

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİMARİ YAPIMDA ROBOT TEKNOLOJİLERİ
KULLANIMININ İRDELENMESİ VE
GELECEKTEKİ KULLANIMLARININ
ÖNGÖRÜLMESİ**

Elmas PAK

Temmuz, 2021

İZMİR

MİMARİ YAPIMDA ROBOT TEKNOLOJİLERİ KULLANIMININ İRDELENMESİ VE GELECEKTEKİ KULLANIMLARININ ÖNGÖRÜLMESİ

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Bilgisi Yüksek Lisans Programı**

Elmas PAK

Temmuz, 2021

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ELMAS PAK tarafından DOÇ. DR. AHMET VEFA ORHON yönetiminde hazırlanan “MİMARİ YAPIMDA ROBOT TEKNOLOJİLERİ KULLANIMININ İRDELENMESİ VE GELECEKTEKİ KULLANIMLARININ ÖNGÖRÜLMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ahmet Vefa ORHON

Yönetici

Doç. Dr. Müjde ALTIN

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Yenal AKGÜN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın gerçekleştirilmesinde bana çok yardımcı olan değerli hocam Doç.Dr. Ahmet Vefa ORHON'a ve hiçbir zaman desteklerini benden esirgemeyen ailem Şerife, Uğur ve Barış PAK'a, manevi desteklerini her zaman hissettiren arkadaşlarıma ve üzerimde emeği olan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Elmas PAK



MİMARİ YAPIMDA ROBOT TEKNOLOJİLERİ KULLANIMININ İRDELENMESİ VE GELECEKTEKİ KULLANIMLARININ ÖNGÖRÜLMESİ

ÖZ

Üretimden hizmet sektörüne kadar çoğu alanda ya sürecin içinde ya da sürecin kendisi olan robotik teknolojileri uzun zamandır üzerinde çalışılan konular arasındadır. Dünya nüfusunun eşi görülmemiş bir şekilde artması, konut ihtiyacının hızla artması, konfor alanlarının gelişmesi ve değişmesi gibi nedenler hızlı, ekonomik, sürdürülebilir ve güvenli inşaat yöntemlerine ihtiyaç duyulmasına yol açmıştır. Böylece, insanoğlunun barınaklarını kendileri inşa etmeye başladığından bu yana pek değişmeyen geleneksel inşaat tekniklerine alternatif arayışlar ortaya çıkmıştır. Daha hızlı inşa edilebilen, ulaşılması zor formlara ekstra maliyetler ödmeden ve atık üretimi daha az olan yapılar inşa etme amaçları ile mimari inşaat süreçlerinde robotların yer alması üzerine çalışmalar hızlanmıştır.

İnşa robotlarının yapım süreçlerine dahil olmasındaki en önemli nedenler; kesin ve net üretimler, insan eliyle yapılması mümkün olmayan formların oluşturulabilmesi, doğru ve hatasız yapım süreçleri, yeni malzeme üretimleri şeklinde sıralanabilir. Bunlara ek olarak; planlan zaman ve maliyete uygun, hızlı bir yapım yöntemi olması inşa robotlarının araştırmalara konu olmasına sebep olmuştur. Bu çalışmada, robotların, inşa robotların tarihçesi, sınıflandırmaları ve üretim teknolojileri hakkında bilgi verilmiştir. İnşa robotları ile üretilmiş 22 adet örnek üretim teknolojilerine göre incelenmiştir. Çalışmanın sonunda ise, yapıların incelenmesi sonucunda elde edilen veriler ışığında robot teknolojilerinin mimari yapım süreçlerinde kullanılmasının üretim yöntemleri ve üretim yaklaşımları gibi başlıklarda karşılaştırmaları yapılmıştır. Daha sonra, konu ile ilgili gelecek süreçlere dair öngörülerde bulunulmuştur.

Anahtar kelimeler: İnşa robotları, robotik yapım süreçleri, eklemeli üretim

UTILIZATION OF ROBOTICS IN BUILDING CONSTRUCTION AND FORESEEING THEIR FUTURE USAGE

ABSTRACT

Robotic technologies, which are either in the process or the process itself, are among the subjects that have been studied for a long time in many areas from production to service sector. Reasons such as the unprecedented increase in the world population, the rapid increase in the need for housing, the development and change of comfort areas have led to the need for fast, economical, sustainable and safe construction methods. Thus, the search for alternatives to the traditional construction techniques has emerged. Studies on robots in architectural construction processes have accelerated with the aim of constructing structures that can be built faster, to get hard-to-reach forms without paying extra money and with less waste generation.

The most important reasons for the inclusion of construction robots in the construction processes are; precise and clear productions, creation of forms that cannot be made by human hands, correct and error-free production processes, new material productions. Additionally; this fast construction method that is appropriate to be finished in the planned time and cost has caused the construction robots to be the subject of research. In this study, the history and classifications of robots and construction robots and the production technologies of construction robots are given. 22 samples produced by construction robots were analyzed according to their production technologies. Consequently, comparisons of the use of robot technologies in architectural construction processes are made according to production methods and production approaches. Then, predictions were made for future processes related to the subject.

Keywords : Construction robots, robotic construction processes, additive manufacturing

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xix
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
1.1 Problemin Tanımlanması	2
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	3
1.3 Araştırma Yöntemi	4
1.4 Çalışmanın Organizasyonu.....	4
BÖLÜM İKİ – GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE ROBOTLAR VE MİMARİDE KULLANIMLARI	6
2.1 Robot ve İnşa Robotiği Kavramları	6
2.2 Robotların Tarihçesi ve Yapım Süreçlerine Girişleri	7
2.3 İnşa Robotlarının Tarihçesi ve Sınıflandırılması	12
2.3.1 Üretim Tekniklerine Göre İnşa Robotları.....	15
2.3.1.1 Eklemeli Üretim.....	15
2.3.1.2 Çıkarmalı Üretim	15
2.3.1.3 Birleştirmeli Üretim	16
2.3.1.4 Biçimlendirmeli Üretim	16
2.3.1.5 Döküm/ Kalıplama ile Üretim	16
2.3.2 Kontrol Mekanizmalarına Göre İnşa Robotları	17
2.3.2.1 Teleoperasyon Robotlar	17
2.3.2.2 Programlanmış Robotlar	18

2.3.2.3 Bilişsel Robotlar.....	19
2.3.3 Üretildikleri Formlara Göre İnş Robotları	19
2.3.3.1 Biyomorfik Robotlar	20
2.3.3.2 Mekanomorfik Robotlar.....	20
2.3.3.3 Polimorfik Robotlar	21
2.3.3.4 Amorfik Robotlar	21
2.3.4 Mimari Yapım Süreçlerindeki Rollerine Göre İnş Robotları	22
2.3.4.1 Tek Görevli Robotlar	22
2.3.4.2 Çok Görevli Robotlar.....	23
2.3.5 İnsan İlişkilerine Göre İnş Robotları	24
2.3.5.1 Yarı-Otonom Robotlar	24
2.3.5.2 Otonom Robotlar	25
2.3.6 Üretim Mekanizmalarına Göre İnş Robotları	26
2.3.6.1 Vinç Sistemleri.....	27
2.3.6.2 Kablo Destekli Sistemler	28
2.3.6.3 Sürü Yaklaşımlı Sistemler	29
2.3.6.4 Robotik Kol Sistemler.....	30
2.3.6.5 Katlamalı Sistemler.....	31
2.3.6.6 Dron Sistemleri	31
2.3.7 Hareket Mekanizmalarına Göre İnş Robotları	33
2.3.7.1 Kartezyende Çalışan Robotlar	33
2.3.7.2 Silindirik Çalışan Robotlar	34
2.3.7.3 Delta Çalışan Robotlar	34
2.3.7.4 4 ve 6 eksenli Çalışan Robotlar	35
2.3.8 Üretim Yaklaşımlarına Göre İnş Robotları.....	35
2.3.8.1 Yerinde Yapım.....	35
2.3.8.2 Fabrikada Yapım.....	36

BÖLÜM ÜÇ – İNŞA ROBOTLARININ ÜRETİM TEKNİKLERİNE GÖRE MİMARİ YAPIM TEKNOLOJİLERİ VE KULLANIM KRİTERLERİ.....37

3.1 Mimari Yapım Süreçlerinde Eklemeli Üretim Tekniği.....	37
--	----

3.1.1 3B Yazıcı Kavramı	37
3.1.1.1 3B Yazıcıların Tarihçesi ve Mimarlığa Girişi	38
3.1.1.2 3B Yazıcıların Baskı Yöntemleri	40
3.1.1.2.1 Eritilmiş Biriktirme Modellemesi (Fused Deposition Modelling- FDM)	40
3.1.1.2.2 Stereolitografi (SLA)	40
3.1.1.2.3 Selektif Lazer Sinterleme (SLS)	40
3.1.1.2.4 Toz ile Yapıştırma Teknolojisi (Binder Jetting Technology) .	41
3.1.1.2.5 PoliJet Teknolojisi (PolyJet Technology)	41
3.1.1.3 3B Yazıcıların Baskı Basamakları	41
3.1.1.4 3B Yazıcılarda Kullanılan Malzemeler	42
3.1.1.4.1 Akrilo Nitril Bütadiyen Sitren- ABS.....	42
3.1.1.4.2 Polilaktik Asit- PLA.....	42
3.1.1.4.3 Laybrick	43
3.1.1.4.4 Polivinil Alkol- PVA.....	44
3.1.1.4.5 Laywood.....	44
3.1.1.4.6 Yüksek Darbe Dayanımlı Polistren- HIPS.....	45
3.1.1.4.7 T Glase- PETT	45
3.1.1.4.8 Metaller ve Alaşımlar.....	45
3.1.2 Eklemeli Üretim Tekniğinin Mimaride Kullanımı	46
3.1.2.1 Mimari Yapım Süreçlerinde Kullanılan Eklemeli Üretim Tekniği ile Yazdırılan Malzemeler.....	46
3.1.2.1.1 Katı Malzemelere Dayalı Eklemeli Üretim.....	48
3.1.2.1.2 Viskoz Ekstrüzyon ile Eklemeli Üretim.....	49
3.1.2.1.3 Toz Malzemelere Dayalı Eklemeli Üretim	50
3.1.2.1.4 Sıvı Malzemelere Dayalı Eklemeli Üretim	51
3.1.2.2 Mimari Yapım Süreçlerinde Eklemeli Üretim Tekniği Kullanabilmek için Malzeme Kriterleri.....	51
3.1.2.2.1 Pompalanabilirlik	52
3.1.2.2.2 Akışkanlık	52
3.1.2.2.3 İnşa Edilebilirlik.....	53
3.1.2.2.4 Kurlenme Zamanı.....	53

3.1.2.3 Eklemeli Üretim Tekniğinde Kullanılan Hammaddeler	53
3.1.2.3.1 Seramik Esaslı Malzemeler	54
3.1.2.3.1 Çimento Esaslı Malzemeler	54
3.1.2.3.2 Polimer Esaslı Malzemeler	55
3.1.2.3.3 Metalik Malzemeler	56
3.1.3 Mimari Yapım Süreçlerinde Kullanılan Eklemeli Üretim Teknolojileri.....	57
3.1.3.1 Contour Crafting	59
3.1.3.2 D-Shape.....	60
3.1.3.3 Kamer Maker	62
3.1.3.4 WinSun	63
3.1.3.5 Concrete Printing	63
3.1.3.6 3D Concrete Printing	66
3.1.3.7 Mesh Mould	69
3.1.3.8 Mini Builders	69
3.1.3.9 WASP (World's Advanced Saving Project)	72
3.1.3.10 Emerging Objects	74
3.1.3.11 Singapur 3B Baskı Merkezi	75
3.1.3.12 ApisCor	76
3.1.3.13 HuaShang Tengda	77
3.1.3.14 MX3D	78
3.1.3.15 BatiPrint	79
3.1.4 Mimari Yapım Süreçlerinde Kullanılan Eklemeli Üretim Tekniğinin Avantajları ve Dezavantajları	80
3.1.4.1 Avantajlar.....	80
3.1.4.2 Dezavantajlar	84
3.2 Mimari Yapım Süreçlerinde Çıkarmalı Üretim Tekniği	86
3.2.1 CNC Makinesinin Kodlanması.....	87
3.2.2 CNC Makinesinin Türleri	88
3.2.2.1 3 Eksenli İşleme	88
3.2.2.2 3+1 veya 3+2 Eksenli İşleme.....	88
3.2.2.3 4 Eksenli İşleme	89
3.2.2.4 5 Eksenli İşleme	89

3.3 Mimari Yapım Süreçlerinde Birleştirmeli Üretim Tekniği	89
3.4 Mimari Yapım Süreçlerinde Biçimlendirmeli Üretim Tekniği	90
3.5 Mimari Yapım Süreçlerinde Döküm/Kalıplama ile Üretim Tekniği	91

BÖLÜM DÖRT – İNŞA ROBOTLARI İLE ÜRETİLMİŞ YAPILARIN İNCELENMESİ.....93

4.1 Eklemeli Üretim Tekniği ile İnşa Edilmiş Yapılar.....	94
4.1.1 Radiolaria Pavyonu.....	94
4.1.2 Lewis Grand Oteli.....	97
4.1.3 Floatsam & Jetsam Pavyonları	100
4.1.4 Dubai Gelecek Vakfı Genel Merkezi	104
4.1.5 HuaShang Tengda Konağı.....	107
4.1.6 Apis Cor Beton Evi.....	110
4.1.7 3D Housing 05.....	114
4.1.8 MX3D Yaya Köprüsü.....	117
4.1.9 Trabaculæ Pavyonu.....	120
4.1.10 Gaia Evi	124
4.1.11 Dubai Belediye Binası	128
4.1.12 Boashan Yaya Köprüsü	131
4.1.13 TECLA	137
4.2 Çıkarmalı Üretim Tekniği ile Üretilmiş Yapılar	140
4.2.1 Zincir Eğrisi Pavyonu.....	140
4.2.2 Devlet Bahçesi Sergi Salonu	142
4.3 Birleştirmeli Üretim Tekniği ile Üretilmiş Yapılar	146
4.3.1 The Vertical Village Enstelasyonu	146
4.3.2 The Sequential Roof	150
4.3.3 BUGA Ahşap Pavyonu	154
4.4 Biçimlendirmeli Üretim Tekniği ile Üretilmiş Yapılar	158
4.4.1 ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2015-16.....	158
4.4.2 ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2016-17	161
4.4.3 BUGA Fiber Pavyonu	164

4.5 Döküm/Kalıplama Üretim Tekniği ile Üretilmiş Yapılar	168
4.5.1 DFAB Evi	168
BÖLÜM BEŞ – SONUÇLAR.....	175
KAYNAKLAR	188



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 İnşaat robotiğinin kronolojik gelişimi.....	14
Şekil 2.2 Filament yapılar için mobil üretim robotu	18
Şekil 2.3 BigDog isimli robot	20
Şekil 2.4 KUKA fiber bileşenler için kullanılan robot	21
Şekil 2.5 Kilobot adlı sürü robotlar.....	22
Şekil 2.6 Malzeme taşıyan altı serbestlik dereceli robotik vinç.....	23
Şekil 2.7 3 katmanı aynı anda 3B yazdırma teknolojisi ile inşa edebilen robotik kol	24
Şekil 2.8 SAM100 tuğla örme robotu	25
Şekil 2.9 Tybot isimli otonom inşaat demiri bağlama robotu.....	26
Şekil 2.10 Üretim tipleri.....	27
Şekil 2.11 Gantenbein Şaraphanesi'nin robotik kol ile üretilmiş cephesinin gösterimi	30
Şekil 2.12 İnşaat sektöründe kullanılan dronlar	33
Şekil 2.13 Kartezyen düzlemde hareket eden robot örneği.....	34
Şekil 2.14 Silindirik koordinat sisteminde çalışan robotun çalışma prensibini gösteren temsili görüntü	34
Şekil 2.15 Delta robot çalışma prensibini gösteren temsili görüntü	34
Şekil 2.16 6 eksenli robotun çalışma prensibini gösteren görüntü	35
Şekil 3.1 3B yazdırma aşamaları.....	42
Şekil 3.2 PLA ve ABS ile üretilmiş aynı ürünün karşılaştırılması	43
Şekil 3.3 Soldan sağa sırasıyla 160-180-200-220°C'lerde Laybrick'ten üretilmiş nesnelerin görünüşleri	44
Şekil 3.4 Laywood kullanarak basılmış kutu örneği	45
Şekil 3.5 Yalnızca PLA kullanılarak basılmış ürün ve PLA-metal tozu karışımından basılmış ürünler.....	46
Şekil 3.6 Eklemeli üretim malzemelerinin halleri.....	47
Şekil 3.7 Lüle deliğinin şekline bağlı olarak değişen yapısal boşluklar	48

Şekil 3.8 Mediated Matter tarafından üretilmiş G3DP yazıcısı ile basılmış cam ürünler	49
Şekil 3.9 Kil kullanılarak 3B yazıcı ile basılmış modeller	50
Şekil 3.10 Malzemenin doğru bir şekilde basılması için gerekli olan parametreler ..	51
Şekil 3.11 Malzemenin baskıya uygunluğunun kontrolü için hazırlanmış yöntem ...	52
Şekil 3.12 Yanlış basılmış katmanlar arası oluşan boşluklar	53
Şekil 3.13 Bevis Marks ofis binası polimer bazlı malzeme kullanılarak basılmış çatı eleman birleşimleri.....	56
Şekil 3.14 Eklemeli üretim teknolojisi ile yapı yazdırma fazlarının şematik gösterimi	58
Şekil 3.15 Vinç benzeri destek ile Contour Crafting teknolojisi ve bu teknoloji kullanılan yan ve üst mala gösterimi	60
Şekil 3.16 D-Shape yazıcının şematik gösterimi	61
Şekil 3.17 Kamer Maker baskı kolu.....	62
Şekil 3.18 3B baskı yöntemiyle üretilmiş 5 katlı yapı	63
Şekil 3.19 12 adet işlevsel boşluklara sahip “Wonder Bench” isimli bank	64
Şekil 3.20 Beton baskı vinci.....	65
Şekil 3.21 Beton baskı yazdırma elemanları.....	65
Şekil 3.22 4 adet çift eğrilikli katmanlı yapı bileşeni.....	66
Şekil 3.23 3B beton baskı yazıcısının elemanları	66
Şekil 3.24 3B beton baskı için optimum yazdırma deseni denemeleri	68
Şekil 3.25 3B beton baskı süreci	68
Şekil 3.26 Mesh Mould baskı yöntemi ile yapı elemanı üretimi	69
Şekil 3.27 Kavrama robotu parçaları ve kavrama robotunun ofsetlemesinin şematik gösterimi.....	71
Şekil 3.28 Temel robotu parçaları ve vakum robotu parçaları.....	71
Şekil 3.29 WASP Big Delta yazıcısı.....	73
Şekil 3.30 WASP Crane yazıcısı.....	73
Şekil 3.31 Emerging Object adlı şirketin 3B yazdırma teknolojisi ile denediği yüzey tasarımları.....	74
Şekil 3.32 Emerging Object adlı şirketin Bloom adlı çalışması	75

Şekil 3.33 SC3DP yazıcıları (a) dört eksenli vinç benzeri ve (b) altı eksenli otomatik kol yazıcıları.....	76
Şekil 3.34 Apis Cor üretimi boşluklu duvar ve Apis Cor yazdırma robotunun dikey sabit taşıyıcısı duvarlar arasındaki cam elyaf destekler	77
Şekil 3.35 HuaShang Tengda şirketinin 3B yazıcı ile ürettikleri villa.....	78
Şekil 3.36 MX3D 3B metal baskı robotu.....	79
Şekil 3.37 BatiPrint 3B yazdırma robot kolunun operatör tarafından kontrol edilmesi	80
Şekil 3.38 Geleneksel yapım yöntemleri ile yerinde yapılmış yapısal beton maliyet dağılımı.....	82
Şekil 3.39 Geleneksel yöntemler ile üretilmiş duvar ile 3B beton baskı teknolojisi ile üretilmiş duvarın süre grafiği	83
Şekil 3.40 NASA'nın sponsorluğunda 3B baskı ile altyapı çalışmaları projesinin öngörülen görseli.....	84
Şekil 3.41 Anoma şirketinin CNC makineleri ile yaptıkları üretimlerden örnek yüzeyler	87
Şekil 3.42 CNC makinesi prototip diyagramı	88
Şekil 3.43 WoodFlex 56 adlı birleştirme robotu.....	90
Şekil 3.44 ADD'nin üretim sürecini gösteren kavramsal şema	91
Şekil 3.45 Sol: bölgesel deformasyonla oluşturulan kalıp sistemi Sağ: Bölgesel deformasyonla oluşturulmuş prototip.....	92
Şekil 3.46 Sol üst: Esnek kalıbın üstten görünümü. Sol alt: Kalıbın şematik gösterimi; a) sert kutu; b) esnek metal; c) kalıbın yüksekliği boyunca hareket eden aktüatörlerin konumunu gösterir Sağ: Esnek tip kalıpla üretilmiş 2 m yüksekliğinde prototip.....	92
Şekil 4.1 Radiolaria pavyonunun taş benzeri görüntüsü.....	96
Şekil 4.2 Radiolaria pavyonunun tabanını desteklemek için basılmış kaset taban ve Radiolaria pavyonunun baskı işlemi tamamlandıktan sonra fazla kumlar temizlenmeden önceki görsel.....	96
Şekil 4.3 3B yazdırma ile yerinde üretilmiş jakuzi	98
Şekil 4.4 Sürekliliği olmayan plan şeması	99
Şekil 4.5 Tesisat boruları ve katmanlar arası donatıları gösteren görsel.....	99

Şekil 4.6 Denizanası benzetilerek tasarlanmış pavyon	101
Şekil 4.7 Branch Technologies ve Oak Ridge iş birliğinde üretilmiş pavyonlar	102
Şekil 4.8 Küçük parçalar halinde fabrikada basılan yapı parçaları	102
Şekil 4.9 Branch Technologies'in yazdırma robotlarının hangi alanlarda görevli olduğunu gösteren görsel	103
Şekil 4.10 Dubai'ye gönderilen beton bloklar	105
Şekil 4.11 DGVGM yapım süreci diyagramları	106
Şekil 4.12 HuaShang Tengda Konağı 250 mm kalınlığında duvarların basılmasını gösteren görsel.....	108
Şekil 4.13 HuaShang Tengda Konağı'nın duvarlarının güçlendirme ve sıhhi tesisat elemanlarını barındırdığını gösteren görsel.....	109
Şekil 4.14 Apis Cor 3B mobil yazıcısı.....	111
Şekil 4.15 Apis Cor beton evi dairesel plan şemasını gösteren görsel	111
Şekil 4.16 Duvarların arasına termal izolasyon için sıkılan sıvı poliüretan köpük..	112
Şekil 4.17 Beton karışımın özelliklerini koruması için gerekli olan sıcaklık seviyelerini sağlayabilmek için inşaat alanına kurulan çadır.....	112
Şekil 4.18 Modüller halinde basılmış duvarların yapının dışından okunabilirliğini gösteren görsel	115
Şekil 4.19 3D Housing 05 dairesel planı ve mekanları.....	115
Şekil 4.20 Konutun formuna göre tasarlanmış ürünlerden bazıları	116
Şekil 4.21 MX3D köprüsünün üretimi için dijital ortamda optimize edilme çalışmalarını gösteren görsel.....	119
Şekil 4.22 Baskı işlemi biten köprünün yük taşıma kapasitesinin test edilmesini gösteren görsel.....	119
Şekil 4.23 Çift eğrilikli olarak tasarlanan Trabaculæ pavyonu	121
Şekil 4.24 Trabaculæ pavyonunun bileşenlerini basan 5 adet yazıcı	122
Şekil 4.25 Trabaculæ pavyonunda kullanılan bileşenlerin tabandan tavana değişimini gösteren görsel	123
Şekil 4.26 Baskı malzemesinden yapının genel görünümüne kadar olan tasarım sürecini gösteren diagramatik çizimler	123
Şekil 4.27 Yerinde montaj aşamalarını gösteren görsel.....	123
Şekil 4.28 Gaia Evi yapım süreci	125

Şekil 4.29 Gaia evinin havalandırma temelini gösteren kesit	125
Şekil 4.30 Üç adet altıgenin kesişim yolunda hareket eden baskı kolu	126
Şekil 4.31 Gaia Evi kısmi duvar planı	127
Şekil 4.32 Dubai Belediye Binasının dış görünümü	129
Şekil 4.33 Dubai Belediye Binasının yapım aşamasında üstten görünümü.....	129
Şekil 4.34 3B yazdırma yöntemi ile inşa edilmiş duvar içlerinde bırakılan boşluklara manuel olarak eklenen güçlendirmeler	130
Şekil 4.35 Şematik plan ve kesitler	132
Şekil 4.36 14,4 m açıklığa sahip olan havuzun üzerine konumlandırılan Boashan yaya köprüsü.....	133
Şekil 4.37 Voussoirlerin kafesli olarak boşluklu baskısı	134
Şekil 4.38 Tırabzan bileşenlerinin basımı.....	135
Şekil 4.39 Döşeme bileşenlerinin basımı.....	135
Şekil 4.40 Köprü bileşenlerinin montajı için geçici olarak yerleştirilmiş çelik kemer destekleri	135
Şekil 4.41 Boashan Yaya Köprüsünün montaj sonrası hali	136
Şekil 4.42 Crane WASP robotlarının birlikte çalışması.....	138
Şekil 4.43 Silindirik koordinatta çalışan ve dairesl formlar oluşturan Crane WASP robotları	138
Şekil 4.44 Zincir Eğrisi Pavyonu ve birbirinden farklı üretilmiş polistiren modüller	141
Şekil 4.45 Kum dolarının üstten ve mikroskopik görünüşü.....	143
Şekil 4.46 Sergi salonunun iç mekân görünüşü ve okunur plaka bağlantıları	144
Şekil 4.47 Düzlemsel olmayan kuvvetlere karşı eklenen vidalar	145
Şekil 4.48 Yapım sürecini gösteren fotolar.....	147
Şekil 4.49 Dronların hareketleri.....	148
Şekil 4.50 Otonom sistemin işleyişini gösteren diagram	149
Şekil 4.51 Üst üste birleştirme sırası.....	151
Şekil 4.52 Çatının izometrik çizimi	152
Şekil 4.53 Çatının yapısal özelliklerini gösteren çizim.....	152
Şekil 4.54 Bir çatının istenen boyutta kesilip, taşınması, çivilenmesi ve montajını sırasıyla gösteren görseller	153

Şekil 4.55 Yardımcı sistemli kafes kirişler	153
Şekil 4.56 Disiplinler arası çalışma konsepti	155
Şekil 4.57 Kabuğun içerisine gömülmüş LED aydınlatmalar.....	155
Şekil 4.58 Ahşap segmentlerin katmanlarının diagramatik görünümü	156
Şekil 4.59 Robotların görev farklılıkları ve senkronize çalışmaları	157
Şekil 4.60 Ahşap modüllerin sahada birleştirilmesi.....	157
Şekil 4.61 Çift tabakalı modüller	159
Şekil 4.62 Üretim sürecini gösteren görseller	159
Şekil 4.63 Liflerin yönlerine göre kontrplakların farklı açılarda bükülmelerini gösteren görsel	160
Şekil 4.64 KUKA KR 120 R3900 ve HIGHTEX CB4500 robotları ve modüllerin sahada montajı.....	160
Şekil 4.65 Tasarım kriterleri için incelenen yaprak güvelerinin oluşturduğu yapı ..	162
Şekil 4.66 Cam ve karbon fiber kompozitten oluşturulmuş yapı.....	163
Şekil 4.67 Pavilyonun üretim sürecini gösteren diyagram ve fotoğraf.....	163
Şekil 4.68 Beton temellere bağlanmış yapı bileşenleri diagramı	165
Şekil 4.69 Yapı bileşenlerinin birbirine çelik elemanları ile bağlanması	166
Şekil 4.70 Yapı kabuğunun ETFE ile kaplanmış hali	166
Şekil 4.71 Yapı bileşenlerinin üretimini gösteren diyagram.....	167
Şekil 4.72 Bileşenlerin üretim aşamalarını gösteren görsel	167
Şekil 4.73 DFAB evi dışarıdan görüntüsü	169
Şekil 4.74 İnovasyon aşamaları diagramatik gösterimi	170
Şekil 4.75 Hasır kalıp üretimi	170
Şekil 4.76 Paslanmaz çelik kalıbı	171
Şekil 4.77 Kalıplara sabitlemek için hazırlanmış güçlendirmeler.....	171
Şekil 4.78 3'er metre yüksekliklere sahip Akıllı Dinamik Döküm kayıtlar	172
Şekil 4.79 Akıllı Döşeme modüllerinin yerleştirilmesi	173
Şekil 4.80 Uzaysal ahşap montajları görseli	173
Şekil 4.81 Hafif ve yarı saydam cephenin önceden gerilmiş iç membranlı görseli ..	174
Şekil 5.1 İnşa robotları ile üretilmiş yapıların üretim teknikleri ve üretim mekanizmalarına göre dağılımı	180

Şekil 5.2 İnşa robotları ile üretilmiş yapıların üretim yaklaşımı ve alanlarına göre dağılımı	180
Şekil 5.3 İnşa robotları ile üretilmiş yapıların üretim teknikleri ve kullanım fonksiyonlarına göre dağılımı	181
Şekil 5.4 İnşa robotlarının gelecekte kullanımının öngörüsü üzerine yapılmış çalışma	185



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Robotların tarihçesi.....	8
Tablo 3.1 3B yazıcıların tarihçesi ve mimarlığa girişi.....	38
Tablo 3.2 3D Concrete Printing'in ürettiği robotik kolun kartezyende çalışma hızı ve ivmesi	67
Tablo 3.3 Geleneksel yapım yöntemleri ve 3B baskı teknolojileri ile üretilmiş 40 Mpa'lık beton duvarın maliyet tahmini karşılaştırması	81
Tablo 4.1 Radiolaria pavyonu incelemesi.....	94
Tablo 4.2 Lewis Grand oteli	97
Tablo 4.3 Floatsam & Jetsam pavyonları.....	100
Tablo 4.4 Dubai Gelecek Vakfı incelemesi	104
Tablo 4.5 HuaShang Tengda konağı incelemesi.....	107
Tablo 4.6 Apis Cor beton evi incelemesi	110
Tablo 4.7 3D Housing 05 incelemesi.....	114
Tablo 4.8 MX3D yaya köprüsü incelemesi.....	117
Tablo 4.9 Trabaculæ pavyonu incelemesi.....	120
Tablo 4.10 Gaia evi incelemesi.....	124
Tablo 4.11 Dubai Belediye Binası incelemesi	128
Tablo 4.12 Boashan yaya köprüsü incelemesi	131
Tablo 4.13 TECLA incelemesi	137
Tablo 4.14 Zincir Eğrisi pavyonu incelemesi	140
Tablo 4.15 Devlet Bahçesi Sergi Salonu incelemesi	142
Tablo 4.16 The Vertical Village enstalasyonu incelemesi.....	146
Tablo 4.17 The Sequential Roof incelemesi	150
Tablo 4.18 BUGA ahşap pavyonu incelemesi	154
Tablo 4.19 ICD/ITKE araştırma pavyonu 2015- 16 incelemesi	158
Tablo 4.20 ICD/ITKE araştırma pavyonu 2016- 17 incelemesi	161
Tablo 4.21 BUGA fiber pavyonu incelemesi.....	164
Tablo 4.22 DFAB evi incelemesi.....	168
Tablo 5.1 Tez kapsamında incelenen yapılar ve özellikleri.....	177

Tablo 5.2 Tez kapsamında incelenen yapıların üretim teknolojilerine göre malzeme dağılımı	178
Tablo 5.3 Tez kapsamında incelenen yapıların uygulamasında kullanılan robotların hareket mekanizmalarının karşılaştırılması.....	179



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Teknolojinin gelişim hızının artması, kent yaşamının yoğunluğu, konut ihtiyaçlarının artması, hızlı, ucuz ve özgün üretim isteği gibi sebepler insanların yaşam standardı beklentilerini değiştirmiştir. Ancak, çoğu sektörde yaşanan dijitalleşme ve endüstriyelleşme, inşaat sektöründe yakın zamana kadar gerçekleşmemiş ve geleneksel yöntemlerle inşa edilen yapılar gerek zaman ve maliyet gerekse işlevsellik ve iş gücü bakımından yetersiz kalmıştır. Chicago Agent dergisinde 2019 yılında yayınlanan verilere göre ABD’de yaklaşık 300.000 kişilik doldurulmamış inşaat işi olduğu ve bu sayıların tahmini olarak 2026 yılında 747.000’lere ulaşması beklenmektedir (Ludman, 2019). Bu nedenle, robotların mimari yapım süreçlerindeki işlevlerinin denemeleri başlamıştır. Böylelikle, doğru inşa robotlarının yardımıyla birçok proje daha verimli bir şekilde tamamlanabilir hale gelmiştir. Gündelik yaşamın her aşamasını etkileyen bu değişimler barınma, çalışma ve sosyalleşme mekanlarının ihtiyacını da etkilemiştir. Ayrıca, robotların kullanıldığı inşaat süreçlerinde geleneksel yapı malzemelerinin kullanımı uygun olmadığı için yeni malzeme arayışları da ortaya çıkmış ve bu konu üzerine de yeni araştırmalar başlatılmıştır. Genel olarak, inşaat süreçlerinde hızlı ve ekonomik çözümler için tercih edilen robotlar; konut, otel, köprü ve pavyon gibi gerek kamusal gerekse özel mülkiyetlerin yapım süreçlerinde denenmiştir.

Günümüz ülkelerinin çoğu sermayelerinin büyük bir kısmını inşaat sektörü için kullanmaktadır. Bu uygulamalar sırasında geleneksel yöntemlerin kullanılması enerji ve ham madde kullanımlarını arttırmaktadır. Dünya genelini etkileyen küresel ısınma gibi global sorunlar için daha da büyük sorunlar çıkartacak olan bu yöntemlere “Endüstri 4.0” ın getirdiği ileri teknoloji ve otomasyon sistemleri ile çözüm bulma çabaları ortaya çıkmıştır (Bock, 2015).

Bilgisayar destekli tasarım programlarının gelişmesi ile tasarım süreçlerinin parçası olan makineler, günümüzde ise robotların bu süreçlere dahil olması ile mimari yapım süreçlerinin de parçası olmuşlardır. Mimari yapıların formları, yükseklikleri, alanları

gibi veriler o yapının inşası için seçilecek malzemeyi, üretim tekniğini ve süresini etkilemektedir.

Farklı yapılar inşa etme ihtiyaçlarının doğurduğu yeni malzeme arayışları da burada devreye girmiştir. Gerek hızlı üretim süreçlerinin getirdiği zorunluluktan gerekse üretim teknolojilerinin farklılığından kaynaklanan sebeplerden dolayı viskoz malzemelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Bunlara ek olarak; yapılan inşaatların çevreye olan zararlarının minimuma indirilmek istenmesiyle de beton, seramik, cam, kâgir malzemeler gibi seramik bazlı malzeme arayışlarında üretici firmalar tarafından rekabetler başlamıştır. Böylece; inşa robotları, sadece akademik ortamlarda araştırılmaktan çıkmış pratikte de üzerine çalışılan konular içerisine girmiştir.

Son 25 yıldır mimari yapım süreçlerine dahil edilmesi hız kazanan robotların en önemli tercih sebepleri; yapıların geleneksele kıyasla oldukça hızlı inşa ediliyor olması, istenilen tasarımların aynısının işçilik hataları olmadan elde edilmesi, insan yapımına uygun olmayan tasarımların robotlarla elde edilmesinde herhangi bir zorluk olmaması, insanlar için güvenli olmayan konumlara robotların erişebilecek olmasının getirdiği güvenli yapım süreçleri, yapım sırasında malzeme atıklarının azaltılması, planlanan zaman ve maliyetlere uygun sonuçlar elde etme olasılığının geleneksel yöntemlere kıyasla oldukça fazla olması gibi sebeplerdir. Robot teknolojilerin mimari yapım süreçleri içerisinde geliştirilmesi ve pratikte uygulanabilirliği için geleneksel inşa tekniklerine ek olarak yeni üretim yöntemleri ve teknolojilerinin geliştirilmesi ile yukarıda belirtilen sebepler doğrultusunda hedeflenmektedir.

1.1 Problemin Tanımlanması

Gelişen ve değişen dünya standartlarının yaşamın her evresini etkilemesiyle birlikte temel insani gereksinimlerde de farklılıklar oluşturması zorunlu hale gelmiştir. Temel insani ihtiyaçlardan biri olan barınma, çalışma alanları hatta yapılı çevrenin tümünü etkileyecek olan hızlı ve ekonomik yapılar üretme arayışları ortaya çıkmıştır. İnşa robotlarının ortaya çıkış sebepleri üç temel nedene bağlanabilir. Bunlardan ilki, küresel

ısınma gibi sebeplere bağılı olarak yaşanan doğal afetler, işsizliğin veya savaşların yol ağıtı göçler ve yapılaşma sırasında gerçekleşen iş kazaları gibi sosyal sebeplerdir.

İkinci olarak, benzersiz tasarımların ekstra maliyetler olmadan üretilmesi gibi ekonomik sebeplerdir. Üçüncüsü ise ham madde kullanımı, atık üretimi ve CO₂ emisyonlarının yapı sektöründeki artışlardan direkt etkileniyor olması gibi çevresel etkenler ve sürdürülebilirlik arayışlarıdır.

Sanayi devrimi ile gelişim hızı artan makineler ve robotlar, üretim süreçlerine daha fazla dahil olmuşlardır. Havacılık sektöründen tekstil sektörüne, ziraatten madencilığe kadar üretimin yapıldığı çoğu alanda göz ardı edilemeyecek kadar pozitif sonuçlar elde edilmesine rağmen robotların mimari yapıım süreçlerine dahil olması son 25 yıla dayanmaktadır. Bu nedenle; dünya çapında üzerine denemeler ve araştırmalar yapılan bu yeni yapıım teknolojilerinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu bağlamda bu tez çalışmasında belirlenen problem alanı; mimari yapıım süreçlerinde inşa robotlarının kullanılmasının potansiyel katkılarının ortaya çıkarılması üzerinedir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Çalışmanın amacı; mimari yapıım süreçlerinde kullanılan inşa robotlarının tanıtılması, bu robotların kullanıldığı projelerde uygulanan üretim ve yapıım teknolojilerinin belirlenmesi ve bu teknolojilerin örnekler üzerinden irdelenmesidir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında dünya genelinde üretilmiş inşa robotlarının araştırmalara ve yapıım süreçlerine nasıl dahil oldukları incelenmiştir. Üretim teknikleri yaklaşımları ve malzeme kullanımları irdelenmiştir. Dünya çapında farklı üretim teknikleri kullanarak yapıım süreçlerine dahil olmuş örneklerin irdelenmesi sonucu elde edilen bulguların ışığında inşa robotlarının potansiyel katkıları belirlenmiştir.

1.3 Araştırma Yöntemi

Çalışmada öncelikle inşa robotları kullanılarak üretilen yapıların uygulama süreçlerine yönelik literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması sonucunda elde edilen bilgilerin ışığında inşa robotlarının mimari yapım süreçlerinde kullanılmasına yönelik sağladığı katkıların belirlenmesi amacıyla 22 adet yapı örneği incelenmiştir. Bunun sonucunda, çalışma kapsamında incelenen yapılar; kullanılan robotun üretim teknolojisine, tercih edilen malzemelere ve yapım yaklaşımlarına göre karşılaştırılmıştır.

1.4 Çalışmanın Organizasyonu

Bu tez, aşağıda açıklandığı gibi beş bölüm olarak organize edilmiştir:

“Giriş” başlığı ile tanımlanan birinci bölüm çalışmayla ilgili genel bilgileri, çalışmanın amacını, önemini ve kapsamını vurgulamaktadır. Buna ek olarak, problemin tanımlanması, araştırmanın yöntemi ve hedefleri bu başlık altında yer almaktadır.

İkinci bölümde, robot ve inşa robotları kavramları, robotların tarihçesi ve inşa robotlarının tarihçesi; üretim tekniklerine göre, kontrol mekanizmalarına göre, üretildikleri formlara göre, mimarideki rollerine göre, insan ilişkilerine göre, mimari yapım süreçlerinde kullanımlarına göre, hareket mekanizmalarına göre ve üretim yaklaşımlarına göre 8 alt başlıkta detaylı bir şekilde verilmiştir.

Üçüncü bölümde inşa robotlarının üretim tekniklerine göre eklemeli, çıkarmalı, birleştirmeli, biçimlendirmeli ve döküm/kalıplama ile üretim şeklinde 5 alt başlıkta yapım süreçlerinde hangi şekillerde yer alabilecekleri incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, inşa robotları kullanılarak üretilmiş yapılara ait 22 adet örnek; yapım süresi, fonksiyonu ve maliyeti mimari ve yapısal oluşumları, kullanılan yazıcılar, robotların çalışma koordinatları ve malzemeler ise teknik başlığı altında

incelenmiştir.

“Sonuçlar” başlıklı beşinci bölümde, çalışma kapsamında genel değerlendirme yapılarak sonuçlar açıklanmış ve örnekler arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca gelecekte yapılabilecek bilimsel araştırmalar ve öneriler bu bölümde sunulmuştur.



BÖLÜM İKİ

GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE ROBOTLAR VE MİMARİDE KULLANIMLARI

Bu bölümde robotlar ve inşa robotları kavramları, tarihçeleri, yapım süreçlerine girişleri ve inşaat robotlarının 8 alt başlıkta sınıflandırılması yer almaktadır.

2.1 Robot ve İnşa Robotiği Kavramları

Robotik sistem sitesinde açıklandığı üzere “Robot, mekanik sistemleri ve bunlarla ilişkili kontrol ve algılama sistemleri ile bilgisayar algoritmalarına bağlı olarak akıllı davranan makinelerdir.” (Robotik sistem, b.t.). Amerikan Robot Enstitüsünün 1979’da yaptığı tanıma göre ise robot, yeniden programlanabilen; maddeleri, parçaları, aletleri, programlanmış hareketlerle yapılacak işe göre taşıyan veya işleyen çok fonksiyonlu makinelerdir (Robotik sistem, b.t.). İki tanımdan da anlaşılabileceği üzere; robotlar aslında makinelerdir. Ancak, her makine robot olarak kabul edilemez. Bir makineyi robot olarak adlandırmak için karmaşık görevleri yönetmek ve en azından yarı özerk bir düzeyde çalışabiliyor olması için programlanabilme yeteneğine sahip olması gerekmektedir. Bir mekanizmanın robot olarak adlandırılabilmesi için; çevresindeki verileri algılayabilmek için gerekli alıcılara, verilerin toplanması ve kontrolünü sağlayan elektronik devrelere, robotun amacına uygun şekilde davranabilmesi için gerekli programa ve bu program doğrultusunda gerekli hareketleri gerçekleştirebilmek için mekanik bir düzeneğe ihtiyacı vardır. Saidi, O’Brien ve Lytle’e göre inşaat robotiği ise; “endüstriyel açıdan önemli bazı işlemleri otomatikleştirmek ve böylece bir insan operatörünü kontrol döngüsünden çıkartarak veya makine kontrol sistemleri yoluyla operasyonel verimliliği artırarak bu işlemlerin maliyetlerini azaltmak için sarf edilen bir mekanizasyon şeklidir” olarak tanımlanır. Robotlar inşaat sektöründe belirli bir görev veya işlevde insanların yerini almak veya onlara bu işlerde yardımcı olmak için tasarlanmış araçlardır (Saidi, O’Brien ve Lytle, 2008). İnşa robotları, bir yapının inşa edilmesi için duruma ve tasarımlara uygun olarak tasarlanmış veya yeniden programlanmış robotlardır. Endüstriyel robotlardan farkı ise; endüstriyel robotlarda sonuç ürün aynı ve robotlar sürekli olarak aynı işlemi tekrarlıyorken inşa robotlarında yeni operasyonlar için yeniden programlama gerekmektedir (Cousineau ve Miura,

1998).

İnşa robotları sahada üretim için kullanıldıklarında ya mobil ya da taşınabilir sistemler olarak üretilirler (Saidi, O'Brien ve Lytle, 2008). Ancak, fabrikada inşaat için üretim yapacak olan robotların çoğu sabit sistemler şeklinde üretilir. İnşa robotları, yapacakları işlere göre farklı şekillerde üretilirler. Böylelikle, istenilen sonuca maksimum verim ile ulaşabilmek için optimum robot veya robot kolu tercih edilmesi oldukça önemlidir. Bu sınıflamalar, inşa robotlarının sınıflandırılması başlığı altında ayrıntılı bir şekilde işlenmiştir.

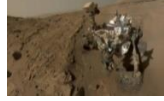
2.2 Robotların Tarihçesi ve Yapım Süreçlerine Girişleri

Robotların tarihsel süreçteki izleri, çok eskilere dayanmakta olup; eski Mısır ve Yunan medeniyetlerinde kullanılan otomatik su saatleri ve yaklaşık 500 yıl önce Da Vinci'nin tasarladığı yürüyen mekanik aslan ilk örnekler arasında gösterilebilir (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018). 13.yüzyılda Artuklular döneminde Diyarbakır'da yaşamış olan El Cezeri, o dönemde yapmış olduğu otomatlar, robotlar ve makineler ile robotların gelişimine ışık tutan önemli isimlerden bir tanesidir (İstanbul Cezeri Müzesi, b.t.). Sanayi Devrimi ile 18. ve 19. yüzyıllarda gelişen makineleşmenin etkisiyle buhar gücünün farklı birçok sektörde kullanımı görülmüş böylelikle robot endüstrisi için gelişim dönemi başlamıştır. 20. yüzyılda robot endüstrisi, askeri, havacılık, uzay, tıp ve eğlence alanlarında yoğunluklarını arttırmıştır. Prototip üretimi üzerinden yapılan araştırmaların arttığı bu dönemde, robotların geliştirilme hızı da artmıştır. Her dönemde oldukça fazla ilgi uyandıran robot endüstrisi, 21. yüzyıla insansı robot üretimleri ile başlamıştır. Uzaya gönderilebilen robotların üretimi, yapay zekaya sahip robot üretme çabaları, inşaat robotlarının sahada kullanımı ve tıp alanında oldukça önemli yer tutan nanorobotların prototiplenmesi gibi çalışmalar ile günümüzde robotlar üzerine yapılan araştırmalar hızla devam etmektedir (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018).

Tablo 2.1 Robotların tarihçesi

1893	Steam Man: Kanadalı Prof. George Moore 0,5 beygir gücünde buhar motoruyla çalışan insansı robot prototipini çelikten üretmiştir (1891-1893 – Steam Man – Prof. George Moore, b.t.).	
1898	Nicola Tesla tarafından uzaktan yönetilebilen bir dalgıç teknesi modeli geliştirilmiştir (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018).	
1920	Çek yazar Karel Čapek, "R.U.R.- Rossum's Universal Robots" adlı eserinde Çekçe işçi anlamına gelen robot kelimesini dünya literatürüne katmıştır (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018).	
1942	Amerikalı Prof. Isaac Asimov, robot yasalarını yayınlamıştır (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018).	
1953	Seiko adlı Japon firma farklı tiplerdeki saat parçaların montajını yapabilen minyatür bir robot üretmiştir (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018).	
1962	General Motors sıcak metalleri taşıyabilmek için Unimate isimli ilk endüstriyel robotu üretmiştir. Birçok işçinin yaptığı işi tek başına yapabilmesinden dolayı üretimde kısa sürede 450 Unimate robot çalışmaya başlatılmıştır (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018).	
1963	Bilgisayar denetimli ilk yapay kol üretilmiştir (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018).	
1964	MIT ve Stanford Üniversitelerinin önderliğinde ilk kez yapay zekâ araştırmaları yapılmıştır (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018).	

Tablo 2.1 devamı

1976	Viking 1 ve Viking 2 adlı uzay araçlarının üretimlerinde robot kollar kullanılmıştır (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018).	
1998	Furby isimli baykuşa benzetilerek tasarlanan oyuncakın üretimi ile robotlar günlük hayatlarımıza dahil olmaya başlamışlardır. Diğer Furby oyuncaklar ile etkileşim kurabildikleri gibi insanların isteklerine de bazı koşullarda cevap verebilme özellikleri vardır (Furby, b.t.).	 (Furby, b.t.)
1999	Sony'nin evcil hayvan olarak geliştirdiği robot oyuncak Aibo piyasaya sürülmüştür. Bu robot köpek günümüzde köpek reflekslerinin neredeyse hepsine sahiptir (Boyd, 2017).	 (Boyd, 2017)
2000	Honda tarafından üretilen insansı robot Asimo piyasada tanıtılmıştır. İleri, geri, yana yürüme gibi kabiliyetlerinin yanında kollarını kullanabiliyor olması ile insanlara yardımcı olarak amacıyla üretildiği görülmektedir (Asimo, b.t.).	 (Asimo, b.t.)
2008	Phoneix isimli NASA'ya ait olan robot, Mars'ta yürütülen araştırmalarda başarılı olmuştur (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018).	
2011	2011'de gönderilen ve 2012'de Mars'a inen Curiosity adlı NASA robotu Gale kraterinde araştırma yapmak üzere gönderilen otomobil benzeri bir keşif robotudur (Nasa, b.t.).	 (Nasa, b.t.)
2015	Hiroshi Ishigura Laboratuvarlarında Sayonara filminde Leona adlı karakteri oynaması için oyuncu robot üretimine başlanılmıştır. Günümüzde, tehlikeli sahnelerde kullanılmak üzere tercih sebebi olmaktadır (Hiroshi Ishigura Laboratories, b.t.).	

Tablo 2.1 devamı

2016	Boston Dynamics tarafından engebeli araziler için iki ayağının üzerinde yürüyebilen iş robotu Atlas üretilmiştir. Hidrolik sistemler ile hareket edebilen bu robot 1,5 m/s ile koşabilen 1,5 metre boyunda 80 kilo bir robottur. Parçaları 3B yazıcılar ile üretilmiştir (Boston Dynamics, b.t.a).	 (Boston Dynamics, b.t.a)
2016	Hanson Robotic tarafından Sofia adlı insan benzeri bir robot üretilmiştir. Teni, görüntüsü, konuşmaları ile gündem oluşturan bu robot konuşurken göz teması kurabilmesi, duygularını dile getirebiliyor oluşu sebebi ile de yapay zekâ çalışmalarına temel oluşturmuştur (Hanson Robotics, b.t.).	 (Hanson Robotics, b.t.)
2016	Deep Mind tarafından üretilen AlphaGo adlı bilgisayar programı yapay zekâ yaratma araştırmaları için bir dönüm noktası oluşturmuştur. Profesyonel bir Go oyuncusunu yenen bilgisayar programıdır (AlphaGo, b.t.).	
2016	ApisCor adlı şirket tarafından Rusya’da 38 metrekarelik bir ev 24 saat içerisinde beton döken bir 3B yazdırma özelliğine sahip bir robot kol tarafından inşa edildi (3DStartup: Apis Cor, creators of the 3D printed house, 2018).	 (3DStartup: Apis Cor, creators of the 3D printed house, 2018)
2017	AlphaGo bilgiyi kendi kendine oluşturmaya başladı. Günümüzde ise proteinler üzerinde çalışarak ilaçların üretimi ile ilgili keşfi için çalışıyor (AlphaGo, b.t.)	
2018	BatiPrint adlı şirketin ürettiği robot kol ile 95 metrekarelik bir ev beton yazdırma tekniği ile üretildi. Robot kol aynı zamanda 3 farklı katmanı yazdırabilmesi açısından inşaat sektörüne hız kazandırabilecektir (Clarke, 2017).	 (Clarke, 2017)

Tablo 2.1 devamı

2018	WASP adlı şirketin ürettiği robot kol pirinç kabukları, kireç, saman, kil ve kum gibi organik maddelerden Gaia isimli evi inşa ettiler (Chiusoli, 2018).	 (Chiusoli, 2018)
2019	Pensilvanya Üniversitesi mühendisleri birkaç hafta içerisinde yarı iletkenlerden nanorobotlar ürettiler. Tıp dünyasında robotların kullanılmasının artması açısından önemli gelişmelerden biri olan nanorobotlar, bir sonraki aşamalarda kablosuz olarak kontrol edilip insan vücuduna enjekte edildikten sonra hasarlı kısımlar için tedavi amacıyla kullanılabilir duruma getirilmek isteniyor (Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, 2018).	
2020	Spot İnşaat sahaları, projenin doğru ilerleyebilmesi için değişikliklerin sürekli olarak izlenmesi gereken dinamik ortamlardır. Mimarlık firması Foster + Partners, Londra'daki Battersea Power Station'daki projelerinin yapım süreçlerini izleyebilmek için Boston Dynamics tarafından tasarlanan Spot adlı bir robot köpek kullanmışlardır. Yukarı ve aşağı yürüyebilen, engebeli zeminlerde yönünü bulabilen dört ayaklı makine, haftalık olarak inşaatın yapım sürecindeki değişiklikleri bildirmektedir. Böylece, tasarım ve yapılmakta olan proje arasında karşılaştırmalar yapılabilmekte ve hatalara oldukça kolay bir şekilde müdahale etme şansı doğmaktadır. Yarı otonom olarak uzaktan kontrol edilebilen robot, çevresel girdilere göre yapının zaman içerisinde nasıl değişebileceğini gösteren 4B'lu bir model oluşturmak için kullanılabilmektedir (Block, 2020).	 (Block, 2020)

2.3 İnşa Robotlarının Tarihçesi ve Sınıflandırılması

Gelişen teknolojiye gün geçtikçe artan bağımlılığımız üretim hızı ve tüketim hızı oranının eşit ilerlememesine bu nedenle de alternatif arayışlara yol açmıştır. Üretimden hizmet sektörüne kadar kimi zaman süreç içerisinde kimi zaman da sürecin kendisi olan robotik teknolojileri, üretim hızının artırılması için hemen her sektörde başvurulan yöntemler içerisinde yer almaktadır. Geçmişten günümüze robot endüstrisi incelendiğinde riskli görevleri hızlı bir biçimde yapmak üzere tasarlanmış endüstriyel robotlar, insanlara yardımcı olmaları için tasarlanmış insansı robotlar, bir görevi maksimum verim ile elde etmek için birden fazla robotun çalıştığı çoklu robotlar, tıp alanında tespit ve müdahaleler için kullanılması hedeflenen nanorobotlar gibi farklı sektörlerde, araştırma alanının geniş ve umut verici olduğu bir sektördür. Ancak; inşaat ve mimari yapım süreçlerinde, insanların barınaklarını inşa etmeye başladıkları dönemden bu yana fazla değişime uğramamış geleneksel yapım tekniklerinin, kimi durumlarda riskli ve yetersiz kalması üzerine son 25 yıl içerisinde robotik teknolojileri bu sektör içerisinde yerini almaya başlamıştır. Robotik teknolojilerinin, mimari yapım süreçlerindeki yerlerini ve rollerini anlayabilmek için sınıflandırmalar yapılmıştır.

Dijital tasarımın mimari tasarım ve yapım süreçlerine dahil olmasıyla birlikte bu süreçlerde kullanılan yöntemler baştan aşağı değişmiştir. Tasarımcılara soyut ortamda tasarladıkları nesneleri üretim sürecinde de uygulama olanağı sağlayan bu dönemle birlikte mimari formlarda elde edilen özgürlük alanının oldukça gelişmiş olduğu örnekler üzerinden gözlemlenebilir hale gelmiştir. Çünkü, karmaşık ve çok yönlü bilgilerin tasarım sürecine dahil olabilmesi kolaylaşmıştır.

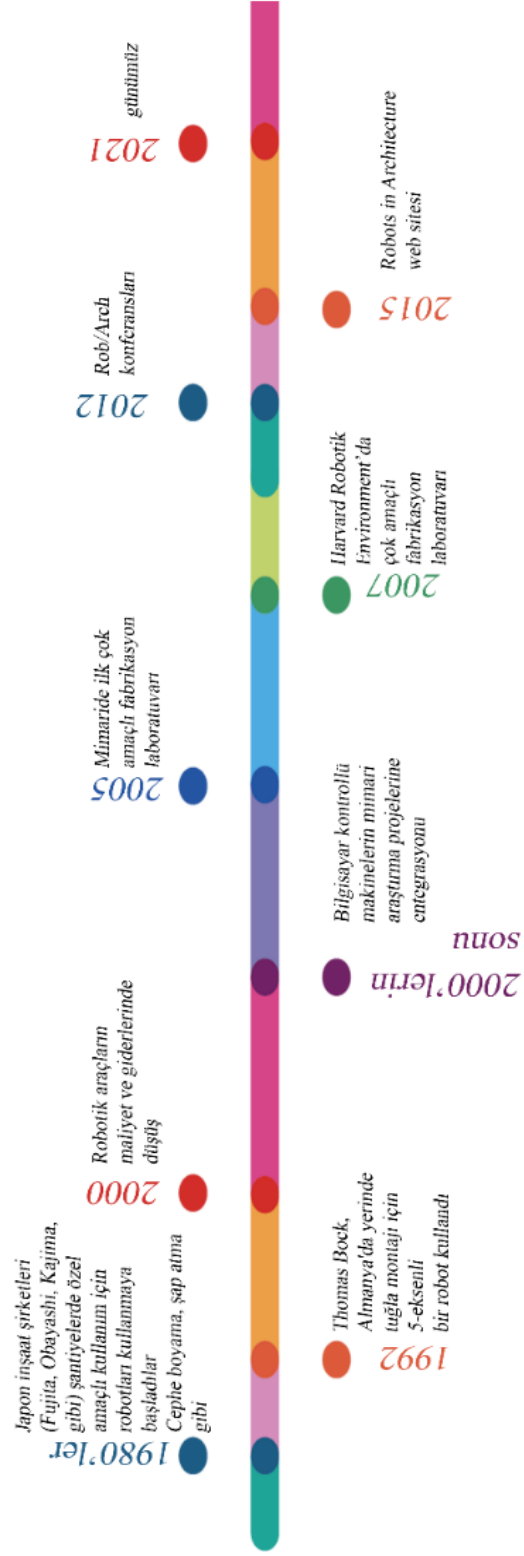
CAD yazılımlarının erişilebilir ve ucuz olması nedeniyle 1990'ların sonları ve 2000'lerin başlarında, bu süreçler için gerekli olan teknolojilerin yeterince gelişmiş olması ile yalnızca akademik araştırmalara konu olan robotların mimari yapım süreçlerinde kullanımı profesyonel uygulamada da kendini göstermiştir. Tasarım çözümlerinin karmaşıklığı, geleneksel yapım yöntemlerinin sınırlarının ötesindeydi ve tekniklerin giderek artan bu karmaşıklık düzeyiyle eşleştirilmesi robotik üretim süreçleri ile gerçekleşmiştir (Bidgoli, 2015).

O döneme kadar kullanılan CNC makinelerinin çoğu belirli bir dizi görev için özel olarak tasarlanırken, endüstriyel robotların genel doğası onlara mimari bağlamdaki çeşitli taleplere uyarlama ayrıcalığı verdi (Bidgoli, 2015).

2000'lerin ortalarında, İsviçre merkezli profesör mimarlar Gramazio ve Kohler, tamamen mimari ve dijital üretime adanmış olan ETH Zürih'te gelişmiş bir araştırma merkezinin liderliğini üstlenmişlerdir. Bunlar, 2005'te bir endüstriyel robot kullanan mimaride ilk çok amaçlı fabrikasyon laboratuvarıydı ve bunu 2007'de Harvard Robotik Çevre izledi. Bu yeni dönem, çoğunlukla tasarımın kapsamını yeni kurulumlar yoluyla genişletmeye odaklanmasıyla bilinen mimari robotikte güçlü bir hareketi canlandırdı. Robotlardan yararlanılarak, tasarım sürecinde yapım ve programlamanın entegrasyonunu aradılar (Bidgoli, 2015).

O zamanlardan günümüze kadar endüstriyel robotların mimari yapım süreçlerinde kullanımına dönük deneyler ve tasarım arayışları önemli ölçüde artmıştır ve inşa robotiğinin kronolojik sıralaması Şekil 2.1'de verilmiştir. Bu alandaki arayışların ve bilginin hızlı bir şekilde artması üzerine, akademisyenler Rob/Arch ismiyle 2012'den beri etkinlikler düzenlemeye başladılar. 2015 Mart itibarıyla, dünyanın her yerinden 59 kurum, Robots in Architecture web sayfasında listeye girmiştir (Bidgoli, 2015).

Robotik çalışmaları, bölgesel olarak da farklılıklar göstermektedir. Amerika'nın Batı kesimlerindeki üniversitelerde, robotların görsel olanaklarına yönelik eğilimler söz konusudur. Özellikle, Bot & Dolly Move ile UCLA iş birliğinin ürünleri film sektörlerinde görülebilir. Doğu kıyısı çalışmalarında ise daha çok malzeme ve imalat olanaklarına odaklanmışlardır. Carnegie Mellon Üniversitesi ve MIT gibi bölgenin prestijli üniversiteleri de bu yönde araştırmalar yapmaktadırlar. Avrupa'da ise eğilim genellikle robotik tektoniğe ve daha az performansa dayalı sistemlere yöneliktir. Gramazio ve Kohler'in ETH Zürih kapsamında ve Achim Menges'in Stuttgart Üniversitesi kapsamındaki deneyleri ve araştırma pavyonları bu bölgedeki inşaat robotiğinin öncülerindendir (Bidgoli, 2015).



Şekil 2.1 İnşaat robotiğinin kronolojik gelişimi

2.3.1 Üretim Tekniklerine Göre İnşa Robotları

Üretim tekniklerine göre inşa robotları; eklemeli, çıkarmalı, birleştirmeli, biçimlendirmeli ve döküm/kalıplama ile üretim olmak üzere 5'e ayrılmaktadır.

2.3.1.1 Eklemeli Üretim

Eklemeli üretim yöntemi, dijital modellerden 3 boyutlu objelerin üretilmesi yöntemidir (Ghaffar, Corker ve Fan, 2018). Genellikle, viskoz malzemeler kullanılarak katmanlı olarak üretim yapma tekniğidir. Üretilecek nesne genellikle sıfırdan başlanarak büyütülür ve obje elde edilir. Daha sürdürülebilir ve malzeme verimli üretimler elde edebilmek adına ortaya çıkmış teknolojilerden bir tanesidir. Robotların eklemeli üretim yapabiliyor olmaları, inşaat sektöründe son 25 yıldır üzerinde çalışılan konulardandır. Verimliliği, kaliteyi, çalışma ortamının kalitesini, iş güvenliğini artırması gibi nedenler yapım süreçlerinde tercih edilmelerinin genel sebepleri arasındadırlar.

Eklemeli üretimin yapı veya yapı elemanı boyunda inşaat sektörüne girişi, 2002 yılında Güney Kaliforniya Üniversitesi'nden Behrokh Khoshnevis'in geliştirdiği Counter Crafting yöntemi ile olmuştur (Khoshnevis, 2004). Yapı veya yapı elemanının eklemeli üretim ile basılmasında kullanılan malzeme genel olarak betondur ancak; kerpiç, kil, cam, polimer, kum gibi farklı malzemelerin kullanımları vardır. Ayrıca; eklemeli üretimde kullanılabilecek yeni ve sürdürülebilir malzeme arayışları devam etmektedir.

2.3.1.2 Çıkarmalı Üretim

Çıkarmalı ya da eksiltmeli üretim yöntemi; 3 boyutlu nesnelerin katı bir malzeme bloğundan çıkartılarak yapıldığı üretimlerdir. Kalıp halinde olan materyalin işlenmesi sürecinden sonra istenilen objeye ulaşılabilir. Üretim süreçlerinde kullanılan en yaygın çıkarmalı imalat yöntemi, CNC (Computer Numerical Control- Bilgisayarlı Nümerik Kontrol) makineleri ile yapılanlardır.

NC makineleri fikri, babasının işleme şirketinde bir makinist ve satıcı olarak çalışan John T. Parsons'a aittir. Maliyet açısından daha düşük ve geleneksel yöntemlerden daha tutarlı havacılık parçaları yapmanın yolunu arayan Parsons 1952 yılında ilk NC makinesi olan Cincinnati-Hydrotel'i üretti (Jaje, 2017).

Çıkarmalı teknik ile üretilen objeler, eklemeli teknikle elde edilen objelere göre daha düzgün bitişlere sahiptir ancak eklemeli üretime göre çoğu zaman daha uzun sürüp daha pahalıya denk gelebilir. O nedenle ürün sayısının çok olduğu imalat türlerinde tercih edilmesi optimal maliyetler için uygundur.

2.3.1.3 Birleştirmeli Üretim

Birleştirme yöntemi ile üretim, küçük parçaların birleştirilerek anlamlı ve tasarıma uygun bir bütünün oluşturulduğu üretim yöntemidir. İnşaat sektöründe genellikle ahşap, tuğla ve metal malzeme kullanımı yapılacak yapılarda tercih edilir. Kaynaklama, bağlama, yapıştırma, çivileme, vidalama gibi işlemlerle birbirinden ayrı parçaların anlamlı bir bütün olabilmesi için kullanılan yöntemdir. Birleştirme yöntemi ile üretim yapan robotlar ve bu yöntemle çalışan robotlarla inşa edilmiş örnekler Bölüm.4'te verilmiştir.

2.3.1.4 Biçimlendirmeli Üretim

Biçimlendirme yöntemi ile üretim, malzemelerin doğal duruşlarının, oluşturulan tasarımlara göre bozulması yardımı ile yapılan üretim şeklidir. Düz panel ahşaplara 3 boyutta hacim kazandırmak, metallerin yüzeylerinde yapılan değişiklikler ve filamentler ile yapılan üretimler bu kategori içerisinde incelenebilir. Biçimlendirme yöntemi ile üretim yapan robotlarla inşa edilmiş örnekler Bölüm.4'te verilmiştir.

2.3.1.5 Döküm/Kalıplama ile Üretim

Döküm ya da kalıplama işlemi, robotlar yardımıyla konvansiyonele göre yapının veya yapı elemanının daha kaliteli şekilde üretilmesi sürecini içermektedir. Yapıların

standart veya standart olmayan elemanlarının üretiminde ekstra bir maliyet çıkarmadan farklı yaklaşım sunabilmek hedeflenmiştir.

2.3.2 Kontrol Mekanizmalarına Göre İnşa Robotları

Kontrol mekanizmalarına göre robotlar 3 ayrı kategoride ele alınır. Robotun operasyonun ne ile sağlandığına göre geliştirilmiş bu sınıflandırma aşağıdaki şekildedir.

2.3.2.1 Teleoperasyon Robotları

Haptik sistemler olarak da bilinen teleoperasyon robotlarında, makinenin kontrolü kablosuz veya kablolu bağlantı aracılığıyla bir insan tarafından uzaktan gerçekleştirilir. Tüm algı, hissetme, planlama, kontrol ve sorumluluk insana aittir. İnsanın ayak basmadığı, gücünün yetmediği ve koşulların aşırı olduğu görevler için tercih edilirler (Whittaker, 1986). Madencilik ve uzay keşifleri gibi tehlikeli işlerin yapılmasında tercih edilmesinin yanı sıra nükleer alanlar gibi insan sağlığını olumsuz etkileyecek alanlarda da tercih edilirler. Ellerin titremesi gibi insani özelliklerin bazı riskler oluşturduğu tıp dünyasında da kullanımı mümkündür. Haptik sistemlerin tıp alanında kullanımına verilebilecek ilk örnek 1995 yılında MIT tarafından beyin ameliyatlarında kullanımıdır (Gürgüze ve Türkoğlu, 2019).

Mimari yapım süreçlerinde ise teleoperasyon robotlarının yeri gün geçtikçe artmaktadır. Fujita Research'e ait kazı alanlarında toprak taşıyan insan kontrollü sistemler ve beton panel uygulama robotları, beton yüzey bitirme robotları, MEYCO Equipment'ın beton püskürtme robotları, tuğla örme robotları gibi temelden cephe bitimine kadar her aşamada ihtiyaca göre yardımcı olabilecek robotlar mevcuttur (Whittaker, 1986).

Katolonya İleri Mimari Enstitüsü (IAAC), 3B yazdırma tekniğini kullanarak yapı inşa edebilen robotların neredeyse çoğunun yapının kendisinden daha büyük olduğunu gerekçe göstererek tek bir inşaat robotu yerine adını "Minibuilders koydukları kimi

zaman ortaklaşa kimi zaman ise kendi görevlerini yapan küçük inşaat robotları üretmişlerdir (Jakupovic, b.t.).

Ulaşılması zor ve tehlikeli alanlar için robotların kullanılması, iş güvenliğini arttırırken aynı zamanda insani hataları ve gecikmeleri azalttığı için yapım sürecinde olumlu katkılar sağlamaktadır.

2.3.2.2 Programlanmış Robotlar

Operatörlerin önceden yazılmış programlar olduğu robotlardır. Bu robotlara görevlerini yapmaları ya yazılım yoluyla yüklenir ya da makineye yeni bir fonksiyon öğretmekle gerçekleştirilir. Bu makinelerin görevlerinde programlama yoluyla yapılan değişiklikler makinenin ilerleme hızını değiştirmek gibi basit değişiklikler olabileceği gibi çelikleri alıp yerleştirmek için programlanmış makinenin beton taşımak için yeniden programlanması gibi karmaşık değişiklikler de olabilir (Whittaker, 1986).

Programlanmış inşaat makineleri için verilebilecek örneklerden bir tanesi, GPS ve 3B yapı modellerini kullanarak arazi için gerekli ölçümleri yapıp buldozerler ve motorlu greyderler için bıçak kontrolünü otomatikleştirebilen “stakeless grading” örneğidir (Whittaker, 1986).

Stuttgart Üniversitesi Hesaplamalı Tasarım Enstitüsü (ICD)’nden Maria Yablonina filament yapılar için robotik teknolojilerinin kullanılması üzerine yeni üretim süreçleri ortaya koymaya çalışmış ve hem yatayda hem de dikeyde hareket edebilen lif filamentini uygulayabilen, çoklu, yarı otonom ve Şekil 2.2’de görülen robotları geliştirmiştir. Bilgisayarda programlanan yolları takip ederek örme işlemini gerçekleştiren robotlar iç mekân yapım süreçlerini ana hedef olarak almaktadır (Maria Yablonina, b.t.).



Şekil 2.2 Filament yapılar için mobil üretim robotu (Maria Yablonina, b.t.)

2.3.2.3 Bilişsel Robotlar

Bilişsel robotlar, belirlenmiş tariflere uymaktan çok hedef odaklı hareket eden robotlardır. Çalışma hedeflerine ulaşabilmek için çevrelerini algılayabilme, modelleme, planlama hatta gerektiğinde yeniden programlama özelliklerine sahiptirler. Bilişsel robotlar teleoperatör robotlar gibi gerçek zamanlıdır ancak tam otonom bilişse robotlarda insan desteği bulunmamaktadır. Yaptıkları eylemleri çevresi ve belirlenen hedefle etkileşimli olarak gerçekleştiren algısal robotlardır (Whittaker, 1986).

İnşaat robotları kapsamında bilişsel robotlar incelendiğinde; etrafında gerçekleşenleri algılayabilen ve bunlara göre hareket eden, beklenmedik durumlarda yeni planlar veya çözümler üretebilen ve yetersiz kaldığı durumlarda insan yardımına başvurulması gerektiğini kavrayabilen robotlardır (Whittaker, 1986).

Digital Craft Lab'ın ürettiği “Swarmscapers” adlı robotlar zorlu arazi koşullarında dahi araziden bulunan yerel malzemeyi kullanarak 3B yazdırma tekniği ile yapılar inşa edebilmektedir (Daas ve Wit, 2018).

Mimari yapım süreçlerinde; tasarımdan yapının temelini inşa edilmesine, metraj hesabından montaj işlerine kadar her aşamada kullanılabilecek robotlardır (Whittaker, 1986).

2.3.3 Üretildikleri Formlara Göre İnşa Robotları

Robotlar, üretildikleri formlara göre dört gruba ayrılırlar. Robotların formları, o robotun üretim amacına göre değişmektedir. Bu nedenle, robotun kullanılacağı alan veya robotun yapacağı iş bu formun belirlenmesinde ana etkindir.

2.3.3.1 Biyomorfik Robotlar

Biyomorfik robotlar, canlılara benzetilerek veya onların formlarından ilham alınarak üretilmiş robotlardır. İnsanlar, hayvanlar, ağaçlar, böcekler kısacası yaşayan her canlıdan alınan ilham ile üretilmiş formlar bu sınıfta ele alınır (Daas, 2018).

1998 yılında üretilen Furby isimli robot oyuncaklar baykuşlardan, 1999 yılında Sony'nin ürettiği AIBO isimli oyuncak evcil hayvan robotları köpeklerden, 2000 yılında Honda'nın piyasaya sürdüğü Asimo adlı robot ise insanlardan esinlenerek tasarlanmıştır (Daas, 2018).

2004 yılında, Boston Dynamics'in tanıttığı, buzda ve tekmelendiğinde dengede durabilen, çamur ve karda yürüyebilen, kütüklerin üzerinden atlayabilen Şekil 2.3'teki "BigDog" adlı robot bu kategoriye örnek olarak verilebilir. Arazi kullanımı için üretilmiş bu robot, çoğu robota kıyasla daha hızlı koşabilmesi için köpeklerden ilham alınarak tasarlanmıştır (Boston Dynamics, b.t.b).



Şekil 2.3 BigDog isimli robot (Boston Dynamics, b.t.b)

2.3.3.2 Mekanomorfik Robotlar

Mekanomorfik robotlar, mekanik karakteristik gösteren veya tamamen makineye benzeyen robotlardır (Daas, 2018). Genellikle, robotun üretildiği parçaların daha belirgin bir şekilde okunabildiği, günlük hayatta yer almayan robotlardır. Endüstriyel robotlar, taşınabilir robotlar, robot kolları bu sınıfa girebilir.

Yıldız Savaşları filminde yer alan R2D2, Roomba otomatik süpürgeleri, dronlar, tarım makineleri, bazı inşaat makineleri bu sınıfa girmektedir (Daas, 2018).

Heilbronn'daki 2019 Bundesgartenschau için Achim Menges'in önderliğinde tasarlanan yün fiber bileşenlerden oluşan pavyon yapısında kullanılan KUKA'nın Şekil 2.4'te görülen KR QUANTEC robotu bu sınıf içerisinde yer almaktadır (Kuka, b.t.).



Şekil 2.4 KUKA fiber bileşenler için kullanılan robot (Kuka, b.t.)

2.3.3.3 Polimorfik Robotlar

Polimorfik robotlar, birden çok farklı formlara bürünebilen robotlardır. Genellikle, bilim kurgu filmlerinde karşılaşılan bu tür robotlara gerçek hayatta rastlamak zordur (Daas, 2018).

Transformes filminde mekanik ve biyomorfik formlar arasında dönüşebilen robotlar ve Yıldızlar arası filminde yer alan TARS adlı robot bu sınıf içerisinde yer alabilir. Mekanomorfik robotlar, mekanik karakteristik gösteren veya tamamen makineye benzeyen robotlardır (Daas, 2018).

2.3.3.4 Amorfik Robotlar

Amorfik robotlar, tanımlanabilen formlara sahip olmayan robotlardır. 2001: Bir Uzay Destanı filminde yer alan HAL 9000 adlı yapay zekâ bilgisayar bu kategoride yer almaktadır (Daas, 2018).

2.3.4 Mimari Yapım Süreçlerindeki Rollerine Göre İnşa Robotları

Yapım süreçlerindeki rollerine göre inşa robotları; tek görevli ve çok görevli olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır.

2.3.4.1 Tek Görevli Robotlar

Tek görevli robotların üretilme amaçları bir hedef doğrultusundadır. Belirlenen hedef doğrultusunda gerek tek bir robot veya robot kolu çalışabilirken birden çok robot da ortaklaşa olarak çalışabilirler.

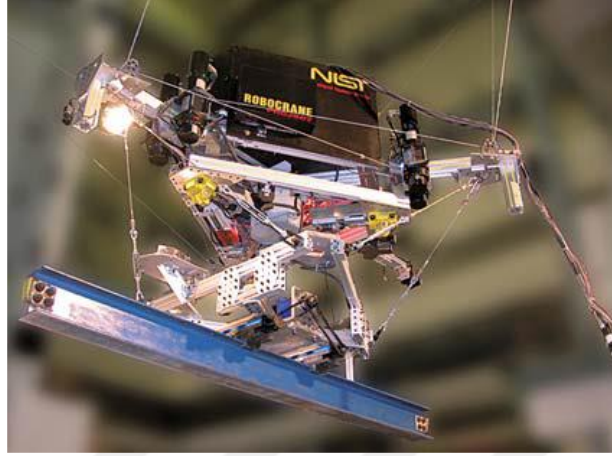
Çoklu robotlar ve sürü robotları, tek görevli robotlar arasında yer alırlar. Birden fazla robot, ortak veya iş bölümü yaparak çalıştıkları için tek bir büyük robot yerine küçük birçok robot aynı görev için odaklanmıştır. Üzerinde yapılan araştırmalar ve çalışmalar devam etmekte olan bu sınıfa verilebilecek örneklerden birkaçı; Harvard Üniversitesi tarafından madeni para boyutlarında tasarlanmış Şekil 2.5'teki 1024 adet kilobot isimli sürü robotları ve Fraunhofer Enstitüsünün tasarladığı karınca robotlarıdır (Gürgüze ve Türkoğlu, 2019).



Şekil 2.5 Kilobot adlı sürü robotları (Kilobots, b.t.)

Malzeme taşıma, birleştirme, boyama, sıva yapma, bağlama, dönüştürme, kazma, ölçme, yerleştirme, planlama, yayma, ... gibi birçok inşaat işlemi robotlara yaptırılabilir. Genel olarak incelendiğinde; Şekil 2.6'teki gibi malzemeyi taşıma,

malzemeye şekil verme ve strüktürel birleştirme ana başlıklarında incelenebilecek görevlerdir (Saidi, O'Brien ve Lytle, 2008).



Şekil 2.6 Malzeme taşıyan altı serbestlik dereceli robotik vinç (Saidi, O'Brien ve Lytle, 2008)

2.3.4.2 Çok Görevli Robotlar

Çok görevli robotlar, birden fazla görevi tek başlarına yapan robotlardır. Tek görevlilerde bir görev için birden fazla robotun çalışmasının aksine çoklu görevlilerde birden fazla görev için tek robot çalışmaktadır. Bu robotların üretim amaçları, Ross Robotic'in kurucusu ve CEO'su olan Philip Norman tarafından “değişen ve gelişen ihtiyaçlara zaman ve paradan tasarruf ederek cevap bulabilmek” şeklinde açıklanmıştır (Multi-tasking robots – doing the dangerous work, so humans don't have to, 2018).

Ross Robotic'in ürettiği “unmanned ground vehicle (UGV)” da çok görevli robotlar arasında yerini almıştır. Öğretilebilir ve yeniden kolayca programlanabilir olan UGV robot, tehlikeli alanlar için veya ulaşılması insan sağlığına zarar verebilecek olan mekanlar için uygunluğunu CERN ve Çernobil'de yapılan testlerde kanıtlamıştır (Multi-tasking robots – doing the dangerous work, so humans don't have to, 2018).

Mimari yapım süreçlerinde çok görevli robotlar incelendiğinde Fransız şirket BatiPrint tarafından tasarlanmış insan kontrollü Şekil 2.7'deki robot kol örnek verilebilir. Bu kol, Nantes'de 2018 yılında inşa edilen sosyal konutta aynı anda polimerik köpük ve betonu 3B yazdırma teknolojisi ile inşa edebilmiştir. Bu

çalışmanın amacı; maddi olarak elde edilebilir ve enerji etkin yapıları hızlı bir şekilde üretebilmektir (Clarke, 2017).



Şekil 2.7 3 katmanlı aynı anda 3B yazdırma teknolojisi ile inşa edebilen robotik kol (Clarke, 2017)

2.3.5 İnsan İlişkilerine Göre İnşa Robotları

İnsan ilişkilerine göre inşa robotları; yarı-otonom ve otonom olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır.

2.3.5.1 Yarı-otonom Robotlar

Yarı otonom robotlar, tamamen otomatik çalışmayan robotlardır. Yani, robotun bir kısmı otomatik olarak işlev görebilir durumdayken diğer kısımlarda operatör yardımına ihtiyaç vardır. Sistemlerin; otomatik, yarı otomatik veya manüelden hangisi olduğuna karar vermek için aşağıda belirtilen formülden yararlanılır (Nof, 2009).

$$\text{Otomasyon derecesi} = \frac{\text{Cihazlar tarafından otomatik olarak alınan kararların toplamı}}{\text{Toplam adım sayısı}} \quad (2.1)$$

Robotların da otonomluk dereceleri bu formül ile değerlendirilebilir. 0 ile 1 arasında çıkacak olan değerlerde 0'a yakın sonuçlar manuel 1'e yakın sonuçlar ise tam otonomluğa yakınlığı ifade eder. Bu arada kalan değerlerde yarı-otonom sistemler için olan aralıktır (Nof, 2009).

Mimari yapım süreçlerinde örneklerine sıkça rastlanan yarı-otonom robotlara verilebilecek örnek Construction Robotics tarafından üretilen tuğla döşeme robotudur. SAM100(Semi-Automated Mason), yığma duvar örme için piyasaya sürülmüş ilk tuğla örme robotudur (Construction Robotics, b.t.).

Haznesine konulan tuğlaları aldıktan sonra tuğlalar arasında kullanılan harçtan tuğlanın iki yüzüne alıp gerekli yere yerleştirmektedir. Şekil 2.8’deki gibi tuğlaları alıp gerekli yerlere yerleştirmesi konusunda otomatik iş görebilse de tuğlaların kontrolünün bir operatörde olması yerleştirilen tuğlalar arasından taşan harçların inşaat çalışanları tarafından temizlenme gereksiniminde olması gibi sebeplerle yarı-otonom sistemdir (Construction Robotics, b.t.).



Şekil 2.8 SAM100 tuğla örme robotu (Construction Robotics, b.t.)

2.3.5.2 Otonom Robotlar

Otonom robotlar; bağımsızlık dereceleri yüksek, kendi kendilerine hedeflere ulaşabilen robotlardır. Bu robotlar, sıkıntı ve tehlikeden uzak durmalarını sağlayan bir dizi veriden oluşmaktadırlar. Tanımlanmış bu veriler, önceden tanımlanmış bilgilerdir. Genellikle zorlayıcı ve tehlikeli işler için kullanılan bu robotlar, beklenmedik koşullarla başa çıkabilmeli ve değişiklikler doğrultusunda hareket edebilmelidir (Nof, 2009).

Otonom robotlar, otonom elektrikli süpürgeler gibi sadece gezinmek ve kızıllötesi veya ultrasonik sensörlerle “görmek” için basit çalışma prensiplerine sahip

olabilecekleri gibi daha üst düzey otonom robotlar, gördükleri şeyleri algılama, tanımlama ve sınıflandırma yapabilecek karmaşıklıkta olabilirler (Eliport, 2018).

Rosalind Franklin adlı gezici robot, 2022 yılında Mars'a gönderilmek için hazırlanan bir keşif aracıdır. Bu robot, Mars'ta gerek geçmişte gerek günümüzde var olup olmadığı belli olmayan organik maddeler araması için tasarlanan bir araçtır. Robota eklenen panoramik kamera, robotun bulunduğu yeri kazması veya yola devam etmesi arasında karar verme mekanizmasının yardımcı elemanıdır (ESA, 2019).

Yapım süreçlerinde tam otonom robotlar da mevcuttur ve her geçen gün gelişmektedir. Advanced Construction Robotics adlı şirketin ürettiği Şekil 2.9'deki Tybot isimli tam otonom robot, inşaat demirlerini bağlamak için üretilmiştir. Köprü güvertelerinde kendi kendine gezinip bağlanması gereken demirleri algılayıp bağlayan bir robottur (Construction Robots, b.t.).

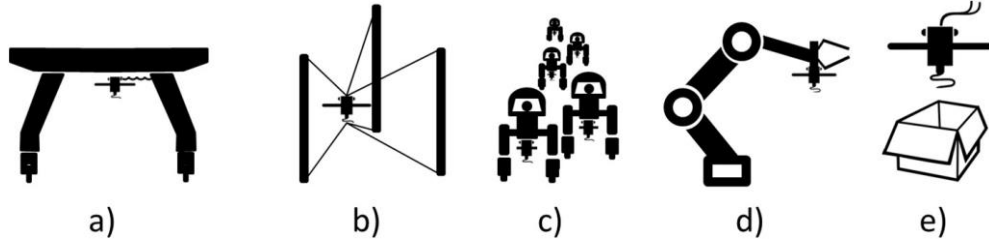


Şekil 2.9 Tybot isimli otonom inşaat demiri bağlama robotu (Construction Robots, b.t.)

2.3.6 Üretim Mekanizmalarına Göre İnşa Robotları

Yapım sistemlerinin gelişen teknoloji ve isteklere cevap verebilmesi adına sürekli olarak gelişen ve değişen üretim tipleri bulunmaktadır. Özellikle; yerinde veya fabrikada yapım, basılacak olan yapı veya yapı elemanı, baskıda kullanılacak olan malzeme ve basılacak olan ürünün boyutları gibi girdilere göre üretim tipine uygun üretim yapmak istenilen tasarrufları ve esneklikleri sağlayacaktır.

İncelenecek üretim tipleri Şekil 2.10’da da gösterildiği gibi; vinç, kablo destekli, sürü yaklaşımli, robotik kol ve katlamalı sistemler olarak ele alınacaktır (Labonnote, Rønquist ve Rüther, 2016).



Şekil 2.10 Üretim tipleri a) vinç, b) kablo destekli, c) sürü yaklaşımli, d) robotik kol, e) katlama (Labonnote ve diğer., 2016)

2.3.6.1 Vinç Sistemleri

Vinç sistemleri, üretim tekniğinin ölçeğinin doğrudan yapıya uyarlanması şeklinde düşünülebilir. Çoğunlukla, kartezyen koordinat sistemini kullanan dev 3B yazıcılar, X-Y-Z eksenlerinde hareket ettirilerek baskı işlemini gerçekleştirirler (Labonnote ve diğer., 2016). Bu sistemlere verilecek örnek teknolojiler Bölüm 3’te detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

Ayaklı bir çerçeve sistemi olarak da adlandırabileceğimiz bu tip üretimin ilk örneği, 2001 yılında betonun ekstrüzyon ile baskı yapılabilmesi için Güney Kaliforniya Üniversitesi’nden Khoshnevis’in patentini aldığı Contour Crafting (CC) teknolojisidir. Bir objeyi tek bir seferde basabilen bir üretim anlayışla bu teknoloji geliştirilmiştir (Khoshnevis, Russell, Kwon ve Bukkapatnam, 2001).

2007 yılında Birleşik Krallık’ta bulunan Loughborough Üniversitesi’nde, “Serbest Biçimli İnşaat” olarak da bilinen “Concrete Printing” teknolojisi geliştirilmiştir (Buswell, Soar, Gibb ve Thorpe, 2007). CC’den farklı olarak, beton baskıda duvar, panel gibi yapı elemanların daha detaylı bir şekilde basılması prensibi ön plandadır (Buswell, Thorpe, Soar ve Gibb, 2008).

Yine 2008 yılında Enrico Dini, D-Shape adlı toz bazlı malzeme kullanarak üretim yapabilen teknolojiyi piyasaya sürmüştür. 6 x 6 x 6 m ölçülere sahip bir yazıcı olduğundan ve toz bazlı malzeme kullanılıyor olmasından iklim şartlarından kolay etkilenebilir olacağından fabrikada üretim için daha uygun bir teknolojidir (Strauss, 2013).

2.3.6.2 Kablo Destekli Sistemler

Kartezyen koordinat sistemi, eklemeli üretim için en sık kullanılan başvurulacak yollardan bir tanesi olsa da büyük ölçekli üretimlerde kartezyen koordinat sistemi yetersiz kalabilmektedir. Vinç sistemlerin; araziye taşınması, monte edilmesi ve yeri geldiğinde bu durumlarla karşılaşmamak için fabrikada üretim yolunun tercih edilmesi (D-Shape gibi) gibi zorlukları vardır. Bunlara çözüm olarak kablolu asma platformlar geliştirilmiştir (Barnett ve Gosselin, 2015).

Vinç sistemlerine göre daha büyük ve esnek çalışma alanları sağlayabilmeleri, taşınma ve kurulum yönünden daha basit oldukları için maliyetin daha ucuza çıkması gibi avantajları mevcuttur. Sistemler, birden çok kablo elemanın harici bir çerçeveye uç elemanlar ile bağlanmasından oluşur. Uç elemanlar, kabloları uzatabilmek ve geri çekebilmek için kullanılan elemanlardır ve motorlar tarafından kontrol edilirler (Barnett ve Gosselin, 2015).

2007 yılında Bosscher ve arkadaşları tarafından 4 altta 8 üstte olmak üzere 12 kablodan asılmış bir uç eleman ile birleştirilmiş çerçeve sistemden oluşan “C4 robot” adlı platformu sunmuşlardır. Her ölçüsü 50’şer m şeklinde tasarlanmış bu küp çerçevenin -44 x 44 x 40 m maksimum ulaşılabilir baskı boyutları vardır (Bosscher, Williams, Bryson ve Castro-Lacouture, 2007).

Daha sonraki yıllarda MIT’den Neri Oxman hem büyük ölçekli yapıları basabilen hem de bu yapıları basabilecek olan yazıcının kolayca konumlandırılmasını kendisine amaç edinerek “Spider Bot” isimli kablo destekli sistemi ortaya koymuştur. Sistem “Doğa için, doğa ile ve doğa sayesinde” şeklinde mottosu ile, dışarıda hali hazırda

zaten bulunan yüksek yapılar veya bitki örtüsünü destek olarak kullanarak yazıcının konumlandırılmasını amaçlamaktadır (Bn Peters, b.t.).

Kablo destekli üretim tipinde adından en çok söz ettiren teknolojilerden bir tanesi de WASP adlı şirkettir. 2012 yılında düşük bütçeli yapı üretimi yapabilmek için İtalya’da araştırmalarına başlamışlardır. Çözümleri her ne kadar Delta Robot içerse de kablolu askı platformu olarak sınıflandırmada mümkün olan projeleri vardır. Çünkü uç elemanlar yardımı ile bir çerçeve sistemine tutturularak baskı yapabilen robot mevcuttur (Labonnote ve diğer., 2016). Mimari yapım süreçleri için toplamda iki adet çözümleri vardır. Bunlardan ilki Big Delta adını verdikleri dünyanın en büyük 3B yazıcısı olarak iddia ettikleri sistemdir. Diğeri ise WASP Crane isimli, Big Delta’nın gelişmiş versiyonu olan ve modüler çerçeveler doğrultusunda çalışan sistemdir (WASP, b.t.a).

2.3.6.3 Sürü Yaklaşımlı Sistemler

1997 yılında Pegna’nın “Büyük yapıların inşası için mekanik karıncalar ordusu, her seferinde bir kum tanesi” tanımlamasıyla yola çıkılmış bir teknolojidir (Pegna, 1997). Tek, büyük ve sabit bir çerçevenin baskı işleminde kullanılmasının fonksiyonel olmadığını bu nedenle küçük, mobil ve çoklu robotların kullanım yaklaşımının benimsendiği bir üretim tipidir (Labonnote ve diğer., 2016).

Özellikle, üretim yapılacak alana ulaşmanın zor olduğu yerlere, hantal makinelerin götürülmesi de zor olacağından sürü yaklaşımı sistemleri oldukça caziptir (Labonnote ve diğer., 2016). Ceccanti ve arkadaşları “tekerler üzerinde hareket edebilen ve regoliti toplama ve yerleştirme işlemini yapan başka bir gezici tarafından desteklenerek hareket eden küçük bir yazıcı (1-2 m baskı genişliğine sahip), diğer yaklaşımlara göre daha verimli çalışır” ifadesini ay yüzeyinde yapılacak olan çalışmalar için kullanmışlardır (Ceccanti, Dini, Kestelier ve Pambaguian, 2010).

Katalonya İleri Mimari Enstitüsünde, Sasa Jokic ve Petr Novikov tarafından üretilen “Minibuilder” yani minik inşaatçılar, büyük ölçekli yapıların üretimi için her

biri 0,05 m³'ün altında olan üç adet robot geliştirmişlerdir. Temel, kavrama ve vakum robotları, sırasıyla birbirlerinin yaptıkları işlerin üzerine ekleyerek üretimde yer alırlar (Jakupovic, b.t.).

2.3.6.4 Robotik Kol Sistemleri

Robotik kolların mimaride kullanımı, geniş çaplı araştırmaların devam ettiği bir araştırma alanıdır. Boya yapabilen, fayans döşeyebilen, sıva yapabilen gibi yapıya ilişkin belirgin görevleri yapan robotların yanı sıra, yapının kendisini veya yapının elemanlarını ekstrüzyon ile üretebilen robotlar da mevcuttur (Khoshnevis, 2004).

Scott Howe ve arkadaşlarının sunduğu “ATHLETE” isimli, insan müdahalesi olmadan çalışabilen altı kollu ve altı veya yedi serbestlik derecesine sahip olan mobil robot bu kategoriye verilebilecek örneklerden biridir (Howe ve diğer., 2014).

ETH Zürih'in bünyesinden bir şirket olan ROB; Gramazio & Kohler iş birliğinde otonom çalışabilen ve tuğla döşeyebilen bir robotik kol üretmişlerdir. 2006 yılında İsviçre'de Gantenbein Şaraphanesi'nde bir servis binasının cephesinin 20.000 adet tuğla ile belirlenen aralık ve konumlarda dizilmesi ile bu kol sayesinde standart olmayan Şekil 2.11'de de görülebileceği gibi bir cephe tasarımı üretimi gerçekleştirilebilmiştir (Labonnote ve diğer., 2016).



Şekil 2.11 Gantenbein Şaraphanesi'nin robotik kol ile üretilmiş cephesinin gösterimi (Archdaily, 2012)

2.3.6.5 Katlamalı Sistemler

İnce kabuklu yapıların inşa robotları ile üretilmesi, üretim hızını önemli ölçüde arttırmaktadır. Yapılan araştırmaların çoğu, orta büyüklükte yapılar için olsa da inşa robotları teknolojilerinde her geçen gün artan yenilikler ile bu tip üretim sistemleri gelişmelere oldukça açıktır. En önemli avantajlarından bir tanesi ise çoğunlukla, baskı makinesinin ölçülerinin ve baskı yapılacak objenin ölçü sınırlarının önemli olmadığı bir üretim sistemidir. Örneğin, Tibbit'in 13 x 13 x 15 cm ölçülerinde olan baskı yatağında 15 metre uzunluğunda bir ipliğin avize üretimi için basılması bunun bir kanıtıdır (Labonnote ve diğer., 2016).

Deng ve Cheng'in yaptıkları araştırmalar, büyük ölçekli kabuk yapıların eklemeli üretim ile inşa edilebilmesi genellikle küçük hacimli malzemelerin kullanımı ile birçok katmandan oluşturulduğunu göstermektedir. Süreç boyunca, origami tasarım prensiplerini eklemeli üretim tekniklerine uyarlamaya çalışmışlardır. Ancak yaşadıkları en büyük zorluklardan biri; 3B kabuk yapıyı katlanabilir 2B yapıya dönüştürmek için gerekli olan algoritmanın geliştirilmesi olmuştur (Deng ve Chen, 2013).

Ge ve arkadaşları ise, aktivasyon enerjisi vererek kendi kendine katlanabilme özelliğini araştırmışlar ve "Basılı Aktif Kompozitler" kavramını tanıtmışlardır. Camı polimer elyaflarla takviye edilmiş ve şekil hafızası etkisi sergileyen bir elastomerik matriks içeren bir malzemeyi sıcaklıkla aktive ederek kendi kendine birleştirme yapabilmesi sağlanmıştır (Ge, Qi ve Dunn, 2013).

2.3.6.6 Dron Sistemleri

Bir inşaat sahasında dronların kullanımı gün geçtikçe artmakta ve kullanım alanları çeşitlenmektedir. İnşaat öncesi, inşaat sırası ve inşaat sonrası olarak ayrılabilen görev alanları ile dronlar, belirlenen işlerde kullanılması ile hızlı ve ekonomik çözümler sunmaktadırlar.

Dronlar; inşaat öncesi saha incelenmesi, havadan ölçüm ve haritalama, kazı derinliklerinin saptanması ve malzeme stoklarının ölçülmesi gibi inşaat öncesi süreçlerde yer alabilirler. İnşaat sırasında dronların kullanımı ise; şantiyedeki ilerlemeyi izlemek ve belgelemek, emniyet, güvenlik ve üretkenlik denetlemelerini yapmak, malzeme taşınmasına yardımcı olmak şeklinde sıralanabilir. İnşaat sonrası süreçlerde ise; ulaşılması güç noktalarda yapılarda ortaya çıkan sorunların görüntülenmesi ve tespit edilmesi gibi önemli rollerde görev almaktadırlar (Li ve Liu, 2019).

İnşaat sektöründe kullanılan dronlar Şekil 2.12’de gösterildiği gibi dört farklı tip üzerinden incelenebilirler. Bunlardan ilki olan çok rotorlu dronlar; genellikle havadan haritalama işlemleri ve hafif malzemelerin taşınması için tercih edilirler. Dört, altı ve sekiz rotorlu olarak ayrılan bu dronların dezavantajları, sınırlı dayanıklılıkları ve hızlarıdır. Uzun süre hava kalabilmek için diğer dronlara göre daha fazla enerji harcamaları gerekmektedir. Dron ve kamera ağırlıklarına bağlı olarak, havada kalabilme süreleri yaklaşık 20-30 dakika şeklindedir. Sabit kanatlı dronlar ise dikey rotorlar tarafından itme üretmezler, sadece sabit kanatlar kullanılarak kaldırma uygularlar. Bu dronlar, havada kalmak için ve sadece ilerlemek için enerjiye ihtiyaç duyarlar. Çok rotorlu dronlara göre daha uzun mesafeler gidebildikleri için genellikle geniş alanların topografik haritalanması için tercih edilebilirler. Tek rotorlu dronlar ise benzinli motorlarla çalışabilmektedirler. Bu nedenle havada çok rotorlularla kıyaslandığında daha uzun süre kalabilirler. Daha yüksek taşıma kapasitelerine, eklentilerle ulaştırılabilirler. Tek rotorlu dronların dezavantajı ise titreşim ve daha fazla bakım ve üretim maliyetidir. Sabit kanatlı dronların quadcoptlerlara göre daha enerji verimli olması ve bunun sonucu olarak daha uzun mesafeleri daha kısa sürelerde gidebilmesinin yanında quadcoptlerların iniş ve kalkış süreçlerinde çok fazla alana ihtiyaç duymamalarından kaynaklı üreticiler tarafından hibrit dronlar üretilmiştir. Bu dronlar, önceden kullanıcı tarafından belirlenmiş bir yükseklikte ve rotada uçar ve renk ve multispektral sensörleri aracılığıyla verileri toplamaktadır. Ardından başlangıç noktasına ilerleyerek dikey olarak iniş yapmaktadır (Tkáč ve Mesároš, 2019).



Şekil 2.12 İnşaat sektöründe kullanılan dronlar (Drones unmanned aerial vehicles, b.t.)

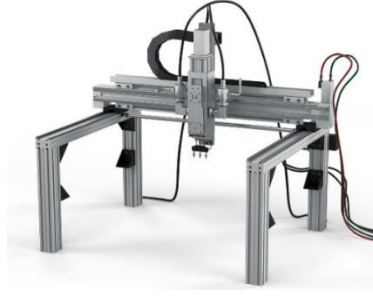
Bu tez içerisinde yer alan örneklerden bir tanesi dronların taşıma ve yerleştirme yeteneklerinden yararlanılarak oluşturulmuş The Vertical Village enstelasyonudur. ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2016-17’de ise hem diğer robotlarla senkronize çalışarak ihtiyaç duydukları anda malzeme temini sağlamış hem de yapının ana malzemesi olan filament ile yapının formunun oluşturulmasında yardımcı olmuştur.

2.3.7 Hareket Mekanizmalarına Göre İnşa Robotları

Hareket mekanizmalarına göre robotlar kısaca aşağıdaki gibi sınıflandırılmış. Hareket mekanizmalarını bilerek inşaat robotunu seçmek, robotun yapılması istenen işteki verimliliği açısından önemli olduğu vurgulanmak istenildiği için bu tezde bu sınıflandırılmaya kısa olsada yer verilmiştir.

2.3.7.1 Kartezyende Çalışan Robotlar

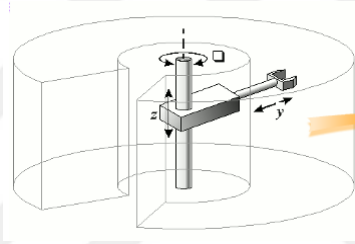
Kartezyen koordinat sisteminde çalışan Şekil 2.13’teki gibi robotlar, çizgisel olarak üç ayrı eksenle hareket edebilen robotlardır.



Şekil 2.13 Kartezyen düzlemde hareket eden robot örneği (Cartesian robot, b.t.)

2.3.7.2 Silindirik Çalışan Robotlar

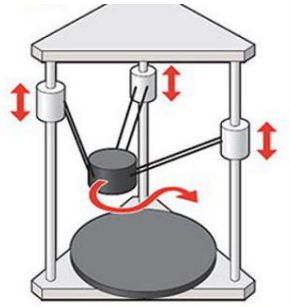
Silindirik robotlar, 3 eksende hareket edebilen Şekil 2.14’teki gibi robotlardır. İki tane çizgisel ve biri dönelecek olarak çalışan eksenlere sahiptir (Silindirik robotlar, b.t.).



Şekil 2.14 Silindirik koordinat sisteminde çalışan robotun çalışma prensibini gösteren temsili görüntü (Silindirik robotlar, b.t.)

2.3.7.3 Delta Çalışan Robotlar

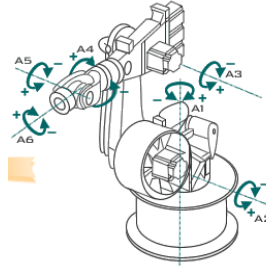
Şekil 2.15’teki gibi delta robotlar, bir askıya bağlı genellikle 3 kolun olduğu sistemler olup taşıma işlemleri için tercih edilen robotlardır (Delta Robot Nedir ve Nereelerde Kullanılır, b.t.).



Şekil 2.15 Delta robot çalışma prensibini gösteren temsili görüntü (Martel, 2017)

2.3.7.4 4 ve 6-eksenli Çalışan Robotlar

Şekil 2.16'daki gibi 4 ve 6 eksenli robotlar, aletleri istenilen yerlere 4 ve 6 hareketli başlığı ile ulaştırabilen robotlardır.



Şekil 2.16 6 eksenli robot çalışma prensibini gösteren görüntü (Robot kollar – eklemli robotlar, b.t.)

2.3.8 Üretim Yaklaşımlarına Göre İnşa Robotları

Üretim yaklaşımlarına göre inşa robotları; yerinde ve fabrikada yapım olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır.

2.3.8.1 Yerinde Yapım

Yerinde yapım; geleneksel inşaat tekniklerinin kullanıldığı ve tüm aşamaların sahada gerçekleştirildiği yaklaşımdır. Dünya ve ülkemiz çapında alışlagelmiş ve oldukça benimsenmiş olan bu yaklaşımın avantaj ve dezavantajları uygulanmak istenen projeler için değişiklikler göstermektedir. Bu yaklaşımda, inşaat başladıktan sonra dahi projede değişiklik yapılabilir. Özel tasarım detaylarının uygulanması kolaydır. Bunlara ek olarak; hava koşullarının değişimi inşaat süreçlerini etkiler. Gerekli uygulamaların hepsi belli bir sırayla yapıldığından, bir alandaki gecikme bütün yapının uygulama sürecini değiştirir. Fabrikada üretim yaklaşımı ile karşılaştırıldığında; iş sağlığı ve güvenliği prosedürlerinin daha da dikkatli uygulanması gerekmektedir (Daniels Construction, 2018).

Robotların yerinde yapım yaklaşımında kullanılmaları ise; uygulaması yapılmak istenen projenin, istenilen konumda robotlar yardımıyla üretilmesini kapsar.

Robotların yerinde yapım yaklaşımlarında kullanılması genellikle eklemeli üretim teknolojileri tercih edilmesinin yanı sıra diğer üretim teknolojilerinde de kullanım olanakları artmaya başlamıştır.

2.3.8.2 *Fabrikada Yapım*

Fabrikada yapım; yapı bileşenleri ya da yapının tamamının saha dışı bir fabrikada üretildikten sonra istenilen konuma taşınıp montaj işleminin tamamlanmasını içermektedir. İnşaat sektöründe bu yaklaşımla çalışılması yerinde yapıma kıyasla oldukça yenidir. Bu yaklaşım, elde edilmek istenen yapının tasarımı, uygulanabilirliği ve konumuna bağlı birkaç parametreye göre tercih sebebi olabilir. Parça, modül ve yapının tamamının fabrikada üretilebileceği bu yaklaşımda da avantajlar ve dezavantajlar projenin kendisine bağlıdır. Yerinde yapımda olduğu gibi zorlu hava koşulları üretim hızını ve işleyişini değiştirmez. Böylelikle planlanan zaman ve maliyetten farklı durumların oluşma riski azdır. Bazı durumlarda daha hızlı üretim potansiyeli sunar. Yerinde yapımda çevreye verilen rahatsızlık bu yaklaşımda yoktur. Ancak; her tasarım fabrika koşullarında üretim yapmaya uygun değildir. Özel tasarımlar daha maliyetli sonuçlar doğurabilir. Ayrıca; üretim başladıktan sonra projede değişiklik yapılamaz bu nedenle üretim başlamadan önce oldukça detaylı planlamalar yapmak gerekmektedir (Daniels Construction, 2018).

Fabrikada üretim yaklaşımında robotların kullanılması, parça, modül veya yapının tamamının saha dışı, kontrollü bir ortamda üretimi kapsar. Eklemeli üretim teknolojilerinde çok fazla tercih edilmemelerine rağmen; Tablo 5.3'te görülebileceği üzere çıkarmalı, birleştirmeli, biçimlendirmeli ve döküm/kalıplama üretim teknolojileri için kullanılan bir yaklaşımdır.

BÖLÜM ÜÇ

İNŞA ROBOTLARININ ÜRETİM TEKNİKLERİNE GÖRE MİMARİ YAPIM TEKNOLOJİLERİ VE KULLANIM KRİTERLERİ

Bu bölümde, inşa robotlarının üretim tekniklerine göre yapım süreçlerinde nasıl ve ne şekilde kullanılabileceklerine dair bilgiler, kullanılabilecek malzemeler ve kullanılan teknolojiler üzerine detaylar incelenmektedir.

3.1 Mimari Yapım Süreçlerinde Eklemeli Üretim Tekniği

Mimari yapım süreçlerinde eklemeli üretim tekniği genel olarak, 3B yazdırma işlemi ve ekstrüzyon ile malzemenin bir robot tarafından yazdırılmasını ifade etmektedir.

3.1.1 3B Yazıcı Kavramı

3 Boyutlu yazıcı ile yazdırma kavramı, bilgisayar ortamında modellenmiş objelerin gerekli ham madeler kullanılarak katmanlı bir yapım yöntemi ile gerçek nesnelere dönüştürülmesini ifade eder. İcat edildiği dönemlerde oldukça pahalı ve karmaşık bir teknoloji olmasına rağmen her geçen gün endüstrinin birçok kolunda yerini almayı başarmıştır (Öztürk ve Öztürk, 2018). Charles W. Hull'un 1984 yılında üretilen 1986 yılında patentini aldığı 3B yazıcılarla başlamış olan sektör hızla gelişmiş ve otomotiv, havacılık ve uzay teknolojileri, tıp gibi alanlarda yer almayı başarmıştır (Hager, Golonka ve Putanowicz, 2016).

3.1.1.1 3B Yazıcıların Tarihçesi ve Mimarlığa Girişi

Tablo 3.1 3B yazıcıların tarihçesi ve mimarlığa girişi

1984	Stereolitografi adı verilen teknik ile 3B yazıcıların ilk adımı Charles W. Hull tarafından atıldı. 1986 yılında ürünün lisansını aldıktan sonra 3B Sistemlerini Kaliforniya’da kurdu ve ilk ticari yazıcıyı geliştirdi (Stone, 2020).	
1988	S. Scott Crump kızı için bir oyuncak kurbağa yapmanın daha basit bir yolunu arıyordu. Sıcak tutkal tabancası kullanarak plastiği eritti ve ince tabakalara döktü. Erimiş Birikim Modellemesi'nin (FDM) icadını aradı (Pearson, b.t.).	
1997	Aeromet adlı şirket, lazer katkılı üretim sektörüne girdi. Havacılık sektörü için titanyum parçaları oluşturabilmek adına yüksek güçlü lazer ve toz titanyum alaşımları kullanan lazer katkı maddesi üretimi (LAM) yapmaya başladılar (Richardson, 2014).	
1998-2004	Yazıcıların gelişmesi ve bu yazıcıların kullanıldığı sektörlerin artması üzerine 3B yazıcılar ucuzlamaya başladı.	
2002	Prof. Behrokh Khoshnevis tarafından ilk 3B yazdırma tekniği ile duvar üretilmiştir (3D printing: The future of construction, 2018).	
2004	Enrico Dini, D-Shaped projesini başlattı (D-Shape, b.t.).	
2005	Z Corporation adlı şirket Spectrum Z510 adlı dünyanın ilk yüksek renk tanımlı 3B yazıcısını sundu (Burlington, 2005).	
2008	Enrico Dini, D-Shaped yazıcısını piyasaya sürdü. Mimari yapım süreçlerinde daha sonraki zamanlarda sıkça kullanılan bir yazdırma tipi haline geldi (Twigg, 2016).	 (Twigg, 2016)

Tablo 3.1 devamı

2010	Loughborough Üniversitesinden Dr Richard Buswell ekibiyle birlikte ilk beton yazıcısını geliştirmiştir (Gardiner, 2011).	
2013	San Francisco Körfezi'nden hasat edilen tuzun da kullanılarak 3B yazdırma tekniği ile deneysel olarak saltYgloo adlı pavyon üretilmiştir (Rael Sanfratello, b.t.).	 (Rael Sanfratello, b.t.)
2014	Amsterdam'da olması planlanan Canal House isimli proje 3B yazdırma tekniği ile Dus Architects tarafından tasarlanılmaya karar verilmiştir. 3B yazdırma tekniği ile yapı üretimleri sıklaşmıştır (3D Print Canal House, b.t.a).	
2016	ApisCor adlı şirket tarafından Rusya'da 38 metrekarelik bir ev 24 saat içerisinde beton döken bir 3B yazdırma özelliğine sahip bir robot kol tarafından inşa edildi (3DStartup: Apis Cor, creators of the 3D printed house, 2018).	 (3DStartup: Apis Cor, creators of the 3D printed house, 2018)
2018	BatuPrint adlı şirketin ürettiği robot kol ile 95 metrekarelik bir ev beton yazdırma tekniği ile üretildi. Robot kol aynı zamanda 3 farklı katmanı yazdırabilmesi açısından inşaat sektörüne hız kazandırabilecektir (Clarke, 2017).	 (Clarke, 2017)
2018	WASP adlı İtalyan şirketin ürettiği robot kol pirinç kabukları, kireç, saman, kil ve kum gibi organik maddelerden Gaia isimli evi inşa ettiler (Chiusoli, 2018).	 (Chiusoli, 2018)
2019	ApisCor tarafından yapılan 9,5 m yüksekliğinde 640 metrekare 2 katlı belediye binası Dubai'de yapılmıştır (Collaborative Project with Dubai Municipality, 2019).	 (Collaborative Project with Dubai Municipality, 2019).

3.1.1.2 3B Yazıcıların Baskı Yöntemleri

3B yazdırma tekniği ile üretim yapılacak her sektör için gerekli yazıcı türünü seçebilmek zaman, maliyet ve malzemeden tasarruf sağlar. Bu nedenle yapım süreçleri içerisinde de 3B yazdırma teknikleri kullanılacak ise aşağıda verilen çalışma prensiplerine göre sınıflandırmalara dikkat edilmelidir.

3.1.1.2.1 Eritilmiş Biriktirme Modellemesi (Fused Deposition Modelling- FDM). Filamentlerin eritilerek katman katman istenilen objenin imal edilmesi yöntemidir. ABS (Akrilonitril bütadien stiren) ve PLA (Polilaktik Asit) gibi termoplastik hammaddeler kullanılır. Hem baskı hızı yavaş hem de yüzey kalitesi düşük yazdırma çeşididir. 0,1-0,3 mm katman çözünürlüğüne sahip makinelerdir. Maket yapımı ve prototip üretimi gibi amaçlarda kullanılabildikleri için otomotiv ve beyaz eşya sektörlerinde kullanımlarına sıkça rastlanırlar (Yağız, 2020).

3.1.1.2.2 Stereolitografi (SLA). Charles W. Hull tarafından üretilen ilk 3B baskı yöntemi olarak bilinir. Bir haznede, sıvı foto polimer malzeme doludur. Lazer ışınının bu haznenin üzerinden geçmesiyle ışının geçtiği yerler katılaşır. Böylece, lazerle sıvıyı katılaştıran bu yöntem ile istenilen objeler elde edilebilir (Yağız, 2020). Yüksek çözünürlüklü baskı elde edilebilen bu yöntemde katman çözünürlüğü 0,06-0,15 mm'dir. Orta düzeyde bir baskı hızı olmasına rağmen FDM ile kıyaslandığında hızı daha yüksektir. Yüzey kaliteleri yüksek nesneler ortaya çıkarılabilirken bu nesnelerin dayanıklılıkları düşüktür. Yüksek hassasiyette parça üretiminin mümkün olduğu bu baskı yönteminde renkli parçalar üretme imkânı olduğundan FDM'ye göre hitap edebileceği sektör sayısı daha fazladır. İnce işçilik ile çalışılması gereken sektörler için sanat, dişçilik, kuyumculuk gibi uygun bir yöntemdir (Yağız, 2020).

3.1.1.2.3 Selektif Lazer Sinterleme (SLS). Ham madde olarak toz plastiğin kullanıldığı yöntemdir. Lazer, her katmandaki toz plastiğin üzerinden geçerken o katmanı bir altındaki katmana yapıştırarak objelerin üretilmesini sağlar. Toz plastik kullanımının dezavantajlarından biri olarak üretilen objelerin yüzeylerinin her zaman biraz tozlu ve bu nedenle de pürüzlü kalmasıdır. 0,06-0,15 mm katman çözünürlüğü

ile çalışan bu yazıcıların baskı hızı yüksektir. Kendi kendini destekleyerek üretimin gerçekleştirildiği bu yöntemde destek malzemesi kullanmaya gerek kalmamasından dolayı karmaşık ve hacimli parçalar üretilebilir. Üretilen objelerin dayanıklılığın yüksek olması sebebi ile havacılık sektöründe, hacimli parçalar üretilebildiğinden ise mimari alanda kullanıma uygun bir yöntemdir (Yağız, 2020).

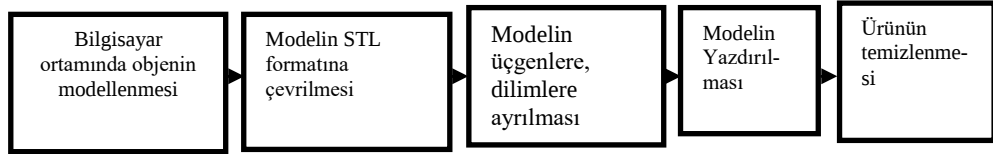
3.1.1.2.4 Toz ile Yapıştırma Teknolojisi (Binder Jetting Technology). SLS ile üretime benzeyen bir yöntemdir. Ham maddesi toz plastik olmasına rağmen SLS’de kullanılabildiği göre daha kalitesizdir. Ayrıca, toz plastiğin püskürtülen yapışkan katman ile birbirine yapışması sonucu üretim gerçekleşir. Ölçü ve yüzey hassasiyeti düşük üretimler yapılan bu baskı yönteminde kırılabilir parçalar elde edilir. 0,089-0,12 mm katman çözünürlüğünde nesneler elde edilir. Düşük kaliteli, kırılabilir ve doğruluğu kesin olmayan üretimlerden dolayı baskı hızı oldukça yüksektir. Bu baskı yönteminin avantajlarından bir tanesi ise renkli baskı seçeneklerinin geniş olmasıdır. Yine SLS’de de görülen, toz plastik ile çalışmanın vermiş olduğu pürüzlü son çıktılar hava kompresörleriyle temizlenmelidir (Yağız, 2020).

3.1.1.2.5 PoliJet Teknolojisi (PolyJet Technology). Ham madde olarak genellikle akrilik reçinenin kullanıldığı yöntemde, reçine UV ışınları ile katılaştırılıp bir alttaki katmanla birleştirilir. Avantajları arasında, birden fazla ögeli parça imalatı yapılabildiği gibi kullanılabilecek renk skalası geniştir. Elde edilen nesnelerin yüzeyleri pürüzsüz ve kalitelidir. Baskı hızı yüksek bir yazdırma yöntemidir. 0,016-0,032 mm katman çözünürlüklerine sahip bu yöntemde mat veya şeffaf malzeme, sert malzeme, sıcaklığa dayanıklı yüksek mukavemetli malzeme gibi seçenekler mevcuttur. Bu yöntem, dişilik ve medikal uygulamalar için gerekli olan nesnelerin üretimi için uygundur (Yağız, 2020).

3.1.1.3 3B Yazıcıların Baskı Basamakları

3B yazdırma tekniği kullanılarak imal edilecek bir ürünün ilk olarak bilgisayar ortamında tasarımının bazı programlar (Tinkercad, Sketchup, Rhino, 3Ds Max, Maya gibi) ile oluşturulması gereklidir. Oluşturulan modelin STL(Steriolitografi)-

çoğunlukla- formatına dönüştürülmesinin ardından STL formatının modeli G-code ile dilimlere ve katmanlara ayırması gerekmektedir. Oluşturulan bu model yazıcıda imal edildikten sonra üretilen nesnenin destek malzemesi varsa çıkarılması ve son şeklinin verilmesi gerekmektedir. Şekil 3.1’de 3B yazdırma aşamaları sırasıyla verilmiştir (Yağız, 2020).



Şekil 3.1 3B yazdırma aşamaları (Sakin ve Kiroğlu, 2017)

3.1.1.4 3B Yazıcılarda Kullanılan Malzemeler

3B yazıcılarda kullanılabilen malzemelerin bir kısmı; akrilonitril bütadien stiren, polilaktik asit, laybrick, polivil alkol, laywood, yüksek darbe dayanımlı polistiren, T-Glase ve metaller ve alaşımlar şeklindedir.

3.1.1.4.1 Akrilonitril bütadien stiren-ABS. Dayanıklı bir yapıya sahip, işlenmesi kolay, endüstride ve günlük hayatta sıklıkla kullanılan opak termoplastik bir malzemedir. Pahalı bir malzeme olan ABS, geri dönüştürme sürecine işlenmemiş malzemelerle karıştırılarak girebilir. Böylelikle hem ucuz hem de kaliteli bir üretim elde edilmiş olur (ABS, b.t.). 3B yazıcılarda kullanılması için, nesnenin basılacağı platformun sıcak olması gerekmektedir. Ortalama 225°C’de eriyen bu malzemenin camlaşma sıcaklığı ise 105°C’dir. Petrol temelli bir malzeme olan ABS, eridiğinde ortama koku veren ve çevreye zararlı olan bir plastiktir. Yalnızca asetonda çözülebilir (Yağız, 2020). Lego oyuncaklar, televizyon kasaları, mutfak aletleri, telefonlar gibi günlük hayatta sıkça kullandığımız ürünler, bu malzemenin dayanıklılığından dolayı ABS’den üretilirler (ABS, b.t.).

3.1.1.4.2 Polilaktik Asit-PLA. Mısır nişastası, pirinç ve şeker kamışı gibi doğal ürünlerden elde edilen malzeme, çevreye koku ve zarar vermez. Camlaşma sıcaklığı

55-60°C olan bu malzeme, hassas ve kırılgan olması sebepleri ile endüstride kullanımları sınırlıdır (Yağız, 2020). PLA biyopolimer bir yapıya sahip olduğundan, geri dönüştürülmesi mümkündür (Biyo bazlı plastikler, b.t.). 3B yazıcılarda kullanılması için, nesnenin basılacağı platformun sıcak olması zorunlu değildir ama tercih edilir. Ortalama 190 °C’de eriyen malzemenin baskısı sürecince soğutma işlemi de gerçekleştirildiğinden ürünün eğilme oranı düşüktür. Biyolojik esaslı bir ürün olduğundan insan sağlığının ön planda olduğu sektörlerde kullanılması mümkündür. Yiyecek-içecek kaplarının, gıda kutularının ve medikal ürünlerinin PLA kullanılarak üretilmelerinde insan sağlığı açısından belirtilmiş bir zararı yoktur. Şekil 3.2’de PLA ve ABS ile üretilmiş ürünlerin karşılaştırılması verilmiştir (Yağız, 2020).



Şekil 3.2 PLA ve ABS ile üretilmiş aynı ürünün karşılaştırılması (PLA vs ABS, 2020)

3.1.1.4.3 Laybrick. Alman filament mühendisi Kai Parthy tarafından üretilmiş mineral temelli bir malzemedir. İnce öğütülmüş kalker ve termoplastik bir polyeesterin karıştırılması ile elde edilen bu malzeme 3B yazıcılarda en çok kullanılan ilk üç malzeme arasındadır. 3B yazıcılarda kullanılırken, 165-195 °C’de eritme sıcaklığının olması gerekmektedir. Şekil 3.3’te gösterildiği gibi düşük sıcaklıkta basılan ürünler daha detaylı ve pürüzsüz görünümlere sahipken yüksek sıcaklıklarda yapılan baskılarda yüzey pürüzlülüğü fazladır. Renk skalası, grimsi beyaz ile hafif bej arasında değişmektedir. Son ürünün eğilme oranı sıfıra yakın olduğundan mimari modeller ve heykelcikler için uygun bir malzemedir (3D printing materials bendlay laywood laybrick, b.t.).



Şekil 3.3 Soldan sağa sırasıyla 160-180-200-220°C’lerde Laybrick’ten üretilmiş nesnelerin görünüşleri (3D printing materials bendlay laywood laybrick, b.t.)

3.1.1.4.4 Polivinil Alkol-PVA. Genel olarak PLA ile üretilcek ürünlere destek malzemesi olarak görev yapacak ürünlerin malzemesidir. Suda çözünebilen bir malzeme olmasından dolayı, son ürünü elde edebilmek için baskı bittikten sonra destek malzemesinden ayırmak oldukça kolaydır. Malzemenin dezavantajları arasında ise; yüksek maliyetli olması, kaynağının zor bulunması ve nemden uzak saklama koşullarına sahip olması yer almaktadır. 3B yazıcılarda kullanırken; basılacağı platformun sıcaklığının 50-70 °C, baskı sıcaklığının ise 170-190 °C olması önemlidir (Yağız, 2020).

3.1.1.4.5 Laywood. Laybrick gibi Alman filament mühendisi Kai Parthy tarafından üretilmiş, bazı bağlayıcı polimerlerle karıştırılmış %40 geri dönüştürülmüş odun parçacıklarından yapılmış bir ahşap-polimer kompozitidir. Eğilme olasılığı düşük bir malzeme olduğundan sıcak baskı platformuna ihtiyaç yoktur. 3B yazıcılarda kullanımı için önerilen erime sıcaklığı 175-250 °C ‘dir. Düşük sıcaklıklarda yapılan baskılardan çıkan ürünler daha açık renkli olurken, yüksek sıcaklıklardan elde edilmiş ürünler koyu renkli olurlar. Ayrıca, erimiş plastik kokusu yerine baskı sırasında ahşap kokusu ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.4’te görüldüğü gibi ahşap bazlı bir malzeme olan Laywood ile basılan son ürünün kendisi de ahşap gibi görünür ve zımparalanabilir, taşlanabilir ve boyanabilir özelliklere sahiptir (3D printing materials bendlay laywood laybrick, b.t.).



Şekil 3.4 Laywood kullanılarak basılmış kutu örneği (3D printing materials bendlay laywood laybrick, b.t.)

3.1.1.4.6 Yüksek darbe dayanımlı polistiren-HIPS. Genellikle karışık tasarımlara sahip modellerin ABS ile basımında destek malzemesi olarak görev yapar. Petrolden üretilen bu malzeme ayrıca hafif parçaların üretimi içinde kullanılabilir. Çünkü, az bir esnekliğe sahip olan bu malzeme ile üretilen ürünler kırılgandır (Yağız, 2020). 3B yazıcılarda kullanılırken erime sıcaklığı 220-230°C, yatak sıcaklığı ise 50-60°C olarak tercih edilir. Limonen adlı kimyasal bileşeni içeren suyun içerisinde kendiliğinden çözünebildiğinden destek malzemesi olarak kullanıldığı baskılarda son ürünün temizlenmesi kolaydır (Yağız, 2020) (3D yazıcı filament özellikleri, b.t.).

3.1.1.4.7 T Glase-PETT. Berrak ve esnek bir yapıya sahip, polimerden üretilmiş bir baskı malzemesidir. 3B yazıcılarda, 220°C erime sıcaklığında ve 80°C yatak sıcaklığında kullanılmasına dikkat edilmelidir. Baskı sırasında koku ve duman çıkarmayan bu malzemenin son ürününün, kırılmaya karşı direnci olduğundan aşınmaya karşı dirençli cam niteliğinde düşünülebilir (Yağız, 2020).

3.1.1.4.8 Metaller ve Alaşımlar. Alüminyum, kobalt, bronz, bakır, çelik ve pirinç gibi metal ve alaşımların tozları ile PLA'nın karıştırılıp filamentler haline getirildikten sonra 3B yazıcılarda basılması mümkün olan malzemelerdir. Bu malzemeler 3B yazıcılarda kullanılırken; 195-220 °C erime sıcaklığında ve 60-70 °C yatak sıcaklığında basılmasına dikkat edilmelidir. Esneklikleri az ancak dayanıklılıkları yüksek olan son ürünler ortaya çıkar. Ancak, Şekil 3.5'te görüldüğü gibi katmanlarının birbirlerine iyi yapışmalarından dolayı pürüzsüz metalik görünümlü objeler elde edilebilirler. Kuyumculuk sektöründe oldukça sık tercih edilmesine rağmen heykel ve

tarihi yapıların restorasyonunda da büyük roller oynayan filamentlerdir (3D yazıcı filament özellikleri, b.t.).



Şekil 3.5 Yalnızca PLA kullanılarak basılmış ürün ve PLA-metal tozu karışımından basılmış ürünler (3D yazıcı filament özellikleri, b.t.)

3.1.2 Eklemeli Üretim Tekniğinin Mimaride Kullanımı

Yediğimiz ürünlerin paketlenmesinden giydiğimiz ayakkabıların üretimine kadar hayatımızın her alanında gerçekleşen otomasyonlu üretim, inşaat sektöründe de son 25 senedir hızlı bir şekilde gelişmektedir. Lim ve diğerlerine göre inşaatı otomasyonlaşmaya bu kadar hızlı iten ana sebeplerden birkaçı iş güvenliğinin sağlanması, zamandan ve maliyetten tasarruf etme isteği ve özellikle de mimari tasarım özgürlüğünün sağlanmasıdır (Lim ve diğer., 2012). Vähä ve diğerleri ise bu otomasyonlaşmayı kaliteli, güvenli, ucuz yapım süreçlerine ek olarak yaşam döngüsü ve iş gücünün basitleştirilmesi olarak tanımlamaktadır (Vähä, Heikkilä, Kilpeläinen, Järviluoma ve Gambao, 2013).

3.1.2.1 Mimari Yapım Süreçlerinde Kullanılan Eklemeli Üretim Tekniği ile Yazdırılan Malzemeler

Eklemeli üretim tekniği ile yapı inşa edebilmek için kullanılabilecek olan malzemeler, geleneksel yapım yöntemlerinde kullanılan malzemelerden ya tamamen farklı ya da içerik olarak oynanmış malzemelerdir. Eklemeli üretim yöntemi ile yapıların inşa edilmesinde genel olarak Şekil 3.6’da görüldüğü gibi; katı, viskoz, toz ve sıvı şeklinde sınıflandırılabilen malzemeler kullanılır. Bu dört kategorinin her biri; çimento, plastik, metal, kum ve kil gibi ana yapı malzemelerinin türlerini içerir

(Noorani,2017).



Şekil 3.6 Eklemeli üretim malzemelerinin halleri (soldan sağa; katı, viskoz, toz ve sıvı) (Labonnote ve diğer., 2016)

Üretim tekniği yönünden geleneksele göre farklı çözümler içeren eklemeli üretim, malzeme yönünden de birkaç özellik açısından verimlilik artışı sağlamaya yönelik çalışmalara dikkat etmeyi hedeflemiştir. Yapıda kullanılması öngörülen malzeme miktarı, inşaat sırasında çoğu zaman eksik veya fazla gelebilir. Böylelikle, hem üretim sırasında açığa çıkan atık malzemeler hem de öngörülemeyen malzemeler çevre kirliliğini sürekli olarak arttırmaktadır. Eklemeli üretim teknolojisinde ise son ürünün üretilmesi için yalnızca gerekli miktarda malzeme kullanımı gerçekleştirilir (Wu, Wang ve Wang, 2016).

Bunların yanında, eklemeli üretim teknolojisiyle kullanılacak harcın özelliklerinin uygun koşullara getirilebilmesi için yeni malzeme arayışları veya yeni karışımlar denenir ki bu durum da yapılarda kullanılabilecek malzeme yelpazesinin genişlemesini sağlamaktadır.

Bu üretim yolunda kalıp kullanımı olmamasından dolayı malzemenin hızlı kürlenmesi istense de her katmanın kendinden bir önceki veya bir sonraki katman ile de bütünleşmesi sağlanacak kadar kürlenmenin hızlı olması istenmez. Ayrıca, art arda eklenen katmanlardan, önce basılmış olanın kendinden sonra basılmış olan katmanı herhangi bir çökme veya deformasyon yaşamadan desteklemesi gerekmektedir (Kazemian, Yuan, Cochran ve Khoshnevis, 2017).

Yazdırılacak olan malzemenin, pompalanması kolay olacak bir malzeme olsun istense de sarkma veya şeklin formunu kaybetmesi gibi durumların önüne geçebilmek

için bu malzemenin lüleden daha sert bir yapıda olması tercih edilir. Hem geleneksel yöntemle üretilen yapılarda hem de eklemeli üretimle inşa edilen yapılarda en çok kullanılan malzemelerden olan beton, yapısında farklı boyutlarda ve şekillerde partiküllere sahip olduğundan heterojen bir malzemedir. Yani, eklemeli üretim için beton kullanımı tercih edildiğinde pompalama aşamasında problemle karşılaşmamak için malzemenin dikkatlice tasarlanmış ve karıştırılmış olması önemlidir (Mechtcherine, Nerella ve Kasten, 2014).

Malzemenin özelliklerinin yapısal olarak inşa edilebilirliğe göre ayarlanabilmesinin yanında, lüle tipinde de değişiklikler yapılarak bu özellik arttırılabilir. Örneğin Şekil 3.7’de gösterildiği gibi dairesel bir lüle, dikdörtgen ve kare bir lüle ile karşılaştırıldığında daha az harç ile temas alanına sahiptir. Dolayısıyla, dikdörtgen bir lüleden yazdırılan harcın kalıcılığı daha fazladır (Uygunoğlu, Özgüven ve Topçu, 2019).

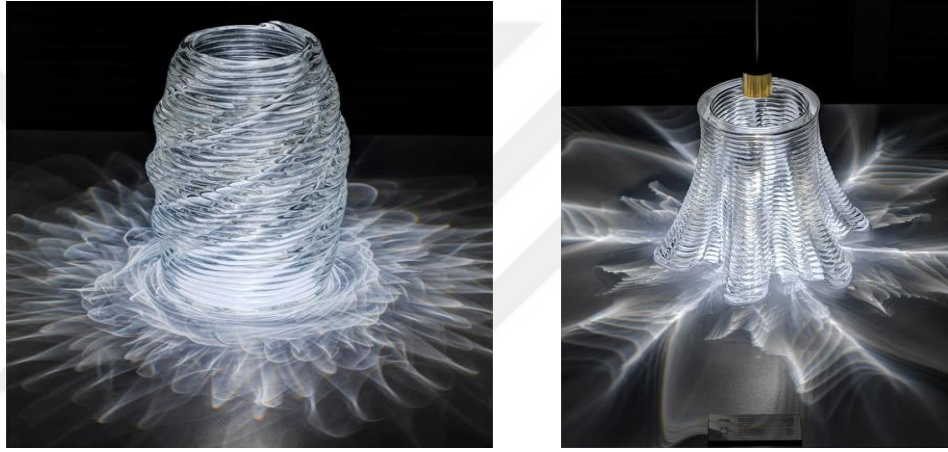


Şekil 3.7 Lüle deliğinin şekline bağlı olarak değişen yapısal boşluklar (soldan sağa; temas alanı, dairesel kesitli lüle ile yazdırılmış ürün, dikdörtgen kesitli lüle ile yazdırılmış ürün) (Uygunoğlu, Özgüven ve Topçu, 2019)

3.1.2.1.1 Katı Malzemelere Dayalı Eklemeli Üretim. Katı halde bulunan malzemenin, katmanlı bir şekilde üretimini içerir (Labonnote ve diğer., 2016). Günümüzde katı malzemelerden eklemeli üretim tekniği ile ürün elde etmek, o malzemenin genellikle viskoz hale getirilip basılması ile gerçekleştirilebilir.

Tasarımcı ve araştırmacı Neri Oxman ve MIT Media Lab'deki Mediated Matter grubu, erimiş camın 3 boyutlu baskısı için bir teknik geliştirip şeffaf cam nesnelerin bu teknik ile basılabileceğini göstermişlerdir. Bu projenin, optik olarak saydam cam

baskı sürecinin ilk örneği olduğunu ileri süren MIT’li grup, eritilmiş camı ekstrüde edebilen bir eklemeli üretim makinesi üretmişlerdir. Grubun mimarı; camın, yapı elemanı olarak kullanılabilcek parçalarının hatta yapının tüm cephesinin bu projenin geliştirilmesiyle basılabileceğini öngörmektedir. Denemeler, iki yalıtımlı bölmeden oluşan G3DP adlı yazıcı ile gerçekleştirilmiştir. Üstteki bölme fırın görevi yaparak sürekli olarak alttaki bölmeye akışkan camı sağlarken alttaki bölme ise camın yavaş yavaş soğumasını ve lüleden çıkan sıvı camın istenilen şekilde basılması için gerekli hareketleri yapmaktadır. Şekil 3.8’de sonuç ürünlerinden iki tanesi gösterilmiştir (Howarth, 2015).



Şekil 3.8 Mediated Matter tarafından üretilmiş G3DP yazıcısı ile basılmış cam ürünler (Howarth, 2015)

3.1.2.1.2 Viskoz Ekstrüzyon ile Eklemeli Üretim. Malzemenin eklemeli üretim ile bir yazdırma ucundan viskoz formda yazdırılıp biriktirmesini içeren süreçtir. “Ekstrüzyon esaslı işlemler” olarak da bilinir. Ekstrüzyon işlemi gerçekleşikten sonra malzeme katılaşır ve istenen forma ulaşır. FDM, InkJet ve PolyJet teknolojileri, ürünlerin elde edilmesi için viskoz malzemelerin sıkça kullanıldığı eklemeli üretim yöntemlerindendir (Labonnote ve diğer., 2016). Mimari yapım süreçlerinde viskoz malzemelerin kullanımları, genellikle bir macun benzeri malzeme ile kütsel olarak oldukça yoğun dökme malzemelerin karışımından oluşur. Dökme malzemeler; toprak, kum, çakıl, taş, kil veya çamur gibi doğal agregalar, inşaat kazılarından veya yıkımlarından kalan atıklardan geri dönüştürülmüş agregalar, hava soğutmalı yüksek fırın cürufu ve dip külü gibi üretilmiş agregalar, selüloz ve geri dönüştürülmüş ağaç lifi gibi doğal lifler olabilir. Macun olarak ise; kalsiyum, silikon ve alüminyum oksit

karışımlarından oluşan çimentolar ve polimer karışımlar kullanılabilir (Labonnote ve diğer., 2016).CC ve Beton Baskı, teknolojileri, viskoz malzemeleri beton tipi malzemeler olarak sıkça kullanılmaktadırlar (Khoshnevis, 2004; Buswell ve diğer., 2007). Hunt ve diğerleri tarafından ise polimer bazlı viskoz bir karışım, büyük yapıların inşasını kolaylaştırmak için tercih edilmiştir (Hunt, Mitzalis, Alhinai, Hooper ve Kovac, 2014).

Eklemeli üretim teknolojisinin inşaat sektöründe daha büyük roller alması için uğraşan şirketlerden biri olan WASP, bu konuda ilerlemek ve sürdürülebilir yaklaşımlar sunabilmek için kil baskısına yönelmiştir. LDM teknolojisi kullanarak kili kademeli bir şekilde basan bir motor geliştirmişlerdir. Böylece, sonradan boyanabilen Şekil 3.9'daki gibi modeller çıkarmışlardır (3D wasp, b.t.b).



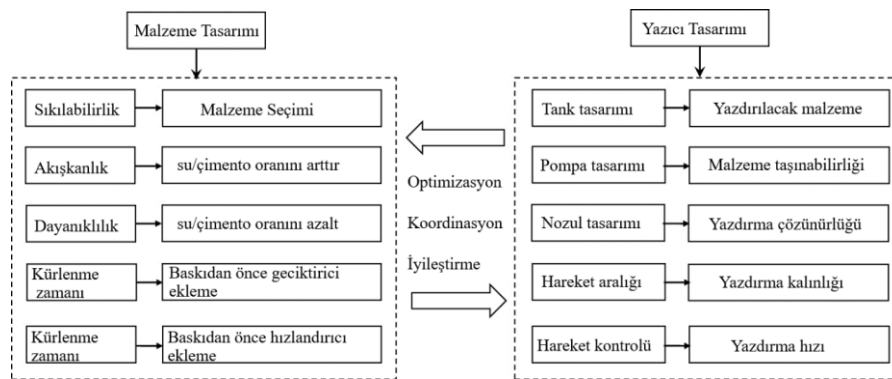
Şekil 3.9 Kil kullanılarak 3B yazıcı ile basılmış modeller (WASP, b.t.b)

3.1.2.1.3 Toz Malzemelere Dayalı Eklemeli Üretim. Bir materyalin tozdan katı duruma dönüştürülmesini içerir. Bu durum; ya bir enerji kaynağı (lazer ışını veya elektron ışını) ile sağlanan eritme veya sinterleme yoluyla ya da kimyasal reaksiyon yoluyla tozun sertleştirilmesi ile elde edilebilir. Bir toz yatağına, o tozu sertleştirecek ve katı duruma getirecek olan bağlayıcı istenen şekil ve ölçülerde püskürtülür ve ürün baskısı bittikten sonra kalan toz temizlenip yeniden kullanım için geri dönüştürülür (Labonnote ve diğer., 2016). Mimari yapım süreçlerinde toz bazlı eklemeli üretimin en önemli örneklerinden bir tanesi, 2008 yılında Dini'nin geliştirdiği D-Shape yazıcısı ile üretilen Radiolaria isimli yapıdır. Kum, taş tozu ve inorganik bağlayıcı ile oluşturulmuş yapı, genellikle eklemeli üretim ile inşa edilmiş ilk büyük ölçekli yapı olarak da kabul edilir (Turner, 2009).

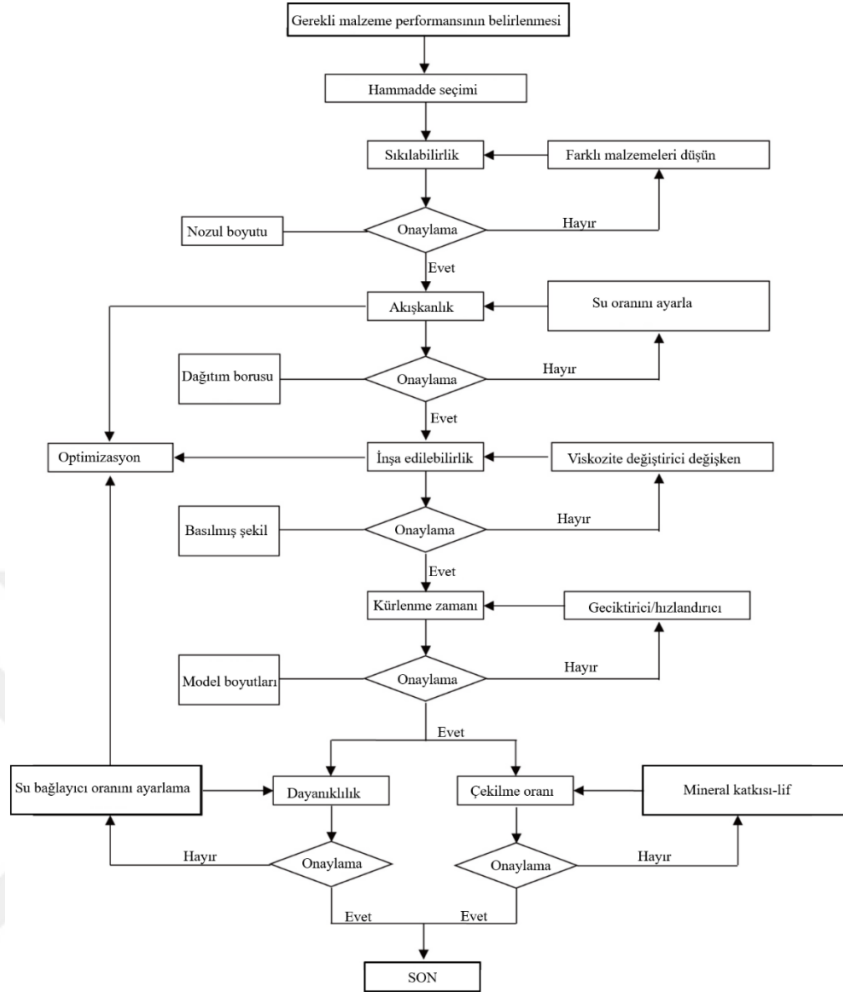
3.1.2.1.4 Sıvı Malzemelere Dayalı Eklemeli Üretim. Malzemenin sıvı formdan katı forma geçmesi ile ürünün elde edilmesi sürecidir. Katılaştırma yani kurutma işlemi bir ışıık kaynağı ile sağlanır. Steriolitografi, sıvı malzemeler dayalı eklemeli üretimin en çok bilinen yazdırma çeşididir. Ancak, sıvın kontrolünün zor ve çoğu zaman ortam koşullarına göre kullanımın mümkün olmamasından dolayı, mimari yapım süreçlerinde 1:1 ölçekte üretilmiş bir örnek henüz bulunmamaktadır.

3.1.2.2 Mimari Yapım Süreçlerinde Eklemeli Üretim Tekniğı Kullanabilmek için Malzeme Kriterleri

Mimari yapım süreçlerinde eklemeli üretim teknolojisinin kullanılabilmesi için malzemenin bazı parametrelerinin baskıya uygun olması gerekmektedir. Genel olarak incelendiğinde basılı uygulamaların temel gereksinimleri; çatlaksız ve deliksiz, kendi formlarını koruyabilen katmanlar, titreşimsiz sıkılaşıma, hidrasyon sırasında oluşabilecek çatlakların önlenmesi, dayanıklılık ve üst üste gelen katmanların bütünlük sağlaması olarak sıralanabilir (Rael ve San Fratello, 2011). Özellikle çimento bazlı malzemelerin bu süreçlerde önemli roller alması, bu malzemenin baskıda veya sonrasında sorun çıkarmaması için belli değişkenlerin kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bunlar aşağıda sırasıyla verilip açıklanmıştır. Şekil 3.10 malzemenin doğru basımı için gereksinimlerini göstermektedir. Şekil 3.11’de gösterilen malzeme gereksinimlerinin adımları ise, eklemeli üretim teknolojisinde yazdırılacak malzemenin baskıya uygun şekilde olabilmesi için izlenebilecek bir yöntem niteliğindedir.



Şekil 3.10 Malzemenin doğru bir şekilde basılması için gerekli olan parametreler (Ma, Wang ve Ju, 2018)

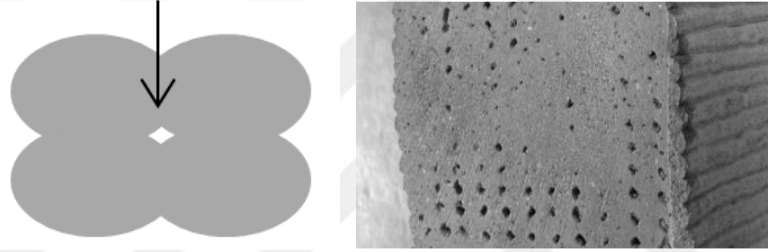


Şekil 3.11 Malzemenin baskıya uygunluğunun kontrolü için hazırlanmış tablo (Ma, Wang ve Ju, 2018)

3.1.2.2.1 Pompalanabilirlik. Malzemenin, borudan akışında herhangi bir kesinti/tıkanma olmadan geçişini/pompalanabilmesini ifade eden terimdir. Bu özellik; karışımın bileşimi, baskı başlığı geometrisi ve pompalama sistemi gibi parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kesintisiz ve deformasyonsuz döküm, iyi pompalanabilirliği ifade eder (Nerella, Näther, Iqbal, Butler ve Mechtcherine, 2019).

3.1.2.2.2 Akışkanlık. Baskı başlığından sürekli olarak kesintisiz geçen macununun durumunu ifade eden terimdir (3D Concrete Printing: Machine and Mix Design). Çökme testi ile malzemenin akışkanlık derecesi kontrol edilebilir. Metalik bir koniye taze çimento karışımı doldurulur. Koninin çıkartılmasından sonra malzemenin yükseklik azalmasının büyüklüğü malzemenin akışkanlığını verir. Daha büyük bir çökme değeri daha büyük akışkanlık değerini ifade eder (Ma, Li ve Wang, 2018).

3.1.2.2.3 İnşa Edilebilirlik. Basılmış tabakaların ufalanmadan ve herhangi bir çökme yaşamadan diğer tabakalar üzerinde durabilme yeteneğini ifade eden terimdir. Yazdırma sürecindeki deformasyonlara sebep olan değişkenlerden bir tanesi harcın yaşıdır. Harç yaşı, ekstrüzyon işleminin başlangıcında, baskı malzemesinin karıştırma fazında geçirdiği süreyi ifade eder. Bu süre, malzemenin viskoz özelliklerini etkilediği gibi bir katman ile diğeri arasındaki yapışmayı da etkiler. Daha uzun harç yaşı, malzemenin sıvı durumdan plastik duruma daha kolay geçişini ve dolayısıyla her katmanın sertliğini ifade eder. Ancak, iki tabaka arasındaki ara yüzeylerin yapışması katmanların sertleşmelerinden dolayı azalır. Böylece; katman aralarında istenmeyen Şekil 3.12’deki gibi boşluklar ve yapının mekanik özelliğinde bozulmalar meydana gelir (Li, Wang ve Ma, 2018).



Şekil 3.12 Yanlış basılmış katmanlar arası oluşan boşluklar (Le ve diğer., 2012)

3.1.2.2.4 Kürlenme Zamanı. Zamanla malzemenin akışkanlığının değişiminin incelenmesi sürecidir. Kürlenme zamanının kontrol altında tutulması, yapının mekanik özelliği için oldukça önemlidir. Bunun için; her basılı katmanın kendi ağırlığını taşıyabilmesi ve kürlenmesi gerekirken daha sonradan üzerine gelecek olan katmanla da bağlanabilecek kadar akışkan bir durumda olması gerekmektedir. Kürlenme süresi, iki farklı faktöre göre ayarlanabilir. Bunlardan biri toplam yazdırma süresi diğeri ise yazıcının özellikleridir (Valente, Sibai ve Sambucci, 2019). Yapılan reoloji testleri ile malzemenin kesme kuvvetinin zaman göre nasıl değiştiğini görmek de mümkündür (Le ve diğer., 2012).

3.1.2.1 Eklemeli Üretim Tekniğinde Kullanılan Hammaddeler

Eklemeli üretim tekniğinde kullanılan hammaddeler; seramik, plastik ve metal esaslı malzemeler şeklinde 3’e ayrılır.

3.1.2.3.1 Seramik Esaslı Malzemeler. Eklemeli üretim ile yapımda en çok tercih edilen ve üzerine denemeler yapılan malzeme çeşididir. Genellikle; çimento esaslı malzemelerin farklı karışımları ile elde edilen bu ürünler, ekstrüzyon ile istenilen formlarda baskıya uygun hale getirilirler. Ancak, sürdürülebilirlik ilkelerinin benimsendiği projelerde, malzeme kullanımı da oldukça önemli bir kriter olduğu için doğal yollardan elde edilen malzeme arayışları da devam etmektedir. Özellikle, toprak, kil, volkanik tüf gibi doğada var olan ürünlerin farklı karışımları ile tamamen doğal malzemeler elde edilmiş uygulamalar da mevcuttur.

3.1.2.3.1.1 Çimento Esaslı Malzemeler. Eklemeli üretim teknolojilerinin yapı inşaatı için kullanılmasında çimento bazlı malzemeler üzerine en çok çalışılan malzemelerdir. Çimento esaslı malzemelerin, baskıda kullanılması için gerekli herhangi bir kılavuzun ve prosedürün olmamasının yanında bu kılavuzun eksikliği sektörde çalışanlar için bu malzemelerin baskıda kullanılması için gerekli olan optimizasyonu yapmasını zorlaştırmaktadır (Ghaffar, Corker ve Fan, 2018). Ekstrüzyon yoluyla basılan malzemelerin herhangi bir destekleri olmamalarından dolayı, lüleden çıktıkları andan itibaren hızlı priz almalarını gerektirir (Di Carlo, Khoshnevis ve Chen, 2013).

Malzemenin basılabilirliğinin kontrol parametreleri; karışım kompozisyonu ve su / çimento oranının fonksiyonları olan, yoğunluk, partikül boyu ve viskoz yapı yoğunluğu gibi parametrelere bağlıdır. Malzemenin; kendiliğinden sıkışması (süper plastikleştiriciler gibi), yüksek kohezyon ve mukavemete sahip olması (silis dumanı), düşük karbon ayak izi oranına sahip ve işlenebilirliğinin artması (uçucu kül gibi), sünekliği (mikro fiberler gibi) gibi bazı özelleşmiş karakterlere ulaşabilmesi için katkı maddeleri de eklenebilir. Karışımda kullanılan ürünlerin arasındaki oran çok önemlidir. Yapılan en ufak bir değişiklik hem harcın pompalanabilirliğini hem de nihai sonucu etkileyebilir. Hem dökülen malzemenin birbirine yeterince güçlü bir şekilde bağlanabilmesi için taze, hem de üzerine gelecek katmanları ve kendi ağırlığını taşıyabilecek şekilde kararlı olması gerekmektedir (Ghaffar ve diğer., 2018).

Günümüzde her geçen gün eklemeli üretim teknolojilerin yapım süreçlerinde kullanımının artması ve çimento esaslı malzemeler üzerine yapılan araştırmaların artması ile bu konularda rekabet de artmıştır. Bunu üzerine yapılan çalışmaların çoğunun içerikleri paylaşılsa da bir kısım araştırmacı, baskı için kullanılabilecek olan malzemeler ile ilgili bazı bilgileri sunmuşlardır. Loughborough Üniversitesi'nde beton baskı üzerine çalışan araştırmacılar, kullandıkları harcın karışım oranını; %54 kum, %36 reaktif çimento ve %10 su olarak bildirmişler, bağlayıcı olarak ise CEM I çimentosu, uçucu kül ve silika dumanı kullanmışlardır. Karışıma ayrıca; geciktirici, süper plastikleştirici ve hızlandırıcı da eklenmiştir. Sonuç ürün incelendiğinde; yoğunluğu 2350 kg/m³, basınç dayanımı 75-102 MPa, eğilme mukavemeti 6-17 MPa ve gerilme direnci 0,7-2 MPa olan bir beton ortaya çıkmıştır (Le ve diğer., 2012).

3.1.2.3.2 Polimer Esaslı Malzemeler. Çimento esaslı hammaddelerden farklı olarak polimer bazlı malzemeler hem daha ucuz oluşları hem de yoğunluklarının daha az olmaları sebebi ile eklemeli üretim tekniği ile yapı üretim süreçlerindeki yerlerini almışlardır. Eklemeli üretim ile yapım süreçlerinde polimerin hafif malzeme olmalarından dolayı kullanımı, havacılık sektöründe (Kroll ve Artzi, 2011), yapısal modeller oluşturabilmek için mimaride ve en yaygın olarak da doku ve organları basmak için tıpta (Murphy ve Atala, 2011) geliştirilmeye devam edilmektedir.

Çoğu zaman eklemeli üretimde kullanımı, özelleştirilmiş prototip denemeleri için olsa da mimaride de prototip çalışmalarında, yapı elemanı boyutlarında, estetik amaçlı oluşturulan simgesel ürünlerde ve mukavemet arttırıcı olarak uygulamaları mevcuttur. Kamer Maker gibi eklemeli üretimin mimari yapım süreçlerinde gelişmesini sağlayan şirketler polimer yapı elemanları basabilen yazıcılar geliştirmişlerdir (Camacho ve diğer., 2018).

Skanska, Londra'daki Bevis Marks Ofis Binası için tasarladığı Şekil 3.13'te görülen çatı için, polimer malzeme kullanarak eklemeli üretim teknolojisine katkıda bulunmuştur. Yapısal elemanlar arası bağlantının dökme çelik düğümler ile tutturulması oldukça pahalı olacak ve bu bağlantıların kaynaklanması estetik açıdan isteneni vermeyeceği için eklemeli üretim yöntemine başvurulmuştur. Çatının

destekleyici çelik yapısı için karmaşık sütun / kiriş birleşimleri 3B polimer baskılı kaplama parçaları kullanılarak oluşturulmuştur. Böylece, Skanska'nın bu uygulaması, eklemeli üretim tekniğinin yapım süreçlerinde kullanılmasının karmaşık ve maliyetli üretim süreçleri gerektirmeden, benzersiz mimari tasarımlar sağlamak için kullanılabileceğini kanıtlamış olmuştur (Skanska, b.t.).



Şekil 3.13 Bevis Marks Ofis Binası polimer bazlı malzeme kullanılarak basılmış çatı eleman birleşimleri (Skanska, b.t.)

3.1.2.3.3 Metalik Malzemeler. Eklemeli üretim teknolojisi; havacılık ve özellikle de enerji sektöründe küçük metal parçaların üretimi için tercih edilen bir yöntemdir (Navrotsky, Graichen ve Brodi, 2015). Ancak, daha büyük ölçekli baskılar için eklemeli üretimde metallerin kullanılması incelendiğinde hem maliyet açısından hem de baskı süresi açısından sınırlayıcı olabilecek olmasından dolayı eklemeli üretim yöntemlerinde çimento ve polimer bazlı malzemelere göre daha az incelenmiştir. Metal kullanılarak; mümkün olmayan ağırlık ve malzeme kullanımını optimize etmek için, tasarlanmış karmaşık geometrilere sahip yapılar veya bileşenler oluştururken eklemeli üretim teknolojilerin kullanılması avantajlı olabilir (Camacho ve diğer, 2018).

Joris Laarman Lab ve Arup, küçük paslanmaz çelik segmentleri kaynaklamak için robotik bir kola bağlı gaz metal ark kaynağı (Gas Metal Arc Welding-GMAW) kullanan MX3D teknolojisini kullanmaktadırlar (Joosten, 2015). MX3D, karmaşık geometrilerin metal ile basılabilirliğine kanıt olarak, Amsterdam'da yaya köprüsü olarak kullanılacak bir yapıyı bu robot kol ile basmışlardır (MX3D, b.t.).

Optimize edilmiş yapısal topolojiler için eklemeli üretim kullanımının başka bir

örneği Arup tarafından geliştirilmiştir. Şirket, Hollanda'nın Lahey kentinde, sokak aydınlatmasının dikme ve kablolarını bağlamak için kullanılan bir projede yapısal bir düğüm elemanı için çeşitli geometrileri ve üretim süreçlerini araştırmıştır (Galjaard, Hofman ve Ren, 2015). Bu projeden çıkan sonuca göre Arup, topoloji optimizasyonu ve eklemeli üretim tekniği ile her bir düğümün ağırlığının tasarlanmış olana göre %75 ve toplam strüktürün ağırlığının %40 daha az olduğunu iddia etmiştir (Galjaard, Hofman, Perry ve Ren, 2015).

İnşaatta metal ile eklemeli üretim uygulamalarının kullanımı, yüksek başlangıç maliyetleri nedeniyle en az araştırılan alanlardan biri olsa da Arup' un bu araştırma projesi, küçük ölçekli metal bileşenlerin yapısal tasarımlar üzerinde önemli etkilere sahip olma potansiyelini göstermektedir. Ticari ve akademik ortaklıklar geliştirmek, bu alandaki araştırmaları ilerletmek ve metalik malzemeler kullanarak eklemeli üretim potansiyel uygulamalarını belirlemek ve geliştirmek için önemlidir (Camacho ve diğer., 2018).

3.1.3 Mimari Yapım Süreçlerinde Kullanılan Eklemeli Üretim Teknolojileri

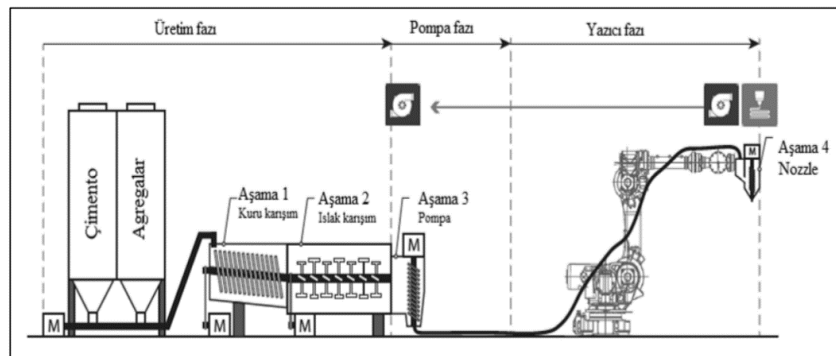
İnşaat sektörüne çok hızlı giriş yapmış olan eklemeli üretim, yapı elemanlarından yapının kendisinin oluşturulması süreçlerine kadar birçok yazıcıya ve tekniğe sahiptir. Her bir yazıcı farklı kullanım amaçları ile üretilmiş olup kullandıkları teknoloji, malzeme, yazdırma süreci, üretim yerleri ve yazdırma başlıkları dolayısıyla da yazdırılan desen değişmektedir. Genel olarak bakıldığında, eklemeli üretim yazıcılarının çoğu kompleks bir strüktürün veya yapının, küçük parçaların üst üste eklenmesi ile üretilmesini içerir. 3 boyutlu bilgisayar destekli tasarımın modellenmesinin ardından 2 boyutlu parçalara dilimlenen model ile üretim yazıcıda tanımlanmış olur (Tay ve diğer., 2017).

İnşaat sektöründe en çok kullanılan malzemelerden bir tanesi üretimin kolay ve ucuz olması sebeplerinden dolayı çimentodur. 2020'de yayınlanan 2019 yılı çimento üretim istatistiklerine göre sadece Çin 2,2 milyar metrik ton çimento üretip dünya çapında en çok çimento üretimi yapan ülke olurken 320 milyon ton ile Hindistan ikinci

ve 51 milyon metrik ton ile Türkiye on ikinci sırada yer almaktadır (Statistica, b.t.). Bu üretimler göz önünde bulundurularak genel olarak geliştirilen yazıcılarda çimento esaslı malzeme kullanıma uygun şekilde üretilmiştir.

Geleneksel yöntemle üretilen yapılarda beton kullanımı; agrega, çimento ve suyun homojen olarak karıştırılmasından sonra belirlenen şekil ve boyutlarda hazırlanan kalıplara dökülmesi ve sertleşmesinden sonra kalıpların sökülmesi şeklinde kullanıma sahiptir. Dökülen taze beton; plastik kıvamda olup, kalıplara döküldükten sonra sertleşip mukavemet kazanır ve kalıpların sökülmesinden sonra da dayanım kazanması devam eder. Bu sertliği ve dayanımı agreganın, çimentonun, suyun ve katkı maddelerinin miktarları ve karışım oranları belirler (Uygunoğlu ve diğer., 2019).

3B yazdırma teknolojisinde beton kullanımında ise harcın içerisinde iri agregalar kullanılmadan kalıpsız olarak katmanlı şekilde dökülen üretim süreçleridir. Projeye ve yazıcı teknolojilerine göre süreçte farklılıklar olabileceği bilinse de genel yapı olarak aynı süreçler gerçekleşmektedir. Eklemeli üretim kullanılarak yapının yazdırma işleminin başlaması için süreç içerisinde Şekil 3.14'teki gibi üç farklı faz ve dört farklı aşama gerekmektedir. Üretim fazında; harç, çimento ve agreganın bulunduğu iki farklı besleme tankı sırasıyla kuru karışım ve ıslak karışım olarak hazırlanır. Pompa fazında; malzeme bir borudan geçerek bir pompa yardımıyla yazdırma başlığına ve sonra lüleye aktarılır. Yazıcı fazında ise; pompadan yazdırma başlığına aktarılan harç belirlenen desen ve boyutlarda istenilen yere sıkılır ve malzemenin katılaşması ile süreç son bulur (Uygunoğlu ve diğer., 2019).



Şekil 3.14 Eklemeli üretim teknolojisi ile yapı yazdırma fazlarının şematik gösterimi (Uygunoğlu ve diğer., 2019)

3.1.3.1 Contour Crafting

Güney Kaliforniya Üniversitesi'nden Behrokh Khoshnevis tarafından 2002 yılında ortaya konmuş Contour Crafting (CC), az işçilik ile hızlı, düzenli ve verimli bir şekilde yapı oluşturulmasını sağlayan bir baskı teknolojisidir (Khoshnevis, 2004). Kompleks ve zor mimari formların ekstra bir maliyet olmadan üretimi için tercih edilebilecek sistemlerdendir (Smith, 2012). Özellikle küçük ölçekli yapılar için kullanımı büyük potansiyellere sahip bir sistem olarak geliştirilmiştir.

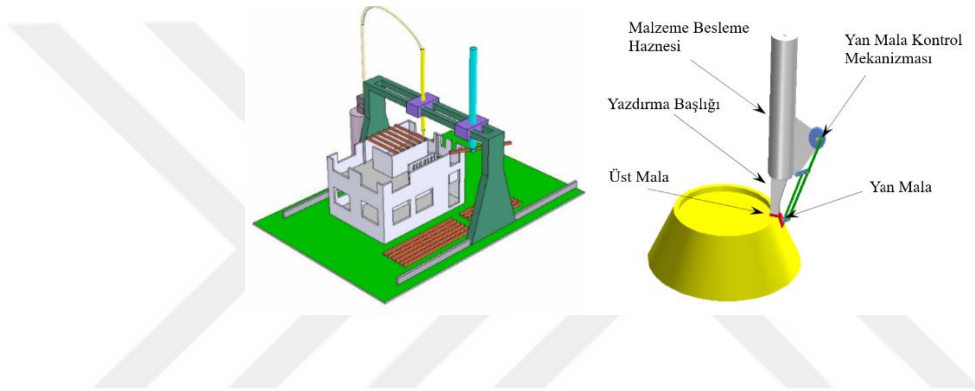
CC, kalın bir beton tabakanın baskı ağzından bir seferde bir katman olmak üzere bilgisayar kontrollü olarak basılmasıdır. Basılan her yeni beton tabaka, daha önce basılmış alt katmanların zamanla kürlenmesinden ve sertlik kazanmalarından dolayı bu alt katmanlar ile desteklenirler. Smith'e göre 20 saniyeden kısa bir sürede bir metrekare duvarı, bir saate bir odanın tamamını ve 200 metrekare tek katlı bir evi ise bir günde inşa etmek mümkündür. Yapım sürecinde otomasyon ile yapılamayan tek kısım kapı ve pencerelerdir. Doğramaların yazdırma süreci bittikten sonra işçiler tarafından takılması gerekmektedir (Smith, 2012).

CC, ekstrüzyon ve doldurma süreçlerinin birleşimidir. Ekstrüzyon işlemi, iki katman olarak betonun ekstrüde ve sonuç olarak içi doldurulabilecek bir kalıp oluşturmaktır. Duvarlar içleri boş bir şekilde yazdırıldığından elektrik ve su tesisatları buralardan geçirilebilir. Doldurma işlemi ise, basılı yapının yüzey kaplamasının yapılması ya da mekanik bütünlüğün gerçekleştirilmesi ile ilgili olan süreçtir (Hwang, Khoshnevis ve Daniel, 2004).

Yapıların iç ve dış sınırlarını katman katman eklemeli yöntem ile yazdıran makine, vinç benzeri bir sistem ile yerinde yapım tekniğiyle yapıyı oluşturmaktadır. Şekil 3.15'te görüldüğü gibi bir vinç sistemi desteğiyle yazdırma yapan CC teknolojisi, özellikle doğal afetlerden sonra bilgisayar kontrollü hızlı bina üretimi için geliştirilmeye devam etmektedir (Tay ve diğer., 2016). Beton benzeri malzeme kullanılarak yapının üretimi gerçekleştirilirken güçlendirme için cam veya karbon fiber donatı olarak kullanılabilir. Katmanların derinliği açısından

incelendiğinde yazdırma çözünürlüğü 4~6 mm arasındadır (Lim ve diğer., 2012). 13 mm kalınlığında katmanlar Ø 15 mm'lik lüleden dökülen beton ile yazdırılır (Hwang ve diğer., 2004).

CC'yi diğer yazıcılardan ayıran en önemli özelliği yazdırma ağzına bağlanmış mala olmasıdır. Katmanlı döküm gerçekleştirildiğinden yüzeyde katmanların izleri okunur durumdadır. Bu izleri görmemek için Şekil 3.15'de gösterilen mala ekleme teknolojisi ile düz ve temiz yüzeyler elde edilebilir ve farklı açılarda şekiller üretilebilir (Lim ve diğer., 2012).



Şekil 3.15 Vinç benzeri destek ile CC teknolojisi ve bu teknoloji kullanılan yan ve üst mala gösterimi (Khoshnevis, 2004)

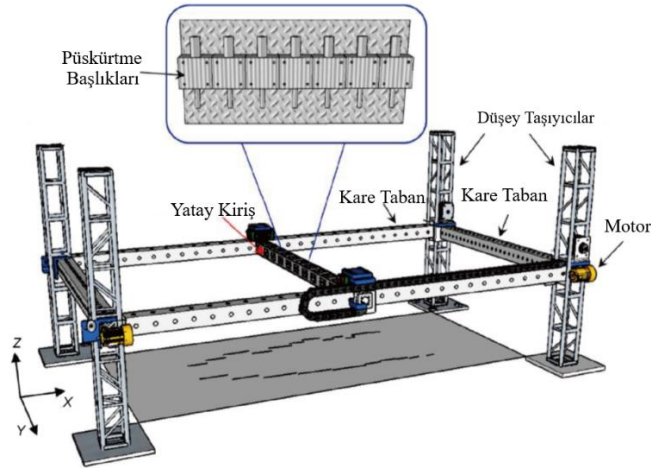
3.1.3.2 D-Shape

Enrico Dini tarafından 2008 yılında geliştirilen D-Shape teknolojisi, toz bazlı malzemeler ile eklemeli üretim şekillerinden biridir. Bağlayıcı bir malzemenin toz yatağına istenen boyut ve şekillerde damlatılması ile yapılan üretim, fabrika ortamında gerçekleşmektedir. Sonuç ürünün taş benzeri bir yapı malzemesi örüntüsü vermesi için üretim yatağında kum ve bağlayıcı olarak magnezyum oksiklorür çimentosu (Soral çimentosu) kullanılmaktadır (Cesaretti, Dini, De Kestelier, Colla ve Pambaguian, 2014).

Üretim prensibi olarak çoğu eklemeli üretim yazıcılarından farklı çalışmaktadır. Toz parçacıklarının lazer ışını ile birbirine bağlandığı Lazer Sinterleme methoduna benzer bir işleyişe sahiptir. Üretim yatağında yapıyı oluşturmak için kullanılan

kumdan geriye kalanlar, bağlayıcı ile birbirine tutunmuş olan yapıyı desteklemektedir. İstenilen yapının tasarıma uygun bir şekilde üretimi tamamlandıktan sonra fazlalık kumlar temizlenir ve bir sonraki projede tekrar kullanılabilirler (Lim ve diğer., 2012).

Şekil 3.16’da gösterildiği gibi alüminyumdan üretilmiş vinç benzeri sisteme monte edilmiş, 300 adet bağlayıcı ekstrüzyon başlığı bulunmaktadır. Yapı, alüminyum olduğu için monte edilmesi kolay ve strüktür hafif olduğu için de taşınması kolaydır. Yazıcı başlığı, X ekseninde serbestçe hareket edebilen yatay bir kirişle 6 x 6 x 6 metrelik kare tabana bağlıdır (Tay ve diğer., 2016). Bu dikdörtgen taban Z ekseninde dört kademeli motorlar ile yukarı doğru hareket edebilmektedir. Yazdırma işlemi boyunca, belirlenmiş tasarıma göre sıvı bağlayıcı madde kum katmanının üzerine püskürtülür (Cesaretti ve diğer., 2014).



Şekil 3.16 D-Shape yazıcının şematik gösterimi (Ma, Wang ve Ju, 2018)

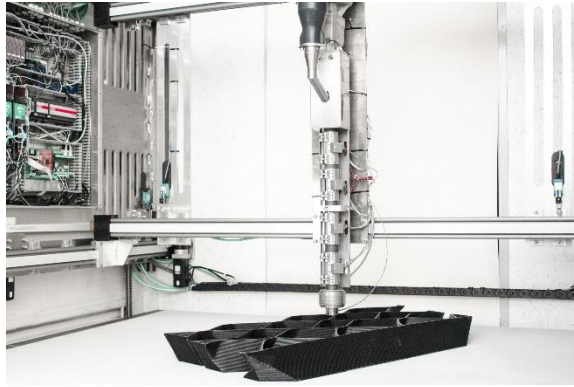
CC’nin aksine büyük ölçekli projelerin üretimi için uygun bir teknolojidir. Avrupa Uzay Ajansının (ESA) finanse ettiği bir araştırma projesinde, D-Shape teknolojisinin ay yüzeyinde yapılaşma için ay tozu ile yapı üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Fakat, bu teknolojinin ay yüzeyinde nasıl çalışacağı hala test aşamasında olan bir süreçtir (Cesaretti ve diğer., 2014).

3.1.3.3 Kamer Maker

Dünyanın ilk portatif büyük ölçekli 3B yazıcısı olarak kabul edilen Kamer Maker, Hollandalı mimarlık şirketi DUS tarafından geliştirilmiş bir yazıcıdır. Tarihi dokunun ve şehir silüetinin korunması gerektiği bölgelerde dış mekânın yönetmeliklerde belirtildiği kalıpta ancak iç mekanların kullanıcının ihtiyaçlarına ve isteklerine göre düzenlenmesi amacıyla geliştirilmiş bir sistemdir (3D print canal house, b.t.b).

3B Baskı ile Kanal Evler projesi, Amsterdam kanal evlerinin 400. senesinde yani 2013'te yapılmıştır. Kanal Evleri, Amsterdam'ın simge yapılarından oldukları için cephede oynamalar yapılmadan iç mekân bölümlere ayrılmış karşılama mekânı, mutfak, çalışma alanı, depolama alanı ve misafir odası gibi bölümler yazdırılmıştır. Dış cephelerin iç mekanlarda kalan kısımları dahi kullanıcı isteğine göre tasarlanabilmektedir (3D print canal house, b.t.b).

2 x 2 x 3,5 m ölçülerinde odalar basabilen Şekil 3.17'de gösterilen bu yazıcı polipropilen gibi termoplastik malzemeler kullanarak baskı işlemini yapabildiği gibi %80'i bitkisel yağ olan biyoplastikler de kullanım için test edilmektedir (Oberti ve Plantamura, 2015).



Şekil 3.17 Kamer Maker baskı kolu (3D print canal house, b.t.b)

3.1.3.4 WinSun

Çin’de malzeme mühendisliği yapan Ma Yihe tarafından kurulan ve yönetilen şirket, 3B inşaat yazıcıları için beton benzeri malzemeler üzerine çalışmaktadır. Ayrıca; dünyanın en büyük 3B inşaat yazıcılarından birini geliştirmiş ve 10 x 6,6 x 150 m ölçülerinde inşaat baskısı yapabilmektedir (Winsun, 2016).

Çimento, kum ve elyaf gibi inşaat malzemelerinin yanında endüstriyel atıkların da kullanıldığı aglomerat isimli malzemeden oluşan ürün, katmanlı bir şekilde ekstrüzyonu ile yapı elemanı boyutuna gelir. Bu yapı elemanları fabrikada basıldıktan sonra sahada birleştirilmektedirler. İçleri boş şekilde üretilen duvarların güçlendirilmesi, diyagonal desenlerin boşlukları doldurması ile gerçekleştirilir (Winsun, 2016).

Şekil 3.18’de gösterilen, 2015 yılında 3 boyutlu baskı yöntemi ile inşa edilmiş en yüksek yapıyı inşa etmeleri ile inşaat sektöründe eklemeli üretim tekniğinin yalnızca az katlı yapılar veya geçici konutlar için değil yüksek katlı yapılar içinde tercih edilebileceğini göstermiştir.



Şekil 3.18 3B baskı yöntemi ile üretilmiş 5 katlı yapı (Winsun 3D, b.t.)

3.1.3.5 Concrete Printing

Serbest biçimli yapı teknolojisi olarak da bilinen beton baskı teknolojisi, Birleşik Krallıkta yer alan Loughborough Üniversitesi’nden araştırmacılar tarafından 2007 yılında geliştirilmiş ve CC gibi ekstrüzyon ile üst üste katmanlı üretim yapan bir

teknolojidir (Buswell ve diğer., 2007).

Çimento esaslı malzeme kullanılan bu yöntemde işlevsel boşlukların tasarlanması ve kalıp işçiliğinin olmaması önemli avantajlardır. Şekil 3.19’da görülen 2 m uzunluğunda 0,9 m maksimum genişliğinde ve 0,8 m yüksekliğinde, 6 mm kalınlıkta 128 katman ile oluşturulmuş “Wonder Bench” isimli bankta görüldüğü gibi, 12 adet boşluk hem ağırlığı minimize etmek için kullanılmış hem de yapılarda termal, akustik izolasyon oluşturmak veya mekanik tesisatlar için yer bırakmak için kullanılabilir. Ancak; konsol ve çıkma yapılar için ekstradan desteklere ihtiyaç duyulan beton baskı teknolojisinde, destek malzemesinin maliyeti, temizlenmesi, işçiliği ve bakımı gibi süreçlerin eklenmesi dezavantaj olarak görülmektedir (Lim ve diğer., 2012).



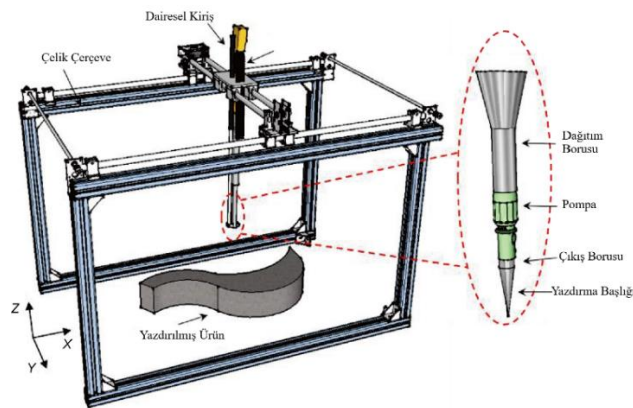
Şekil 3.19 12 adet işlevsel boşuklara sahip “Wonder Bench” isimli bank (Lim ve diğer., 2012)

Şekil 3.20’de görüldüğü gibi bir vinç benzeri sistem ile çalışan yazdırma süreci; 5,4 x 4,4 x 5,4 m (U-E-B) ölçülerinde bir fiziksel yapıya sahiptir (Tay ve diğer., 2017). X-Y-Z Kartezyen koordinat sisteminde çalışan ve bir CNC makinesinin kontrol ettiği yazdırma başlığına bağlı lüle, çelik dairesel kesitli bir vinç üzerinde hareket etmektedir (Labonnote ve diğer., 2016). Ø6-20 mm yuvarlak kesitli bu lüle, 6-25 mm arasında katman kalınlıklarına sahip baskılar yapmaktadır (Bos, Wolfs, Ahmed ve Salet, 2016).



Şekil 3.20 Beton baskı vinci (Le ve diğer., 2011)

Şekil 3.21’de şematik olarak beton baskı gösterilen yazdırma elemanlarının, CC ile çalışma prensibi olarak oldukça benzemelerine rağmen; CC’de bütün bir yapının tek parça olarak basılmasına odaklanılırken beton baskı yönteminde panel ve duvar gibi yapı elemanlarının gerçek ölçülerde fabrika ortamlarında basılmasına odaklanılmıştır (Buswell ve diğer., 2008). Ayrıca, CC’ye göre daha az biriktirme çözünürlüğüne sahip olduğu için iç iç ve dış yüzey alanlarında daha kontrollü ve kompleks formlar elde etmek mümkündür. Her iki yöntemde de baskı, çimento esaslı olmasına rağmen; beton baskı teknolojisinde yüksek performanslı elyaf takviyeli ince agrega betonu kullanılır (Lim ve diğer., 2012). Le ve diğerleri bu yöntemde kullanılan bağlayıcı malzeme karışımının; CEM I çimentosu, uçucu kül ve silis dumanı olduğunu belirtmiştir (Le ve diğer., 2012).



Şekil 3.21 Beton baskı yazdırma elemanları (Ma, Wang ve Ju, 2018)

Eklemeli üretimi, ekstrüzyon yöntemi ile yapan çoğu teknolojiye katmanlar iki boyutlu desenler çerçevesinde üretilmektedir. Ancak; bu yazdırma şekli, bitmiş üründe

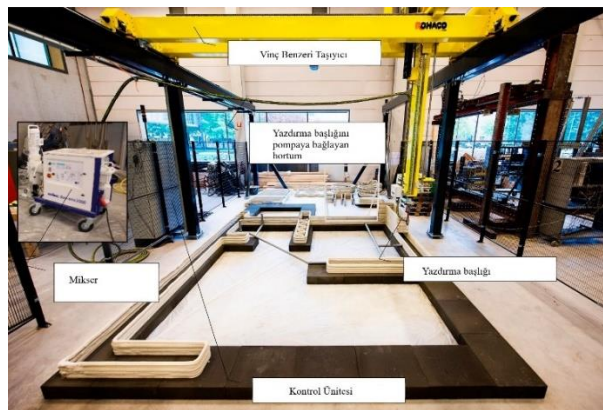
anizotropik özellikler oluşması gibi yapının mekanik özelliğini zayıflatacak etkiler yaratabilir. Bu nedenle, Lim ve diğerleri Şekil 3.22’de gösterilen eğrisel tabaka baskısı yöntemini geliştirerek hem estetik yönü hem de mekanik özellikleri daha güçlü yapılar üretmeye başladıklarını bildirdiler (Lim ve diğer., 2016).



Şekil 3.22 4 adet çift eğrilikli katmanlı yapı bileşeni (Fitzpatrick, 2014)

3.1.3.6 3D Concrete Printing

3D Concrete Printing, Eindhoven Teknoloji Üniversitesi’nde geliştirilen ve CC ve Concrete Printing(CP) yöntemlerinin ikisini de baz alarak tasarlanmış teknolojidir. Yazdırma işlemi vinç benzeri bir yapı ile gerçekleştirilen bu teknolojiye, Şekil 3.23’te görülen 3B beton baskı yazıcısının ölçüleri 11 x 6 x 3 m şeklindedir (Marijnissen ve van Der Zee, 2017).



Şekil 3.23 3B beton baskı yazıcısının elemanları (Bos ve diğer., 2016)

Suyla karıştırılan beton düzeneğin yan tarafında bulunan bir mikser pompasıyla bir hortumun içine pompalanır. Hortum, vinç benzeri yapı içerisinde 9 x 4,5 x 2,8 m’lik

alan içerisinde yazdırma işlemini gerçekleştirebilir. Bu hortum; hareket kontrollü ve 4 serbestlik derecesine sahip dikey robot koluna bağlı olan yazdırma başlığına bağlanır. Kartezyen koordinat sisteminde hareket eden bu kolun X-Y-Z eksenlerindeki maksimum hız ve ivmelenmeleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir. Köşelerde ya da eğriselliğin olduğu bölgelerde yazdırma hızları düşmektedir (Bos ve diğer., 2016).

Tablo 3.2 3D Concrete Printing’in ürettiği robotik kolun kartezyende çalışma hızı ve ivmesi (Bos ve diğer., 2016)

Serbestlik derecesi	V_{max}	a_{max}
X ekseninde hareket	1,8 m/s	1,0 m/s ²
Y ekseninde hareket	1,8 m/s	1,0 m/s ²
Z ekseninde hareket	1,8 m/s	2,0 m/s ²
Z ekseninde dönüş	3,0 rad/s (~172 derece/sn)	6,0 rad/s ² (~344 derece/ s ²)

İçi boş çelik bir eleman olan yazdırma başlığına bağlı lüle, başlangıçta dairesel Ø25 mm’lik olarak kullanılmıştır. Yuvarlak olarak yazıcıdan çıkan karışımın istiflenmesinin zor olduğu görüldüğünden 25 x 25 mm’lik kare kesitli lüleye geçilmiştir. Bu başlık ile yazdırılan formların esnekliği artırılmış olmasına rağmen yazdırma yolu ile başlığın teğet gitmediği durumlarda karışımın yazdırma esnasında büküldüğü görülmüştür. Bu durumda yapıda istenmeyen mekanik özellikler çıkabileceği öngörülmüş ve 2016 yılında 40 x 10 mm açıklıklı bir lüleye geçilmiştir (Bos ve diğer., 2016).

Bu araştırma için, SG Weber Beamix adlı şirketin geliştirdiği yazdırılabilir harç; portland çimentosu (CEM I 52,5 R), partikül boyutu maksimum 1 mm olan silisli agrega, kireç taşı ve pompalama kolaylığı için özel katkı maddeleri, reoloji değiştiriciler ve erken kuruma nedeniyle oluşabilecek çatlakları azaltmak için polipropilen liflerden oluşmaktadır (Bos ve diğer., 2016).

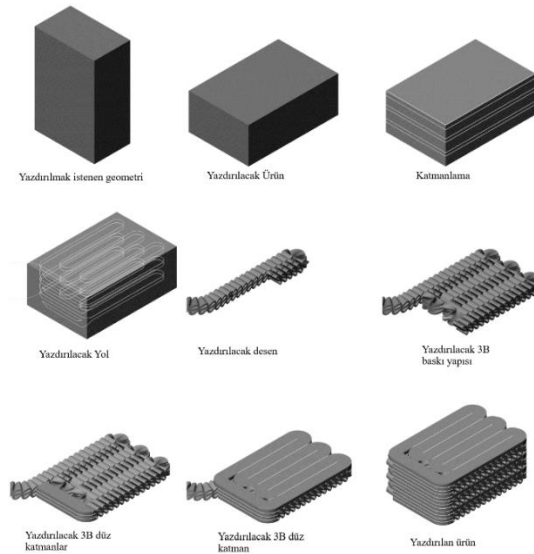
Marijnissen ve Zee’nin yayınladıkları çalışmada; Şekil 3.24’te görülen ve 3B beton baskı teknolojisi ile oluşturulabilecek optimum desen denemeleri yer almaktadır.

Yazdırılan ve sürekliliği olan desenlerin optimize edilmesinin, malzemedan, zamandan ve maliyetten tasarruf sağlayacağı amacıyla bu çalışmayı gerçekleştirmişlerdir (Marijnissen ve van Der Zee, 2017).



Şekil 3.24 3B beton baskı için optimum yazdırma deseni denemeleri (Marijnissen ve van Der Zee, 2017)

Yine Marijnissen ve Zee'nin yayınladıkları çalışmada; yazdırılacak olan ürünün gerçekte durması gereken konumda yazdırmak yerine Şekil 3.25'te gösterildiği gibi yüksekliğinin en az olduğu boyutun, yazdırma yatağına dik olacağı şekilde yazdırmanın ve yazdırma işlemi bittikten sonra döndürmenin hem daha hızlı sonuçlar vereceğini hem de yapısal olarak istenen mukavemetlere daha rahat ulaşmak için iyi bir yol olduğunu iddia edip bu konuda çalışmalar yapmaya devam etmektedirler (Marijnissen ve van Der Zee, 2017).

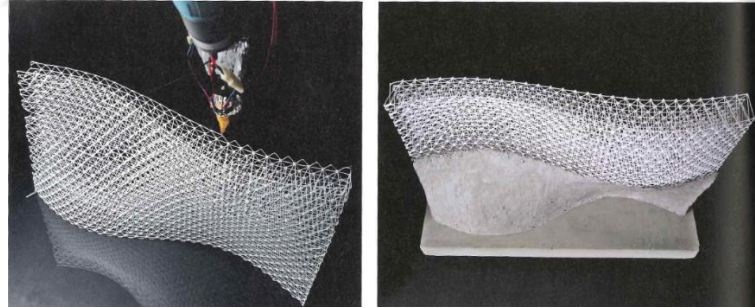


Şekil 3.25 3B beton baskı süreci (Marijnissen ve van Der Zee, 2017)

3.1.3.7 Mesh Mould

Geleneksel yapım yöntemlerinin, standart dışı geometrileri betondan üretmeye izin vermemeleri üzerinden geliştirilmiş bir yazıcıdır. Bu yöntemde, yapının kendisini değil güçlendirmesini basmak amaç edinilmiştir. Kafeslerin dokunması olarak da adlandırabileceğimiz bu yöntemde baskı sırasında lülede soğutma amaçlı basınçlı hava kullanımı gerçekleşir. Böylece tel kafeslerin birbirleriyle bütünleşmesi daha hızlı gerçekleşmiş olur (Tay ve diğer., 2017).

Termoplastik bir polimerin, yerinde yapım ile 3B olarak 6 eksenli bir robot kol tarafından Şekil 3.26'da görüldüğü gibi basılması ile son ürün elde edilir. Beton, Şekil 3.26'da gösterildiği gibi basılmış olan güçlendirme üzerine sonradan dökülür. Bu uygulama ile karmaşık ve serbest formlu yapıların üretimi için gerekli süreler azaltılmış ve gerekli esneklikler sağlanmış olur. Tasarlanan yapılara etki eden basınç, çekme, eğilme kuvvetlerine karşı farklı ağ yoğunlukları tasarlanıp basılabilir (Hack ve Lauer, 2014).



Şekil 3.26 Mesh Mould baskı yöntemi ile yapı elemanı üretimi (Hack ve Lauer, 2014)

3.1.3.8 Mini Builders

Mini Builders teknolojisi, tek büyük sabit bir çerçeve ile eklemeli üretim yapan yazıcı yerine küçük ve mobil robotların kullanımına verilebilecek en iyi teknolojilerden bir tanesidir. Bu teknoloji; Katalonya İleri Mimari Enstitüsünden Sasa Jokic ve Petr Novikov'un 0,05 m³'den daha küçük hacimlerde tasarladığı ve geliştirdiği 3 adet küçük robotun, bir yapıyı birlikte inşa etme yeteneğine dayanarak oluşturulmuş bir yöntem içermektedir (Jakupovic, b.t.).

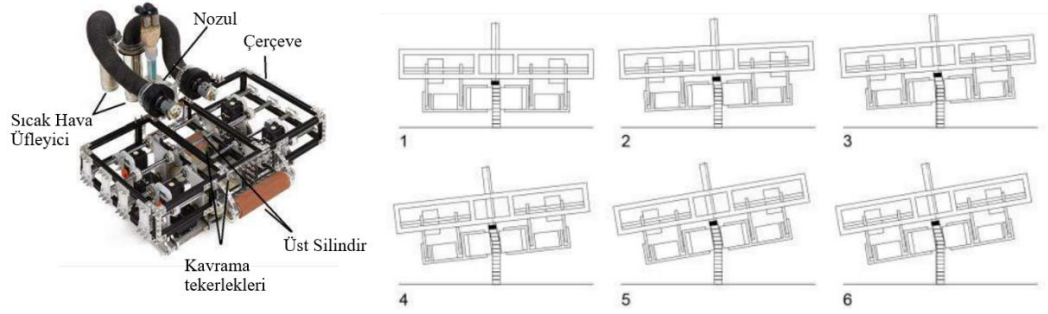
Genellikle; ekstrüzyon ile eklemeli üretim yapan yazıcılar beton ile çalışmayı tercih ederlerken bu teknolojiye, aşınma direnci, kayma ve eğilme mukavemeti, darbe dayanımı yüksek ve renk çeşitliliği oluşturulabilecek sentetik mermer kullanımı tercih ediliyor. İki bileşenli bir polimer olan Axson Easymax'ın %40 oranında ve mermer tozunun %60 oranında karıştırılması ile oluşturulan harç, uzun süre kalabilecekleri iki ayrı yerde saklanıyorlar. Ekstrüzyon işlemi sırasında birleşen malzemeler, 2-3 dakika içinde tamamlanan ve aynı zamanda ısıtıcılar kullanılarak hızlandırılabilen hızlı bir kürleme işlemi ile son ürün oluşana kadar yazdırılmaya devam edilir (Jakupovic, b.t.).

3 boyutlu modelin oluşturulduğu dosyanın, robotların hareket edecekleri yolun ve yapacakları işlemlerin tanımlanması şekline dönüştürüldükten sonra yazdırma işlemi başlar. Bu robotlar, katmanların üst üste eklemeli üretim yöntemi ile yazdırılması prensibini izleyen sisteme sahiptirler. Yazdırılan katmanların kalınlığı; kullanılan malzemenin cinsine ve yazdırma hızına bağlı bir sonuç verse de ortalama 6 mm kalınlığında katmanlar elde edilir. Bilgisayar gibi bir kullanıcı yardımıyla hareket edip yapı malzemesinin sıkılmasını gerçekleştiren bu sistemler, üç ayrı yapım süreci için üç ayrı robotun kullanılması ile gerçekleştirilir (Jakupovic, b.t.).

26 x 35 x 37 cm ölçülerinde, 2,05 kg ağırlığında olan ve parçaları Şekil 3.28'de görülen temel robotu, yani sürecin ilk yazdırma robotu, düz tahta bir yazdırma platformundan başlayarak yapının ilk 15 cm yüksekliğini yazdırır (Jakupovic, b.t.). Hareket edebilmek için zemin izlerini kullanan bu robot, konumlandırma için önüne takılmış olan hat takip (çizgi takip) sensörünün yerdeki dalgalanmaları algılaması ile yönünü algılayabilmektedir (Labonnote ve diğer., 2016).

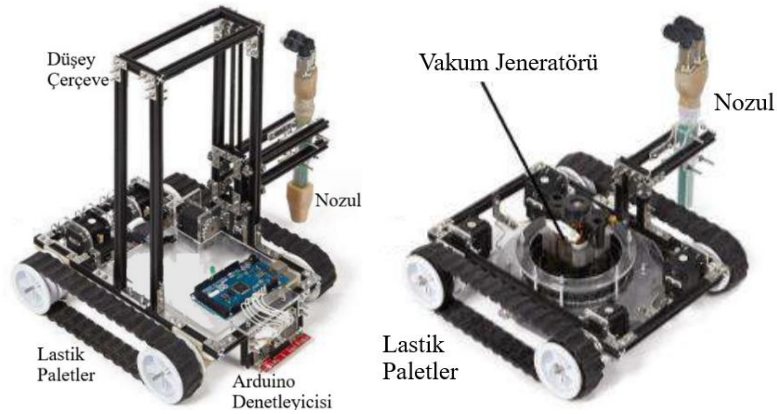
40 x 27 x 12 cm ölçülerinde, 4,6 kg ağırlığında olan ve parçaları Şekil 3.27'de görülebilen Kavrama robotu, temel robotunun yazdırdığı kısmın üstüne tutunur ve her bir katmanı, bir altındaki katmanı kavrayarak yazdırır (Jakupovic, b.t.). Kendini 4 silindir arasına sıkıştırıp yapıya bağlanarak hareket edebilir (Labonnote ve diğer., 2016). Robot, katmanları Şekil 3.27'deki gibi ofsetleyebilme özelliğine sahiptir. Bu nedenle, hem tavan gibi yapının yatay elemanlarının basılmasına yardımcı olurken hem de kademeli eğimler oluşturup konsol yapıların yazdırılabilmesine olanak

sağlamaktadır.



Şekil 3.27 Kavrama robotu parçaları ve kavrama robotunun ofsetlemesinin şematik gösterimi (Jakupovic, b.t.)

Son olarak, zaten yazdırılmış olan yapının üzerine ek kalınlıklar ve yüzeyler oluşturabilmek için 30 x 27 x 12 cm ölçülerinde, 2,1 kg ağırlığında olan ve Şekil 3.28’de parçaları görülebilen Vakum Robotu devreye girer (Jakupovic, b.t.). Bu robotlar, daha önceki robotların yazdırdığı yüzeylere kendilerini yapıştırdıktan sonra o yüzeylere katmanlar ilave ederek kabuğun güçlenmesini sağlarlar. Bu robot için basılacak katmanların birbirine paralel olması gerekmez. Yüzey üzerinde her açıda hareket edebilme özellikleri vardır (Labonnote ve diğer., 2016).



Şekil 3.28 Temel robotu parçaları ve vakum robotu parçaları (Jakupovic, b.t.)

3.1.3.9 WASP (*World's Advanced Saving Project*)

İtalya'da 2012 yılında düşük maliyetli eklemeli yapı üretimini araştırma amacıyla kurulmuş bir şirkettir. Sürdürülebilir ve strüktürleri doğal malzemeler veya zirai atıklardan elde edilebilen yapılar yazdırma amacıyla yola çıkmışlardır (Valente ve diğer., 2019).

Delta robot yardımı ile yazdırma işlemi gerçekleştirilmesine rağmen kablo destekli platform ile eklemeli üretim yöntemine de benzemektedir. Kablolar yerine; paralel olarak konumlandırılmış kollar vasıtasıyla hafif bir çerçeve sisteme tutturulmuş uç elemanlar vardır (Labonnote ve diğer., 2016). Bu teknoloji ile yapılan araştırmalar, iki tip cihazın tasarlanması ve geliştirilmesine sebep olmuştur: WASP Big Delta Yazıcısı ve WASP Crane (Valente ve diğer., 2019).

Şekil 3.29'da gösterilen Big Delta adını verdikleri 3 kablolu asma platform ilk olarak 4 m yüksekliğinde üretilmiştir. Daha sonra sırasıyla 8 ve 12 metre yüksekliklerinde platformlar inşa edilerek dünyanın en büyük delta 3B yazıcısı olduğu iddia edilen teknolojiler geliştirilmiştir (Labonnote ve diğer., 2016). Günümüzde; 12 m yüksekliğinde 7 m genişliğinde baskı yapabilen bu yazıcının bütün parçaları 6 m'lik modüler kollarla monte edilmiştir. Makinenin bütün parçaları en fazla 3 metrelik uzunluklara sahiptir. Böylelikle, parçaların sahaya götürülüp monte edilmesi kolaylaştırılmıştır. Enerji tüketimini minimize edebilmek için motor ve elektronik parçalar güneş panellerinden güç alabilecek şekilde tasarlanmışlardır. Yazıcının hızı basılacak olan malzemeye göre değişse de 40 cm/s ulaşabileceği maksimum hızıdır. 200 kg basılacak olan malzemeyi taşıma kapasitesine sahip olsa da yazdırma sırasında oluşan mekanik titreşimi azaltmak için 40-50 kg arası malzeme yükleme yapılır (Valente ve diğer., 2019).



Şekil 3.29 WASP Big Delta yazıcısı (WASP, b.t.c)

Bu yazıcı ile 40 tondan oluşan saman ve kilden üretilmiş bir karışım ile Ø5 m genişliğinde, 270 cm yüksekliğinde bir yapı; 135 katman ile ortalama 20 dakikada basılmıştır. 2 m³ su için 3 €, 200 kwh enerji için 32 €, saman için 10€ ve motor benzini için 3 € tüketilmiş ve örnek yapının toplam maliyeti 48 € olarak belirtilmiştir (WASP, b.t.c)

Şekil 3.30'da gösterilen WASP Crane adlı yazıcı ise Big Delta'nın geliştirilmiş versiyonudur. Yazdırılacak alan ve mimari öğeye göre farklı kurulum seçenekleri sunabilen bu yazıcı modüler bir sistem üzerinde hareket ettirildiğinden esnek üretim seçenekleri sunmaktadır. 6,6 m çapında 3 m yüksekliğinde olan her bir modüle istenildiği kadar ekleme yapılarak istenilen yapı boyutlarına ulaşılabilir (Valente ve diğer., 2019). Maksimum hızı 30 cm/s olan bu yazıcının lüle çapı 18-30 mm arasında değişmektedir. 9 mm yüksekliğe sahip katmanların malzemeleri; toprak bazlı, beton veya jeopolimer malzemeler olabilir. 150 kg ağırlığa sahip olan makinenin taşıyıcısının malzemeleri ise çelik ve alüminyumdur (WASP, b.t.c).



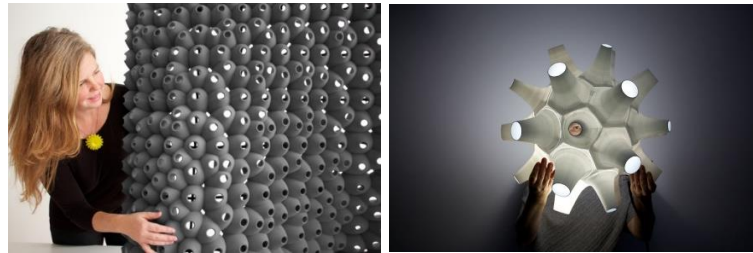
Şekil 3.30 WASP Crane yazıcısı (WASP, b.t.a)

WASP Crane adlı yazıcı ile üretilen ve WASP’ın en bilindik yapı baskılarından biri olan “GAIA” evi doğal çamur karışımı ile yazdırılmıştır. İçinde dikey boşlukları olan duvarlar katmanlı bir şekilde yazdırılmıştır. Bu boşluklara yazdırma işlemi tamamlandıktan sonra ısı yalıtımını sağlamak amacıyla pirinç kabukları doldurulmuştur. 40 cm kalınlığında toplam 30 metrekare duvar 10 gün sürede 900 €’ya mal edilmiştir (Valente ve diğer., 2019).

3.1.3.10 Emerging Objects

Kaliforniya Berkeley Üniversitesi’nde mimarlık profesörü olan Ronald Rael ve San José Eyalet Üniversitesi iç mimarlıkta doçent olan Virginia San Fratello tarafından kurulmuş olan şirketin amacı; eklemeli üretim tekniği vasıtasıyla yapı veya yapı elemanı baskısı ile yapım süreçlerinin kolaylaşmasına katkıda bulunmaktır (Emerging Objects, b.t.a).

Toz bazlı üretim tekniğini kullanarak; Şekil 3.31’de görülen gözeneklilik ve yarı saydamlık gibi tasarımın bütünü için önemli olan yüzey denemeleri üzerine çalışmaktadırlar. Genellikle, yapı elemanlarının uygun görülen malzeme ile basılması sürecini ele alan bu teknolojiye, basılan ürün en son monte edilerek bir bütün elde edilebilir. Çamur, ahşap, çimento, çay, kahve hatta kemik tozundan dahi üretim yapabildikleri geniş çaplı malzeme skalaları mevcuttur. Bünyelerinde bu malzemelerin, 3B yazdırma tekniğinde nasıl davranacaklarını araştırmak adına kurulmuş Forust gibi şirketler bulunmaktadır. Forust, gezegenimizin ekolojisine zarar vermeyen yöntemler kullanarak ahşabın bu süreçte incelenmesini yapan şirkettir (Emerging Objects, b.t.a).



Şekil 3.31 Emerging Object adlı şirketin 3B yazdırma teknolojisi ile denediği yüzey tasarımları (Emerging Objects, b.t.b)

Bu teknoloji kullanılarak 2015 yılında üretilmiş 840 adet yazdırılmış bloğun bir araya getirilmesi ile 3,66 x 3,66 m ayak izine sahip 2,74 m yüksekliğinde Şekil 3.32’de gösterildiği gibi “Bloom” ismi ile bir yapı üretilmiştir. Blokların her biri paslanmaz çelik iskete monte edilerek ayakta durması sağlanır (Emerging Objects, b.t.a).

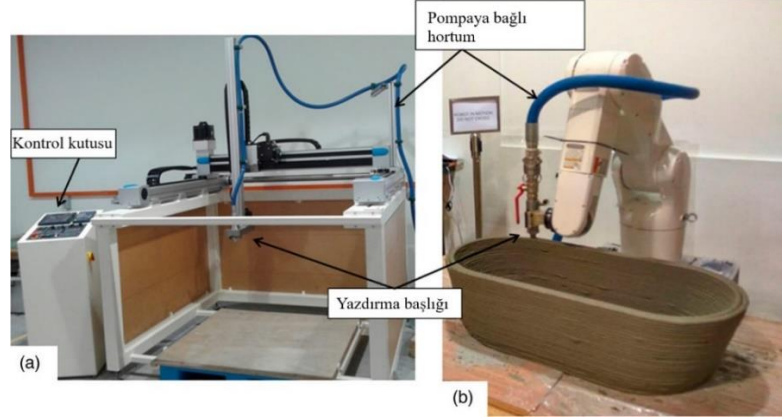


Şekil 3.32 Emerging Object adlı şirketin Bloom adlı çalışması (Emerging Objects, b.t.b)

3.1.3.11 Singapur 3B Baskı Merkezi

İnşaat sektöründe sürekli artan ince detaylı ve karmaşık yapıların uygulanabilirliği isteği üzerine, 3B olarak yazdırılabilir malzemelerin geliştirilmesi amacıyla kurulmuş bir yapılaşmadır (Nematollahi, Xia ve Sanjayan, 2017). Jeopolimer, hafif ve elyaf takviyeli harç gibi basılabilir malzemeler üzerine çalışmaktadırlar. Bunlara ek olarak, geri dönüştürülmüş cam agregaları ve ezilmiş kaya tozu (bazalt) gibi malzemeleri sürdürülebilir yapılar elde edebilmek için çalışmaktadırlar (Tay ve diğer., 2016).

Yazdırılmak istenen objeye göre Şekil 3.33’te görüldüğü gibi iki farklı yazıcı tipi geliştirilmiştir. Büyük ölçekli yazdırma işlemleri için dört eksenli vinç benzeri bir yazıcı kullanılırken, karmaşık ve daha detaylı basılması gereken ürünler için altı eksenli robot kol ile baskı yapılmaktadır (Tay ve diğer., 2016).



Şekil 3.33 SC3DP yazıcıları (a) dört eksenli vinç benzeri ve (b) altı eksenli otomatik robotik kol yazıcıları (Tay ve diğer., 2016)

Jeopolimer malzemenin üzerinde çalışmalar yapılması portland çimentosuna sürdürülebilir alternatif bir malzeme getirilmek istenmesindendir. Kömür santrallerinin ve demir imalatının yan ürünleri olarak ortaya çıkan uçucu kül ve cürufun, alkalin ile aktivasyonu ile ortaya jeopolimer malzeme çıkar. Portland çimentosuna göre yaklaşık olarak %60 daha az karbon emisyonuna sahip olmasının yanı sıra mekanik, kimyasal ve termal özellikleri bir yapı elamanı olarak kullanılması için oldukça iyidir (Nematollahi ve Sanjayan, 2014).

Jeopolimer bazlı malzemenin yazdırılabilirliğini etkileyen parametreler ise şu şekildedir: parçacık boyutunun dağılımı, toz yatağının yüzey kalitesi, toz yoğunluğu, toz yatağı gözenekliliği ve bağlayıcı damlaların penetrasyon davranışı (Xia ve Sajayan, 2016).

3.1.3.12 ApisCor

2016 Aralık ayında, Apis Cor adlı şirket; Rusya’da ilk yerinde yapım yöntemi ile bir evi 24 saat içerisinde, mobil bir 3B beton yazıcı ile inşa ettiğini duyurmuştur. 38 m²’lik ev için toplamda harcanan yapım tutarının \$10,134 olduğu belirtilmiştir (Nematollahi ve diğer., 2017).

Tamamen beton bazlı karışım kullanılarak ve 2,5 x 2,5 cm en kesitlerinde iç-dış duvar yüzeylerinin arasında Şekil 3.34’te görüldüğü gibi boşluk bırakılarak yazdırılan

duvarların arasına cam elyafından destekler robotik kol yardımıyla konumlandırılmıştır. Yazıcının kapladığı toplam alan 132 m² olup katlandığında 4 x 1,6 x 1,5 boyutlarına kadar küçülebilen 2 ton ağırlığında bir teknolojidir. Bu yazıcının hassasiyeti 0,5 mm'ye kadar çıkabilirken baskı yoluna göre değişebilen ancak maksimum 16 cm/s'ye kadar çıkabilen hıza sahiptir (Valente ve diğer., 2019). Yazdırma süreci bittikten sonra, kapı ve pencerelerin manuel olarak konumlandırılması gerçekleştirilir (3D Printer, b.t.).



Şekil 3.34 Apis Cor üretimi boşluklu duvar ve Apis Cor yazdırma robotunun dikey sabit taşıyıcısı duvarlar arasındaki cam elyaf destekler (3D Printer, b.t.)

Yazdırma işlemi için gerekli olan robotik kolun kurulumu 30 dakika sürmüştür olup, baskının gerçekleştirileceği alanın ortasına yerleştirilmiş Şekil 3.34'teki gibi sabit dikey bir taşıyıcı üzerinde çalışması sağlanmıştır. Dairesel bir plan şeması üzerinden baskı yapılarak, organik formların basılmasının kolaylaştırıldığı mesajı verilmek istenmiştir. Ayrıca, -35°C gibi ekstrem hava koşullarında herhangi bir aksaklık yaşamadan yapılan üretim ile de insanlar için çalışması zor olan koşullarda; robotik kol yardımı ile üretimin aksamadığı gösterilmek istenmiştir (3DStartup: Apis Cor, creators of the 3D printed house, 2018).

3.1.3.13 Huashang Tengda

Çin'in Pekin şehrinde kurulmuş olan Huashang Tengda adlı şirket, 2016 yılında 8 büyüklüğünde depreme dahi dayanabileceğini iddia ettikleri iki katlı bir villanın 3B yazdırma tekniği ile inşa edildiğini belirterek eklemeli üretim ile yapım endüstrisinde adlarını duyurmuşlardır. 45 günde 2 ton beton kullanarak Şekil 3.35'te görülen 400

m²'lik villa için, C30 beton ve agregalar çerçeve üzerine ve donatı çubukların etrafına büyük bir 3B yazıcı ile sıkılmıştır (Scott, 2016).

En büyük rakiplerinden biri olan Winsun'un fabrikada üretim yerinde montaj sürecinin aksine, tek seferde bütün bir villayı sahada üretim ile inşa edebilen teknolojiye sahiptirler. Yazdırma işlemine başlamadan önce bir inşaat ekibi tarafından binanın çerçeve sistemi ve yapının tesisat düzeneği kurulur. Yazdırma işlemi bir bilgisayar ile kontrol edilerek gerçekleştirilir. Yazdırma için geliştirilmiş olan yazılım dört ana sistemden oluşur: elektronik bileşen formülü, beton karıştırma, iletim ve 3B baskı (Scott, 2016).



Şekil 3.35 Huashang Tengda şirketinin 3B yazıcı ile ürettikleri villa (Scott, 2016)

3.1.3.14 MX3D

2014 yılında Amsterdam'da metalin 3B baskı ile son ürüne dönüştürülmesini hedef olarak kurulmuş bir şirkettir. Kaynak makinelerini Şekil 3.36'da görülen 3B baskı makinelerine dönüştürerek, yapıların eklemeli üretim ile inşa edilmesini sağlamaktadırlar. MX3D Metal XL yazılımının beta versiyonunu, evler için büyük ölçekli 3B metal baskı objelerin üretilebilmesi amacıyla geliştirmişlerdir. Özellikle, MX3D Köprüsü olarak adlandırdıkları yaya köprüsün, eklemeli üretim ile elde edilmesi ile tanınmışlardır. Baskı için paslanmaz çeliği kullanan şirketin hedefleri arasında, daha hafif metallerin yazdırılmasını sağlayan robotik kollar üretim Mars'taki kolonileşme için bu kolların kullanılmasını sağlamak vardır (MX3D, b.t.).

Parametrik tasarım ile dijital ortamda Grasshoper ve Karamba programları ile hazırlanan projeleri robot kollar ile basılmaktadır. İleri teknolojiler ve geleneksel çelik işçiliğinin birleşimi olarak ortaya çıkacak ürünlerin basılması için şirket; mimar, mühendis, zanaatçılar gibi farklı disiplinlerden insanlar ile de çalışmaya devam etmektedir (MX3D, b.t.).



Şekil 3.36 MX3D 3B metal baskı robotu (MX3D, b.t.)

3.1.3.15 BatiPrint

BatiPrint adıyla kurulmuş olan şirketin amacı herkes tarafından karşılanabilir, uygun yaşama koşullarına sahip yapıları 3B yazdırma tekniği ile üretmektir. Eklemeli üretim tekniği ile aynı anda birden fazla katmanı farklı malzemeler ile basabilmesinden dolayı oldukça önemli gelişmelere yol açan bir şirkettir (Clarke, 2017).

2018 yılında Fransa’da 95 m² olarak 5 odalı bir sosyal konutu toplamda 176.000£ maliyet ile üretmişleridir. Ekstrüzyon yöntemi ile eklemeli üretimi sahada yapan yazıcı, Şekil 3.37’de görüldüğü gibi yatayda bir tabaka çimento bazlı harcı ve iki tabaka polimerik köpüğü aynı anda basabilmektedir. Böylece hem yapının taşıyıcısı hem de yalıtım malzemesi aynı anda dökülmüş olur. Bir operatör tarafından kontrol edilebilen Şekil 3.37’de görülen robotik kol, tasarlanmış olan yol üzerinde hareket ettirilebilir. Böylelikle, organik formların elde edilmesi için ekstradan bir maliyete gerek duyulmamaktadır (Clarke, 2017).



Şekil 3.37 BatiPrint 3B yazdırma robot kolunun operatör tarafından kontrol edilmesi (Clarke, 2017)

3.1.4 Mimari Yapım Süreçlerinde Kullanılan Eklemeli Üretim Tekniğinin Avantaj ve Dezavantajları

Mimari yapım süreçlerinde kullanılan eklemeli üretim tekniğinin avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

3.1.4.1 Avantajlar

Eklemeli üretim teknolojisinin yapım süreçlerine dahil olması birçok yönden sürece olumlu katkılarda bulunmuştur. Pegna (1997)'nin tahminine göre bu teknolojinin inşaat maliyetlerini %30'a kadar azaltılabileceği; yerinde yapım ile yapıldığında işgücüne olan bağımlılığın dolayısıyla insan gücüne bağlı değişkenlerin azalacağı ve böylelikle yaralanmaların azalacağı vurgulanmıştır (Pegna, 1997).

İmar yönetmelikleri, işveren talepleri, iş gücü, malzeme, kalıp kullanımı gibi kısıtlamalar; yapıların daha ekonomik ve uygulanabilir olması için tekdüze yapılmasına sebep olmuştur. Özellikle de ekonomik sebeplerin bireysel isteklerin önüne geçmesinden kaynaklı, eklemeli üretimin inşaat süreçlerine de dahil olması büyük avantajları da beraberinde getirmiştir (Pegna, 1997).

Bireylerin isteklerine göre, konfor koşullarının ve estetik kaygıların karşılanması fazladan maliyet gerektirmeden eklemeli üretim yöntemleri ile sağlanabilmektedir. Geleneksel yapım yöntemleriyle yapılması zor veya imkânsız olan karmaşık yapıların veya yapı elemanlarının inşa edilebilirliği bu teknoloji ile mümkün olabileceği görülmüş ayrıca üretim maliyeti ve süresinde de azalmalar olacağı belirtilmiştir (Han,

Jafari ve Seved, 2003).

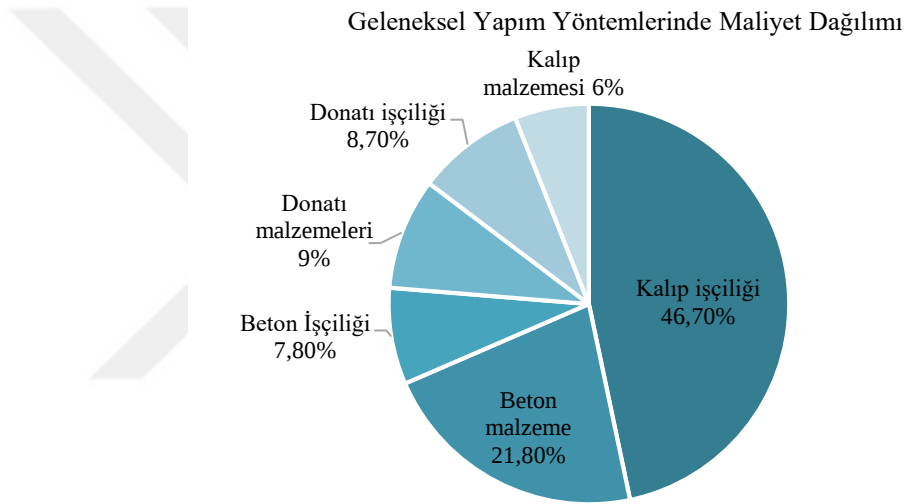
Bir yazıcının; operatör yardımıyla ya da tam otomatik olması fark etmeksizin, çıkardığı ürünlerdeki detaylar, insan yapımına kıyasla daha derin ve ince işçiliklidir. Çıkan üründe hata payı minimumdur (Buswell ve diğer., 2007). Dolayısıyla; yeniden yapım, hataların düzeltilmesi gibi süreçler yaşanmayacağından hem fazladan, hesaplanmayan veya öngörülemeyen maliyetlerden kaçılmış hem de ekstradan projelerin süreleri uzatılmamış olur. Tablo 3. 3'te, 40 MPa'lık geleneksel yöntem ve 3B baskı yöntemleriyle üretilmiş iki duvarın maliyet karşılaştırılması gösterilmiştir. 3B baskı yöntemleri; işçilik ve kalıp maliyetlerini neredeyse sıfıra indirmiştir (Ma, Wang ve Ju, 2018). Şekil 3.38'de ise geleneksel yöntemlerle üretilmiş beton bir yapının veya yapı elemanının üretimi için gerekli olan maliyetin %35-60'ının kalıp için kullanıldığı görülmektedir (Robert H. Lab, 2007).

Tablo 3.3 Geleneksel yapım yöntemleri ve 3B baskı teknolojileri ile üretilmiş 40MPa'lık beton duvarın maliyet tahmini karşılaştırması (Ma, Wang ve Ju, 2018)

	Geleneksel Yapım Yöntemi			3B Baskı Yöntemi		
	Birim Fiyat	Birim	Maliyet	Birim Fiyat	Birim	Maliyet
Beton	\$200/m ³	150 m ³	\$30.000	\$250/ m ³	150 m ³	\$37.500
Beton pompalama	\$20/ m ³	150 m ³	\$3.000	\$20/ m ³	150 m ³	\$3.000
İşçilik	\$20/ m ³	150 m ³	\$3.000	-	-	-
Kalıp	\$100/ m ³	1500 m ³	\$150.000	-	-	-
Toplam			\$186.000			\$40.500

Dünya çapında kullanılan hammaddenin çoğu inşaat sektöründe kullanılmaktadır (Lenssen, 1995). Şekil 3.38'de de görülebileceği gibi geleneksel yöntemlerde maliyetin büyük kısmı kalıp işçiliğine gitmektedir. Bu nedenle, her ne kadar eklemeli üretim teknolojilerinin yapım süreçlerinde kullanımı yeni gelişmeler arasında sayılsa da yapılacak olan projelerin en başından sürdürülebilirlik ilkelerine göre yapılması dünya için olumlu olacaktır. Pasif yöntem olarak sürdürülebilirlik kapsamında eklemeli üretim teknolojilerine bakıldığında; gerekli malzemelerin ihtiyaç kadar,

firenin sifira yakın olduğu bir durum vardır. Bu da kullanılacak olan malzemelerden oluşacak atığı azaltmaktadır. Örneğin; Marble EcoDesign adlı araştırma projesi, mermer mağaralarında ortaya çıkan ve atılmaları ekstra maliyet gerektiren atıkların; bir polimer ile birleştirilip 3B yazdırma teknolojilerinde kullanılmasını hedeflemektedir (Marble Eco Design, b.t.). Aktif olarak uygulanabilen önlemler arasında ise malzemenin karbon ayak izinin olabildiğince düşük seçilmesi çevreye verilen zararı minimuma indirmek için girişimlerdenir. Malzeme dışında, ihtiyaç duyulan enerjinin de yenilenebilir enerji kaynaklarından temin edildiği projeler görmek mümkündür.

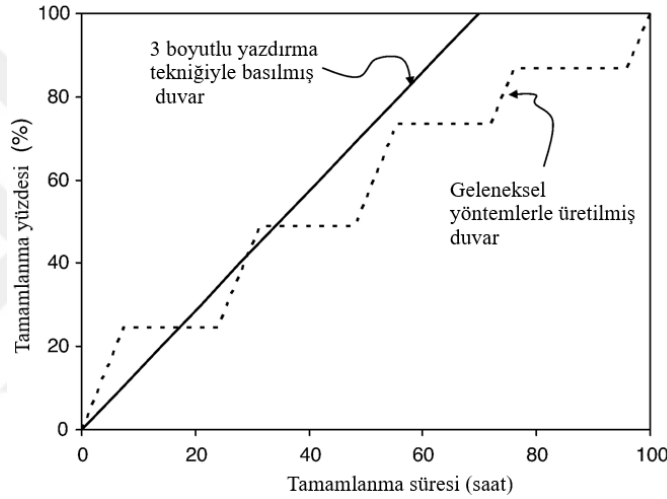


Şekil 3.38 Geleneksel yapım yöntemleri ile yerinde yapılmış yapısal beton maliyet dağılımı (Robert H. Lab, 2007)

Çoğu eklemeli üretim tekniği, daha sonradan tekrar uğraşılması için baskı sırasında elektrik ve mekanik tesisatları için yapı içerisinde boşluklar bırakmaktadır. Böylece iş gücünün azaltılması hedeflenmektedir (Toğay ve Sağıroğlu, 2019). Ayrıca eklemeli üretim teknolojilerinin neredeyse hiçbirinde yapının stabilitesinin zamanla sağlamlaşabilmesi için gerekli olan kalıp kullanımı olmadığından yine malzemeden ve ham madde kullanımından tasarruf edilmiş olunur (Lim ve diğer.,2012).

Eklemeli üretim teknolojilerinin yapım süreçlerinde kullanılmasının en avantajlı yönlerinden biri de yapım süresini kısaltmasıdır. Örneğin; CC teknolojisinde bir evin

tamamı aylar yerine saatler içerisinde (200 m² iki katlı tekil bir evin inşasının iki günden az sürede) inşa edilebilir olduğu ifade edilmiştir (Khoshnevis, 2003). Özellikle, toplu konutlara acil ihtiyaç duyulduğu doğal afet ve savaş zamanlarında, insanların kendilerini biraz da olsa güvende hissetmeleri için hızlı bir çözüm yolu sunması sebebiyle de sosyal yönden avantajları da vardır. Şekil 3.39’da görüldüğü gibi zaman açısından geleneksel yöntemlerle ve 3B baskı yöntemleriyle üretilmiş iki duvardan, geleneksel yöntemlerle duvarın üretimine daha hızlı başlanabilir. Ancak, sonuç ürünlere bakıldığında 3B baskı ile üretilmiş duvarın daha çabuk tamamlandığı görülmektedir.



Şekil 3.39 Geleneksel yöntemler ile üretilmiş duvar ile 3B beton baskı teknolojisi ile üretilmiş duvarın süre grafiği (Buswell ve diğer., 2007)

Eklemeli üretim süreçleri, her sürecin baştan itibaren planlanmış olması ve insan faktörünün bu süreçlerde minimum rol almaları sebebiyle istenilen ve öngörülen sürelerde işlemler tamamlanır. Böylece, projede herhangi bir gecikme ve istenmeyen uzatmalar yaşanmadan inşaat süresi bitirilebilir.

Çoğu eklemeli üretim yazıcısı, her iklim koşulunda ve her koşulda çalışabilme yeteneklerindedirler. Çünkü, insan gücünün yetmediği veya insanlar için oldukça tehlikeli olabilecek durumlarda bu yazıcılar rahatlıkla kullanılmak istenmiştir. Böylece, çalışma ortamlarında minimum risk ile daha rahat çalışma koşulları sağlanmış olunur (Hager ve diğer., 2016). Özellikle, farklı bir gezegende kolonileşme

alışmalarının gündemde olduğu bu zamanda insanların bu eklemeli üretim tekniklerini oldukça sık kullanması beklenilmektedir. Şekil 3.40’da da görülebileceği gibi NASA’nın sponsorluğunda, Mars’ta ve Ay’da 3B baskı ile altyapı çalışmaları projesi kapsamında yapılması beklenen proje gösterilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.40 NASA'nın sponsorluğunda 3B baskı ile altyapı çalışmaları projesinin öngörülen görseli (Contour Crafting, b.t.)

Bütün bu avantajlara ek olarak; eklemeli üretim teknolojilerinin yapı sektöründe kendini göstermesinden doğan dolaylı bir avantaj da malzeme üzerine yapılan çalışmaların artmasıdır. Geleneksel yöntem ile yapılan inşaatlarda kullanılan malzemelerin, eklemeli üretim teknolojilerinde doğrudan kullanılamaması araŐtırmacıları yeni karışım arayışlarına itmiŐtir. Böylelikle yeni arayışların olması da yeni iş kollarının oluŐmasına sebep olmuştur.

3.1.4.2 Dezavantajlar

Günümüzde oğu Avrupa ülkesinin ortak sorunu, genç nüfus yoğunluğunun az olmasından kaynaklı nitelikli eleman bulunamamasıdır. Eklemeli retim süreçlerinde de insanların sadece, harç tazelemek, pencere-kapı takmak ve çatı eklemek gibi yan rollerde yer alırlar. Böylece, hem az insan ile maksimum sürede iş halledilmiŐ olur hem de iş kazaları minimuma indirilirmiŐ olur (Smith, 2012). Ancak, lkemizdeki genç nüfus yoğunluğu fazladır. Bu nedenle, yapım süreçlerinde yer alacak olan işçi sayısının azaltılması sektörde çalışanları olumsuz bir şekilde etkileyebileceği gibi eklemeli üretim teknolojileri ile açılan yeni iş sektörlerine de uyum sağlayabilirler. Genel olarak bakıldığında; eklemeli üretim teknolojileri bazı iş kollarını süreçten çıkartırken yeni iş kolları açarak genç nüfusun kendini bu yönde geliŐtirmesi için de

olarak sağlamaktadır. Yani hem avantaj hem de dezavantajlı bir durum olarak bu durumu incelemek mümkündür.

Valente ve diğerlerinin Garcia de Soto'nun "Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall" yazısından çıkardıklarına göre standart bir yapı elemanı veya bir yapı için eklemeli üretim tekniklerinin kullanılması oldukça pahalı olacaktır. Eğer standart ölçülere uygun yapılar inşa edilmek isteniyorsa geleneksel yapım yöntemlerinin daha uygun olacağı savunulmuştur (Valente ve diğer., 2019).

Geleneksel yapım tekniklerinde kullanılan malzemeler senelerdir üzerlerinde çalışılmış, denenmiş ve kullanılmış malzemelerdir. Bu nedenle, bu malzemelerin yapılarda kullanımında güvenlik veya statik ile ilgili problemler yaşama riski oldukça azdır. Özellikle de çimento bazlı malzemelerin sıkça kullanıldığı inşaat sektöründe, yapıların mekanik davranışları öngörülebilir durumdadır. Ancak, geleneksel yöntemlerde kullanılan malzemelerin eklemeli üretim tekniklerinde kullanılmaları mümkün değildir. Bu nedenle, eklemeli üretim teknolojilerinin inşaat sektörüne girmesi; yapıların güvenli ve tasarlandığı şekliyle kullanılabilmesi için yeni malzeme arayışlarına girme mecburiyeti doğurmuştur (Valente ve diğer., 2019).

Yapı sektöründe eklemeli üretim teknolojilerinin var olması çok eskiye dayanmadığı için yönetmelik ve standartlarda eksiklikler vardır. Yapının mekanik davranışı ve yapısal bütünlüğü, yapıyı oluşturan bileşenler gibi belli başlı konularda herhangi bir güvenlik problemi ile karşılaşılması adına denetlemeler ve yönetmelikler oluşturulması gerekmektedir (Valente ve diğer., 2019).

Eklemeli üretim teknolojileri ile yapıların üretilmesi için dijital ortamda yapının ve yapım sürecinin modellenmesi gerekmektedir. Bu durum fikri mülkiyet sorunlarını kolaylıkla doğurabilir. Çünkü, dijital bir nesnenin kopyalanıp yeniden satışa çıkarılması oldukça basittir (Berman, 2012).

Eklemeli üretimin yapım teknolojilerinde kullanımına yönelik dezavantajlardan

kabul edilebilecek bir diğerkonu ise sorumluluktur. Buswell ve diğerkleri, sıcak su taşıma sistemi ve elektrik dağıtım ekipmanlarının olduğu, eklemeli üretim tekniğı ile üretilmiş bir duvarda çıkacak olan problemden sorumlu kimdir şeklinde endişelerini dile getirmişlerdir. Bu gibi çok disiplinli görevlerden insanların bir arada çalıştığı tek bir üründe; tasarımcı, yüklenici, makine mühendisi, elektrik mühendisi veya makineyi üreten kişilerden kimin sorumluluk alacağı da problemlı bir konudur (Buswell ve diğerk., 2007).

Eklemeli üretim teknolojilerinin çoğı yerinde yapım yapan sistemledir. Bu nedenle, yazıcıların yapının konumlandırılacağı yere taşınıp orada kurulduktan sonra üretime başlanabilir. Bu durumlar, yazıcının taşınması ve kurulumu için ciddi maliyet harcanması anlamına gelmektedir (Sakin ve Kiroğlu, 2017). Ancak, geleneksel yöntemle inşa edilen yapılar için de tonlarca kum, çimento, tuğla... gibi birçok yapı malzemesinin taşınması gerektiğı düşünöldüğünde, eklemeli üretim daha avantajlı bir durumdadır.

Eklemeli üretim yöntemi ile inşa edilen yapıların boyutları da gelişen teknolojiye paralel olarak artmaktadır. Ancak, günümüzde teknolojinin gelişme hızı ile eklemeli üretimin inşaat sektöründeki gelişme hızı aynı olmadığından, çoğı eklemeli üretim yöntemi büyük ölçekli yapılar için uygun değildir.

3.2 Mimari Yapım Süreçlerinde Çıkarmalı Üretim Tekniğı

Mimari yapım süreçlerinde çıkarmalı üretim yapılan ilk örneklerden bir tanesi 106-107 yılları arasında inşa edilen Celsus Kütüphanesidir. Mermer ocaklarından ham bloklar halinde getirilmiş mermerler yan yana birleştirildikten sonra yüzeyle murç ve taraklarla düzeltilmiştir. Sonrasında, yüzeylere uygulanacak bezemeler mermer bloklara çizilmiş ve taş ustaları bu bezemeleri bloklardan gereksiz parçaları çıkartarak kütüphane cephesini oluşturmuşlardır (Celsus Kütüphanesi-Efes, 2015).

Günümüzde ise genellikle panel uygulamalarının yüzey tasarımında kullanılan CNC örneklerinden bir tanesi Şekil 3.41’de görölen ve Anoma isimli şirketin ürettiğı

panellerdir. İç ve dış mekanlarda kaplama olarak kullanılabilecek olan paneller, bilgisayar ortamında tasarlandıktan sonra genellikle 24" x 24" (60x60cm) ve 24" x 48" (60x120cm) ölçülerindeki panellere CNC makineleri ile işlenmektedir (Anoma Stone, b.t.).



Şekil 3.41 Anoma şirketinin CNC makineleri ile yaptıkları üretimlerden örnek yüzeyler (Anoma Stone, b.t.).

3.2.1 CNC Makinesinin Kodlanması

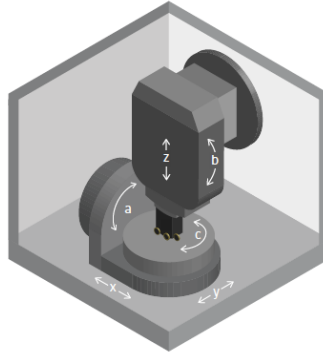
CNC frezeleme için konum verileri kontrolöre manuel olarak, genellikle klavye ve yerleşik ekran aracılığıyla girilebilir, bu genellikle bir plandan veya çizimden yapılır. Alternatif olarak, bir CAD / CAM sistemi parçayı tasarlamak ve programlamak için kullanılabilir ve sonuçta ortaya çıkan program CNC kontrolörüne yüklenir veya beslenir (Jaje, 2017).

Freze için çalıştırmak için kullanılan kod genellikle Geometri kodudur(G-Kodu). Operatörlerde ayrıca iş milini veya soğutucuyu açmak veya kapatmak için "M kodları" veya çeşitli kodlar bulunur (Jaje, 2017).

CNC freze tezgâhları, genellikle doğrusal ilerleme yaparak talaş kaldırma işlemi ile tezgâha sabitlenmiş ürünün istenilen şekle veya forma ulaştırılması amaçları için kullanılırlar. Düz ve açılı yüzeylerin işlenmesi, kanal açılması gibi işlemler için kullanılan tezgahlar; otomotivden havacılık sektörüne kadar çeşitli alanlarda tercih edilirler (Osman Mühendislik, b.t.)

3.2.2 CNC Makinesinin Türleri

Prototip diyagramı Şekil 3.42’de verilen CNC makine tasarımları büyük ölçüde değişiklik gösterir. Bazı stillerde, iş mili ve takım sabit kalırken parça hareket eder veya döner, diğerlerinde parça sabittir ve iş mili ve takım hareket eder ve üçüncü tür, parça ve iş milinin hareketinin bir karışımıdır (Jaje, 2017).



Şekil 3.42 CNC makinesi prototip diyagramı (Jaje, 2017)

3.2.2.1 3-eksenli İşleme

3 eksenli işleme yapan makineler CNC türleri arasında en çok üretilenlerdir. X, Y ve Z eksenlerinde aynı anda hareket edebilen bu makinelerde genellikle karmaşık formlu kalıplar ve basit prizmatik ürünler üretilebilir (Jaje, 2017).

3.2.2.2 3+1 veya 3+2 Eksenli İşleme

Bu tip işlemlerde, dönme hareketleri ile doğrusal hareketler ortak çalışabilir. Parça, konumuna döndürüldükten sonra doğrusal hareket mekanizması devreye girer. Dönüş eksenlerine göre adlandırılan 3+1 veya 3+2 eksenli işlemlerin en önemli avantajı, manuel kurulumun en aza indirilmesine yardımcı olmasıdır. Bazı parçaların farklı bölgelerinde yapılması istenen frezeleme işlemi için 3 eksenli işlemede parçanın çıkarılıp tekrardan konumlandırılması gerekirken, bu tip işlemlerde işlem otomatik olarak gerçekleştirilebilir (Jaje, 2017).

3.2.2.3 4-eksenli İşleme

Havacılık ve diğer endüstrilerde sıkça kullanılan bu işleme yönteminde, 3 eksenli doğrusal hareket ve 1 eksenli dönme hareketleri aynı anda gerçekleşebilir. Yani, tüm 4 eksenli işleme makinelerinde 3+1 işleme yapılabilirken, 3+1 işleme makinelerinde 4 eksenli işleme gerçekleştirilemez (Jaje, 2017).

3.2.2.4 5-eksenli İşleme

Bu işleme, parçayı farklı yönlerde frezelemede en çok esneklik sağlayan yöntemdir. Parça, A&C veya B&C’de dönerken aynı anda 3 doğrusal ekseninde de hareket edebilir. 5 eksenli işleme; 3 eksenli, 3 + 1 eksenli, 3 + 2 eksenli ve 4 eksenli işleme için de kullanılabilirler. Bu durum makinenin tasarımı ve operatörüne bağlı olarak kontrol edilebilir. Aynı boyutta üretilecek olan elemanlar için bu tipte üretim diğerlerine göre daha pahalı olmasına rağmen daha fazla esneklik sağladığından detayların oldukça önemli olduğu tasarımlar için tercih edilebilirler (Jaje, 2017).

3.3 Mimari Yapım Süreçlerinde Birleştirmeli Üretim Tekniği

Birleştirme yöntemi ile üretim, küçük parçalardan üst üste veya uç uca birbirine eklenmesi, montajlanması, bağlanması, çivilenmesi, yapıştırılması gibi yöntemlerle bir bütün oluşturmaktır. Birleştirilen parçalar birbiriyle aynı tür olabilecekleri gibi farklı türde malzemeler de olabilirler. Geleneksel inşaat yöntemlerinde sıkça kullanılan bu yöntem, robotların inşaat süreçlerine dahil olması ile uygulamada hız kazanmıştır. Uygulama hatalarından doğan tasarım boşlukları, bu yöntem ile ortadan kaldırılmıştır. Çünkü, elde edilen ürünlerde istenilene kesin benzerlikte sonuçlar çıkmıştır. Özellikle keskin ve küçük detayların elde edilmesinde sağladığı kolaylıklar sebebiyle inşaat robotiğinde sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Yerinde veya fabrikada yapım için de uygun olan bu yöntem, özellikle Gramazio ve Kohler’in yaptığı çalışmalarla literatür ve uygulamadaki yerlerini korumuşlardır.

Advanced Robotics adlı şirketin inşaat demirlerini birbirine bağlamak için ürettiği

Tybot isimli robot bu sınıf içerisinde incelenebilecek oldukça önemli bir görevi olan robotlardan bir tanesidir (Construction Robots, b.t.)

R.O.B. Technologies adlı şirketin ürettiği Şekil 3.43'te görülen WoodFlex 56 adlı robot ise ahşap parçalarını taşımak, kesmek, çivilemek ve frezelemek için üretilmiş bir robottur. Duvar modüllerinin montajı amacıyla üretilmiş robot buna ek olarak çift eğrilikli kafes kiriş üretimi için uygun olduğu da kanıtlanmıştır. Robotun çok işlevli olması boyutlarının büyük olmasına sebep olmuş ve fabrikada üretim yapılıp arazide montajlama süreçleri birlikte çalışmaktadır (ROB, b.t.).



Şekil 3.43 WoodFlex 56 adlı birleştirme robotu (ROB, b.t.)

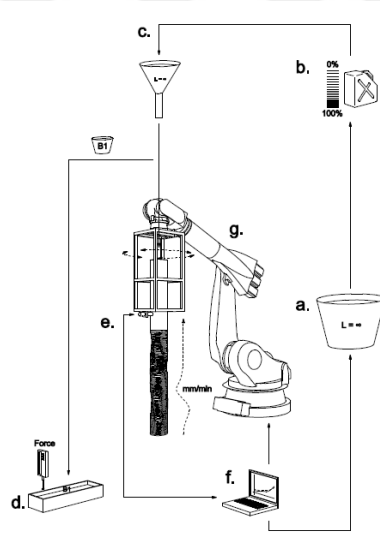
3.4 Mimari Yapım Süreçlerinde Biçimlendirmeli Üretim Tekniği

Biçimlendirme yöntemi ile üretim, malzemelerin doğal duruşlarının elde edilmek istenilen form ve tasarımlara uygun şekillerde orijinal halleriyle oynanmasıdır. Otomotiv sektöründen havacılığa kadar her sektörde üretim aşaması sırasında oldukça önemli roller oynayan biçimlendirme robotları; inşaat sektöründe de yerini almıştır. Genellikle organik ve kompleks formların geleneksel yöntemlerle üretilmesi uzun zamanlar ve fazla maliyetler gerektirdiğinden; yapı malzemelerinin eğme, bükme, örme gibi işlemlerden geçerek inşa robotları yardımıyla istenilen formların oluşturulması üzerinde çalışılan konular arasında yerini almıştır. Düz panel ahşaplara ve metaller 3. boyutta hacim kazandırmak ve filamentler ile yapılan örme işlemleri bu kategori içerisinde incelenebilir. İnşaat aşamasında biçimlendirmeli üretim tekniği genellikle fabrikada yapı ya da yapı elemanlarının üretilip sahada monte edilmesi şeklinde gerçekleştirilir. Özellikle Stuttgart Üniversitesine bağlı ICD/ITKE'de Achim Menges ve Jan Knippers öncülüklerinde yapılan araştırma pavyonları bu üretim

teknikinin inşaatta yerini almasında oldukça önemli adımlardır.

3.5 Mimari Yapım Süreçlerinde Döküm/Kalıplama ile Üretim Tekniği

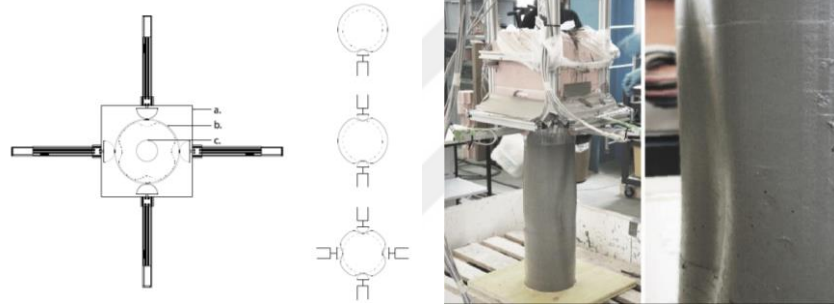
Döküm/Kalıplama ile üretim tekniği, geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor ve maliyetli olan formların yapımında inşaat robotlarının kullanılmasıdır. ETH Zürih'ten Prof. Dr. Robert Flatt'ın malzeme optimizasyonu, Gramazio & Kohler Research ve Prof. Dr. Walter Kaufmann'ın strüktür alanında yaptıkları ortak çalışmalar sonucunda ortaya çıkmış ve üretim sürecinin kavramsal şeması Şekil 3.44'de verilmiş bir sistemdir. ETH Zürih'in DFAB House adlı projesinin bir bölümünde, malzeme açısından optimize edilmiş yük taşıyan beton dikmelerin otomatik olarak prefabrikasyonu için “Akıllı Dinamik Döküm (ADD)” (Smart Dynamic Casting) sistemi geliştirilmiştir.



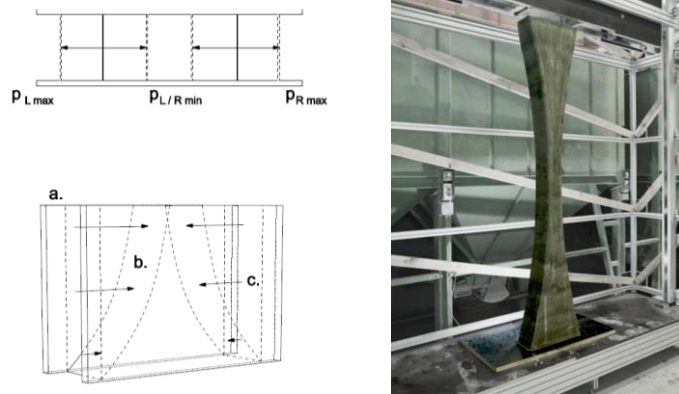
Şekil 3.44 ADD'nin üretim sürecini gösteren kavramsal şema. a. geciktirilmiş büyük beton harmanı; b. gaz pedalı; c. karıştırma odası; d. uzaktan geri bildirim sistemi; e. sıralı geri bildirim sistemine sahip kalıp; f. kontrol sistemi; g. Dikey hareketi yürüten 6 eksenli robotik kol (Lloret Fritschi ve diğer., 2017)

Bu kapsamda, iki farklı şekillendirme sistemi geliştirmişlerdir. Birincisi, kalıbın çıkışında oluşturulan bölgesel deformasyon ile ikincisi ise kalıp yüksekliği boyunca bütüncül şekillendirme yöntemi ile şeklindedir. İlk sistem, Şekil 3.45'te gösterildiği gibi kalıbın çıkışında düz veya döndürülmüş bir yörüngede malzemeyi girintileme yöntemidir. Bu üretim için, 200 mm çapında ve 400 mm yüksekliğinde dairesel bir

kalıba esnek bir membran monte edilmiştir. Ayrıca, malzemenin yer değiştirebilmesi için kalıbın merkezine 80 mm çapında içi boş bir göbek yerleştirilmiştir. Membranın hareketi ve betonu deforme etmesiyle dijital olarak oluşturulmuş formlar elde edilebilmektedir. Şekil 3.46’da görülen ikinci yöntemde ise amaç; yapının yüksekliği üzerinde daha yüksek derecelerde deformasyona sahip yapı ve yapı elemanları üretebilmektir. Bunu yapabilmek için malzemeyi tüm kalıp boyunca şekillendirebilen esnek bir kalıp sistemi geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, şekillendirme yöntemi, deformasyon çözünürlüğünü değiştirerek tasarım alanını doğrudan etkilemektedir. 1. deformasyon enine kesit alanından ziyade öncelikle yüzeyin şeklini değiştirirken 2. deformasyonda kesit alanında köklü değişiklikler söz konusudur (Lloret Fritschi ve diğer., 2017).



Şekil 3.45 Sol: Bölgesel deformasyonla oluşturulan kalıp sistemi Sağ: Bölgesel deformasyonla oluşturulmuş prototip (Lloret Fritschi, 2016)



Şekil 3.46 Sol üst: Esnek kalıbın üstten görünümü; sol alt: Kalıbın şematik gösterimi; a) sert kutu; b) esnek metal; c) kalıbın yüksekliği boyunca hareket eden aktüatörlerin konumunu gösterir sağ: Esnek tip kalıpla üretilmiş 2 m yüksekliğinde prototip (Lloret Fritschi ve diğer., 2017)

BÖLÜM DÖRT

İNŞA ROBOTLARI İLE ÜRETİLMİŞ YAPILARIN İNCELENMESİ

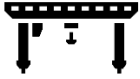
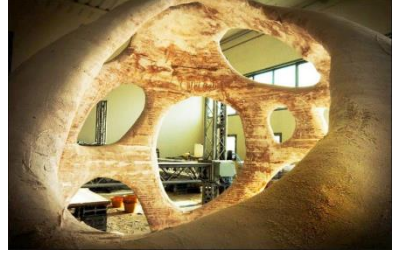
Bu bölümde, inşa robotları kullanılarak gerek yapının tamamı gerekse bir bölümü üretilmiş 22 adet yapı örneği araştırılmış, yapım teknolojileri, üretim teknikleri, kullanılan malzeme ve elemanları incelenmiştir. Araştırma kapsamında incelenen örneklerle genel bir bakış içeren tablolar, Radiolaria pavyonu (Tablo 4.1), Lewis Grand Oteli parti evi eklemesi (Tablo 4.2), Floatsam & Jetsam pavyonları (Tablo 4.3), Dubai Gelecek Vakfı Genel Merkezi (Tablo 4.4), HuaShang Tengda konağı (Tablo 4.5), Apis Cor beton evi (Tablo 4.6), 3D Housing 05 (Tablo 4.7), MX3D yaya köprüsü (Tablo 4.8), Trabeculae pavyonu (Tablo 4.9), Gaia evi (Tablo 4.10), Dubai belediye binası (Tablo 4.11), Boashan yaya köprüsü (Tablo 4.12), TECLA (Tablo 4.13), Zincir Eğrisi pavyonu (Tablo 4.14), Devlet bahçesi sergi salonu (Tablo 4.15), The Vertical Village enstelasyonu (Tablo 4.16), The Sequential Roof (Tablo 4.17), BUGA ahşap pavyonu (Tablo 4.18), ICD/ITKE araştırma pavyonu 2015-16 (Tablo 4.19), ICD/ITKE araştırma pavyonu 2016-17 (Tablo 4.20), BUGA fiber pavyonu (Tablo 4.21) ve DFAB evi (Tablo 4.22)'den oluşmaktadır.

4.1 Eklemeli Üretim Tekniği ile İnşa Edilmiş Yapılar

Eklemeli üretim tekniği ile inşa edilmiş 13 adet örnek aşağıda verilmiştir.

4.1.1 Radiolaria Pavyonu

Tablo 4.1 Radiolaria Pavyonu incelemesi (Morgante, 2011)

Radiolaria Pavyonu		
Mimari	Yıl: 2008 Yer: Pisa/İtalya Mimar: Andrea Morgante Yapım Süresi: 10 gün Fonksiyon: Kamu Yapısı Maliyet: -	
“Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Organik Form – 3 x 3 x 3 m Üretim tipi: Vinç  Yazıcıların Adı: D-Shape yazıcısı Robotun çalışma koordinatı: Kartezyen 	  Malzeme kullanım tipi: Toz bazlı ekstrüzyon Yapı Malzemesi: Kum, mineral tozu ve inorganik bağlayıcı

Radiolaria, Londra'daki Shiro Studio'dan Andrea Morgante'ye ait organik, açık hücreli bir tasarımıdır. İnşa edilme amacı, kendi kendini destekleyebilen, geçici veya tek kullanımlık kalıplar olmadan karmaşık formlara sahip yapıların, yenilikçi teknolojilerle ve basit malzemeler ile üretilebileceğini göstermektir. Ekstrüzyon yöntemiyle toz bazlı malzemeler kullanılarak üretilen bu yapı, Radiolaria yani ışınlılar isimli su yosunlarından ilham alınarak tasarlanmıştır. Fiziksel tasarım kriterlerinde Radiolaria'ların örnek alınmasının yanı sıra deniz altı oluşumlarında mineral ve silisli iskeletlerin yavaşça biriktirilmesi prensibi göz önüne alınarak D-Shape adlı şirketin yazıcının çalışma prensibi de biriktirme, üst üste koyma yoluyla çalışmaktadır (Morgante, 2011).

Yapı, kum ve mineral tozu gibi doğada kolayca bulunan malzemeler üzerine, bir inorganik bağlayıcının yazdırma başlığındaki 300 adet lüleden püskürtülmesi ve zamanla sertleşmesi ile inşa edilmiştir (Perkins ve Skitmore, 2015). Morgante'ye göre Portland çimentosundan daha üstün bir dirençle Şekil 4.1'de görüldüğü gibi taş benzeri bir görünüme sahip olan yapının üretimindeki ana agrega malzemesi ise atölyeden sadece birkaç km uzaklıkta bulunan bir yerden tedarik edilebiliyor olan Kalsiyum Magnezyum Karbonat'tır ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (Morgante, 2011).

Süreç, STL formatına dönüştürülen ve Şekil 4.2'de görülen D-Shape yazıcı başlığını kontrol eden yazılıma dosyanın aktarılması ile başlar. Baskı sırasında, “yapısal mürekkep” yazıcının püskürtme uçları tarafından kum üzerine tasarımda belirtilen forma göre püskürtülür. Katılma işleminin tamamen gerçekleşmesi 24 saat sürmüştür. Baskı, yapının en altından başlamış ve her biri 10 mm kalınlığında olan katmanlara göre püskürtme işlemi yapılmıştır. Her püskürtme yani her voksel 5 x 5 x 5 mm olarak ayarlanmış ve günde 150-200 mm baskı hızıyla inşa işlemine devam edilmiştir (Morgante, 2011).



Şekil 4.1 Radiolaria Pavyonunun taş benzeri görüntüsü (Morgante, 2011)

Yaklaşık 10 günlük bir sürede, 3 x 3 x 3 m boyutlarında kendi 300 kg, Şekil 4.2’de görülen taşıyıcı tablası 200 kg olan toplam 500 kg’lık pavyon yapısı inşa edilmiştir. Yapısal mürekkebin püskürtülmediği yerlerdeki Şekil 4.2’de görülebilen kumlar süreç devam ederken püskürtme işleminin uygulandığı alanlardaki kumların sertleşip taş benzeri monolitik bir yapıya dönüşmesi sırasında destekleyici rol oynamışlardır. Baskı işlemi tamamlandıktan sonra ise bir sonraki baskıda kullanılmak üzere manuel olarak temizlenmişlerdir (Morgante, 2011).



Şekil 4.2 Radiolaria Pavyonunun tabanını desteklemek için basılmış kaset taban ve Radiolaria Pavyonunun baskı işlemi tamamlandıktan sonra fazla kumlar temizlenmeden önceki görsel (Morgante, 2011)

Radiolaria; monolitik serbest biçimli ve kendi kendini destekleyen bir yapının, herhangi geçici kalıp kullanılmadan doğal ortamlarda kolaylıkla bulunabilecek toz bazlı malzemeler ile dijital bir dosyadan yapı boyutuna nasıl geçebileceğini gösteren ilk örneklerden bir tanesidir (Morgante, 2011).

4.1.2 Lewis Grand Oteli

Tablo 4.2 Lewis Grand Oteli Parti Evi eklemesi incelemesi (Lewis Grand Hotel teams with Andrey Rudenko to develop world's first 3D printed hotel, planning 3D printed homes, 2015)

Lewis Grand Oteli Parti Evi Eklemesi		
Mimari	Yıl: 2015 Yer: Angeles/Filipinler Mimar: Lewis Yakich Yapım Süresi: 100 saat Fonksiyon: Otel	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Yerinde yapım Mimari Form ve Alanı: Dikdögen-131 m² Üretim tipi: Vinç  Yazıcıların Adı: Audrey Rudenko yazıcısı Robotun çalışma koordinatı: Kartezyen 	  Malzeme kullanım tipi: Vikoz Ekstrüzyon Yapı Malzemesi: Kum, yerel volkanik külden oluşturulmuş beton karışımı

Lewis Grand Oteli, Filipinler'in Angeles şehrinde bulunan Don Juico Bulvarı üzerinde yer alan ve uluslararası misafirler için oldukça dikkat çekici bir oteldir. Otelin sahibi olan Lewis Yakich, Kaliforniya Üniversitesi'nde malzeme biliminden mezun olduğundan otel için yapılacak olan yenilikte, arkadaşı Audrey Rudenko ile çalışmışlardır. Projenin amacı; bu lüks otel için bir parti evi eklemesi yapılmasıdır (Lewis Grand Hotel teams with Andrey Rudenko to develop world's first 3D printed hotel, planning 3D printed homes, 2015).

Eklemeli üretim teknolojisi kullanılarak üretilmiş ilk ticari işletme olma özelliği gösteren proje için toplamda 130 m² olacak şekilde 2 yatak odası, yaşam alanı ve spa tasarlanıp inşa edilmiştir. Şekil 4.3'te görülen ve spada yer alacak olan jakuzi de bu vinç sistemi ile yazdırılmıştır (Ghaffar, Corker ve Fan, 2018).



Şekil 4.3 3B yazdırma ile yerinde üretilmiş jakuzi (First 3D printed hotel, plans to print thousands of homes in the Philippines next, 2015)

Kum ve bölgede bulunan volkanik küllerden oluşturulmuş beton karışımı bir karıştırıcıya manuel olarak eklenmiştir. Hem parti evinin plan şemasının Şekil 4.4'te görüldüğü gibi süreklilik göstermemesi hem de Şekil 4.5'te görüldüğü gibi sıhhi tesisat, kablolama ve yazdırılan katmanların arasına yerleştirilecek olan inşaat demiri için duraklamalar olmuştur. Bu nedenle; vinç sistemine bağlı yazdırma kolu devamlı olarak çalışmamıştır. Yine de, üretim 100 saat sürmüştür (First 3D printed hotel, plans to print thousands of homes in the Philippines next).



Şekil 4.4 Sürekliliği olmayan plan şeması (First 3D printed hotel, plans to print thousands of homes in the Philippines next, 2015)



Şekil 4.5 Tesisat boruları ve katmanlar arası donatıları gösteren görsel (First 3D printed hotel, plans to print thousands of homes in the Philippines next, 2015)

4.1.3 Floatsam & Jetsam Pavyonları

Tablo 4.3 Flotsam & Jetsam Pavyonları incelemesi (Floatsam & Jetsam, b.t.a)

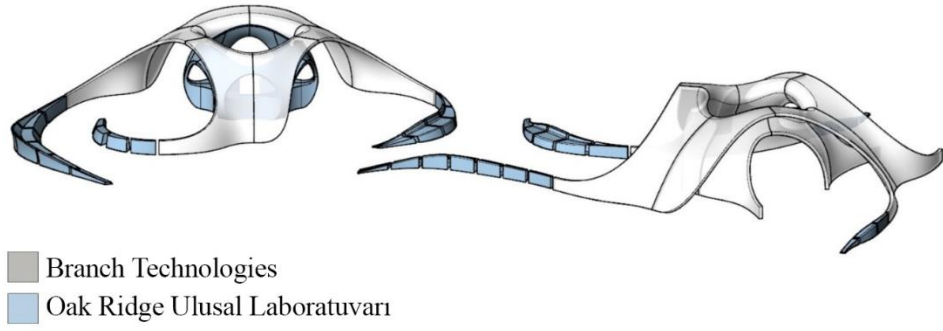
Floatsam & Jetsam Pavyonları		
Mimari	Yıl: 2016 Yer: Miami/ABD Mimar: SHoP Architects Yapım Süresi: 2519 saat Fonksiyon: Kamu Yapısı Maliyet: -	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Amorf Form – 85 m³ Üretim tipi: Robotik kol  Yazıcıların Adı: Branch Technologies yazıcısı Robotik kol tipi: 6-eksenli 	  Malzeme kullanım tipi: Vikoz Ekstrüzyon Yapı Malzemesi: Karbon fiber takviyeli akrilonitril bütadien stiren kompozit plastik

Flotsam & Jetsam adlı iki adet pavyon 2016 Design Miami forumu için Miami’de 2016 yılında SHoP Architects tarafından tasarlanmış, Branch Technologies tarafından üretilmiş ve 2016 tasarım vizyoner ödülü almış Şekil 4.6’da görüldüğü gibi denizanasına benzetilerek inşa edilmiş yapılardır. 55 m³ ve 30 m³ yani toplamda 85 m³’lük hacim kaplayan bu pavyonların en uzun boyutu 14,75 m olarak tasarlanmış ve üretilmiştir (Daas ve Wit, 2018).



Şekil 4.6 Denizanası benzetilerek tasarlanmış pavyon (Floatsam & Jetsam, b.t.b)

Süreç, SHoP Architects’in tasarım fikirleri ürettikten sonra Thornton Tomasetti’nin Core adlı stüdyosunda yapılan sonlu elemanlar analizi ile yapının hem kendini taşıyabilmesi hem de çevresel uyaranlara karşı ayakta kalabilmesi için yapılan analizlerle devam etmiştir. KUKA/Prc ve özel algoritmalar ile tasarım makine koduna dönüştürülüp toplamda 2519 saat sürececek olan baskı süreci başlamıştır. Branch Technologies’in “Hücrel İmalat” adını verdiği, voksel, mozaikleme ve ızgara tasarımı tabanlı süreç modüllerin her biri 3 boyutlu yapısal kafesler şeklinde ve 3 katman derinliğinde üretilmişlerdir. Bu sayede, yapı hem iç gerilmelere dayanabilmekte hem de kasırga gibi doğal afetlerin fazlaca yaşandığı bu bölgede çevresel etkilere dayanabilmektedir (Daas ve Wit, 2018). Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı tarafından ise biyolojik olarak parçalanabilen bambu bazlı ikinci bir baskı teknolojisi sağlandı. Bu baskı yöntemi de Şekil 4.7’de görüldüğü gibi ziyaretçiler için oturma alanı olarak tasarlanmış ve kafes benzeri yapının, zemin ile temas ettiği yerlerde amorf formun devamı şeklinde inşa edilmiştir (Floatsam & Jetsam, b.t.a).



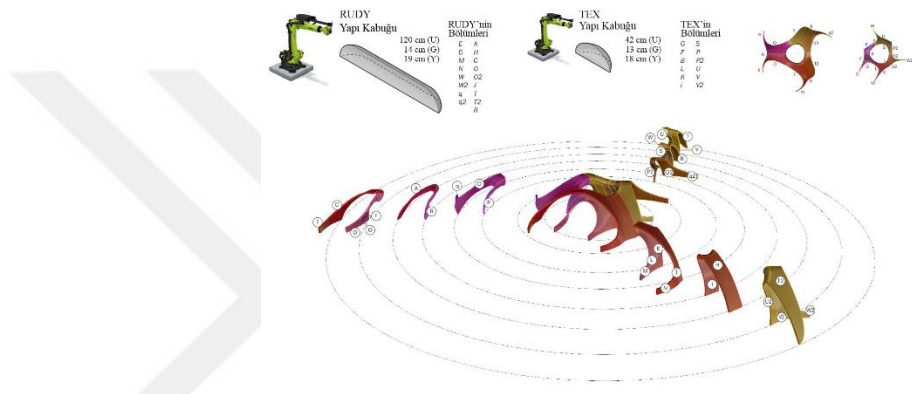
Şekil 4.7 Branch Technologies ve Oak Ridge iş birliğinde üretilmiş pavyonlar (Floatsam & Jetsam, b.t.a)

Karbon fiber güçlendirilmesi yapılmış ABS (siyah harç) plastiği ile fabrikada 45 ayrı modül olarak üretilmiş ve proje alanına daha sonra manuel olarak monte edilmiştir. Tek seferde büyük ölçekli modüller oluşturmak yerine Şekil 4.8’de görülebilen daha küçük boyutlarda parçalardan oluşan modüller üretilmiş böylelikle hem proje alanına taşınması hem de montajı kolaylaştırılmıştır. Ayrıca, küçük parçalarda yapılacak değişiklikler istenilen amorf görüntüyü yakalamaya imkân sağlamıştır. Neredeyse, baskı başlığından çıktıktan hemen sonra donan siyah harç, boyutları 40 mm² ile 65 mm² arasında değişen vokseller ile basılmıştır. Kare ve dikdörtgen formuyla basılan voksellerin arasına sağlamlığı artırmak için çaprazlar atılmıştır. Tek tek basılan voksellerin önceki ve yeni basılmışlarının birbirine bağlantısı ise sıcak bir metal ekstrüder tarafından gerçekleştirilir (Daas ve Wit, 2018).



Şekil 4.8 Küçük parçalar halinde fabrikada basılan yapı parçaları (Floatsam & Jetsam, b.t.a)

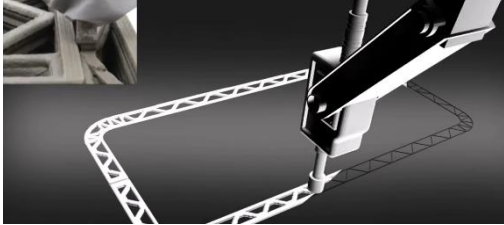
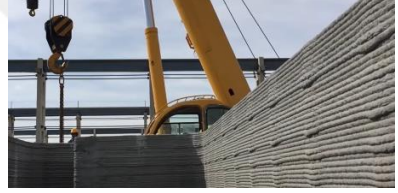
Son olarak parçalar, örnek tablosunda görüldüğü gibi metalik bakır otomotiv boyasıyla boyanmış, zemine sabitlenmiş ve birbirlerine plastik kablo bağı ile manuel olarak bağlanmışlardır. Baskı sırasında, Şekil 4.9’da görülen ikisi Branch Technologies’e ait üç endüstriyel robot aynı anda çalışmış ve bir insan yapılan baskının tutarlılığını denetlemek için orada bulunmuştur. Flotsam & Jetsam pavyonları, eklemeli üretim teknolojilerinin inşaat sektöründe gelişmesi için yeni malzeme ve metodoloji arayışları içerisinde olan örneklerden yalnızca bir tanesidir ve gün geçtikçe bu yöntem ve malzemelere yenilere eklenmektedir (Daas ve Wit, 2018).



Şekil 4.9 Branch Technologies'in yazdırma robotlarının hangi alanlarda görevli olduğunu gösteren görsel (Flotsam & Jetsam, b.t.a)

4.1.4 Dubai Gelecek Vakfı Genel Merkezi

Tablo 4.4 Dubai Gelecek Vakfı incelemesi (Busta, 2016)

Dubai Gelecek Vakfı Genel Merkezi		
Mimari	Yıl: 2016 Yer: Dubai/Birleşik Arap Emirlikleri Mimar: Gensler Yapım Süresi: 19 gün Fonksiyon: Ofis Kompleksi Maliyet: 140.000 \$	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Yuvarlatılmış dikdörtgen – 250 m² Üretim tipi: Robotik kol  Yazıcıların Adı: Winsun Global Yazıcısı Robotik kol tipi: 4-eksenli 	  Malzeme kullanım tipi: Viskoz Ekstrüzyon Yapı Malzemesi: Takviyeli beton + cam elyaf takviyeli alçı + elyaf takviyeli plastik

3B yazıcıların inşaat sektörüne girişi ile inşa edilen yapıların hem formları hem de yapım şekilleri farklılıklar kazanmıştır. Dubai Gelecek Vakfı Genel Merkezi olarak tasarlanan ofis komplekslerinin amacı da teknolojik gelişme, yenilik ve yaratıcılık konusunda yapı sektöründe öncülerden biri olmaktır. Gensler müdürü Richard Hammond yaptığı açıklamada da “Bu, 3B baskının çevre ve kentleşme sorunlarının çözülmesine yardımcı olabileceği bir geleceğin yolunu açıyor ve müşterilerimiz için çok daha kısa sürede özelleştirilmiş alanlar sunmamıza olanak sağlıyor.” şeklinde belirtmektedir. 2016 yılında Gensler adlı şirketin tasarımını, Thornton Tomasetti’nin yapısal mühendisliğini ve Syska Hennessy’nin makine mühendisliğini yaptığı 250 m²’lik ofis kompleksi inşa edilmiştir (Busta, 2016).

Tek katlı ve birden çok binanın inşa edildiği bu komplekste her bina, Şangay’daki WinSun Global’in yaklaşık 6 m yüksekliğinde, 36,6 m uzunluğunda ve 12 m genişliğinde bir 3B yazıcı kullanılarak imal edildikten sonra Dubai’ye gönderilen ve Şekil 4.10’daki gibi bir araya getirilen çoklu beton bileşenlerden oluşur (Busta, 2016).



Şekil 4.10 Dubai’ye gönderilen beton bloklar (Office of the future, b.t.)

Şengay’da üretilen beton bileşenlerin baskısı 17 gün sürerken ve bu beton bileşenlerin Dubai’de yerinde yapılan montajı 2 gün sürmüştür (Artuğ ve Altun, 2019). Montajı ve yapı 140.000 \$ olan ve eklemeli üretim tekniği ile robotik bir kol tarafından basılmış olan parçaların üretim süreci Şekil 4.11’de gösterilmiştir (Office of the future, b.t.).



Şekil 4.11 DGVGM yapım süreci diyagramları (Office of the future, b.t.)

4.1.5 HuaShang Tengda Konağı

Tablo 4.5 HuaShang Teengda Konağı incelemesi (Scott, 2016)

HuaShang Tengda Konağı		
Mimari	Yıl: 2016 Yer: Pekin/Çin Mimar: SHoP Architects Yapım Süresi: 45 gün Fonksiyon: Konut Maliyet: -	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Yerinde yapım Mimari Form ve Alanı: Dairesel ve Dikdörtgen Form – 400 m² Üretim tipi: Vinç  Yazıcıların Adı: HuaShang Tengda yazıcısı Robotun çalışma koordinatı: Kartezyen 	  Malzeme kullanım tipi: Viskoz Ekstrüzyon Yapı Malzemesi: C30 beton

HuaShang Tengda Konağı; Pekin yakınlarında bulunan Tongzhou bölgesinde, 45 günde 400 m² olarak, 3B yazdırma tekniği ile Şekil 4.12’de gösterildiği gibi katman katman, yerinde üretilmiş, iki katlı bir yapıdır. 3B yazdırma tekniği ile üretilmiş diğer yapılardan iki önemli farkı vardır. Birincisi; bu konak, üreticisinin beyanına göre, herhangi bir katkı maddesi eklenmemiş geleneksel C30 betonun yazdırılması ile elde edilmiştir. İnşaat alanına yakın mesafeden tedarik edilebilen çimento sayesinde nakliye maliyeti minimize edilmiş, teslimat için gerekli olan lojistik basitleştirilmiştir. İkinci olarak ise, 250 mm kalınlığında yazdırılmış Şekil 4.12’de görülebilen duvarlara sahip olan bu konağın Richter ölçeğinde 8 büyüklüğünde dahi depreme dayanıklı olmasıdır (Molitch-Hou, 2016).



Şekil 4.12 HuaShang Tengda Konağı 250 mm kalınlığında duvarların basılmasını gösteren görsel (New China Tv, 2016)

Bu yapı, yapısal ve sıhhi tesisat elemanlarının Şekil 4.13’te gösterilmeye çalışıldığı gibi doğrudan 3B baskılı elemanlara entegre edildiği ilk örneklerden olabilir. Yazdırma işleminin başlamasından hemen önce betonarme temel hazırlanmış, üzerine yapı için gerekli olan tüm güçlendirme elemanları ve sıhhi tesisat işlemleri tamamlanmıştır. Toplamda 20 ton C30 beton kullanılan bu yapının inşa edilebilmesi için üretici firmanın bahsettiğine göre 4 farklı sistem kombinasyonu kullanılmıştır. Bunlar; elektronik bileşen formülasyon sistemi, beton karıştırma sistemi, iletim/taşıma sistemi ve 3B baskı sistemidir (Scott, 2016).

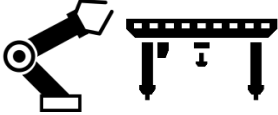


Şekil 4.13 HuaShang Tengda Konağı'nın duvarlarının güçlendirme ve sıhhi tesisat elemanlarını barındırdığını gösteren görsel (New China TV, 2016)

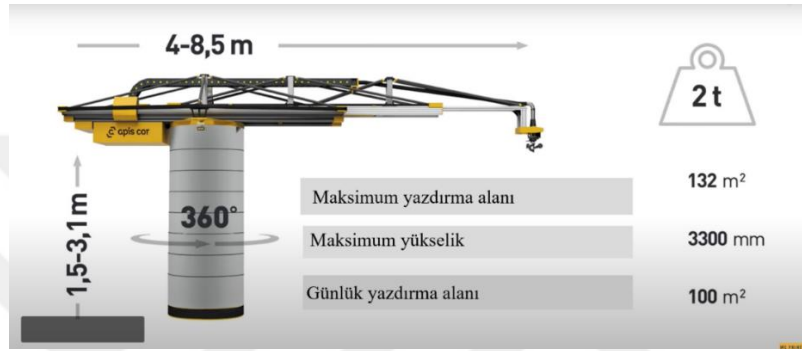
Vinç benzeri bir yazıcı ile inşa edilen yapının pencere ve kapı gibi doğramaları sonradan eklenmiştir. Ayrıca, yazdırma işlemi bittikten sonra konağın boya ve dekorasyon işleri manuel olarak gerçekleştirilmiştir (Molitch-Hou, 2016).

4.1.6 Apis Cor Beton Evi

Tablo 4.6 Apis Cor Beton Evi incelemesi (3D printing a home for under \$10,000, b.t.)

Apis Cor Beton Evi		
Mimari	Yıl: 2016 Yer: Moskova/Rusya Mimar: Apis Cor Yapım Süresi: 24 saat 30 dakika Fonksiyon: Konut Maliyet: \$10,134	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Yerinde yapım Mimari Form ve Alanı: Dairesel form – 38 m² Üretim tipi: Robotik kol- Vinç  Yazıcıların Adı: Apis Cor yazıcısı Robotik kol tipi: Silindirik 	  Malzeme kullanım tipi: Viskoz Ekstrüzyon Yapı Malzemesi: Çimento bazlı karışım

Amerikan 3D baskı şirketi Apis Cor ve Rus emlak geliştiricisi PIK'ın iş birliği ile dünyanın ilk 3B yazdırılmış evi, 24 saatte Apis Cor'un bu amaçla kendi geliştirdiği mobil yazıcı ile basılmıştır. Tüm bina, dış duvarlar ve iç bölücüler dahil tek bir birim olarak inşa edilmiştir. Ayrı ayrı panellerin fabrikada üretilip inşaat alanına taşınması ve orada monte edilmesinin aksine inşaat alanına vinç benzeri bir yapıya sahip olan Şekil 4.14'te görülen mobil 3B yazıcı taşınıp inşa işlemi yerinde gerçekleştirilmiştir (3D printed house by Apis Cor entirely created in one day, b.t.).



Şekil 4.14 Apis Cor 3B mobil yazıcısı (Apis Cor, 2017)

Geleneksel yöntemle üretimde sıkça karşımıza çıkan dikdörtgen biçimde formlar yerine yazıcının mimari esneklik sağladığını göstermek için Şekil 4.15'teki gibi dairesel bir form inşa edilmek istenmiştir. Ev, yaşam alanı, mutfak, banyo ve koridordan oluşmaktadır. Beton karışımın katmanlı olarak oluşturduğu yığma duvarların arasına Tablo 4.6'da gösterildiği gibi yatay cam elyaf çubukları güçlendirme için kullanılmıştır. Ayrıca, Şekil 4.16'da görüldüğü gibi termal izolasyon için duvarların arasına sıvı poliüretan sıkılırken evin diğer kısımları için katı paneller konumlandırılmıştır (3D printed house by Apis Cor entirely created in one day, b.t.).



Şekil 4.15 Apis Cor Beton Evi dairesel plan şemasını gösteren görsel (3D printed house by Apis Cor entirely created in one day, b.t.)



Şekil 4.16 Duvarların arasına termal izolasyon için sıkılan sıvı poliüretan köpük (3D printed house by Apis Cor entirely created in one day, b.t.)

Yazıcının kendisi -35 santigrat dereceye kadar sıcaklıklarda çalışabilse de kullanılan beton karışımı sadece 5 santigrat dereceyi aşan bir sıcaklıkta özelliklerini koruyabilmektedir. Bu nedenle, çevreyi izole etmek ve beton karışımı için daha iyi sıcaklık koşulları sağlamak için inşaat alanının üzerine Şekil 4.17’de görüldüğü gibi çadır konumlandırılmıştır (3D printed house by Apis Cor entirely created in one day, b.t.).



Şekil 4.17 Beton karışımının özelliklerini koruması için gerekli olan sıcaklık seviyelerini sağlayabilmek amacıyla inşaat alanına kurulan çadır (3D printed house by Apis Cor entirely created in one day, b.t.)

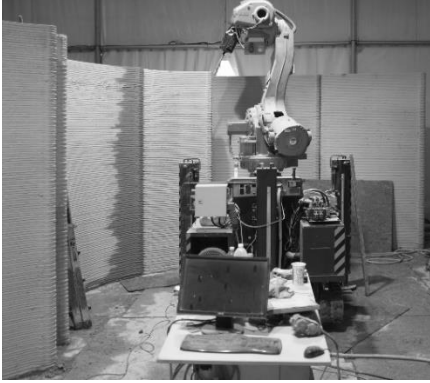
Apis Cor tarafından üretilen 3B baskılı binanın maliyeti 10.134 dolar, yani her metrekare için 275 dolar olarak hesaplanmıştır. Bu maliyet; çatı, yalıtım, pencereler, temel ve iç-dış bitişleri içermektedir. Düz çatı kar yükünü taşıyabilecek şekilde inşa edilmiş ve TechnoNICOL Corporation tarafından sağlanan yalıtım malzemesi ile kaplanmış olup evin pencere ve kapıları baskı işleminden sonra monte edilmiştir (3D printed house by Apis Cor entirely created in one day, b.t.).

Eklemeli yöntem ile üretilmiş ilk ev olarak geçen bu proje için farklı sektörlerden sponsorlar bulunmuştur. Samsung Electronics, evin kavisli iç duvarlarına uygun kavisli Samsung TV yerleştirmiştir. Ayrıca; evin teknolojik ürünlerine sponsor olup mikrodalga fırın, buzdolabı, ocak, bulaşık makinesi ve çamaşır makinesi gibi ürünleri tedarik etmiştir. Soğuk bir iklimde yer alan bu yapının yalıtımı için iki tür yalıtım sağlayan yapı malzemeleri üreticisi olan TechnoNICOL Corporation, evin bir kısmı için sıvı poliüretan bileşimi ve diğer bölümü için ise katı bir malzeme tedarik ederek duvarların arasında kalan boşlukların tamamen doldurulmasını sağlamışlardır. Boya ve dekoratif sıvayı BİTEX Reibeputz, Fabrika Okon ise çift camlı yüksek teknoloji ürünü olan pencereleri bu proje için tedarik etmiştir (Scott, 2017).



4.1.7 3D Housing 05

Tablo 4.7 3D Housing 05 incelemesi (3D Housing 05, b.t.)

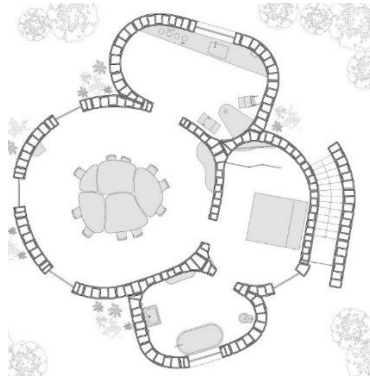
3D Housing 05		
Mimari	Yıl: 2018 Yer: Milano/İtalya Mimar: CLS Architeti Yapım Süresi: 1 hafta Fonksiyon: Konut Maliyet: 1 m² duvar için 1000€	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Yerinde yapım Mimari Form ve Alanı: Dairesel form – 100 m² Üretim tipi: Robotik kol  Yazıcıların Adı: CyBe Construction Robotu Robotik kol tipi: 4-eksenli 	  Malzeme kullanım tipi: Viskoz Ekstrüzyon Yapı Malzemesi: Geri dönüştürülmüş betondan üretilmiş karışım

Gün geçtikçe artan konut ihtiyacına hızlı ve sürdürülebilir bir konut yaklaşımı ile çözüm sunmak için birden çok sektörden şirketin iş birliği ile ortaya çıkan bir araştırmaya projesidir. CLS Architeti'nin tasarlamış olduğu dairesel plan şeması Arup yardımı ile desteklenerek inşa edilebilir bir hale getirilmiş, CyBe Construction tarafından tasarlanmış olan bir robot kol sayesinde Italcementi'nin geliştirdiği malzeme ile de yapı basılmıştır (3D Housig 05, b.t.).



Şekil 4.18 Modüller halinde basılmış duvarların yapının dışından okunabilirliğini gösteren görsel (Jordahn, 2018)

Milano tasarım haftasında sergilenmek için Milano Cesare Beccaria Meydanında yerinde yapım ile inşa edilmiş 100 m²'lik bu konut bünyesinde Şekil 4.19'da görüldüğü gibi mutfak, yatak odası, yaşılan alanı ve banyo içermektedir. Duvarlar, toplamda 35 adet olmak üzere Şekil 4.18'de görülen modüller şeklinde basılmışlardır ve her bir duvarın basımı 60-90 dakika sürmektedir. Eklemeli üretim ile basılan her bir duvar katmanının kurlenmesi ise yaklaşık 5 dakika sürmektedir (Jordahn, 2018).



Şekil 4.19 3D Housing 05 dairesel planı ve mekanları (3D Housig 05, b.t.)

Evin iç tasarımında da 3B baskı dilinden uzaklaşmak istenilmediğinden yine CLS Architeti tarafından tasarlanan Şekil 4.20’de bazı örnekleri görülen lavabo, masa, sehpa gibi el yapımı özel malzemeli ürünlere yer verilmiştir. Çatı, kapı ve pencere gibi yapı elemanları ise yine konuta uygun tasarımlar ile baskı işlemi bittikten sonra monte edilmişlerdir (3D Housig 05, b.t.).



Şekil 4.20 Konutun formuna göre tasarlanmış ürünlerden bazıları (Jordahn, 2018)

Baskı malzemesi olarak; dünyanın en büyük çimento tedarikçilerinden biri olan Italcementi adlı şirket, sürdürülebilir bir inşaat yaklaşımını benimseyip yıkılmış alanlardan yapı kalıntılarının toplanıp geri dönüştürülmesinden sonra çimento bazlı bir karışım elde etmiştir. Harç kıvamına getirilen bu malzemeler CyBe Construction robotu ile basılmış ve kürlenmesi beklenmiştir. Bu malzeme ile basılan yapıların yıkımından sonra ise kalıntılar tekrar geri dönüştürülebilir şekilde tasarlanmıştır (Jordahn, 2018).

CLS Architeti’nin baş mimarı Massimiliano Locatelli 3B baskı yöntemi ile inşa edilecek olan yapıların o dönem koşullarında 1m² duvar için yaklaşık 1000€ civarında bir maliyet gerektirdiğini söylemiştir. Ancak, Locatelli’ye göre teknolojinin gelişmesi ve 3B inşaat teknikleri üzerine yapılan araştırma ve uygulamalar arttıkça m² başına düşen maliyet 200€ gibi sayılara düşebileceğini vurgulamıştır (Jordahn, 2018).

4.1.8 MX3D Yaya Köprüsü

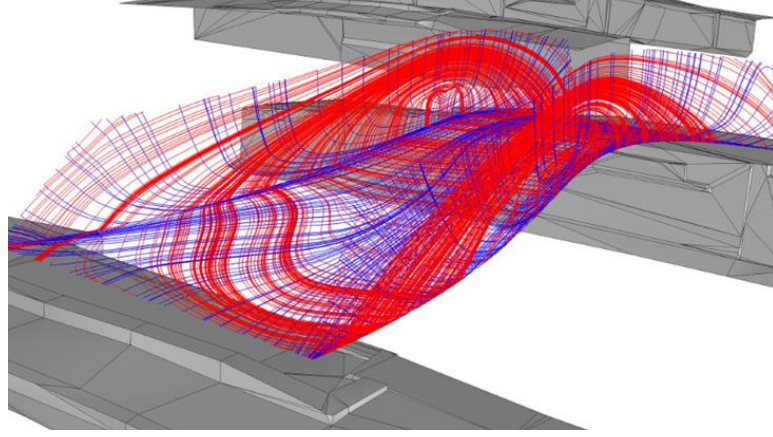
Tablo 4.8 MX3D Yaya Köprüsü incelemesi (MX3D Bridge, 2018)

MX3D Yaya Köprüsü		
Mimari	Yıl: 2018 Yer: Amsterdam/Hollanda Mimar: Joris Laarman Lab Yapım Süresi: 6 ay Fonksiyon: Kamu Yapısı Maliyet: -	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Organik Form – 12,5 m uzunluk, 6,3 m genişlik Üretim tipi: Robotik Kol  Yazıcıların Adı: Wire Arc Welding Machine Robotik kol tipi: 4-eksenli 	 Malzeme kullanım tipi: - Yapı Malzemesi: Paslanmaz Çelik

MX3D 2014 yılında Amsterdam’da, yapıların metal kullanılarak eklemeli üretim tekniği ile inşa edilebilirliğini sağlamak için kurulmuş bir şirkettir. Genel olarak, kaynak makinelerinin 3B yazıcılar şeklinde çalıştırıldığı prensiple üretim yapmaktadırlar. MX3D Köprüsü, tasarımının Joris Laarman Lab tarafından yapılıp baş yapı mühendisliğini Arup ’un yaptığı ve inşaat uzmanlığının Heijmans tarafından yapıldığı ortak bir çalışmadır. Bu köprü için metalürjik uzmanlık görüşleri ArcelorMittal’dan, dijital üretim araçları hakkında bilgi Autodesk’ten, hesaplama donanımı Lenova’dan, robotik uzmanlık bilgileri ABB’dan, kaynak hakkında bilgiler Air Liquide & Oerlikon’dan ve AMS Enstitüsü ve TU Delft araştırmalarını yaparken ortamdaki hava kalitesinin optimumda kalabilmesini sağlayabilmek adına Plymovent’dan destekler alınmıştır (MX3D Bridge, 2018). Ayrıca, 2018 yılında tasarım araştırması dalında Dutch Design Award 2018 ödülünü alan köprü, 2018 yılında Eindhoven’daki Dutch Design Week (DDW)’de tanıtılmıştır (MX3D Bridge, 2019).

Amsterdam’ın merkezinde yer alan kanallardan biri olan Oudezijds Achterburgwal’dan yayaların geçişi için tasarlanmış olan köprünün, 2017’de başlayan projelendirme ve mühendislik hesapları 18 ay sürmüştür. Bu süreçte, robot kolun programlanması, bağış toplanması ve deneme baskısı yapılmıştır (MX3D Bridge, 2019). 12,5 metre uzunluğunda ve 6,3 metre genişliğindeki bu köprü, Tablo 4.8’de bir tanesi görülen 4 adet robot kol tarafından toplamda 6 ay süren baskı süresinde inşa edilmiştir. Toplamda 4,500 kg paslanmaz çeliğin ve 1100 km telin kullanıldığı bu proje, bir sonraki üretimler için örnek niteliğindedir. Bu nedenle, maddi bir endişe taşımamaktadır (MX3D, 2018).

Tasarımını Joris Laarman Lab’ın yaptığı köprüde minimum malzeme kullanımı ile maksimum güvenlik sağlanmak istenildiğinden Grasshoper ve Karamba programları ile Şekil 4.21’de görüldüğü gibi optimize edilmiştir. Böylece, formda daha özgür tasarımlar elde edilebilirken atık ve malzeme kullanımında azalmalar olmaktadır (About MX3D, 2018).



Şekil 4.21 MX3D Köprüsünün üretimi için dijital ortamda optimize edilme çalışmalarını gösteren görsel (MX3D Bridge, 2018)

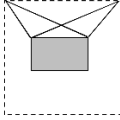
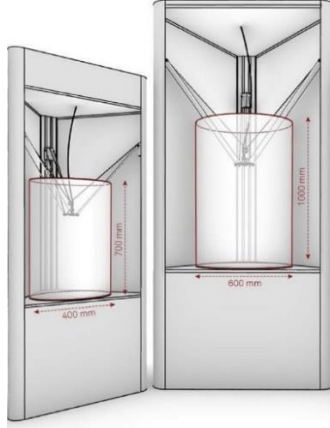
Köprünün ikizi yük ve sağlamlık testinin dijital ortamda da gözlemlenebilir olması için dijital ortamda modellenmiştir (MX3D, 2018). Baskı işlemlerinden sonra ise Şekil 4.22’de de görüldüğü gibi 20 tonluk yük ile denemeler yapılmış ve başarılı olunmuştur (MX3D Bridge, 2018).



Şekil 4.22 Baskı işlemi biten köprünün yük taşıma kapasitesinin test edilmesini gösteren görsel (MX3D Bridge, 2018)

4.1.9 Trabeculae Pavyonu

Tablo 4.9 Trabeculae Pavyonu incelemesi (Naboni, Breseghello ve Kunic, 2019)

Trabeculae Pavyonu		
Mimari	Yıl: 2018 Yer: Milano/İtalya Mimar: Roberto Naboni, Anja Kunić, Luca Breseghello Yapım Süresi: 4352 saat Fonksiyon: Kamu Yapısı	
	Üretim Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Çift eğrilikli yüzey– 36 m² Üretim tipi: Kablo destekli sistem  Yazıcıların Adı: DeltaWASP 4070, DeltaWASP 60100 Robot çalışma koordinatı: Delta 	Malzeme   Malzeme kullanım tipi: Eritilmiş filament ile Üretim Yapı Malzemesi: Biyopolimer

Trabeculae Pavyonu'nun yapılış amacı; CO2 emisyonu ve sera gazı üretimi gibi çevreye zararlı olan moleküllerin çoğunun, direkt veya dolaylı olarak bina üretiminden kaynaklanması üzerine, malzeme kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanımı için 3B baskı yoluyla üretilen yük dayanımlı mimari bir konsepti tanıtmaktır. Kemik yapısından ilham alınarak, hafif konstrüksiyon olarak tasarım yapılmıştır. Yapısal sürdürülebilirlik, montaj ve bakım kolaylığı, farklı bir tasarıma dönüştürülebilirlik gibi olanaklar sağlayacağı düşünüldüğünden pavyon, bileşen tabanlı olarak Şekil 4.23'te görüldüğü gibi çift eğrilikli yüzey şeklinde geliştirilmiştir (Naboni ve diğer., 2019).



Şekil 4.23 Çift eğrilikli olarak tasarlanan Trabeculae Pavyonu (Moretti, 2018)

Eklemeli üretim tekniği ile benzersiz bu yüzeyin üretimi, hücresel yapılara dayalı olarak çoklu optimizasyon hesaplamalarına göre yapılmıştır. Kafes yapıların otomatik olarak tasarlanması için özel algoritmaların yazılması ve minimal yüzey oluşturmak için gereken bir dizi parametrenin kombinasyonu sonucu tasarım ortaya çıkmıştır. Bu yöntemin amacı, biçim ve kendi ağırlığını taşıyabilme koşullarında potansiyel olarak sonsuz varyasyonlara uygulanabilen, malzeme açısından verimli bir yapı için çok yönlü bir yaklaşım oluşturabilmektir (Nabonia ve diğer., 2019).

Eklemeli üretim teknolojilerinin kullanıldığı inşaatlarda kullanılan robotların genellikle kartezyen koordinat sisteminde çalışmasının aksine bu projede delta yazıcılar tercih edilmiştir. Çünkü, delta yazıcılar kesintili geometriler basılması durumunda kartezyenlere göre daha yüksek ivmelenmelere sahiptirler. Şekil 4.24'te gösterildiği gibi, 4 adet 400x700 mm ve 1 adet 600x1000 mm olarak iki farklı boyuta

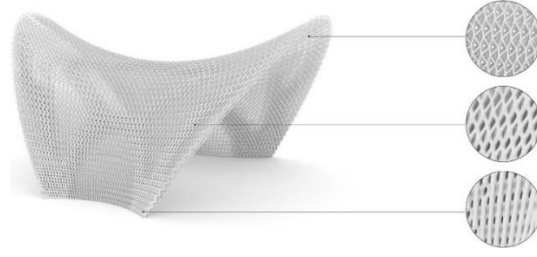
sahip olan delta yazıcılar; silindirik baskı hacimlerine sahiptirler. Tek bir ekstrüzyonda; 1,2 ve 1,6 mm arasında katman kalınlıklarında baskı yapabilen yazıcılar, filament bazlı üretim yaparlar (Nabonia ve diğer., 2019).



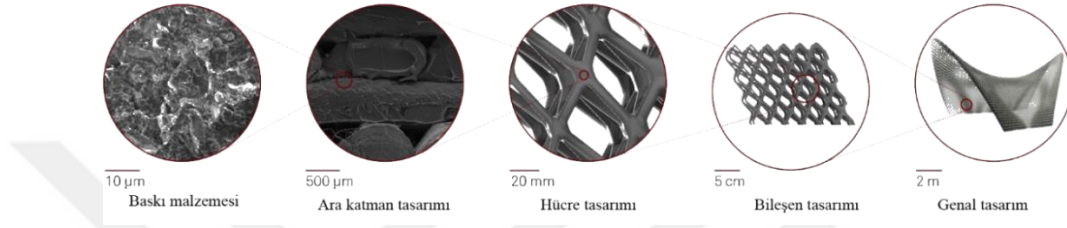
Şekil 4.24 Trabeculae Pavyonunun bileşenlerini basan 5 adet yazıcı (Moretti, 2018)

FILOALHA adlı İtalyan şirket tarafından özel olarak geliştirilen biyopolimer bazlı malzeme filamentler ile üretilmiştir. Optimum mekanik direnç, termal davranış ve düzgün basılabilirlik açısından birçok testler yapıldıktan sonra son ürüne uygulanacak malzemeye karar verilmiştir. Malzemenin; 20°, 50° ve 80°C’de olan davranışları ölçülmüş, bileşenlere farklı açılardan gelebilecek olan kuvvetlere karşı anizotropik testleri yapılmış ve gerekli görülen noktalarda dikey destekler tasarlanmıştır (Nabonia ve diğer., 2019).

Oktahedron hücreler, baskı için en uygun birimler olarak karar verilmiştir. Her bileşen ise düzlemsel bir temel üzerine inşa edilmiştir. Şekil 4.25’te gösterildiği gibi bileşenlerin formları, tabana yakın yerlerde çok daha kompakt ve kısa iken, üstlere doğru gidildikçe bileşenler büyür. Bileşenlerin sayılarının ve boyutlarının farklılaşması; kafes konfigürasyonlarını, hücre boyut aralıklarını ve hücre eğim açılarını etkilemektedir. Dolayısıyla, kafes yoğunluklarının değişkenlikleri ışık geçirgenlikleri ile ters orantılı olarak değişmektedir. Yapı için kullanılan malzemenin yakınlştırılmış görüntüsünden, yapının genel formuna kadar olan tasarımlar Şekil 4.26’da gösterilmiştir (Nabonia ve diğer., 2019).

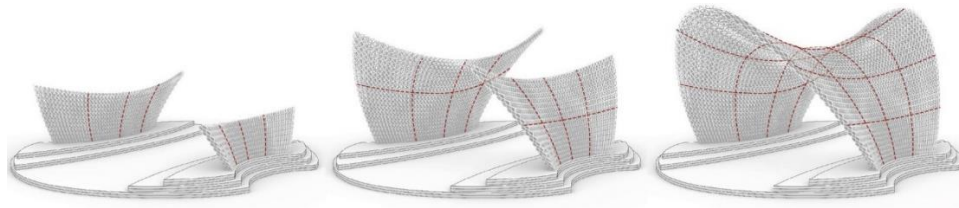


Şekil 4.25 Trabeculae Pavyonunda kullanılan bileşenlerin tabandan tavana değişimini gösteren görsel (Nabonia ve diğer., 2019)



Şekil 4.26 Baskı malzemesinden yapının genel görünümüne kadar olan tasarım sürecini gösteren diagramatik çizimler (Nabonia ve diğer., 2019)

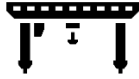
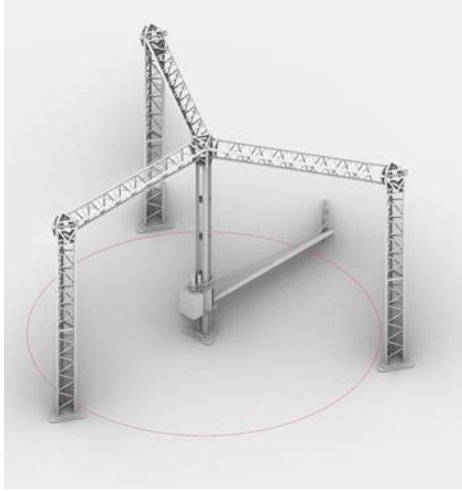
Toplamda 352 adet basılmış bileşen, 24 farklı tipte, 5 adet delta yazıcı ile günde yaklaşık 7 bileşen olmak üzere basılmıştır. Ortalama 60 mm/s (0,06 m/s) ekstrüzyon hızında toplam 112 km uzunluğunda yüksek dirençli biyopolimer ekstrüzyonu yapılmıştır. Fabrikada baskısı tamamlanan bileşenlerin montajı, taban elemanlarının ahşap bir zemine ankrılanması, Şekil 4.27’de gösterildiği gibi iki yan duvarların montajı ve bu iki yan duvara yaslanan eyerin yerleştirilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir (Nabonia ve diğer., 2019).



Şekil 4.27 Yerinde montaj aşamalarını gösteren görsel (Nabonia ve diğer., 2019)

4.1.10 Gaia Evi

Tablo 4.10 Gaia Evi incelemesi (Chiusoli, 2018)

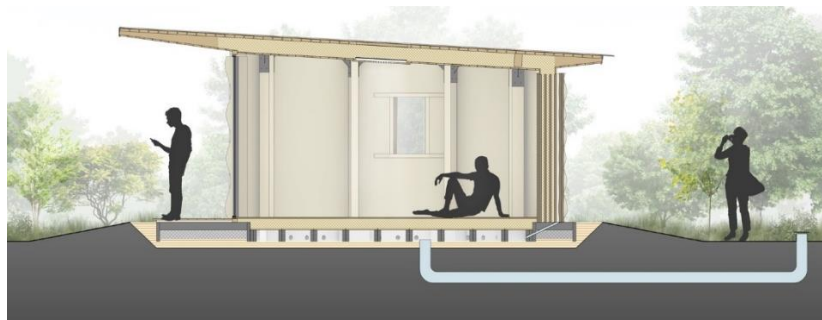
Gaia Evi		
Mimari	Yıl: 2018 Yer: Ravenna/İtalya Mimar: - Yapım Süresi: 10 gün Fonksiyon: Konut Maliyet: 900 €	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Yerinde yapım Mimari Form ve Alanı: Dairesel form- 20 m² Üretim tipi: Vinç  Yazıcıların Adı: Crane WASP Robot çalışma koordinatı: Delta 	  Malzeme kullanım tipi: Viskoz ekstrüzyon Yapı Malzemesi: Toprak, kireç, saman, pirinç kabuğu

Gaia Evi; sürdürülebilir mimarlık anlayışıyla neredeyse sıfır çevresel etkiye sahip düşük maliyetli konut inşa edilebilirliğinin bir örneği niteliğindedir. Toprak ile 3B baskı yöntemiyle basılmış ilk ev olarak da bilinmektedir. İtalya’da WASP tarafından geliştirilen bir yazıcı ile basılan ev, 2018 yılının Ekim ayında yerinde yapım teknoloji Şekil 4.28’de gösterildiği gibi viskoz bir malzemenin üst üste eklemeli üretimi ile basılması ve kürlenmesi sonucu oluşan duvarların hem taşıyıcı hem de örtme görevlerini yapmaları sonucu ortaya çıkmıştır (Chiusoli, 2018).



Şekil 4.28 Gaia Evi yapım süreci (Chiusoli, 2018)

RiceHouse’un da tasarım katkılarıyla üretilen ev, güneşten pasif olarak yararlanabilmek adına Güney-Batı yönelimli büyük pencereye sahiptir. Ayrıca, Şekil 4.29’da görüldüğü gibi hem doğal havalandırma için pencere ve kapı gibi yapı elemanlarının haricinde hem de mekânın soğutmasına katkıda bulunması amacıyla dışarıdaki temiz hava alınıp evin altından bir boru yardımı ile geçirdikten sonra eve veren bir sistem kurgulanmıştır (Chiusoli, 2018).



Şekil 4.29 Gaia Evinin havalandırma temelini gösteren kesiti (Chiusoli, 2018)

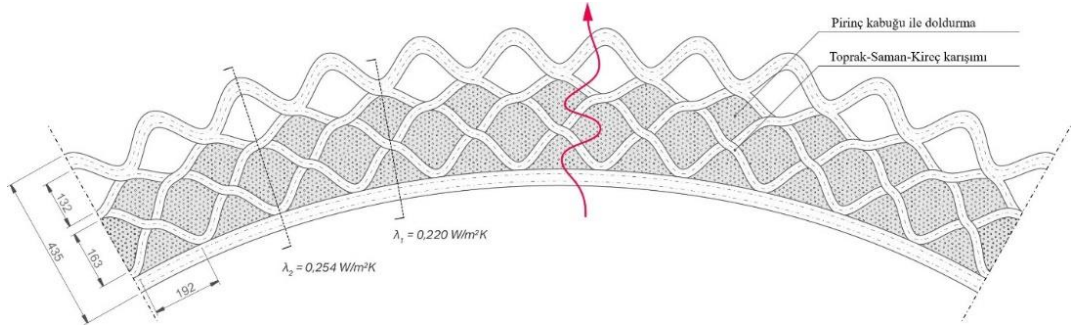
6,6 m çapında ve 3 metre yüksekliğinde baskı alanına sahip modüllerden oluşan elik ve alüminyumdan üretilmiş vinç benzeri sistemler, altıgen plan şeması içerisinde istenilen sayıda genişletilebilecek şekilde kurulmasının ardından baskı işlemi yapılabilmektedir. Bu ev için ise şekil 4.30’da gösterilmeye çalışıldığı gibi 3B yazıcı, üç adet altıgenin birleşimden oluşan akslar üzerinde hareket edebilen bir kola bağlanarak dairesel bir form elde edilmeye çalışılmıştır (Chiusoli, 2018).



şekil 4.30 üç adet altıgenin keşişim yolunda hareket eden baskı kolu (Chiusoli, 2018)

şekil 4.29’da görülen evin temeli, imento bazlı malzeme ile geleneksel yapım yöntemleri kullanılarak kalıplar yardımıyla inşa edilmiştir. Ancak evin monolitik olarak çalışan duvarı tek seferde eklemeli üretim yöntemi ile inşa edilmiştir. Bu monolitik duvar, %25 araziden alınan toprak (%30 kireç, %40 silt ve %30 kum), %10 kireç, %40 saman ve %25 pirinç kabuğu gibi doğal malzemelerin homojen bir şekilde karıştırılıp viskoz halde basılması ile oluşmuştur (Chiusoli, 2018).

Bu ev; 20m²’lik dairesel bir plan şeması ile 3,3 m yarıçapa sahip 3 m yüksekliğe sahiptir. Grasshopper programında yapılan modellemeden sonra plan düzleminde dalgalı basım örüntüsü ile 40 cm’lik duvar kalınlıkları tercih edilmiş ve şekil 4.31’de gösterildiği gibi ısı iletkenlik katsayıları ile termal konfora katkıda bulunmak açısından bu dalga örüntülü duvarın arasına pirinç kabukları dökülmüştür. Toplamda 30 m² duvarın basımı 10 gün sürmüş olup kullanılan malzemeler ile maliyet 900 € olarak hesaplanmıştır. Ahşap pencere ve kapı gibi doğramalar eklemeli üretim süreçlerinin parçaları değillerdir bu nedenle yapının basım işleminde hemen sonra montaj edilmişlerdir (Chiusoli, 2018).

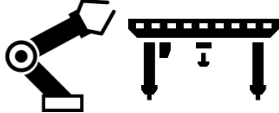
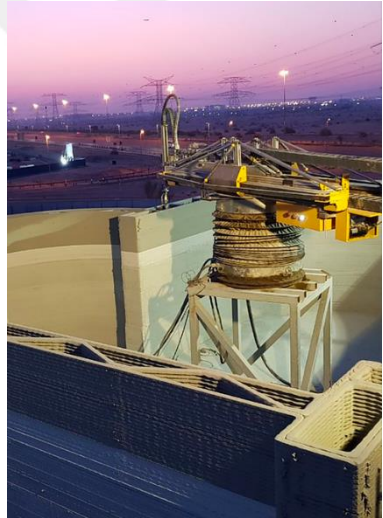


Şekil 4.31 Gaia Evi kısmi duvar planı (Chiusoli, 2018)



4.1.11 Dubai Belediye Binası

Tablo 4.11 Dubai Belediye Binası incelemesi (Dubai Project, 2019)

Dubai Belediye Binası		
Mimari	Yıl: 2019 Yer: Dubai/Birleşik Arap Emirlikleri Mimar: - Yapım Süresi: - Fonksiyon: Kamu Binası Maliyet: -	
Teknik	Üretim Yapım Şekli: Yerinde yapım Mimari Form ve Alanı: Çember parçalarından oluşturulmuş geometrik form- 640 m² Üretim tipi: Robotik kol - Vinç  Yazıcıların Adı: Apis Cor yazıcısı Robotik kol tipi: Silindirik 	Malzeme   Malzeme kullanım tipi: Viskoz Ekstrüzyon Yapı Malzemesi: Çimento ve alçı bazlı karışımı

Dubai Belediye Binası, 2019 yılının Ekim ayında tamamlanmış Apis Cor adlı şirket tarafından geliştirilen robotik kol yardımıyla eklemeli üretim tekniği ile basılmış bir yapıdır. 9,5 m yüksekliğe sahip 2 katlı olan bu yapının inşası yerinde yapım ile gerçekleştirilmiştir. Döneminde dünyanın en büyük 3B baskı ile üretilmiş yapısı olarak geçen bu yapının formu ise Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te de görüldüğü gibi farklı geometrik formların bir araya gelmesinden oluşturulmuştur. Yapının toplam alanı 640 m²'dir ve bu alan Apis Cor 3B yazıcısı sabitken yazdırılabilecek olandan daha büyüktür. Bu nedenle, zaten mobil olan bu robotik kol bir vinç yardımıyla şantiye çevresinde gezdirilmiştir (Dubai Project, 2019).



Şekil 4.32 Dubai Belediye Binasının dış görünümü (Dubai Project, 2019)



Şekil 4.33 Dubai Belediye Binasının yapım aşamasında üstten görünümü (Dubai Project, 2019)

Dubai sıcaklık ve nem yönünden oldukça zorlu koşullara sahip olmasına rağmen tüm süreç açık bir alanda gerçekleştirilmiştir. Çünkü, bu yapı için özel olarak çimento ve alçıdan oluşan yerli üretim bir malzeme geliştirilmiştir. Tablo 4.11'de gösterildiği gibi baskı sırasında gri renkte olan bu harç kurudukça beyaz renge dönüşmektedir.

Yapının temeli, çatısı, kapı – pencereleri ve izolasyonu Apis Cor dışında genel yükleniciler tarafından konvansiyonel olarak yapılmıştır. Yapının döşemeleri ise yapının özel formundan dolayı prefabrik olarak üretilmiş ve sahada konumlandırılmışlardır. 3B yazdırma tekniğiyle üretilmiş olan duvarların arasına, statik hesaplamalara göre Şekil 3.34’te görüldüğü gibi inşaat demiri ve beton manuel olarak doldurularak yapının güçlendirilmesi yapılmıştır (Dubai Project, 2019).



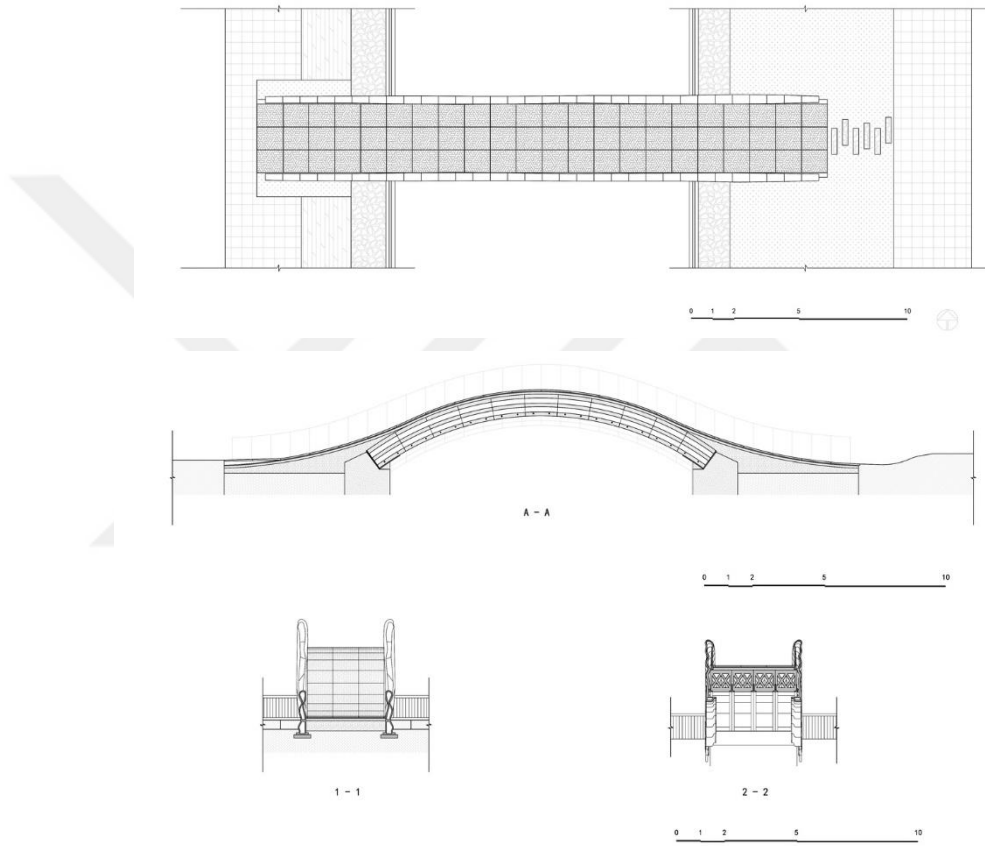
Şekil 4.34 3B yazdırma yöntemi ile inşa edilmiş duvar içlerinde bırakılan boşluklara manuel olarak eklenen güçlendirmeler (Dubai Project, 2019).

4.1.12 Boashan Yaya Köprüsü

Tablo 4.12 Boashan Yaya Köprüsü incelemesi (Xu, Gao, Sun ve Wang, 2020)

Boashan Yaya Köprüsü		
Mimari	Yıl: 2019 Yer: Şangay/Çin Mimar: Prof. Xu Weiguo Yapım Süresi: 450 saat Fonksiyon: Kamu Yapısı Maliyet: -	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Dairesel kemer- 14,4 x 3,6 m Üretim tipi: Robotik kol  Yazıcıların Adı: KUKA Robotik kol tipi: 4-eksenli 	  Malzeme kullanım tipi: Viskoz Ekstrüzyon Yapı Malzemesi: Elyaf takviyeli beton

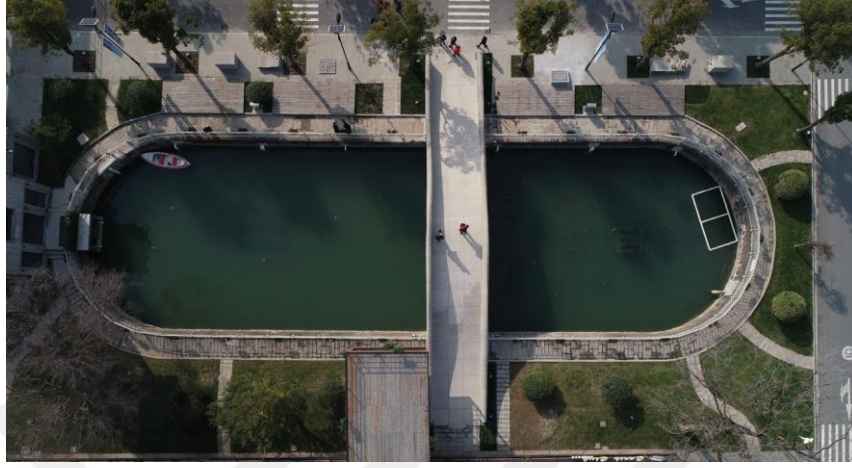
Proje, Şangay Wisdom Bay Yatırım Yönetimi Şirketi ile, Tsinghua Üniversitesi mimarlık bölümünden Profesör Xu Weiguo'nun liderliğindeki bir ekip tarafından tasarlandı ve üretildi (Barandy, 2019). Şematik plan ve kesit görünüşleri Şekil 4.35'te verilen kemerli yaya köprüsü; yapısal birimler, korkuluklar ve dekoratif döşeme panelleri dahil olmak üzere 3B yazdırma tekniği ile üretilmiş beton bileşenler kullanılarak inşa edilmiştir (Xu ve diğer., 2020).



Şekil 4.35 Şematik plan ve kesitler (Walsh, 2019)

Köprü, yayaların kullanımına uygun bir şekilde Şangay'daki Boashan bölgesinde yer alan Şekil 4.36'da görülen 14,4 metrelik genişliğe sahip olan bir havuzun üzerine inşa edilmiştir. Köprüde kullanılan kemerin tipolojisi; yerel tipolojiye uygun olarak tasarlanmış, köprü eğimi %8'den az olarak yaya konforuna uygun, kullanılan malzeme performans verileri dikkate alınarak, korkuluklar ve döşeme tasarımları dahil ölü yük hesaplamaları yapılarak ve köprünün genişliği çevredeki yollara göre belirlenerek ortaya çıkarılmıştır. Genel tasarım görünümü, dairesel bir kemer yapısı olarak

belirlenmiş, yükseklik 2,17 m, açıklık 14,47 m, genişlik 3,6 m ve kalınlık 0,9 m olarak inşa edilmiştir (Xu ve diğer., 2020).



Şekil 4.36 14,4 m açıklığa sahip olan havuzun üzerine konumlandırılan Boashan Yaya Köprüsü (Xu ve diğer., 2020)

Bu projede hem yapısal hem de basılabilirlik için özel olarak elyaf takviyeli bir beton bileşimi geliştirilmiştir. Sülfo-alüminli çimento, 0,2-0,4 mm ve 0,4-0,7 mm partikül çaplarına sahip kum, polivinil alkol, su ve geciktirici, kıvamlaştırıcı, su uzaklaştırıcı ve erken kürlenmeyi sağlayan katkı maddeleri kullanılarak bu projenin malzemesi geliştirilmiştir. Betonun basılabilirliğini sağlamak için daha önce bahsedilmiş olan iki temel özelliğe bakılmıştır. Bunlardan biri; ekstrüde edilebilirlik yani malzemenin bir 3B baskı sisteminin lülesinden çıkabilirliği, diğeri ise inşa edilebilirlik yani basılı harcın dağılmadan tabakalaşma gücünü ifade eder (Xu ve diğer., 2020).

Grasshopper ve Midas yazımları kullanılarak kemerin ve voussoirlerinin tasarımı optimize edilmiştir. Stres analizine dayalı olarak, voussoir bölümlerinin bloklarının kesitleri malzeme optimizasyonu için boşluklu tasarlanmıştır. Köprüde kullanılacak olan voussoirlerin Şekil 4.37’de gösterilen kafes yapısı, malzeme miktarını azaltırken mukavemeti korur ve baskı süresinden tasarruf sağlanmış olur (Xu ve diğer., 2020).



Şekil 4.37 Voussoirlerin kafesli olarak boşluklu baskısı (Xu ve diğer., 2020).

Projenin baskı donanımı; beton harcı taşımak için bir beton harç karıştırıcı ve bir pompa, baskı programını yürütmek için altı eksenli robotik kol ve ekstrüzyon başlığı dahil olmak üzere 4 ana elemana sahiptir. Baskı sisteminde kullanılan ekipmana ait kontrol sinyalinin çoğu açık kaynaklı platformlar aracılığıyla baskı platformuna entegre edilmiş olsa da baskı sırasında bir miktar el emeği gerekmektedir. Bu, çimento ve kuru harcın karıştırılmasını ve beton harcın karıştırıcıdan pompaya taşınmasını içeriyor. Ancak; bu adımlar, ekipmanın yeniden tasarlanması ve bu adımların donanıma entegre edilmesiyle otomatikleştirilebilir, böylece işçilik maliyeti daha da azaltılabilir (Xu ve diğer., 2020).

44 adet voussoir, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’de görülen 68 adet tırbazan bileşeni ve 64 adet desenli döşeme paneli, iki adet KUKA robotik koluyla 200 saatte tüm voussoirler ve 250 saatte diğer tüm bileşenler olarak basım işlemi yapılmıştır. Bileşenler, baskı işlemi tamamlandıktan sonra montaj edilecek bölgeye taşınmış ve vinçler yardımıyla montaj edilmişlerdir. Voussoirlerin montajı için geçici olarak kullanılan ve kendi kendini destekleyen önceden köprü ayaklarının üstüne inşa edilmiş Şekil 4.40’ta görülen 5 adet çelik kemer yerleştirildikten sonra yerleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir (Xu ve diğer., 2020).



Şekil 4.38 Tırabzan bileşeninin basımı (Xu ve diğer., 2020)

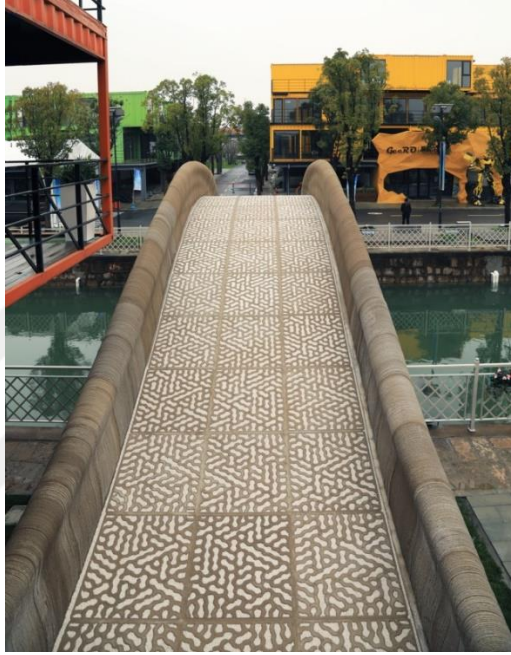


Şekil 4.39 Döşeme bileşenlerinin basımı (Walsh, 2019)



Şekil 4.40 Köprü bileşenlerinin montajı için geçici olarak yerleştirilmiş çelik kemer destekleri (Yuan, 2019)

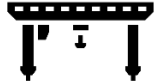
Xu ve arkadaşlarına göre; Şekil 4.41’de gösterilen son ürünün yani Boashan Yaya Köprüsünün maliyeti, geleneksel bir şekilde inşa edilen benzer bir boyutta beton köprü ile karşılaştırıldığında, $2/3$ ’ü kadarına denk gelmektedir. Bu fark, köprünün bileşenlerinin basılması ve montajı sırasında voussoirlerin kafes şeklinde basılması ile oluşan malzeme tasarrufuna ve güçlendirme çubuklarının kullanılmamasına bağlanmaktadır (Xu ve diğer., 2020).



Şekil 4.41 Boashan Yaya Köprüsünün montaj sonrası hali (Walsh, 2019)

4.1.13 TECLA

Tablo 4.13 TECLA incelemesi (Chiusoli, 2021)

TECLA		
Mimari	Yıl: 2021 Yer: Ravenna/İtalya Mimar: MCA- Mario Cucinella Architects Yapım Süresi: 200 saat Fonksiyon: Konut	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Yerinde yapım Mimari Form ve Alanı: Yarım küre-100 m² Üretim tipi: Vinç  Yazıcıların Adı: Crane WASP Robotun çalıştığı koordinat: Silindirik 	 Yapı Malzemesi: Toprak

WASP'ın üzerinde çalıştığı projelerden bir tanesi de TECLA adını verdikleri dairesel konut modelidir. Proje adı; Teknoloji ve Kil (Technology and Clay) kelimelerinin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. WASP'ın amaçları arasında olan sürdürülebilir yapılar inşa etmek ve bu yapıların herkes tarafından karşılanabilir maliyetlerde olması bu projelerinde de çıkış noktası olmuştur.

Doğal malzemelere dayalı olarak üretilen yapının formu ise arı kovanlarından ilham alınarak Grasshopper'da tasarlanmıştır. Eklemeli üretimde, Şekil 4.42'de görüldüğü gibi iş birlikçi yazıcılar kullanılarak inşa edilen ilk eko-habitat olan TECLA, insan ve enerji kaynaklarının kullanımını en aza indirerek binalar oluşturulabileceğinin de bir göstergesi şeklindedir. Robotların lülelerinden ekstrüde edilen viskoz malzemenin kalınlığı 12 mm olup toplamda bu proje için 350 katman üretilmiştir. Şekil 4.43'te gösterilen WASP tarafından üretilen Crane WASP adlı 2 adet robot ile ham topraktan üretilen yapının destek yapısının inşası tamamlanmış ancak bitirişler ve yapının sunumu 2021 bahar döneminde gerçekleştirilecektir (Chiusoli, 2021).



Şekil 4.42 Crane WASP robotlarının birlikte çalışması (Chiusoli, 2021)



Şekil 4.43 Silindirik koordinatta çalışan ve dairesel formlar oluşturan Crane WASP robotları (Chiusoli, 2021)

Crane WASP adlı robotlar; proje ihtiyaçlarına göre yeniden yapılandırılabilir şekilde 7000 makine kodu (G kodu)'dan oluşmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.42'de görüldüğü gibi dairesel formlar oluşturan bu robotların çalışma şekilleri silindirik koordinat üzerindedir. 50 m²'lik baskı alanına sahip olan her bir yazıcının ulaşabileceği maksimum yükseklik 3m'dir. Böylece, bu robotlar sayesinde herhangi bir şekle sahip bağımsız yaşam modüllerini üretmek sadece birkaç gün sürmektedir. Hareketlerin optimize edildiği, çarpışmaların önlendiği ve eş zamanlı olarak çalışabilmeyi sağlayan robotların yazılımları sayesinde iki baskı kolu da senkronize şekilde çalışabilmektedir (Chiusoli, 2021).

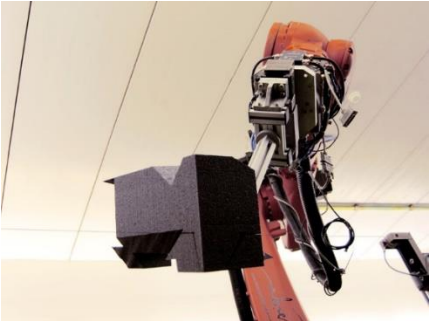
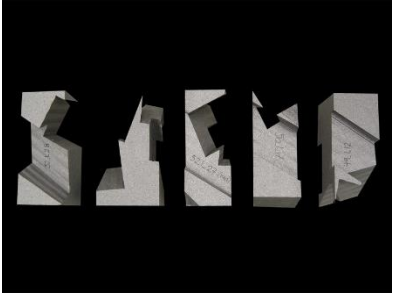


4.2 Çıkarmalı Üretim Tekniği ile İnşa Edilmiş Yapılar

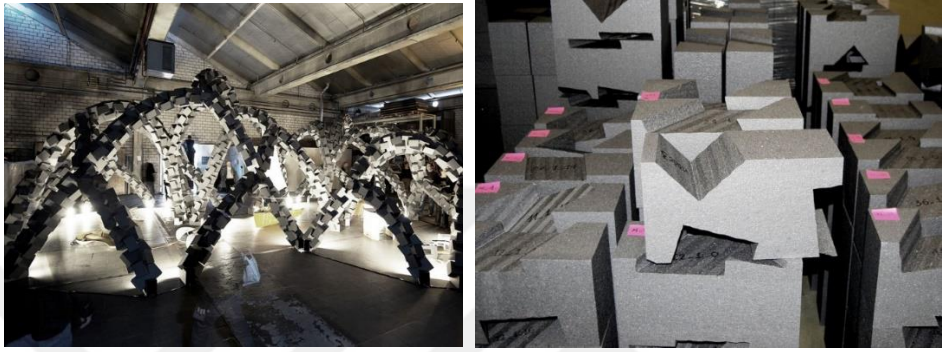
Çıkarmalı üretim tekniği ile inşa edilmiş 2 adet örnek aşağıda verilmiştir.

4.2.1 Zincir Eğrisi Pavyonu

Tablo 4.14 Zincir Eğrisi Pavyonu incelemesi (The Catenary Pavilion, b.t.)

Zincir Eğrisi Pavyonu		
Mimari	Yıl: 2010 Yer: Langental, İsviçre Mimar: Gramazio & Kohler Yapım Süresi: - Fonksiyon: Kamu Yapısı	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Zincir eğrisi – Üretim tipi: Robotik kol  Robotik kol tipi: 6-eksenli 	 Yapı Malzemesi: Polistiren köpük

Gramazio & Kohler Research ve ETH Z r h ortaklığında üretilen örneklerden bir tanesi  ekil 4.44'te görülen zincir eğrisi pavyonudur. Öğrencilerin ürettikleri prototiplerin sergilenebilece i bir alan yaratmak için somut bir sergi alanı oluşturma amacıyla yola  ıkılmı  bir projedir. Tasarımın yapısal konsepti ilk olarak Barselona'da 2010 yılında Akıllı Geometri konferansında gerçekleştirilen bir atölye çalışması sırasında gerçekleştirilmiştir (The Catenary Pavilion, b.t.).



Şekil 4.44 Zincir Eğrisi Pavyonu ve birbirinden farklı üretilmiş polistiren modüller (The Catenary Pavilion, b.t.)

Zincir eğrilerinden oluşturulmuş bir a  yapısı, tasarımda tercih edilmiştir. A  yapısının geometrisi, yapının kendi a ırlı ını taşıyabilecek durumda simüle edilmiştir. Şekil 4.44'te g r ld  u gibi birbirinden farklı modüllerin yapısal olarak birbirine kenetlenmesi yapının stabilitesini desteklerken herhangi bir ek teknik destek olmadan ayakta durmasını sa lar (The Catenary Pavilion, b.t.).

Toplamda 1022 adet polistiren köpükten oluşturulmuş bu a  yapısı, polistiren modüllerin kemerler boyunca spiral şeklinde döndürülerek monte edilmesi ile oluşturulmuştur. Her bir polistiren modül, bir endüstriyel robot ve bir sıcak tel makinesi ile standart olmayan bir imalat sürecinde ayrı ayrı kesilir. Kesilen modüllerin montajı ise manuel olarak gerçekleştirilir (The Catenary Pavilion, b.t.).

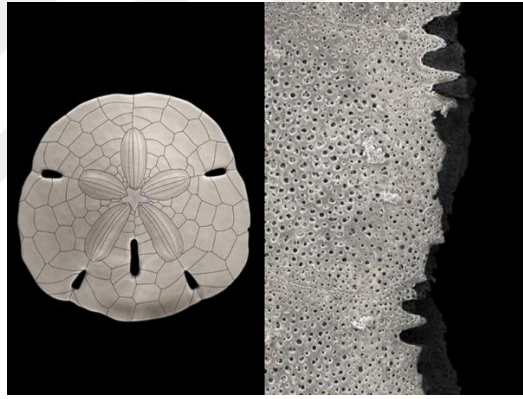
4.2.2 Devlet Bahçesi Sergi Salonu

Tablo 4.15 Devlet Bahçesi Sergi Salonu incelemesi (Krieg ve diğer., 2015).

Devlet Bahçesi Sergi Salonu		
Mimari	Yıl: 2014 Yer: Stuttgart, Almanya Mimar: ICD/ITKE Yapım Süresi: 7 hafta Fonksiyon: Müze	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Kubbe – 125 m² Üretim tipi: Robotik kol  Robotun Adı: KUKA Robotik kol tipi: 4-eksenli 	 Yapı Malzemesi: Kayın Kontrplak

Devlet bahçesi sergi salonu, hesaplamalı tasarım ve robotik üretim süreçlerinin senkronize olarak yürütüldüğü, ICD/ITKE tarafından tasarlanan mimari bir prototiptir. Avrupa Birliği ve Baden-Württemberg eyaleti tarafından finanse dilmiş olan yapı, Stuttgart Üniversitesi ‘Ahşap Yapılarda Robotik’ adlı araştırma projesi olarak Holzbau ve KUKA’nın da destekleriyle inşa edilmiştir (Krieg ve diğer., 2015).

Projenin tasarımı, biyomimetik yapı ilkeleri üzerinden ilerlemiştir. Deniz kestanelerinin iskelet sistemlerinin birbirine kenetlenmesinden yola çıkılarak kontrplakların birbirine bağlanması üzerine çalışılmış ve bir noktada sadece üç plaka birleşimi yapılmıştır. Şekil 4.45’te görülen kum doları iskeletinin biyolojik yapısal morfoloji ilkelerine göre tasarım kriterleri belirlenip daha az materyal ile daha fazlasını elde etme amacına ulaşılacak istenmektedir (Krieg ve diğer., 2015).



Şekil 4.45 Kum dolarının üstten ve mikroskopik görünüşü (Krieg ve diğer., 2015)

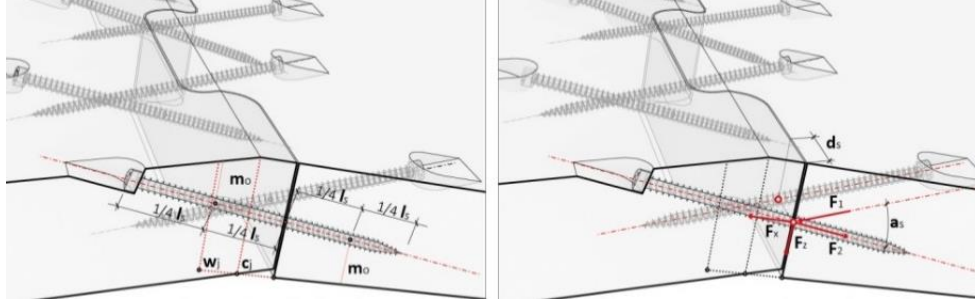
Yapıda, giriş ve sergi salonu olmak üzere iki birbirine bağlı mekânsal bölge bulunmaktadır. İki mekân da dışbükey çokgen plakalardan oluşan kubbe şeklindedir. 245 m²’lik toplam yüzey alanı yaklaşık 17x11x6 m boyutlarında ve 125 m²’lik taban alanını örtmektedir. Ziyaretçiler binaya küçük hacimli kabuktan girerler ve yapının hafif daralmasından geçerek çevredeki manzaraya açılan geniş cam cepheli ana salona yönlendirilirler. Şekil 4.46’da görüldüğü gibi iç mekânda küresel geometri oluşturmuş kontrplakların bağlantıları okunabilir olarak bırakılmıştır (Krieg ve diğer., 2015).



Şekil 4.46 Sergi salonunun iç mekan görünüşü ve okunur plaka bağlantıları (Krieg ve diğer., 2015)

Sergi salonunun karmaşık plaka yapısı, hesaplamalı tasarım ve simülasyon yöntemleriyle birlikte malzeme ve imalat optimizasyonları yapılarak geliştirilmiştir. Bu araştırma kapsamında geliştirilen hesaplamalı tasarım aracı, tasarım sürecinde malzeme özelliklerini ve fabrikasyon parametrelerini dahil etme imkânı sunmuştur. Böylece her bir plakayı manuel olarak üretmek yerine, optimizasyon ve simülasyon programlarıyla plakanın tasarım alanına göre otomatik form bulma ile plakalar tasarlanmışlardır (Menges, Schwinn ve Krieg, 2015).

Kayın kontrplaklar ilk olarak Hundegger SPM makinesinde büyük boyutlu ham plakalar halinde kesilmiştir. Daha sonra bu plakalar, frezeden geçirilerek özel bağlantı yerleri açılır. 243 adet birbirinden farklı 50 mm kalınlığındaki kayın kontrplak levhaların tamamına, 7356 ayrı kenetlenme yerleri robotik olarak açılmıştır. Parmak kenetlenme ile birbirine bağlanan plakalar, binanın yapısal stabilitesinin ana kaynağıdır. Düzlem dışından gelebilecek olan kesme kuvvetlerine karşı bu bağlantı noktalarına Şekil 4.47’de gösterildiği gibi çift geçiş vidaları da bağlanmıştır (Menges ve diğer., 2015).



Şekil 4.47 Düzlemsel olmayan kuvvetlere karşı eklenen vidalar (Menges ve diğer., 2015)

Proje, çıkarmalı üretim tekniğinin kullanıldığı önemli bir prototiptir. Plakaların fabrikada hazırlanması toplamda üç hafta sürerken sahaya getirilip manuel olarak monte edilmesi toplamda dört hafta sürmüştür. Mimarlar, yapı mühendisleri ve kereste imalatçıların disiplinler arası ve malzeme odaklı ortak çalışmaları sonucunda ortaya çıkmıştır.

4.3 Birleştirmeli Üretim Tekniği ile İnşa Edilmiş Yapılar

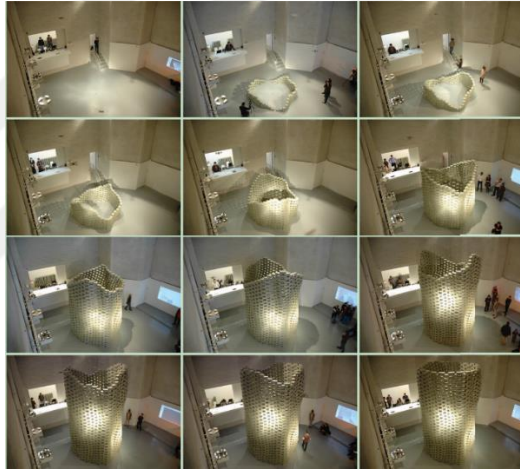
Birleştirmeli üretim tekniği ile inşa edilmiş 3 adet örnek aşağıda verilmiştir.

4.3.1 The vertical Village Enstalasyonu

Tablo 4.16 The Vertical Village Enstalasyonu incelemesi (Augugliaro ve diğer., 2014)

The Vertical Village Enstalasyonu		
Mimari	Yıl: 2011 Yer: Orléans, Fransa Mimar: Gramazio & Kohler ve Raffaello d'Andrea Yapım Süresi: 18 saat Fonksiyon: Enstalasyon	
Teknik	Üretim Yapım Şekli: Yerinde yapım Mimari Form ve Alanı: Organik form – ~ 9,5 m² Üretim tipi: Dron robotlar  Robotların Adı: Quadcopter 	Malzeme  Yapı Malzemesi: Polistiren köpük

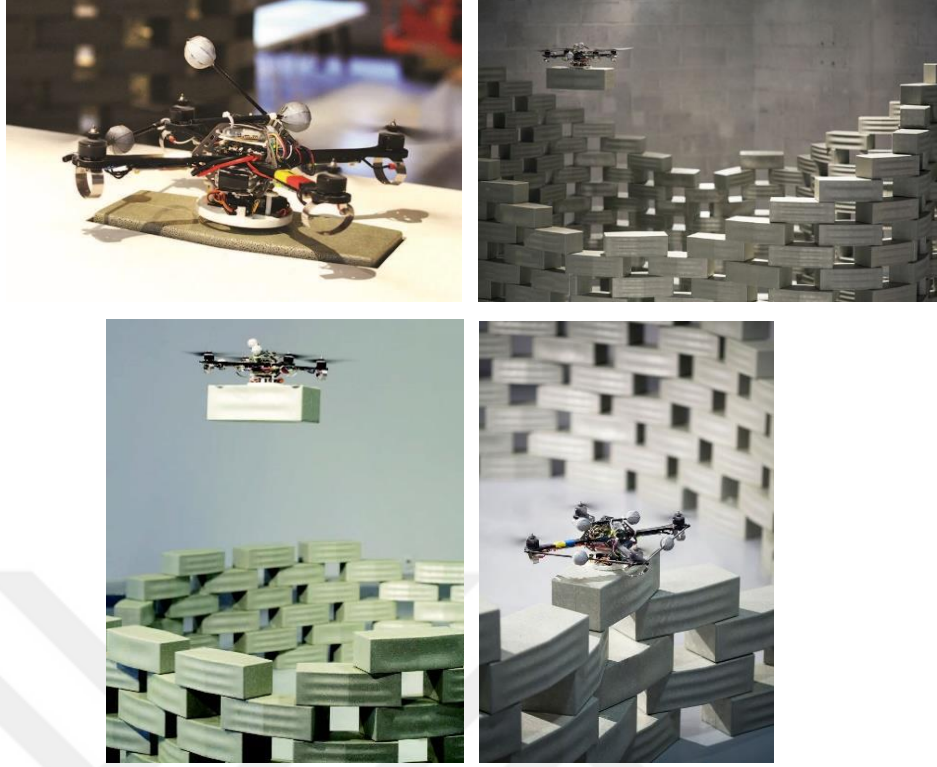
Robot teknolojisi kullanarak yapı inşa etme tekniklerine, çalışmalarında oldukça önem veren ETH Zürih, bu projesinde yerleşik mimariyi dijitalleştirmeye çalışan Gramazio & Kohler Architects ve Raffaello d'Andrea ortaklığında gerçekleştirmişlerdir. Mimari yapım tekniklerinin dijitalleşme sürecinde ortaya konan üretim tekniklerinin çoğunda, elde edilmesi istenen yapı için kullanılacak makineler oldukça büyüktür. Bu oranı da göze alarak farklı yaklaşımlar öne sürmek isteyen grup, robotların ürettikleri son ürünün robotun kendisinden oldukça küçük olduğu uçan makineler üzerine çalışmalar yapmışlardır. Böylece, Şekil 4.48’de yapım süreci gösterilen ve dronlarla yapılan ilk enstalasyon örneği üretilmiştir (Augugliaro ve diğer., 2014).



Şekil 4.48 Yapım sürecini gösteren fotoğraflar (Augugliaro ve diğer., 2014)

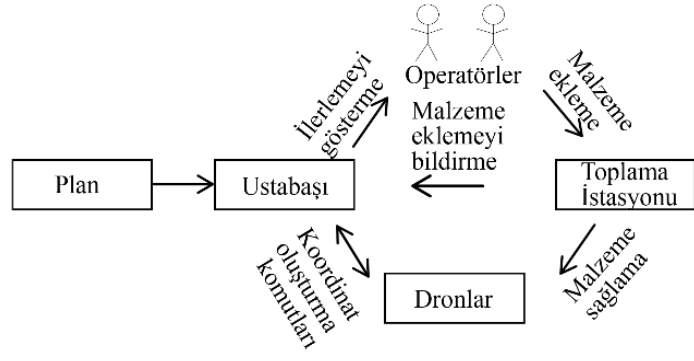
600 m yüksekliğindeki the Vertical Village adlı yapının 1/100 ölçeğindeki modellemesi 4 günlük canlı sergide toplamda 18 saatte yapılmıştır. FRAC Centre’de 2011 Aralık-Şubat 2012 tarihlerinde sergilenen bu enstalasyon, 4 adet quadcopter (4 rotorlu) dronun çalışması ile üretilmiştir (Augugliaro ve diğer., 2014).

Dronlar, 3,5 m genişliğinde yapıyı oluşturmak için her biri 90 gr ağırlığında olan 1500 polistiren köpükten yapılmış tuğlayı Şekil 4.49’da gösterildiği gibi kaldırır, taşır ve planlanmış olan yerlere konumlandırırlar. Bunu yaparken hem birbirleriyle hem de çevreyle olan ilişkilerini sürekli olarak açık tutmaktadırlar (Augugliaro ve diğer., 2014).



Şekil 4.49 Dronların hareketleri (Flight assembled architecture, b.t)

Kulenin inşasından sorumlu otonom sistem, Şekil 4.50’de anlatılmaya çalışıldığı gibi 4 alt sisteme bölünmüş olarak çalışır. Bunlar; sıralı ve doğru yerleştirme talimatlarının listesini içeren plan, planı yorumlayarak ve inşaat sürecini izleyerek genel inşaat sürecini yöneten bir ustabaşı, yapıyı inşa etmek için önceden hazırlanmış emirleri yerine getirmekten sorumlu dronlar ve dronlara yapı malzemesi sağlayan toplama istasyonudur. Kurulumda, bir insan operatör toplama istasyonuna köpük tuğlaları koyar ve quadcopterlar onları alıp planda belirtilen yerlere taşırlar (Augugliaro ve diğer., 2014).

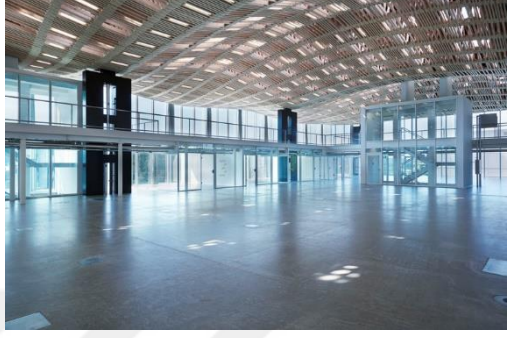


Şekil 4.50 Otonom sistemin işleyişini gösteren diyagram (Augugliaro ve diğer., 2014).

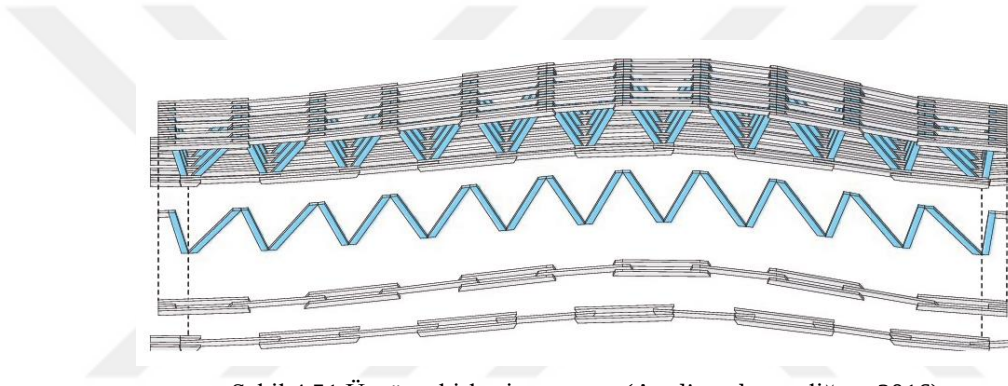
6 m yüksekliğinde üretilen bu yapının asıl amacı ise; dronlar yardımıyla yapılabilecek olan sınırları insanlara gösterip daha büyük ölçekli projelerde bu yöntemin kullanılmasının önünü açmaktır.

4.3.2 The Sequential Roof

Tablo 4.17 The Sequential Roof incelemesi (Apolinarska, Bärtschi, Furrer, Gramazio ve Kohler, 2016)

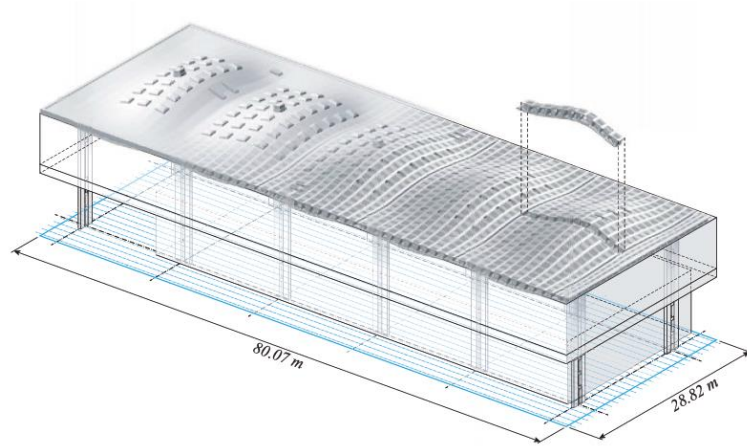
The Sequential Roof		
Mimari	Yıl: 2016 Yer: Zürih, İsviçre Mimar: Gramazio & Kohler Yapım Süresi: - Fonksiyon: Çatı	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Bezier eğrilikli yüzey – 2308 m² Üretim tipi: Vinç  Robotların Adı: ERNE AG Holzbau Robotun çalıştığı koordinat: Silindirik 	 Yapı Malzemesi: Ahşap

İnşaat robotiğinin çatı uygulamalarında kullanıldığı ilk örnek olan proje; disiplinler arası hesaplı bir çalışma sonucu ETH Z r h'te 2016 yılında tamamlanmıştır. 2308 m²'lik serbest biçimli, y k taşıyabilen ve yaklaşık 50.000 birimin robotlar tarafından Şekil 4.51'deki gibi üst üste konulması sonucu elde edilen ahşap bir yapı elemanıdır. Süreçte ilk olarak çatının olması istenilen geometrik formu tanımlanmış ve yapısal modeli oluşturulmuştur. Daha sonra ise çivilerin konumlandırılacağı yerler bir algoritma yardımıyla belirlenmiştir (Apolinarska ve diğ r., 2016). The Sequential Roof, Arch-Tec-Lab AG tarafından planlandı ve ERNE AG Holzbau tarafından üretilmiştir (The sequential roof, b.t.).



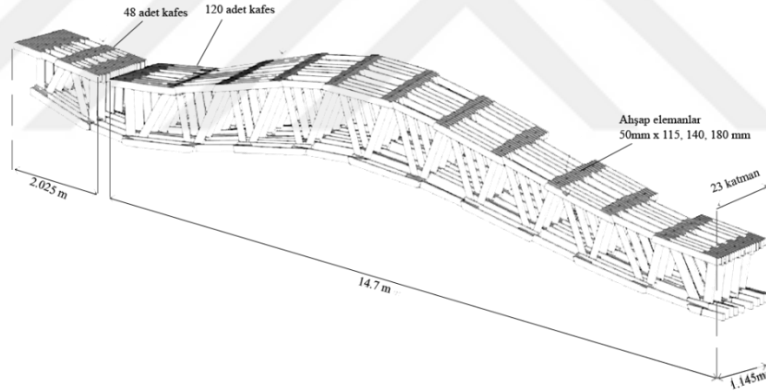
Şekil 4.51  st üste birleştirme sırası (Apolinarska ve diğ r., 2016)

Gramazio & Kohler'e göre bu proje; “profesyonellikte mimarın bazı zamanlarda kaybettiğı esnekliğı sağıyor”. Ayrıca, Şekil 4.52'de gösterilen izometrik çizimde görülebileceğı gibi esnek tasarım kriterlerine ulaşıldığı bir proje geliştirdiklerini belirtmek isteyen Gramazio Kohler “Bu  retim paradigmasında, form hiçbir şeye mal olmuyor” şeklinde ifade de bulunuyor (MuDa, 2018).



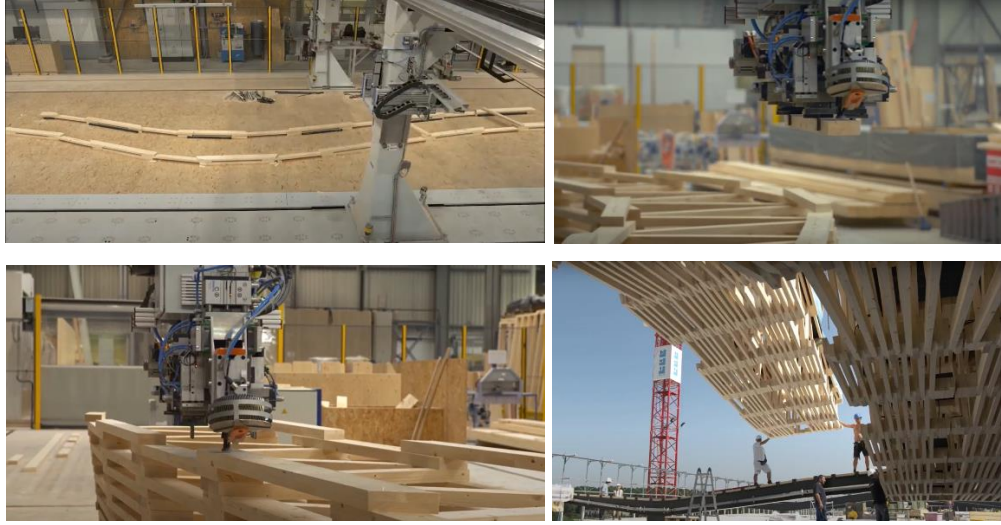
Şekil 4.52 Çatının izometrik çizimi (Apolinarska ve diğer., 2016)

Çatı yapısı, ana yapının çelik kutu kirişleri arasında Şekil 4.53'te gösterildiği gibi maksimum 14,70 m genişlikte olan 168 münferit kafes kirişten oluşmaktadır (Adam, 2014).



Şekil 4.53 Çatının yapısal özelliklerini gösteren çizim (Apolinarska ve diğer., 2016)

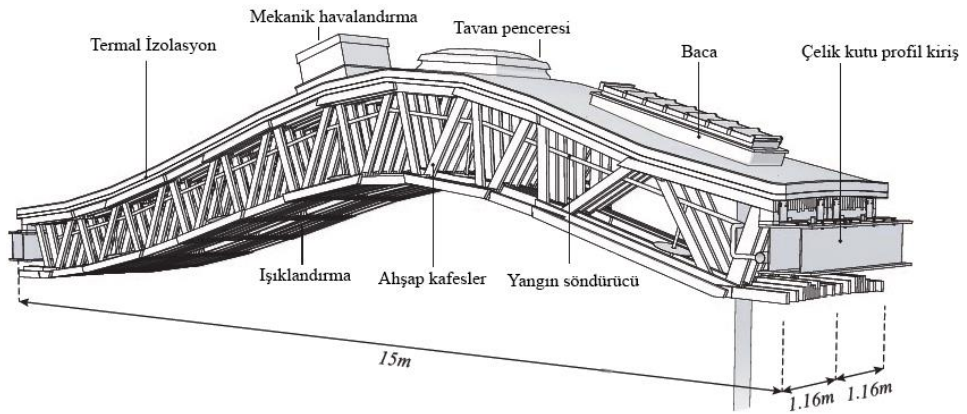
Robotik bir kurulum kullanılarak, 48.624 ahşap çıtanın tek tek oluşturulmuş kafes kirişlere, Şekil 4.54'te gösterilmeye çalışıldığı gibi her bir çıtanın istenilen boyuta göre kesildiği ve ardından kafes yapısının geri kalanına yerleştirildiği ve birleştirildiği tam otomatik bir süreçte gerçekleştirilmiştir (Apolinarska ve diğer., 2016).



Şekil 4.54 Bir çatının istenilen boyutta kesilip, taşınması, çivilenmesi ve montajını sırasıyla gösteren görseller (MuDa, 2018)

Çatının genel dalgalı formu, kübik Bézier eğrileriyle katman şeklinde tanımlanır. Çatının serbest biçimli genel şekli nedeniyle, her katmanda şablon farklıdır ve komşu katmanlardaki çitılar arasında hafif bir kayma vardır (Apolinarska ve diğer., 2016).

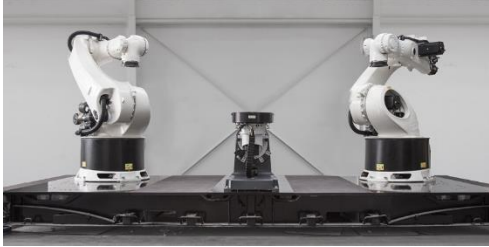
Aynı zamanda bir uygulama projesi olan bu çatıda, izolasyon yerleşimi, doğal ve yapay havalandırma, ısklandırma gibi fonksiyonlar için Şekil 4.55'te görülebileceğı gibi farklılaşmalar mevcuttur (MuDa, 2018).



Şekil 4.55 Yardımcı sistemli kafes kirişler (Apolinarska ve diğer., 2016)

4.3.3 BUGA Ahşap Pavyonu

Tablo 4.18 BUGA Ahşap Pavyonu incelemesi (Alvarez ve diğer., 2019)

BUGA Ahşap Pavyonu		
Mimari	Yıl: 2019 Yer: Heilbronn, Almanya Mimar: ICD/ITKE Stuttgart Üniversitesi Yapım Süresi: - Fonksiyon: Kamu Yapısı	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Çift eğrilikli yüzey – 500 m² Üretim tipi: Robotik kol  Robotların Adı: KUKA BEC GMBH Robotik kol tipi: 6 eksenli 	 Yapı Malzemesi: Ahşap

Diyagramatik olarak Şekil 4.56’da ifade edildiği gibi disiplinler arası çalışmanın bir ürünü olan bu proje, ICD/ITKE Stuttgart Üniversitesi ekibi tarafından tasarlanmış ve üretime geçirilmiştir. Projenin amacı, biyomimetik tasarım yaklaşımı ve ahşap malzeme kullanılarak; mimari esnekliği ve yapısal performansı yüksek, az maliyetli bir yapı üretilebildiğini kanıtlamaktır (Alvarez ve diğer., 2019).



Şekil 4.56 Disiplinler arası çalışma konsepti (Menges ve Knippers, 2019a)

Tasarımında üç adet kemer ana yönle konumlandırılmış ve ziyaretçileri pavyonun iç kısmına yönlendirme amaçlanmıştır. Konser ve halka açık etkinliklere ev sahipliği yapacak olan kabuğun iç kısımlarına Şekil 4.57’de görüldüğü gibi LED ışıklar yerleştirilerek aydınlatma ihtiyacı yapının kendi içerisinde çözülmüştür. Ayrıca, tüm yapı elemanları sökülüp farklı bir projede tekrar kullanılabilecek şekilde tasarlandığından sürdürülebilirliğe de dikkat çekmektedir (Menges ve Knippers, 2019a).



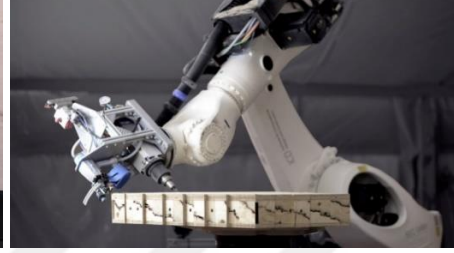
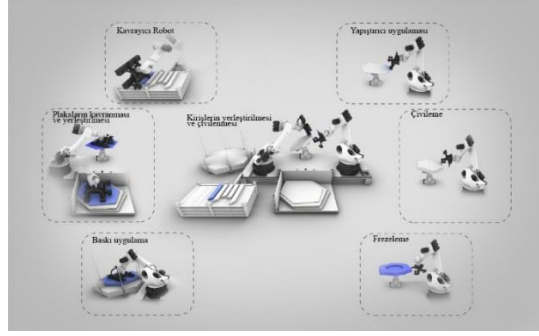
Şekil 4.57 Kabuğun içine gömülmüş LED aydınlatmalar (Menges ve Knippers, 2019a)

Projede malzeme kullanımını minimuma indirmek ve yapının ağırlığını azaltmak için kullanılan yöntem, Şekil 4.58’de ahşap segmentlerin katmanlarının diagramatik olarak gösterildiği gibi yapı için tasarlanmış çift cidar ahşap parçalarının içinin boş olarak kullanılmasıdır. İçi boş ahşap yapı segmentleri, yapının ağırlığını ve malzeme kullanımını önemli ölçüde azaltırken daha karışık bir üretim sistemi geliştirme zorunluluğu getirmiştir. Bunun için kabuk segmentlerin otomatik olarak robotik kollarla birleştirilmesi planlanmıştır. Tablo 4.18’de görüldüğü gibi 6 metrelik genişliğe sahip, iki adet, 6 eksenli ve taşınabilir bir robotik ahşap birleştirme platformu oluşturulmuştur (Menges ve Knippers, 2019a).



Şekil 4.58 Ahşap segmentlerin katmanlarının diyagramatik görünümü (Alvarez ve diğer., 2019)

Üretim sürecinde iki adet robot Şekil 4.59’daki gibi senkronize şekilde çalışarak bir modülü birlikte birleştirirler. İlk olarak alt ahşap plakaya yan kirişleri yapıştırılıp çivilenir. Daha sonra yapının iç tarafında kalacak olan üst plaka yerleştirilir. Birleştirme işleminden sonra modüllerin birbirlerine bağlanabilmesi için her birine kertme geçmeli birleşim detayları işlenir. 17.000 farklı kertme geçmeli birleşim detayı kullanılarak 376 adet modül birbirine entegre edilmiş ve 30 metre kolonsuz açıklık geçebilen çift eğrilikli pavyon yapısı elde edilmiştir (Alvarez ve diğer., 2019).



Şekil 4.59 Robotların görev farklılıkları ve senkronize çalışmaları (Menges ve Knippers, 2019a)

Plaka ve kirişlerin montajından görüntü tabanlı kalite kontrolüne kadar her işlem tam otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Her segmentin ortalama olarak Şekil 4.60’ta görüldüğü gibi birleştirilmesi 8 dakika sürerken yüksek hassasiyetli frezeleme 20-40 dakika arasında sürmektedir. Bütün bu segmentlerin sahada birleştirilmesi ise 2 kişi ile yapılmış ve 10 gün sürmüştür. Tüm bölümler birbirine monte edildikten sonra su yalıtımını sağlamak için EPDM folyo tabakası pavyonun üzerinde serilmiştir (Menges ve Knippers, 2019a).



Şekil 4.60 Ahşap modüllerin sahada birleştirilmesi (Menges ve Knippers, 2019a)

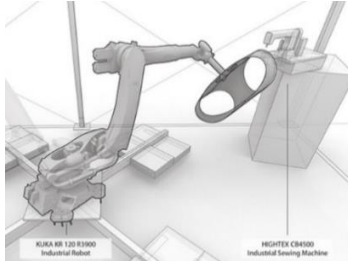
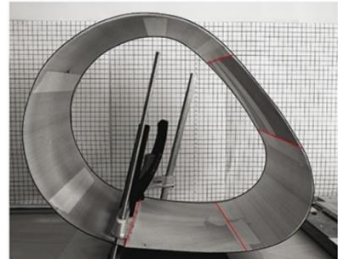
Pavyon; zanaat, yenilik ve bilimsel araştırmanın kesişim noktasında ortaya çıkan bir anlayışla ortaya çıkmıştır. Yapı, malzemenin verimli kullanımı dolayısıyla ekonomik, ekolojik ve esnek bir mimari ile dijital fabrikasyonun önemli örneklerindendir.

4.4 Biçimlendirmeli Üretim Tekniği ile İnşa Edilmiş Yapılar

Biçimlendirmeli üretim tekniği ile inşa edilmiş 3 adet örnek aşağıda verilmiştir.

4.4.1 ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2015-16

Tablo 4.19 ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2015-16 incelemesi (Menges ve Knippers, 2016)

ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2015-16		
Mimari	Yıl: 2016 Yer: Stuttgart, Almanya Mimar: ICD/ITKE Yapım Süresi: - Fonksiyon: Kamu Yapısı	
Teknik	Üretim Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Çift eğrilikli yüzey – 85 m² Üretim tipi: Robotik kol  Robotların Adı: KUKA KR 120 R3900, HIGHTEX CB4500 Robotik kol tipi: 6-eksenli 	Malzeme   Yapı Malzemesi: Kayın Kontrplak

Yapım süreçleri içerisindeki yeri hızla artan biçimlendirme yöntemi ile üretime verilebilecek mimari örneklerden olan ve The Institute for Computational Design (ICD) ve the Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE)'nin ortak çalışması ile oluşturulan ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2015-16'nın amacı robotik dikim ile üretime dikkat çekmektir. Pavyon, mimari ölçekte ahşap elemanların endüstriyel dikimini kullanan ilk örnek olması nedeniyle önemlidir (Menges ve Knippers, 2016).

Pavyonun tasarımında ve bazı yapısal özelliklerinde denizkestanesi ve kum dolarından ilham alınmıştır. Bu nedenle, bu canlılar biyologlarla birlikte incelenip yapısal özellikleri analiz edilmiştir. Pavyonun Şekil 4.61'de görüldüğü gibi çift katmanlı olması ve birleşim noktalarındaki farklılaşmalar bu canlılara dayanarak oluşturulmuştur.



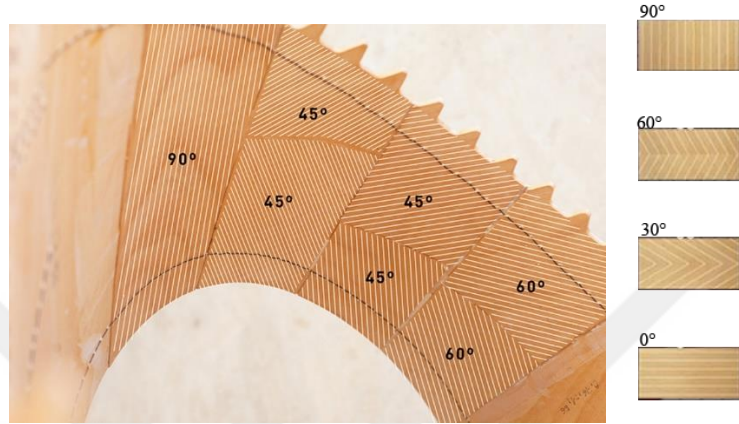
Şekil 4.61 Çift tabakalı modüller (Menges ve Knippers, 2016)

Şekil 4.62'de gösterildiği gibi üretim süreci; ince kontrplaklardan istenilen şekil ve büyüklüklerde formların kesilmesi ile başlar. Daha sonra kesilmiş parçaların istenilen forma göre bükülüp dikiş ile kenetlenmesi ve son olarak modüllerin birleştirmesi yer alır (Menges ve Knippers, 2016).



Şekil 4.62 Üretim sürecini gösteren görseller (Menges ve Knippers, 2016)

Bükülme işleminde ahşabın anizotropik yapısından yararlanılarak Şekil 4.63'teki gibi farklı açılarda eğimler elde edilmiştir. Şekil 4.64'te görüldüğü gibi KUKA KR 120 R3900 ve HIGHTEX CB4500 robotları yardımıyla düz yüzeyli kontrplaklar, istenilen şekilde katlanarak dikilmiştir (Menges ve Knippers, 2016).



Şekil 4.63 Liflerin yönlerine göre kontrplakların farklı açılarda bükülmelerini gösteren görsel (Menges ve Knippers, 2016)



Şekil 4.64 KUKA KR 120 R3900 ve HIGHTEX CB4500 robotları ve modüllerin sahada montajı (Menges ve Knippers, 2016)

Geometrik olarak birbirinden farklı 151 eleman üretilmiştir. Böylece monte işlemi gerçekleştirildiğinde Tablo 4.19'da gösterilen çift kıvrımlı kabuk yapısı elde edilmiştir. Şekil 4.64'te montaj sırasında çekilmiş fotoğrafı gösterilen 780 kg ağırlığında olan bu yapı, 85 m²'lik alanı kaplamakta ve 9,3 m'lik açıklık geçmektedir.

4.4.2 ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2016-17

Tablo 4.20 ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2016-17 incelemesi (Menges ve Knippers, 2017)

ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2016-17		
Mimari	Yıl: 2017 Yer: Stuttgart, Almanya Mimar: ICD/ITKE Yapım Süresi: - Fonksiyon: Kamu Yapısı	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Organik form – 40 m² Üretim tipi: Robotik kol ve dron  Robotların Adı: KUKA Robotik kol tipi: 6-eksenli 	 Yapı Malzemesi: Cam ve karbon fiber takviyeli kompozit

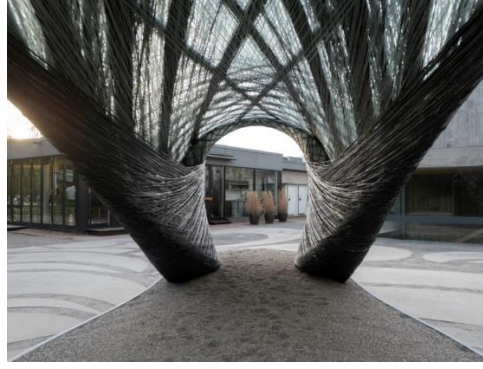
The Institute for Computational Design (ICD) ve the Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) akademik ortaklığı ve Hexion'un üretimi ile hayata geçirilmiş olan pavyon yapısı, robotların mimari yapım süreçlerinde biçimlendirme yöntemi kullanılarak yapılmış örneklerden bir tanesidir.

Proje; öğrenciler ve akademisyenlerden oluşan mimarlar, mühendisler ve biyologlar tarafından disiplinler arası olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Pavyonun genel geometrisi, uzun açıklıklı ve lifli yapı oluşturabilmek için yaprak güvelerinden ilham alınarak tasarlanmıştır. Evrim ve Ekoloji Enstitüsü ve Tübingen Üniversitesi Paleobiyoloji bölümü iş birliği yapılarak Şekil 4.65'te görüldüğü gibi incelenen güvelerin kendi yaşam alanlarında oluşturdukları lifli yapılara incelendikten sonra tasarım sonuca ulaştırılmıştır. Projenin amacı; minimum kalıp kullanımı ile sürekli filamentin yapısal performansından yararlanarak uzun açıklıklı yapılar elde etmektir (Menges ve Knippers, 2017).



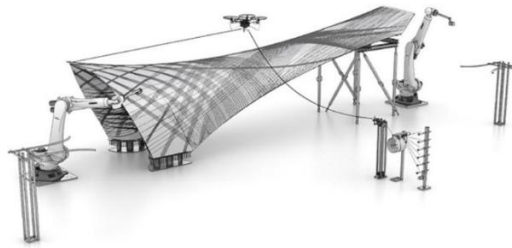
Şekil 4.65 Tasarım kriterleri için incelenen yaprak güvelerinin oluşturduğu yapı (Menges ve Knippers, 2017)

Hafif ve yüksek gerilme mukavemetine sahip olduğu için cam ve karbon fiber takviyeli kompozit ana yapı malzemesi olarak seçilmiştir. Toplamda 184 km reçine emdirilmiş Şekil 4.66'da görülen cam ve karbon fiberle, 12 m uzunluğa sahip konsol çalışan 1000 kg ağırlığında ve 40 m²'lik alanı örten pavyon elde edilmiştir. Böylelikle, insansız hava araçları (İHA) gibi düşük yük taşıma kapasitesine sahip ancak uzun menzilli robotlar tercih edilebilmektedir. Uzun menzilli robotların kullanımı ise geniş açıklıklara sahip yapıların üretimine olanak sağlamaktadır (Menges ve Knippers, 2017).



Şekil 4.66 Cam ve karbon fiber kompozitten oluşturulmuş yapı (Menges ve Knippers, 2017)

Şekil 4.67’de görülen pavyonun üretim süreci; güçlü ve hassas ancak sınırlı erişime sahip sabit iki adet KUKA robotları ile sınırlı hassasiyete sahip hareketli ve uzun menzilli bir İHA arasındaki iş birliğine dayanmaktadır. Yapının iki ucunda gerekli mukavemet ve hassasiyete sahip iki sabit endüstriyel robotik kol yerleştirilmiştir. Böylece; otonom, uzun menzilli ve daha az hassasiyete sahip olan İHA, sabit robotik kollara fiber taşıma işlemini yapmanın yanı sıra yapının etrafında dönerek veya içinden geçerek istenilen yerlere fiber yerleştirme imkânı sunmaktadır. Senkronize hareket eden bu üç robot, üretim boyunca birbirleriyle kontrol ve iletişim sistemleri sayesinde etkileşimde bulunmaktadır (Menges ve Knippers, 2017).



Şekil 4.67 Pavyonun üretim sürecini gösteren diyagram ve fotoğraf (Menges ve Knippers, 2017)

Geleneksel imalat yöntemleri, çoğu yapı için tam ölçekli kalıplar gerektirir ve çoğu zaman işlemi, aynı parçanın seri üretimi ile sınırlandırır. Farklı üretim robotlarının, aynı projede kullanılmasının ihtiyaca göre pratik çözümler ve esnek tasarım sonuçları verdiği bu pavyon yapısında görülmektedir.

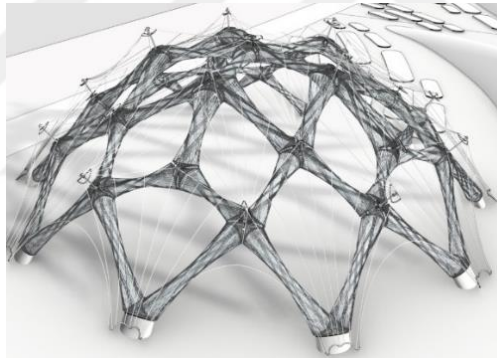
4.4.3 BUGA Fiber Pavyonu

Tablo 4.21 BUGA Fiber Pavyonu incelemesi (Bodea ve diğ., 2020)

BUGA Fiber Pavyonu		
Mimari	Yıl: 2019 Yer: Heilbronn, Almanya Mimar: ICD/ITKE Yapım Süresi: - Fonksiyon: Kamu Yapısı	
Teknik	Üretim	Malzeme
	Yapım Şekli: Fabrikada yapım Mimari Form ve Alanı: Organik form – 400 m² Üretim tipi: Robotik kol  Robotların Adı: KUKA Robot210-R3100 Robotik kol tipi: 4 eksenli 	  Yapı Malzemesi: Cam ve karbon fiber destekli polimer

The Institute for Computational Design (ICD) ve the Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) akademik ortaklığı ve FibR GmbH'nin endüstriyel ortaklığıyla hayata geçirilmiş olan pavyon yapısı, robotların mimari yapım süreçlerinde biçimlendirme yöntemi kullanılarak yapılmış örneklerden bir tanesidir.

Tarihsel olarak uzun açıklıklı kubbelerin, hacim/yüzey alanı odaklı tasarımlarda oldukça verimli olmasından yola çıkılarak pavyonun tasarımı gerçekleştirilmiştir. Biyomimetik tasarımı oldukça önemseyen Stuttgart Üniversitesi, bu projesinde de bu konu üzerinden ilerlemiştir. Projenin amacı, yarı açık hava etkinlikleri için ideal açıklıklara sahip ve yeterli derecede ışık alan bir yapı üretmektir. Tasarım temel olarak bir yarım küre şeklinde düzenlenmiş ve 5 özdeş bölüme ayrılarak Şekil 4.68'de görülebileceği gibi 10 farklı noktada yapının beton temellerle bağlantısı sağlanmıştır (Bodea ve diğer., 2020).



Şekil 4.68 Beton temellere bağlanmış yapı bileşenleri diagramı (Menges ve Knippers, 2019b)

12 farklı tipte 60 adet yapı bileşeni, hiperboloit lifli gövdeler şeklinde FimBR GmbH bünyesinde imal edilmiştir. Bu 60 adet yapı bileşeni, değişken açılı Şekil 4.69'da görüldüğü gibi çelik bağlantı elemanlarıyla birbirlerine eklenmişlerdir. Yapının kendisi 4,8 tonluk ağırlığa sahip olup 23 metre açıklık geçerek toplamda 400 m²'lik alanın üzerini örtmektedir (Bodea ve diğer., 2020).



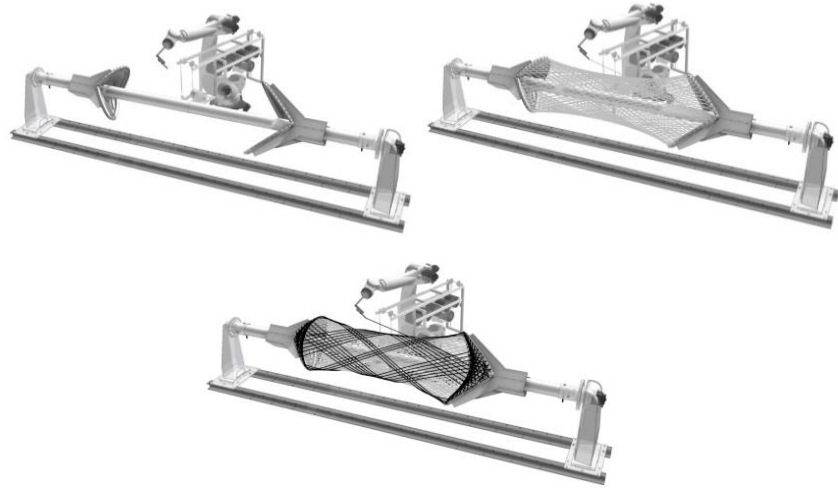
Şekil 4.69 Yapı bileşenlerinin birbirine çelik elemanları ile bağlanması (Menges ve Knippers, 2019b)

Kompozit yapı bileşenlerinin her biri sırasıyla yarı saydam cam elyaf kafes ve epoksi reçineden geçirilmiş siyah karbon fiber takviyeden oluşur. Epoksi reçine elementlerin birbirine bağlanması için projede yer almaktadır. Kompozit yük taşıyıcı yapı, yükleri doğrudan beton temellere aktararak, yapıda oluşabilecek olan yük süreksizliklerini minimuma indirir. Yapı kabuğu ise Şekil 4.70’te gösterildiği gibi şeffaf ETFE ile kaplanmıştır (Bodea ve diğer., 2020).



Şekil 4.70 Yapı kabuğunun ETFE ile kaplanmış hali (Menges ve Knippers, 2019b)

Lifli yapı bileşenleri, Şekil 4.71’de gösterilen KUKA Robot 210-R3100 adlı sargı efektörüne sahip bir robot tarafından iki döner sarma iskelesi arasına yerleştirilerek elde edilir. Şekil 4.72’de üretim aşamaları gösterilen kompozit, basınçsız bir fırında tekrar kullanılabilir olan sarım iskelesi ile kurlenir ve daha sonra sarım iskelesinden ayrılarak sahada montaja hazır hale gelir. Her bir bileşen yaklaşık olarak 5-6 saat’lik sarım süresiyle birlikte toplamda 8 saatte üretilmiş olur (Bodea ve diğer., 2020).



Şekil 4.71 Yapı bileşenlerinin üretimini gösteren diyagram (Menges ve Knippers, 2019b).



Şekil 4.72 Bileşenlerin üretim aşamalarını gösteren görsel (Bodea ve diğer., 2020).

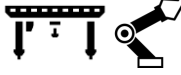
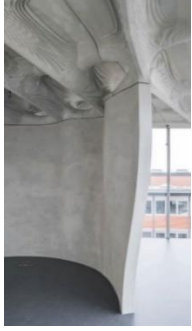
Bu işlem sırasında herhangi bir kalıba ihtiyaç olmadığı için ve her bileşen için önceden belirlenmiş farklı şekillerin dahi ekstra maliyet gerektirmemesi yapının imalatının oldukça ekonomik olmasını sağlamıştır. Buna ek olarak, üretim atığının oluşmaması da doğaya verilen zararın minimuma indirgenmesi istendiğinin göstergelerindendir.

4.5 Döküm/Kalıplama ile Üretim Tekniği ile İnşa Edilmiş Yapılar

Döküm/kalıplama ile üretim tekniğinde inşa edilmiş 1 adet örnek aşağıda verilmiştir.

4.5.1 DFAB Evi

Tablo 4.22 DFAB Evi incelemesi (Graser ve diğer., 2020).

DFAB Evi		
Mimari	Yıl: 2019 Yer: Dübendorf/İsviçre Mimar: NCCR Digital Fabrication Yapım Süresi: ~ 22 gün Fonksiyon: Konut	
Teknik	Üretim Üretim Şekli: Eklemeli, çıkarmalı, biçimlendirmeli, döküm Yapım Şekli: Fabrikada ve yerinde yapım Mimari Form ve Alanı: Kompleks form, 200 m² Üretim tipi: Vinç, robotik kol  Robotların Adı: ABB, In-Situ Fabricator Robotik kol tipi: 6-eksenli 	Malzeme   Yapı Malzemesi: Ahşap ve beton

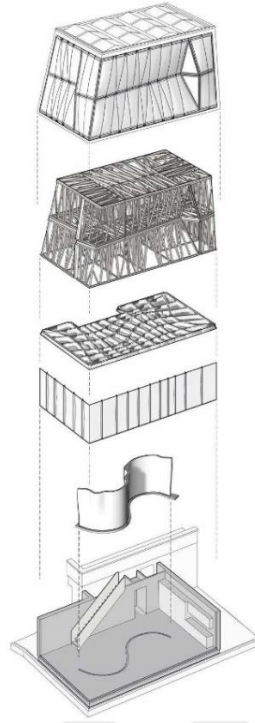
ETH Z r h bünyesinde yapılan disiplinler arası çalışmanın bir sonucu olarak ortaya çıkan yapının üretim amacı gerçek ortamda dijital imalatın olanaklarını öğrenmektir. ETH Z r h'te görev yapan 7 profesör ile 40'tan fazla endüstri ortağının iş birliğiyle DFAB Evi'nin üretimi gerçekleştirilmiştir. Günümüz mimarisinde, dijital fabrikasyonun en kapsamlı ve çoklu olarak kullanıldığı birleştirici bir projedir (Graser ve diğer., 2020).

şekil 4.73'te dışarıdan görüntüsü verilen çok katlı olarak tasarlanan evin inşa edilmesi 3 ana farklı zorlukla u raşılarak 2019 yılında tamamlanmıştır. İlk olarak, hesaplamalı tasarım ile yapısal değerlendirmeyi birbirine ba lamak için parametrik ara yüzlerin kullanılması ile tasarım ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra yapısal gereksinimleri ve kalite standartlarını, yapının karşılayabilece ini   mek için malzeme testleri ve tam   ekli prototip çalışmaları gerçekleştirilmiştir. En son aşamada ise sistem tasarımı ve teknik detaylandırma gibi verilerle inşaat sürecinin tamamı öngörülebilir hale getirilmiştir (Graser ve diğer., 2020).



şekil 4.73 DFAB Evi dışarıdan görüntüsü (Graser ve diğer., 2020)

DFAB Evi,  retenlerinin İnovasyon Aşamaları adını verdikleri şekil 4.74'te gösterilen altı dijital üretim teknolojisi ile inşa edilmiştir. İlk aşama Yerde İmalatçı adını verdikleri çevreye duyarlı mobil bir imalat robotu ile gerçekleştirilmiştir. Süreç içi üretim araştırmasına olanak sağlayan robot; algılama ve hesaplama sistemine sahip, otonom olarak yeniden konumlanabilen ve kamera geri bildirimi yapabilmektedir (Dörfler ve diğer., 2019).



Şekil 4.74 İnovasyon aşamaları diagramatik gösterimi (Graser ve diğer., 2020)

İkincisi; Hasır Kalıp adı verilen atıksız ve standart dışı beton yapılar için yerinde ve robotik olarak inşa edilen güçlendirme sistemidir. DFAB Evi'nde bu Hasır Kalıp, 12 m uzunluğunda ve 3 m yüksekliğinde dalgalı bir forma sahip olan yük taşıyıcı bir duvarın üretiminde kullanılmıştır. Yerinde İmalatçı'ya uygulamaya özel uç efektörler eklenmesi ile biçimlendirmeli üretim gerçekleştirilmiştir. 6 ve 8 mm'lik inşaat demirlerinin kaynaklanarak Şekil 4.75'te gösterildiği gibi Hasır Kalıp üretimi yapılmıştır. Daha sonra bu ağın üzerine 20 mm'lik püskürtme beton uygulanmıştır (Hack, 2018).



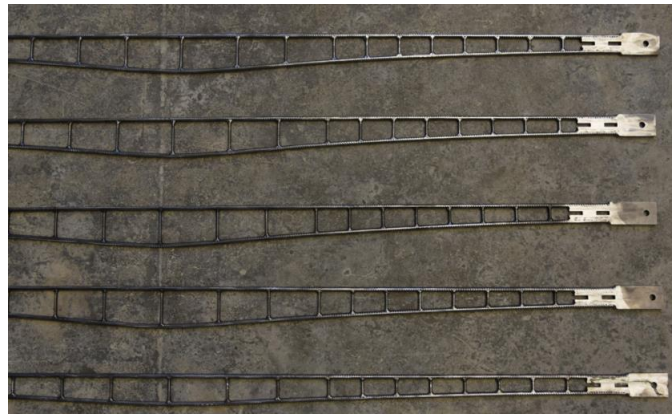
Şekil 4.75 Hasır Kalıp üretimi (Pintos, 2020).

Üçüncü olarak Bölüm 3'te detayları verilen Akıllı Dinamik Döküm uygulaması yapılmıştır. Otomatik bir süreç olan üretimde; hareketli kalıp, malzemenin viskoz halden katı hale dönüşmesine izin verecek hızda ilerlemektedir. Yapılan testler ve araştırmalar sonucunda kalıp malzemesi olarak Şekil 4.76'da gösterilen paslanmaz çelik seçilmiştir (Graser ve diğer., 2020).



Şekil 4.76 Paslanmaz çelik kalıbı (Smart dynamic casting, b.t)

Beton dikmelerin güçlendirilmesi ise; önceden istenen şekillere getirilen ve Şekil 4.77'de gösterilen 12 mm'lik paslanmaz çelik profillerin imalat sürecine başlanmadan önce kalıp içerisine yerleştirilmesi ve alt ve üst bağlantılara sabitlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, beton eklemesi yapıp dinamik kalıp ile istenilen kesitler elde edilmektedir (NCCR Digital Fabrication, 2019).



Şekil 4.77 Kalıplara sabitlenmek için hazırlanmış güçlendirmeler (Smart dynamic casting, b.t)

Araştırma, Şekil 4.78’de görülen minimum 70x100 mm kesitli ve 3 m yüksekliğinde güçlendirilmiş cephe elemanlarının üretimine odaklıdır. Proje için toplamda 15 adet kayıt(mullion) üretilmiştir ve her bir kayıtın üretimi yaklaşık 4 saat sürmüştür (NCCR Digital Fabrication, 2019).



Şekil 4.78 3’er metre yüksekliklere sahip Akıllı Dinamik Döküm kayıtlar (Smart dynamic casting, b.t)

Dördüncü olarak Akıllı Döşeme adı verilen uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu döşeme, 3B baskı yöntemiyle üretilmiş özel bir kalıpla prefabrik olarak betondan üretilmiştir. 78 m² alana sahip ve maksimum 4 m konsol çalışmakta olan bu döşeme, 4 günde üretilmiştir (NCCR Digital Fabrication, 2019). Kalıp elemanları, D-Shape’de olduğu gibi bağlayıcı ve kumla imal edilmiştir. On bir adet kalıp modülü, kavisli ve nervürlü bütüncül kalıp levhayı oluşturmaktadır. Bu kalıp modülleri istenilen forma uygun şekillerde birleştirilir, üzerine beton püskürtülür ve daha sonra beton dökümü gerçekleştirilir. Eklemeli üretimin yüksek çözünürlüklerde gerçekleştirilebilir olması ve geometrik esneklikler sağlaması bu kalıpların üretiminde tercih sebepleridir. Döşemenin tasarımı, malzeme hacmini ve bina yükünü azaltmak için optimize edilmiş ve döşeme 15.7 t ağırlığında üretilerek benzer bir geleneksel beton levhadan yaklaşık %65 daha hafif yapı elemanı ortaya çıkmıştır (NCCR Digital Fabrication, 2019). Son olarak, Şekil 4.79’da gösterildiği gibi sahada montajı gerçekleşen döşeme modüllere, elektrik ve yağmurlama sistemleri de entegre edilmiştir (Meibodi ve diğer., 2018).



Şekil 4.79 Akıllı Döşeme modüllerinin yerleştirilmesi (Graser ve diğer., 2020).

Beşinci aşama ise Uzaysal Ahşap Montajları adı verilen ve standart olamayan uzaysal ahşap yapılar için tercih edilebilecek olan bir robotik prefabrikasyon sürecidir. DFAB Evi'nin son iki katı, iki adet vinç robot kolları, CNC kontrollü masa testeresi ve bir adet otomatik olarak çalışan ekipman değiştirici kullanılarak ETH Zürich'teki Robotik İmalat Laboratuvarında üretilmiştir. Şekil 4.80'de görüldüğü gibi iki adet vince bağlı robot kolları, dönüşümlü olarak çalışıp hem ahşap elemanların belirlenen yerlere yerleştirilmesi hem de birleştirilmiş yapıya geçici destek görevi görerek iş birliği içerisinde çalışmışlardır. Seç-kes-tara-yerleştir iş akışı ile çalışan bu robotlar sayesinde 6 farklı ahşap modül ile 12 saatte istenilen şekillerde kesilmiş ve vida kanalları belirlenen noktalarda delinmiştir. Vida bağlantıları ise manuel olarak uygulanmıştır (Thoma ve diğer., 2018).



Şekil 4.80 Uzaysal ahşap montajları görseli (Pintos, 2020)

Altıncı ve son aşama ise 80-120 mm kalınlığa sahip Hafif ve Yarı Saydam Cephe adı verilen, DFAB Evi için özel olarak geliştirilmiş, sıkıştırılmış aerojel yalıtım dolgulu çift katmanlı bir ön gerilimli membran kaplama sistemidir. Sistem, ısıl köprüler oluşturmaksızın 8 metreye kadar olan uzunluklarda kesintisiz ve düzlemsel olmayan membran panellerin kullanımına olanak sağlamıştır. İç membran, Şekil 4.81’de görüldüğü gibi ahşap modüllere fabrikada monte edilmiş olup dış katman ise boşlukların aerojel ile pnömatik olarak doldurulmasından hemen önce sahada yerleştirilmiştir (Graser ve diğer., 2020).



Şekil 4.81 Hafif ve yarı saydam cephenin önceden gerilmiş iç membranlı görseli (Pintos, 2020)

Bu örnek, dijital üretimin olanaklarının gerçekte olan bağlantılarını göstermesi bakımından oldukça önemlidir. Gerçek bir ortamda, tam ölçekli bir inşaatın dijital fabrikasyon ile üretiminde sağlayabileceğı kolaylıkları ve sınırlamaları anlayabilmek için birden fazla yöntemi aynı anda ele almaya çalışan bu örnek, aynı zamanda disiplinler arası ve kuruluşlar arası yapılan ortak bir emeğin sonucudur.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR

Tez çalışmasında, yeni yapım teknolojilerinden olan inşa robotlarının mimari yapım süreçlerine yönelik bilimsel literatüre dayanan bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Robotların genel kullanımlarından yapım süreçlerinde kullanımına yönelik tündengelim bir araştırma yapılmıştır. Bu kapsamda, inşa robotlarının sınıflandırılması, bu robotların kullandığı üretim teknikleri, uygulama alanları ve kullanılabilecek malzemeler yönelik teorik bilgi verilmiştir. Bu bağlamda, yapım yaklaşımlarının ve üretim tekniklerinin uygulamalarda nasıl olduğunu gösterebilmek amacıyla 22 adet yapı incelenmiştir. İncelenen yapılar, yapım yaklaşımları, üretim teknolojileri, inşa robotlarının hareket mekanizmaları ve malzemelere göre karşılaştırılmıştır (Tablo 5.1), (Tablo 5.2), (Tablo 5.3). Çalışma kapsamında incelenen ve karşılaştırılan 22 adet yapı örneğinde inşa robotlarının uygulama ve üretim süreçlerinde kullanılmasının sağladığı katkılar ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, uygulamada farklı prensiplerde çalışan inşa robotlarının ne şekilde çalıştığına dair sonuçlar elde edilmiştir. İncelenen yapı örneklerinin 13 tanesi eklemeli üretim, 2 tanesi çıkarmalı üretim, 3 tanesi birleştirmeli üretim, 3 tanesi biçimlendirmeli üretim ve 1 tanesi de eklemeli, çıkarmalı, biçimlendirmeli ve döküm ile üretim tekniklerini içermektedir.

Yapım süreçlerine yeni girmiş fakat kullanım alanları hızla genişleyen inşa robotları hem akademide hem de pratikte yeni çalışma alanları ortaya çıkarmıştır. Ülkemizde kullanımı henüz yaygınlaşmayan ancak dünya çapında birçok ülkede uygulama alanı ve malzeme kullanımı denemeleri yapılan bu yeni yapım teknolojisinin sosyal, ekonomik ve sürdürülebilirlik kriterleri altında iyi anlaşılması ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Çalışmanın sonucunda yeni yapım teknolojisi olarak inşa robotlarının kullanılmasının sağladığı potansiyel katkılar aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

-İnşa robotları ile tasarım aşamasından uygulamanın sonuna kadar denetimli ve kontrollü üretim yapıldığından ilk aşamada öngörülen zamana uymak geleneksel yöntemlerle inşa edilenlere göre olasılığı arttırmaktadır.

-Sürdürülebilir yapım süreçleri ana amaçlardan biri olduğundan kullanılan ham madde ve ortaya çıkan atıkların miktarı düşürülmüştür.

-Bazı projeler için kullanılan hammaddelerden artanlar bir sonraki proje için kullanılabilir.

-Ham madde bazı projeler için doğal kaynaklardan elde edilirken bazı projelerde yeni malzeme üretimi araştırmalarını arttırmaktadır.

-Yapım süreçlerinin kısaltması çevresel etkileri azaltmaktadır.

-Tasarımın formu açısından esneklik sağlanabilse de günümüz projeleri kısıtlı çalışma alanları ve yüksekliklerine sahiptir.

-İnsanlar için uygun olmayan fiziksel koşullarda dahi çalışabildikleri için aksaklıkların yaşanma olasılıkları azaltılmaktadır.

-İnsan kaynaklı oluşabilecek ve projenin seyrini değiştirebilecek problemler elimine edilmiştir.

-Yerinde veya fabrika ortamında üretim yapılabilirdiğinden gerek yapının tamamı gerekse yapı elemanlarının üretimi yapılabilir.

-Üretim süreçleri hızlı bir şekilde gerçekleştirilebildiğinden acil durumlara kalıcı çözümler oluşturulabilir.

Projelerin planlama ve ön tasarım aşamalarından başlayarak karar verilmesi gereken kriterlerden olan yapım teknolojileri, malzeme seçimleri veya malzeme geliştirmeleri, oluşacak atık miktarlarının ve kullanılacak enerjinin hesaplanması, robotların geliştirilmesi, uygulama alanları, kullanılacak robotun parametreleri başından sonuna mimarların ve mühendislerin disiplinlerarası çalışmasını gerektirmektedir.

İnşa edilmesi istenen yapılarda kullanılacak olan inşa robotlarının seçimi için; uygulama alanı, kullanılacak üretim tekniği, tasarım için en uygun olacak robotun çalışma prensipleri, yapının ne kadarının robotla inşa edileceği, yerinde veya fabrikada üretimden hangisinin uygulamasının proje için uygun olduğu, optimum malzemenin belirlenmesi gibi kriterler önemlidir. Uygulama sonunda optimum sonuçlar almak için değişen her bir parametre için seçilecek veya geliştirilecek inşa robotu tekrardan gözden geçirilmelidir.

Tablo 5.1 Tez kapsamında incelenen yapılar ve özellikleri

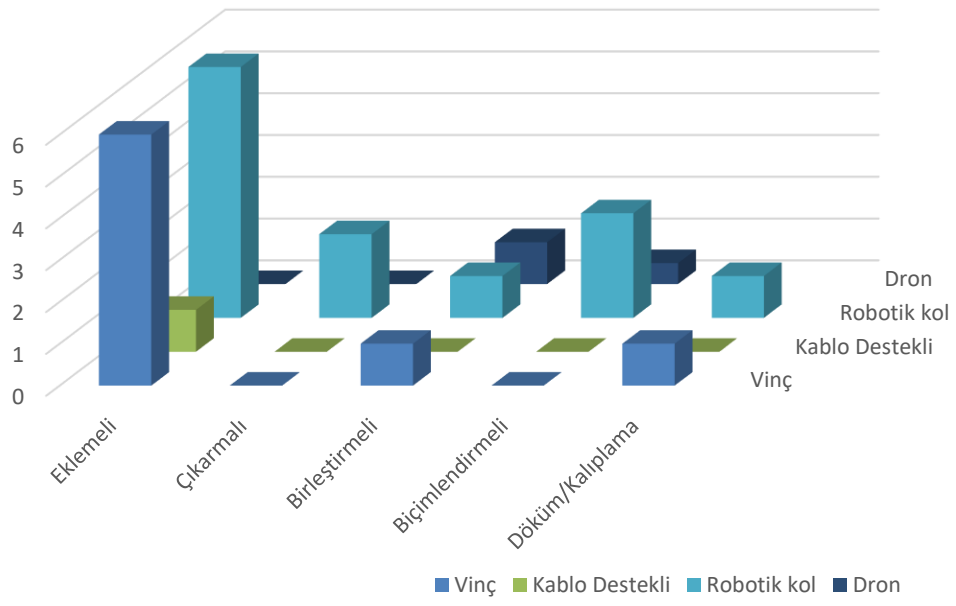
No	Yapı	Yıl	Yer	Süre	Fonksiyon	Maliyet	Form	Alan	Üretim Tipi
4.1.1	Radiolaria Pavyonu	2008	Pisa/İtalya	10 gün	Kamu Yapısı	-	Organik	9 m ²	Vineç
4.1.2	Lewis Grand Oteli Parti Evi Eklmesi	2015	Angeles/Filipinler	100 saat	Otel	-	Dikdörtgen	131 m ²	Vineç
4.1.3	Floutsam&Jetsam Pavyonları	2016	Miami/ABD	2519 saat	Kamu Yapısı	-	Amorf	85 m ²	Robotik kol
4.1.4	Dubai Gelecek Vakfı Genel Merkezi	2016	Dubai/Birleşik Arap Emirlikleri	19 gün	Ofis Kompleksi	140.000 \$	Dikdörtgen	250 m ²	Robotik kol
4.1.5	HuaShang Tengda Konağı	2016	Pekin/Çin	45 gün	Konut	-	Dairesel ve dikdörtgen	400 m ²	Vineç
4.1.6	Apis Cor Beton Evi	2016	Moskova/Rusya	24 saat 30 dk	Konut	10.134 \$	Dairesel	38 m ²	Robotik kol- vineç
4.1.7	3D Housing 05	2018	Milano/İtalya	1 hafta	Konut	1 m ² için 1000€	Dairesel	100 m ²	Robotik kol
4.1.8	MX3D Yaya Köprüsü	2018	Amsterdam/Hollanda	6 ay	Kamu Yapısı	-	Organik	79 m ²	Robotik kol
4.1.9	Trabeculae Pavyonu	2018	Milano/İtalya	4352 saat	Kamu Yapısı	-	Çift eğrilikli yüzey	36 m ²	Kablo destekli sistem
4.1.10	Gaia Evi	2018	Ravenna/İtalya	10 gün	Konut	900	Dairesel	20 m ²	Vineç
4.1.11	Dubai Belediye Binası	2019	Dubai/Birleşik Arap Emirlikleri	-	Kamu Binası	-	Çember parçalarından oluşturulmuş geometri	640 m ²	Robotik kol- vineç
4.1.12	Booshan Yaya Köprüsü	2019	Şangay/Çin	450 saat	Kamu Yapısı	-	Dairesel kemer	52 m ²	Robotik kol
4.1.13	TECLA	2021	Ravenna/İtalya	200 saat	Konut	-	Yarı küre	100 m ²	Vineç
4.2.1	Zincir Eğrisi Pavyonu	2010	Langental, İsviçre	-	Kamu yapısı	-	Zincir eğrisi	-	Robotik kol
4.2.2	Devlet Bahçesi Sergi Salonu	2014	Stuttgart, Almanya	7 hafta	Müze	-	Kubbe	125 m ²	Robotik kol
4.3.1	The Vertical Village Enstelasyonu	2011	Orléans, Fransa	18 saat	Enstelasyon	-	Organik form	9,5 m ²	Drone robotlar
4.3.2	The Sequential Roof	2016	Zürich, İsviçre	-	Çatı	-	Bezier eğrilikli yüzey	2308 m ²	Vineç
4.3.3	BUGA Ahşap Pavyonu	2019	Heilbrom, Almanya	-	Kamu yapısı	-	Çift eğrilikli yüzey	500 m ²	Robotik kol
4.4.1	ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2015-16	2016	Stuttgart, Almanya	-	Kamu yapısı	-	Çift eğrilikli yüzey	85 m ²	Robotik kol
4.4.2	ICD/ITKE Araştırma Pavyonu 2016-17	2017	Stuttgart, Almanya	-	Kamu yapısı	-	Organik form	40 m ²	Robotik kol ve drone
4.4.3	BUGA Fiber Pavyonu	2019	Heilbrom, Almanya	-	Kamu yapısı	-	Organik form	400 m ²	Robotik kol
4.5.1	DFAB Evi	2019	Dübandorf/İsviçre	22 gün	Konut	-	Kompleks form	200 m ²	Vineç-robotik kol

Tablo 5.2 Tez kapsamında incelenen yapıların üretim tekniklerine göre malzeme dağılımı

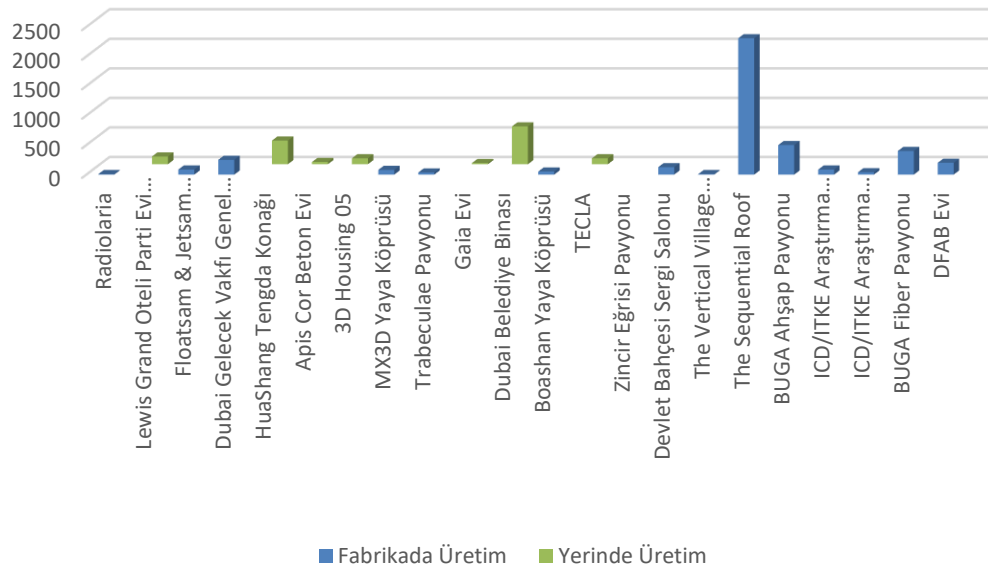
Üretim teknikleri	Eldeatıl Üretim					Çekimatl/Öretim					Bileşimatl Üretim					Beynelatmatl Üretim					Düzelat Kalıplamlat Üretim				
	Malzeme	Metall	Plastik	Ahşap	Kompozit	Seramik	Metall	Plastik	Ahşap	Kompozit	Seramik	Metall	Plastik	Ahşap	Kompozit	Seramik	Metall	Plastik	Ahşap	Kompozit	Seramik	Metall	Plastik	Ahşap	Kompozit
Özellat																									
Robatlat Pavyat	X																								
Lewis Grand																									
Qedi Part Eri	X																								
Elamati																									
Flattat & Beton Pavyatlat					X																				
Düat Gışat					X																				
Vıldat Genel																									
Medat																									
Plaklat	X																								
Tengat Kavat																									
Apas Cör Batat	X																								
Eri																									
3D Havat	X				X																				
MXD Yapı		X																							
Kırtat																									
Talacat			X																						
Pavyat																									
Gıat İri	X																								
Düat Bolat	X																								
Batı																									
Batıat Yapı					X																				
Kırtat																									
TXLA	X																								
Zıat Eri			X																						
Pavyat																									
Düat Batı																									
Sorg Sıat									X																
The Vertical Village														X											
Ematıat																									
The Sequential																									
Roof																									
BUGA Alıat														X											
Pavyat																									
KDİRE																									
Anıat																									
Pavyat 2015-16															X										
KDİRE																									
Anıat																									
Pavyat 2016-17																									
BUGA Eri																									
Pavyat																									
DEA Eri					X												X								X

Tablo 5.3 Tez kapsamında incelenen yapıların uygulamasında kullanılan robotların hareket mekanizmalarının karşılaştırılması

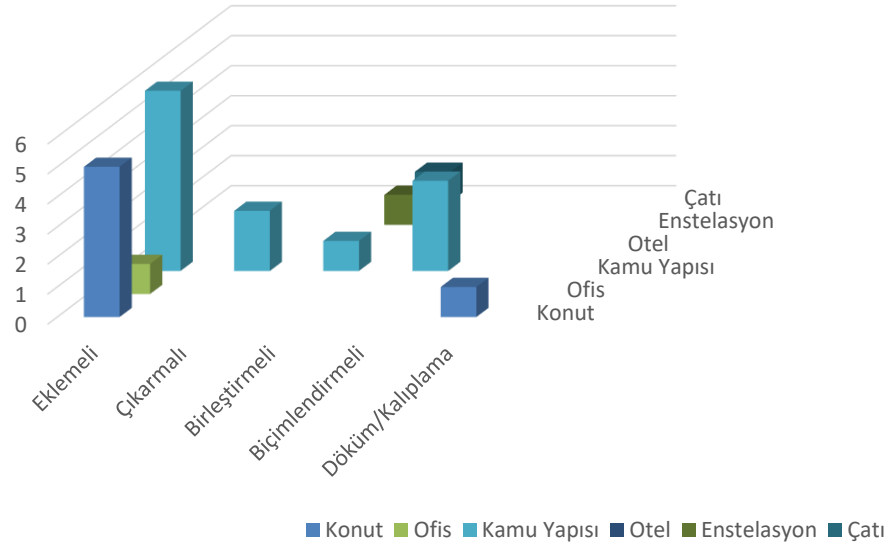
Robotların Çalışma Prensipleri	Kartzyon				Süslendirik				Delta				4 Eksenli				6 Eksenli			
	Yenide Üretim	Parça	Model	Bütün	Yenide Üretim	Parça	Model	Bütün	Yenide Üretim	Parça	Model	Bütün	Yenide Üretim	Parça	Model	Bütün	Yenide Üretim	Parça	Model	Bütün
Robotların				X																
Lewis Grand Oteli	X																			
Pamir Evi (Eklenen)																				
Florian & Jeanm																				
Pavilion																				
Dubai Guleck Valfi																				
Grand Metre																				
Huashang Tugela	X																			
Exonib																				
Apur Cor Beton Evi					X															
3D Housing 05																				
MXSD Yıyn																				
Exonib																				
Traficline Pavyon																				
Gün Evi																				
Dubai Bedelye																				
Banco					X															
Boudun Yıyn																				
Exonib																				
TECLA					X															
Zincir Eğri Pavyon																				
Devlet Bahçesi Sığı																				
Silvan																				
The Vertical Village																				
Enzaiyayon																				
The Sequential Roof																				
BUGA Akap																				
Pavyon																				
ICD ITKE Anapama																				
Pavyon/2015-16																				
ICD ITKE Anapama																				
Pavyon/2016-17																				
BUGA Filer																				
Pavyon																				
DEAB Evi																				



Şekil 5.1 İnşa robotları ile üretilmiş yapıların üretim teknikleri ve üretim mekanizmalarına göre dağılımı



Şekil 5.2 İnşa robotları ile üretilmiş yapıların üretim yaklaşımı ve alanlarına göre dağılımı



Şekil 5.3 İnşa robotları ile üretilmiş yapıların üretim teknikleri ve kullanım fonksiyonlarına göre dağılımı

Tablo 5.1’den okunabileceği gibi bir yapının bütününün en hızlı şekilde yerinde inşa edildiği örnek Apis Cor Beton Evi olup 24 saat 30 dakikada yazdırma işlemi tamamlanmıştır. Eklemeli üretim dışındaki tekniklerde üzerinde çalışılan ve inşa edilen örneklerin çoğu prototip oluşturma için üniversitelerin dış paydaşlarla birlikte geliştirdikleri projeler olduğundan süre konusunda çıkarımlar yapmak güçtür. Ayrıca, her ne kadar inşa robotlarının yapım süreçlerinde kullanımı ekonomik olarak iddia edilse de gerek prototip üretimleri yapılmasından gerekse bazı projelerde karşılaşılan yeni prosedürlerden, maliyet bilgisi karşılaştırması yapmak zordur. Bunlara ek olarak, üretilen projelerin bazıları da üniversitelerde gerçekleştirilen araştırma projeleri olduklarından üretim süreçlerinde harcanan maliyetler sponsorlar tarafından karşılandığından bu bilgiye ulaşmak ve buna göre karşılaştırma yapmak da doğru çıkarımlar vermemektedir.

İncelenen örneklerin çoğu kamu yapısı olarak inşa edilmiş olup inşa robotları ile üretilmiş en büyük alana sahip örnek 640 m2’lik alan ile Dubai Belediye Binası’dır. Ayrıca, örneklerin çoğu robotik kol ve vinç üretim tipi kullanılarak üretilmiş olup kablo destekli ve sürü yaklaşımli çalışan robotlar için birer örnek mevcuttur. Çünkü, robotik kolların üretimi ve değişen projelere adaptasyonu kolaydır. Buna ek olarak,

robotik kolların hareket esnekliğinden dolayı dairesel ve organik formlu uygulamaların çoğunda tercih edilirken dikdörtgen formluların çoğu ise vinç üretim tipini kullanmaktadır.

İncelenen örneklerde eklemeli üretim tekniğiyle çalışan inşa robotlarının çoğunun İtalya ve Çin’de üretildiği ve geliştirildiği görülürken diğer tekniklerde üretilen inşa robotları ise Almanya ve İsviçre’de geliştirilmektedir. Ülkelerin farklı tekniklere ve malzemelere yaklaşımının birbirinden farklı olduğu gerçeği ise bu tablodan anlaşılabilmektedir.

Tablo 5.2’de görüldüğü gibi incelenen örnekler arasında yeni malzeme denemeleri en çok eklemeli üretim tekniği için yapılmışken diğer üretim tekniklerinde ya daha önceden varolan malzemeler ya da bu malzemelere ilave edilen ek maddeler üzerinden çalışmalar yapılmıştır.

Tablo 5.2’den anlaşıldığı gibi incelenen örneklerde eklemeli üretim için en çok kullanılan malzeme seramik bazlı (toprak, kum, çimento, v.b.) malzemedir. Bunlara ek olarak, seramik bazlı malzemelere sonradan eklenen güçlendirme elemanlı örnekler de vardır. Bu üretim tekniğinde metal ve plastiklerle inşa edilmiş örnekler de mevcut olmasına rağmen ahşap kullanılmış örnek yoktur. Çıkarmalı üretim tekniğinde ise plastik ve ahşap malzemeler tercih edilmektedir. Ancak, örneklerin azlığından da anlaşılabileceği üzere bu üretim tekniği inşa süreçlerinde eklemeli üretimde olduğu gibi gelişmemiştir. Birleştirmeli ve biçimlendirmeli üretim teknikleri, yalnızca seramik bazlı malzemelerin tek başına kullanılacağı projeler için tercih edilmezken döküm/kalıplama ile üretim tekniğinde seramik bazlı malzeme kullanılmıştır. Ancak, bu teknik de çıkarmalı üretimde olduğu gibi örneklerin az sayıya olmasından kaynaklı çıkarımlar için yetersizdir.

Tablo 5.3’te belirlenen kriterler sonucunda çıkarılan sonuçlardan biri eklemeli üretim tekniğinde genellikle yapının bütünü yerinde inşa edilmiş olup fabrikada bütünü üretilmiş 2 adet, parçası üretilmiş 3 adet ve modülü üretilmiş 2 örnek mevcuttur. Diğer üretim tekniklerinde ise ICD/ITKE araştırma Pavyonu 2016-17

örneği dışında hepsinin ya parçası ya da modülü fabrikada üretilip yerinde monte edilmiştir.

Tablo 5.3'te yapıların üretiminde kullanılan robotların hareket mekanizmaları verilmiştir. Ancak, bu tabloda görülmektedir ki dronların kullanıldığı örneği, diğer örneklerde olduğu gibi sınıflandırmak mümkün değildir. Çünkü, dronlar genellikle bir operatör yardımıyla veya tam otonom şekilde çalışıp istenilen yön ve konumlarda uçabilme serbestliğine sahiptirler.

Tablo 5.1 ve 5.3 birlikte incelendiğinde dikdörtgen formlu yapıların çoğunun kartezyende çalışan robotlarla üretildiği ve sadece eklemeli üretimde bu çalışma prensibine sahip robotların tercih edildiği görülmüştür. Dairesel, organik ve amorf formlar için ise silindirik, delta, 4 ve 6 eksenli robotlar tercih edilmiş olup biçimlendirme ve birleştirmeli üretimde kullanımları oldukça yaygındır.

Şekil 5.1'de incelenen örnekler çerçevesinde kullanılan inşa robotlarının üretim teknikleri ve üretim mekanizmalarının dağılımı görülmektedir. Bu grafikten anlaşılacağı üzere, genel olarak her üretim tekniğinde robotik kollar kullanılabilir. Ancak, vinç ile üretim mekanizması çıkarmalı ve biçimlendirmeli üretim tekniklerinde tercih edilmemiştir.

Şekil 5.2'de inşa robotları ile üretilmiş örneklerin üretim yaklaşımlarına bağlı olarak yapıların alanlarındaki metrekaresinden değişimler irdelenmek istenmiştir. Grafikten anlaşıldığı gibi, fabrikada üretilip yerinde montaj yapılan örneklerde daha büyük alanlara ulaşabilmektedir.

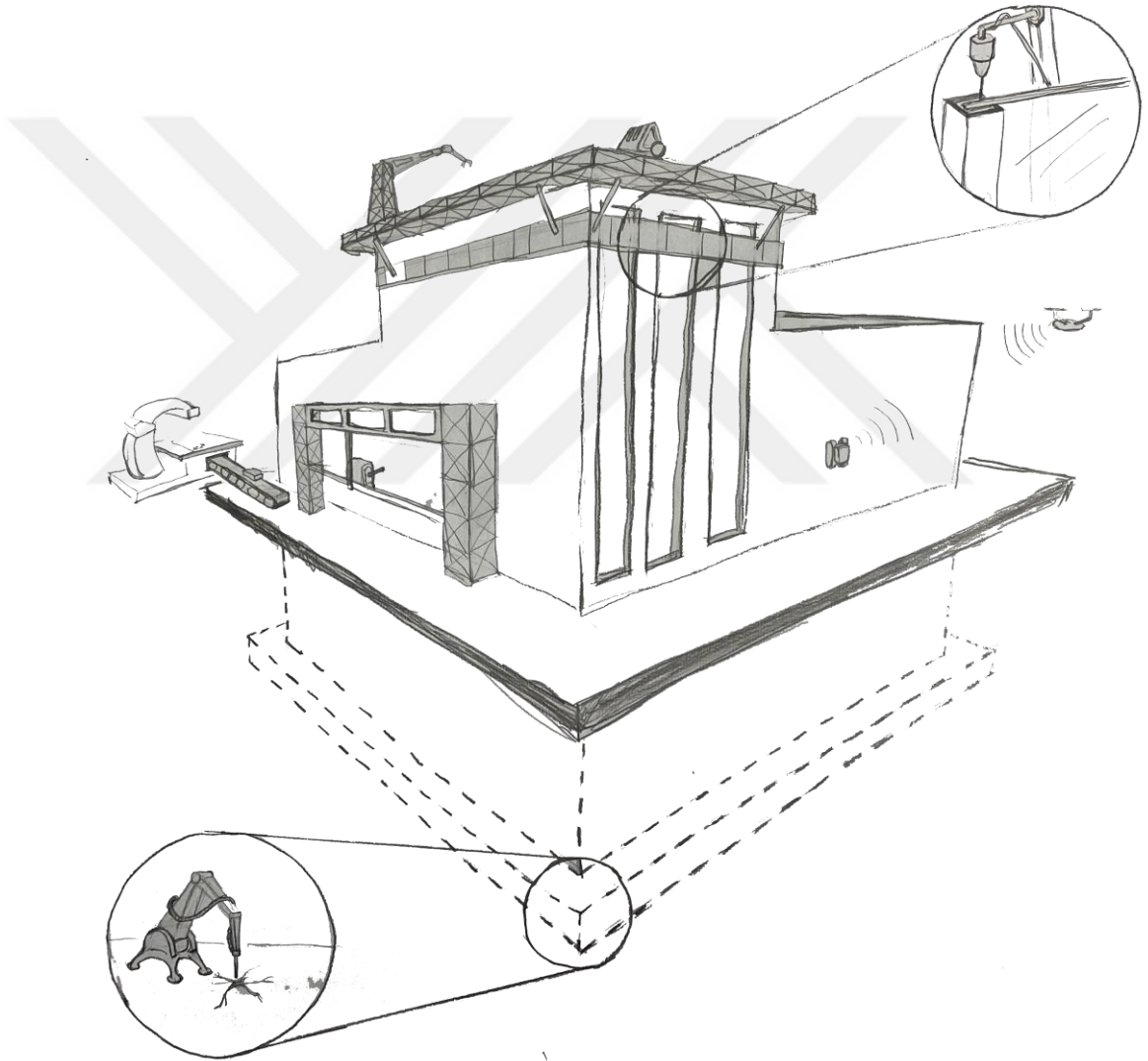
Şekil 5.3'de ise inşa robotları ile üretilmiş yapıların kullanım fonksiyonlarına ve üretim teknikleri arasındaki sayısal bağlantı kurulmak istenmiştir. Döküm/ kalıplama ile üretim hariç bütün üretim tekniklerinde kamu yapıları inşa edilmiştir. Özellikle, eklemeli üretim tekniğinin diğer üretim tekniklerine göre daha yaygın olmasından kaynaklı konut üretimi için en çok kullanılan teknik olarak gözlemlenebilmektedir.

Yukarıda verilmiş olan bütün tablolardan çıkarılacak net sonuçlar; inşa robotlarının mimari yapım süreçlerine dahil olması ile kesin ve net üretimler gerçekleştirilebilmektedir. İnsan faktörünün minimize edildiği uygulamalarda doğru ve hatasız üretimler gerçekleştirilebilmiş böylece süreç geleneksel yöntemlerle inşaya kıyasla çok daha hızlı gerçekleştirilmiştir. İnsan eliyle yapılması imkansız olan form ve üretimlere ekstra zaman ve maliyet harcamadan ulaşıldığı görülmüştür. Robotların inşaat süreçlerine girmeye başlaması çok yeni olduğundan, bu sisteme uygun malzemeler üretmeye çalışılmaya başlanmıştır. Böylece, hem akademik anlamda yeni araştırmalara konu olabilecek üretimler gerçekleştirilebilmektedir hem de pratikte yeni uygulama alanları doğmaktadır.

İnşa robotlarının gelecekte kullanımına yönelik bu tez çalışmasından ulaşılan öngörüler ise şu şekildedir: İnşa robotlarının araştırma hızının artması gelecekte yaşanabilecek olan afetler ve acil durumlar için kalıcı çözümler oluşturabileceği gibi geleneksel yapılaşma süreçlerinde kullanılan malzemelerin yerine sürdürülebilir malzemeler kullanılması da çevre için oldukça etkili çözümler oluşturabilir; inşa robotları, yakın gelecekte planlanan farklı gezegenlerde kurulacak kolonileşmeler için potansiyel çözümler sunabilecektir. Çünkü, malzeme ve insan gücünü dünyadan taşımak yerine o gezegenlerde olan yerel malzemeler ile robotların ek çaba sarf etmeden üretim yapması öngörülmektedir. Ayrıca, bu robotların sadece üretim süreçlerinde değil veri toplama, analiz etme ve senkronizasyon gibi noktalarda da sürece daha fazla dahil olup otonomluk derecelerinin artırılması yönündedir.

Gelecekte inşaat sektörünün seyrini baştan sona değiştirebilecek olan inşa robotları, yapım süreçleri için devrim niteliğindedir. Temelden çatıya kadar inşa robotları tarafından üretilen uygulamaların yapılacağı varsayılmaktadır. Böylece, inşaat süreçlerinde yepyeni formların ve üretim şekillerinin kullanılabileceği yeni bir döneme girilecektir. Örneğin gerek zeminde gerek kurulmuş bir vinç üzerinde çalışabilen birden fazla inşa robotunun birbirleri ile senkronize olarak aynı anda farklı görevler yapabilecekleri sistemler kurulabilir. Şekil 5.4'te gösterildiği gibi kurulan platformlar süspansiyon sistemlerine sahip olup her kat yüksekliğinde bir üst kata kendini taşıyabilecek ve böylece sabit malzemelerle istenilen uzunlukta yapılar inşa

edilebilecektir. Ayrıca halihazırda üretilmiş yapılar üzerinde gezebilen örümcek robotlarla üretim dikey yönde ilerleyebilir. Bunlara ek olarak; günümüz teknolojilerinde yapının doğramaları genellikle yapının üretimi tamamlandıktan sonra manuel olarak takılmaktadır. Bu noktada eklemeli üretim mantığı ile çalışan ancak beton yerine cam basabilen robotların duvar örebilen robotla bağlantı kurup doğramaları da basması mümkün olacaktır. Böylece, temelden çatıya kadar bütün üretim ve yapım süreci inşa robotları ile gerçekleştirilmiş olacak ve yapım süreçlerinde yeni bir dönem başlamış olacaktır.



Şekil 5.4 İnşa robotlarının gelecekte kullanımının öngörüsü üzerine yapılmış çalışma

Bunlara ek olarak, dronların serbestlik derecelerinin diğer robot türlerine göre daha fazla olmasından dolayı inşaat sektöründe kullanım alanlarının geliştirilmesi büyük olanaklar sağlayacaktır. Örneğin, inşa robotu olarak kullanılacak dronların taşıma kapasiteleri arttırılarak tuğla gibi yapı malzemelerini taşımak yerine yapının modüllerini taşıyıp önceden programlanmış olan lokasyonlara konumlandırmak için kullanılabilirler. Gerek hücresel prefabrikasyon için gerekse yerinde üretim için gelecekte dronların yapım süreçlerinde kullanımı üretim süreçlerindeki verimlilik açısından büyük katkılar sağlayacaktır.

Günümüzde genellikle yerinde üretim yapan robotların çoğunda eklemeli üretim tercih edilirken diğer üretim tekniklerinde ise fabrikada üretim tercih edilmektedir. Gelecek çalışmalarda, bu üretim tekniklerinde de yerinde üretim yapan inşa robotlarının sayısı arttırılabilir. Ayrıca, incelenen örneklerden görülebileceği gibi günümüz inşa robotlarının boyutları oldukça büyüktür. Bu nedenle, yerinde üretim yapabilmek için bu robotların inşaat sahasına taşınması maliyetleri ortaya çıkmaktadır. Bu duruma çözüm olarak, gelecek uygulamalarda ve çalışmalarda daha küçük boyutlara sahip robotların sahada kullanımı hem taşıma maliyetlerini azaltacak hem de robotun kurulumu için harcanan süre minimize edilecektir.

Çoğunlukla günümüz üretimlerinde gördüğümüz tek görevli robotlar yerine gelecekte iş birlikçi robotların sayısı artacaktır. Böylece, üretim süresi azalacak ve daha esnek çalışma koşulları sağlanabilecektir. Ancak, buna ek olarak, çok görevli robotların da yapım süreçlerine daha fazla dahil olması ile de yerinde veya fabrikada üretimde çalışma alanları basitleştirilebilir.

Bu tez çalışması kapsamında belirlenen inşa robotlarının yapım süreçlerine katkıları dikkate alındığında gelecekte yapılabilecek bilimsel çalışmalar için öneriler şunlardır: Araştırma ve prototipleme amacıyla yapılan uygulamaların zaman ve maliyet verilerinin yayınlaması, inşa robotlarının tercih edilmesinde yönlendirici ve ulaşılması beklenen amaçlar için kanıt oluşturması açısından etkili olabilir; çıkarmalı, birleştirmeli, biçimlendirmeli, döküm/kalıplama ile üretim üzerine daha fazla çalışmalar yapılarak yapı elemanı boyutlarında üretimlerin yer aldığı projelerin

sayılarının arttırılması sağlanabilir; üretim tekniklerinde kullanılan robotların malzeme skalasının genişletilmesi açısından yapılan çalışmaların detaylarının paylaşılması ham madde kullanımı yerine doğal malzeme kullanımının teşvik edilmesine yardımcı olabilir.



KAYNAKLAR

1891-1893 – Steam Man – Prof. George Moore, (b.t.). 26 Kasım 2020, <http://cyberneticzoo.com/steammen/1891-1893-steam-man-prof-george-moore-canadianamerican/>.

3D Housing 05 (b.t). 17 Temmuz 2020, <https://www.3dhousing05.com>.

3D print canal house, (b.t.a). 17 Nisan 2020, <https://3dprintcanalhouse.com/construction-technique>.

3D print canal house, (b.t.b). 16 Haziran 2020, <https://archello.com/project/kamermaker>.

3D printed house by Apis Cor entirely created in one day, (b.t). 27 Temmuz 2020, <https://www.arch2o.com/3d-printed-house-apis-cor/>.

3D printer, (b.t.). 15 Ekim 2018, <https://www.apis-cor.com/en/3d-printer>.

3D printing a home for under \$10,000, (b.t). 27 Temmuz 2020, <https://www.apis-cor.com/gallery>.

3D printing materials bendlay laywood laybrick, (b.t.). 26 Haziran 2020, <http://3dprintingforbeginners.com/3d-printing-materials-bendlay-laywood-laybrick/>.

3D printing: The future of construction, (2018). 17 Nisan 2020, <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-construction-310120184/>.

3D yazıcı filament özellikleri, (b.t.). 4 Mayıs 2020, <https://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/39-3d-yazici-filament-ozellikleri>.

3DStartup: Apis Cor, creators of the 3D printed house, (2018). 26 Kasım 2020, <https://www.3dnatives.com/en/apis-cor-3d-printed-house-060320184/#!>.

About MX3D, (2018b). 21 Temmuz 2020, <https://mx3d.com/company/about/>.

ABS, (b.t.). 26 Haziran 2020, <https://pagev.org/abs>.

Adam, H. (2014). *Holzkonstruktionen, digital fabrizier*. 02 Aralık 2020, <https://www.proholz.at/zuschnitt/53/holzkonstruktionen-digital-fabriziert/>.

AlphaGo, (b.t.). 26 Kasım 2020, <https://deepmind.com/research/case-studies/alphago-the-story-so-far>.

Alvarez, M., Wagner, H. J., Groenewolt, A., Krieg, O. D., Kyjanek, O., Sonntag, D., Bechert, S., Aldinger L., Menges, A. ve Knippers, J. (2019). The Buga wood pavilion. *Acadia*, 490-499.

Anoma Stone. (b.t.). 7 Temmuz 2020, <https://www.anomastone.com/>.

Apis Cor. (2017). *Apis Cor: first residential house has been printed!*. 14 Nisan 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=xktwDfasPGQ>.

Apolinarska, A., Bärtschi, R., Furrer, R., Gramazio, F. ve Kohler, M. (2016). Mastering the sequential roof. *Advances in architectural geometry*, 240-259.

Artuğ, S. ve Altun, M. C. (2019). 3 boyutlu baskı teknolojisinin bina üretiminde kullanım olanaklarının güncel örnekler üzerinden incelenmesi. *4th international congress on 3D printing*, Antalya, Turkey.

Asimo, (b.t.). 26 Kasım 2020, <https://asimo.honda.com/asimo-history/>.

Asimov'dan yapay zekâya: Robotların büyüleyici tarihi, (2018). 20 Mart 2020, <http://tr.fujitsu-news.com/2018/10/19/asimovdan-yapay-zekaya-robotlarin-buyuleyici-tarihi/>.

Augugliaro, F., Lupashin, S., Hamer, M., Male, C., Hehn, M., Mueller, M. W. ve D'Andrea, R. (2014). The flight assembled architecture installation: cooperative construction with flying machines. *IEEE Control Systems Magazine*, 34(4), 46-64.

Barandy, K. (2019). *The world's largest 3D printed concrete bridge is completed in Shanghai*. 04 Aralık 2020, <https://www.designboom.com/architecture/shanghai-3d-printed-concrete-bridge-jcda-01-21-19/>.

- Barnett, E., ve Gosselin, C. (2015). Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot. *Additive Manufacturing*, 7, 27-44.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business horizons*, 55(2), 155-162.
- Bidgoli, A. (2015). *Towards an integrated design making approach in architectural robotics*. Yüksek Lisans Tezi, Pennsylvania State Üniversitesi, Pennsylvania.
- Biyo bazlı plastikler*, (b.t.). 26 Haziran 2020, <https://pagev.org/biyo-bazli-plastikler>.
- Block, I. (2020). *Foster + Partners adopts Spot the Boston Dynamics robot dog*. 5 Ocak 2021, <https://www.dezeen.com/2020/11/13/foster-partners-adopts-spot-the-boston-dynamics-robot-dog/>.
- Bn Peters. (b.t.). *Spiderbot: Large scale 3D printer*. 11 Haziran 2020, <http://www.bn timers.com/spiderbot.html#>.
- Bock, T. (2015). The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. *Automation in Construction*, 59, 113-121. 20 Mart 2020, Elsevier veritabanı.
- Bodea, S., Dambrosio, N., Zechmeister, C., Gil Pérez, M., Koslowski, V., Rongen, B. ve Menges, A. (2020). BUGA fibre pavilion: towards robotically-fabricated composite building structures. *Fabricate*, 234-245.
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., ve Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209-225.
- Bosscher, P., Williams II, R. L., Bryson, L. S., ve Castro-Lacouture, D. (2007). Cable-suspended robotic contour crafting system. *Automation in construction*, 17(1), 45-55. 11 Haziran 2020, Elsevier veritabanı.
- Boston Dynamics. (b.t.a). *Atlas*. 26 Kasım 2020, <https://www.bostondynamics.com/atlas>.

- Boston Dynamics. (b.t.b). *Legacy robots*. 25 Nisan 2020, <https://www.bostondynamics.com/legacy>.
- Boyd, J. (2017). *Sony unleashes new Aibo robot dog*. 26 Kasım 2020, <https://spectrum.ieee.org/autaton/robotics/home-robots/sony-advanced-aibo-robot-dog-unleashed>.
- Burlington, M. (2005). *Z Corporation Ships Spectrum Z510 3D Printing Systems*. 17 Nisan 2020, <https://www.3dsystems.com/press-releases/z-corporation-ships-spectrum-z510-3d-printing-systems>.
- Busta, H. (2016). *Gensler completes the world's first 3D-Printed office Building*. 04 Ağustos 2020, https://www.architectmagazine.com/technology/gensler-designs-the-worlds-first-3d-printed-office-building-in-dubai_o.
- Buswell, R. A., Soar, R. C., Gibb, A. G., ve Thorpe, A. (2007). Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in construction*, 16(2), 224-231. 29 Nisan 2020, Elsevier veritabanı.
- Buswell, R. A., Thorpe, A., Soar, R. C., ve Gibb, A. G. (2008). Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. *Automation in Construction*, 17(8) içinde (923-929). 29 Nisan 2020, Elsevier veritabanı.
- Camacho, D. D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R. ve Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry—A forward-looking review. *Automation in construction*, 89, 110-119.
- Cartesian robot*, (b.t.). 16 Mart 2021, <https://www.tss.trelleborg.com/en/upcoming/robotics/application-examples/cartesian-robot>.
- Ceccanti, F., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., ve Pambaguian, L. (2010). 3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil. *61st International Astronautical Congress* içinde (1-9). Prag.

- Celsus Kütüphanesi-Efes*, (2015). 7 Temmuz 2020, <https://tarihvearkeoloji.blogspot.com/2015/07/celsus-kutuphanesi-efes.html>.
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V. ve Pambaguian, L. (2014). Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, 93, 430-450.
- Chiusoli, A. (2018). *The first 3D printed house with earth Gaia*. 26 Kasım 2020, <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/>.
- Chiusoli, A. (2021). *Tecla | a 3d printed global habitat for sustainable living*. 05 Şubat 2021, <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>.
- Clarke, C. (2017). *French BatiPrint3D project to construct house with “inside-out” 3D printing*. 26 Kasım 2020, <https://3dprintingindustry.com/news/french-batiprint3d-project-construct-house-inside-3d-printing-110099/>.
- Collaborative Project with Dubai Municipality*, (2019). 17 Nisan 2020, <https://www.apis-cor.com/dubai-project>.
- Construction Robotics. (b.t.). *SAM100*. 25 Nisan 2020, <https://www.construction-robotics.com/sam100/>.
- Construction Robots. (b.t.). *Construction's Most Advanced Rebar Installation Equipment*. 29 Nisan 2020, <https://www.constructionrobots.com/>.
- Contour Crafting. (b.t.). *Technologies for building immediate infrastructure on the moon and mars for future colonization*. 26 Haziran 2020, <https://www.contourcrafting.com/space>.
- Cousineau, L., ve Miura, N. (1998). *Construction robots: the search for new building technology in Japan*. ASCE Publications.
- Daas, M. (2018). Being thinking doing becoming: Framing robotics in architecture. M. W. Daas, A. J. Wit, (Ed.), *Towards A Robotic Architecture* içinde (12-27). San Francisco: AR+D.

Daas, M. ve Wit, A. J. (2018). Robotic Production in Architecture. M. Daas ve A. J. Wit (Ed.), *Towards a robotic architecture* (28-62). Novato: ORO Editions.

Daas, M. ve Wit, A. J. (2018). The Affordances of Robotic Production. *ARCC konferans kayıtları*.

Daniels Construction. (2018). *Comparing the on-site vs. off-site (modular or pre-engineered) commercial construction methods*. 14 Nisan 2021, <https://constructionbydaniels.com/comparing-the-on-site-vs-off-site-modular-or-pre-engineered-commercial-construction-methods/>.

Delta Robot Nedir ve Nerelerde Kullanılır, (b.t.). 16 Mart 2021, <http://www.robottechnic.com/delta-robot-nedir-ve-nerelerde-kullanilir.html#.XqyyKqgzZPY>.

Deng, D., ve Chen, Y. (2013). An origami inspired additive manufacturing process for building thin-shell structures. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 56185, p. V02AT02A016). American Society of Mechanical Engineers, San Diego, USA.

Di Carlo, T., Khoshnevis, B. ve Chen, Y. (2013). Manufacturing additively, with fresh concrete. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers.

Dörfler, K., Hack, N., Sandy, T., Giftthaler, M., Lussi, M., Walzer, A. N. ve Kohler, M. (2019). Mobile robotic fabrication beyond factory conditions: case study mesh mould wall of the DFAB house. *Construction Robotics*, 3(1), 53-67.

Drones unmanned aerial vehicles, (b.t.). 16 Mart 2021, <https://electricalfundablog.com/drones-unmanned-aerial-vehicles-uavs/>.

D-Shape, (b.t.). 17 Nisan 2020, <https://d-shape.com/>.

Dubai Project, (2019). 17 Temmuz 2020, <https://www.apis-cor.com/dubai-project>.

Eliport, (2018). 25 Nisan 2020, <https://medium.com/eliport/what-are-autonomous-robots-and-why-should-we-care-538bb804704b>.

Emerging Objects. (b.t.a). 8 Haziran 2020, <http://www.emergingobjects.com/about/>.

Emerging Objects. (b.t.b). *Our 3D printed design & material innovations*. 8 Haziran 2020, <http://emergingobjects.com/portfolio/>.

ESA. (2019). *All instruments onboard Rosalind Franklin rover*. 29 Nisan 2020, http://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ExoMars/All_instruments_onboard_Rosalind_Franklin_rover.

First 3D printed hotel, plans to print thousands of homes in the Philippines next, (2015). 6 Aralık 2020, <https://3dprint.com/94558/3d-printed-hotel-lewis-grand/>

Fitzpatrick, T. (2014). *Skanska collaborates to create world's first commercial concrete printing robot*. 27 Eylül 2020, <https://www.constructionnews.co.uk/news/contractors-news/skanska-collaborates-to-create-worlds-first-commercial-concrete-printing-robot-24-11-2014/>.

Flight assembled architecture, 2011-2012 FRAC centre Orléans, (b.t). 13 Aralık 2020, <http://www.gramaziokohler.com/web/d/installationen/209.html>.

Floatsam & Jetsam, (b.t.a). 25 Ağustos 2020, <https://www.shoparc.com/projects/design-miami/>.

Floatsam & Jetsam, (b.t.b). 25 Ağustos 2020, <https://architizer.com/projects/flotsam-jetsam/>

Furby, (b.t.). 26 Kasım 2020, <https://robots.ieee.org/robots/furby/?gallery=video1>.

Galjaard, S., Hofman, S. ve Ren, S. (2015). New opportunities to optimize structural designs in metal by using additive manufacturing. *Advances in architectural geometry 2014* içinde (79-93). Cham: Springer.

- Galjaard, S., Hofman, S., Perry, N. ve Ren, S. (2015). Optimizing structural building elements in metal by using additive manufacturing. *Proceedings of IASS Annual Symposia*, 1-12.
- Gardiner, J. (2011). *Exploring the emerging design territory of construction 3D printing - project led architectural research*. Doktora Tezi, RMIT Üniversitesi, Melbourne.
- Ge, Q., Qi, H. J., ve Dunn, M. L. (2013). Active materials by four-dimension printing. *Applied Physics Letters*, 103(13), 131901.
- Ghaffar, S. H., Corker, J., ve Fan, M. (2018). Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*, 93, 1-11. 20 Mart 2020, Elsevier veritabanı.
- Graser, K., Baur, M., Apolinarska, A. A., Dörfler, K., Hack, N., Jipa, A. ve Kohler, M. (2020). DFAB house a comprehensive demonstrator of digital fabrication in architecture. *Fabricate 2020: Making Resilient Architecture*, 130-139.
- Gürgöze, G. ve Türkoğlu, İ. (2019). Kullanım alanlarına göre robot sistemlerinin sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(1), 53-66.
- Hack, N. P. (2018). *Mesh mould: a robotically fabricated structural stay-in-place formwork system*. Doktora Tezi, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Hack, N. ve Lauer, W. V. (2014). Mesh-mould: robotically fabricated spatial meshes as reinforced concrete formwork. *Architectural Design*, 84(3), 44-53.
- 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.
- Han, W., Jafari, M. A. ve Seyed, K. (2003). Process speeding up via deposition planning in fused deposition-based layered manufacturing processes. *Rapid Prototyping Journal*, 9(4), 212-218.

- Hanson Robotics. (b.t.). *Sophia*. 26 Kasım 2020, <https://www.hansonrobotics.com/sophia/>.
- Hiroshi Ishiguro Laboratories, (b.t.). 26 Kasım 2020, <http://www.geminoid.jp/en/index.html>.
- Howarth, D. (2015). *Neri Oxman's new glass printing technique could lead to 3D-printed glass building facades*. 28 Kasım 2020, <https://www.dezeen.com/2015/08/26/neri-oxman-3d-printing-transparent-glass-sculptural-structures-mediated-matter-mit-media-lab/>.
- Howe, A. S., Wilcox, B., McQuin, C., Mittman, D., Townsend, J., Polit-Casillas, R., ve Litwin, T. (2014). Modular additive construction using native materials. *Earth and Space 2014*, 301-312.
- Hunt, G., Mitzalis, F., Alhinai, T., Hooper, P. A. ve Kovac, M. (2014). 3D printing with flying robots. *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4493-4499.
- Hwang, D., Khoshnevis, B. ve Daniel, E. (2004). Concrete wall fabrication by contour crafting. *21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2004)*, Jeju, South Korea, 301-307.
- İstanbul Cezeri Müzesi*, (b.t.). 26 Kasım 2020, <https://www.cezerimuzesi.com/aljazari>.
- Jaje, J. (2017). Types of CNC machining [Broşür]. Autodesk.
- Jakupovic, A. (b.t.). *Minibuilders project-report*. Barselona: IaaC.
- Joosten, S. K. (2015). *Printing a stainless steel bridge: An exploration of structural properties of stainless steel additive manufactures for civil engineering purposes*. Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, Delft.
- Jordahn, S. (2018). *Arup and CLS Architetti's 3D-printed house was built in a week*. 17 Temmuz 2020, <https://www.dezeen.com/2018/11/19/video-mini-living-3d-printing-cls-architetti-arup-movie/>.

- Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., ve Khoshnevis, B. (2017). Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, 145, 639-647.
- Khoshnevis, B. (2003). Toward total automation of on-site construction an integrated approach based on contour crafting. *20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 61-66.
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. *Automation in construction*, 13(1), 5-19. 25 Mart 2020, Sciencedirect veritabanı.
- Khoshnevis, B., Russell, R., Kwon, H., ve Bukkapatnam, S. (2001). Crafting large prototypes. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 8(3), 33-42.
- Kilobots, (b.t.). 29 Nisan 2020, <https://ssr.seas.harvard.edu/kilobots>.
- Krieg, O. D., Schwinn, T., Menges, A., Li, J. M., Knippers, J., Schmitt, A. ve Schwieger, V. (2015). Biomimetic lightweight timber plate shells: computational integration of robotic fabrication, architectural geometry and structural design. Block, P., Knippers, J., Mitra, N. J. ve Wang W. (Ed.) *Advances in architectural geometry 2014* içinde 109-125. Cham: Springer.
- Kroll, E. ve Artzi, D. (2011). Enhancing aerospace engineering students' learning with 3D printing wind-tunnel models. *Rapid Prototyping Journal*, 17(5), 393-402.
- KUKA. (b.t.). *Robots used in architecture: KUKA robot manufactures components for Bundesgartenschau pavilion*. 29 Nisan 2020, <https://www.kuka.com/en-us/industries/solutions-database/2019/05/icd-carbon-fiber>.
- Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., ve Rüther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in construction*, 72, 347-366. 29 Nisan 2020, Elsevier veritabanı.

- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. ve Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and structures*, 45(8), 1221-1232.
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G. ve Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(3), 558-566.
- Lenssen, J. R. (1995). *A building revolution: How ecology and health concerns are transforming construction*. Washington, D.C: Worldwatch Institute
- Lewis Grand Hotel teams with Andrey Rudenko to develop world's first 3D printed hotel, planning 3D printed homes.* (2015). 6 Aralık 2020, <https://www.3ders.org/articles/20150909-lewis-grand-hotel-andrey-rudenko-to-develop-worlds-first-3d-printed-hotel.html>.
- Li, Y. ve Liu, C. (2019). Applications of multirotor drone technologies in construction management. *International Journal of Construction Management*, 19(5), 401-412.
- Li, Z., Wang, L. ve Ma, G. (2018). Method for the enhancement of buildability and bending resistance of 3D printable tailing mortar. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 1-12.
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G., ve Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction*, 21, 262-268.
- Lim, S., Buswell, R. A., Valentine, P. J., Piker, D., Austin, S. A. ve De Kestelier, X. (2016). Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components. *Additive Manufacturing*, 12, 216-230.
- Lloret Fritschi, E. (2016). *Smart Dynamic Casting-A digital fabrication method for non-standard concrete structures*. Doktora Tezi, ETH Zürich.

- Lloret Fritschi, E., Reiter, L., Wangler, T., Gramazio, F., Kohler, M. ve Flatt, R. J. (2017). Smart dynamic casting: slipforming with flexible formwork-inline measurement and control. *HPC/CIC Tromsø 2017*.
- Ludman, E. (2019). *Robots expected to overtake humans in construction by 2025*. 8 Haziran 2021, <https://chicagoagentmagazine.com/2019/12/24/robots-expected-to-overtake-humans-in-construction-by-2025/>.
- Ma, G., Li, Z. ve Wang, L. (2018). Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Construction and building materials*, 162, 613-627.
- Ma, G., Wang, L. ve Ju, Y. (2018). State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material-An emerging technique for construction. *Science China Technological Sciences*, 61(4), 475-495.
- Marble Eco Design, (b.t.). 26 Kasım 2020, <http://www.marbleecodesign.com/>.
- Maria Yablonina. (b.t). *Mobile robotic fabrication system for filament structures*. 29 Nisan 2020, <https://www.mariayablonina.com/mobile-robotic-fabrication-system>.
- Marijnissen, M. ve van Der Zee, A. (2017). 3D concrete printing in architecture. a research on the potential benefits of 3D concrete printing in architecture. *Material Studies–Methodologies*, (2), 299-308.
- Martel, A. (2017). *The 4 types of FFF / FDM 3D printer explained*. 16 Mart 2021, <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/>.
- Mechtcherine, V., Nerella, V. N., ve Kasten, K. (2014). Testing pumpability of concrete using sliding pipe rheometer. *Construction and Building Materials*, 53, 312-323.
- Meibodi, M. A., Jipa, A., Giesecke, R., Shammass, D., Bernhard, M., Leschok, M. ve Dillenburger, B. (2018). Smart slab computational design and digital fabrication of a lightweight concrete slab. *Acadia*, 434-443.

- Menges, A. ve Knippers, J. (2016). *ICD/ITKE Research pavilion 2015-16*. 05 Aralık 2020, <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2015-16/>.
- Menges, A. ve Knippers, J. (2017). *ICD/ITKE Research pavilion 2016-17*. 03 Mart 2021, <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2016-17/>.
- Menges, A. ve Knippers, J. (2019a). *BUGA wood pavilion 2019*. 07 Aralık 2020, <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-wood-pavilion-2019/>.
- Menges, A., Knippers, J. (2019b). *BUGA fibre pavilion 2019*. 18 Aralık 2020, <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/buga-fiber-pavilion/>.
- Menges, A., Schwinn, T. ve Krieg, O. D. (2015). Landesgartenschau Exhibition Hall. *Interlocking Digital and Material Cultures*, (55-71). Londra: Anagram Books.
- Molitch-Hou, M. (2016). *400 square meter villa 3d printed in just 45 day*. 23 Ağustos 2020, <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/12415/400-SquareMeter-Villa-3D-Printed-Onsite-in-Just-45-Days.aspx>.
- Moretti, F. (2018). *Trabeculae Pavilion 3d printed by Delta WASP*. 31 Temmuz 2020, <https://www.3dwasp.com/en/trabeculae-pavilion-3d-printed-by-delta-wasp/>.
- Morgante, A. (2011). Radiolaria pavillion. R. Glynn ve B. Sheil, (Ed.), *Fabricate: making digital architecture* içinde (232 – 235). Londra: UCL Press.
- MuDa. (2018). *Gramazio Kohler: The Sequential Roof [8/11]*. 7 Ekim 2020, https://www.youtube.com/watch?v=EBQS67_Us8k.
- Multi-tasking robots – doing the dangerous work, so humans don't have to*, (b.t.). 29 Nisan 2020, <https://stfc.ukri.org/news-events-and-publications/features/multi-tasking-robots/>.
- Murphy, S. V. ve Atala, A. (2014). 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature biotechnology*, 32(8), 773-785.

- MX3D bridge, (2018). 21 Temmuz 2020, <https://mx3d.com/industries/infrastructure/mx3d-bridge/>.
- MX3D, (b.t.). 18 Haziran 2020, <https://mx3d.com/company/about/>.
- MX3D. (2018, 1 Nisan). *MX3D printed bridge update 2018* [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=STAHy6hTP14>.
- Naboni, R., Breseghello, L. ve Kunic, A. (2019). Multi-scale design and fabrication of the Trabeculae Pavilion. *Additive Manufacturing*, 27, 305-317.
- NASA. (b.t.). *Mission timeline summary*. 26 Kasım 2020, <https://mars.nasa.gov/msl/timeline/summary/>.
- Navrotsky, V., Graichen, A. ve Brodi, H. (2015) Industrialisation of 3D printing (additive manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing, *VGB PowerTech*, 12(2015), 48–52.
- NCCR Digital Fabrication. (2019). *DFAB house: Fact sheet*. 18 Eylül 2020, <https://www.empa.ch/web/s604/dfabhouse?inheritRedirect=true>.
- Nematollahi, B. ve Sanjayan, J. (2014). Efficacy of available superplasticizers on geopolymers. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(7), 1278-1282.
- Nematollahi, B., Xia, M. ve Sanjayan, J. (2017). Current progress of 3D concrete printing technologies. *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (34). IAARC Publications.
- Nerella, V. N., Näther, M., Iqbal, A., Butler, M. ve Mechtcherine, V. (2019). Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction. *Cement and Concrete Composites*, 95, 260-270.
- New China TV. (2016). *World's first 3D-printed house that can withstand 8.0-magnitude quake*. 27 Nisan 2020, https://www.youtube.com/watch?v=OloOc21_u80.

- Nof, S. Y. (2009). Automation: What it means to us around the world. *Springer handbook of automation* içinde (13-52). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Noorani, R. (2017). *3D printing: technology, applications, and selection*. Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL: CRC Press.
- Oberti, I. ve Plantamura, F. (2015). Is 3D printed house sustainable?. *Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale*, 173-178.
- Office of the future, (b.t). 04 Ağustos 2020, <https://www.dubaifuture.gov.ae/our-initiatives/office-of-the-future/>.
- Osman Mühendislik. (b.t.). CNC freze nedir?. 5 Nisan 2021, <https://osmamuhendislik.com/cnc-freze-nedir/#:~:text=CNC%20freze%20tezgah%C4%B1%2C%20%C3%BCzerinde%20birden,yapma%20gibi%20ama%C3%A7lar%20i%C3%A7in%20kullan%C4%B1l%C4%B1r..>
- Öztürk, İ.E. ve Öztürk, G. B. (2018). The future of 3D printing technology in the construction industry: a systematic literature review. *Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2(2), 10-24.
- Pearson, A. (b.t.). A look at how the industry began. 17 Nisan 2020, <https://www.stratasys.com/explore/article/3d-printing-history>.
- Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in construction*, 5(5), 427-437.
- Perkins, I. ve Skitmore, M. (2015). Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*, 15(1), 1-9.
- Pintos, P., (2020). *DFAB house / NCCR digital fabrication*. 20 Ocak 2021, <https://www.archdaily.com/942221/dfab-house-eth-zurich-plus-nccr-digital-fabrication>.

PLA vs ABS: Which is best for your 3D printing needs?, (2020). 26 Haziran 2020, <https://pagev.org/biyo-bazli-plastikler>.

Rael, R., ve San Fratello, V. (2011). Developing concrete polymer building components for 3D printing. *ACADIA 2011*, 152-157.

Richardson, M. (2014). *From art to part*. 17 Nisan 2020, <https://www.aero-mag.com/from-art-to-part/>.

ROB. (b.t.). *Timber Construction*. 7 Temmuz 2020, <https://rob-technologies.com/timber-construction>.

Robert H. (2007) Think formwork-reduced cost. *Structure Magazine*, 12–14.

Robot kollar – eklemlı robotlar, (b.t.). 16 Mart 2021, <http://www.robotpark.com.tr/blog/tum-robot-tipleri/sabit-robotlar/robot-kollari-eklemlı-robotlar/>.

Robotik Sistem, (b.t.). 20 Mart 2020, http://www.robotiksistem.com/robot_nedir_robot_tasarimi_yapimi.html.

Saidi, K.S., O'Brien, J.B., ve Lytle, A.M. (2008). Robotics in construction. B.Siciliano ve O. Khatib, (Ed.), *Springer handbook of robotics* içinde (1079-1100). Berlin: Springer Science+Business Media.

Sakin, M., ve Kiroğlu, Y. C. (2017). 3D printing of buildings: construction of the sustainable houses of the future by BIM. *Energy Procedia*, 134, 702-711.

Sanfratello, R. (b.t.). *Saltygloo*. 17 Nisan 2020, <https://www.rael-sanfratello.com/made/saltygloo>.

Scott, C. (2016). *HuaShang Tengda 3D print house*. 10 Haziran 2020, <https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-print-house/>.

Scott, C. (2017). *Apis Cor 3d prints a house in 24 hours and creates a technological showcase*. 27 Temmuz 2020, <https://3dprint.com/166389/apis-cor-3d-printed-house-russia/>.

- Silindirik robotlar*, (b.t.). 16 Mart 2021, <http://www.robotpark.com.tr/blog/tum-robot-tipleri/sabit-robotlar/silindirik-robotlar/>.
- Skanska. (b.t.). *New techniques and material in the heart of the city*. 16 Haziran 2020, <https://www.skanska.co.uk/expertise/projects/57267/6-Bevis-Marks/>.
- Smart dynamic casting* (b.t.). 02 Ocak 2021, <https://dfabhouse.ch/smart-dynamic-casting/>.
- Smith, D. (2012). Printed buildings: an international race for the ultimate in automation. *Construction Research and Innovation*, 3(2), 26-31.
- Statista. (b.t.). *Major countries in worldwide cement production from 2010 to 2020*. 16 Haziran 2020, <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>.
- Stone, M. (2020). *Meet Charles Hull, inventor of stereolithography*. 17 Nisan 2020, <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/meet-charles-hull-inventor-of-stereolithography/>.
- Strauss, H. (2013). *An envelope: the potential of additive manufacturing for facade constructions* (1.Baskı). Delft: CreateSpace Independent Publishing Platform .
- Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J. ve Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261-276.
- Tay, Y. W., Panda, B., Paul, S. C., Tan, M. J., Qian, S. Z., Leong, K. F. ve Chua, C. K. (2016). Processing and properties of construction materials for 3D printing. *Materials Science Forum*, 177-181.
- The Catenary Pavilion, Langenthal*, (b.t.) 11 Şubat 2021, <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/191.html>.

The sequential roof, Zurich, 2010-2016 digital assembly of a complex roof structure,
(b.t.). 02 Aralık 2020,
<https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/201.html>.

Thoma, A., Adel, A., Helmreich, M., Wehrle, T., Gramazio, F. ve Kohler, M. (2018). Robotic fabrication of bespoke timber frame modules. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design* içinde (447-458). Cham: Springer.

Tkáč, M. ve Mésároš, P. (2019). Utilizing drone technology in the civil engineering. *Journal of Civil Engineering*, 14(1), 27-37.

Toğay, A. ve Sağıroğlu, Ö. (2019). 3 boyutlu baskı teknolojilerinin mimarlık ve inşaat alanında kullanımında mevcut değerlendirmesi. *4th international congress on 3D printing*, Antalya, Turkey, 1327-1336.

Turner, B. (2009). *Radiolaria pavilion by Shiro Studio*. 18 Haziran 2020, <https://www.dezeen.com/2009/06/22/radiolaria-pavilion-by-shiro-studio/>.

Twigg, M. (2016). *Story of world's first industrial-scale 3D printer is a story of sacrifice*. 17 Nisan 2020, <https://www.scmp.com/magazines/post-magazine/long-reads/article/2050702/story-worlds-first-industrial-scale-3d-printer>.

Uygunoğlu, T., Özgüven, S., ve Topçu, İ. B. (2019). 3D teknolojisi ile yapı malzemesi üretimindeki gelişmeler. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(3), 279-288.

Üç boyutlu metal baskı ile inşa edilen köprü: MX3D Bridge, (2019). 21 Temmuz 2020, <https://www.arkitera.com/haber/uc-boyutlu-metal-baski-ile-insa-edilen-kopru-mx3d-bridge/>.

Vähä, P., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P., Järviluoma, M., ve Gambao, E. (2013). Extending automation of building construction—Survey on potential sensor technologies and robotic applications. *Automation in construction*, 36, 168-178.

- Valente, M., Sibai, A. ve Sambucci, M. (2019). Extrusion-based additive manufacturing of concrete products: revolutionizing and remodeling the construction industry. *Journal of Composites Science*, 3(3), 88.
- Walsh, N. P. (2019). *World's largest 3d-printed concrete pedestrian bridge completed in China*. 4 Kasım 2020, <https://www.archdaily.com/909534/worlds-largest-3d-printed-concrete-pedestrian-bridge-completed-in-china>.
- WASP. (b.t.a). *Crane wasp*. 11 Haziran 2020, <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>.
- WASP. (b.t.b). *Ceramic 3D printing*. 28 Kasım 2020, <https://www.3dwasp.com/en/ceramic-3d-printing-wasp-clay/>.
- WASP. (b.t.c). *BigDelta Wasp 12m*. 8 Haziran 2020, <https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/>.
- Whittaker, W. L. (1986). Construction robotics: a perspective. *CAD and Robotics in Architecture and Construction* içinde (105-112). Boston: Springer.
- Archdaily*, (2012). 11 Haziran 2020, <https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten>.
- Winsun 3D. (b.t.). *2015 global highest 3D printing building*. 16 Haziran 2020, http://www.winsun3d.com/En/Product/pro_inner_5/id/102.
- Winsun, (2016). 16 Haziran 2020, <https://futureofconstruction.org/case/winsun/>.
- Wu, P., Wang, J., ve Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21-31.
- Xia, M. ve Sanjayan, J. (2016). Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications. *Materials & Design*, 110, 382-390.
- Xu, W., Gao, Y., Sun, C. ve Wang, Z. (2020). Fabrication and application of 3D-printed concrete structural components in the Baoshan pedestrian bridge project. *Fabricate*, 4, 140-147. 4 Kasım 2020, JSTOR veritabanı.

Yağız, A. (2020). *3B yazıcı teknolojisine giriş*. 13 Aralık 2020, <https://bilgeis.net/tr/courses/15/3-boyutlu-yazici-teknolojisine-giris>.

Yuan G. (2019). *The world's largest concrete 3D printed pedestrian bridge*. 21 Mart 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=C5e0PfTMXGU>.

