ve suya karşı koruyucu malzemeler kullanılmaktadır. Bu üretim yöntemi, yapıların hem estetik hem de işlevsel özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağlamakta ve 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründeki uygulanabilirliğini artırmaktadır.

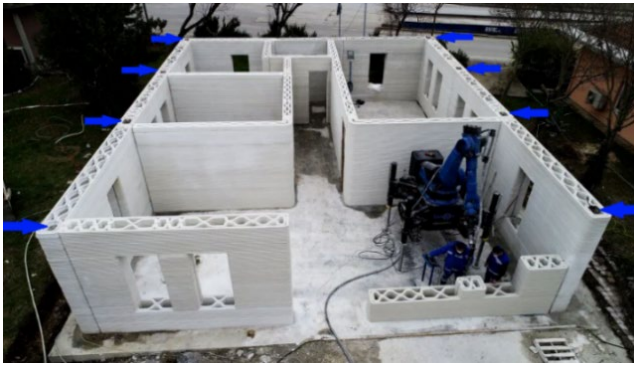
5.4. Uygulanan Yapılar ve Kent Mobilyaları

İSTON tarafından üretilen yapılar incelendiğinde, ilk üretilen konut yapısının yanı sıra, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Park ve Bahçeler Müdürlüğü Üsküdar Şeflik Ofisi olarak kullanılan ofis yapısı ve Tiny House konseptinde tasarlanmış bir konut yapısı da bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, prefabrike yapı sistemleri ile üretilmiş yapı çalışmaları da bulunmaktadır. Bu yapıların tamamının tek katlı olduğu gözlemlenmiş olup, henüz merdiven üretimine yönelik çalışmaların gerçekleştirilmediği tespit edilmiştir.

Tuzla Tesisleri'nde inşa edilen ilk 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen konut yapısı, 155 metrekarelik (m^2) bir alana sahip olup 3 oda ve 1 salondan oluşmaktadır **Şekil 5.12**. Yapıda toplamda 8 taşıyıcı kolon bulunmaktadır. Bu kolonlar, etriyeli donatılarla güçlendirilmiştir. Duvarlar, taşıyıcı bir yük taşımamakta olup, çelik çatı yapısı tamamen bu 8 kolon üzerine yerleştirilen çelik konstrüksiyonla desteklenmiştir **Şekil 5.13**. Bu sistem, yapının taşıyıcı yüklerini kolonlar aracılığıyla zemine aktaran bir tasarım yaklaşımını yansıtmaktadır.



a)



b)



c)

Şekil 5.12: Konut inşası: a) plan şeması, b) 8 taşıyıcı kolon, c) duvar üretimi [246], [248].

İki pencere doğraması yer alan duvarın üretimi, beş aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, duvarın alt sırası tek seferde, ikinci aşamada, doğramaların arasındaki duvarlar üç parçalı olarak, üçüncü aşamada ise en üst sıra, doğrama kısımlarının altlarına kalıp eklenerek tek seferde üretimi yapılarak tamamlanmıştır **Şekil 5.13**. Doğramaların boydan olmaması ve iki duvar arasında yer alması nedeniyle, baskı sırasında destek kullanılmıştır. Ayrıca, duvarın taşıyıcı özelliklerini artırmak amacıyla baskı işlemi sırasında 8 milimetrelik donatılar yerleştirilmiş ve bu donatılar lento görevi görerek doğrama alanlarının üzerindeki yükün eşit şekilde dağıtılmasını sağlamıştır. Duvarların birleşim noktasındaki izler, **Şekil 5.13b**'de görülmektedir.



a)



b)

Şekil 5.13: Konutun duvarları: a) duvarın üretim aşaması [248], b) birleşim detayı [246].

Çatı sistemi hibrit bir yaklaşımla tasarlanmış olup, çelik taşıyıcı sistem kullanılarak inşa edilmiştir. Çatıdan su tahliyesi için geleneksel oluk ve boru sistemleri tercih edilmiş, ancak saçak üzerindeki suyun yönlendirilmesi amacıyla 3D yazıcı teknolojisiyle üretilmiş bükümlü kolonun yanından yağmur zincirleri kullanılmıştır. Bu sistem, geleneksel oluk ve boru sistemlerine alternatif olarak suyun kontrollü ve estetik bir şekilde belirli bir noktaya yönlendirilmesini sağlamaktadır **Şekil 5.14**.



a)

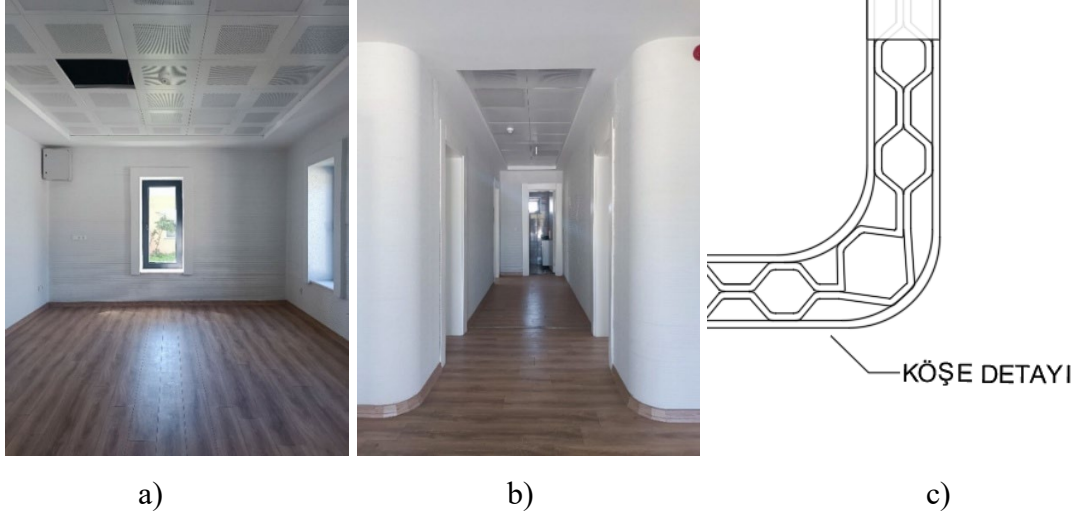


b)

Şekil 5.14: Türkiye'de inşa edilen ilk konut: a) dıştan genel görünüm, b) bükümlü kolon ve yağmur zinciri detayı [246].

Yapının iç mekân tasarımında, duvar köşelerinin dairesel bir şekilde üretildiği, zemin kaplamasında lamine ahşap kullanıldığı ve tavanda asma tavan uygulanmıştır. Dairesel köşe tasarımı, estetik bir görünüm sağlamanın yanı sıra köşelerdeki keskin hatları yumuşatarak daha organik ve akıcı bir mekân hissi yaratmaktadır **Şekil 5.15**.

Bu tasarım yaklaşımı, yalnızca estetik bir katkı sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda temizliği kolaylaştırarak kir ve toz birikimini azaltmakta ve bakım süreçlerini daha pratik hale getirmektedir.



Şekil 5.15: İçten görünüm: a) bir odanın görünümü, b) holün görünümü, c) dairesel köşe detayı şeması [246].

Mutfak ve salonun tek bir alanda çözümlendiği bu tasarımda, ahşap görünümlü modüler mutfak tercih edilmiştir. Mutfak bölümünde, tezgâh arasında seramik kaplama uygulanmadığı ve yüzeyin doğal haliyle bırakıldığı gözlemlenmiştir **Şekil 5.16a**. Yapının ıslak hacimi tavana kadar seramik kaplamadır **Şekil 5.16b**. Bu durum, farklı tasarım kararlarının aynı yapı içerisinde bir arada uygulanabileceğini ve bu sayede işlevsel çözümler sunulabileceğini ortaya koymaktadır.

155 m² büyüklüğündeki bu yapının inşası, yaklaşık 1 hafta gibi kısa bir sürede tamamlanmıştır. Kalıp kullanımı ve iş gücü ihtiyacı en aza indirilen bu üretim yöntemi, hız ve verimlilik açısından önemli faydalar sunmaktadır. 3D mobil yazıcının üretilmesinin maliyetleri hesaba katılmadığında, bu büyüklükte bir yapının geleneksel betonarme yapı üretim yöntemlerine kıyasla daha düşük maliyetle inşa edilebildiği belirlenmiştir. Bu durum, 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründe ekonomik ve sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıktığını göstermektedir.



a)



b)

Şekil 5.16: İç Mekân Tasarımları: a) Mutfak tasarımı, b) Islak Hacim [246].

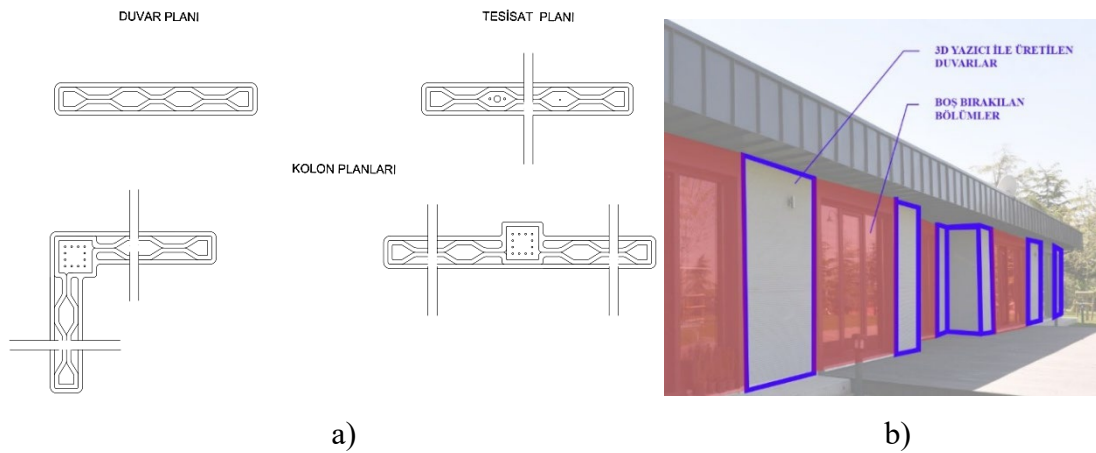
İBB Park ve Bahçeler Müdürlüğü Üsküdar Şeflik Ofisi olarak kullanılan Türkiye’deki ilk ofis yapısı ise konut yapısında elde edilen başarının ardından aynı zamanda kullanılmak üzere hayata geçirilen ilk yapı projesidir **Şekil 5.17**. 2021 yılında Üsküdar’da inşa edilen bu proje, 300 m² alana sahiptir. Radye temel üzerine inşa edilen ve sekiz ayrı bölümden oluşan bu yapı, C50/60 sınıfı beton kullanılarak yerinde döküm yöntemiyle üretilmiştir.

Şehir merkezinde konumlanan bu yapı, yüksek çevresel gürültü seviyelerine maruz kalan bir bölgede inşa edilmiştir. Bu nedenle, ofis işlevi görece yapının tasarımında temel parametrelerden biri ses yalıtım performansıdır. Yapı, 45 dB ses azaltım indisi ile yüksek düzeyde akustik izolasyon sağlayarak, iç mekânların dış ortam kaynaklı gürültüden etkilenmesini minimize etmektedir. Bu akustik performans, mekânlar arası ses geçişini sınırlayarak konforlu bir çalışma ortamı oluşturmayı amaçlamaktadır. Yüksek ses yalıtımı özelliği hem kullanıcı konforu hem de yapının fonksiyonel gereksinimleri açısından kritik bir tasarım kriteri olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 5.17: İBB Park ve Bahçeler Müdürlüğü Üsküdar Şeflik Ofisi [249].

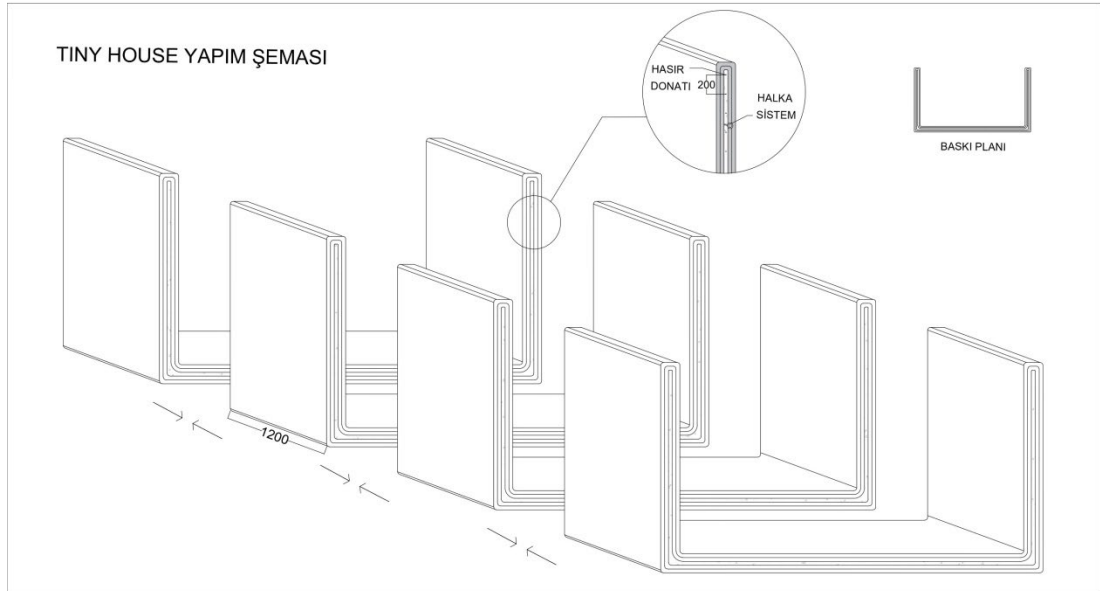
Bu ofis yapısının tasarımında, konut yapısında olduğu gibi kolonlar ve duvarlar üretilmiş, çatı sistemi olarak çelik çatı sistemi tercih edilmiştir. Ancak, konut yapısından farklı olarak, bu yapıda pencere ve kapı doğramaları, yerden duvar bitimine kadar uzanacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarım kararı doğrultusunda, pencere ve kapı doğramalarının bulunduğu alanlar tamamen boş bırakılmış ve yalnızca doğramalar arasındaki duvarlar üretilmiştir **Şekil 5.18**. Böylece, doğrama geçen alanlara üretim sırasında destek eklenmesine veya lento kullanılmasına gerek kalmadan yapı tamamlanmıştır. Konut yapısına kıyasla yaklaşık iki kat daha fazla metrekareye sahip olan bu ofis yapısının üretimi, 10 gün gibi kısa bir sürede tamamlanmıştır. Bu durum, 3D yazıcı teknolojisinin ölçek büyüdükçe dahi verimliliğini koruduğunu ve üretim hızını artırdığını göstermektedir.



Şekil 5.18: Ofisin duvar üretim: a) duvar ve kolon planları, b) duvarda boşluk bırakılan yerler [246].

Minimalist tasarım anlayışını yansıtan ve 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen “Tiny House”, özelleştirilebilir ve modüler bir yapı olarak tasarlanmıştır. 22 m² alana sahip

bu yapı, alanın etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayarak minimalist bir yaşam alanı sunmayı hedeflemektedir. Tasarımda sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği gibi çevresel faktörler de ön planda tutulmuş, çevre dostu bir yaklaşım benimsenmiştir. Yapı, 120 santimetre genişliğinde dört U şeklinde üretilen duvar (U-form) kesitin birleştirilmesiyle inşa edilmiştir **Şekil 5.19**. Tasarımın temel özelliği, kesitler arasında kafes donatısı kullanılarak yapısal dayanımın artırılması ve farklı bir yapısal yaklaşımın benimsenmesidir. Üretim sırasında donatılar, her 20 katmanda bir yerleştirilmiş ve üretim sürecine entegre edilerek inşa süreci tamamlanmıştır. U-form kesitler, vinç yardımıyla kaldırılarak birleşim noktalarında iki duvarı birbirine kenetleyen halka sistemi ile birleştirilmiştir. Birleştirme işleminin ardından, birleşim noktalarına hızlı donma ve yüksek yapışma özelliği sağlayan harç uygulanarak yapısal bütünlük sağlanmıştır. U-form kesitlerinin ön kısmına yerden çatıya kadar doğrama yapılmış, arka kısmına ise gazbeton duvar örülmüş, sıva ve boya işlemi yapılmıştır **Şekil 5.20**. Yapıdaki U-form kesitlerin donatılı ve boşluksuz üretilmesi sebebiyle tesisat detayları örülen duvarın içinde çözümlenmiştir **Şekil 5.19**. Bu yenilikçi üretim yöntemi, hem tasarım hem de uygulama süreçlerinde teknolojik ve yapısal bir gelişim sunmaktadır.



Şekil 5.19: Tiny House yapım şeması [246].



a)



b)



c)

Şekil 5.20: Tiny House: a) Tiny House yapısı b) duvar birleşim izleri, c) örülen duvardaki tesisat çıkışları [246].

Çatı yapımında, U-form kesitler üzerine ahşap ile betonun birleşimini sağlayan metal bağlantı elemanları monte edilmiştir **Şekil 5.21**. Çatı elemanları, ahşap parçaların metal bağlantı elemanlarına sabitlenmesiyle dört parça halinde hazırlanmış ve vinç yardımıyla yerine yerleştirilmiştir. Çatı kaplamalarının arasına, ısı ve ses yalıtımını

en üst düzeye çıkarmak amacıyla yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve yangın güvenliği sağlayan yalıtım malzemesi olarak taş yünü yerleştirilmiştir.



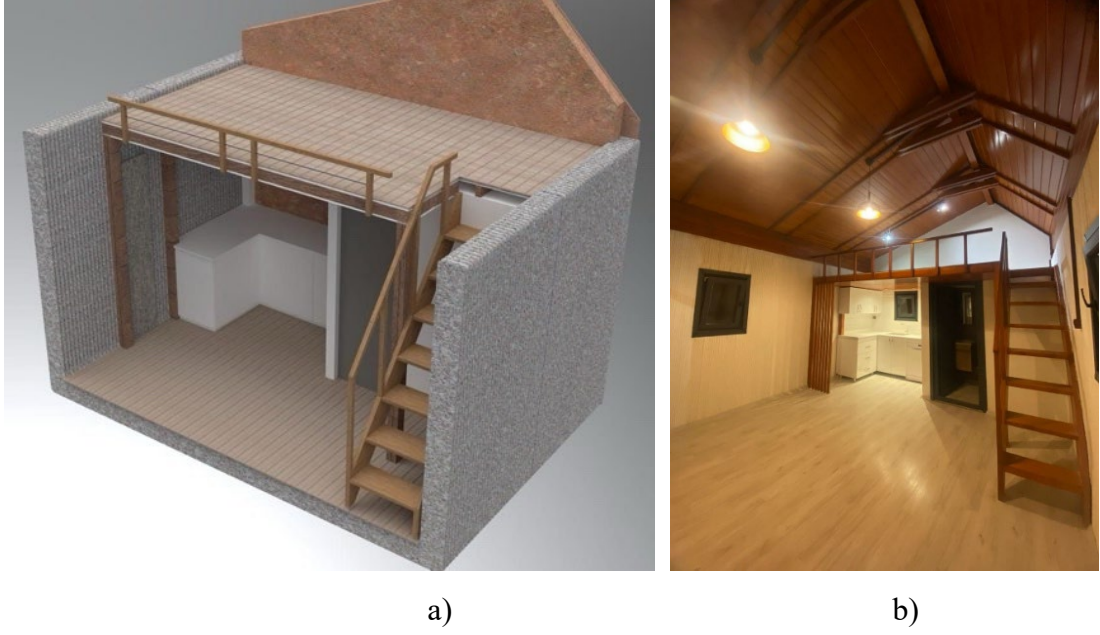
a)



b)

Şekil 5.21: Tiny House: a) duvar-çatı birleşimi, b) içten görünümü [246].

İç mekânda bir yaşam alanı, ıslak hacim ve asma kat bulunmaktadır **Şekil 5.22**. Mutfak, modüler mutfak tasarımıyla planlanmış, tezgâh üstü duvar seramik kaplama ile tamamlanmıştır. Islak hacimde ise hem zemin hem de duvarlar seramik kaplama ile bitirilmiştir. 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen bu yapı, minimalist yaşam tarzına uygun bir konut çözümü sunmanın yanı sıra, afet bölgelerindeki barınma sorunlarına yönelik alternatif bir model olarak da öne çıkmaktadır. Beton malzeme kullanılarak üretilen yapının parçalarının ağır olması nedeniyle, afet bölgelerinde yerinde üretim yapılarak ve vinçler yardımıyla inşa edilmesinin mümkün olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu yapı, diğer "tiny house" modellerinden farklı olarak hareketli bir mekanizma üzerine inşa edilmediği için kolay taşınabilir bir özelliğe sahip olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.22: Tiny House: a) modellemesi, b) içten görünümü [250].

İstanbul Bakırköy’de gerçekleştirilen bir diğer konut/ofis projesi, prefabrike yapı sistemlerinin 3D yazıcı teknolojisiyle entegre edildiği yenilikçi bir uygulamadır. Projede, tüm yapı elemanları fabrikada 3D yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilmiş ve önceden hazırlanmış duvar elemanları sahaya taşınarak vinç yardımıyla monte edilmiştir **Şekil 5.23**. Toplam 255 m²’lik bu yapının kaba inşaat süreci, tüm bileşenlerin fabrikada üretilmesi ve sahada montajlanması da dahil olmak üzere yalnızca 1 hafta içinde tamamlanmıştır. Bu süreç, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla iş gücü ihtiyacını azaltmış, inşaat süresini önemli ölçüde kısaltmış ve üretim verimliliğini artırmıştır. Ayrıca, bu yöntem malzeme israfını minimize ederek sürdürülebilir bir inşaat yaklaşımı sunmuş ve çevresel etkileri en aza indirmiştir. Prefabrike yapı sistemleri ile 3D yazıcı teknolojinin entegrasyonu, hem yapı üretim sürecinde yüksek hassasiyet sağlamış hem de sektör genelinde daha geniş bir ölçekte uygulanabilirliğini ortaya koymuştur.



a)



b)



c)

Şekil 5.23: Prefabrike konut/ofis yapısı: a) yapı elemanlarının sahaya taşınması, b) duvarın sahada montajlanması, c) saha alanı [251].

Üretilen yapıların özellikleri **Tablo 5.1**'de verilmiştir. Genel olarak, bu yapıların üretiminde 3D yazıcı teknolojisini kullanabilmek için geniş kapsamlı bir Ar-Ge çalışması ve ileri teknoloji üretimi gerekmektedir. 3D yazıcı üretim süreçlerinin geliştirilmesi, malzeme optimizasyonu, baskı hassasiyeti, üretim hızı ve dayanıklılık gibi çeşitli teknik faktörleri içeren mühendislik çalışmalarıyla sağlanmaktadır.

Üretim maliyetleri, 3D yazıcı teknolojisinin geliştirilmesi ve üretim maliyetlerinin yanı sıra, kalıp ve işçilik ihtiyacının azalmasıyla düşmektedir. Ancak, 3D yazıcı üretim süreçleri, yüksek hassasiyetli ekipman, özel malzeme bileşenleri ve yazılım altyapısı gerektirmektedir. Bu süreçler, geniş bir Ar-Ge çalışması ve finansman gerektiren teknik geliştirmeleri içermektedir. Bu bağlamda, 3D yazıcı teknolojisinin

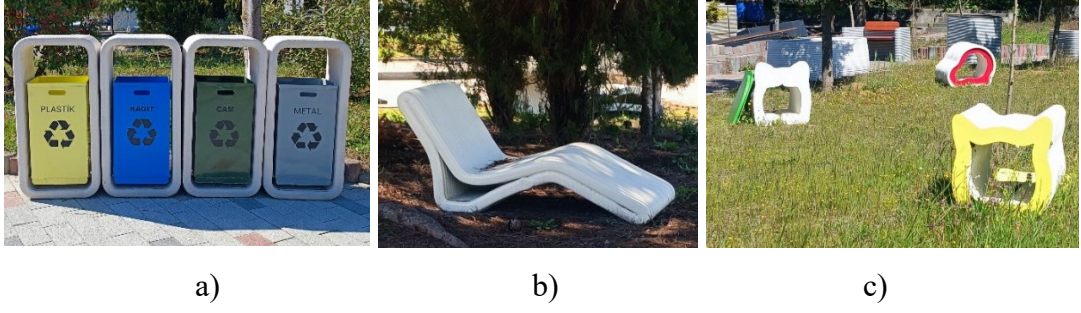
inşaat sektöründe uygulanabilmesi için baskı sistemleri, malzeme uyumluluğu ve üretim sürecine yönelik teknik çalışmalar sürdürüldüğü görülmektedir.

Tablo 5.1: İSTON tarafından üretilen yapılar.

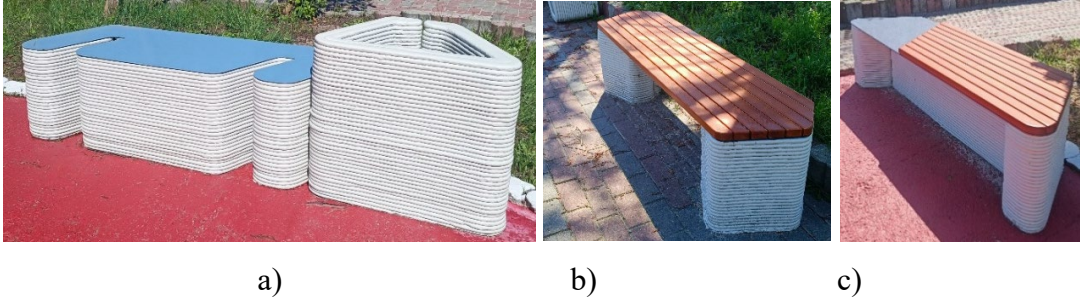
İSTON TARAFINDAN ÜRETİLEN YAPILAR						
Yapının Adı	Yılı ve Yeri	Alan (m ²)	İşlev	Süre (Gün)	Üretim Şekli	Özellik
3D Konut Projesi	2021, Tuzla Tesisleri	155	Konut	7	Yerinde/ Doğrudan	3D Yazıcı Teknolojisi ile üretilen ilk yapı örneğidir.
3D Ofis Projesi	2021, Üsküdar	300	Ofis	10	Yerinde/ Doğrudan	Kalıp Kullanılmamıştır. 45 dB ses azaltım indisiyle dikkat çeken bir ses yalıtım performansı sunmaktadır
Tiny House Projesi	2022, Tuzla Tesisleri	22	Konut	7	Yerinde/ Prefabrike	U-Form kesitlerle üretilen minimal yaşam alanıdır.
Konut/Ofis Projesi	2022, Bakırköy	255	Konut/ Ofis	7	Fabrikada / Prefabrike	Tüm elemanları fabrikada prefabrike olarak üretilen yapıdır.

3D yazıcı teknolojisi yalnızca yapı elemanlarının üretiminde değil, aynı zamanda kent mobilyalarının üretiminde de kullanılmaktadır. Bu teknolojiyle üretilen kent mobilyaları, zorlu hava koşullarına dayanıklı olacak şekilde tasarlanmakta ve bahçe oturma grupları, dış mekân bankları, aydınlatma elemanları ve çiçeklikler gibi çeşitli ürünleri kapsamaktadır. Organik formlarla çevreye uyumlu tasarımlar, estetik ve işlevsellik açısından dikkat çekmektedir. Kamusal alanlar için geliştirilen bu özel mobilyalar, banklar, pergolalar, şezlonglar, masa ve sandalyeler, saksılar, hayvan barınakları ve çöp kovaları gibi geniş bir ürün yelpazesine sahiptir **Şekil 5.24**.

3D yazıcı teknolojisiyle üretilen bankları, yenilikçi tasarımlar ve malzeme kombinasyonlarıyla öne çıkmaktadır. Beton ile ahşap ve/veya metalin birlikte kullanıldığı tasarımlar, bu malzemelerin özelliklerini bir araya getirerek hem estetik hem de işlevsel gereksinimlere cevap veren çok yönlü çözümler sunmaktadır. Bu tasarımlar, dayanıklılık, görsel uyum ve kullanıcı konforunu bir arada sağlayarak kent mobilyaları için ideal bir alternatif oluşturmaktadır **Şekil 5.25**.



Şekil 5.24: 3D yazıcı teknolojiyle üretilen kent mobilyaları: a) geri dönüşüm kutusu, b) şezlong, c) hayvan evleri [246].



Şekil 5.25: 3D yazıcı teknolojiyle üretilen banklar: a) beton ve metal kombinasyonu, b) beton ve ahşap kombinasyonu, c) beton ile ahşap/metal kombinasyonu [246].

Kent peyzajında yenilikçi bir yaklaşımı temsil eden bu tasarımlar, kentsel alanların estetik değerini artırırken sürdürülebilir üretim süreçlerine de katkı sağlamaktadır. 3D yazıcı teknolojisi, bankların kullanıcı gereksinimlerine göre özelleştirilmesini sağlarken malzeme israfını en aza indirmektedir. Bu yönüyle, şehir planlamasında estetik ve işlevselliği çevre dostu bir yaklaşımla birleştirmektedir.

6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojisi, beton, polimer, metal ve ahşap gibi malzemelerle yenilikçi, hızlı ve maliyet etkin yapı üretim süreçlerine olanak tanımaktadır. Bu çalışma kapsamında, 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründe kullanım potansiyeli, yapı malzemesi, yapı bileşeni, yapı elemanı ve yapı üretimi bağlamında ele alınmıştır. Bu doğrultuda literatür araştırması yapılmış, örnek çalışmalar incelenmiş ve İSTON'un Tuzla tesislerindeki üretim süreçleri yerinde gözlemlenmiştir. Geliştirilen yenilikçi üretim süreçleri değerlendirildiğinde önemli faydaların yanı sıra bazı kısıtlamaların da olduğu tespit edilmiştir.

- 3D yazıcı teknolojisiyle üretim süreçlerinde, tasarım ve modelleme aşamalarında üç boyutlu bir yazılım kullanılarak üretim simülasyonları gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede üretim süreçlerinde koordinasyon sağlanmaktadır. Ancak, yazılımların destek çubuklarını yapı tasarımı sırasında belirleyememesi manuel müdahaleyi zorunlu kılması, üretim süreçlerini deneyime bağımlı hale getirmektedir. Bu sorunların üstesinden gelmek için destek yapıların otomatik yerleşimini sağlayan yazılımların geliştirilmesi gereklidir.
- Kullanılan teknolojinin geleneksel üretim tekniklerinden farklı olması nedeniyle yazıcının kumanda işlemlerini doğru bir şekilde yönetme ve hareketleri kontrol etme konusunda teknik elemanların yetkin olmaları gerekmektedir. Bu doğrultuda, teknik elemanlara eğitim verilmesi verimliliğin artırılması açısından eğitimler verilmektedir. Teknik personelin eğitimi ve süreçlere hâkimiyetinin sağlanması, üretim hatalarını en aza indirerek verimliliği arttırmaktadır.
- 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen betonun kıvamı, geleneksel betona göre daha katı olması gerektiğinden yüksek çimento oranı kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet sağlamak için gereken bu yüksek çimento oranı, karbon ayak izini artıran önemli bir sorundur. Daha az çimento içeren alternatiflerin kullanılması ve C30 sınıfı betonun propilen liflerle güçlendirilmesi gibi çalışmalar, dayanımı yüksek yapı malzemelerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca geri dönüştürülmüş agregaların düşük mekanik

dayanımı, bu malzemelerin yapı üretiminde kullanılamamasına yol açmakta ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini kısmen sınırlamaktadır. Bu doğrultuda, 3D yazıcı teknolojisiyle kullanılan beton karışımlarında çimento oranını azaltacak, dayanıklılığı artıracak ve karbon ayak izini düşürecek yeni formülasyonlar geliştirilmelidir. Geri dönüştürülmüş agregaların mekanik özelliklerini iyileştirmek için daha fazla Ar-Ge çalışması yapılmalıdır.

- 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen yapılar için özel yönetmeliklerin bulunmaması, statik hesaplamalarda mevcut betonarme yönetmeliklerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu kapsamda, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen yapıların güvenlik ve dayanıklılık standartlarını belirlemek amacıyla özel yönetmelikler hazırlanmalıdır. Bu, teknolojinin daha geniş ölçekte uygulanmasını destekleyecektir.
- Yapı üretiminde 3D yazıcı teknolojisiyle prefabrike ve yerinde üretim yöntemleri kullanılarak yapılar bileşenlerine ayrılmakta ya da yapı elemanları ayrı ayrı üretilmektedir. Aynı zamanda, kalıp ve fazla iş gücü ihtiyacının minimuma inmesi, üretim maliyetlerinde düşüş sağlamış; özellikle prefabrike yapı elemanlarının fabrikada üretilip sahada monte edilmesi hem malzeme israfını önlemiş hem de ekonomik verimlilik sağlamıştır. Çevresel sürdürülebilirlik açısından, üretim sürecinde daha az atık oluşması ve malzemelerin optimize edilmesi çevresel etkilerin azalmasına katkıda bulunmuştur. İşgücü ihtiyacının azalması, Türkiye gibi ülkelerde istihdam sorunlarına yol açabilse de yapıların hızlı üretimi ve esnek tasarım olanakları, afet bölgeleri gibi acil ihtiyaçlarda kullanım için fayda sağlamaktadır.
- Dikey elemanların üretiminde başarı gösteren bu teknoloji, yatay elemanların üretiminde yerçekimi ve destek ihtiyaçları gibi teknik zorluklarla karşılaşmaktadır. Kiriş ve döşeme gibi elemanların üretiminde, kesme kuvvetleri ve yerçekimi etkisi nedeniyle destek yapılarına ihtiyaç duyulması, süreci karmaşıklştırmaktadır. Bununla birlikte, prototip çalışmalarda elde edilen olumlu sonuçlar, bu sınırlamaların Ar-Ge çalışmalarıyla aşılabileceğini göstermektedir.
- Doğrama boşluklarının üretim sırasında oluşturulması, doğrama montajını büyük ölçüde kolaylaştırmaktadır. Bazı yapı örneklerinde, doğramaların yer alacağı alanlara taşıyıcı ve sabitlenebilir kalıp elemanları yerleştirilmektedir. Minimum düzeyde kalıp ve destek elemanı kullanılıyor olsa da ileri

Çalışmalarda bu süreçlerin daha optimize edilmesi ve üretim verimliliğinin artırılabilir.

- 3D yazıcı teknolojisi, farklı formların ve tasarım detaylarının kolayca uygulanabilmesine olanak tanımış; özellikle spiral kolonlar ve dairesel köşe tasarımları estetik ve işlevsellik açısından yenilikçi çözümler sunmuştur. Duvarların içine yalıtım ve tesisat sistemlerinin entegre edilebilmesi, üretim sürecinde önemli bir zaman tasarrufu sağlamıştır. Tesisat sistemlerinin duvar boşluklarından döşenmesiyle, bu işlemi takip eden sıva, alçı ve boya gibi zaman alıcı ve maliyetli süreçlere olan ihtiyaç ortadan kalkmıştır. Kullanıcının isteğine bağlı olarak, duvarlarda seramik kaplama ve boya işlemleri de uygulanabilmektedir. Böylece, estetik açıdan kullanıcı beklentilerini karşılayan çözümler sunulabilmektedir.
- Taşınabilirliğiyle klasik yazıcılardan ayrılan 3D mobil yazıcı, üretim alanı kısıtlamalarının önüne geçmektedir. Ancak kat yüksekliğinin 3 metreden fazla olduğu yapılarda tek seferde üretim süreçlerinde kısmi kısıtlamalar yaşanabilmektedir. Ayrıca, parçalı üretim olması sebebiyle üretim sırasında birleşim detaylarının görünür olması estetik bütünlüğü olumsuz etkileyebilmektedir. Daha büyük yapıların üretimine olanak tanıyacak şekilde yazıcı boyutları ve kapasitesinin arttırılması; birleşim detaylarının estetik bütünlüğü bozmasını önleyecek yeni yöntemlerin araştırılması gerektiği düşünülmektedir.
- Üretim sürecinde 3D yazıcı teknolojisinin hız ve verimlilik açısından büyük faydalar sağladığı gözlemlenmiştir. İSTON'un inşa ettiği konut ve ofis yapıları, bir hafta ila on gün gibi kısa sürelerde tamamlanmış ve bu süreler büyük ölçüde kalıp kullanımı ile iş gücü ihtiyacının minimize edilmesi sayesinde elde edilmiştir. Bu hızlı üretim, yapı sektöründe iş süreçlerinin hızlandırılmasına büyük katkı sağlamaktadır.
- 3D yazıcı teknolojisi kent mobilyalarında da dış mekâna uygun, özgün tasarım imkânı sunan ve çevreye uyumlu ürünlerin üretiminde kullanılabilir.
- Üretim maliyetlerinin, teknolojinin geliştirilmesi ve 3D yazıcı üretimindeki maliyetler dışında, kalıp ve işçiliklerin azalmasıyla önemli ölçüde düştüğü görülse de 3D yazıcı üretim maliyetleri geniş bir Ar-Ge ve finansman gerektirmektedir. Bu teknolojinin üretimde yaygınlaşmasını sağlamak ve 3D

yazıcıların üretim maliyetlerini iyileştirmek için devlet destekli çalışma birimlerinin artırılması faydalı olacaktır.

Sonuç olarak, 3D yazıcı teknolojiyle üretim, yapı sektöründe yenilikçi ve sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Teknolojinin sağladığı hız, maliyet avantajları, tasarım esnekliği ve çevresel katkılar, yapı sektöründe önemli bir potansiyel barındırmaktadır. Ancak malzeme ve yazılım kısıtlamaları, teknik sınırlamalar ve yönetmelik eksiklikleri gibi alanlarda yapılacak iyileştirmelerle bu potansiyelin daha da artırılması mümkündür. Bu kapsamda, önerilen iyileştirmeler yapılarak teknolojiye yönelik daha kapsamlı çözümler geliştirilebilir ve yapı sektöründe 3D yazıcı ile üretim artırılarak kullanım potansiyeli artırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ercoşkun P. K., Avlar E., (2013), “Yapı sektöründe teknolojik yeni yapı ürünlerinin karar verme sürecinde sistematik değerlendirilmesi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 1(1), 17-27.
- [2] Ercoşkun P. K., Avlar E., (2010), “Yapı ürünlerinde teknolojik yeniliklerin benimsenmesinde bilgi edinme süreci için model önerisi”, Megaron, 5(1), 33-42.
- [3] Metin R. Y., (2022), “Yapı Yapma Kültüründe Teknoloji Yönetimi”, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi.
- [4] Erdede B. S., Bektaş S., (2014), “Ekolojik açıdan sürdürülebilir taşınmaz geliştirme ve yeşil bina sertifika sistemleri”, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1(1), 1-12.
- [5] Duru M. O., Koç İ., (2021), “Sürdürülebilir yapı üretiminde yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) hesaplamalarının yapı bilgi modellemesi (BIM) ile entegrasyonuna yönelik bir araştırma”, Sanat ve Tasarım Araştırmaları Dergisi, 2(3), 107-121.
- [6] Çalışkan C. İ., Arpacıoğlu Ü., (2020), “Yapı üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi”, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(2), 1117-1136.
- [7] Hager I., Golonka A., ve Putanowicz R., (2016), “3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?”, Procedia Engineering, 151, 292-299.
- [8] Web 1, (2024), <https://www.iconbuild.com/>, (Erişim Tarihi: 07/09/2024).
- [9] Web 2, (2024), <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/innovation-eine-villa-aus-dem-3d-drucker-13466157.html>, (Erişim Tarihi: 12/10/2024).
- [10] Dikshit V., Yap Y. L., Goh G. D., Yang H., Lim J. C., Qi X., Yeong W. Y., Wei J., (2016), “Investigation of out of plane compressive strength of 3D printed sandwich composites”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 139, 01-07.
- [11] Coblenz R. M., (2019), “3D Printed Affordable Housing in Albuquerque”, Yüksek Lisans Tezi, Cincinnati Üniversitesi.
- [12] Shahrubudin N., Lee T. C., ve Ramlan R., (2019), “An overview on 3d printing technology: technological, materials, and applications”, Procedia Manufacturing, 35, 1286-1296.
- [13] Raikar P. S. P., (2020), “Extrusion Based Ceramic 3D Printing- Printer Development, Part Characterization, and Model-Based Systems Engineering Analysis”, Yüksek Lisans Tezi, Purdue Üniversitesi.

- [14] Wang L., Jiang H., Li Z., Ma G., (2020), “Mechanical behaviors of 3D printed lightweight concrete structure with hollow section”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(1), 1-17.
- [15] Murphy S. K., (2024), “The Implementation and Development of 3D Concrete Printing for On-Site Applications in Construction”, (2020), Yüksek Lisans Tezi, Washington Üniversitesi.
- [16] Das A. K., Agar D. A., Rudolfsson M., Larsson S. H., (2021), “A review on wood powders in 3d printing: processes, properties and potential applications”, *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 241-255.
- [17] Pessoa S., Guimarães A. S., Lucas S. S., Simões N., (2021), “3D printing in the construction industry- A systematic review of the thermal performance in buildings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110794.
- [18] Suntharalingam T., Gatheeshgar P., Upasiri I., Poologanathan K., Nagaratnam B., Corradi M., Nuwanthika, (2021), “Fire performance of innovative 3D printed concrete composite wall panels – A Numerical Study”, *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00586.
- [19] Şahin O., İlcan H., Ateşli A. T., Kul A., Yıldırım G., Şahmaran M., (2021) “Construction and demolition waste-based geopolymers suited for use in 3-dimensional additive manufacturing”, *Cement and Concrete Composites*, 121, 104088.
- [20] İlcan H., Kul A., Şahmaran M., Yıldırım G., Şahin O., (2022), “Rheological properties and compressive strength of construction and demolition waste-based geopolymer mortars for 3D-Printing”, *Construction and Building Materials*, 328, 127114.
- [21] Demiral N. C., Ekinici M. O., Şahin O., İlcan H., Kul A., Yıldırım G., Şahmaran M., (2022), “Mechanical anisotropy evaluation and bonding properties of 3D-printable construction and demolition waste-based geopolymer mortars”, *Cement and Concrete Composites*, 134, 104814.
- [22] Tabassum T., Mir A. A., (2023), “A review of 3d printing technology-the future of sustainable construction”, *Materials Today Proceedings*, 93, 408-414.
- [23] Baigarina A., Shehab E., Ali H., (2023), “Construction 3D printing: a critical review and future research directions”, *Progress in Additive Manufacturing*, 8 (6), 1393-1421.
- [24] Geng S., Luo Q., Liu K., Li Y., Hou Y., Long W., (2023), “Research status and prospect of machine learning in construction 3D printing”, *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01952.

- [25] Mohamed R. A., Mohamed A. F. A., (2024), “Exploring the environmental benefits of 3D printing technology in concrete construction; a review”, *Progress in Additive Manufacturing*, 10 (1), 279-289.
- [26] Çerçevik A. E., Toklu Y. C., Kandemir S. Y., Yaylı M. Ö., (2018), “3D baskı teknolojisi kullanarak yapı üretiminin son dönem yeniliklerinin araştırılması”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(2), 116-122.
- [27] Karabulut B. Y. G., (2019), “Mimarlık Eğitiminde Üç Boyutlu Yazıcılar: Türkiye Durum Değerlendirmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi.
- [28] Eke T. E., (2019), “Mobilya Tasarım ve Üretiminde Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi.
- [29] Uygunoğlu T., Özgüven S. B., Topçu İ. B., (2019), “3D teknolojisi ile yapı malzemesi üretimindeki gelişmeler”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(3), 279-288.
- [30] Artuğ S., Altun M.C., (2019), “3 boyutlu baskı teknolojisinin bina üretiminde kullanım olanaklarının güncel örnekler üzerinden”, 4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, Antalya Türkiye, 11-14, Nisan.
- [31] Felek S. Ö., (2019), “Mimari yapılarda 3 boyutlu yazıcıların kullanımı”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(3), 289-296.
- [32] Genç Z., (2019), “Konut Tipi Az Katlı Yapılarda Üç Boyutlu Yazıcı Tekniği ile Beton Yapım-Dökümünün Türkiye’de Uygulanabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- [33] Çimen O., (2019), “Üç Boyutlu Baskı Teknolojilerinin Mimarlık ve Mimari Koruma Alanında Kullanım Potansiyeli Üzerine Bir Araştırma”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [34] Bulut F. E., (2019), “3B Yazıcı Teknolojilerinin Mimarlık Alanındaki Potansiyelleri ve Geleceği Üzerine Bir Değerlendirme: Sosyal Ekonomik ve Çevresel Bir Perspektif”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- [35] Tümer M. B., (2020), “Üç Boyutlu Yazıcılar ve Günümüz Mimarisinde Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, Işık Üniversitesi.
- [36] Derin C., (2022), “Konut Tasarım ve Üretim Süreçlerinde 3B Yazıcı Teknolojisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Topkapı Üniversitesi.
- [37] Kadı B., (2022), “3 Boyutlu Yazıcıların Kompozit Gaz Beton Üretiminde Kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi.

- [38] Yılmaz A., (2022), “Afet Sonrası Oluşacak Barınma İhtiyacını 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojileri ile Çözümleme Üzerine Bir Değerlendirme”, Yüksek Lisans Tezi, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi.
- [39] Aktepe Ş., (2023), “Mimari Aydınlatma Elemanlarının Geri Dönüştürülmüş Pet Malzeme ile Üretiminde 3 Boyutlu Yazıcıların Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- [40] Arı A. C., (2023), “3 boyutlu yazıcı teknolojisiyle üretilen yapı malzemeleri ve inşaat sektöründe kullanımlarının incelenmesi”, Social Sciences Studies Journal, 9(114), 7829-7840.
- [41] Uygunoğlu T., Çetingül F., (2023), “3B yazıcıyla baskılanan çimento esaslı harçlarda katmanlar arası bağ dayanımının incelenmesi”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 7(3), 362-370.
- [42] İşman A., (2014), “Teknolojinin felsefi temelleri”, Sakarya Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 1, 1-19.
- [43] Nazarko L., (2015) “Technology assessment in construction sector as a strategy towards sustainability”, Procedia Engineering, 122, 290-295.
- [44] Yetkin E. G., Coşkun K., (2021), “Endüstri 5.0 (Toplum 5.0) ve Mimarlık”, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 27, 347-353.
- [45] Birol G., (1996), “19. Yüzyıl Endüstri Devrimi Sonrası Mimari Akımlar”, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi.
- [46] Güvenol B., Gündüz Z., Güler M. E., (2021), “Endüstriyel devrimler ve toplumsal gelişmelerin ışığında turizm”, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 6(12), 204-227.
- [47] James I., (2021) “Büyük Mühendisler Riquet’den Shannon’a”, 1. Baskı, İş Bankası Kültür Yayınları.
- [48] Web 3, (2022), https://www.arkitektuel.com/kristal-saray/crystal_palace/, (Erişim Tarihi: 20 /12/2022).
- [49] Web 4, (2022), https://tr.wikipedia.org/wiki/Eyfel_Kulesi, (Erişim Tarihi: 20/12/2022).
- [50] Web 5, (2024), <https://yapidergisi.com/endustrilesme-sonrasi-kentlerin-donusumu/>, (Erişim Tarihi: 14/09/2024).
- [51] Web 6, (2024), <https://www.toplumveutopya.com/sanayi-devrimi-sonrasi-kentlerin-kuresellesmesi-kapitalizmin-yeni-kaynaklari-hasancan-yagli/>, (Erişim Tarihi: 14/09/2024).

- [52] Özakçaoğlu N., (2021), “Endüstriyel gelişme: modernleşme bağlamında sanat eseri ve sanatçının dönüşüm süreci”, Sanat ve Tasarım Araştırmaları Dergisi, 2(2), 58-65.
- [53] Kılıç R., (2023), “Sanayi Devrimlerinin serüveni: Endüstri 1.0’dan Endüstri 5.0’a”, Takvim-i Vekayi, 11(2), 276-291.
- [54] Web 7, (2022), <https://proente.com/endustri-alaninda-yasanan-gelismelerin-siniflandirilmesi/>, (Erişim Tarihi: 20/12/2022).
- [55] Web 8, (2022), <https://www.betonvecimento.com/cimento/cimentonun-gelisimi>, (Erişim Tarihi: 20/12/2022).
- [56] Ünal O. ve Yurtcu Ş., (2007) “Betonarme yapılarda hazır beton kullanımı”, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 3(1), 51-64.
- [57] Xu L. D., Xu E. L., Li L., (2018), “Industry 4.0: State of the art and future trends”, International Journal of Production Research, 56(8), 2941-2962.
- [58] Kumar S., Suhaib M., Asjad M., (2020), “Industry 4.0: Complex, disruptive, but inevitable”, Management and Production Engineering Review, 11(1), 43-51.
- [59] Web 9, (2024), <https://www.sap.com/turkey/products/scm/what-is-a-smart-factory.html>, (Erişim Tarihi: 28/09/2024).
- [60] Ivanov D., (2023), “The Industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives”, International Journal of Production Research, 61(5), 1683-1695.
- [61] Huang S., Wang B., Li X., Zheng P., Mourtzis D., Wang L., (2022), “Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution”, Journal of Manufacturing Systems, 64, 424-428.
- [62] Akundi A., Euresi D., Luna S., Ankobiah W., Lopes A., Edinbarough I., (2022), “State of Industry 5.0—analysis and identification of current research trends”, Applied System Innovation, 5(1), 27.
- [63] Baloğlu Ö. Ö., (2023), “Teknolojik bir dönüşüm olarak dijitalleşme kavramı ve etkileri”, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi, 13(2), 1189-1210.
- [64] Inceoğlu M., İnan B., (2020), “Bilgisayar destekli tasarımın gelişimi: yeni bir mimari metodoloji olarak YBM”, GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies, 3(1), 47-65.
- [65] Sutherland I. E., (1963) “Sketchpad, A Man-Machine Graphical Communication System”, Doktora Tezi, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü.
- [66] Kuzgun T., (2004) “Bilgisayar Destekli Mimari Tasarım ve Yaratıcılık”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- [67] Kumaş E. ve Erol S., (2021), “Endüstri 4.0’da anahtar teknoloji olarak dijital ikizler”, Politeknik Dergisi, 24(2), 691-701.
- [68] Tünger Ç., Pektaş Ş. T., (2014), “Öğrencilerin geleneksel ve parametrik üç boyutlu modelleme ortamlarındaki deneyimlerinin fenomenografik yöntem ile karşılaştırılması”, 8. Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu, 1-10, İzmir, Türkiye, 26-27, Haziran.
- [69] Sdegno A., (2017), “For an archeology of the digital iconography”, Proceedings, 1(10), 1093.
- [70] Web 10, (2024), <https://cadsay.com/autocad-3d-cizim-ornekleri>, (Erişim Tarihi: 13/10/2024).
- [71] Atabay Ş., Öztürk M. B., (2019), “Yapı bilgi modellemesi (YBM) uygulama planı üzerine inceleme”, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(2), 418-430.
- [72] Web 11, (2024), <https://www.autodesk.com/tr/solutions/bim>, (Erişim Tarihi: 15/10/2024).
- [73] Azhar S., Khalfan M., ve Maqsood T., (2012), “Building information modeling (BIM): now and beyond”, Australasian Journal of Construction Economics and Building, 12(4), 15-28.
- [74] Web 12, (2024), <https://bimsoft.com.tr/>, (Erişim Tarihi: 17/10/2024).
- [75] Mathews M., (2013), “BIM collaboration in student architectural technologist learning”, Journal of Engineering, Design and Technology, 11(2), 190-206.
- [76] Yeang K., (1998), “Yeni yüzyıla girerken bina tasarımı ekoloji/enerji etkin/akıllı bina”, 3. Uluslararası Yapıda Tesisat Bilimi ve Teknolojisi Sempozyumu, İstanbul, Türkiye, 07-09, Mayıs.
- [77] Civan U., (2006), “Akıllı binaların çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [78] Çimen L., (2005), “Bina otomasyon sistemleri”, Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi.
- [79] Avincan G., (1999), “Akıllı bina otomasyon sistemleri ve Türkiye’deki uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [80] Goldberg K., (2012) “What is automation?”, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 9(1), 1-2.
- [81] Chu B., Kim D., Hong D., (2008), “Robotic automation technologies in construction: a review”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 9(3), 85-91.

- [82] Can R. S., (2021), “İnşaat Sektörünün Geleceği”, Bitirme Projesi, MEF Üniversitesi.
- [83] Ertürk N. B., Değirmenci F. N., (2023), “Sanal gerçeklik (VR) teknolojilerinin mimarlık sektöründeki yeri”, Karesi Journal of Architecture, 2(2), 24-36.
- [84] Web 13, (2024), <https://parametric-architecture.com/virtual-reality-and-how-are-architects-using-it-in-design/>, (Erişim Tarihi: 20/10/2024).
- [85] Choi H.-W., Kim H.-J., Kim S.-K., Na W. S., (2023), “An overview of drone applications in the construction industry”, Drones, 7(8), 515.
- [86] Nagata M., Baba N., Tachikawa H., Shimizu I., Aoki T., (2002), “Steel frame welding robot systems and their application at the construction site”, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 12,15-30.
- [87] Web 14, (2024), <https://www.kuka.com/tr-tr/end%20bcstriler/%20a7%20b6z%20bcm-veri-bankas%20b1/2019/07/icd-ah%205%209fap-pavyon-buga>, (Erişim Tarihi: 20/10/2024).
- [88] Çirkin E., Özdağoğlu A., (2021), “Endüstri 4.0 bünyesindeki otonom robotların sürdürülebilirlik perspektifleri açısından değerlendirilmesi”, Erciyes Akademi, 35(4), 1534-1553.
- [89] Web 15, (2024), <https://www.fbr.com.au/view/hadrian-x>, (Erişim Tarihi: 20/10/2024).
- [90] Sönmez S., Kesen U., Dalgıç C., (2018), “3 boyutlu yazıcılar”, 6. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, 471-481, İstanbul, Türkiye, 01-03, Kasım.
- [91] Akbaba A. İ., Akbulut E., (2021), “3 boyutlu yazıcılar ve kullanım alanları”, ETU Sentez İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, (3), 19-46.
- [92] Web 16, (2022), <https://maker.robotistan.com/3d-yazici-printer/>, (Erişim Tarihi: 21/12/2022).
- [93] Duman B., Kayacan M. C., (2016), “Seçmeli lazer sinterleme tezgâhı için imalat yazılımı geliştirilmesi”, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 8(3), 27-45.
- [94] Kai C. C., Jacob G. G. K., Mei T., (1997), “Interface between CAD and rapid prototyping systems. Part 1: A study of existing interfaces”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 13(8), 566-570.
- [95] Web 17, (2024), <https://erlas.com.tr/3d-prototip/sla-ile-uretim>, (Erişim Tarihi: 26/10/2024).
- [96] Web 18, (2024), <https://3dedi.com/blog/3d-baski-teknolojileri.html>, (Erişim Tarihi: 26/10/2024).

- [97] Childs E. H., Latchman A. V., Lamont A. C., Hubbard J. D., Sochol R. D., (2020), “Additive assembly for polyjet-based multi-material 3D printed microfluidics”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 29(5), 1094-1096.
- [98] Kadry H., Wadnap S., Xu C., Ahsan F., (2019), “Digital light processing (DLP) 3D-printing technology and photoreactive polymers in fabrication of modified-release tablets”, *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 135, 60-67.
- [99] Web 19, (2024), <https://3mash.com/blog/3d-yazici-teknolojileri-sla-dlp-ve-lcd>, (Erişim Tarihi: 26/10/2024).
- [100] Martínez-Pellitero S., Castro M. A., Fernández-Abia A. I., González S., Cuesta E., (2017), “Analysis of influence factors on part quality in micro-SLA technology”, *Procedia Manufacturing*, 13, 856-863.
- [101] Gu P., Zhang X., Zeng Y., Ferguson B., (2001), “Quality analysis and optimization of Solid Ground Curing process”, *Journal of Manufacturing Systems*, 20(4), 250-263.
- [102] Web 20, (2024), <https://eklemeliimalat.net/eklemeli-imalat-teknolojileri-nelerdir/>, (Erişim Tarihi: 26/10/2024).
- [103] Helfesrieder N., Lechler A., Verl A., (2020), “Method for generating manufacturable, topology-optimized parts for Laminated Layer Manufacturing”, *Procedia CIRP*, 93, 38-43.
- [104] Guo H., Gingerich M. B., Headings L. M., Hahnlen R., Dapino M. J., (2019), “Joining of carbon fiber and aluminum using ultrasonic additive manufacturing (UAM)”, *Composite Structures*, 208, 180-188.
- [105] Poyraz Ö., Kuşhan M. C., (2018), “Havacılık komponentlerinin bakım uygulamalarında katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı”, *Mühendis ve Makina*, 59(691), 59-69.
- [106] Mostafaei A., Elliott A. M., Barnes J. E., Li F., Tan W., Cramer C. L., Nandwana P., Chmielus M., (2021), “Binder jet 3D printing—process parameters, materials, properties, modeling, and challenges”, *Progress in Materials Science*, 119, 100707.
- [107] Web 21, (2024), <http://tr.insta3dm.com/info/introduction-to-binder-jetting-3d-printing-f-71990778.html>, (Erişim Tarihi: 26/10/2024).
- [108] Zhu C., Liu T., Qian F., Chen W., Chandrasekaran S., Yao B., Song Y., Duoss E. B., Kuntz J. D., Spadaccini C. M., Worsley M. A., Li Y., (2017), “3D printed functional nanomaterials for electrochemical energy storage”, *Nano Today*, 15, 107-120.
- [109] Deckard C. R., (1989), “Method and apparatus for producing parts by selective sintering”, ABD Patent 4,863,538.

- [110] King D., Tansey T., (2002), “Alternative materials for rapid tooling”, Journal of Materials Processing Technology, 121(2-3), 313-317.
- [111] Partee B., Hollister S. J., Das S., (2006), “Selective Laser Sintering process optimization for layered manufacturing of CAPA® 6501 polycaprolactone bone tissue engineering scaffolds”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 128(2), 531-540.
- [112] Web 22, (2024), <https://www.positronadditive.com/technology>, (Erişim Tarihi: 26/10/2024).
- [113] Klocke F., Arntz K., Teli M., (2017), Winands K., Wegener M., Oliari S., “State-of-the-art laser additive manufacturing for hot-work tool steels”, Procedia CIRP, 63, 58-63.
- [114] Zäh M. F., Lutzmann S., (2010), “Modelling and simulation of electron beam melting”, Production Engineering, 4(1), 15-23.
- [115] Bacak S., Varol Özkavak H., Tatlı M., (2021), “FDM yöntemi ile üretilen PLA numunelerin çekme özelliklerine işlem parametrelerinin etkisinin incelenmesi”, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(1), 209-216.
- [116] Web 23, (2024), <https://www.archdaily.com/194235/contour-crafting-dr-behrokh-khoshnevis>, (Erişim Tarihi: 27/10/2024).
- [117] Khoshnevis B., Bekey G., (2002), “Automated construction using Contour Crafting: applications on earth and beyond”, 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), 489-494, Gaithersburg, MD, 23-24, Eylül.
- [118] Web 24, (2024), <https://www.kuka.com/tr-tr/%C5%9Firket/bas%C4%B1n/news/2021/05/besix-3d>, (Erişim Tarihi: 27/10/2024).
- [119] Ranjan R., Kumar D., Kundu M., Moi S. C., (2022), “A critical review on classification of materials used in 3D printing process”, Materials Today Proceedings, 61, 43-49.
- [120] Web 25, (2024), <https://www.boyutkat.com/3d-yazici-filament/pla-filament-nedir/>, (Erişim Tarihi: 28/10/2024).
- [121] Taormina G., Sciancalepore C., Messori M., Bondioli F., (2018), “3D printing processes for photocurable polymeric materials: technologies, materials, and future trends”, Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials, 16(3), 151-160.
- [122] Web 26, (2024), <https://all3dp.com/2/resin-vs-filament-3d-printer-fdm-vs-sla/>, (Erişim Tarihi: 28/10/2024).
- [123] Web 27, (2024), <http://www.lezerszinter.hu/>, (Erişim Tarihi: 28/10/2024).

- [124] Pervaiz S., Qureshi T. A., Kashwani G., Kannan S., (2021), “3D printing of fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: a status review”, *Materials*, 14, 4520.
- [125] Hao W., Liu Y., Zhou H., Chen H., Fang D., (2018), “Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites”, *Polymer Testing*, 65, 29-34.
- [126] Sathishkumar T. P., Satheeshkumar S., Naveen J., (2014), “Glass fiber-reinforced polymer composites – a review”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258-1275.
- [127] Liu Z., Zhang L., Yu E., Ying Z., “Modification of glass fiber surface and glass fiber reinforced polymer composites challenges and opportunities: from organic chemistry perspective”, *Current Organic Chemistry*, 19(11), 991-1010.
- [128] Web 28, (2024), <https://formbond.com/kompozit-3d-baski/>, (Erişim Tarihi: 28/10/2024).
- [129] Web 29, (2024), <https://blog.3dortgen.com/3d-gida-baskisi-mutfak-inovasyonunun-gelecegi-ve-etkileri/>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).
- [130] Web 30, (2024), <https://voksel.com.tr/blog/3d-yazici-ile-tekstil-imalati> , (Erişim Tarihi: 29/10/2024).
- [131] Moore D. G., Barbera L., Masania K., Studart A. R., (2020), “Three-dimensional printing of multicomponent glasses using phase-separating resins”, *Nature Materials*, 19(2), 212-217.
- [132] Lee J.-Y., An J., Chua C. K., (2017), “Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials”, *Applied Materials Today*, 7, 120-133.
- [133] Humbeeck J. Van, (2018), “Additive manufacturing of shape memory alloys”, *shape memory and superelasticity*, 4(2), 309-312.
- [134] Yang Y., Chen Y., Wei Y., Li Y., (2016), “3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9-12), 2079-2095.
- [135] Web 31, (2024), <https://www.dezeen.com/2012/10/25/noumenon-by-carl-desmet/>, (Erişim Tarihi: 28/10/2024).
- [136] Das A. K., Agar D. A., (2021), Rudolfsson M., Larsson S. H., “A review on wood powders in 3D printing: processes, properties and potential applications”, *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 241-255.
- [137] Estakhrianhaghighi E., Mirabolghasemi A., Zhang Y., Lessard L., Akbarzadeh A., (2020), “3D-printed wood-fiber reinforced architected cellular composites”, *Advanced Engineering Materials*, 22(11), 2000565.

- [138] Avci E., Acar M., Gonultas O., Candan Z., (2018), “Manufacturing biocomposites using black pine bark and oak bark”, *BioResources*, 13(1), 15.
- [139] Web 32, (2024), <https://tobuya3dprinter.com/expect-3d-printing-wood/>, (Erişim Tarihi: 28/10/2024).
- [140] Pugliese R., Beltrami B., Regondi S., Lunetta C., (2021), “Polymeric biomaterials for 3D printing in medicine: An overview”, *Annals of 3D Printed Medicine*, 2, 100011.
- [141] Ma H., Feng C., Chang J., Wu C., (2018), “3D-printed bioceramic scaffolds: From bone tissue engineering to tumor therapy”, *Acta Biomaterialia*, 79, 37-59.
- [142] Topuz M., Dikici B., Gavgalı M., Yilmazer H., (2018), “A review on the hydrogels used in 3D bio-printing”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(2), 68-75.
- [143] Owen D., Hickey J., Cusson A., Ayeni O. I., Rhoades J., Deng Y., Zhang Y., Wu L., Park H.-Y., Hawaldar N., Raikar P. P., Jung Y.-G., Zhang J., (2018), “3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer”, *Progress in Additive Manufacturing*, 3, 3-9.
- [144] Zocca A., Lima P., G nster J., (2017), “LSD-based 3D printing of alumina ceramics”, *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8(1), 141-148.
- [145] Gmeiner R., Deisinger U., Sch nherr J., Lechner B., Detsch R., Boccaccini A. R., Stampfl J., (2015), “Additive manufacturing of bioactive glasses and silicate bioceramics”, *Journal of Ceramic Science and Technology*, 6(2), 75-86.
- [146] Web 33, (2024), <https://zoelovellsmith.com/3d-printed-ceramics>, (Erişim Tarihi: 28/10/2024).
- [147] Turker K., Birol T., Yavaş A., Hasg l U., Yazıcı H., (2019), “Ultra yüksek performanslı lifli beton içeren kirişlerin eğilme davranışı”, *Teknik Dergi*, 30(1), 8777-8801.
- [148] Web 34, (2024), <https://www.thbbakademi.org/3-boyutlu-beton-baski/>, (Erişim Tarihi: 02/11/2024).
- [149] İmert, H., (2023), “Sürdürülebilir kent mobilyası üretiminde robotik 3d baskı: şehrini yazdır projesi  rneği”, *Tasarım Mimarlık ve Mühendislik Dergisi*, 3(1), 22-34.
- [150] Anwar A., Ahmad S., Husain S. M. A., Ahmad S. A., (2015), “Replacement of cement by marble dust and ceramic waste in concrete for sustainable development”, *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology (IJSET)*, 2(6), 496-503.

- [151] Ding T., Xiao J., Zou S., Wang Y., (2020), “Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand”, *Cement and Concrete Composites*, 113, 103724.
- [152] Olawumi M. A., Oladapo B. I., Ikumapayi O. M., Akinyoola J. O., ve J. O. Akinyoola, (2023), “Waste to wonder to explore possibilities with recycled materials in 3D printing”, *Science of The Total Environment*, 905, s. 167109.
- [153] Dodziuk H., (2016), “Applications of 3D printing in healthcare”, *Polish Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 13(3), 283-293.
- [154] Web 35, (2024), <https://www.dezeen.com/2020/01/03/lorenzo-spreafico-t1-prosthetic/>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).
- [155] Murphy S. V., Atala A., (2014), “3D bioprinting of tissues and organs”, *Nature Biotechnology*, 32(8), 773-785.
- [156] Web 36, (2024), <https://luxcreo.com/four-features-of-the-best-3d-printer-for-dental-models/>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).
- [157] Web 37, (2024), <https://directorsblog.nih.gov/2015/11/03/building-a-better-scaffold-for-3d-bioprinting/>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).
- [158] Web 38, (2024), https://en.wikipedia.org/wiki/3D_food_printing, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).
- [159] oşana D., Aymankuy ř. Y., (2023), “Industrial use of food waste”, *Journal of Tourism Leisure and Hospitality*, 5(1), 62-68.
- [160] Web 39, (2024), <https://www.naturalmachines.com/>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).
- [161] Web 40, (2024), <https://new.nsf.gov/science-matters/3d-food-printing-healthy-eating-delicious-desserts>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).
- [162] Düzgün D. E., etinkaya K., (2019), “Moda alanında 3 boyutlu baskı teknolojileri kullanımı”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(1), 19-31.
- [163] Taylor A., Unver E., (2014), “3D printing-media hype or manufacturing reality: textiles surface fashion product architecture.”, *Textile Centre of Excellence Conference*, Huddersfield, İngiltere, 17, şubat.
- [164] Web 41, (2024), <https://3d3teknoloji.com/blog/3d-baskili-ayakkabilar-adidas/>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).
- [165] Web 42, (2024), <https://www.futurefactories.com/works>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).

[166] Sandalcı N., (2016), “Türkiye’de Endüstriyel Tasarımcıların 3 Boyutlu Yazıcıları Kullanımları Hakkında Bir İnceleme”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[167] Web 43, (2024), <https://www.dunyahalleri.com/3d-yazici-ile-uretilen-ilk-ucak/>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).

[168] Web 44, (2024), <https://3dprint.com/124086/3d-printed-urbee-2-car/>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).

[169] Web 45, (2024), <https://www.arcelik.com.tr/blog/3d-yazici-ile-neler-yapilir>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).

[170] Web 46, (2024), <https://pixabay.com/tr/photos/tekneler-oyuncak-tekneler-3d-bask%C4%B1%C4%B1-7009838/>, (Erişim Tarihi: 29/10/2024).

[171] Kökhan S., Özcan U., (2018), “3D yazıcıların eğitimde kullanımı”, Bilim, Eğitim, Sanat ve Teknoloji Dergisi (BEST), 2(1), 81-85.

[172] İşbeceren M. Ü., Okuyucu Ş. E., (2024), “İç mimarlık ve çevre tasarımı eğitimde 3D yazıcının rolü: ölçekli kent mobilyası örneği Online Journal of Art and Design,12(4), 65-78.

[173] Petrick I. J., Simpson T. W., (2015) “3D printing disrupts manufacturing: how economies of one create new rules of competition”, Research Technology Management,56(6),12-16.

[174] Ren C., Hua D., Bai Y., Wu S., Yao Y., Wang W., (2022), “Preparation and 3D printing building application of sulfoaluminate cementitious material using industrial solid waste”, Journal of Cleaner Production,363, 132597.

[175] Srinivasan R., Giannikas V., McFarlane D., Thorne A., (2018), “Customising with 3D printing: the role of intelligent control”, Computers in Industry, 103, 38-46.

[176] Web 47, (2024), <https://sozluk.gov.tr/>, (Erişim Tarihi: 29/09/2024).

[177] Web 48, (2024), <https://www.ardatugla.com/kiremit-irmigi/>, (Erişim Tarihi: 29/09/2024).

[178] Web 49, (2024), <https://yukseltuglakiremit.com/urunler.aspx>, (Erişim Tarihi: 29/09/2024).

[179] Web 50, (2024), <https://www.stonewrap.com/urunler/kultur-tuglasi/loft>, (Erişim Tarihi: 29/09/2024).

[180] Web 51, (2024), <https://www.arkitera.com/haber/italyanin-langhe-tepelerine-bakan-bir-tugla-ev/>, (Erişim Tarihi: 29/09/2024).

[181] Türkçü H. Ç., (2022), “Yapım İlkeler-Malzemeler-Yöntemler-Çözümler”, 7. Baskı, Birsen Yayınevi.

- [182] Gürdal E., Tanaçan L., Toydemir N., (2019), “Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme”, 4. Baskı, Literatür Yayıncılık.
- [183] İpekçi C. A., Coşkun N., Karadayı T. T., (2017), “İnşaat sektöründe geri kazanılmış malzeme kullanımının sürdürülebilirlik açısından önemi”, Türk Bilim Araştırma Vakfı (TÜBAV) Bilim Dergisi, 10(2), 43-50.
- [184] Öztürk Y., Burdurlu E., (2021), “3D yazıcı ile yazdırılmış malzemede ahşap kaplama laminasyonunun eğilme direncine etkisi”, Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 23(3), 885-891.
- [185] Ayrılmış N., Kariz M., Kuzman M. K., (2019), “Effect of wood flour content on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament”, International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 24(7), 659-666.
- [186] Ayrılmış N., Kuzman M. K., Sernek M., Kariz M., (2018), “Use of wood in 3D printing technology- case studies”, 11th Annual International Scientific Conference, 283-289, Belgrade, Sırbistan-Karadağ, 26-28, Eylül.
- [187] Hwang J., Park D., Kim S., Rie D., (2022), “A study on the flame-retardant performance of recycled paper building materials manufactured by 3D printer”, Sustainability, 14 (8), 4798.
- [188] Spencer J. D., Dickens P. M., Wykes C. M., (1998), “Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding”, Institution of Mechanical Engineers, 212(3), 175-182.
- [189] Buchanan C., Gardner L., (2019), “Metal 3D printing in construction: a review of methods, research, applications, opportunities and challenges”, Engineering Structures, 180, 332-348.
- [190] Cruz P., Knaack U., Figueiredo B., de Witte D., (2017), “Ceramic 3D printing: the future of brick architecture”, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2-10, Hamburg, Almanya, 07-08, Temmuz.
- [191] Web 52, (2023), <https://houseofdus.com/work/#project-urban-cabin>, (Erişim Tarihi: 14/01/2023).
- [192] Uygunoğlu T., Barlas Özgüven S., (2019), “3D teknolojisiyle inşa edilen yapıların harç özelliklerinin araştırılması”, 4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, 684-692, Antalya, Türkiye, 11-14, Nisan.
- [193] Zuriguel I., Garcimartín A., Maza D., Pagnaloni L. A., Pastor M., (2005) “Jamming during the discharge of granular matter from a silo”, Physical Review E, 71, 051303.

- [194] Fowler R. T., Glastonbury J. R., (1959), "The flow of granular solids through orifices", Chemical Engineering Science, 10(3), 150-156.
- [195] Le T. T., Austin S. A., Lim S., Buswell R. A., Gibb A. G. F., Thorpe A., (2012), "Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete", Materials and Structures, 45(8), 1221-1232.
- [196] Yücel F., (2003), "Sürdürülebilir kalkınmanın sağlanmasında çevre korumanın ve ekonomik kalkınmanın karşılığı ve birlikteliği", Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 11(11), 100-120.
- [197] Özalp F., Yılmaz H. D., Yaşar Ş., ve Ş. Yaşar, "3D yazıcı teknolojisine uygun sürdürülebilir ve yenilikçi betonların geliştirilmesi", Hazır Beton, (149), 62-70.
- [198] Soda P. R. K., Dwivedi A., Sahana C. M., Gupta S., (2024), "Development of 3D printable stabilized earth-based construction materials using excavated soil: evaluation of fresh and hardened properties", Science of The Total Environment, 924, 171654.
- [199] Satoğlu B., (2008), "Yapı Elemanlarına Göre Yapı Sınıflandırma Sistemlerinin Karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [200] Beyhan F., Selçuk S. A., (2018), "3D printing in architecture: one step closer to a sustainable built environment", Lecture Notes in Civil Engineering, 6, 253-268.
- [201] Web 53, (2024), <https://www.dezeen.com/2013/12/02/first-architectural-application-of-3d-printing-adrian-priestman-6-bevis-marks/>, (Erişim Tarihi: 15/12/2024).
- [202] Laghi V., Gasparini G., (2023), "Explorations of efficient design solutions for wire-and-arc additive manufacturing in construction", Structures, 56, 104883.
- [203] Leonard W. J., (2018), "Case study on 3D printing implementation strategies", Öğrenci Projesi, California Polytechnic State University.
- [204] Web 54, (2024), <https://3dprint.com/187220/3d-printed-building-facades/>, (Erişim Tarihi: 15/12/2024).
- [205] Galjaard S., Hofman S., Ren S., (2014), "New opportunities to optimize structural designs in metal by using additive manufacturing", İçinde: Block P., Knippers J., Mitra N. J., Wang W. (Editörler), Advances in Architectural Geometry 2014, Springer, 79-93.
- [206] Web 55, (2024), https://www.architectmagazine.com/practice/material-focus_o, (Erişim Tarihi: 15/12/2024).
- [207] Web 56, (2024), <https://emergingobjects.com/project/picoroco-wall-in-translucent-orange/>, (Erişim Tarihi: 19/12/2024).

- [208] Web 57, (2024), <https://emergingobjects.com/project/sawdust-screen/>, (Erişim Tarihi: 20/12/2024).
- [209] Web 58, (2024), <https://emergingobjects.com/project/future-archeologies/>, (Erişim Tarihi: 19/12/2024).
- [210] Web 59, (2024), <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-sensory-ceramic-garden-for-chelsea-flower-show/>, (Erişim Tarihi: 21/12/2024).
- [211] Web 60, (2024), <https://emergingobjects.com/project/cool-brick/>, (Erişim Tarihi: 19/12/2024).
- [212] Web 61, (2024), <https://emergingobjects.com/project/seed-stitch/>, (Erişim Tarihi: 19/12/2024).
- [213] Web 62, (2024), <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-ceramic-tiles-for-wall-cladding-wasp-residency/>, (Erişim Tarihi: 21/12/2024).
- [214] Web 63, (2024), https://www.academia.edu/93138664/The_structural_feasibility_of_3D_printing_ho_uses_using_printable_polymers, (Erişim Tarihi: 15/12/2024).
- [215] Web 64, (2024), <https://emergingobjects.com/project/quake-column/>, (Erişim Tarihi: 21/12/2024).
- [216] Bedarf P., Dutto A., Zanini M., Dillenburger B., “Foam 3D printing for construction: a review of applications, materials, and processes”, Automation in Construction, 130, 103861.
- [217] Oymael S., (2018), Yapı Bilgisi 1, 1. Basım, Birsen Yayınevi.
- [218] Web 65, (2024), <https://www.hyperionrobotics.com/projects/pad-foundation>, (Erişim Tarihi: 22/12/2024).
- [219] Web 66, (2024), <https://www.sq4d.com/islandia-print/>, (Erişim Tarihi: 22/12/2024).
- [220] Web 67, (2024), <https://www.shimz.co.jp/en/topics/technology/item01/>, (Erişim Tarihi: 29/12/2024).
- [221] Web 68, (2024), <https://www.archdaily.com/806230/this-complex-concrete-column-was-made-using-3d-printed-formwork>, (Erişim Tarihi: 29/12/2024).
- [222] Gebhard L., Mata-Falc3n J., Anton A., Burger J., Lloret E., Reiter L., Dillenburger B., Gramazio F., Kohler M., Flatt R. J., Kaufmann W., (2020), “Aligned interlayer fibre reinforcement and post-tensioning as a reinforcement strategy for digital fabrication”, İçinde: Bos F. P., Lucas S. S., Wolfs R. J. M., Salet T. A. M. (Edit3rler), RILEM Bookseries, Springer, 622-631.

[223] Uygunoğlu T., Barlas Özgüven S., Topçu İ. B., ve İ. B. Topçu, (2019), “3D teknolojisi ile üretilen yapı malzemeleri ve özellikleri”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 3(3), 279-288.

[224] Web 69, (2024), <https://dbt.arch.ethz.ch/project/smart-slab/>, (Erişim Tarihi: 21/12/2024).

[225] Web 70, (2024), <https://www.dezeen.com/2019/12/22/apis-cor-worlds-largest-3d-printed-building-dubai/>, (Erişim Tarihi: 30/12/2024).

[226] Web 71, (2024), <https://3dprint.com/292186/saint-gobain-launches-parametric-3d-printed-stairs/>, (Erişim Tarihi: 30/12/2024).

[227] Web 72, (2024), <https://dbt.arch.ethz.ch/project/cadenza/>, (Erişim Tarihi: 30/12/2024).

[228] Web 73, (2025), <https://www.archdaily.com/1001512/3dpod-pavilion-obayashi>, (Erişim Tarihi: 15/01/2025).

[229] Web 74, (2024), <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-wall/>, (Erişim Tarihi: 30/12/2024).

[230] Web 75, (2022), <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-TECLA/>, (Erişim Tarihi: 22/12/2022).

[231] Web 76, (2025), <https://www.iconbuild.com/projects/house-zero>, (Erişim Tarihi: 04/01/2025).

[232] Web 77, (2025), <https://www.yankodesign.com/2024/06/10/this-pocket-friendly-home-in-kazakhstan-is-3d-printed-in-just-five-days/>, (Erişim Tarihi: 04/01/2025).

[233] Web 78, (2025), <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/nasa-opens-2-million-third-phase-of-3d-printed-habitat-competition/>, (Erişim Tarihi: 06/01/2025).

[234] Web 79, (2025), <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>, (Erişim Tarihi: 06/01/2025).

[235] Web 80, (2025), http://www.yhbm.com/En/News/news_inner/id/588, (Erişim Tarihi: 06/01/2025).

[236] Web 81, (2023), <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-gaia/>, (Erişim Tarihi: 14/01/2023).

[237] Web 82, (2025), <https://composites.umaine.edu/advanced-manufacturing/biohome3d/>, (Erişim Tarihi: 04/01/2025).

[238] Web 83, (2025), <https://www.ekoyapidergisi.org/gecmis-ve-gelecek-arasinda-bir-bag>, (Erişim Tarihi: 04/01/2025).

[239] Küçükerbaş M. N., (2021), “Üç boyutlu yazıcıların doğal hayatın sürdürülebilirliği alanında kullanımı”, Akademik Sanat, 13, 36-49.

[240] Web 84, (2025), <https://www.3dhousing05.com/>, (Erişim Tarihi: 04/01/2025).

[241] Web 85, (2023), <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla/>, (Erişim Tarihi: 14/01/2023).

[242] Web 86, (2025), <https://www.stirworld.com/see-features-czech-republic-builds-its-first-3d-printed-floating-house-in-32-hours>, (Erişim Tarihi: 06/01/2025).

[243] Web 87, (2022), <https://houseofdus.com/work/#project-urban-cabin>, (Erişim Tarihi: 22/12/2022).

[244] Web 88, (2025), <https://www.3dwasp.com/en/the-first-3d-printed-bridge-using-waste-materials-from-marble-processing/>, (Erişim Tarihi: 04/01/2025).

[245] Web 89, (2025), <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-pop-up-store-wasp-dior/>, (Erişim Tarihi: 04/01/2025).

[246] Kaplan Arşivi, (2023), “Görsel ve Doküman Arşivi”.

[247] Web 90, (2025), <https://mechenerji.com.tr/proje/bakirkoy-3d-insaati>, (Erişim Tarihi: 19/01/2025).

[248] Web 91, (2025), <https://iston.istanbul/iston-turkiyede-ilk-defa-3d-teknolojisi-ile-ev-uretti>, (Erişim Tarihi: 21/01/2025).

[249] Web 92, (2025), <https://ssayapi.net/portfolio/ibb-camlıca-park-ve-bahceler-mdr-3d-yazıcı-ile-ofis-yapımı/>, (Erişim Tarihi: 19/01/2025).

[250] İSTON Arşivi, (2025), “Görsel ve Doküman Arşivi”.

[251] Web 93, (2025), <https://www.linkedin.com/in/cenk-g%C3%B6kcan-57161726/recent-activity/all/>, (Erişim Tarihi: 20/01/2025).

ÖZGEÇMİŞ

Şevval KAPLAN, 2017 yılında Maltepe Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümü'nde lisans eğitimine başlamıştır. 2021 yılında lisans eğitimini bölüm üçüncüsü olarak başarıyla tamamlamış ve 2022 bahar döneminde Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı Yapı Bilgisi Programı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Aynı zamanda, 2021 yılında Atatürk Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi İşletme Yönetimi Programı'nda ön lisans eğitimine başlamış ve bu eğitimini 2023 yılında tamamlamıştır. 2021 yılından itibaren özel sektörde mimar olarak görev yapmaktadır.

TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

- [1] Kaplan Ş., Coşgun N., (2023), “3 boyutlu (3D) yazıcı teknolojisinin yapı sektöründe kullanımının örnek yapılar üzerinden incelenmesi”,11. Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi (ICAR), 804-813, Ankara, Türkiye, 25 – 26, Temmuz.
- [2] Pakdamar F., Kaplan Ş., Coşgun N., (2023), “3D baskılı beton kompozit duvar panellerinin standart yangın koşulundaki duvar iç yüzey sıcaklık değişiminin bulanıklaştırılması”, Uluslararası 3D Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi, 7(3), 485–498.

EKLER

Ek-A: Röportaj Soruları.

Ek-B: İnsan Araştırmaları Etik Kurulu Kararı.

Ek-A: Röportaj Soruları

Belge A.1: Alan çalışmasında kullanılan uzmanlara sorulan röportaj soruları [246].



RÖPORTAJ SORULARI

Bu röportaj soruları, Gebze Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü, Yüksek Lisans Programında devam eden “Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisinin Yapı Sektöründe Kullanım Potansiyeline Yönelik Araştırma” başlıklı yüksek lisans tez çalışmasına veri sağlamak üzere hazırlanmıştır ve üniversitenin resmi izni ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmanın amacı, 3D yazıcı teknolojisinin yapı malzemesi, yapı bileşeni, yapı elemanı ve yapı üretimi açısından yapı sektöründeki potansiyelini belirleme ve bu teknolojinin mevcut inşaat süreçlerine nasıl entegre edilebileceğini anlamaya yönelik çalışmalara katkı sağlamaktır. Kişisel önem arz edebilecek bilgilerin hiçbirinin paylaşılmayacağını taahhüt ederiz.

Genel Sorular

1. Mevcut mesleki unvanınızı ve hangi alanda çalıştığınızı paylaşır mısınız?
2. Mesleki olarak toplamda kaç yıllık deneyime sahipsiniz?
3. 3D baskı teknolojisine üzerine çalışmalarınıza ne zaman başladınız ve bu alandaki deneyim süreniz nedir?

3D Baskı Tekniğinin Tasarım Aşamaları ve Üretim Aşamaları

1. Tasarım ve modelleme aşamasında hangi programlar kullanılmaktadır?
2. 3D baskı tekniği ile üretim yapmak tasarım sürecinde ne gibi esneklikler sağlamaktadır?
3. Temelden çatıya uygulama aşamaları nelerdir, kısaca bahsedebilir misiniz?
4. Çatı/Döşeme örtü sistemi nasıl ve hangi malzemeler kullanılarak uygulanmaktadır?
5. Elektrik ve sıhhi tesisat gibi sistemler nasıl çözümlenmektedir?
6. Yapılardaki izolasyon nasıl sağlanmaktadır? Yalıtım malzemeleri olarak hangi malzemeler kullanılmaktadır?
7. Üretilen yapıların ısıtma ve soğutma ihtiyacı nasıl karşılanmaktadır?
8. Baskısı tamamlanmış yapının iç ve dış cephelerinde kaplama yapılıyor mu? Özellikle ıslak hacimlerde nasıl uygulamalar yapılmaktadır?
9. 3D baskılı bir yapı üretmek için nitelikli işçi ihtiyacı nedir? Çalışan işçilerde ne gibi nitelik ve nicelikler aranmaktadır?
10. Ortalama 100 metrekarelik bir yapının projelendirme ve inşaa süresi nedir?
11. 3 boyutlu baskı tekniğiyle en fazla ne kadar yükseklikte ve kaç katlı yapılar yapılabilmektedir?
12. Belirli bir baskı alanı var mıdır? Var ise bu baskı alanı nedir?
13. Üretilen yapıların taşıyıcı sistemi nedir?
14. Bu üretim tekniğinde geçilebilecek maksimum açıklık nedir?
15. Duvar ve döşemelerde geniş boşluklar açılabilir mi?
16. Baskı sürecinde kalıp kullanımı gerekli midir? Eğer gerekli ise, kalıplar hangi aşamalarda kullanılır?
17. Bu üretim tekniği ile, elemanları ayrı ayrı üretilip, prefabrik yapı üretmek mümkün müdür?
18. Geleneksel yapı üretim tekniklerine göre, deprem dayanıklılığı hakkında ne söylenebilir? Bu üretim tekniği, deprem bölgelerinde veya afet sonrası geçici barınma alanları üretimde kullanılabilir mi?

3D Baskıda Kullanılan Malzemeler

19. 3D baskı tekniği için kullanılan malzemeler nelerdir? (Bu malzemeler kolay tedarik edilebilir mi?)
20. Kullanılan malzemelerin genel özellikleri nedir?
21. Ürettiğiniz baskı makinesinde Kullanılabilen malzeme ürettiğiniz makineye özgü bir yapı malzemesi midir?

3D Baskının Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi

22. Geleneksel yapı üretim teknikleri ile 3D baskı tekniği arasındaki karbon ayak izi farkı nedir? Karbon ayak izini azaltmak için ne tür yöntemler kullanıyorsunuz?
23. Kullanılan harç karışımındaki malzemelerin ne kadarı geri dönüştürülebilir veya ne kadarı geri dönüştürülmüş malzemelerden elde edilmektedir?

Belge A.1: Devamı.



24. Harç karışımında kullanılan kimyasallar geleneksel yolla dökülen beton harç karışımına göre kullanım oranı nedir? Kullanılan kimyasalların çevreye zararlı etkileri var mıdır?
25. Yapı ömrünü tamamladığı zaman tekrardan doğaya karışabilir mi?
26. Üretilen yapılarda açığa çıkan yapısal atık var mıdır? Geleneksel yapı üretim tekniklerine göre yapısal atık oranında ne gibi azalmaları sağlanır?

3D Baskının Maliyet Açısından Değerlendirilmesi

27. İnşaat ve nakliye maliyetleri açısından değerlendirildiğinde geleneksel yöntemlere göre maliyet durumu nedir?

Ek-B: İnsan Araştırmaları Etik Kurulu Kararı

Belge B.1: Alan çalışması yapmak için alınan İnsan Araştırmaları Etik Kurul Kararı sonucu [246].



T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
İnsan Araştırmaları Etik Kurulu

Sayı : E-43633178-199-181666
Konu : İnsan Araştırmaları Etik Kurulu Şevval
KAPLAN()

07.01.2025

Sayın Şevval KAPLAN

İlgi : 25.12.2024 tarihli ve E-180235 sayılı yazınız.

İlgi yazıya istinaden yapmış olduğunuz başvuru, Üniversitemiz İnsan Araştırmaları Etik Kurulu'nun 06.01.2025 tarih ve 2025/01-02 oturum sayılı toplantısında incelenmiş ve değerlendirilmiştir. "Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisinin Yapı Sektöründe Kullanım Potansiyeline Yönelik Araştırma" konulu araştırma kapsamında kullanacağınız belgelerin etik açısından bir sakıncası olmamakla birlikte, tarafınıza iletilen bu yazıyı "Etik Uygunluk" belgesi niteliğinde değerlendirmenizi rica ederim.

Prof.Dr. Mahmut DURMUŞ
Başkan

Ek:İnsan Araştırmaları Etik Kurulu Kararı (1 Adet)

Bu belge, güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.

Doğrulama Kodu :BSEB8985HP Pin Kodu :92752

Adres:GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, İnsan Araştırmaları Etik Kurulu, 41400,

Gebze/KOCAELİ

Telefon:+90 262 605 (10 00) Faks:+90 262 653 84 90

Elektronik Ağ:www.gtu.edu.tr

Belge Takip Adresi : <https://turkiye.gov.tr/ebd?cK=5466&cD=BSEB8985HP&cS=181666>

Bilgi için: Şeyma Gürel Dalkıran

Unvanı: Raportör



Belge B.2: Ek: İnsan Araştırmaları Etik Kurulu Kararları [246].

	T.C. GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ İNSAN ARAŞTIRMALARI ETİK KURULU KARARLARI
Oturum Tarihi: 06.01.2025	Oturum Sayısı: 2025/01

KARAR:01-02) Üniversitemiz Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı öğrencisi Şevval KAPLAN' ın 25.12.2024 tarihli ve 180235 sayılı başvurusu görüşüldü ve aşağıdaki şekilde değerlendirildi.

Başvuru Tarihi:	25.12.2024
Protokol Sıra No:	01-01
Sorumlu Araştırmacıların Adı:	Şevval KAPLAN-Prof. Dr. Nilay COŞGUN
Çalıştığı Birim:	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Proje Çalışmasının Adı:	"Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisinin Yapı Sektöründe Kullanım Potansiyeline Yönelik Araştırma"
Toplantı Tarihi ve Oturum Sayısı:	06.01.2025 – 2025/01-02

Değerlendirme:

Araştırmanın Amacı:

Bu tez çalışmasının amacı, 3D yazıcı teknolojisinin yapı malzemesi, yapı bileşeni, yapı elemanı ve yapı üretimi açısından yapı sektöründeki potansiyelini belirlemek ve bu teknolojinin mevcut inşaat süreçlerine nasıl entegre edilebileceğini anlamaktır. Sosyal, ekonomik ve çevresel açıdan değerlendirilen mevcut çalışmalardan farklı olarak, bu araştırma 3D yazıcı teknolojisinin yapı malzemeleri, yapı bileşenleri ve yapı elemanları üzerindeki uygulanabilirliğini, üretim süreçleri ve saha gözlemleriyle incelemeyi amaçlamaktadır.

Araştırmanın Gerekçesi:

Yapılan çeşitli bilimsel çalışmalar incelendiğinde, gelişen yeni bir teknoloji olan 3D yazıcı teknolojisinin mimarlık eğitiminde kullanım potansiyelleri, mobilya tasarımı, konut üretimi, yapı malzemesi geliştirilmesi ve uygulanması gibi konuların ele alındığı görülmektedir. Ancak, 3D yazıcıların yapı sektöründe yapı malzemesi, yapı bileşeni, yapı elemanı ve yapının kendisinin üretimine katkısını içeren çok boyutlu bir araştırmaya rastlanmamıştır. Bu kapsamda, 3D yazıcı teknolojisinin yapı sektöründe etkin bir şekilde kullanılabilmesi için gerekli olan faktörler ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Araştırmanın Yöntemi:

Çalışmada, ulusal ve uluslararası tezler, makaleler, bildiriler, kitaplar, dergiler, yayınlar ve 3D baskı firmalarının web sayfaları kapsamlı bir şekilde incelenmiş; ayrıca üretim tesisleri ile uygulama örneklerinin saha çalışmaları yoluyla gözlemlenmesi ve uzmanlarla yapılan görüşmelerin çalışmaya dahil edilmesi planlanmıştır.

Çalışmaya Katılacak İnsanlarda Aranacak Özellikler:

- Yapı sektöründe 3D yazıcıları kullanan veya araştıran kişiler,
- 3D yazıcıyla üretilebilecek malzemeler konusunda bilgi sahibi kişiler,
- 3D yazıcıların tasarım ve inşaat süreçlerine entegrasyonunu bilen uzmanlar,
- 3D yazıcıyla yapılmış projelerde saha çalışması yapmış veya üretim süreçlerine katılmış kişiler,
- 3D yazıcı ile inşa edilmiş yapıların saha uygulamalarında yer almış, süreçteki zorluklar ve çözümler hakkında bilgi sahibi kişiler tercih edilmiş.

Kullanılacak Psikolojik ve Teknik Yöntemler:

Çalışmada psikolojik veya teknik bir yöntem kullanılmayacak; yalnızca araştırma sorularına verilen yanıtlar değerlendirmeye alınacaktır.

Etik Özet:

Araştırmaya katılan kişilerin kişisel bilgileri gizli tutulacak, sonuçlar yalnızca akademik amaçlarla kullanılacak ve üçüncü kişilerle paylaşılmayacaktır. Veri toplama, analiz, tez yazımı ve makale yayımlama süreçlerinde 'Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi' ne uygun hareket edilecektir.

Proje Yöneticisi: Şevval KAPLAN-Prof. Dr. Nilay COŞGUN

Proje Araştırmacısı: -

Projenin Yönetileceği Kuruluş: -

Belge B.2: Devamı.

	T.C. GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ İNSAN ARAŞTIRMALARI ETİK KURULU KARARLARI
Oturum Tarihi: 06.01.2025	Oturum Sayısı: 2025/01
Olası Tehlikeleri: -	
Araştırmanın nasıl finanse edileceği / Finanse eden kurum: -	
Araştırma Bütçesi:-	
İnsan Araştırmaları için kullanılacak tutar:-	
<u>K A R A R</u>	
Kurul Üyelerinin bu çalışma ile ilişkisinin olup olmadığı incelenmiş olup, Kurul üyelerinin bu çalışma ile ilgili bir bağlantısı olmadığı görülmüştür.	
☒	Uygun Üniversitemiz Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı öğrencisi Şevval KAPLAN' ın “Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisinin Yapı Sektöründe Kullanım Potansiyeline Yönelik Araştırma” başlıklı projesi kapsamında kullanmak üzere Etik Kurulumuza sunduğu belgeler kurul üyeleri tarafından incelenmiş ve bir sakınca görülmemiş olup kullanımı için etik onayı verilmesine toplantıya katılanların oybirliği ile karar verildi.
☐	Uygun Değildir (Gerekçesi)
☐	Düzeltilmesi Gerekir yada Yeniden Düzenlenmesinden sonra tekrar başvurulması yönünde tavsiye kararı (Tavsiye edilen düzeltmeler ve düzenlemeler)