

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

3 BOYUTLU BETON BASKI TEKNOLOJİSİNİN MALİYET ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet HACIOĞLU

HAZİRAN - 2025

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

3 BOYUTLU BETON BASKI TEKNOLOJİSİNİN MALİYET ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet HACIOĞLU

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kadir KILINÇ

HAZİRAN – 2025

“3 BOYUTLU BETON BASKI TEKNOLOJİSİNİN MALİYET ANALİZİ” adlı tez çalışması **Samet HACIOĞLU** tarafından hazırlanmış olup aşağıdaki jüri tarafından **OY BİRLİĞİ** ile Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Kadir KILINÇ
Kırklareli Üniversitesi

.....

Jüri Üyeleri:

Doç. Dr. Burak ÖZŞAHİN
Kırklareli Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Aylin AKYILDIZ
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

.....

Tez Savunma Tarihi: 04/06/2025

.....
Doç. Dr. H. HALE KARAYER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Kırkırelı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Samet HACIOĞLU
04/06/2025

ÖZET

3 BOYUTLU BETON BASKI TEKNOLOJİSİNİN MALİYET ANALİZİ

Samet HACIOĞLU

Yüksek Lisans

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kadir KILINÇ

Haziran 2025, 207 sayfa

Küresel olarak inşaat sektörü, küresel enerji tüketiminin % 40'ını ve karbon emisyonunun % 38'ini oluşturmaktadır. Bu nedenle, inşaat sektöründe dekarbonizasyon için büyük bir talep olmaktadır. 3 boyutlu baskı teknolojisi ile üretim, enerji taleplerini ve karbon emisyonlarını azaltmak için potansiyel bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. İnşaat 3D baskı teknolojisi, bina yapılarının hızını ve doğruluğunu artırarak, işçilik maliyetlerini, inşaat atıklarını ve insan sağlığına yönelik riskleri azaltarak büyük ilgi uyandırmaktadır. Son zamanlarda 3D baskılı beton, dünya çapında düşük maliyetli binaların üretimi için yenilikçi bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. 3D baskılı beton tekniği, geleneksel inşaat sistemlerine kıyasla hem maliyet hem de inşaat süresinde % 70'e varan önemli tasarruflar sağlayan binaların üretimine olanak tanımaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile inşaat yapımı, konvansiyonel inşaat yapımına kıyasla malzeme tüketimini azaltma, tasarımı optimize etme, inşaat süresini kısaltma, işçilik gereksinimlerini azaltma, lojistik talebi en aza indirme, sürdürülebilirliği iyileştirme ve maliyetleri düşürme potansiyeline sahip katmanlı bir yapım teknolojisidir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde maliyet hesabı, konvansiyonel yapım teknolojisindeki maliyet hesabından farklıdır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapım hem endüstriyel hem de yapı ürünü olarak tanımlanmıştır. Son yıllarda, endüstriyel ölçekli 3D baskı inşaat talebini karşılamak için büyük ölçekli 3D yazıcılar ve inşaat malzemeleri geliştirme konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Binaların ve yapısal bileşenlerin 3D beton baskı kullanılarak inşa edilmesi önemlidir. Bu tez çalışmasında 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin maliyet analizi kapsamlı olarak ele alınmıştır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi maliyetlerinin geleneksel yapım yöntemi maliyetleri ile karşılaştırılması ele alınarak 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin maliyet analizine yönelik yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İnşaat Sektörü, Karbon Emisyonu, 3D Baskı Teknolojisi, Maliyet Hesabı, Geleneksel Yapım Yöntemi

ABSTRACT

COST ANALYSIS OF 3D CONCRETE PRINTING TECHNOLOGY

Samet HACIOĞLU

MSc Thesis

Kırklareli University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Kadir KILINÇ

June 2025, 207 pages

Globally, the construction sector accounts for 40% of global energy consumption and 38% of carbon emissions. Therefore, there is a huge demand for decarbonization in the construction industry. Manufacturing with 3D printing technology has emerged as a potential solution to reduce energy demands and carbon emissions. 3D printing technology in construction is generating great interest by increasing the speed and accuracy of building structures, reducing labor costs, construction waste and risks to human health. Recently 3D printed concrete has emerged as an innovative material for the production of low-cost buildings worldwide. The 3D printed concrete technique enables the production of buildings with significant savings of up to 70% in both cost and construction time compared to traditional construction systems. 3D printed concrete construction is a layered construction technology that has the potential to reduce material consumption, optimize design, shorten construction time, reduce labor requirements, minimize logistical demand, improve sustainability and reduce costs compared to conventional construction. The cost calculation in 3D concrete printing technology is different from the cost calculation in conventional construction technology. Construction with 3D concrete printing technology has been defined as both industrial and building product. In recent years, significant progress has been made in developing large-scale 3D printers and construction materials to meet the demand for industrial-scale 3D printing construction. It is important that buildings and structural components are constructed using 3D concrete printing. In this thesis, the cost analysis of 3D concrete printing technology is comprehensively discussed. By comparing the costs of 3D concrete printing technology with the costs of traditional construction methods, a new approach to the cost analysis of 3D concrete printing technology is presented.

Keywords: Construction Industry, Carbon Emission, 3D Printing Technology, Cost Calculation, Traditional Construction Method

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim sırasında daha iyiye ulaşmam için benden desteğini esirgemeyerek bilimsel ufkumun genişlemesi için çaba sarf eden tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kadir KILINÇ’a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimde her aşamada desteği ve güler yüzlerini esirgemeyen Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyelerine çok teşekkür ederim.

Maddi, manevi destekleri için anneme, babama teşekkür ederim.

Son olarak; hayatımın her evresinde bana destek olan, varlığı ile hayatıma anlam katan eşim Dr. Öğr. Üyesi Özgenur HACIOĞLU’na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Samet HACIOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xvii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xviii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	5
1.2. Çalışmanın Araştırma Metodolojisi.....	5
1.3. Çalışmanın Araştırma Soruları.....	5
1.4. Çalışmanın Özgün Değeri.....	6
2. 3 BOYUTLU BETON BASKI TEKNOLOJİSİ.....	7
2.1. İnşaatta Çağdaş Dekarbonizasyon Yöntemleri.....	7
2.2. İnşaat Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Doğru Yeşil ve Dijital Dönüşüm...	8
2.3. İnşaat Sektörünün Otomasyonu.....	9
2.4. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisine Genel Bir Bakış.....	10
2.5. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Yöntemi.....	16
2.6. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Kullanımının Avantajları.....	16
2.7. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Teknolojik Yönleri.....	18

2.8. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Malzeme Özellikleri.....	19
2.9. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Teknoloji Uygulamaları.....	22
2.10. 3D Baskı Betonarme Teknolojisinin Teknolojik Yönleri.....	23
2.11. 3D Baskı Betonarme Teknolojisinin Malzeme Özellikleri.....	24
2.12. 3D Baskı Betonarme Teknolojisinin Teknoloji Uygulamaları.....	25
2.13. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinde Maliyet ve Zaman Analizi.....	25
2.14. 3D Baskı Yazıcı Otomatik Yapı Üretim Prensibi.....	29
2.15. 3 Boyutlu Yazıcıların Çalışma Prensibi.....	31
2.16. 3D Yazıcıların Üretim Teknikleri.....	31
2.16.1. Direkt katmanlı üretim.....	32
2.16.2. Polimerleşme.....	32
2.16.3. Stereolitografi (SLA).....	33
2.16.4. Polimer jet yöntemi (polyjet-multijet) modelleme.....	33
2.16.5. Dijital ışık yöntemi (digital light processing-dlp).....	33
2.16.6. Mikro stereolitografi (micro stereolithography).....	34
3. İNŞAATTA KULLANILAN 3D YAZICILAR.....	35
3.1. 3D Yazıcıların Avantajları ve Dezavantajları.....	35
3.1.1. 3D yazıcıların avantajları.....	35
3.1.2. 3D yazıcıların dezavantajları.....	35
3.2. Üç Boyutlu Yazıcı Betonunun Avantajları ve Dezavantajları.....	36
3.3. 3D Yazıcıların İşlevselliği.....	37
3.4. Basım Sektöründe 3D Yazıcılar.....	37
3.5. Üç Boyutlu Yazıcılarla Üretilen Yapı Elemanları.....	38
3.5.1. 3D baskı yazıcı ile çimento esaslı duvar üretimi.....	38
3.5.2. 3D baskı yazıcı ile yapı üretiminde donatı bağlanması.....	39
3.5.3. 3D baskı yazıcı ile üretilen seramik duvar elemanları.....	40

3.6. 3 Boyutlu Yazıcı Betonu.....	40
3.6.1. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi modelini inşa etme.....	40
3.6.2. Baskı teknikleri.....	41
3.6.3. Beton yapıların katmanlı imalatı.....	45
3.7. Beton Yapıların Kısa Tarihi.....	48
4. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEDEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	53
5. 3 BOYUTLU BETON BASKI TEKNOLOJİSİ PROSEDÜRÜ.....	65
5.1. Kontur İşçiliği.....	65
5.2. D-Şekli.....	65
5.3. Beton Baskı Süreci.....	66
5.4. Otomatik 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Özellikleri.....	66
5.4.1. Yapı özellikleri.....	66
5.5. Mimari Esneklik.....	67
5.6. Çevresel Özellikler.....	67
5.7. Yapısal Özellikler.....	67
5.7.1. Malzemelerdeki gelişmeler.....	68
5.7.2. Yapısal bütünlük.....	68
5.7.3. Yatay döşemelerin yapısal tasarımı.....	69
5.7.4. Yapısal davranış.....	69
5.8. 3D Baskı Harç Bileşenleri.....	70
5.8.1. Agregalar.....	70
5.8.2. Su/Çimento oranı.....	71
5.8.3. Kimyasal ve mineral katkıları.....	71
5.9. 3D Baskı Taze Harç Özellikleri.....	72
5.10. 3D Baskı Harçlarının Sertleşmiş Haldeki Özellikleri.....	74
5.11. 3D Baskılı Beton ve Özellikleri.....	77

5.11.1. 3D betonun karışım tasarımı ve beton özellikleri.....	78
5.12. 3D Baskılı Betonun Depreme Dayanıklı Yapı İnşaatında Potansiyel Kullanımı.....	81
5.13. İklim Değişikliğinin 3B Beton Yazıcılar ile Üretilmiş Yapılar Üzerindeki Etkisi.....	83
5.14. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisini Değerlendirme Faktörleri.....	83
5.14.1. Maliyet.....	83
5.14.2. Zaman.....	91
5.14.3. İşgücü.....	91
5.14.4. Kalite.....	92
5.14.5. Güvenlik.....	92
5.15. Mimarlık.....	92
5.16. Çevre Dostu.....	93
5.17. Yapının Ağırlığı.....	93
5.18. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Fonksiyonelliğinin ve Uygulamasının Değerlendirilmesi.....	94
5.18.1. Malzemeler.....	94
5.18.2. Yapısal dizayn.....	95
5.18.3. Süreç verimliliği.....	97
5.18.4. İşçilik.....	98
5.18.5. Lojistik.....	99
5.18.6. Çevresel etki.....	100
5.18.7. Maliyet.....	101
5.19. 3DPC ve 3DPRC'nin mekanik davranışı.....	102
5.19.1. 3D baskılı betonun mekanik özellikleri.....	102
5.19.2. 3DPRC'nin mekanik özellikleri.....	105

5.20. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin İkili Özelliği.....	106
5.21. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinde Maliyet Tahmini.....	107
5.21.1. Geleneksel konutun maliyet tahmini.....	107
5.21.2. Geleneksel olarak yapılmış bir evin maliyet tahmini.....	109
5.21.3. 3D baskılı evin maliyet tahmini.....	112
5.22. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Maliyet Hesaplamasını Etkileyen Faktörlerin Analizi.....	115
5.23. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Maliyet Hesaplama Yöntemi.....	122
5.23.1. Yapım sahası dışında 3 boyutlu beton baskı teknolojisi maliyet hesaplaması.....	122
5.23.2. Yapım sahası dışında 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde maliyet hesaplamasının analizi.....	123
5.24. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi için 3 Boyutlu Beton Baskı Maliyet Fayda Analizi.....	123
5.25. Performans Standartları için Prototip Testi ve Doğrulama.....	125
5.26. Uygulamalar: uzak yerlerde tamamlanmış ve planlanmış 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapım.....	127
5.26.1. İzole ortam vaka çalışması: uzay yerleşimleri.....	127
5.26.2. Uzak ortam vaka çalışması: düşük gelirli konut.....	129
5.26.3. Sefer ortamı vaka çalışması: askeri yapılar.....	129
5.27. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi ile İlgili Türkiye’de Yapılan Endüstriyel Ölçekte Üretimler.....	131
5.28. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknoloji ile İlgili Dünyadaki Mevcut Gelişmeler...	132
5.29. 3D Baskılı Beton Yapılarda Güncel Uygulamalar.....	134
5.30. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Kullanılarak Üretilmiş Yapı Örnekleri...	139
5.30.1. Çin’de 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanılarak yapılmış yapılar...	139
5.30.2. Dubai’de 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapılmış ofis.....	139

5.30.3. Suudi Arabistan projesi.....	140
5.30.4. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilmiş yaya beton köprüsü.....	140
5.30.5. Ürdün'de 3 boyutlu beton baskı teknolojisi uygulamaları.....	140
5.30.6. Güney Afrika'da bilim ve yenilik departmanının 3 boyutlu beton baskı teknolojisi proje programı ve pilot uygulaması.....	149
5.30.7. Dubai Al Aweer'de Bulunan 3D Baskılı Konut Villası Projesine Genel Bakış.....	169
6. 3 BOYUTLU BETON BASKI TEKNOLOJİSİ İLE İLGİLİ BİBLİYOĞRAFİK ANALİZ.....	177
6.1. Veri Kaynağı Analizi ve Metodoloji.....	178
6.2. Taranan Veri Sonuçları ve Tartışmalar.....	178
6.2.1. 2002'den 2022'ye yayınların çıktı özellikleri.....	178
6.2.2. B&C için 3D baskı yayınların kökeni.....	179
6.2.3. Başlıca araştırma bulguları.....	179
6.3. Seçilmiş Yayın Başlıkları İncelemesi.....	180
6.3.1. B&C'de 3D baskı son teknolojileri.....	181
6.4. Dijital İnşaat.....	182
6.4.1. Küçük kurucu.....	183
6.4.2. Mesh-kalıp yapım tekniği.....	183
6.5. Yapı Bilgi Modellemesi (BIM).....	184
6.6. B&C'de Beton 3D Baskı.....	184
6.7. 3D Baskı İnşaat Sistemleri.....	185
6.8. B&C'de 3D Beton Yazıcıları.....	185
6.9. Beton Ekstrüzyon Nozulları.....	186
6.10. Pompalama, Besleme ve Kontrol Sistemi.....	187
6.11. 3D Yazdırılabilir Malzemelerin Özellikleri.....	187

6.11.1. Pompalanabilirlik.....	188
6.11.2. Ekstrüde edilebilirlik.....	188
6.11.3. İşlenebilirlik.....	189
6.11.4. Çalışabilirlik Süresi.....	190
6.11.5. İnşa edilebilirlik (taşıtılabilirlik).....	192
6.11.6. Akışkanlık kontrolü.....	193
6.11.7. Zaman kontrolünün ayarlanması.....	197
6.11.8. Basınç dayanımı.....	197
6.11.9. Büzülme kontrolü.....	195
6.11.10. Kimyasal katkı maddelerinin seçimi.....	195
7. MEVCUT SINIRLAMALAR, ZORLUKLAR VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR	197
7.1. 3D İnşaat Baskısının Sınırlamaları.....	197
7.2. 3D İnşaat Baskısının Zorlukları.....	198
7.2.1. İstikrar ve akış dengesi.....	198
7.2.2. İşlenebilirliği korumak.....	199
7.2.3. Ekstrüzyon sonrası deformasyon olmaması.....	199
7.2.4. Köşelerde çatlak oluşmasını önlemek.....	199
7.3. Çoklu Nozul Kombinasyonu.....	199
7.4. 3D İnşaat Baskı Hibrit Sistemleri.....	200
7.5. Yeni Malzeme Geliştirme.....	200
7.6. Güçlendirme Özelliği.....	200
7.7. Baskı Parametrelerinin Optimizasyonu.....	201
7.8. 3D Beton Baskı için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA).....	201
7.9. Beton 3D Baskı için Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi (LCCA).....	201
7.10. Güvenlik ve Beceri Gereksinimi.....	202

7.11. Taze Halde Reoloji ve Ampirik Özellikler.....	202
7.12. Mekanik Özellikler.....	203
7.13. Dayanıklılık Özellikleri.....	203
7.13.1. Geçirimsizlik özellikleri ve donma-çözölmeye direnç.....	203
7.14. 3 Boyutlu baskılı betonda takviye çeliği.....	204
8. 3 BOYUTLU BETON MALİYETİ KARŞILAŞTIRMASI (USD).....	207
9. GENEL SONUÇLAR.....	209
KAYNAKLAR.....	211
ÖZGEÇMİŞ.....	217

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 2.1. Yaygın İnşaat Malzemelerinden Üretilen Karbon Emisyonları.....	8
Çizelge 2.2. Proje bileşenleri maliyet analizi.....	28
Çizelge 5.1. 3DPC'nin ekonomik değerlendirmesindeki çalışmalara genel bir bakış..	84
Çizelge 5.2. 3DPC ve geleneksel beton için kullanılan karma tasarım bileşenlerinin maliyeti \$ (milyon tümen)	87
Çizelge 5.3. 3DPC ve geleneksel beton için kullanılan karışım tasarımı.....	88
Çizelge 5.4. Farklı üretim yöntemlerinde parça maliyetlerinin ayrıştırılması \$ (milyon tümen)	89
Çizelge 5.5. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin ikili özelliği.....	115
Çizelge 5.6. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde maliyet hesaplamasını etkileyen faktörler.....	117
Çizelge 5.7. Yazdırılan bileşenlerin maliyet hesaplaması.....	119
Çizelge 5.8. Yerinde montaj maliyet hesaplaması.....	120
Çizelge 5.9. Farklı beton duvar yapıları için işçilik, malzeme, ekipman maliyetlerinin yüzde olarak dağılımı.....	124
Çizelge 5.10. Farklı beton duvar inşaat türleri için işçilik, malzeme, ekipman maliyetlerinin dolar cinsinden dağılımı.....	124
Çizelge 5.11. Karışım oranları.....	126
Çizelge 5.12. Düşük gelirli bir ev için standart metrajlar.....	153
Çizelge 5.13. Geleneksel tuğla ve harçla inşaat yönteminin nihai özeti.....	156
Çizelge 5.14. Robotik kol sistemi için maliyet karşılaştırması.....	160
Çizelge 5.15. Gantri sistemi için maliyet karşılaştırması	161
Çizelge 5.16. Temel proje parametrelerinin karşılaştırılması.....	164

Çizelge 5.17. Gerçek zamanlı maliyetlere göre iskonto oranının değiştirilmesi.....	165
Çizelge 5.18. Gelecekteki bileşik maliyetlerle duyarlılık analizi-konvansiyonel.....	166
Çizelge 5.19. İyimser ve kötümser tahmini hizmet ömrü (ESL)-konvansiyonel.....	166
Çizelge 5.20. LCC isteye bağlı değerlendirme özeti.....	167
Çizelge 5.21. Dört inşaat senaryosunun enerji tüketimi.....	174
Çizelge 8.1. Şirket Bazlı 1 m ² 3B Beton Duvar Maliyetleri(USD).....	207



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 2.1. 3D baskı yazıcı otomatik yapı üretim fazlarının şematik gösterimi	30
Şekil 5.1. İncelenen Binanın Planı	86
Şekil 5.2. Farklı inşaat yöntemlerinin iç ve dış duvar detayları; a) 3DPC, b) yığma yapılar, c) beton ve metal yapılar	87
Şekil 5.3. Farklı inşaat yöntemlerinin kalem bazında farklı inşaat yöntemlerinin maliyeti (milyon tümen).....	90
Şekil 5.4. Kalem bazında farklı üretim yöntemlerinin maliyeti (yüzde).....	90
Şekil 5.5. İncelenen geleneksel olarak yapılan evin planı	109
Şekil 5.6. Geleneksel olarak yapılan evin maliyetinin belirlenmesi	110
Şekil 5.7. Geleneksel olarak yapılan evin maliyetinin belirlenmesi-(devamı 1).....	111
Şekil 5.8. Geleneksel olarak yapılan evin maliyetinin belirlenmesi-(devamı 2).....	112
Şekil 5.9. 3D Baskılı Evin Maliyetinin Belirlenmesi	113
Şekil 5.10. 3D Baskılı Evin Maliyetinin Belirlenmesi-(devamı).....	114
Şekil 5.11. Kontur İşleme Tekniği Kullanılarak Endüstriyel Robotik Kollar Tarafından Basılmış Parçalar için Üretim Hattı Şeması (Bayrak ve Sarıtaş, 2024).....	134
Şekil 5.12. Konvansiyonel Yapım Planı (Allouzi ve ark., 2020).....	146
Şekil 5.13. Kontur İşçiliği yapım planı (Allouzi ve ark., 2020).....	148
Şekil 5.14. Metodolojik Yaklaşım (Ntakana ve ark.).....	152
Şekil 5.15. Tipik sübvansiyon evi kat planı	153
Şekil 5.16. LCC Ön Plan Yapısı.....	154

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim 2.1. 3D yazıcı ile inşa edilmiş bir ev	11
Resim 2.2. 3D baskılı beton teknolojisi süreci (Pessoa ve arkadaşlarının 2021 yılında gerçekleştirdiği çalışmadan alınmıştır).....	18
Resim 2.3. 3D baskı metodolojisi: (A) ve (B) Farklı açıklık kalınlıkları, (C) X yönünde yükleme, (D) Y yönünde yükleme ve (E) Z yönünde yükleme (Momeni ve ark., 2025).....	20
Resim 2.4. 3D baskılı beton. (A) Temel kol robotik, (B) Tanker tabanlı 3D yazıcı (MIT), (C) Mobil tabanlı 3D yazıcı, (D) WASP Company 3D yazıcı rayları ve (E) Çin Yeşil Baskı Şirketi.....	22
Resim 2.5. 3D baskı yazıcı ile a) harç filamentlerin basılması ve b) bükülmesi.....	30
Resim 3.1. Kontur İşçiliği (Ranjha ve ark., 2018).....	41
Resim 3.2. İlk yapılmış 3D Beton Baskılı Yapı (Breland, 2017).....	46
Resim 3.3. İlk Yapılmış 3D Beton Baskılı Otel.....	47
Resim 5.1. ICON tarafından yapılan 3D Baskılı bir ev	130
Resim 5.2. 3D Baskılı Kulübeler	130
Resim 5.3. İSTON'da geliştirilen 3D beton yazıcı kullanılarak üretilen ürünler	131
Resim 5.4. Çin'de Winsun Firması tarafından üretilen yapılar: (a) 4800\$ maliyeti olan 300 m2 tek katlı yapı (b) 5 katlı yapı	135
Resim 5.5. (a) Yaroslavi Evi'nin yapımında kullanılan malzeme M-300 kum betonu adı verilen çimento esaslı bir karışım (b) İSTON tarafından inşa edilen Türkiye'deki ilk 3DPC yapı (c) Alcobendas'ın ilk 3D baskılı yaya köprüsü	135
Resim 5.6. Geleceğin ofisi - 3D baskılı ofis; elektrik, su, telekomünikasyon ve hatta iklimlendirme sistemleri ile tamamen işlevsel bir bina	136
Resim 5.7. Apis Cor'un 3D baskı makinesi, binanın farklı bölümlerini inşa edebilmesi için yeniden konumlandırmak üzere bir vinç kullanılarak sahada hareket ettirilmiştir (Bayrak ve Sarıtaş, 2024).....	137
Resim 5.8. 24 saatlik inşaat sürecinden bir aşama (Bayrak ve Sarıtaş, 2024).....	138
Resim 5.9. Winsun Şirketi Tarafından Basılan Bina (Bayrak ve Sarıtaş, 2024).....	138

Resim 5.10. ABD Ordusu Mühendisler Birliği tarafından yürütülen ACES Projesi kapsamında inşa edilen 3DPC yapıları	139
Resim 5.11. Çelik ile dıştan bağlanan basılı segmentlerden oluşan betonarme kirişler	141
Resim 5.12. Robotik kol sistemi (Ntakana ve ark.).....	159
Resim 5.13. Gantry sistemi	161
Resim 5.14. 3DCP ile mümkün kılınan karmaşık geometrileri ve yenilikçi tasarım unsurlarını sergileyen villanın 3D modeli (Alqaryouti ve ark., 2024).....	170
Resim 5.15. İnşaat aşamasında 3DCP Villa (Alqaryouti ve ark., 2024).....	173
Resim 5.16. Render edilmiş 3DCP Villa (Alqaryouti ve ark., 2024).....	175



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
----------	-------------

\$	Dolar
%	Yüzde
°C	Santigratderece
C	Coulomb
cm	Santimetre
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
ft ²	Fitkare
g	Gram
gr/m ³	Gram/Metreküp
kg	Kilogram
kg/m ³	Kilogram/metreküp
kg/t	Kilogram/ton
km ³	Kilometreküp
kN	Kilonewton
m	Metre

m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
mm	Milimetre
mm/s	Milimetre/Saniye
MPa	Megapaskal
SiO_2	Silisyum dioksit
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı
T_m	Yarı erime noktası sıcaklığı
μm	Mikrometre

Kısaltmalar

Açıklamalar

2D	İki boyutlu
3B/3D	Üç boyutlu
3DPC	Üç boyutlu yazdırılmış beton
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
ACES	Otomatik Sefer Yapıları İnşası
BIM	Yapı bilgi modellemesi
BPÇ 52,5	Beyaz çimento
CAC	Kalsiyum alüminat çimentosu
CAD/CAM	Bilgisayar destekli üretim

CDW	İnşaat ve yıkım atıkları
CEM I 42,5 R	Portland çimentosu
CEM	Cement
CO₂	Karbondioksit
CR	Kiral
DFF	Dubai Gelecek Vakfı
DHS	İnsan yerleşimleri departmanı
DLP	Dijital ışık işleme
DSI	Bilim ve Yenilik Departmanı
ERDC-CERL	Amerika Birleşik Devletleri Ordusu Mühendisler Birliği Mühendis Araştırma ve Geliştirme Merkezi İnşaat Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı
FDM	Fused Deposition Modeling (Kaynaşmış biriktirme modellemesi)
FFF	Erimiş filament fabrikasyon
FRP	Fiber takviyeli polimerler
GGBS	Yüksek fırın cürufu
GSYİH	Gayri Safı Yurtiçi Hasılası
IAAC	Catalonia İleri Mimarlık Enstitüsü
IoT	Nesnelerin interneti
JD	Ürdün Dinarı
KDV	Katma değer vergisi

LCA	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
LCCA	Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi
MDM	Malzeme biriktirme yöntemi
MR	Eksik kaburga
OPC	Portland çimentosu
PCE	Süper akışkanlaştırıcılar
PE	Polietilen
PETG	Polietilen tereftalat glikol
PLA	Polilaktik asit
PP	Polipropilen
PPC	Portland Pozzolana Çimentosu
PVA	Polivinil alkol
RC	Betonarme
RE	Yeniden girintili
RS	Dönen kare
SLA	Stereolitografi
SLM	Seçici Lazer Eritme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
STL	Standart mozaikleme dili
UJ	Johannesburg Üniversitesi
UV	Ultraviyole

VMA	Viskozite Değiştirici Maddeler
WASP	World's Advanced Saving Project
YDM	Yaşam dgs maliyeti
YPB	Yüksek performanslı beton
yy	Yüzyıl



1. GİRİŞ

İnsanoğlunun en temel gereksinimlerinden biri olan barınma ihtiyacı, tarihsel süreç içerisinde yapı teknolojilerinin gelişimini doğrudan etkilemiştir. Bu bağlamda, doğada bulunan ham maddelerin işlenmesiyle çeşitli yapı malzemeleri ortaya çıkmıştır. Günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biri olan beton, barınma ve yaşam alanlarının inşasında temel bir rol üstlenmektedir. Beton; agrega, çimento, su ve kullanım amacına göre belirlenen çeşitli mineral ya da kimyasal katkı maddelerinin karışımından elde edilen kompozit bir malzemedir. Karışımın ilk aşamasında plastik bir kıvamda olan beton, zamanla sertleşerek yüksek mekanik dayanım kazanmaktadır. Ancak betonun üretim süreci, özellikle çimento üretimi aşamasında yüksek oranda karbondioksit (CO₂) salınımına neden olmakta ve bu durum çevresel açıdan önemli sorunlara yol açmaktadır. Bu bağlamda sürdürülebilir yapı teknolojilerine duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Beton, birim ağırlığı, basınç dayanımı ve uygulama alanına göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte beton üretim ve uygulama yöntemlerinde de önemli yenilikler meydana gelmiştir. Bu yeniliklerden biri de "üç boyutlu (3B) beton yazdırma" teknolojisidir. Geleneksel kalıplama yöntemlerine alternatif olarak geliştirilen bu yöntem, bilgisayar destekli üretim (CAD/CAM) tekniklerine dayanmaktadır. Kalıpsız üretim olanağı sunan bu sistem, malzeme israfını en aza indirirken aynı zamanda zamandan tasarruf sağlamaktadır. Üç boyutlu beton yazdırma teknolojisi, hem ekonomik hem de estetik açıdan avantajlar sunarak özellikle karmaşık geometrilere sahip yapıların inşasında yeni olanaklar yaratmaktadır. Bu teknoloji, geleneksel yapı üretim süreçlerinin sınırlarını aşarak, geleceğin sürdürülebilir ve yenilikçi yapı tasarımlarına zemin hazırlamaktadır (Aygün ve Kaman, 2021).

Dünya genelinde yılda 25 milyar ton beton kullanılması ve kişi başı yaklaşık 3,8 ton beton tüketimi, bu malzemenin ölçek ve etki açısından ne kadar büyük bir rol oynadığını açıkça göstermektedir. Bu ölçekte bir üretimin kaçınılmaz sonucu olarak, çimento üretiminin küresel CO₂ emisyonlarının % 5-7'sinden sorumlu olması da ciddi bir çevresel yük anlamına gelmektedir. Bu noktada sürdürülebilirlik kavramının üç temel boyutuyla (ekonomik, çevresel, toplumsal) ele alınması büyük önem taşımaktadır. Özellikle inşaat

sektöründe ekonomik etkilerin sayısallaştırılabilir olması, yeni teknolojilerin kıyaslanması ve uygulanabilirliğinin değerlendirilmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Yapı sektörü ekolojik ve ekonomik bir dönüm noktasındadır. Bu dönüşümün merkezinde ise 3D beton baskı gibi dijital üretim teknolojileri yer almaktadır (Çatalkaya ve Kılınç, 2023).

Güvenli bir barınağa sahip olmak temel insan ihtiyaçlarından biridir. Dünya genelinde artan inşaat oranı nedeniyle, inşaat sektörü şu anda malzeme sıkıntısı çekmekte ve bu da yüksek malzeme maliyetlerine yol açmaktadır. Ayrıca, işgücü açığı da bu sektördeki bir diğer sorundur. Malzeme ve işçilik maliyetlerindeki artış, inşaat maliyetlerinde de artışa neden olmaktadır. Bugün bile, her alanda otomasyonun olduğu modern çağda, inşaat sektörü hala geleneksel inşaat yöntemlerine dayanmaktadır. Bu nedenle, bu endüstrinin uygulamalarını çeşitli inşaat otomasyon teknolojileri ile dönüştürmek ve geliştirmek için acil bir talep vardır. 3DPC, binaların ve altyapıların inşası için gelişmekte olan bir tekniktir (Givkashi ve ark., 2023).

Bina tasarımı ve üretim şekli, çevre koşullarının değişmesi ve teknolojik gelişmeler gibi etkenler sebebiyle yıllar içinde değişime uğramıştır. Fakat sosyal yaşamı yönlendiren, yapıyı çevreyi oluşturan ve bir ihtiyacı karşılamak amacı taşıyan ‘yapı üretimi’, insan hayatındaki önemli yerini korumaktadır (Artuğ ve Altun, 2019).

İnşaat sektörünün kendine özgü zorlukları, teknolojik adaptasyon sürecini diğer sektörlerle kıyasla daha yavaş ilerlemesine neden olmuştur. Ancak, endüstri devrimiyle birlikte başlayan süreç ve özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrası toplu konut ihtiyacı, sektörde önemli bir dönüşümü tetiklemiştir. Yapısal çelik kullanımı, prefabrikasyonun önünü açmış ve kontrplak paneller, betonarme plaklar gibi ön üretilmiş elemanların geliştirilmesiyle inşaat süreçlerinde standardizasyon, rasyonelizasyon ve modülerlik kavramları önem kazanmıştır. Seri üretim mantığıyla toplu konut projelerinin hayata geçirilmesi, bu dönüşümün somut bir göstergesi olmuştur. Günümüzde de bu eğilim devam etmekte ve inşaat sektöründe verimliliği artırmak, maliyetleri düşürmek ve daha hızlı üretim sağlamak amacıyla prefabrikasyon ve modüler yapım teknikleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Teknolojik gelişmelerle birlikte yeni malzeme ve üretim yöntemlerinin de sektöre entegrasyonu bu alandaki ilerlemenin süreceği öngörülebilir. 20. yy’ın sonlarında ise dijital üretim teknikleri de inşaat sektöründe kullanılmaya başlanmıştır (Artuğ ve Altun, 2019).

Günümüzde teknoloji baş döndürücü bir hızla gelişmekte ve üretim süreçleri de bu değişime ayak uydurmaktadır. Endüstri 4.0'ın önemli bileşenlerinden biri olan 3 boyutlu yazıcı teknolojisi, üretim alanında büyük yenilikler sunmaktadır. Geleneksel üretim yöntemlerine alternatif olarak ortaya çıkan bu teknoloji, günümüzde hızla gelişmekte ve farklı sektörlerde yaygınlaşmaktadır. Her ne kadar 3 boyutlu yazıcılar yeni bir teknoloji gibi görülse de, kökenleri 1984 yılına dayanmaktadır. Geleneksel üretim tekniklerine kıyasla daha düşük maliyet, yüksek hız ve tasarım esnekliği gibi avantajlar sunan 3 boyutlu yazıcılar, sağlık, otomotiv, havacılık ve inşaat gibi pek çok sektörde kendine yer bulmaktadır (Akbaba ve Akbulut, 2021).

3D yazıcı teknolojisi, günümüzün en önemli yeniliklerinden biri olup tıp, gıda, havacılık mühendisliği ve günlük yaşam gibi geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmuştur. Yapı endüstrisinde de bu teknoloji giderek benimsenmekte olup büyük ölçekli üretimlerde kullanılması hedeflenmektedir. 3D beton yazıcı teknolojisi, hem mimari hem de yapısal tasarımda daha fazla özgürlük sağlayan, düşük maliyetli ve yüksek hızlı bir inşaat yöntemi sunmaktadır (Özalp ve ark., 2018).

3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilmiş bir yapı dijital bir dosyadan 3 boyutlu nesneler üreten, katmanlı bir oluşturma yöntemidir. Bu teknoloji malzeme bilimi, mimarlık, inşaat mühendisliği, makine mühendisliği ve yazılım mühendisliği disiplinlerini içeren disiplinler arası bir uygulama olarak belirtilebilir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapılan bir inşaatın uzun vadede uygulanabilir bir inşaat yöntemi olarak kabul edilmesi için, geleneksel yöntemlerle rekabet edebilmesi ve son kullanıcıları için hem yararlı hem de kullanılabilir olması gerekmektedir (Schuldt ve ark., 2021).

İnşaatta, 3D-baskı teknolojisi, inşaatın yüksek hız ve doğruluğunu sağlama, işçilik maliyetlerini, inşaat atıklarını ve insan sağlığı risklerini azaltma olasılığının yanı sıra inşaat projelerinin ve unsurlarının konfigürasyonunu genişletme potansiyeli nedeniyle büyük ilgi görmektedir (Inozemtcev ve Duong, 2019).

3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapım süreci nesnelerin internetinin inşaat alanındaki uygulama temelidir (Yang ve ark., 2018). 3 boyutlu beton baskı teknolojisi dijital bir teknoloji olup bu teknoloji ile yapılan yapılara 3 boyutlu yazıcılar ile üretilen yapılar denmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin kullanımı sürecinde konstrüksiyon maliyetinin düşük olması ya da çıktı veriminin girdiden çok daha yüksek olması durumunda 3 boyutlu beton baskı teknolojisi birçok işletme tarafından rahatlıkla kabul

edilecektir. Sonuç olarak nesnelerin interneti hakkında yapılanma da büyük ölçüde teşvik edilmiş olacaktır (Yang ve ark., 2018).

Yeni bir yapım teknolojisi olarak, 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin maliyetinin konvansiyonel yapım teknolojisinin maliyetinden yüksek ya da düşük olup olmadığı hala tartışılmaktadır. Tartışılmasının sebeplerinden ilki tüm maliyeti etkileyen faktörlerin bir kısmına göre karşılaştırma yapılmasıdır. Diğer sebebi ise maliyet hesaplamasının analizden yoksun olmasıdır. Sonuç olarak 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin hesaplama yöntemini ve maliyet yapısını incelemek gerekmektedir. Konvansiyonel yapım teknolojisinin maliyet hesaplaması küresel olarak tamamen geliştirilmiştir. Oysa 3 boyutlu beton baskı teknolojisi için maliyet hesaplamasını içeren bir metraj listesi ve fiyatlandırma temeli yoktur (Yang ve ark., 2018).

Günümüzde 3D baskı, araştırma ve uygulama faaliyetleri açısından üstel bir artış yaşamakta ve sürekli ilerlemektedir. İnşaatta 3DPC teknolojisinin kullanımı, geleneksel inşaat yöntemlerinde değişim yaratma potansiyeli nedeniyle sektör için yeni bir dönem olarak kabul edilmektedir. Kalıpsız yapı, daha az insan müdahalesi, minimum malzeme israfı, zaman alıcı kalıpların olmaması nedeniyle daha yüksek şekil karmaşıklığı, kitlesel özelleştirme, geometrik özgürlük ve esneklik ve yapısal tasarım gibi benzersiz özellikleri nedeniyle. Daha istikrarlı yapılara yol açan daha fazla verimlilik arzu edilen bir durum olarak kabul edilmektedir. Bu teknoloji kalıp maliyetlerinden tamamen tasarruf sağlar, işçilik maliyetlerini % 50-80 oranında azaltır ve sahadaki inşaat malzemesi israfını % 30-60 oranında azaltır. Ayrıca, şantiyedeki verimlilik artışı ve inşaat süresindeki azalma nedeniyle, inşaat maliyetlerini daha da düşürme potansiyeline sahiptir (Givkashi ve ark., 2023).

3 boyutlu beton baskı üzerinde son zamanlarda muazzam miktarda araştırma yapılmıştır ve bunun bir kısmı inşaat endüstrisindeki potansiyelden kaynaklanmıştır (Ranjha ve ark., 2018).

3D baskı teknolojisinin inşaat sektörüne sunduğu geometrik özgürlük, malzeme tasarrufu ve düşük iş gücü gereksinimi gibi avantajlar, konvansiyonel yöntemlere kıyasla oldukça cazip hale gelmesini sağlamaktadır. Özellikle kalıp ihtiyacının ortadan kalkması, hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük bir dönüşüm yaratabilir (Uygunoğlu ve Özgüven, 2019).

İnşaatta 3D baskı kullanmanın önemli faydalarından biri de işçilik maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilmesidir. Bu teknoloji inşaat sürecini otomatikleştirerek zaman alıcı ve maliyetli olabilen el işçiliği ihtiyacını azaltmaktadır. Ayrıca, geleneksel inşaat yöntemlerinde önemli bir zorluk olan malzeme israfını da en aza indirir. 3D baskı ile malzeme yalnızca ihtiyaç duyulan yerde kullanılır ve inşaat sırasında ortaya çıkan atık miktarı azaltılır (Alqaryouti ve ark., 2024).

3DPC yapılarının inşasının standartlaştırılması, 3DPC yapısının uygulama ilerlemesini kolaylaştırmak için önemli bir konudur. Bu nedenle, standartlaştırmadan önce 3DPC yapılarını iyice anlamak çok önemlidir. Bu tez çalışması, mevcut literatürü analiz etmiştir ve 3 boyutlu beton baskılı inşaat endüstrisi ile ilgili maliyet analizi hususlarını keşfetmiştir. Ayrıca bu çalışma, 3D teknolojisinin sürdürülebilirliğini mevcut geleneksel yöntemlerle karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bu çalışmada özellikle bu teknolojinin maliyet faydaları kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Bu çalışmada 3DPC yapılarındaki mevcut uygulamalarla ilgili mevcut literatürün kapsamlı bir incelemesi yapılmıştır.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapımın konvansiyonel yapım yöntemlerinin yerine uygulanabilir bir alternatif olup olmadığını belirlemektir. Dah açık bir biçimde ifade edilecek olursa bu çalışma 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapım teknolojisinin konvansiyonel yapım teknolojisine kıyasla güvenilir, uygun maliyetli ve verimli olup olmadığını ortaya koymaktadır. Bina inşaatında 3D baskı teknolojisinin ekonomik etkisini analiz etmek ve diğer geleneksel inşaat yöntemleriyle karşılaştırmak bu tez çalışmasının amaçları arasında yer almıştır.

1.2. Çalışmanın Araştırma Metodolojisi

Bu tez çalışması, 3 boyutlu beton baskısını geleneksel beton kullanım yöntemleriyle karşılaştıran karşılaştırmalı bir çalışma olmuştur. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi bağlamındaki mevcut durumu analiz etmek için ayrıntılı bir literatür taraması yapılmıştır.

1.3. Çalışmanın Araştırma Soruları

Bu tez çalışmasının araştırma soruları aşağıda sunulmuştur;

- 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin maliyetinin konvansiyonel yapım teknolojisinin maliyetine göre daha düşükmüdür?
- Yapı şekli 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin maliyeti bağlamında önemli bir parametremidir?
- 3D beton baskı teknolojisi kullanımının beton yapıların üretiminde hangi temel zorlukları aşması beklenmektedir?

1.4. Çalışmanın Özgün Değeri

Bu çalışma sayesinde, endüstrileşmiş yapı teknolojisi olan 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımında söz konusu olan maliyet kalemlerinin analiz fikri ortaya konmuştur ve farklı yapım teknolojileri arasındaki maliyet kalemleri karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışması 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin maliyet analizi üzerine kapsamlı bir şekilde odaklanmıştır. Bu çalışma sayesinde 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımının yaygın hale gelebilmesi ve standartlaştırılması bağlamında bir yol açılmıştır. Bu tez çalışmasının temel amacı, insan yerleşimlerinin sağlanmasında 3 boyutlu baskı teknolojilerinin benimsenmesini destekleyen bilimsel kanıtlar sağlamak olmuştur. Bu tez çalışmasının amaçları bina yöntemlerini karşılaştırmak için bir kıyaslama geliştirmek, 3 boyutlu baskı teknolojilerindeki yatırım fırsatlarını değerlendirmek, sosyal faydaları ölçmek ve inşa yöntemlerinin uygulanabilirliği ve/veya tavsiye edilebilirliği hakkında makul sonuçlar geliştirmek olmuştur.

2. 3 BOYUTLU BETON BASKI TEKNOLOJİSİ

2.1. İnşaat Çağdaş Dekarbonizasyon Yöntemleri

İnşaat sektörü, sanayileşmiş ülkelerde birincil enerji kullanımının tahmini % 40'ını oluşturan, küresel CO₂ emisyon çıktılarının en önemli katkılarından biridir. Bu, bir binanın mimari, mühendislik ve inşaat (AEC) yaşam döngüsünün tüm aşamalarını, yani üretim ve işletme aşamalarını içermektedir. Tek başına inşaat malzemelerinin imalatı (beton, çelik vb.), toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık % 8-12'sini oluşturmaktadır. Etkili olarak, bu, imalat ve inşaat süreci sırasında karbon çıkışının, çevredeki çevre üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu anlamına gelmektedir ve inşaat endüstrisinde karbonizasyonun azaltılmasındaki büyük önemi vurgulamaktadır. Şu anda, inşaat ortamında birkaç dekarbonizasyon yöntemi uygulanmaktadır. İnşaat sektöründe karbondan arındırmanın yaygın bir stratejisi, binalarda kullanılan malzemelerde daha bilinçli bir karar vermektir. Aşağıdaki Çizelge 2.1'de gösterildiği gibi, beton yerine kereste gibi malzemelerin kullanılması, binaların yaşam döngüsünün üretim aşamasında karbon çıkışını önemli ölçüde azaltmaktadır. Ahşabın özellikleri düşük olmakla kalmamaktadır. Aynı zamanda inşaat yaygın olarak kullanılması, ormancılık uygulamaları gibi diğer etik ikilemleri gündeme getirmektedir (Ranjha ve ark., 2018).

İnşaat sırasında karbon salınımını azaltmak için öne çıkan bir başka teknik de çevresel olarak sürdürülebilir beton kullanımı olmaktadır. Daha sürdürülebilir bir beton oluşturma en popüler yöntemleri, çimento içeriğini yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi diğer malzemelerle değiştirmek veya daha önce kullanılmış beton agregasını geri dönüştürmektir. Bununla birlikte, bu tür karışım tasarımlarının kullanılmasındaki zorluk, çeşitli yapısal özelliklerin normal betondan daha düşük olmasıdır. Sonuç olarak bu araştırma, 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin kritik önemini ve inşaat endüstrisinin karbonsuzlaştırılmasındaki etkisini öngörmektedir (Ranjha ve ark., 2018).

Çizelge 2.1. Yaygın İnşaat Malzemelerinden Üretilen Karbon Emisyonları

	Salınan Karbon		Depolanan Karbon kg/m ³	Net Karbon Salımı kg/m ³
	kg/t	kg/m ³		
İşlenmiş kereste	44	22	250	228
Yapıştırılmış ahşap	164	82	250	168
Yapısal çelik	1070	8132	15	8117
Betonarme	76	182	0	182
Alüminyum	2530	6325	0	6325

2.2. İnşaat Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Doğru Yeşil ve Dijital Dönüşüm

Toplum, çevre ve kentsel gelişimin kesişme noktasında yer alan inşaat sektörü, devasa bir ekonomi oluşturmakta ve artan nüfus ile doğal afetler, siyasi istikrarsızlık ve diğer nedenlerle yerlerinden olan bireyleri barındırma ihtiyacı nedeniyle önemli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu birincil endüstri, AB'deki tüm atıkların üçte birinden fazlasını oluşturan en büyük atık akışı olan inşaat ve yıkım atıklarından (CDW) sorumludur. Bu nedenle, uygunsuz yönetimiyle ilgili zorlukları ele almak için uygulanabilir ve sürdürülebilir yönetim stratejileri uygulamak için acil eylem gereklidir. Bu noktada, 3D beton baskı, uygun fiyatlı konut, hızlı inşaat ve inşaat sektörünün atık bazlı basılabilir malzemeleri entegre ederek döngüsel bir ekonomiye geçişi gibi ortak zorluklar bağlamında sorunların çözümü için umut verici bir potansiyel oluşturmaktadır (Kul ve Yıldırım, 2024).

İnşaat, dünyanın birçok ülkesinde ekonomik büyümede önemli bir rol oynamaktadır. Bunun önemi, konut, ticari binalar, ulaşım ve enerji sistemleri de dahil olmak üzere geliştirilen çok sayıda altyapı projesinde açıkça görülmektedir. Nüfus artışı, göç ve kentleşme nedeniyle inşaat faaliyetleri artmıştır, bu da sektörde önemli bir genişlemeye yol açmıştır. Ancak, inşaat sektörünün büyümesi önemli çevresel zorlukları da beraberinde getirmiştir. Bina sektörü tek başına toplam çevre kirliliğinin yaklaşık % 30'unu oluşturmaktadır. Buna ek olarak, bina stoku, binaların günlük işletiminden

kaynaklanan dünyadaki karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık % 27'sinden sorumludur (Kul ve Yıldırım, 2024).

2.3. İnşaat Sektörünün Otomasyonu

Şu anda dünya Endüstri 4.0'a doğru ilerlemektedir. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve dijitalleşme bu değişimi çoğu sektör için mümkün kılmaktadır. Ancak, inşaat sektörü hala geri kalmış durumdadır. Hala ne geniş çaplı otomasyondan ne de üçüncü sanayi devriminin avantajlarından yararlanabilmiş değildir. Otomasyonun kullanılması kalite güvencesini ve üretkenliği artırabilir. Endüstri 3.0, imalat gibi başarıya ulaşmış otomasyon sektörlerinden ipuçları alan daha ileri görüşlü bir strateji gerektirmektedir. İnşaat sektörü, 3.0 ve 4.0 endüstrileri arasındaki boşluğu doldurmanın bir yolu olarak 3D baskı olarak da bilinen katmanlı üretimi benimsemeye hazırlanmaktadır (Chamatete ve Yalçinkaya, 2024).

Büyük inşaat süreçlerini, malzemelerini ve bileşenlerini otomatik hale getirmenin yüksek maliyeti ve karmaşıklığı nedeniyle, inşaat sektörü şu anda üretimin gerisinde kalmaktadır. Ancak otomasyon, entegre robotik sistemler ve prefabrik yapı bileşenleri gibi inşaatın diğer alanlarına da girmeye başlamıştır. Bu gelişmeler, geleneksel tekniklere kıyasla çok az mali kazanç sağlayan maliyetli prosedürlere yol açmış olsa da üretkenliği, güvenliği ve kaliteyi artırmıştır. Doğasında var olan karmaşıklık ve kalite gereksinimleri nedeniyle, üstyapının yerinde robotik üretimi veya montajı, şu anda olduğu gibi inşaat otomasyonunun ana odak noktasıdır. Eğer başarılı olursa, bu durum inşaat sektörünü tamamen altüst edecek ve değiştirecektir (Chamatete ve Yalçinkaya, 2024).

Beton başlıca yapı malzemesidir. Bu nedenle yapısal beton inşaatının otomasyonu kaçınılmaz veya gerekli görünmektedir. Başarının sağlanması için sektörün otomasyonun doğasında var olan karmaşıklıklara ve kalite ihtiyaçlarına uyum sağlaması gerekmektedir. Beton, sudan sonra en yaygın kullanılan ikinci inşaat malzemesidir ve her yıl dünya genelinde tahmini 10 km³ kullanılmaktadır. İnşaat malzemesi çevre dostu olmasına rağmen, ham işlenmesi dünya sera gazı emisyonlarının % 5-8'ini üretmektedir. Beton, Roma döneminden beri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, inşaat yöntemlerinde sıklıkla kalıp veya kalıplar kullanılmaktadır. Mimari daha serbest formlu hale geldikçe, daha fazla kavisli şekle ihtiyaç duyulmakta, bu da daha yüksek maliyet ve israfa neden olmaktadır (Chamatete ve Yalçinkaya, 2024).

2.4. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisine Genel Bir Bakış

Günümüzde inşaat sektöründe birçok yenilik ve gelişme yaşanmaktadır. Bu gelişmelerden biri de büyük ölçekli 3D baskı yapabilen yazıcıların geliştirilmesidir. Yapı sektöründe de kullanılan bu teknoloji sayesinde 3D beton baskı hem maliyet hem de hız açısından avantajlıdır. Hem mimari hem de yapısal tasarım açısından büyük bir özgürlük sunmaktadır. Eklemeli imalat yöntemini kullanan 3D yazıcılarda malzeme katman katman istiflenerek 3D model oluşturulmaktadır. Maliyetlerdeki verimlilik ve üretim hızındaki avantaj, tüketici ve müteahhit için büyük fayda sağlamaktadır. Binalar 3D yazıcılar ile hızlı ve verimli bir şekilde inşa edilebilmektedir. Mühendisler 3D yazıcılar sayesinde zor geometrilere sahip tasarımlar yapabilmektedir, böylece inşa edilecek yapı daha güvenli ve sağlam olmaktadır. Shanghai WinSun gibi şirketler son yıllarda az katlı binalar inşa etmek için 3D yazıcıları kullanmaya başlamıştır. Kırsal villa ve 5 katlı konut bloğunu 3D yazıcılarla inşa etmiştir (Özbay, E., Özbay, F.A., 2022).

Şirket yöneticileri bu deney sonucunda geleneksel yöntemle kıyasla kullanılan inşaat malzemesinin % 60, sürenin ise % 30 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca inşaat ekibinin iş gücünün beş kat azalacağını ve buna bağlı olarak iş kazası ve yaralanma risklerinin de azalacağını öngörmektedir. 3D yazıcılar genellikle malzeme gereksinimlerini azaltmak, özel nesneler üretmek, işçiliği azaltmak ve hızlı prototipleme oluşturmak için kullanılmaktadır (Özbay, E., Özbay, F.A., 2022).

İnşaat sektöründe 3D yazıcıların kullanılmasıyla, inşaat alanına taşınacak malzeme miktarını azaltmak mümkündür. Malzemenin inşaat alanına taşınması, özgün binaların inşa edilmesi, gerekli işçi sayısının azaltılması ve binaların daha kısa sürede inşa edilmesi mümkündür. İlk tam ölçekli 3D inşaat projesi “Canal House ”dur. 3D yazıcı teknolojisi ile inşa edilen 298,5 m² alana sahip ilk konut projesi Rusya'daki “Yaroslavl ”dır. Katalonya İleri Mimarlık Enstitüsü, dünyanın ilk 3D yazıcı ile basılmış yaya köprüsünün tasarım ve yapımını üstlenmiştir. Resmi yönetmeliklere uygun ilk ofis oteli Kopenhag'da 3D Printhuset tarafından inşa edilmiştir (Özbay, E., Özbay, F.A., 2022).

3D yazıcıların inşaat sektöründe kullanılmasıyla birlikte en küçük parçadan binanın tamamına kadar baskı yapabilen yazıcılar geliştirilmiştir. Bu yazıcıların her biri farklı dönemlerde farklı alanlarda kullanılmış ve yapılan çalışmalar sonucunda 3D yazıcıların inşaat sektöründe kullanımı konusunda birçok gelişmeye katkı sağlamıştır. Resim 2.1’de

3D yazıcı ile inşa edilmiş bir ev görülmektedir. Kullandıkları malzemeler ve teknolojiler farklıdır (Özbay, E., Özbay, F.A., 2022).



Resim 2.1. 3D yazıcı ile inşa edilmiş bir ev (Özbay, E., Özbay, F.A., 2022)

D-Shape 3D yazıcının mucidi Dini, 2009 yılında yaptığı çalışma için patent almıştır. Bu çalışmada çevreye zarar vermeyen daha ucuz bir hammadde üretmiştir. Ürettiği hammaddenin bileşenlerinde ağırlıklı olarak kum, oksit ve deniz suyundan elde edilen klorürleri kullanmıştır. Yapı bileşenlerinin 3D baskısı için kullanılan malzemelerin çözümlerinde çeşitli kompozit malzemeler denenmektedir. Bu malzemelerden birinin de sülfür betonu olduğu ileri sürülmektedir. Karışım, sülfürün erime noktasının üzerinde ısıtılır. Karışım 140 °C'ye kadar soğuduktan sonra normal beton gibi uzun süre sertleşmeden istenilen dayanıma ulaşmaktadır. Bu nedenle kükürtlü beton potansiyel bir yapı malzemesi olarak değerlendirilebilir (Özbay, E., Özbay, F.A., 2022).

İnşaat 3D baskısı, binaları veya inşaat bileşenlerini imal etmek için 3D baskıyı temel bir yöntem olarak kullanan çeşitli teknolojileri ifade eder. Katmanlı inşaat gibi alternatif terimler de kullanılmaktadır. İnşaat ölçeğinde kullanılan çeşitli 3D baskı yöntemleri ekstrüzyon (beton/çimento, balmumu, köpük, polimerler), toz yapıştırma ve katkılı kaynaktır. İnşaat ölçeğinde 3D baskı, özel, ticari, endüstriyel ve kamu sektörlerinde çok çeşitli uygulamalara sahip olacaktır. Bu teknolojilerin potansiyel avantajları arasında daha hızlı inşaat, daha düşük işçilik maliyetleri, artan karmaşıklık ve doğruluk, daha fazla işlev entegrasyonu ve daha az atık üretilmesi yer almaktadır. Bugüne kadar endüstriyel robotlar, gantry sistemleri ve bağlı otonom araçlar kullanılarak binaların ve inşaat bileşenlerinin yerinde ve saha dışında imal edilmesini içeren bir dizi farklı yaklaşım sergilenmiştir (Akhil ve ark., 2021).

Chen ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada % 35–% 60 oranında maliyet avantajı vurgulanmıştır. Bu tasarrufun büyük kısmı, kalıplamaya ihtiyaç duyulmamasından kaynaklanmaktadır ve bu da işçilik, malzeme ve zaman gibi kaynaklarda önemli bir azalma anlamına gelmektedir. Geleneksel yöntemlerde kalıp işlerinin yapının toplam maliyetinin % 30–60’ını oluşturması, 3D beton baskının neden bu kadar çarpıcı bir maliyet avantajı sunduğunu açıklamaktadır. Ayrıca, bu teknoloji ile kalıp üretimi, yerleştirilmesi ve sökülmesi gibi süreçler ortadan kalktığı için iş gücü ihtiyacı azalmaktadır, proje süresi kısalmaktadır, hatalar ve yeniden işleme oranı düşmektedir. Bu ekonomik avantajlar, özellikle konut açığının yüksek olduğu gelişmekte olan ülkelerde, afet sonrası hızlı yapı inşası ya da düşük maliyetli sosyal konut projeleri için büyük fırsatlar sunmaktadır. Aynı zamanda özel mimari tasarımlarda da, kalıpsız üretim sayesinde tasarıma müdahale serbestliği elde edilmektedir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023). Ancak bu maliyet avantajlarının sürdürülebilir şekilde korunabilmesi için beton karışımlarının üretiminde kullanılan özel malzemelerin maliyeti optimize edilmelidir. Yazıcıların enerji tüketimi ve bakım gereksinimleri azaltılmalıdır. Eğitimli iş gücü ve otomasyon sistemleri daha erişilebilir hale gelmelidir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023).

3 boyutlu beton baskı teknolojisinde yüksek oranda CEM I 42,5R Portland çimentosu kullanımı söz konusu olmaktadır. % 55’in üzerinde kullanım oranı görülebilmektedir. Bu oran, karışımın karbon ayak izi açısından hâlâ yüksek olduğunu göstermektedir. 1 kg Portland çimentosu üretiminde yaklaşık 0,8–0,9 kg CO₂ salımı söz konusu olmaktadır. Henüz 3 boyutlu beton baskıya özgü bir standart bulunmaması, teknolojinin yaygınlaşmasında önemli bir engeldir. Geleneksel test yöntemleri (örneğin slump testi) bu teknoloji için uygun değildir. Akma dayanımı, ekstrüzyon uygunluğu, tabakalar arası aderans gibi parametreler 3D beton için çok daha kritiktir. Dolayısıyla, hem laboratuvar hem de saha testlerine özgü yeni standartların geliştirilmesi ve uluslararası kabul görmesi gerekmektedir. Agrega miktarının artması akma dayanımını ve viskoziteyi artırarak ekstrüde edilebilirliği zorlaştırmaktadır. Bu, karışımın dengeli bir reolojik davranış göstermesi gerektiği anlamına gelmektedir. Akışkanlığı koruyacak kadar düşük viskozite ama yapı formunu koruyacak kadar yüksek şekil stabilitesi söz konusu olmalıdır. Silika dumanı, yüksek incelik ve puzolanik özellikleri sayesinde 3D baskı için idealdir. Ancak üretimi sınırlı (0,5–1 milyon ton/yıl) olduğu için yaygın kullanımda arz sıkıntısı yaşanabilir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023). Kalsine kil, daha çevreci bir alternatiftir. 1 kg kalsine kil üretiminde yaklaşık 0,2–0,37 kg CO₂ salınımı ile Portland çimentosuna kıyasla

daha düşük bir emisyon sağlanmaktadır. 2 mm nozul kullanımı, çok ince ve homojen bir karışım gerektirmektedir. Bu, özellikle agreganın tane boyutu ve lif takviyesinin dikkatle seçilmesini zorunlu kılmaktadır. 3–6 mm uzunluğundaki karbon lifler, baskı yönünde eğilme ve çekme dayanımını artırsa da, karışımın pompalanabilirliğini ve nozuldan geçişini zorlaştırabilir. Sonuç olarak 3D beton baskı teknolojisi, şu anda malzeme mühendisliği, çevresel sürdürülebilirlik ve standart geliştirme konularında büyük bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Mevcut eksiklikler aşıldıkça, bu teknoloji sadece özel projelerde değil, yaygın yapı üretiminde de kendine sağlam bir yer bulabilir (Çatalıkaya ve Kılınç, 2023).

3 boyutlu beton baskı teknolojisinde işçilik maliyetinde % 50-% 80 azalma söz konusu olmaktadır. Bu oran, özellikle yüksek iş gücü maliyetine sahip ülkelerde 3D baskının cazibesini ciddi şekilde artırmaktadır. Kalıpsız üretim, elle yerleştirme ve düzeltme ihtiyacının ortadan kalkmasıyla bu tasarruf gerçekleşmektedir. Aynı zamanda atık malzeme miktarında % 30-% 60 azalma söz konusu olmaktadır. Geleneksel yöntemlerde fazla karıştırılan beton, kalıptan taşan veya yanlış dökülen malzeme ciddi kayıplara yol açar. 3D baskı ise sadece gereken malzemeyi katman katman ve tam dozajla uyguladığı için israfı minimize eder. Bu da hem maliyetleri düşürür hem çevresel sürdürülebilirliği artırır (Çatalıkaya ve Kılınç, 2023). İşçilik azaldığı için insan hatası ve bekleme süreleri azalır. Kalıp kurma, sökme gibi aşamalar atlandığı için yapım süresi ciddi şekilde kısalır. Otonom üretim sayesinde gece gündüz kesintisiz üretim yapılabilir. Bu da özellikle afet bölgeleri, geçici barınma çözümleri veya seri konut projeleri için büyük avantaj sağlar. Bu teknoloji, yapı sektöründe hız, ekonomi, çevre ve otomasyon gibi birçok kilit alanda eş zamanlı iyileşme sağlamaktadır. Tüm bu etkiler birleştiğinde, 3D beton baskı teknolojisi sadece bir üretim yöntemi değil, aynı zamanda sektörün genel yapısını değiştirme potansiyeline sahip bir yenilik olarak değerlendirilebilir (Çatalıkaya ve Kılınç, 2023).

3 boyutlu beton baskı teknolojisinin küresel düzeyde geldiği noktayı, teknolojik gelişim ve uygulama çeşitliliği oldukça açık şekilde göstermektedir. Hem teknolojik altyapı hem de uygulama örnekleri açısından 3D beton baskının artık deneysel düzeyden çıkıp gerçek dünya uygulamalarına geçtiği çok net bir şekilde görünmektedir. Apis Cor (Dubai) firması iki katlı bina üretimiyle, 3D baskının sadece tek katlı yapılara değil, daha karmaşık yapısal sistemlere de uygulanabileceğini kanıtlamıştır. ICON (Austin, Teksas) firması sosyal konut ihtiyacına yönelik bir köy projesinde bu teknolojinin

kullanılabileceğini göstermektedir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023). COBOD (Avrupa) firması birden fazla konut üreterek seri üretime geçişin mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Peri Group (Berlin) firması sektörün geleneksel kalıp sistemleri üreticilerinden biri olarak, 3D baskıya yönelmesi teknolojinin ana akım haline geldiğini göstermiştir. Endüstri 4.0 ile entegrasyon, robotik sistemlerin, sensörlerin ve dijital veri analizinin bu teknolojiyle birleştiğini ortaya koymaktadır. 6 eksenli robotik kol (Gosselin et al.), karmaşık geometrilerin çok daha hassas şekilde yazdırılmasını sağlamaktadır. Arduino Mega 2560 gibi mikrodenetleyiciler, baskı başlığı ve pompa sistemlerinin tam zamanlı kontrolüne olanak tanıyarak sistemin otomasyon kabiliyetini artırmaktadır (Çatalkaya ve Kılınç, 2023). Malzeme açısından, 3D baskıya özel beton karışımları, geleneksel betonla aynı bileşenleri taşısa da; reoloji, priz süresi ve pompalanabilirlik gibi özellikler açısından ciddi farklılıklar göstermektedir. Pegna tarafından 1997 yılında yapılan ilk çalışma, bu teknolojinin aslında oldukça eski bir fikir olduğunu ancak son yıllarda donanım, yazılım ve malzeme alanındaki gelişmeler sayesinde uygulanabilir hale geldiğini göstermektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi, hem inşaatın dijitalleşmesi hem de sürdürülebilirliğin artırılması açısından yapı sektöründe çığır açıcı bir yenilik olarak hızla yayılmaktadır. Dünya genelindeki bu örnekler, teknolojinin sadece teoride değil, gerçek inşaat süreçlerinde etkili biçimde kullanılabileceğini kanıtlamıştır (Çatalkaya ve Kılınç, 2023).

Üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojisi, dijital üretim yöntemlerinin yapı sektörüne uyarlanması açısından önemli bir dönüm noktasıdır. Başlangıçta tıp, otomotiv ve endüstriyel üretim gibi çeşitli alanlarda kullanılan bu teknoloji, zamanla inşaat sektöründe de uygulanabilir hale gelmiştir. Bu süreçte, farklı beton malzeme sınıflarıyla uyumlu, yüksek baskı hızı ve karmaşık geometrilerin inşasını mümkün kılan çok yönlü yazıcıların geliştirilmesi, 3B beton baskısının uygulanabilirliğini artırmıştır (Aygün ve Kaman, 2021). Beton baskısında kullanılan üç temel yazıcı tipi bulunmaktadır: portal tipi yazıcılar, robotik kol sistemleri ve vinç tipi yazıcılar. Bu sistemler arasında, ekonomikliği ve kolay kurulum avantajı nedeniyle portal tipi yazıcılar, literatürde en yaygın kullanılan sistem olarak öne çıkmaktadır. Bu yazıcılar, sabit bir çerçeve içerisinde üç eksenli hareket kabiliyeti sayesinde betonun istenilen koordinatlarda katman katman dökülmesini sağlamaktadır. 3B beton baskı teknolojisinde temel üretim prensibi, bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları ile oluşturulan dijital modellerin katmanlı üretim mantığına göre fiziksel yapılara dönüştürülmesidir. Bu işlem sırasında çimento, agrega, kimyasal ve

mineral katkılar ile özel liflerden oluşan özel bir karışım hazırlanmakta ve bu karışım, yazıcının başlığı aracılığıyla kontrol edilen bir şekilde basılmaktadır. Geleneksel kalıplama yöntemlerinin aksine, bu sistemde kalıba ihtiyaç duyulmaması, hem zaman hem de iş gücü açısından tasarruf sağlamaktadır. Ancak tüm bu teknolojik gelişmelere rağmen, üç boyutlu beton baskı sürecinde kullanılan malzeme içerikleri, bu malzemelerin uzun vadeli performansları ve baskı işleminin süreç kontrolüne ilişkin yeterli sayıda ve nitelikte bilimsel çalışmanın bulunmaması önemli bir eksiklik olarak dikkat çekmektedir. Bu durum, teknolojinin yaygın kullanımını sınırlayan temel faktörlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Aygün ve Kaman, 2021).

Üç boyutlu beton baskı teknolojisinin öncülerinden biri olan Contour Crafting, çimentolu karışımların katmanlı üretim yöntemiyle ekstrüde edilmesi esasına dayanan bir sistem geliştirmiştir. Bu yöntemde beton, özel bir yazıcı başlığı aracılığıyla katman katman yerleştirilmekte, oluşan yüzey pürüzleri ise mekanik bir mala yardımıyla düzeltilmektedir. Sistem, yerinde döküm esasına göre çalıştığından yazıcı başlığı, hareketli bir vinç sistemi üzerine monte edilerek geniş alanlarda uygulama imkânı sunmaktadır. Ancak bu yöntemde karşılaşılan başlıca teknik sorunlardan biri, betonun dikey yönde ekstrüde edilmesi ile ortaya çıkan katmanlar arası yapışma problemleridir. Bu durum, özellikle yapıların geometrik karmaşıklığı ve büyük boyutlu bileşenlerin üretimi sırasında daha da kritik hale gelmektedir (Aygün ve Kaman, 2021).

Ekstrüzyonla baskı işleminin başarısı, büyük ölçüde betonun reolojik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Le ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 9 mm ağız açıklığına sahip bir yazıcı kullanılarak, yüksek dayanımlı elyaf katkılı ve ince agrega içeren bir beton karışımı ile baskı yapılmıştır. Bu çalışmada; katmanlar arası yapışma mukavemeti, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yoğunluk gibi sertleşmiş beton özellikleri, farklı karışım reçeteleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kullanılan katkı maddelerinin ekstrüzyon sürecinde betonun performansını doğrudan etkilediğini ve özellikle elyaf katkılarının mekanik dayanımı artırmada etkili olduğunu ortaya koymuştur (Aygün ve Kaman, 2021). Bu bulgular, 3B beton yazdırma teknolojisinin gelişiminde yalnızca donanım değil, aynı zamanda malzeme bilimi temelli karışım tasarımı ve reolojik kontrol unsurlarının da belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda, yüksek viskozite, düşük akma gerilimi ve kontrollü tiksotropi gibi özelliklerin optimize edilmesi, hem katmanlar arası yapışmayı

iyileştirmek hem de yapının genel dayanımını artırmak açısından büyük önem taşımaktadır (Aygün ve Kaman, 2021).

2.5. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Yöntemi

Bir yapının 3 boyutlu olarak basılabilmesi için öncelikle modelleme yazılımı kullanılarak veya yapının kendisi taranarak bir model oluşturulmalıdır. Daha sonra dijital model 2 boyutlu dilimler halinde kesilecektir ve buna göre katman katman basılacaktır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi, inşaat maliyetlerinin % 40-50'sine denk gelen yapılara ihtiyaç duymadan daha karmaşık yapılar üretmek için uygundur. Toplu üretilen 3 boyutlu beton baskı teknolojisi, ek zaman ve maliyet avantajları ile karbon ayak izlerini önemli ölçüde azaltma avantajına sahiptir (Ranjha ve ark., 2018).

3D baskı veya eklemeli üretim, bir CAD modelinden veya dijital bir 3D modelden 3 boyutlu bir nesnenin oluşturulmasıdır. “3D baskı” terimi, 3 boyutlu bir nesne oluşturmak için malzemenin bilgisayar kontrolü altında biriktirildiği, birleştirildiği veya katılaştırıldığı, malzemenin tipik olarak katman katman birbirine eklendiği çeşitli süreçleri ifade edebilir. 1980'lerde, 3D baskı tekniklerinin yalnızca işlevsel veya estetik prototiplerin üretimi için uygun olduğu düşünülmüştür ve o zamanlar bunun için daha uygun bir terim hızlı prototipleme olmuştur. 2019 itibariyle, 3D baskının hassasiyeti, tekrarlanabilirliği ve malzeme yelpazesi, bazı 3D baskı işlemlerinin endüstriyel bir üretim teknolojisi olarak kabul edilebileceği noktaya kadar artmıştır. Burada eklemeli üretim terimi 3D baskı ile eşanlamlı olarak kullanılabilir. 3D baskının en önemli avantajlarından biri, ağırlığı azaltmak için içi boş parçalar veya iç kafes yapılara sahip parçalar da dahil olmak üzere, elle inşa edilmesi mümkün olmayan çok karmaşık şekiller veya geometriler üretebilmesidir (Akhil ve ark., 2021).

2.6. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Kullanımının Avantajları

Kaszynska ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptığı çalışma küçük ölçekli bir yapı için yapılan zaman analizi, bu teknolojinin potansiyelini ve pratik sınırlamalarını birlikte göstermesi açısından çok değerlidir. Geleneksel betonarme yapılarda kalıp işleri maliyeti düşmesi oranının % 35-54'ü bulması, bu kalemin ortadan kalkmasının doğrudan ve ciddi bir maliyet avantajı sunduğunu göstermektedir. Kalıpsız üretim sadece maliyeti değil, aynı zamanda hataları ve yeniden işlem ihtiyacını da azaltarak ek tasarruf sağlar

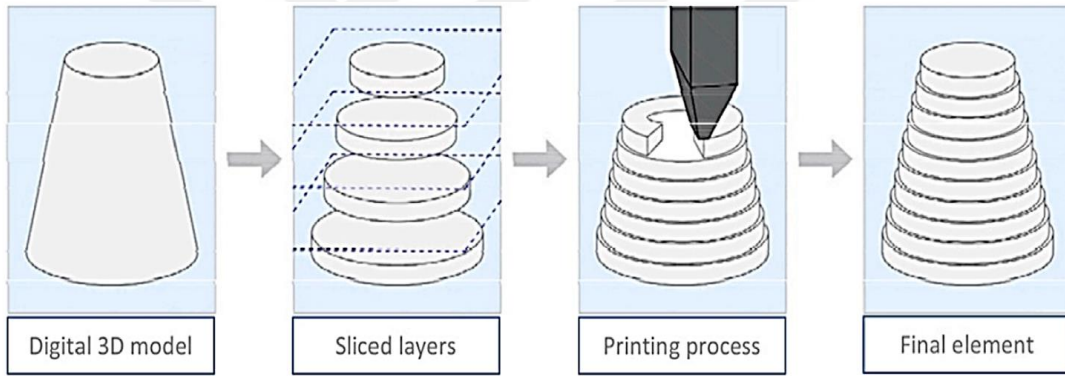
(Çatalkaya ve Kılınç, 2023). Otomasyonun sağladığı en büyük avantajlardan biri de iş gücü ihtiyacının azalmasıdır. Bu durum, özellikle nitelikli iş gücünün az olduğu veya işçilik maliyetlerinin yüksek olduğu bölgelerde büyük avantaj sağlamaktadır (Çatalkaya ve Kılınç, 2023). Ancak yine de bazı süreçlerde (karışım hazırlanması, yazıcı kurulumu, denetim gibi) sınırlı düzeyde insan müdahalesine ihtiyaç duyulmaktadır (Çatalkaya ve Kılınç, 2023). 3D baskı, inşaat süresini ve maliyetini azaltma konusunda önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak tam verim için sadece yazma süresi değil, tüm operasyonel süreçlerin optimizasyonu gerekir. Hazırlık, kurulum ve temizlik gibi aşamalar standartlaştırıldıkça ve otomatikleştirildikçe, bu teknoloji daha da hızlı ve verimli hale gelecektir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023).

3 boyutlu beton baskı teknolojisinin sadece maliyet açısından değil, aynı zamanda iş güvenliği, üretim doğruluğu ve mimari özgürlük açısından sunduğu avantajlar söz konusudur. Özellikle prefabrik üretim örneği, teknolojinin potansiyelini küçük ölçekli uygulamalarda da etkili bir şekilde sergilemektedir. Kalıp işlerinin olmaması, sadece üretim sürecini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda malzeme israfını azaltarak maliyetleri düşürür. Geleneksel beton işlerinde kalıp, malzeme ve işçilik açısından önemli bir maliyet kalemi oluştururken, 3D baskı ile bu aşamaların ortadan kalkması, % 25,4 gibi önemli bir maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Otomasyon ve robotik sistemler, işçi sayısını azaltarak daha az işçiyle daha fazla iş yapılmasına olanak tanır. Bu da doğrudan iş kazalarının azalmasına yol açar. İnşaat sektörü, iş kazalarının yaygın olduğu bir sektör olduğundan, bu güvenlik avantajı çok kritiktir. Ayrıca, düşük iş gücü ihtiyacı ve ağır işlerin otomatikleşmesi, işçi sağlığını koruyarak verimliliği artırır. 3D yazıcılar, belirli parametrelerle çalıştıkları için hata payını en aza indirir. İnsanın yapacağı hataları ortadan kaldıran bu teknoloji, tekrarlayan işlemlerde yüksek doğruluk sağlar. Yapıların her katmanı, önceki katmanın doğruluğuna bağlı olarak tam olarak oluşturulabilir, bu da yapıların daha dayanıklı ve sağlam olmasını sağlar. Mimari açıdan özgürlük sağlamak, 3D beton baskının en güçlü yönlerinden biridir. Geleneksel yöntemlerle karmaşık geometrik şekillerin inşası zorken, 3D baskı ile sınırsız tasarım olasılıkları ortaya çıkar. Bu özgürlük, özellikle estetik ve fonksiyonel açıdan yaratıcı yapılar tasarlamak isteyen mimar ve mühendisler için büyük bir avantajdır. Prefabrik banyo üniteleri gibi küçük ölçekli üretimlerde bile 3D baskının geleneksel yöntemlere göre % 25,4 daha düşük maliyet sunduğu örneği, teknolojinin serbest tasarım ve özelleştirme imkanı sunarken aynı zamanda maliyet avantajı sağladığını göstermektedir. Özellikle seriye dayalı üretim

(örneğin, çok sayıda banyo ünitesi üretimi) yapıldığında önemli bir ekonomik kazanç sağlanmış olur (Çatalkaya ve Kılınç, 2023). Sonuç olarak 3 boyutlu beton baskı teknolojisi, sadece inşaat maliyetlerini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda iş güvenliği, üretim doğruluğu, tasarım esnekliği ve yeni iş olanakları gibi alanlarda da dönüşüm yaratmaktadır. Bu durum da teknolojinin gelecekteki büyük ölçekli inşaat projelerinde nasıl kilit bir rol oynayabileceğini göstermektedir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023).

2.7. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Teknolojik Yönleri

3DPC teknolojisi, dijital bir 3D model ve “dilimlenmiş katmanlar” işlemleriyle başlar ve dosya formatlarını standart mozaikleme diline (STL) değiştirir. Ardından baskı süreci başlar ve yapı “son eleman” sürecinde tamamlanır (Resim 2.2).



Resim 2.2. 3D baskılı beton teknolojisi süreci (Pessoa ve arkadaşlarının 2021 yılında gerçekleştirdiği çalışmadan alınmıştır).

Üç boyutlu beton teknolojileri yazılım tarafından tasarlanır ve daha sonra baskı sürecine dönüştürülür. Baskı parametreleri, basılı betona göre tanımlanmalıdır. Nozul açıklığı ve katman yüksekliği, kalınlığın yanı sıra geometrik karmaşıklığa göre tanımlanır. Nozul açıklığı daha küçükse, akışkanlık daha yüksek olmalıdır. Beton yerleştirmek için yuvarlak ve düz olmak üzere iki tip nozul vardır. Yuvarlak nozullar söz konusu olduğunda, katmanlar arasındaki daha küçük boşluklar nedeniyle, aralarındaki bağ daha zayıftır, ancak bazen bazı yuvarlak nozul türleri daha pürüzsüz ve daha kalın katmanlar oluşturma eğilimindedir. Düz nozul daha kalın katmanlar oluşturur ve mekanik direnci artırır ve

dikdörtgen açıklık nedeniyle binanın şekli iyileştirilir (Resim 2.3A, B farklı açıklık kalınlıklarını göstermektedir) (Momeni ve ark., 2025).

Anizotropik özellikler, 3D baskılı betonun bir başka yönüdür. Yük z yönünde uygulandığında, basınç dayanımı artar ve x ve y yönlerinde, viskozite, içerik seviyesi ve zaman aralığı ile ilişkili olan katmanlar arasındaki bağ dayanımı nedeniyle çekme dayanımı artar (Resim 2.3C-E). Sanjayan ve arkadaşları 2018 yılında gerçekleştirdiği çalışmada tabakalar arasındaki nem seviyesinin muhtemelen tabakalar arası yapışmayı etkileyen ana faktör olduğunu ve basınç ve çekme dayanımı ile ilişkili olduğunu bulmuştur (Momeni ve ark., 2025).

3D baskılı betonda, büzülme nedeniyle çatlama, filament kilitlenmesi nedeniyle soğuk bağlanma, nozül tıkanması ve farklı genişlik ve yükseklikteki katmanlar gibi dezavantajlar vardır. Büzülme çatlama genellikle yüksek sıcaklık, düşük nem ve diğer çevresel koşullardan kaynaklanır. Soğuk bağlantı sorunu hızlı hidrasyon sürecinden kaynaklanmaktadır. Nozül tıkanma bozukluğu, yüksek agrega içeriği ve 3D baskılı betonun düşük esnekliği nedeniyle ortaya çıkar. Literatür taramasına göre, 3D baskılı beton, kalıpların ortadan kaldırılması ve işçiliğin azaltılması nedeniyle çevre dostu bir betondur (Momeni ve ark., 2025).

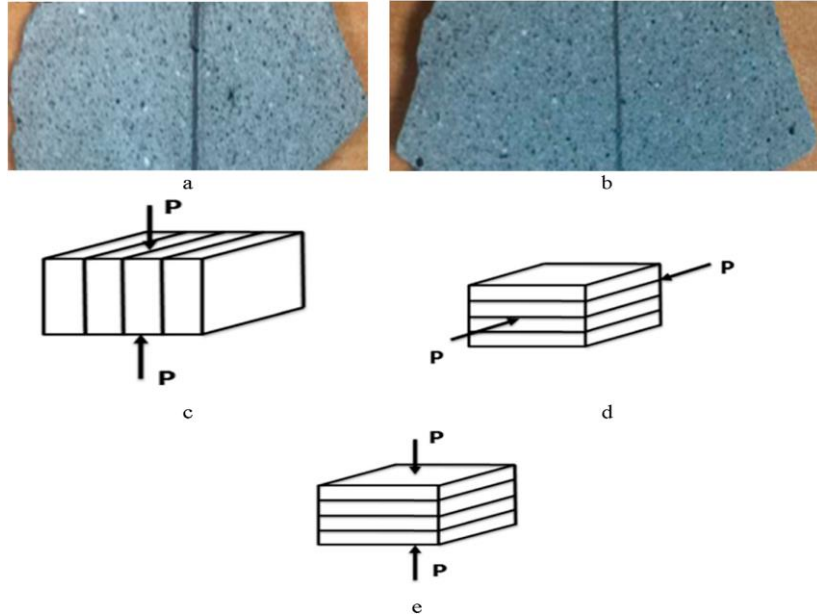
2.8. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Malzeme Özellikleri

Çeşitli yeni çalışmalar yeni yöntemler sunmaktadır. Örneğin, Dvorkin ve arkadaşları 2024 yılında 3D baskılı beton yapmak için ince agregaları incelemiştir. Betona mineral katkıları ve cüruf-alkali bağlayıcılar eklemişlerdir. Sonuçlara göre, maksimum basınç dayanımı 1 gün sonra 7,6 MPa ile 18,7 MPa arasında olmuştur. Her bir katmanın kalınlığının maksimum 4 cm olduğu belirtilmelidir. Resim 2.3, katmanları ve beton 3D baskı üretimini göstermektedir (Momeni ve ark., 2025).

Jiang ve arkadaşları 2024 yılında çapraz, dikey, kemerli ve diyagonal gibi farklı desen ve yolları analiz etmiştir. Filamentler arasındaki bağ nedeniyle kemerli yol 3D baskılı betonun en iyi eğilme dayanımına (diğer numunelere kıyasla % 30'dan fazla iyileşme) sahip olduğunu bulmuşlardır. Çimento, kum, silika dumanı ve uçucu kül kullanmışlardır. Mekanik özellik sonuçları, kemerli eğilme ve basınç dayanımlarının sırasıyla 6,3 MPa ve 12,4 MPa olduğunu göstermektedir (Momeni ve ark., 2025).

Portland çimentosu kullanılan 3D baskılı beton 20 MPa ile 60 MPa arasında basınç, 3 MPa ile 10 MPa arasında eğilme dayanımı vermiştir. Ayrıca, inşaat demiri ve donatı eklenmesi çekme mukavemetini ve sünekliği artırabilir. Asprone ve arkadaşları 2018 yılında, çelik çubuklarla 3D baskılı beton kiriş kullanmıştır. Çelik inşaat demiri ile güçlendirilmiş 3D baskılı beton kirişlerin, tamamen güçlendirilmiş beton kirişleriyle karşılaştırılabilir bir başlangıç sertliği sağladığını bulmuşlardır. Bazı araştırmacılar takviyelerin değiştirilmesi sonrası için iç boşlukları analiz etmişlerdir ve bu strateji prefabrik bileşenlerin montajında yapıların çekme ve eğilme mukavemetlerini iyileştirmek için kullanılabilir. Bir başka strateji de çelik donatı yerine liflerin kullanılmasıdır. Bazı araştırmalar 3D baskılı beton elyaf takviyesinin 3D baskılı beton çelik inşaat demiri takviyesine benzer yüksek mekanik özellikler elde edebileceğini göstermektedir (Momeni ve ark., 2025).

Bazalt, cam, çelik, karbon vb. gibi birçok lif türü, tokluk, süneklik, yorulma direnci, darbe direnci ve özellikle bina yapısının çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri geliştirmek için kullanılmaktadır. 3D baskılı beton dayanımını artırmak için lif oryantasyonu, en-boy oranı, boyut, tip ve hacim oranı gibi birçok husus vardır. En boy oranı 30 ila 150 arasında değiştiğinde daha yüksek en boy oranlı lifler daha yüksek çatlama sonrası dayanıma sahip olmuştur (Momeni ve ark., 2025).



Resim 2.3. 3D baskı metodolojisi: (A) ve (B) Farklı açıklık kalınlıkları, (C) X yönünde yükleme, (D) Y yönünde yükleme ve (E) Z yönünde yükleme (Momeni ve ark., 2025).

3D baskılı beton üzerindeki lifler işlenebilirliği büzülmeyi ve mekanik özellikleri etkileyebilir. Örneğin, çimento 483 g agregalar 1.074 g silis dumanı 268 g ve süperakışkanlaştırıcı 10,7 g'dan fazla olduğunda 3D baskılı betona % 1 çelik elyaf eklenmesi basınç dayanımını 109 MPa'dan fazla artırmaktadır. Bazı çalışmalar % 1'den fazla polietilen (PE) lif eklendiğinde basınç dayanımının 27,3 MPa'dan fazla arttığını çimentonun 1.000 g agregaların g bağlayıcı yüzdesinin % 35 ve süperakışkanlaştırıcının 1,28 g olduğunu göstermektedir. 3D baskılı betona polipropilen (PP) liflerin eklenmesi basınç dayanımını 60,5 MPa'nın üzerine çıkarmaktadır. Bu karışımda çimento 562 g, silis dumanı 81,4 g'dan fazla, agregalar 1.144 g ve süperakışkanlaştırıcı 4 g'dan fazladır. 3D baskılı betona % 1,5 polivinil alkol (PVA) lifi eklendiğinde, silis dumanı 110 g, çimento 1.000 g, agregalar 1.330 g ve süperakışkanlaştırıcı 11 g olduğunda, eğilme ve basınç dayanımları 10,81 MPa ve 45,05 MPa olmuştur (Momeni ve ark., 2025).

Singh ve arkadaşları 2022 yılında yaptığı çalışmada 13 mm uzunluğunda ve 200 µm çapında % 1 hacim oranına sahip liflerin 3D baskılı betona eklendiğinde inşa edilebilirliğin arttığını tespit etmiştir (Momeni ve ark., 2025).

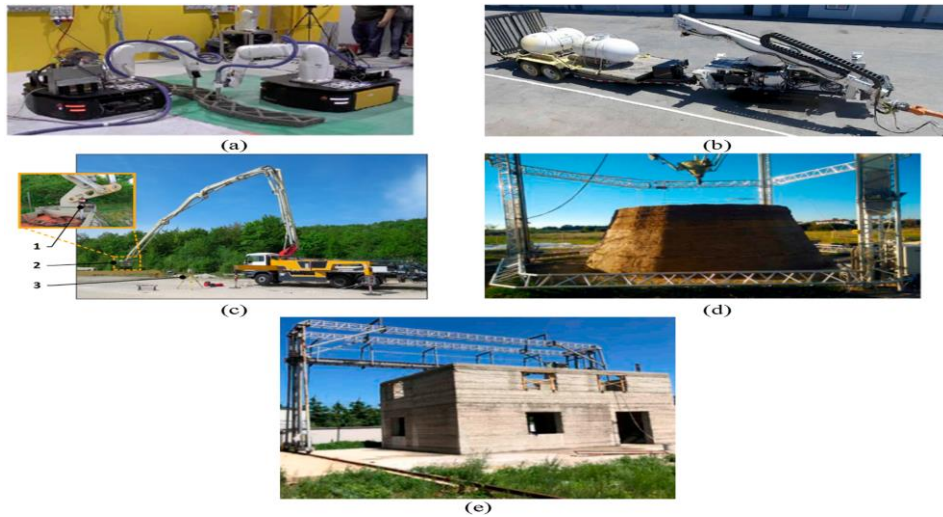
Lif yönelimi ve lif pozisyonu 3D baskılı betonda önemlidir. Liflerin izotropik dağılımı ve yönelimi 3D baskılı betonun dayanımını değiştirebilir. Liflerin uzunluğu, türü, sertliği ve esnekliği diğer önemli faktörlerdir. En iyi en-boy oranı aralığı 30 ila 150 arasındadır; lif yönelimi genellikle dikey, yatay veya rastgele dağılımdır. Lif oryantasyonu yatay hizalamaya değiştirildiğinde, eğilme dayanımı 120 MPa'dan fazla artmıştır. Diğer çalışmalar 3DPC teknolojisindeki farklı türleri ve yeni yöntemleri analiz etmiştir. Bai ve arkadaşları 2021 yılında, 3D baskılı betonda agrega olarak çöl kumu (küçük boyutlu), nehir tortulu seramik kumu (orta boyutlu) ve geri dönüştürülmüş betonu (büyük boyutlu) incelemiştir. Bu araştırmaya göre, bu tür agrega eklemek çimentolu matris büzülmesini azaltmıştır. En iyi akış hızı 2,3-3,5 mm/s ve genişleme çapı 160-210 mm/s olmuştur (Momeni ve ark., 2025).

Malzemeler 3D baskı yapımında önemli bir rol oynar. Kullanılan malzeme, tasarımı yeterli tutarlılık ve işlenebilirlikle harmanlamalıdır. Yapısal uygulamalar için bu, ağırlıklı olarak çimento, kum ve diğer katkı maddelerinden oluşan bir beton taban anlamına gelir. Bununla birlikte, bu yoldan sapan birkaç varyant vardır. Kesin karışım amaçtan amaca ve hatta 3D yazıcıya göre değişir. Hindistan'da 'Tvasta' adlı bir start-up şirketi, ülkenin uzak bölgelerindeki insanlara uygun fiyatlı ve sıhhi evler sunmak için kaliteli inşaat

sağlamaktadır. Bu şirket Hindistan'da 3D baskılı beton bir yapı inşa eden ilk şirkettir. Tvasta, IIT Madras ile işbirliği içinde, hem uygun fiyatlı hem de sürdürülebilir özel bir beton yaratmıştır. Özel beton daha düşük bir su-çimento oranına sahiptir. Uygulamaya bağlı olarak çimento ile birlikte amorf metal lifler veya plastik lifler kullanılmaktadır. Yani, kullanılan malzemeler Normal Portland çimentosuna dayalı, ancak daha düşük su çimento oranına sahip beton karışımıdır. Bu projede, 3D baskılı bir evin maliyet tahmini için aynı hammadde reçetesi de ele alınmıştır (Akhil ve ark., 2021).

2.9. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Teknoloji Uygulamaları

Bazı çalışmalar büyük ölçekli 3B baskılı beton binalara odaklanmıştır. Örneğin, Lowke ve arkadaşları 2021 yılında reolojik özellikleri, beton akış hızını ve nozül yer değiştirme hızını incelemiştir. Taşıyıcı sıvı olarak kireçtaşı süspansiyonunun maliyeti düşürdüğünü ve reolojik özellikleri kontrol ettiğini bulmuşlardır. Yapay mercan gibi malzemelerle 3D baskılı enjeksiyon için yeni bir yöntem bulmuşlardır. Baskı yöntemi robot kılavuzlu bir nozül olmuştur ve değişkenler nozülün kesit alanını içermiştir. Bu teknolojinin kafes tipi köprülerin basılması için en iyi teknik olduğunu bulmuştur. Mechtcherine ve arkadaşları 2019 yılında beton kamyonunu temel alan yeni bir 3B beton yazıcısı tasarlamıştır (Momeni ve ark., 2025). Yazıcının yüksekliği 10 m'dir ve yazıcı ray ile hareket ettirilmiştir. Bu yazıcıda, yerinde inşaat projesinde maksimum malzeme boyutu 15 mm olmuştur.



Resim 2.4. 3D baskılı beton. (A) Temel kol robotik, (B) Tanker tabanlı 3D yazıcı (MIT), (C) Mobil tabanlı 3D yazıcı, (D) WASP Company 3D yazıcı rayları ve (E) Çin Yeşil Baskı Şirketi.

Güneydoğu Üniversitesi ve Nanjing Akıllı Katmanlı Üretim Enstitüsü, duvarlar, kirişler, kolonlar ve döşemeler gibi prefabrike ve monte edilmiş 3D baskılı beton parçacıklarını yerinde tasarlamak için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Çin'in Nanjing kentinde 5,15 m yüksekliğinde, 286 m²'lik bir bina inşa edebilen 3D yazıcı teknolojisi geliştirilmiştir. Resim 2.4'te farklı 3D baskılı betonlar görülmektedir (Momeni ve ark., 2025).

2.10. 3D Baskı Betonarme Teknolojisinin Teknolojik Yönleri

Hali hazırda birçok çalışma, kaynaşmış biriktirme modelleme (FDM) gibi 3D baskı teknolojisi ile betonu güçlendirmeye çalışmaktadır. Bu tür bir çalışma, betonu güçlendirmek için farklı 3D baskı desenleri eklemeye çalışır. 3DPC teknolojisinden farklı olarak 3DPRC teknolojisi, güçlendirilmiş beton basmak ve betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için FDM teknolojisini kullanır. FDM yöntemini kullanarak 3D baskı için en önemli araçlar nozullar, filamentler, sıcak uçlar, ısıtma blokları vb. doğrudan tahrikli ve bowden olmak üzere iki ana baskı yöntemi vardır. Doğrudan tahrik yönteminde filament, filamenti ısıtma bloğuna doğru hareket ettirirken, Bowden yönteminde dişliler ipi Bowden tüpünden ısıtma bloğuna gönderir. Nozul sıcaklığı PLA erime sıcaklığından daha yüksektir. saf PLA erime sıcaklığı 180 °C-230 °C'den fazladır, PLA'nın yarı erime noktası sıcaklığı 150 °C-165 °C (T_m) ve camsı geçiş sıcaklığı 55 °C-65 °C'dir (T_g) (Momeni ve ark., 2025). Rosewitz ve arkadaşları 2019 yılında, çimento harcını güçlendirmek için malzeme olarak FDM teknolojisi ve polilaktik asit (PLA) ile üretilen farklı 3D baskı kalıpları kullanmıştır. Bazı 3B baskı kalıplarının eğilme mukavemetini iyileştirmek için uygun olduğunu ve bu tür güçlendirilmiş teknoloji baskısının uygulanmasının kirişi güçlendirmek için kullandığını bulmuştur. Salazar ve arkadaşları 2020 yılında çimento harcını güçlendirmek için PLA ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzemeleriyle bir 3D baskı kafesi kullanmıştır. Çimento harcına takviye olarak bir 3D baskı kafesi eklemenin en önemli faktörünün gerinim sertleşmesini iyileştirmek olduğunu anlamıştır. Çalışmalarının en iyi uygulaması, beton ve çimento harcının deprem yüklerine karşı direncini artırmak olmuştur (Momeni ve ark., 2025). Hao ve arkadaşları 2023 yılında, küpleri ve prizmaları güçlendirmek için 3D baskılı bir kafes kullanmayı araştırmıştır. Güçlendirilmiş numunelerin basınç dayanımını % 71,36'dan fazla artırdığını anlamışlardır. Çimento harcını güçlendirmek için polimer kullanmak betonun dayanıklılığını artırabilir ve uygun olabilir. Tzortzinis ve arkadaşları 2022 yılında, güçlendirilmiş betonun basınç dayanımını anlamak için çimento harcına altıgen auxetic

kafes geometrisi ile 3D baskı eklemiştir. Basınç dayanımı % 140'tan fazla artmıştır. 3D baskı çelik imalatının döngüsel ve dinamik yükler altındaki direnç yapıları için uygun olduğu anlaşılmıştır. Hematibahar ve arkadaşları 2023 yılında ultra yüksek performanslı betonu güçlendirmek için 3D baskı hiperbolik kabuk yapılarının etkisini incelemiştir. 3D baskı hiperbolik kabuk yapılarının betonun sünekliğini artırabileceğini bulmuşlardır. Chiadighikaobi ve arkadaşları 2024 yılında, yüksek performanslı betona 3D baskılı bir kafes eklendiğinde eğilme dayanımının arttığını bulmuştur. Bir kurulumda genellikle kalıplar basılır ve ardından kalıba beton dökülür. Kalıplar her deneyin tasarım yöntemlerine göre hazırlanır. Yaygın olarak, yapı önce 3D baskı yöntemi kullanılarak basılır, ardından kalıba yerleştirilir ve son olarak kalıplara beton yerleştirilir (Momeni ve ark., 2025).

2.11. 3D Baskı Betonarme Teknolojisinin Malzeme Özellikleri

Xu ve Savija 2024 yılında, PLA ile 3D baskılı üretimi auxetic bir şekil olarak analiz etmiştir. Dört tür yardımcı şekli analiz etmişlerdir: yeniden girintili (RE), dönen kare (RS), kiral (CR) ve eksik kaburga (MR). Elde ettikleri sonuçlara göre, RS yardımcı yapıları çimento matrisine eklendiğinde, basınç dayanımı % 18,5'ten fazla artmıştır ve süneklik % 32,2'den fazla azalmıştır (Momeni ve ark., 2025). Bol ve arkadaşları 2024 yılında çimento matrisine eklenen oksetik etkisini incelemiştir. Sonuçlara göre, plato sertliği ve dayanımı sırasıyla yaklaşık 120 MPa ve 3 MPa'dır. Yardımcı malzemeler kullanıldığında, gerinim sertleşmesi özelliklerinin sıkıştırma yüklemesi altında % 40 oranında iyileştiğini bulmuşlardır. Zhang ve arkadaşları 2022 yılında, çimento matrisine eklendiğinde yardımcı malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yeni bir yöntem sunmuşlardır. İlk olarak dairesel delikli ve deliksiz kiral kafesler üretmişlerdir. Sonuçlara göre, dairesel delikli auxetic malzeme gelişmiş yük taşıma kapasitesi göstermektedir. Yeni kiral kafes kompozitler hacim oranını 0,1 ve 0,5'ten daha fazla artırmıştır. Araştırmalar, takviye olarak farklı malzeme türleri kullanıldığında betonun mekanik özelliklerinin değişeceğini göstermektedir. Ayrıca, 3DPRC teknolojisinin uygulama alanı çok geniştir (Momeni ve ark., 2025).

2.12. 3D Baskı Betonarme Teknolojisinin Teknoloji Uygulamaları

Farklı FDM özellikleri 3D baskı imalatının mekanik özellikleriyle ilgilidir. Deneyler, 3D baskı imalatının geometrisi ve malzeme özellikleri değiştiğinde çimento matrisinin mekanik özelliklerinin de değişeceğini göstermektedir. Örneğin, Wan ve arkadaşları 2023 yılında gerçekleştirdiği çalışmada PVA malzemeleriyle vasküler ağlar basmak için katmanlı üretim kullanmıştır. Deneylerine göre, mum kaplı PVA malzemesi kullanılarak yapılan vasküler tüp, proxy reçinesi kendi kendini iyileştiren bir malzeme olarak vasküler tüpe enjekte edildiğinde çözünebilir. Son olarak, dört noktalı bükme testi, proxy reçinenin kendi kendini iyileştiren bir çimento matrisi olarak iyi performansını göstermektedir. Benzer şekilde, Wan ve arkadaşları 2023 yılında erimiş filament fabrikasyon (FFF) teknolojisi aracılığıyla vasküler tüpleri yazdırmak için yeni bir yöntemi analiz etmiştir. Reçine 3D baskılı vasküler ağa enjekte edilir, vasküler ağ çözülür ve reçine kendi kendini iyileştirir (Momeni ve ark., 2025).

2.13. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinde Maliyet ve Zaman Analizi

3 boyutlu beton baskı teknolojisinin maliyet avantajları, iş gücü verimliliği ve hızlı inşaat gibi güçlü yönlerini bir kez daha vurgulamaktadır. Aynı zamanda, teknolojik yatırımın maliyeti gibi bazı zorluklar da gözler önüne serilmiştir. 4500 dolar gibi düşük maliyetli ev yapımı, geleneksel inşaat yöntemleriyle kıyaslandığında önemli bir tasarruf sağlamaktadır. Geleneksel yöntemlerde, bir evin maliyeti genellikle çok daha yüksek olur ve bu fark, malzeme, işçilik ve kalıp maliyetlerinden kaynaklanır. Bu örnek, 3D baskının çok daha düşük işçilik maliyetleri ve malzeme verimliliği sunduğunu net bir şekilde göstermektedir. Sadece 8 işçi ile 10 evin inşa edilmesi, 3D baskının otomasyon gücünü ve iş gücü verimliliğini ortaya koymaktadır. Bu teknoloji, insan emeğini minimize ederek daha verimli bir üretim süreci sağlar. Ayrıca, iş gücü azaldığı için iş kazaları da önemli ölçüde azalma gösterebilir. Geleneksel inşaatta genellikle çok sayıda işçi çalışırken, 3D baskı ile az sayıda işçi ile yüksek verimlilik elde edilebilmektedir. Kalıp kullanmama avantajı, hem maliyetleri hem de üretim süresini kısaltır. Kalıp maliyetlerinin geleneksel inşaat projelerinin önemli bir kısmını oluşturduğunu göz önünde bulundurursak, 3D baskı bu maliyetten tasarruf sağlar. Vibrasyona gerek olmaması, beton karışımının daha düzgün ve hatasız bir şekilde yerleştirilmesine olanak tanır, aynı zamanda iş gücünün yükünü de azaltır. Ayrıca, bu durum yapının daha homojen ve daha sağlam olmasını sağlayabilir. 1

günde 10 ev gibi bir hızda üretim yapılabilmesi, 3D baskı teknolojisinin ne kadar hızlı inşa sağladığını göstermektedir. Geleneksel inşaat bu tür hızda inşaat yapabilmek, çok sayıda işçi, malzeme ve zaman gerektirecektir. Hızlı inşaat, özellikle acil konut ihtiyacı olan bölgelerde, doğal afet sonrası hızlı barınma çözümleri için büyük avantaj sağlar. 3D beton yazıcılarının yüksek maliyetleri (özellikle ilk kurulum maliyetleri), bu teknolojinin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri olabilir. Bu yazıcıların fiyatları, hala geleneksel inşaat ekipmanlarına göre oldukça yüksektir. Ancak teknoloji geliştikçe ve üretim süreçleri daha verimli hale geldikçe fiyatların düşmesi beklenmektedir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023). Bu örnek, 3D beton baskı teknolojisinin maliyet etkinliğini, iş gücü verimliliğini ve inşaat hızını öne çıkarmaktadır. Ancak, teknolojinin yüksek başlangıç maliyetleri, küçük ölçekli projeler için erişilebilirliğini sınırlayabilmektedir. Büyük ölçekli projelerde ise zaman ve maliyet tasarrufu sağlamak, yatırımın geri dönüşünü hızlandırabilir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023).

El Sakka ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptığı çalışmadaki zaman analizi, 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin üretim hızını ve verimliliğini detaylı şekilde göstermektedir. Yazıcı, saniyede 15 cm hızla çalışarak 60 m'lik bir kısmı 6,67 dakikada yazmıştır. Her katman 5 cm derinliğinde ve filament de 5 cm genişliğindedir. Bu durum, yazıcı başlığının belirli bir hızda hareket ettiğini ve yazdırma işlemi sırasında belirli bir derinlik ve genişlikte katmanlar oluşturduğunu göstermektedir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023). 6,67 dakika gibi bir süre zarfında yazıcı, 60 m uzunluğundaki bir kısmı yazabilmiştir. Bu durumda, yazıcının 1 m²'lik alanda üretim süresi şu şekilde hesaplanmıştır (Çatalkaya ve Kılınç, 2023):

$$6,67 \text{ dakika} / (60 \text{ m} \times 0,05 \text{ m}) = 2,22 \text{ dakika/m}^2$$

1 m² düşey yüzey alanı için yazdırma süresi 2,22 dakika olarak hesaplanmıştır.

Pencerelerin tabanına kadar yazdırılan toplam yüzey alanı aşağıda sunulmuştur (Çatalkaya ve Kılınç, 2023);

$$1,2 \text{ m} \times 60 \text{ m} = 72 \text{ m}^2$$

Pencerelerin tabanına kadar yazdırılan toplam yüzey alanı 72 m² olarak hesaplanmıştır (Çatalkaya ve Kılınç, 2023);

$$0,8 \text{ m} \times 60 \text{ m} = 48 \text{ m}^2$$

Pencerelerin üstüne kadar yazdırılan toplam yüzey alanı ise 48 m² olarak belirlenmiştir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023).

Khajavi ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptığı çalışmada, 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin maliyet üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, 3D beton baskı teknolojisi kullanılarak üretilen prefabrik banyo ünitelerinin, geleneksel prefabrik üretim yöntemlerine göre % 25 daha düşük maliyetle üretilebileceği ortaya konmuştur. Bu bulgu, 3D baskının maliyet avantajı sunduğuna dair önemli bir gösterge sunmaktadır. Geleneksel prefabrik üretim ile karşılaştırıldığında, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilen banyo üniteleri maliyet açısından % 25 daha ucuz olmuştur. Maliyet ve zaman analizi için, Singapur ve Danimarka'daki 3 boyutlu beton baskı teknolojisi uygulamaları kullanılmıştır. Bu iki ülkede uygulanan projelerden sağlanan veriler, 3D beton baskı teknolojisinin maliyet verimliliğini anlamamıza yardımcı olmuştur. Geleneksel yapım yöntemleri için analiz verileri, İsveç'in 2019 yılına ait Uluslararası Yapı Sektörü Araştırması verilerinden alınmıştır. Bu veriler, geleneksel inşaat yöntemlerinin maliyetlerini ortaya koymak amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada yapılan maliyet hesaplamaları, Euro cinsinden verilmiştir. Çizelge 2.2, bu maliyet verilerini görsel olarak sunmaktadır, fakat burada yalnızca bulgular ve analiz sonuçları incelenmiştir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023). Sonuç olarak 3D beton baskı teknolojisi, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla önemli bir maliyet avantajı sunmaktadır. % 25 daha düşük maliyet, bu teknolojinin potansiyelini gözler önüne sererken, hızlı üretim ve esneklik gibi ek faydalar da sağlayacaktır. Ayrıca, farklı ülkelerdeki uygulamalardan elde edilen veriler, bu teknolojinin dünya çapında potansiyel kullanım alanlarını genişletmektedir. Bu tür çalışmalar, 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin gelecekteki inşaat projelerinde daha yaygın hale gelmesinin ve sektördeki maliyet yapılarının daha verimli hale gelmesinin önünü açabilir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023). Winsun Firması ve diğer örnekler, 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin yapım sürecindeki devrimsel etkilerini ve potansiyelini göstermektedir. Özellikle inşaat süresi ve maliyet açısından avantajlar, bu teknolojiyi gelecekteki büyük ölçekli projeler için cazip hale getirmektedir. Winsun Firmasının 3D Beton Baskı ile birçok proje gerçekleştirmiştir. 2014 yılında 10 ev inşa etmiştir. Her bir evin büyüklüğü 195 m² olmuştur. Her bir evin inşa süresi 1 günden daha kısa sürede tamamlanmıştır. Her bir evin maliyeti 4800 dolar olmuştur. Ekstrüzyon bazlı 3D beton baskı teknolojisi kullanılmıştır. Temel ev bileşenleri, şantiye dışında üretilip, montajı şantiyede yapılmıştır. Bu örnek, 3D baskı teknolojisinin hızlı

Üretim kapasitesini ve maliyet verimliliğini gözler önüne sermiştir. Günümüzde benzer projelerin çok daha kısa sürelerde tamamlanması mümkün hale gelmiştir. 2015 yılında toplam alanı 110 m² olan 5 Katlı Apartman yapmıştır. Apartman, şantiye dışında üretilen beton elemanlarla tamamlanmıştır. Ayrıca maliyeti 160.000 dolar olan bir villa inşası gerçekleştirilmiştir. Bu yapılar 8 Richter ölçeğinde depreme karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Burada, çok katlı yapılar için de 3D beton baskı teknolojisinin nasıl kullanılabileceği ve deprem dayanıklılığı gibi kritik özelliklerin nasıl sağlanabileceği gösterilmiştir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023).

Çizelge2.2. Proje bileşenleri maliyet analizi

Bileşen	Ekipman	Maliyet (Euro)
Yazma makinası	Kuka robotik kol KR120 R3900+beton pompası	135000
Beton mikseri	M-tec	15000
Forklift	3 ton kaldırma kapasiteli	35000
Geleneksel yöntemler için hammadeler	Beton ve kalıp malzemeleri	110 Euro/m ³
3 boyutlu beton teknolojisi için hammadeler	1 tonluk ön karıştırması yapılmış kuru malzeme	150 Euro/m ³

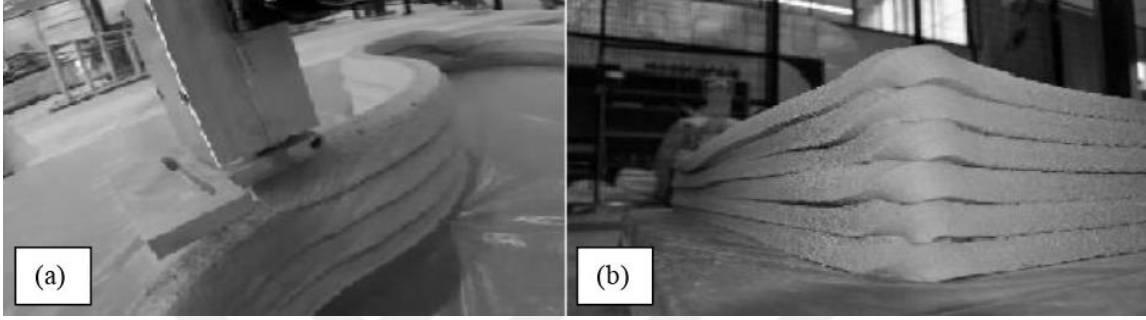
Pekin'de 400 m² iki katlı villa yapımı 45 günde tamamlanmıştır. C30 sınıfı beton kullanılmıştır. Pekin örneği, daha büyük ve karmaşık projelerde de 3D beton baskı teknolojisinin potansiyelini ortaya koymaktadır. Süpermakine Stüdyosu ve Siam Çimento Grubu işbirliği sonucunda 3 m uzunluğunda bir yapı üretilmiştir. Bu tür projeler, özelleştirilmiş ve yaratıcı tasarımlar konusunda da 3D beton baskı teknolojisinin sunduğu esnekliği göstermektedir. Geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla, 3D beton baskı teknolojisi, inşaat süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Winsun örneği, bu sürecin ne kadar hızlı olabileceğini kanıtlamaktadır. Sonuç olarak 3D beton baskı teknolojisi, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla önemli maliyet ve zaman avantajları sunmaktadır. Bu tür uygulamalar, gelecekteki büyük ölçekli projelerde verimlilik ve hız sağlarken, deprem dayanıklılığı gibi kritik unsurları da göz önünde bulunduracaktır. Ayrıca, bu teknoloji sayesinde inşaat sektöründe sürdürülebilirlik sağlanabilir ve yenilikçi tasarımlar daha kolay hayata geçirilebilir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023).

Tayland'da Süpermakine Stüdyosu ve Siam Çimento Grubu işbirliğinde yapılan yapının boyutu 3 m olmuştur. Yapının bileşenleri, fabrikada üretilmiştir. Yapının toplam maliyeti 28.000 dolar olmuştur. Bu örnek, 3D beton baskı teknolojisinin büyük ölçekli ve özelleştirilmiş yapılar için kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, fabrika ortamında üretilen bileşenlerin daha hızlı ve verimli bir şekilde montajlanabileceği, maliyetin optimize edilebileceği belirtilmiştir. Apis Core Firması Rusya'da 2016 yılında bir ev yapmıştır. Yapı 38 m² alana sahiptir. Yapı 24 saatte inşa edilmiştir. Ev, toplamda 10.134 dolar maliyetle inşa edilmiştir. Bu örnek, 3D beton baskı teknolojisinin hızlı üretim kapasitesini ve maliyet etkinliğini bir kez daha ortaya koymaktadır. Apis Core firması, bu teknolojiyi kullanarak geleneksel inşaat yöntemlerinden çok daha kısa sürede düşük maliyetle bir ev inşa edebilmiştir. Sonuç olarak 3D beton baskı teknolojisi, inşaat sektöründe daha hızlı, daha düşük maliyetli ve daha çevre dostu projelerin gerçekleştirilmesini sağlayan bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Winsun ve Apis Core gibi firmalar, bu teknolojiyi kullanarak inşaatın hızını ve maliyet verimliliğini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Gelecekte, modüler yapılar, sürdürülebilir projeler ve özelleştirilmiş tasarımlar gibi uygulamalarda bu teknolojinin daha fazla kullanılması beklenmektedir (Çatalkaya ve Kılınç, 2023).

2.14. 3D Baskı Yazıcı Otomatik Yapı Üretim Prensipleri

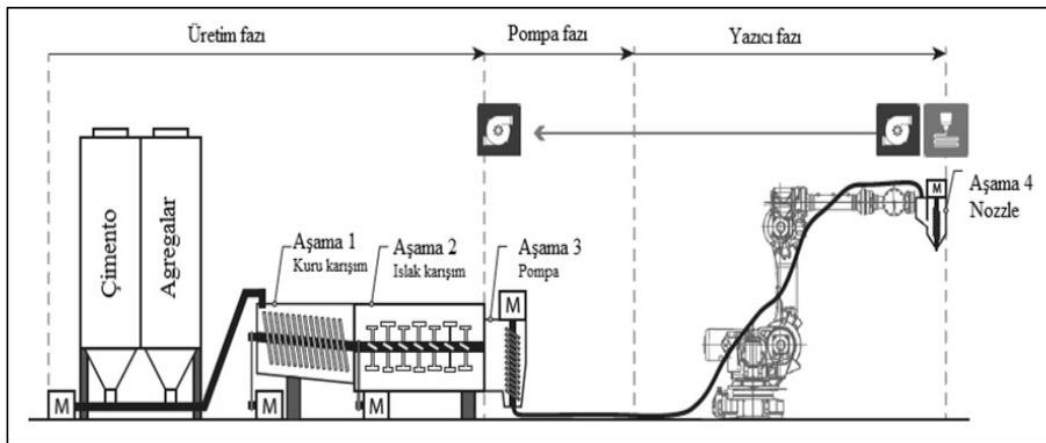
Konvansiyonel metotla yapı üretiminde kullanılan beton, agrega, çimento ve suyun kimyasal ve mineral katkı maddeleri ile birlikte homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla katılaşıp dayanım kazanan kompozit bir yapı malzemesidir. Projelendirme aşamasında belirlenen yapı elemanlarının şekil ve boyutlarına uygun kalıplar hazırlanarak taze beton bu kalıplara yerleştirilir. Kalıplar içerisindeki beton sertleşip dayanım kazandıktan sonra sökülür; bu süreçten sonra da betonun sertleşme ve dayanım kazanma süreci devam eder. Taze ve sertleşmiş betonun tüm özellikleri, kullanılan çimento, agrega, su ve katkı malzemelerinin özellikleri ile karışım içindeki oranları tarafından etkilenir (Uygunoğlu ve ark., 2019). Konvansiyonel metottaki beton yerleştirme işleminin aksine 3D baskı yazıcıda kalıpsız katmanlı üretim esastır ve yerleştirme esnasında baskı katmanının genişliği ve kalınlığı kontrol edilmelidir (Resim 2.5.a,b). 3D baskı yazıcılarla yapı üretimi yapılabilmesi için öncelikle 3 boyutlu model tasarıma ihtiyaç vardır. Bilgisayar ortamında tasarlanan çizimlerin somutlaştırılması için de 3D baskı yazıcılarda çimento esaslı harç malzemesi

kullanılmaktadır. Harç ise çimento, su ve ince agrega karışımından oluşan ve içerisinde iri agrega bulunmayan bir karışımdan oluşmaktadır (Uygunoğlu ve ark., 2019). Katmanlı üretim yapacak olan yazıcının harcı yazdırma işlemi, üç farklı faz ve dört aşamadan oluşmaktadır (Şekil 2.1). Üretim fazında baskı işleminde kullanılacak olan harcı oluşturan malzemeler iki farklı besleme tankına yerleştirilir. İlk aşamada bu malzemelerden kuru karışım, ikinci aşamada ise ıslak karışım hazırlanır.



Resim 2.5. 3D baskı yazıcı ile a) harç filamentlerin basılması ve b) bükülmesi

Pompa fazına geçildiğinde üçüncü aşama olan pompa devreye girer ve pompalama sırasında malzeme bir borudan geçerek nozula aktarılır. Yazıcı fazı ise pompayla iletilen harcın son aşamadaki nozul olarak adlandırılan hareketli uçtan belirli noktalara (extruding) sıkılması işlemiyle gerçekleştirilir. Daha sonra malzemenin katılaşması ile üretim tamamlanmış olur (Uygunoğlu ve ark., 2019).



Şekil 2.1. 3D baskı yazıcı otomatik yapı üretim fazlarının şematik gösterimi

3D baskı yazıcılarla otomatik yapı üretimi, çeşitli projelere bağlı olarak farklı yöntemler ve teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Le ve arkadaşları 9 mm nozulu ve

dijital kontrol özelliklerine sahip bir baskı işlemi kullanırken, Malaeb ve arkadaşları 2 cm çapında bir ağızlığa sahip, arkasında iki mala bulunan bir makineyi üç eksenli düzlemde hareket ettirmek için tasarlamışlardır. Ayrıca, Gosselin ve arkadaşları, 6 eksenli bir robot koluna entegre edilmiş bir baskı kafasıyla çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Bu örnekler, 3D baskı sürecinin çeşitliliğini ve uygulama alanlarının genişliğini göstermektedir. Her bir yaklaşım, belirli projelerin gereksinimlerine göre optimize edilmiştir (Uygunoğlu ve ark., 2019).

2.15. 3 Boyutlu Yazıcıların Çalışma Prensipleri

Karmaşık nesneler, dijital ortamda oluşturulan bilgisayar destekli tasarım (CAD) dosyaları kullanılarak üç boyutlu yazıcılar aracılığıyla üretilmektedir. Üç boyutlu yazdırma teknolojileri; yazıcı donanımının yanı sıra modelleme yazılımları, üç boyutlu tarayıcılar ve filament olarak adlandırılan özel hammaddeleri kapsamaktadır. Üç boyutlu yazıcılarla uyumlu tasarımlar, AutoCAD, 3ds Max, SketchUp, Tinkercad, Autodesk 123D ve SolidWorks gibi çeşitli yazılımlar kullanılarak oluşturulmaktadır. Yazdırılacak nesnenin dijital modeli, bu tür tasarım programları aracılığıyla ya da üç boyutlu tarayıcılar yardımıyla bilgisayar ortamında oluşturulur. Daha sonra bu model, yazdırma işlemine uygun bir formatta üç boyutlu yazıcıya aktarılır. Bu aşamada özel dilimleme (slicing) yazılımları kullanılarak model katmanlara ayrılır. Filament adı verilen ince iplik formundaki yazıcı mürekkebi kullanılarak, bu dijital model fiziksel bir nesneye dönüştürülür. Üç boyutlu yazıcılarda hammadde olarak; plastik tozları, reçine, oyun hamuru, seramik, metal, yiyecek malzemeleri, biyomateryaller, çimento, cam, çeşitli metaller, metal alaşımları ve kompozit malzemeler gibi çok çeşitli materyaller kullanılabilir. Bunlar arasında, dayanıklılığı ve sertliği nedeniyle en çok tercih edilen yazdırma malzemesi plastiktir. Plastik materyal, ince katmanlar halinde üst üste işlenerek üç boyutlu yazdırma süreciyle nesnenin fiziksel modeli oluşturulur (Sönmez ve ark., 2018).

2.16. 3D Yazıcıların Üretim Teknikleri

Eklemeli imalat teknolojisi, üç boyutlu dijital veriler kullanılarak malzemenin katmanlar halinde üst üste eklenmesi yoluyla, karmaşık geometrilere sahip fiziksel parçaların hızlı

ve etkin bir şekilde üretilmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu sistem kapsamında kullanılan başlıca teknikler aşağıda sıralanmıştır (Sönmez ve ark., 2018).

2.16.1. Direkt Katmanlı Üretim

Eklemeli imalat iki temel ilke içermektedir (Sönmez ve ark., 2018).

- *Katman Oluşturma (Kontur Belirleme):* İmalat süreci, üç boyutlu dijital modelin ilk katmanına uygun şekilde konturların belirlenmesiyle başlar. Bu aşamada, modelin dış sınırlarını ve iç yapısını temsil eden kesit geometrileri tanımlanarak yazdırma işlemine temel oluşturulur.
- *Katmanların Üst Üste Eklenmesi:* Her yeni katman, bir önceki katman üzerine hassas bir şekilde yerleştirilerek yapı inşa edilir. Bu katmanlar ardışık olarak eklenerek modelin üç boyutlu yapısı adım adım oluşturulur.

Bahsi geçen ikinci adım ürün meydana gelene kadar devam eder. Bu sistem 1980’li yıllarda başlamış ve günümüzde de popülerliğini arttırmış olup birçok sektörde avantajlı üretimler gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu teknoloji sayesinde, herhangi bir organı zarar gören ve tedavi için hastanelere gelen hastalara kısa sürede yeni organ üretilmesi yakın gelecekte beklenen bir gelişmedir (Sönmez ve ark., 2018). Katmanların birbirine başarılı bir şekilde bağlanmasında, eklemeli imalatta kullanılan filament veya hammadde türü büyük önem taşır. Bu durum, elde edilen ürünlerin yapısal özelliklerini ve kullanım alanlarını doğrudan etkilemektedir. Eklemeli imalat sürecinde plastik, metal ve seramik gibi çeşitli malzemeler kullanılmakta olup; bu malzemeler toz, ergimiş (eritilmiş), sıvı ya da tel (filament) formunda sürece dahil edilebilmektedir (Sönmez ve ark., 2018).

2.16.2. Polimerleşme

Polimerizasyon yöntemi, sıvı haldeki monomer reçinenin (örneğin epoksi, akrilat, vinil, eter) ultraviyole (UV) ışınları yardımıyla katılaştırılması prensibine dayanır. Bu yöntem, kontur ve katman oluşumunu sağlayarak katı tabakanın elde edilmesini mümkün kılar ve literatürde genellikle "fotopolimerizasyon" olarak anılır. Bazı uygulamalarda, yalnızca belirli bölgelerin katılaştırılmasıyla "bölgesel kürleşme" sağlanır. Üretilen parça (yeşil parça) tam olarak kürleşmemiş olabilir ve bu durumda ek kürleşme işlemleri gerekebilir.

Bu tür durumlarda, ön kürlenmiş parçalar UV ışınlarının uygulandığı özel fırınlarda ek kürleşmeye tabi tutulur (Sönmez ve ark., 2018).

2.16.3. Stereolitografi (SLA)

Stereolitografi, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçinenin, morötesi (UV) lazer ışını ile belirli bölgelerinin noktasal olarak kürleştirilmesi prensibine dayanan bir eklemeli imalat tekniğidir. Bu yöntemde, bilgisayar kontrollü bir tarama sistemi, üç boyutlu modelin geometrisine uygun olarak lazer ışınını reçine yüzeyi üzerinde yönlendirir ve böylece ilk katman oluşturulur. Daha sonra, parçanın yer aldığı platform bir katman kalınlığı kadar aşağı indirilir ve yeni bir fotopolimer katmanı, özel bir sıvama kanadı yardımıyla önceki katmanın üzerine yayılır. Bu işlem, her katmanın sırasıyla kürleştirilmesiyle devam eder. Tüm katmanlar tamamlandıktan sonra, nihai parça reçine havuzundan çıkarılarak işlem tamamlanır (Sönmez ve ark., 2018).

2.16.4. Polimer Jet Yöntemi (Polyjet-Multijet) Modelleme

Polimer Jet teknolojisi, yazıcı kafasında bulunan çok sayıda küçük nozül aracılığıyla, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçinenin yüzeye püskürtülmesi prensibine dayanmaktadır. Püskürtülen materyal, aynı anda uygulanan morötesi (UV) ışıkla anında kürleştirilerek katı hale getirilir. Bu işlem katman katman tekrarlanarak üç boyutlu model oluşturulur. Enjeksiyon kafalarının bir bölümü modeli oluşturan temel malzemeyi püskürtürken, diğer bölümü ise yapı süresince geçici destek görevi gören destek malzemesini uygular. Üretim süreci tamamlandıktan sonra, yapı platformu üzerindeki parça mekanik yöntemlerle yüzeyden ayrılır. Bu teknoloji, bazı firmalar tarafından “PolyJet” ya da “MultiJet” gibi ticari isimlerle pazarlanmaktadır (Sönmez ve ark., 2018).

2.16.5. Dijital Işık Yöntemi (Digital Light Processing - DLP)

Dijital Işık İşleme (DLP), anlık katılaşmayı sağlamak için enerji kaynağı olarak dijital ışık (projektor) kullanılan bir eklemeli imalat teknolojisidir. Sistemin alt kısmına yerleştirilen projektor, doğrudan modelin bir katmanını temsil eden ışık desenini reçine haznesine yansıtır. Bu hazne, ışığın geçişini sağlamak amacıyla şeffaf bir alt platforma sahiptir. Katılaşma işlemi, reçinenin bu ışığa maruz kalmasıyla anında gerçekleşir.

Platform, her katman üretildikçe yukarı doğru hareket eder ve yeni katmanın oluşması için reçine yüzeyi tekrar hazırlanır. DLP teknolojisi, temel prensipleri bakımından Stereolitografi (SLA) yöntemiyle benzerlik gösterse de; ışık kaynağı olarak lazer yerine projektör kullanılması ve reçine sertleştirme yöntemi açısından farklılık arz etmektedir (Sönmez ve ark., 2018).

2.16.6. Mikro Stereolitografi (Micro Stereolithography)

Mikro stereolitografi SLA'ya benzer bir mantık da çalışmaktadır ve daha çok küçük parçaların seri üretiminde kullanılmaktadır (Sönmez ve ark., 2018).



3. İNŞAATTA KULLANILAN 3D YAZICILAR

3.1. 3D Yazıcıların Avantajları ve Dezavantajları

3.1.1. 3D Yazıcıların Avantajları

3D Baskı, 3D modeli katmanlara ayıran bir yöntemdir. Her katman 0,1 mm kalınlığında plakalardan oluşur. Oluşturulan plakalar üst üste kaynatılarak model oluşturulur. Bu yönüyle bir bloğu keserek ve frezeleyerek talaşlı imalattan ayrılır. Sadece atık bırakmakla kalmaz aynı zamanda üretimde esneklik ve yaratıcılık sağlar. Ayrıca 3D baskı küçük miktarlar için uygun olduğundan plastik enjeksiyon teknolojisine kıyasla daha ekonomik çözümler üretebilmektedir. Kalıba ihtiyaç duymadan sadece yapılacak değişikliklerle üretilen ürünün değişmesine olanak sağlamaktadır. Bir diğer avantajı ise diğer üretim yöntemleri ile imalatı zor ya da imkânsız olan modelleri üretebilmesidir. Bu yönüyle tasarımcılara sınırların ötesinde esneklik ve yaratıcılık sunar (Özbay, E., Özbay, F.A., 2022).

3.1.2. 3D Yazıcıların Dezavantajları

Diğer seri üretim yöntemlerine kıyasla 3D yazıcıların üretim süresi daha uzun bir üretim yöntemi gerektirir. Diğer üretim yöntemlerinde gereken kalıp, takım tasarım gibi aşamalar 3D yazıcılarda yoktur. Bundan dolayı daha hızlı ürün üretimi gerçekleştirilmektedir. 3D yazıcılar ile seri üretimde diğer yöntemlere kıyasla daha yavaş bir seri üretim söz konusu olmaktadır. 3D yazıcılarda yüzey pürüzlülüğü bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Katmanlar çok çok küçük bile olsa dikkatli incelendiğinde gözlemlenebilmektedir. Geleneksel üretim yöntemleri ile kıyaslandığında malzeme çeşitliliği oldukça az olmaktadır. Döküm ve talaşlı imalat ile kıyaslandığında hassasiyet oldukça büyük bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. 3D yazıcı ile dev makine parçaları üretmek oldukça problemli olmaktadır. Hacim arttıkça yukarıda vurgulanan problemler katlanarak artmaktadır (Sönmez ve ark., 2018).

3.2. Üç Boyutlu Yazıcı Betonunun Avantajları ve Dezavantajları

Üç boyutlu (3B) beton baskı teknolojisi, inşaat sektöründe yenilikçi bir üretim yöntemi olarak dikkat çekmektedir. Ancak bu teknolojinin yaygınlaşmasının önünde çeşitli teknik ve malzeme temelli zorluklar bulunmaktadır. Öncelikli olarak, 3B baskı sistemlerinde kullanılabilecek beton türlerinin sınırlı olması ve kaliteli malzemelerin yüksek maliyetli oluşu, uygulamada önemli kısıtlar yaratmaktadır. Bu durum, özellikle büyük ölçekli projelerde maliyet-etkin çözümler geliştirilmesini zorlaştırmaktadır. Teknolojinin başarılı şekilde uygulanabilmesi için çökme meydana gelmeden üst üste beton katmanlarının yerleştirilebilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda, büzülme kaynaklı çatlakların önlenmesi de, yapı bütünlüğü açısından kritik bir konudur. Bu hedeflere ulaşabilmek için, uygun karışım oranlarının belirlenmesiyle özel bir beton reçetesi hazırlanmalı ve uygulama sürecinde optimal kür koşulları sağlanmalıdır. Kalıpsız üretim tekniği kullanıldığından, taze betonun sertleşme süreci, özellikle katkı maddeleriyle kimyasal olarak kontrol altına alınmalıdır. Bu üretim sisteminin değerlendirilmesinde, Schutter ve arkadaşları tarafından beş temel performans kriteri tanımlanmıştır. Bu kriterler aşağıda sunulmuştur (Aygün ve Kaman, 2021):

- Ekstrüde edilebilirlik (betonun yazıcıdan sorunsuz biçimde çıkabilme yetisi)
- Akışkanlık (karışımın homojen biçimde yayılabilme özelliği)
- İnşa edilebilirlik (katmanlar arasında deformasyon olmadan yapının yükseltilebilmesi)
- Basınç dayanımı (sertleşmiş betonun taşıyıcı performansı)
- Açık zaman (işlenebilirlik süresi)

Bu kriterlerin her biri, yazdırılabilir betonun performansını belirlemede temel ölçütler olup, 3B beton yazıcı sistemlerinin tasarımı ve uygulanması sürecinde dikkate alınması gereken teknik gerekliliklerdir. Üç boyutlu beton baskı teknolojisinin başarısı, yazdırılabilir beton karışımının çeşitli teknik özelliklerine bağlıdır. Bu bağlamda, ekstrüde edilebilirlik, betonun yazıcı ağzından herhangi bir tıkanma olmaksızın homojen biçimde çıkabilme yetisi olarak tanımlanabilir. Bu parametre, doğrudan betonun akışkanlık özelliğiyle ilişkili olup, karışım tasarımıındaki kuru bileşen oranları, mineral ve kimyasal katkıların tipi, miktarı ve dağılımı gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Ancak ekstrüde edilebilirlik için henüz literatürde standardize edilmiş bir deney yöntemi bulunmamaktadır (Aygün ve Kaman, 2021). Öte yandan, akışkanlık testi için geleneksel

yayılma testi kullanılmakta olup, bu test ile karışımın akma kolaylığı ölçülmekte ve optimum değerler belirlenebilmektedir. Katmanlı üretim tekniğinde bir diğer kritik özellik olan inşa edilebilirlik, taze betonun kalıpsız bir ortamda kendi ağırlığını taşıyabilme kapasitesiyle ilgilidir. Bu özellik, prototip bir sıkma düzeneğiyle yapılan dökümler sonucunda katmanların deformasyon düzeyi ve çökme miktarı gözlemlenerek, katman sayısına göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmektedir. Çalışılabilirlik süresi (açık zaman), geleneksel beton döküm yöntemlerindeki işlenebilirlik kavramından farklı olarak ele alınmaktadır. Bu bağlamda, betonun yazıcı ağızından çıkan ilk katman ile üzerine uygulanacak sonraki katmanlar arasındaki zaman farkı, priz süresi açısından kritik öneme sahiptir. Katmanlar arası adezyonun sağlanabilmesi için priz süresinin çok kısa olmaması, ancak yeterli dayanımı sağlayacak kadar hızlı gelişmesi gerekmektedir. Son olarak, 3B beton yazımında hedeflenen basınç dayanımı, geleneksel yöntemlerdeki gibi tek seferde döküm değil, katmanlar halinde uygulandığından daha yüksek bir hassasiyet gerektirir. Bu nedenle, standardize edilmiş boyutlarda hazırlanan numuneler üzerinde basınç dayanımı ve eğilme dayanımı testleri gerçekleştirilerek karışım performansı belirlenmelidir (Aygün ve Kaman, 2021).

3.3. 3D Yazıcıların İşlevselliği

Üç boyutlu yazıcılar, maliyet ve işlevsellik açısından imalat sektörüne gerçekten de çığır açan imkanlar sunmaktadır. Geleneksel eksiltmeli imalat yöntemleriyle üretimi zor veya maliyetli olan büyük ebatlı ve karmaşık şekiller, üç boyutlu yazıcılar sayesinde artık çok daha kolay ve uygulanabilir hale gelmektedir. Bu durum, tasarım özgürlüğünü önemli ölçüde artırmaktadır ve mühendislerin, hayallerindeki tasarımları somut ürünlere dönüştürme potansiyelini yükseltmektedir. Üç boyutlu yazıcıların, geleneksel yöntemlerle üretilemeyen karmaşık objeleri üretebilme yeteneği, özellikle havacılık, tıp ve otomotiv gibi yüksek hassasiyet ve özelleştirme gerektiren sektörlerde büyük avantajlar sağlamaktadır (Tümer, 2020).

3.4. Basım Sektöründe 3D Yazıcılar

Basım sektöründe 3D yazıcılar kullanılarak birçok alanda proto tiplendirme, proje ve maket üretimi gerçekleştirilir ve seri üretim öncesi karşılaşılabilecek problemlerin önüne geçilebilir. Aynı zamanda promosyon alanında hizmet vermekte olan firmalar için 3

boyutlu promosyon çözümlerin üretilmesi aşamasında ve kişiye özel hediyelerin hazırlanmasında 3D yazıcılar kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan 3D yazıcılar tek renk veya CMYK baskı teknolojisi ile renkli üretimler gerçekleştirerek sektörün ihtiyaçlarına cevap vermektedir. Ayrıca 3D yazıcılar kullanılarak açık hava reklamcılığına yeni bakış açıları kazandırılmıştır. 3D teknolojisinin imkanları kullanılarak diğer sektörler de olduğu gibi basım sektöründe de birçok makinanın yedek parçaları herhangi bir kalıp maliyeti olmaksızın parça üretimleri yapılabilmektedir (Sönmez ve ark., 2018).

3.5. Üç Boyutlu Yazıcılarla Üretilen Yapı Elemanları

3.5.1. 3D Baskı Yazıcı İle Çimento Esaslı Duvar Üretimi

3D baskı beton teknolojisi, kalıp ihtiyacını ortadan kaldırarak hem malzeme tasarrufu sağlamaktadır hem de inşaat süreçlerini hızlandırmaktadır. Boşluklu yapılar oluşturma ve donatı ekleme imkanı, bu yöntemi geleneksel betonarme sistemlere alternatif hale getirmektedir. Özellikle erken mekanik dayanım, baskının kesintisiz ilerleyebilmesi için kritik bir parametredir. Çimento esaslı malzemeye eklenen katkılar, hem reolojik kontrolü sağlamak hem de katmanlar arası aderansı güçlendirmek için önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, 3D baskılı beton duvarların yalnızca mekanik özelliklerle değil, fonksiyonel gereksinimlerle de optimize edilmesi gerektiği fikri oldukça önemli. Isı ve ses yalıtımı, enerji verimliliği, geometrik özgürlükle fonksiyonelliğin birleşimi, yeni nesil yapı malzemelerinin geliştirilmesinde dikkate alınmalıdır. Termal köprülerin azaltılması, duvarların ısı yalıtım performansını önemli ölçüde artırabilir. Özellikle betonarme yapılarda, iç donatı geometrisinin optimize edilmesiyle ısı transferinin azalması sağlanabilir. Burada temel prensip, yüksek ısı iletkenliğine sahip betonun kesit alanını en aza indirerek, düşük iletkenlikli malzemelerle ısı akışını kesintiye uğratmaktır. Yapısal performansı koruyarak duvarın iki yüzü arasındaki temas alanını azaltmak, ısı kaybını sınırlar. Donatı yerleşiminin optimize edilmesi, geleneksel tasarıma kıyasla ciddi bir ısı yalıtım kazancı sağlayabilir. Yapılan araştırmalar, sadece iç donatı geometrisinin değiştirilmesiyle bile ciddi bir yalıtım artışı sağlanabileceğini göstermektedir. 3D baskı teknolojisi sayesinde akustik performansı artırılmış yapısal elemanlar üretmek mümkündür. Farklı delik geometrileri ve hücresel yapılar, ses dalgalarının soğurulmasını ve yansıtılmasını optimize ederek gürültü kontrolüne katkı sağlayabilir. Bu tür duvar

elemanları, özellikle yankı süresini düşürmek ve belirli frekans aralıklarında ses yalıtımını artırmak için özelleştirilebilir. Bu tür 3D baskılı duvar elemanları için malzeme seçimi de büyük önem taşır. Gözenekli veya kompozit malzemeler kullanılarak hem hafiflik hem de mekanik dayanım sağlanabilir. Özellikle biyobazlı veya geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı, sürdürülebilirlik açısından avantaj sunabilir (Uygunoğlu ve ark., 2019).

3.5.2. 3D Baskı Yazıcı ile Yapı Üretiminde Donatı Bağlanması

3D baskı beton teknolojisinde en büyük zorluklardan biri donatı entegrasyonudur. Geleneksel betonarme sistemlerde donatı, betonun çekme dayanımını artıran kritik bir bileşen olduğu için, 3D baskılı beton yapıların da benzer bir dayanımı sağlayacak şekilde güçlendirilmesi gerekmektedir. Ancak, mevcut 3D baskı süreçleri genellikle yalnızca beton ekstrüzyonuna odaklandığından, geleneksel çelik donatının yerleştirilmesi zor ve zaman alıcıdır. Beton karışımına karbon fiber veya cam fiber gibi takviyeler eklenerek çekme dayanımı artırılabilir. Fiber takviyeli polimerler (FRP) de hafif ve yüksek dayanımlı bir alternatif sunabilir. 3D baskı süreciyle entegre çalışan robotlar aracılığıyla çelik veya FRP donatıların katmanlı yapıya dahil edilmesi önerilebilir. Önceden üretilmiş modüler donatı elemanları ile 3D baskılı betonun birleştirilmesi gibi hibrit yöntemler geliştirilebilir. Yüksek dayanımlı ve düşük gözenekli bu özel beton türü, donatı ihtiyacını minimize edebilir. Kontur hazırlama tekniği, 3D baskı beton üretiminde donatı entegrasyonunu sağlamak için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu teknik, betonun katmanlı üretimi ile geleneksel donatı yerleştirme süreçlerini birleştirerek daha dayanıklı ve yapısal olarak güvenli elemanların üretimine olanak tanımaktadır. Hem dikey hem de yatay donatıların eklenmesine olanak tanır, böylece betonun çekme dayanımı artırılır. Prefabrik yapı elemanları üretmek için uygun olup sahada montajı kolaylaştırabilir. 3D baskı süreci sayesinde donatının konumlandırılması daha kontrollü olabilir. Ancak bazı zorluklar da mevcuttur. Donatıların baskı süreciyle senkronize edilmesi karmaşıktır ve ek otomasyon gerektirebilir. Kalıp dolum aşamasında betonun akışkanlık özellikleri iyi ayarlanmalıdır, aksi halde boşluklar oluşabilir. Donatı-beton aderansı, konvansiyonel betonarme sistemlere kıyasla farklılık gösterebilir, bu yüzden özel bağlayıcılar veya yüzey işlemleri gerekebilir. Çelik telin doğrudan yazıcı kafasından yerleştirilmesi veya önceden hazırlanmış takviye kafesinin yanında beton ekstrüzyon edilerek hibrit yapı oluşturulması gibi iki temel yöneme değinmektedir. Bu bağlamda,

otomatik yapı üretimi süreçlerinde hem ara katmanlara donatı eklenmesi hem de eşzamanlı beton ekstrüzyonu önemli yenilikler arasında yer almaktadır. 3D yazıcı teknolojisi ile üretilen betonarme yapı elemanları inşaat sektöründe devrim yaratmıştır. Prefabrik kiriş elemanlarının çelik donatılarla güçlendirilmesi, betonun düşük çekme dayanımı problemini çözerek daha büyük açıklıkların geçilmesine olanak tanıyabilir. Bu tür elemanların optimizasyonu için topoloji optimizasyonu ve malzeme mühendisliği açısından detaylı analizler yapılması gerekir. Ayrıca, yükleme testleri, yorulma dayanımı ve dayanıklılık analizleri de bu elemanların uzun vadeli performansını değerlendirmek için önemlidir (Uygunoğlu ve ark., 2019).

3.5.3. 3D Baskı Yazıcı ile Üretilen Seramik Duvar Elemanları

3D baskı ile seramik tuğla üretimi, yapı sektöründe sürdürülebilirlik ve tasarım özgürlüğü açısından büyük fırsatlar sunmaktadır. Özellikle harçsız montaj ve kenetlenmeli modüler tasarımlar, inşaat sürecini hızlandırarak iş gücü maliyetlerini ve hata oranlarını azaltabilir. Bu yöntemle üretilen polybricks gibi seramik bileşenler geleneksel yöntemlere kıyasla daha az malzeme tüketir. Hafifletilmiş tasarımlar sayesinde enerji verimliliğini artırır. Özel geometrik formların üretilmesine imkân tanır. Biyo-esinlenmeli tasarımlar ile dayanıklılığı artırabilir. Özellikle mimari cephe tasarımları, iç mekan panelleri ve hafif modüler duvarlar için büyük avantajlar sunmaktadır. Kıl bazlı 3D baskı teknolojisi, özellikle sürdürülebilir inşaat uygulamalarında büyük potansiyel taşımaktadır. Seramik malzemelerden ilham alınarak geliştirilen bu yöntem, geleneksel tuğla üretimine kıyasla daha az enerji tüketen ve karbon ayak izini düşüren bir alternatif sunmaktadır. Toprak esaslı baskı malzemelerinde yeşil dayanımın hızla gelişmesi için biyopolimer katkıları (örneğin aljinatlı deniz yosunu) eklenmesi, bu yapı elemanlarının stabilitesini artırmak açısından önemli bir stratejidir. Ayrıca, taze karıştırılmış toprağın reolojik özelliklerinin nüfuz etme yöntemiyle değerlendirilmesi, malzemenin baskıya uygunluğunu belirlemede kritik bir rol oynamaktadır (Uygunoğlu ve ark., 2019).

3.6. 3 Boyutlu Yazıcı Beton

3.6.1. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Modelini İnşa Etme

CAD yazılımında 7 adım söz konusu olmaktadır (Ranjha ve ark., 2018);

- Modeli Revit programında oluşturunuz. Model oluştururken ekstrüzyon kullanarak su geçirmez hale getiriniz.
- Yerinde bileşen/kütle görünür oluşturmak için eleman katmanını açınız ve çizimin baskıya hazır olduğundan emin olunuz.
- Revit dosyasını, 3 boyutlu yazıcı için girdi olarak kullanılabilmesi için STL formatına dışa aktarınız.
- 3 boyutlu yazıcı için uygun yazılımı kullanınız. Blog yazısında LulzBot Taz 6 yazıcısıyla çalışıldığı için Cura kullanılmalıdır. Repetier-Host veya Slic3r gibi kullanılabilecek başka yazılımlar da vardır.
- Baskı katmanlarını iki kez kontrol ediniz. Modelin yerinde kütleyle sahip olduğundan ve sağlam bir yapı olduğundan emin olunuz.
- Yazıcıya gönderiniz ve Yazdır'a basınız.
- Basılı prototipleri kontrol ediniz. Bazen tatmin edici basılı yapıyı elde etmek için birkaç denemeye ihtiyaç duyulmaktadır (Ranjha ve ark., 2018).

3.6.2. Baskı Teknikleri

Test amaçlı bir prototipi yazdırmak için küçük bir 3 boyutlu yazıcı kullanılmıştır. Ancak, daha büyük yapıları basmak için, karmaşık yapılar daha büyük yazıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için yüzey kalitesini, imalat hızını ve malzeme girdi seçeneklerini iyileştiren, kontur işçiliği adı verilen bir teknoloji önerilmektedir. Bu 3 boyutlu yazıcı teknolojisi ile Resim 3.1'de gösterildiği gibi, sahadaki karmaşık yapılar vinç ve robotik kol yardımıyla inşa edilmektedir. Kontur işçiliğinin birkaç saat içinde tüm bir evi tamamlamayı mümkün kıldığı iddia edilmektedir (Ranjha ve ark., 2018).



Resim 3.1. Kontur İşçiliği (Ranjha ve ark., 2018)

Çinli bir şirket olan Winsun Dekorasyon Tasarım Mühendisliği kontur işçiliği yardımıyla bir günde 10 ev inşa etmiştir. Baskı yöntemi zamandan tasarruf sağladığı gibi inşaat sektöründen kaynaklanan fireleri de azaltmıştır. Ayrıca, girdi olarak geri dönüştürülmüş malzemeler de kullanılabilir. Ayrıca baskı makineleri, enerji tüketimlerini toplamak için güneş enerjisi bazlı olabilir. Bu nedenle, yöntem çevre dostu bir örnek olarak kabul edilmektedir ve inşaat sektörünün geleceğine giden yolu açmaktadır (Ranjha ve ark., 2018).

Katmanlı İmalata Giriş

Günümüzde 3d baskı ve Katmanlı Üretim terimleri büyük ölçüde birbirinin yerine kullanılmaktadır. Günümüzde 3 boyutlu baskıdan bahsederken çoğu insanın aklına muhtemelen küçük plastik yenilikler ve prototipler üretmek için çevrimiçi topluluklarda yaygın olan masaüstü boyutlu ekstrüzyon tabanlı yazıcılar gelmektedir. Gerçekte, hepsi Katmanlı Üretim terimi altında kategorize edilebilecek çok sayıda üretim yöntemi vardır. Neyin uygun olup olmadığını doğru bir şekilde belirlemek için Eklemeli İmalat açıkça tanımlanmalıdır. ASTM Standardı, Eklemeli İmalatı “geleneksel işleme gibi eksiltici imalat metodolojilerinin aksine, 3 boyutlu model verilerinden, genellikle katman katman nesneler yapmak için malzemeleri birleştirme süreci” olarak tanımlamaktadır. Loughborough Üniversitesi, 3 boyutlu baskı için en yaygın yöntemleri aşağıdaki şekillerde açıklamaktadır. Malzeme ekstrüzyonu en yaygın AM yöntemidir. Genellikle PLA veya ABS gibi bir plastik olan bir malzeme, genellikle ısıtılan bir yatak üzerine başlayarak her seferinde bir katman halinde ekstrüde edilir. Bağlayıcı püskürtme, malzeme ekstrüzyonuna benzer, ancak her katman tamamlandıktan sonra yüzeye bir toz malzeme eklenir ve bu da “yatağı” sürekli olarak aynı seviyeye getirir. Nesnenin katı kısımlarını oluşturmak için bir bağlayıcı madde uygulanır. Toz, herhangi bir alanda çıkıntılara izin vermek için bir destek malzemesi görevi görür. Malzeme püskürtme, nesneyi oluşturmak için bir mürekkep püskürtmeli yazıcı gibi malzeme damlatır. Toz yatak füzyonu, bir toz malzeme kullanması bakımından bağlayıcı püskürtmeye benzer, ancak bir bağlayıcı madde yerine güçlü bir lazer tozu katılaştırır. Yatak füzyon üretimi, diğer yöntemlerin yapamadığı güçlü bileşenler oluşturmak için tozu (genellikle metal) katılaştırır. Stereolitografi yatak füzyonuna benzer şekilde çalışır ancak toz yerine ultraviyole lazer teknolojisi ile katılaştırılan foto2 duyarlı bir polimer sıvı kullanır. Ayrıca nesneyi tozla inşa etmek yerine, katılacak kısım sıvının derinliklerine indirilir, böylece yeni katmanlar yüzey seviyesinde oluşturulur. Fused Deposition Modeling (FDM), ilgili

süreçler nedeniyle genellikle ekstrüder tabanlı 3d baskı olarak adlandırılır ve yirmi yıldan uzun bir süre önce Stratasys tarafından patentlenmiştir (Breland, 2017). Bazı önemli patentlerinin süresinin dolması, sonuçta bu teknolojiye dayalı ev kullanımı için 3d yazıcılar oluşturmak üzere açık kaynaklı RepRap hareketine ilham verecek olan şeydir. Stratasys süreci şu şekilde tanımlamaktadır: ısıtılmış bir ekstrüder, bir termoplastiği “yarı sıvı” bir duruma eritir. Bu ısıtılmış plastik, genellikle aynı zamanda ısıtılan ancak plastiğin erime noktasının altında olan bir platforma ekstrüde edilir, böylece katılaşır ancak çok fazla küçülmez. Mevcut katmanların üzerine katman üzerine katman inşa edilir. Çıkıntıları desteklemek için aynı malzemeden ya da daha kolay çıkarılabilen başka bir plastikten kurban desteklerin de üretilmesi gerekebilir. Başka bir malzeme kullanılıyorsa ikinci bir ekstrüder gerekecektir. Kullanılan malzemenin elastik özellikleri nedeniyle, ekstrüzyon hattının önü ve sonu desteklendiği sürece kısa “köprü” alanları desteksiz kalabilir. Malzeme Jeti çok sayıda malzemenin kullanıldığı bir süreci ifade edebilirken, en yaygın uygulama balmumu dökümdür. Kuyumculuk endüstrisi tarihsel olarak onlarca yıldır mücevher modellemek için balmumu dökümlerini kullanmıştır. Bu işlem, süreci otomatikleştirmek için ısıtılmış mumu ekstrüde eder. İşlem ekstrüzyon yöntemine benzer, ancak standart ekstrüder sisteminden farklı olarak talep üzerine bir damla sistemi kullanır (Breland, 2017). Destekler hala gereklidir, ancak destekleri sağlamak için daha düşük erime noktalı bir balmumu kullanılır, böylece hassas bir şekilde ısıtılmış bir banyo kullanılarak kolayca çıkarılabilirler. Yatak Füzyon baskısı şu şekilde tanımlanmaktadır. Yatak Füzyonu, tam işlem mekaniğine bağlı olarak Seçici Lazer Sinterleme (SLS) veya Seçici Lazer Eritme (SLM) olarak da adlandırılır. SLM genellikle SLS'nin bir alt kümesi olarak kabul edilir. Toz halindeki bir malzeme yatağı her seferinde bir katman oluşturulur. Toz yatağını sinterlemek için güçlü bir lazer kullanılır ve granüllerin katı segmentler halinde kaynaşmasına neden olur. Her katmanın kaynaşması bittikten sonra, nesne tamamlanana kadar başka bir ince toz katmanı uygulanır. Bu sürecin iki büyük avantajı, toz yatağının baskı işlemi sırasında destek sağlaması ve malzemelerin çok yönlülüğünün önemli olmasıdır (Breland, 2017). Seramik, naylon, cam ve çelik, gümüş ve alüminyum dahil olmak üzere çok sayıda metal basılabilir. Ekipman pahalıdır. Birçok ev kullanıcısı bu ekipmana sahip olmasa da, internette baskı hizmeti veren birçok şirket bulunmaktadır. Binder Jetting, yukarıda açıklanan yatak füzyon yöntemine çok benzer. Katman katman toz, daha önce tamamlanmış katmanın üzerinde yeni bir katman oluşturmak için serilir. Buradaki temel fark, her bir baskı segmentini katılaştırmak için lazer yerine sıvı bir bağlayıcı maddenin kullanılmasıdır. En eski 3

boyutlu baskı yöntemi olan stereolitografi, diğer yöntemlerden bazılarına göre biraz daha karmaşık olabilir, ancak yaşına rağmen bugün hala birçok özel baskı işlemi için kullanılmaktadır. Baskı sürecinin mekanığı Yatak Füzyon baskısına benzer, ancak burada belirtilen temel farklılıklar vardır. Yatak Füzyonu yönteminde olduğu gibi toz bir ortam yerine sıvı bir polimer baskı ortamı uygulanmaktadır. Hala destek gerektiren her katman, nesnenin en üst yüzeyi boyunca katı katmanlar oluşturmak üzere polimer sıvıyla reaksiyona girmek için bir UV lazer kullanır (Breland, 2017). Nihai nesne katman katman oluşturulurken tüm nesne katman katman sıvının derinliklerine indirilir. Nesne 4 tamamlandığında, bir çözücü ile durulanır ve genellikle UV ışıklı bir ortamda pişirmeyi bitirmek için yerleştirilir. Bunlar Katmanlı İmalatın en yaygın beş yöntemi olsa da, neyin ayrı bir teknik veya mevcut bir tekniğin alt kümesi olarak kabul edildiğine bağlı olarak, dokuz farklı baskı yönteminin her biri farklı bir teknik olarak kabul edilebilir. Eklemeli İmalat, düzenli olarak duyurulan yeni uygulamalar veya ilerlemelerle şu anda kesinlikle yoğun bir araştırma konusudur (Breland, 2017).

Katmanlı İmalatın Kısa Tarihçesi

Modern stereolitografi 1970'lerde Japonya'da Dr. Hideo Kodama tarafından icat edilmiştir, ancak Charles Hull 1986'ya kadar teknolojinin patentini alıp ticarileştirmeye başlamamıştır. Devrim niteliğinde olsa da, stereolitografi çok niş bir pazarı doldurmuştur ve sürecin yavaş ve pahalı olduğu kanıtlanmıştır. T. Rowe Price tarafından oluşturulan, daha çığır açan ve ilginç 3d baskı gelişmelerinden bazıları için kısa bir zaman çizelgesi aşağıda görülebilir (Breland, 2017). RepRap'in 2008 yılında kendi kendini kopyalayan ilk yazıcısı ile sonraki yıllarda çeşitli alanlarda 3 boyutlu baskıda yaşanan ani hızlı gelişmeler arasındaki korelasyonu görmek kolaydır. 1992 yılında ilk stereolitografik makineler 3d Systems tarafından ticari kullanım için üretilmiştir. 2002 yılında 3d baskı teknolojisi ile 1999 yılında geliştirilen organ büyütme teknolojisi birleştirilerek çalışan bir böbrek 3d olarak basılmıştır. 2005 yılında Bath Üniversitesi'nde Adrian Bowyer RepRap hareketini yaratmıştır. Daha fazla 3d yazıcı yapmak için temel bileşenleri yapabilen 3d yazıcılar tasarlayan açık kaynaklı bir projedir. 2006 yılında seçici lazer sinterleme (SLS), malzemelerin lazerle kaynaştırılmasına izin vermiştir. Bu, endüstriyel parçaların prototiplenmesine ve daha dayanıklı malzemelerle üretilmesine olanak tanımıştır. 2008 yılında RepRap ilk kendini kopyalayan yazıcıyı yaratmıştır. Ayrıca 2008'de Shapeways, 3 boyutlu modeli olan herkesin kendi özel kreasyonlarının ucuz 3 boyutlu gerçek hayat versiyonlarını çevrimiçi olarak sipariş etmesine izin vermiştir (Breland, 2017). Ayrıca

2008 yılında bir kişi 3 boyutlu basılmış bir protezle yürümüştür. Eklemler dahil tüm protez tek bir yapıda basılmıştır. Montaj veya ayrıntılı yeniden boyutlandırma gerekmemiştir. 2009 yılında kendin yap (DIY) 3d yazıcı kitleri ilk kez piyasaya çıkmıştır. Yine 2009 yılında Dr. Gabor Forgacs ilk kan damarını basmıştır. 2011 yılında Southampton Üniversitesi 5000 İngiliz Sterlini bütçe ile yedi günde insansız bir “uçak” veya drone basmıştır. Eliptik kanat şeklinin tipik olarak pahalı olacağı düşünülmüştür. Ancak 3d baskı onları çok daha uygun hale getirmiştir. Yine 2011'de Kor Ecologic tarafından üretilen ilk 3 boyutlu baskılı araba görülmüştür. Urbee, sırasıyla 100-200 MPG şehir içi otoyol alan çevre dostu bir prototiptir. Ayrıca 2011'de altın ve gümüşte 3d baskı, AM'yi mücevher pazarına getirerek kullanılabilir hale gelmiştir. 2012 yılında ilk 3 boyutlu basılmış protez çene Hollanda'da bir hastaya implante edilmiştir (Breland, 2017). Günümüzde 3d baskının patlayıcı etkisi, köklerini RepRap hareketi ile bulabilmiştir. Adrian Bowyer, gelecek nesil 3d yazıcılar için parçaların çoğunu yeniden üretebilecek 3d yazıcılar yaratmak istemiştir. Tüm proje, maliyetleri düşüren ve 3d yazıcıları daha yaygın bir şekilde kullanılabilir hale getiren açık kaynaklıdır. RepRap bir bütün olarak 2010'ların başında çok sayıda yazıcı çeşidiyle dünya çapında popülerlik kazanmaya başlamıştır. Bugün 3d baskı çok çeşitli alanları etkilemiştir ve çok daha fazlasını etkilemeyi vaat etmektedir. İnşaat sektöründe beton yapıların 3 boyutlu baskısı, sektörü altüst etmeyi vaat etmektedir. Yeni Zelanda kısa bir süre önce 3 boyutlu baskı yapmıştır ve bir roketi yörünge altı yörüngeye başarıyla fırlatmıştır. 3B baskıda potansiyel malzemeler olarak karmaşık metal alaşımları, cam ve beton ile Katmanlı Üretim, üretilen mallarla herhangi bir endüstriyi etkileme potansiyeline sahiptir. Amsterdam'daki bir banka ve finansal hizmetler şirketi olan ING, 2060 yılına kadar üretilen tüm malların yarısının 3 boyutlu olarak basılacağını ve bunun da dünya çapındaki ticareti % 25 oranında azaltacağını tahmin etmektedir. Bu tahminler kulağa zorlama gelebilir, ancak tıpkı televizyonun talep üzerine yayın yapan bir endüstriye doğru ilerlemesi gibi, araba parçaları, oyuncaklar ve mücevherler de bir gün yerinde talep üzerine basılabilir (Breland, 2017).

3.6.3. Beton Yapıların Katmanlı İmalatı

Hem saha içinde hem de saha dışında tam ölçekli kullanılabilir beton binaların basımının ilk aşamalarında aktif olarak yer alan birkaç ticari kuruluş bulunmaktadır. Katmanlı İmalat beton yapıları konusunda önde gelen araştırmacı olabilecek Dr. Behrokh Khoshnevis bile araştırmasından para kazanmak için ticari bir kuruluş oluşturmuştur.

Beton AM alanında işletmeler hem manşetlere çıkmak hem de kâr elde etmek için yarışmaktadır. 2014 yılında Andrew Rudenko, Resim 3.2'de gösterilen muhtemelen ilk kalıcı büyük ölçekli yapıyı 3 boyutlu olarak bastığında manşetlere çıkmıştır. RepRap mimarisine dayanarak, plastik yerine beton kullanan büyük boyutlu bir 3d yazıcı inşa etmiştir. Konseptin bir kanıtı olarak çocukları için kale benzeri bir yapı basmıştır. Bu proje, karmaşıklığın Eklemeli Üretim süreçleri tarafından nasıl kolayca ele alınabileceğini göstermek için harika bir iş çıkarmaktadır. Karmaşıklık, insan emeğinden ziyade yazıcının izlediği yolla ele alındığından, malzeme hacmi karmaşıklıktan ziyade projenin maliyetine katkıda bulunan faktör haline gelir (Breland, 2017).



Resim 3.2. İlk yapılmış 3D Beton Baskılı Yapı (Breland, 2017)

2015 yılının Ekim ayında Andrey Rudenko, Filipinler'den Lewis Yakich ile birlikte 1076 ft²'lik tam boyutlu bir otel süiti inşa etmek için bir proje üzerinde işbirliği yapmıştır. Baskı işlemi yaklaşık 48 saat sürmüştür. Bitmiş bina aşağıda Resim 3.3'te görülebilir. Süit, aynı zamanda 3 boyutlu baskı sürecinin bir parçası olan dev boyutlu bir jakuzi içermektedir. Bu başarı etkileyicidir çünkü 3 boyutlu baskı sürecinin çok yönlülüğünü ortaya koymaktadır. Birçok konsept yapı kanıtının aksine, otel süiti gerçek kullanım için tasarlanmıştır. Ayrıca Lewis Yakich, Filipin hükümeti tarafından düşük maliyetli konut programı için nitelikli bir inşaatçı olarak onaylanmıştır. Düşük gelirli aileler için uygun fiyatlı evlerde devrim yaratacak gibi görünmektedir (Breland, 2017).



Resim 3.3. İlk Yapılmış 3D Beton Baskılı Otel

2016 yılında Dubai, 3 boyutlu baskılı bir ofis binasını tamamlayan ilk ülke olmuştur. Şimdi ise Dubai daha büyük bir projeyle övünmektedir. 1,375 fit yüksekliğinde bir gökdelen inşa etme projesi erken geliştirme aşamasındadır. Bu, 3 boyutlu baskı teknolojisi ve mevcut hassas vinç teknolojisinin birleşimiyle mümkün olacaktır. Dubai'nin yöneticisi, 2030 yılına kadar kentteki tüm binaların % 25'inin 3 boyutlu baskı ile inşa edilmesinin planlandığını açıklamıştır. 2017'nin başlarında ABD merkezli bir startup şirketi olan Apis Cor, Rusya'da 400 ft²'lik tamamen mobilyalı yaşanabilir bir alanı başarıyla üretmiştir. Tüm baskı süreci, sadece teknolojinin hızını değil aynı zamanda çalışabilirlik aralığını da göstermek için Rus kışı sırasında 24 saatte tamamlanmıştır. İnşaat için AM'nin ticarileştirilmesine yönelik güçlü ilgi, zorlayıcı istatistiklerle desteklenmektedir. Dr. Behrokh Khoshnevis, Lewis Yakich ve Apis Cor, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla tüm proje genelinde yaklaşık % 60 oranında parasal tasarruf sağlanabileceğini tahmin etmektedir. Finansal faydaların yanı sıra Dr. Khoshnevis, geleneksel beton yığma birim inşaat yöntemine kıyasla CO2 emisyonlarının % 75, enerjinin % 50 ve katı atıkların % 86 oranında azaltılabileceğini tahmin etmektedir. AM'nin inşaatta kullanımı her ne kadar umut verici görünse de, kaçınılmaz olabilecek en az iki önemli dezavantajı vardır. Büyük ölçekli beton yazıcılar için ön maliyetler pahalı olacaktır. Gelişmekte olan birçok teknolojiye olduğu gibi başlangıç maliyetleri yüksek olma eğilimindedir (İlk cep telefonu başlangıçta 3995 dolara mal olmuştur) ve zamanla düşmektedir (Breland, 2017). İkinci en belirgin dezavantaj, inşaat işlerinde net bir kayıp olacaktır. Otomasyon arttıkça, daha az el emeğine dayalı inşaat işinin mevcut olacağı açıktır. Dr. Khoshnevis potansiyel iş kaybına ilişkin iki ikna edici noktaya değinmiştir.

İlk olarak 1900 yılında tüm yetişkin ABD vatandaşlarının % 60'ından fazlasının çiftçi olduğu gözlenmiştir. Bugün ise Amerikalıların sadece % 1,5'i bu mesleği icra etmektedir. Kişi başına düşen toplam çiftçi sayısındaki azalma otomasyonun doğal bir sonucudur. İkinci olarak, yeni ortaya çıkan teknoloji etrafında ek işlerin ortaya çıkacağına işaret etmektedir. Geleneksel inşaat işleri genç ve orta yaşlı erkekler tarafından doldurulurken, bu yeni işler kadınlar ve yaşlı bireyler tarafından da doldurulabilir. Ne olursa olsun, inşaat sektörü önümüzdeki on yıllarda büyük ölçüde farklı görünebilir. Gelişmekte olan bir teknoloji olarak, inşaat sektörü için yıkıcı bir teknoloji olduğu kanıtlanabilir. Çok sayıda ticari ve akademik kuruluş, inşaat alanında AM'yi aktif olarak araştırmakta ve geliştirmektedir. Beş ila on yıl içinde 3 boyutlu baskıyı yaygın bir inşaat yöntemi olarak görmek şaşırtıcı olmayabilir (Breland, 2017).

3.7. Beton Yapıların Kısa Tarihi

Beton, aynı derecede karmaşık bir geçmişe sahip karmaşık bir malzemedir. Beton kullanılan tarihi yapıları incelendiğinde, yapının tasarım stratejileri ve malzemeleri hakkında fikir edinebilir ve zamana karşı nasıl direndikleri görülebilmektedir. Giza'daki Büyük Piramit MÖ 2500 civarında inşa edilmiştir. Piramitlere rağmen, o dönemde Mısır'da en yaygın kullanılan yapı malzemesi saman ve çamurdan yapılan tuğlalar olmuştur. Bu da piramidin taş ocağından çıkarılmış taşlardan ve gövde taşlarının temelleri için 500.000 ton alçı ve kireç harcından oluşan yapısını mimari bir başarı olarak daha da etkileyici kılmaktadır. Piramidin harç temelinden genellikle çok az bahsedilir, ancak o kadar çok ham harç kullanılmıştır ki arkeologlar bu kadar çok harcı pişirecek yakıtın nereden gelmiş olabileceğini açıklayamamaktadır (Breland, 2017). Dr. Michel Barsoum muhafaza taşlarının ocaktan çıkarılmak yerine dökülmüş olabileceğine inanmaktadır. Bu suçlama hararetle tartışılrsa da, elektron mikroskobu görüntülemesine dayanan ikna edici bilimsel kanıtları vardır. Barsoum haklıysa, Mısırlılar Yunanlılardan veya Romalılarından binlerce yıl önce karmaşık beton kullanmış olabilirler. Kaplama taşlarının ocaktan çıkarılmış ya da dökülmüş olmasına bakılmaksızın, piramidin sağlam harç temeli, harçların ve betonların binlerce yıl boyunca basınç kuvvetlerini destekleyebileceğini göstererek kesinlikle takdire şayan bir performans sergilemiştir. Yunanlılar ilk olarak M.Ö. 600'lerde mevcut kireçtaşı çimentosuyla puzolanları karıştırmaya başladıklarında, sonuçta daha dayanıklı ve suya, özellikle de çoğu standart yapı malzemesini hızla aşındıran tuzlu suya karşı daha az reaktif olduğu kanıtlanan muazzam derecede güçlü

beton ortaya çıkmıştır. Adını Pozzuoli'den (Napoli) alan puzolanlar, yukarıda açıklandığı gibi ilk hidrolik betonun oluşturulmasına yardımcı olan volkanik bir küldür (Breland, 2017). Su altında kürlenme kabiliyeti nedeniyle bu şekilde adlandırılan hidrolik beton, havadaki karbondioksit ile reaksiyona giren önceki hidrolik olmayan çimentoların aksine, kürlenmek için su ve kireç ile kimyasal olarak reaksiyona girer. Yunanlılar puzolan betonu kullanmış olsalar da, bu betona daha yaygın olarak Roma betonu denmesinin iyi bir nedeni vardır. Romalılar çimentoyu, en ünlü tasarım ve altyapılarından bazılarında damgasını vuran değerli bir araç haline getirmişlerdir. Romalılar, birçoğu bugün hala ayakta olan beton yapılarıyla en ünlü kültür olabilir. Roma hamamları, Kolezyum, Pantheon ve çok sayıda su kemeri ve beton liman ya tamamen ya da kısmen günümüze kadar ayakta kalmıştır. Bugün hala ayakta duran beton karışımları, bu yapıların varlığını sürdürmesini sağlayan şeyin yalnızca yarısıdır. Daireler ve yaylar, aşağıda kolezyumda görüldüğü gibi ortak bir tasarım teması olmuştur. Bu tasarım unsurları, modern inşaat demiri olmadan bile, bu yapıların binlerce yıl boyunca depremlere, sert kışlara ve fırtınalara dayanmasını sağlamıştır (Breland, 2017). Pantheon, Kolezyum kadar ünlü olmayabilir, ancak mimari bir başarı olarak Kolezyum'u geçebilir. Aşağıda resmi görülen Pantheon'un yüksekliği boyunca en az beş farklı beton karışımı kullanılarak daha hafif ve daha ince malzemeler daha yukarıya taşınmıştır. Yükü hafifletmek için kare iç kısımlara sahip kubbe şeklindeki yapı yine inşaat demiri içermemektedir ve aşağıda resmedilmiştir. Beton sıkıştırma kuvvetlerine karşı güçlü ancak çekme kuvvetlerine karşı zayıftır. Yapısal olarak Pantheonun, yapının ayakta durabilmesi için tüm destekleyici basınçların çekme yerine tamamen sıkıştırıcı olacak şekilde tasarlanma gerekirdi. Günümüzde neredeyse tüm büyük betonarme yapılarda yapısal güçlendirme için inşaat demiri kullanılmasına rağmen, Roma yapıları tasarım gereği inşaat demiri olmadan ayakta kalmıştır (Breland, 2017). Çin Seddi başlangıçta standart kireç bazlı harçla inşa edilmiştir, ancak yıllar ilerledikçe Çin, inorganik kireci organik pirinçle birleştirerek daha üstün bir harç geliştirmiştir. Bingjian Zhang, Ph.D. ve meslektaşları, pirinç harcını geleneksel harçtan daha güçlü ve suya karşı daha dayanıklı hale getiren gizli bileşen olarak karmaşık bir karbonhidrat olan amilopektini tanımlamıştır. Çin'deki mezarlar, pagodalar ve şehir surları gibi diğer yapılar, Çin Seddi'nden önce pirinç harcını kullanmıştır. Pirinç harcı halen restorasyon projelerinde kullanılmaktadır (Breland, 2017). Kesin tarihler çok azdır ancak çoğu kaynak betonun kalitesinin ve özellikle Roma hidrolik betonunun sırrının Roma İmparatorluğu'nun çöküşünden sonra kaybolduğu konusunda hemfikir. Olağanüstü zanaatkarlar tarafından çok sayıda katedral ve kale inşa edilmiş olsa da, bir

malzeme olarak betonun teknik yeterliliğine erişilememiştir. Örneğin, 1248 yılında inşasına başlanan Almanya'daki Köln Katedrali, yıpranan tarihi taşları ve betonu yenilemek için sürekli bir onarım sürecinden geçmektedir. Hidrolik beton, Vitruvius'un beton ve inşaatın ana hatlarını çizdiği Roma el yazmalarının 1414 yılında bir İsviçre Manastırında keşfedilmesi ve yeniden dolaşıma sokulmasıyla bir yapı malzemesi olarak yeniden canlanmıştır (Breland, 2017). Ne yazık ki 1793 yılında bir Fransız olan John Smeaton'un hidrolik beton üretmenin yeni ve modern bir yolunu keşfetmesine kadar beton konusunda büyük bir atılım gerçekleşmemiştir. Smeaton'un bu buluşu hemen, felaket bir şekilde su altında kalan ve keşfinin arkasındaki itici güç olan Eddystone Deniz Feneri'nde kullanmıştır. 1824 yılında bir başka büyük atılım daha gerçekleşmiştir. Joseph Aspdin adında bir İngiliz Portland çimentosunu icat etmiştir ve patentini almıştır. Bu, bugün kullandığımız modern betonun temelidir. Roma betonu gibi o da hidroliktir ancak daha hızlı, daha sert kürlenir ve daha az su geçirir. Kısaca belirtmek gerekirse, Roma betonu ima edildiği gibi modern betondan tamamen daha iyi performans göstermeyebilir. Aslında geleneksel Roma betonu, modern Portland çimentosuna göre daha az belirgin bazı avantajlara sahiptir (Breland, 2017). Günümüzde her yıl yaklaşık 16 milyar ton Portland betonu kullanılmaktadır. Bu da yıllık karbon emisyonlarının yaklaşık % 7'sini oluşturmaktadır. Portland çimentosunun 1450 °C'ye kadar ısıtılmasına kıyasla Roma betonunun sadece 900 °C'ye kadar ısıtılması gerekmektedir. Roma çimentosu tariflerinin kısmen veya tamamen benimsenmesi toplam küresel emisyonların azaltılmasına yardımcı olabilir. Roma betonu daha su geçirgen ve daha az sert olmasına rağmen zamana karşı daha dayanıklı görünmektedir. Volkanik kül ve kireç kombinasyonu Portland çimentosuna göre uzun vadede daha dayanıklıdır. Roma betonunun modern bir versiyonu olan Portland Pozzolana Çimentosu (PPC) artık mevcuttur ve modern pazarlarda daha popüler hale gelmektedir. İncelencek olan son tarihi beton yapıların pek de olası olmayan bir kaynağı vardır (Breland, 2017). Thomas Edison 1900'lerin başında bina yapılarında beton kullanımını araştırmıştır. Kendi Portland Çimento Şirketini kurduktan sonra Edison, binalar, kaldırımlar, yollar ve diğer yapılar için betonu zorlamaya başlamıştır. Yenilikçi fikirlerinden biri, beton kullanarak tek bir dökümde bütün bir evi dökmek olmuştur. Çelik destek çubukları ve ahşap çerçeveler, beton tüm kalıpları doldurmak üzere üstten akıtılmadan önce bütünüyle yerleştirilmiştir. Modern hidrolik çimento, betonun havasız ortamda sertleşmesini sağlamıştır. Edison'un hayalini kurduğu tek dökme ev gerçeğe dönüşmüştür. Ancak kalıplar beklenenden daha maliyetli olmuştur (Breland, 2017).

Başlangıçtaki 175.000 \$'lık yatırım (enflasyon hesaba katılmamıştır) fikrin yayılması için çok maliyetli olmuştur. Nihayetinde tutmamasına rağmen, hammaddelerin o zamanki geleneksel ahşap evlerden çok daha ucuz ve çok daha sağlam olduğu kanıtlanmıştır. O zamanlar ahşap bir ev toplam 4.000 dolara mal olmuştur. Bir evi dökmek ise malzeme ve işçilik olarak yaklaşık 1.200 dolara mal olmuştur. Edison'un beton dökme evleri zamanının ötesinde olabilir, ancak gelecek şeyler için bir öncü olarak da görülebilir. Günümüzün 3 boyutlu baskı süreçleri Edison'un tek dökme ev vizyonu ile büyük ölçüde örtüşmektedir, ancak neyse ki katmanlı üretim süreci kapsamlı çerçevelere ve kalıplara olan ihtiyacı büyük ölçüde azaltmıştır (Breland, 2017).





4. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEDEDEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Son on yılda, 3D baskılı beton, mühendislik ve inşaat alanında maliyetlerin düşürülmesine, üretim sürelerine, malzeme atıklarından tasarruf edilmesine (daha temiz inşaat), hoş bir mimariye ve binaların inşası için çevresel etkinin azaltılmasına katkıda bulunan devrim niteliğinde bir fikri temsil etmiştir (Uribe-Pinzon ve ark., 2021). 3D baskı teknolojisinin temelleri, Zhou, Lin, Zhang ve Shang tarafından 2014 yılında ele alınmıştır. Aynı zamanda bu çalışmada havacılık sektöründe 3D baskının önemi vurgulanmıştır. Sağlık alanında 3D baskı uygulamaları Emre, Yolcu ve Celayir tarafından 2015 yılında ele alınmıştır. 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin çeşitli sektörlerdeki potansiyeli ve etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Dodziuk'un 2016 yılında gerçekleştirdiği çalışmada 3 boyutlu yazıcıların özellikle diş hekimliği ve genel tıp alanındaki cerrahi uygulamalarında nasıl bir devrim yarattığını ele alınmıştır. Kişiyeye özel tıbbi cihazlar, protezler ve hatta organların üretimi gibi alanlardaki potansiyeli vurgulanmıştır. Hager, Golonka ve Putanowicz 2016 yılında binaların ve yapı bileşenlerinin 3 boyutlu baskısı alanındaki en son teknolojilerini ve mevcut başarıları incelemiştir. 3 boyutlu baskı için kullanılan model hazırlama araçlarını tartışmıştır. Uygunoğlu ve Özgüven 2019 yılında geleneksel yapı üretiminde kullanılan beton ile 3 boyutlu yazıcılarda kullanılan harcın özelliklerini karşılaştırmıştır. Bu iki yöntemin avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir ve 3 boyutlu yazıcıların inşaat sektörünün geleceğini nasıl şekillendireceği tartışılmıştır. Özsoy ve Duman 2017 yılında 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin eğitimdeki potansiyelini ve kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu teknolojinin, öğrencilere uygulamalı öğrenme deneyimleri sunarak eğitimde yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesine nasıl olanak tanıdığı incelenmiştir. Değerli ve El 2017 yılında 3 boyutlu yazıcıların gıda üretimindeki kullanımını, çalışma prensiplerini ve kullanılan hammaddeleri incelemiştir. Günümüze kadar yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar, 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin tıp, inşaat, eğitim ve gıda üretimi gibi çeşitli sektörlerde önemli bir dönüştürücü etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Teknolojinin kişiyeye özel çözümler sunma, üretim süreçlerini hızlandırma ve yenilikçi uygulamalara olanak tanıma potansiyeli vurgulanmıştır. 3 boyutlu yazıcılar gün geçtikçe daha çok

sektörde kullanılmaya başlanmıştır. 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin farklı endüstriyel ve yaratıcı alanlardaki uygulamaları incelenmiştir. Kalender, Kılıç, Ersoy, Bozkurt ve Salman 2019 yılında havacılık endüstrisinde katmanlı imalat alanındaki araştırma ve geliştirme faaliyetlerini incelemiştir. Deneysel bir çalışma yaparak, 3D yazıcı teknolojisiyle ölçekli bir roket ekipmanının prototipini üretmiştir ve basınç parametrelerini değerlendirmiştir. Bu çalışma, 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin havacılık sektöründeki prototipleme ve üretim süreçlerine olan katkısını vurgulamaktadır. Avcı, Eren ve Sezer 2019 yılında özgün tekstil yüzey tasarımları oluşturmayı hedeflemiştir. Tasarım ve üretim süreçlerini deneysel yöntemlerle gerçekleştirerek, tasarlanan tekstil yüzeyini 3 boyutlu üretim yöntemiyle üretmiştir. Bu çalışma, 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin tekstil sektöründe yeni ve özgün tasarımların üretilmesine olanak sağladığını göstermiştir. Kim, Seong, Her ve Chun 2019 yılında FDM teknolojisine sahip 3 boyutlu yazıcılar kullanılarak giysi üretimini incelemiştir. Kullanılan malzemelerin, modelleme programlarının, baskı, üretim ve ürünün kullanım süreçlerindeki kısıtlamaları değerlendirilmiştir ve bu kısıtlamaların giderilmesi için öneriler sunulmuştur. Bu çalışma, 3 boyutlu yazıcıların giyim sektöründeki potansiyelini ve karşılaşılan zorlukları ele almıştır. Bu çalışmalar, 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin havacılık, tekstil ve giyim gibi farklı sektörlerde yaratıcı ve yenilikçi uygulamalara olanak tanıdığını göstermiştir. Teknolojinin prototipleme, özgün tasarım ve kişiselleştirilmiş üretim süreçlerine katkısı vurgulanmıştır. Ayrıca, 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin kullanım alanlarının her geçen gün daha da genişlediği açıkça görülmektedir. Saraçyakupoğlu 2020 yılında 3 boyutlu üretim yöntemlerini standartlar çerçevesinde incelemiştir. 3 boyutlu üretim teknolojilerinin havacılık sektöründe gelebileceği aşamalara yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma, 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin havacılık sektöründeki gelecekteki önemini ve potansiyelini vurgulamıştır. Özel, Zeren ve Alp 2020 yılında 3 boyutlu yazıcıların otomotiv sektöründeki kullanımını incelemiştir. Otomotiv sektöründe 3 boyutlu yazıcıların bugünü ve geleceği değerlendirilmiştir. Bu çalışma, 3 boyutlu yazıcıların otomotiv sektöründeki prototipleme, parça üretimi ve kişiselleştirme gibi alanlardaki önemini ortaya koymuştur. Erener ve Boz 2021 yılında eklemeli imalat yöntemlerine genel bir bakış sunmuştur. 3 boyutlu yazıcıların çalışma prensipleri ve uygulama teknikleri hakkında bilgi verilmiştir. Bu çalışma, 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin temel prensiplerini ve farklı uygulama alanlarını anlamak için önemli bir kaynak sunmaktadır. Bu çalışmalar, 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin havacılık ve otomotiv gibi kritik endüstriyel sektörlerde giderek daha fazla kullanıldığını ve gelecekte bu sektörlerde önemli bir rol

oynayacağını göstermektedir. Teknolojinin, üretim süreçlerini optimize etme, maliyetleri düşürme ve yenilikçi tasarımların geliştirilmesini sağlama potansiyeli vurgulanmıştır. 3 Boyutlu yazıcı teknolojilerinin, farklı endüstriyel sektörlerin geleceğini şekillendirmede önemli bir rol oynayacağı görülmektedir. Günümüzde inşaat sektöründe birçok yenilik ve gelişme görülmektedir. Bu gelişmelerden biri, büyük ölçekli 3 boyutlu yazıcıların gelişimidir. Bina endüstrisinde de kullanılan bu teknoloji sayesinde üretilen 3D beton yazdırma, maliyet ve hız açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Hem mimari yönden hem de yapısal tasarım açısından büyük özgürlük sunmaktadır. Eklemeli imalat yönteminin kullanıldığı 3 boyutlu yazıcılarda, modeli oluşturmak için malzeme katman katman üst üste eklenerek 3D model ortaya çıkarılmaktadır. Maliyet verimliliği ve üretim hızındaki avantajlar, hem tüketiciye hem de müteahhite büyük faydalar sağlamaktadır. 3 boyutlu yazıcılarla binalar hızlı ve verimli bir şekilde inşa edilebilir. 3 boyutlu yazıcılar sayesinde mühendisler, inşa edilecek yapının daha güvenli ve sağlam olması için zor geometrilere sahip tasarımlar oluşturabilmektedir. Shanghai WinSun gibi şirketler, geçtiğimiz yıllarda 3 boyutlu yazıcıları alçak katlı binalar inşa etmek için kullanmaya başlamışlardır. Kır villası ve 5 katlı konut bloğunun inşası 3 boyutlu yazıcılarla gerçekleştirilmiştir. Şirket yöneticileri, bu deneme sonucu kullanılan inşaat malzemesinin geleneksel yöntemle göre % 60 daha az, sürenin ise % 30 daha kısa olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, inşaatla görevli ekibin işgücünün beş kat azaldığı ve buna bağlı olarak iş kazaları ile yaralanma risklerinin de azaldığı öngörülmektedir. 3 boyutlu yazıcılar genellikle malzeme gereksinimlerini azaltmak, özel nesnelerin üretimini gerçekleştirmek, işçiliği azaltmak ve hızlı prototip oluşturmak için kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe 3 boyutlu yazıcıların kullanılması ile şantiyeye nakledilecek malzeme miktarının azaltılması, benzersiz binaların inşası, gerekli işçi sayısının azaltılması ve binaların daha kısa sürede inşası gerçekleştirilebilir. Bu alanda yapılan çalışmalardan bazıları şunlardır (Akbaba ve Akbulut, 2021):

- Tam ölçekli ilk 3 boyutlu inşaat projesi “Canal House”’dur.
- 3 boyutlu yazıcı teknolojisi ile inşa edilen 298,5 m² alana sahip ilk konut projesi Rusya’da bulunan “Yaroslavl”dır.
- Dünyanın ilk 3D baskı ile oluşturulan yaya köprüsünün tasarım ve inşasını Institute of Advanced Architecture Catalonia üstlenmiştir.

- Resmi düzenlemelere uygun ilk ofis-otel, Kopenhag’da 3D Printhuset tarafından inşa edilmiştir (Akbaba ve Akbulut, 2021).

3 boyutlu yazıcıların inşaat sektöründe kullanılmasıyla, en küçük bir parçadan binanın tamamına kadar yazdırılabilen yazıcılar geliştirilmiştir. Bu yazıcılar, farklı dönemlerde ve farklı alanlarda kullanılarak inşaat sektöründe önemli yenilikler ve gelişmelerin önünü açmıştır. Yapılan çalışmalar, 3 boyutlu yazıcıların kullanımını daha verimli ve çeşitli alanlarda yaygınlaştırmıştır. Kullanılan malzemeler ve teknolojiler ise her projeye özel olarak değişiklik gösterebilmektedir. 2007 yılında Enrico Dini tarafından icat edilen D-Shape, inşaat sektörü için geliştirilen dünyadaki ilk 3 boyutlu yazıcıdır. Bu yazıcı, ezilmiş dolomit kireçtaşının sağlam malzemelere dönüştürülmesini sağlar. Lazer Sinterleme metodu, toz parçacıklarının lazer ışınları ile birleştirilmesidir ve bu sistem de D-Shape yazıcılarında kullanılır. D-Shape yazıcılarının şu anki sürümü, 6mx6m alüminyum çerçeve üzerine kuruludur. Bu çerçeve sayesinde belirli bir uzunlukta sürekli hareket sağlanabilir. Kirişler üzerindeki motorlar, sistemin yukarı ve aşağı doğru hareket etmesini sağlar. Bu motorlar baskı işlemini gerçekleştirir. D-Shape yazıcıları, 300 nozula sahiptir ve yazıcının kafası tabana dik olarak çalışan bir alüminyum ışınla bağlanmıştır. Yapı malzemesi olarak alüminyum kullanılmıştır. Hafif ve kolay taşınabilir olmasından dolayı, iki işçi tarafından kısa sürede istenilen alanda kurulabilir. D-Shape yazıcıları, kum ve inorganik bağlayıcıları kullanarak basım işlemini gerçekleştirir. Behrokh Khoshnevis tarafından Southern California Üniversitesi Bilgi Teknolojileri Enstitüsü’nde geliştirilen Contour Crafting teknolojisi, bilgisayar ile kontrol edilebilen vinç veya makas kullanarak bina inşası yapmayı mümkün kılar. Bu teknoloji, çok az el emeğiyle hızlı ve verimli bir yapı oluşturulmasına olanak tanır. Başlangıçta endüstriyel parçaların üretimi için tasarlanmış olan teknoloji, doğal afetlerden sonra hızla inşa edilebilen binalar yapabilmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistemde binaların duvarları, beton benzeri malzemelerle katman katman inşa edilirken, donatı olarak cam veya karbon fiber gibi malzemelerle denemeler yapılmaktadır. İnşaat sektöründe kullanılan bir diğer önemli yazıcı teknolojisi ise Kamer Maker (RoomBuilder) olarak bilinir ve dünyanın ilk taşınabilir 3 boyutlu baskı makinesi olarak tanıtılmıştır. Bu makine, geliştirilmiş ve büyütülmüş bir 'Ultimaker' baskı makinesine dayanır ve PLA (mısırdan üretilen biyoplastikler) kullanarak 3D objeler basabilmektedir. Kamer Maker sayesinde, 2,0 m genişlik, 2,0 m uzunluk ve 3,5 m yükseklik ölçülerine sahip küçük odalar yazdırılabilmektedir. Canal House, DUS

mimarları tarafından geliştirilen ve tüm iç mekanları 2 m x 2 m x 3,5 m boyutlarında olan bir projedir. Bu proje, büyük, taşınabilir bir 3D yazıcı olan Kamer Maker (RoomMaker) ile basılmıştır. Odalar tek tek basılarak inşaat alanında birleştirilir. Bu yazıcı, termoplastik madde kullanarak baskı işlemi gerçekleştirir ve Macromelt olarak adlandırılan, %80 bitkisel yağ içeren biyoplastik madde baskıda kullanılır. İçi boş elemanlar baskı makinesi ile yazdırıldıktan sonra, katılarak beton ile doldurulabilir. 2005 yılında 3 boyutlu baskı sektörüne WinSun şirketi giriş yapmıştır. WinSun, bu alanda önemli bir yeniliğe imza atarak püskürtme başlığını (spray nozzle) icat etmiştir. Püskürtme başlığı, 3 boyutlu yazıcıların temel bileşenlerinden biri haline gelmiş ve yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. İlk olarak çimento ve diğer geliştirilmiş malzemelerle yapılan deneylerde kullanılan bu başlık, üreticiler tarafından sürekli olarak geliştirilmeye devam edilmiştir. Şirketin kurucusu ve malzeme mühendisi Ma Yihe, bu deneylerden elde edilen sonuçları iyileştirmek ve malzeme birleşimlerini optimize etmek amacıyla teknolojiyi ve malzeme toplama süreçlerini sürekli olarak geliştirmiştir. WinSun, dünyanın en büyük 3 boyutlu inşaat yazıcısını geliştiren şirket olarak öne çıkmıştır. Bu yazıcı, 10 m genişlik, 6,6 m yükseklik ve 150 m uzunluk gibi büyük ebatlarda baskı alabilmektedir. 2013 yılında elde ettiği tecrübe ve bilgi birikimi ile WinSun, 3D yazıcı teknolojisini kullanarak ilk kez bir konut baskısı yapmıştır. Bu baskı sürecinde, özel katkı maddeleri ile zenginleştirilmiş çimento, kum ve elyaftan oluşan bir malzeme kullanılmıştır. WinSun, bu teknolojiyi kullanarak konutların duvarlarını fabrikada basıp, sahada bu parçaları birleştirerek binaları inşa etmektedir. Bu yaklaşım, inşaat sürecinde verimlilik sağlamak ve maliyetleri düşürmek amacıyla önemli bir adım olmuştur. Bu sürecin başlangıcı, müşterinin tasarımları ile olur ve tasarımlar, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımları kullanılarak 3B model olarak oluşturulur. Püskürtme başlığı daha sonra, malzeme katmanını tabaka halinde ekleyerek inşaat sürecini başlatır. Her bir tabaka, istenilen şekil ve büyüklükte seçilebilir ve bu işlem, duvar tamamlanıncaya kadar devam eder. Duvarlar, 0.6-3 cm kalınlığında olabilir. Basımı tamamlanan duvarlar, inşa alanına taşınır ve oluşturulan temellere monte edilir. Ancak, bu yapılar bölgesel yapı düzenlemelerine uygun olmalıdır. Ayrıca, geleneksel çelik yapılar veya çimentoyla güçlendirilmiş yapılar gibi ek güçlendirme yöntemleri kullanılabilir. Müşterilerin taleplerine göre, boyanmayan duvarlar fitigler veya son katlarla desteklenebilir. Malzeme olarak, geri dönüştürülmüş inşaat atıklarından (kum, beton, cam elyafı) ve endüstriyel atıklardan oluşan bir aglomerat kullanılmıştır. Bu malzeme, çevresel açıdan sürdürülebilir bir seçenek sunar ve inşaat sürecinin verimliliğini artırır. Bu teknolojinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için,

kullanılan beton malzemenin belirli özellikleri taşıması gerekmektedir. Beton karışımı özel bir yapıya sahip olmalıdır. Akıcı bir yapıda olan bu karışım, yazıcının nozulundan çıktığında hızlıca sertleşmelidir. Bu özellik, her katmanın düzgün ve sağlam bir şekilde yerleşmesini sağlar, böylece bina inşaatı başarılı bir şekilde tamamlanabilir. Betonun 3 boyutlu yazdırma işlemi sırasında sertleşme süreci, nozul tıkanmalarına yol açabilir, bu da yazıcının verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, betonun fiziksel özelliklerinin bozulmaması ve karıştırıcıdan nozüle doğru kesintisiz bir şekilde ilerlemesi çok önemlidir. Her katmanın düzgün bir şekilde üst üste yerleşebilmesi için, beton karışımının belirli özelliklere sahip olması gerekir. Bu süreçte, katmanların oluşumu Freek Bos tarafından icat edilen çökmeyen beton (zero slump concrete) sayesinde sağlanır. Bu tür beton, daha stabil ve kolay bir yazdırma süreci sağlar, çünkü genellikle düşük akışkanlık gösterir, bu da betonun katmanlar halinde düzgünce birikmesini mümkün kılar. Donma süresi, yazdırma işleminde önemli bir faktördür ve bu süre, yazıcının hızına ve kullanılan malzemenin özelliklerine göre ayarlanmalıdır. Donma süresinin doğru şekilde kontrol edilmesi, malzemenin formunun korunmasına ve sonraki katmanın düzgün şekilde yerleşmesine olanak tanır. Bunun için bazı kimyasallar kullanılabilir. Bu kimyasallar, katkı maddelerindeki su miktarını azaltabilir, hava geçişini sağlayabilir veya suyun etkisini geciktirerek betonun daha hızlı sertleşmesini sağlayabilir. Yapının tasarımı, mimari özelliklerin karmaşıklığına göre yazıcının hızını da etkileyebilir. Eğer yapı çok sayıda karmaşık mimari detay içeriyorsa, yazıcının hızı bu detaylara göre daha düşük olmalıdır. Bu, Canal House projesinde olduğu gibi, çok sayıda özelleştirilmiş ve detaylı yapı elemanları içerdiğinde özellikle önemlidir. Bu projede kullanılan “Fused Deposition Modeling” teknolojisi, yazdırılacak malzemenin sorunsuz bir şekilde üretilmesi ve geliştirilmesi için doğru malzeme seçimini gerektirmiştir. Ancak, 3 boyutlu yazıcılar ile projeler yaparken, en uygun malzemenin bulunması büyük bir zorluk teşkil etmektedir, çünkü malzeme hem yapı güvenliğini hem de yazıcı performansını etkileyen kritik bir faktördür. Hollanda Canal House Projesi için kullanılan malzeme, Henkel tarafından geliştirilen termoplastik biyo bazlı bir malzeme olup, yazdırılan parçaların basınç direncini arttırmak amacıyla özel olarak tasarlanmıştır. Bu malzeme, eko taban teknolojisi ile desteklenmiş ve yapılan testlerle geliştirilmiştir. Test sonuçlarına göre, bu malzeme, yapı bileşenlerinin dayanıklılığını arttırarak, projenin son aşamalarında kullanılmak üzere uygun hale getirilmiştir. Canal House Projesi'nde, bina bileşenlerinin içinde yer alan petek şeklindeki boşluklar, hava sirkülasyonu ve yalıtım sağlamak amacıyla özel hafif beton ile doldurulacak şekilde tasarlanmıştır. Bu, yapının

enerji verimliliğini arttırmak ve ısı yalıtımını optimize etmek amacıyla önemli bir özellik sunmaktadır. Çin Win Sun Projesi'nde ise kullanılan malzeme karışımı, stereolitografi baskı yönteminde endüstriyel atıklar, cam elyafı, çimento ve sertleştirici maddelerin birleşiminden oluşmaktadır. Bu karışım, katman katman yapı bileşenlerinin sıralanmasını mümkün kılar ve her bir katmanın düzgün bir şekilde üst üste eklenmesini sağlar. Bu tür bir katmanlı üretim için malzemenin akışkan ve işlenebilir olması gerekmektedir. Malzemenin yüksek akışkanlık özelliği, yazıcı başlığından çıkan her bir katmanın düzgün bir şekilde dağılmasını sağlar. Aynı zamanda, her katmanın bir sonraki katmanla sağlıklı bir şekilde bağlanabilmesi için malzemenin su miktarı minimal tutulmalı ve malzeme daha hızlı sertleşecek şekilde formüle edilmelidir. Bu şekilde, yapıların sağlam ve estetik bütünlüğü korunur. Her iki projede de kullanılan malzeme ve teknoloji, inşaat sektöründe 3 boyutlu yazıcıların potansiyelini geliştirmiş malzeme mühendislikleri ile birleştirilerek hem yapıların dayanıklılığını hem de enerji verimliliğini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu tür yenilikçi malzeme kullanımları, 3D baskının gelecekteki inşaat uygulamaları için önemli bir temel oluşturmaktadır. Sıvı katmanların sertleşmesi, 3D baskı süreçlerinde önemli bir adımdır çünkü her yeni katman, altındaki katmanın yeterince sertleşmeden üzerine döküldüğünde yapı bütünlüğünü olumsuz etkileyebilir. Mühendisler, betonun doğru şekilde sertleşmesi için en uygun karışımı bulmak amacıyla testler ve denemeler yapmaktadır. Bu denemelerde, malzemenin yazıcı nozulünden dışarı pompalanmadan önce dayanmasını sağlamak ve aynı zamanda betonarme kadar güçlü olmasını temin etmek için önemli araştırmalar yapılmaktadır. Ayrıca, Contour Crafting gibi ileri düzey yazıcı teknolojilerinde, beton karışımının donatılması için cam ya da karbon fiber kullanılarak malzeme dayanıklılığı test edilmektedir. Bu sayede, yazıcı ile basılan parçaların yüzey kalitesi etkilenmeden güçlü ve dayanıklı yapılar inşa edilebilmektedir. D-Shape 3D yazıcısının mucidi Dini, 2009 yılında yaptığı çalışmayla patent almış ve çevreye zarar vermeyen, daha uygun maliyetli bir hammadde üretmiştir. Bu hammaddenin bileşenlerinde kum, oksitler ve deniz suyundan elde edilen kloritler bulunmaktadır. Bu yeni malzeme, çevre dostu ve sürdürülebilir özelliklere sahip olup, geleneksel yapı malzemelerinden daha verimli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. D-Shape yazıcısında kullanılan malzeme çözümleri, çeşitli kompozit malzemelerle yapılan denemelerle desteklenmektedir. Kükürtlü beton, bu denemelerden biri olarak potansiyel bir yapı malzemesi olarak kabul edilmektedir. Bu karışım, kükürtün erime noktasının üstünde ısıtıldığında, 140 °C'ye ulaşan karışım soğuduktan sonra normal beton gibi uzun süre sertleşmeden istenilen mukavemete ulaşmaktadır. Kükürtlü beton, özellikle çevre

dostu olması ve daha düşük maliyetle üretilebilmesi nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu özellikleri sayesinde, sürdürülebilir inşaat uygulamaları için yeni bir yapı malzemesi alternatifi olarak değerlendirilebilmektedir. Bu yenilikçi malzeme ve yazıcı teknolojileri, 3D baskı teknolojisinin inşaat sektöründe daha geniş bir kullanım alanı bulmasına olanak tanımakta ve sürdürülebilir, çevre dostu yapıların inşasında büyük bir potansiyel sunmaktadır. Savunma sanayinde 3 boyutlu yazıcı teknolojilerinin kullanımı, büyük bir potansiyel taşımaktadır. Bu teknoloji, savunma sanayinin ihtiyaçlarını karşılamak için önemli bir araç haline gelmiştir. Özellikle, denizaltı pervanesi, uçak savar parçaları, arazi araçlarının parçaları ve silah ekipmanları gibi savunma malzemelerinin daha hızlı ve düşük maliyetle üretilmesi mümkün hale gelmektedir. 3 boyutlu yazıcılar sayesinde, maliyetlerin düşürülmesi ve üretim hızının artırılması sağlanırken, aynı zamanda dışa bağımlılığın ortadan kaldırılması mümkün olmuştur. Bu, savunma sanayinin bağımsızlık kazanmasını sağlayan önemli bir faktördür. Dışa bağımlılıkların ortadan kalkması, 3 boyutlu yazıcı teknolojilerinin savunma sanayiindeki önemini vurgulayan önemli bir göstergedir. Bu teknoloji sayesinde, ülkeler yerli parçalar ve ekipmanlar üreterek kendi savunma ihtiyaçlarını karşılayabilirler. Ayrıca, bu teknoloji sayesinde onarım gerektiren veya arızalı parçaların hızlı bir şekilde yenileriyle değiştirilmesi de mümkün hale gelmektedir. Maliyetlerin düşmesi ve üretim süreçlerinin hızlanması, savunma sanayinin verimliliğini artırmaktadır. Özellikle, savaş durumlarında askerler için geçici sensörlerin üretilmesi gibi acil ihtiyaçlar için de 3 boyutlu yazıcılar kullanılmaktadır. Bu sensörler genellikle kimyasal ve biyolojik ajanların tespit edilmesi gibi kritik görevlerde kullanılmaktadır. Askerlerin kolayca taşınabilir ve hızla üretilebilen bu tür sensörlerle donatılması, askeri operasyonlarda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Türkiye'de de 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin yaygınlaşması, savunma sanayinde yerli üretimin artırılması ve dışa bağımlılığın azaltılması adına önemli bir adımdır. Bu teknoloji, savunma sektöründe hızla gelişmekte olup, yenilikçi çözümler sunarak stratejik bağımsızlık sağlamak için büyük bir potansiyel taşımaktadır (Akbaba ve Akbulut, 2021).

Hager ve arkadaşları tarafından 2016 yılında yapılan çalışmanın öne çıkardığı noktalar oldukça önemlidir. 3D yazıcıların yapı sektöründe kullanımının potansiyelini anlamak, özellikle karmaşık geometrilerin kolayca üretilebilmesi gibi büyük bir avantajı gözler önüne sermektedir. Geleneksel inşaat yöntemlerinin ötesine geçebilme imkanı, yapılar için yeni tasarım özgürlükleri sunmaktadır. Ayrıca, çevre dostu olma ve maliyetleri düşürme gibi avantajları da oldukça dikkat çekicidir. Ancak, her yeni teknoloji gibi 3D

yazıcıların da sınırlamaları vardır. Çalışmanın bir diğer önemli yönü ise, uygun yazılım ve modelleme programlarının gerekliliğine değinilmesidir. 3D yazıcılarla çalışabilmek için doğru modeli oluşturmak, başarılı bir üretim süreci için kritik bir husustur. STL formatının bu alandaki en popüler formatlardan biri olması, yazılım araçlarının evrildiği yönü de göstermektedir. STL, geometrik verileri temsil etme konusunda yaygın olarak kullanılmaktadır çünkü basit ve uyumlu bir yapı sunmaktadır. Wu ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptığı çalışmada, 3D yazıcıli üretimin potansiyeli daha geniş bir perspektiften ele alınmıştır. Çalışma, büyük ölçekli uygulamaların henüz sınırlı olmasının, 3D baskının yapı sektöründeki gelişimini engelleyen temel faktörlerden biri olduğunu vurgulamıştır. Ancak, bu teknolojinin gelişimi için önemli alanlara da dikkat çekilmiştir. Özellikle yapı gelişimi bilgi modellemesi (BIM), kullanıcı tanımlı kütle gereksinimleri ve yaşam döngüsü maliyetleri gibi başlıklar, 3D yazıcılarla yapılan inşaatın uzun vadeli başarı ve verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. BIM (Bina Bilgisi Modellemesi), 3D baskı teknolojisi ile entegre edildiğinde, inşaat projelerinin her aşamasında daha fazla kontrol ve verimlilik sağlanabilir. Bu entegrasyon, özellikle proje planlamasından inşa sürecine kadar olan her aşamanın daha şeffaf ve izlenebilir hale gelmesini sağlar. Bununla birlikte, 3D yazıcıli inşaatta yaşanan zorluklar da önemli. Bunlar, malzeme uyumsuzlukları, yazıcı kapasite sınırlamaları ve inşaat sürecindeki koordinasyon eksiklikleri gibi unsurlar olabilir. Wu ve arkadaşlarının çalışmasında bahsedilen "isteğe göre düzenleme" konusu da oldukça dikkat çekicidir. 3D yazıcının sağladığı en önemli avantajlardan biri; yani, her projenin özel gereksinimlerine göre özelleştirilmiş yapılar oluşturabilme imkânıdır. Bu sayede tasarımda esneklik artarken, istenmeyen atıklar ve fazla malzeme kullanımı da minimuma indirilebilir. Genel olarak, 3D yazıcıların yapı sektöründe geniş çapta uygulanabilirliği, bu tür zorlukların aşılmasıyla daha mümkün hale gelecektir. Gosselin ve arkadaşları tarafından 2016 yılında yapılan çalışma, 3D baskılı ultra yüksek performanslı betonun üretimi üzerine önemli bir adım atıldığını göstermiştir. Bu tür bir beton, özellikle yapıların dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Çalışmada kullanılan malzeme karışımı oldukça dikkat çekicidir. Portland çimentosu, kristal silika, silis dumanı ve kalker tozu gibi malzemelerin bir arada kullanılması, betona yüksek dayanım, düşük su emilimi ve uzun süreli performans sağlama amacını gütmektedir. Polimer bazlı reçine ilavesi ise, hem reolojik parametreleri iyileştirerek yazdırılabilirliği artırmaktadır, hem de tabakalar arasındaki bağlanma kalitesini yükseltmektedir. Bu tür eklemeli imalat (AM) yöntemleri, betonun geleneksel üretim süreçlerine göre çok daha esnek ve özelleştirilebilir olmasını sağlamaktadır.

Multifonksiyonel duvar elemanlarının üretimi, hem estetik açıdan özgün tasarımlar oluşturmayı mümkün kılmaktadır, hem de yapısal anlamda çeşitli işlevler ekleyebilmektedir. Örneğin, duvarlar yalnızca taşıyıcı değil, aynı zamanda ısı yalıtımı, ses yalıtımı veya hatta elektrik iletimi gibi fonksiyonlara sahip olabilmektedir. Ayrıca, bu tür betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin dikkatli bir şekilde incelenmesi, 3D baskılı yapıların güvenliğini ve dayanıklılığını doğrulamak için kritiktir. Yapısal elemanların test edilmesi, bu teknolojinin ne kadar güvenli ve sürdürülebilir bir alternatif sunabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada önemli bir diğer nokta da malzeme mühendisliğinin 3D baskı teknolojisine entegrasyonudur. Betonun reolojik özellikleri, yazıcıdan çıkacak her katmanın düzgün bir şekilde yerleşebilmesi için oldukça kritiktir. Bu noktada polimer bazlı reçine kullanımı, malzemenin baskı sırasında yeterli viskoziteye sahip olmasını sağlayarak işlem başarısını artırmaktadır. Shakor ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan çalışma, 3D baskı için geliştirilmiş özel bir çimento karışımını ve bunun mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışma, 3D baskılı yapıların dayanıklılığını ve sürdürülebilirliğini artırmak için malzeme mühendisliğine yapılan önemli bir katkıyı temsil etmektedir. Kalsiyum alüminat çimentosu (CAC) ve Portland çimentosu (OPC) kombinasyonu, betona özel bir reaktivite ve dayanıklılık kazandırmıştır. Bu tür karışımlar, özellikle 3D yazıcılarda kullanılabilirlik açısından önemli, çünkü doğru viskozite ve ayarlanabilir priz süresi gereksinimlerini karşılayabilmektedir. Lityum karbonat eklenmesi de ilginç bir detay olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu katkı, çimentonun priz süresini hızlandırmayı amaçlamıştır. Böylece yazdırma süreci daha verimli hale gelmiştir. Bu tür kimyasal katkılar, yazıcıyla yapılan üretimin hızını artırırken, aynı zamanda malzemenin mekanik özelliklerini de etkileyebilmektedir. Panda ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan çalışma, 3D beton baskının karşılaştığı en temel zorluklardan biri olan yapısal stabilite sorununa çözüm arayışı açısından oldukça önemlidir. Özellikle 3D baskı gibi tabakalı üretim yöntemlerinde, katmanlar arası bağın zayıf olması nedeniyle yapılar eğilme ve çekme gerilmelerine karşı daha savunmasız hale gelebilmektedir. Bu nedenle, yapısal dayanımı artırmak için lif takviyeleri çok kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada kullanılan kısa cam lifler (3, 6 ve 8 mm uzunlukta, % 0,25 ve % 1 oranlarında) ile yapılan deneyler, malzemenin yönsel özelliklerini incelemek açısından oldukça yerindedir. Elde edilen sonuçlar, cam liflerin basınç dayanımı üzerinde sınırlı ama eğilme ve çekme dayanımı üzerinde daha belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu da beklenen bir durumdur çünkü cam lifler, çatlak ilerlemesini engelleyerek malzemeye daha fazla süneklik ve

çekme direnci kazandırmaktadır. Bu tür lif takviyelerinin yönsel (anizotropik) etkileri ise özellikle 3D baskının katmanlı yapısı düşünüldüğünde çok önemlidir. Liflerin baskı yönüyle hizalanması veya rastgele dağılımı, elde edilecek mekanik özellikleri doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle yalnızca lif içeriği değil, aynı zamanda liflerin yerleşim yönü ve dağılımı da ileriki çalışmalarda daha detaylı incelenmelidir. Sonuç olarak, Panda ve arkadaşlarının çalışması, 3D beton baskının mevcut sınırlamalarına karşı etkili malzeme tabanlı çözümler sunmuştur (Tarhan ve Şahin, 2020).





5.3 BOYUTLU BETON BASKI TEKNOLOJİSİ PROSEDÜRÜ

3 boyutlu beton baskı teknolojisi süreciyle çimento bazlı malzemeleri kullanmaya yönelik ilk girişim Joseph Pegna tarafından önerilmiştir. Kamu binaları yapımında 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımı sürecinde kontur işçiliği, D-şekli ve beton baskı süreçlerinin kullanımı tercih edilmelidir. Bu üç süreç, büyük ölçekli bileşenleri üretmeyi başarmaktadır ve inşaat uygulamaları için uygundur. Katman tabanlı prosedür açısından üç işlemin benzer olduğu belirtilebilmektedir. Bu prosedürlerin her biri farklı uygulamalar ve malzemeler için geliştirilmiştir (Allouzi ve ark., 2020).

5.1. Kontur İşçiliği

Kontur işçiliği yapım süreci, yapıyı konvansiyonel yöntemden katman katman yönetime değiştirmek için geliştirilmiştir. Kontur işçiliği, Dr. Behrokh Khoshnevis tarafından elektrik, sıhhi tesisat, alçıpan ve yalıtım dahil olmak üzere komple bir evin yapımını otomatikleştirmek için geliştirilmiş katmanlı bir inşaat teknolojisidir. Kontur işçiliği yapı maliyetini düşürmektedir. Yapım hızını artırmaktadır. Mimari tasarım için daha fazla esneklik sağlamaktadır. Bu yöntem güvenli ve samimi bir ortam sağlamaktadır. Yapı maliyeti, kontur işçiliği makinesi tarafından harcanan zaman ve enerjiye ve yapıyı inşa etmek için kullanılan malzeme miktarına göre tahmin edilebilmektedir. Yapı modeli stereolitografi (STL) dosyasına dönüştürüldükten ve bir takım yolu tanımlandıktan sonra toplam inşaat süresi değerlendirilebilmektedir. Herhangi bir özel yapı için bir kontur işçiliği takım yolu, toplam inşaat süresi boyunca karışımı döken memenin konumunu, yönünü, hızını ve besleme hızını ifade etmelidir. Bu veriler, kontur işçiliği makinesine beslenen bir dizi makine görevine dönüştürülmektedir (Allouzi ve ark., 2020).

5.2. D-Şekli

D-şekli işlemi, bir bağlayıcı kullanılarak sertleştirilen toz biriktirme olan bağlayıcı püskürtme prosedürüne dayanmaktadır. Her bir malzeme tabakası gerekli kalınlıkta

yerleştirilmektedir, sıkıştırılmaktadır ve ardından çerçeveye takılan nozüller, bağlayıcıyı parçanın sağlam olacağı yere bırakılmaktadır. Parça tamamlandıktan sonra gevşek toz yatağından temizlenmektedir (Allouzi ve ark., 2020).

5.3. Beton Baskı Süreci

Beton baskı, çimento harcının ekstrüzyonu olarak belirtilebilmektedir. Ekstrüzyon işlemi, iç ve dış geometrilerin daha fazla kontrol edilmesini sağlayan biriktirmeye kıyasla daha düşük çözünürlükle 3 boyutlu özgürlüğünü korumak için geliştirilmiştir (Allouzi ve ark., 2020).

5.4. Otomatik 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Özellikleri

5.4.1. Yapı Özellikleri

Yapı sektörü, yavaş üretkenlik, düşük kalite, düşük güvenlik ve yetersiz vasıflı işgücü gibi aşağıdaki zorluklardan bir veya birkaçıyla karşı karşıya kalabilmektedir. Bazı Japon inşaat şirketleri, otomasyon uygulayarak vasıflı işgücü eksikliğini gidermeye çalışmaktadır. Buna göre, ya basit emek faaliyetlerinin yerini alacak tek görevli robotlar ya da prefabrik bileşenler kullanarak yüksek katlı çelik binalar veya çelik takviyeli beton binalar inşa edebilen tam otomatik sistemler üretilmiştir. 89'dan fazla tek görevli yapı robotu ve 11 tam otomatik yapı sistemi üretilmiştir (Allouzi ve ark., 2020). Robot teknolojisi üretkenliği, güvenliği ve kaliteyi geliştirmiş olsa da, yapı sektörü hala konvansiyonel süreçleri takip etmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi katlı yapı sektöründe yeni alternatif haline gelmiştir. Örneğin, donatıların döşenmesi, bağların ve saplamaların montajı emek isteyen bir iş olarak belirtilebilmektedir. Otomatik bir besleme sistemi, üç modüler bileşeni yerleştirmektedir ve bunları her katmanın iki kenarı arasına monte etmektedir. Daha sonra beton uygulaması gerçekleştirilmektedir. Karışımı döken meme, çelik takviye besleyici ve beton besleyici aynı yapıya takılabilmektedir. Zemin ve duvarların otomatik döşenmesi yapıştırma malzemesini zeminlere veya duvarlara robotik olarak dağıtarak ve yayarak entegre edilebilmektedir. Daha sonra başka bir robotik kol, karoları bir paketten almaktadır ve bunları bağ malzemesinin yerleştirildiği alana yerleştirmektedir. Bu robotik kollar, kontur işçiliği nozulunu hareket ettiren aynı yapı üzerine yerleştirilebilmektedir. Kontur işçiliği yöntemi, katmanlı yapı

tipine dayanmaktadır ve buna göre, duvarlar içinde elektrik boruları inşa etmek mümkün olmaktadır. Sonuç olarak sıhhi tesisat ve elektrik şebekelerinin inşasının otomatikleştirme potansiyeli artmaktadır. Sıhhi tesisat için, bir boru parçası yerleştirilebilmektedir ve inşa edilmiş kanal içinden (birkaç duvar katmanı uygulandıktan sonra) zaten monte edilmiş olan alt bölüme takılabilmektedir. İki boru parçası arasındaki bağ, lehim eriten ısıtıcı elemanlar (kırmızı ile gösterilmiştir) ile sağlanabilmektedir. Elektrik ve iletişim hattı kablo tesisatını otomatikleştirmek için modüller, iletken olmayan malzemelere yerleştirilmiş güç ve iletişim hatları için iletken parçalara sahiptir. Basit bir robotik kol, bu parçaları yakalayabilmektedir ve duvarın çıktısını alırken zaten kurulu olan bileşene bağlayabilmektedir (tesisat prosedürüyle aynı). Bu armatürler duvar açıklıklarından manuel olarak geçirilmektedir. Duvarların her katının yerleştirilmesi sırasında veya sonrasında, kontur işçiliği ana yapısına bağlı bir spreysel boya makinesi ile istenilen özelliklere göre boya uygulaması yapılmaktadır (Allouzi ve ark., 2020).

5.5. Mimari Esneklik

3 boyutlu beton baskı teknolojisi, mimarların konvansiyonel yapı pratiğinde inşa edilmesi zor olan çeşitli fonksiyonel ve tuhaf geometrilere sahip yapılar tasarlamasına olanak tanımaktadır (Allouzi ve ark., 2020).

5.6. Çevresel Özellikler

Yapı sektörü küresel olarak ham maddelerin % 40'ından fazlasını kullanmaktadır. Örneğin, kontur işçiliği tekniği, tek ailelik bir ev için malzeme israfını yedi tondan neredeyse sıfıra indirebilmektedir. Kontur işçiliği nesneleri bir malzemeyi yalnızca gerektiği kadar kullanmaktadır. Ayrıca, kontur işçiliği sürecinden kaynaklanan CO₂ emisyonu oldukça düşük bir değerdedir (Allouzi ve ark., 2020).

5.7. Yapısal Özellikler

3 boyutlu beton baskı teknolojisi, mimarların konvansiyonel yapı pratiğinde inşa edilmesi zor olan çeşitli fonksiyonel ve tuhaf geometrilere sahip yapılar tasarlamasına olanak tanımaktadır (Allouzi ve ark., 2020).

5.7.1. Malzemelerdeki Gelişmeler

3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapımda kullanılan beton karışımı konvansiyonel beton karışımından farklı olmaktadır. Günümüzde 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapımda kullanılan beton karışımında kullanılacak malzemeler üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Birçok araştırmacı çimento, kum, uçucu kül, silis dumanı ve liflerden oluşan çeşitli karışım tasarımları kullanarak 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapılar üretmiştir. Ayrıca 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapımda hafif harç ve fiber takviyeli harç üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir. İnce agregası olarak geri dönüştürülmüş cam kullanımı incelenmiştir. Kum kullanılarak üretilen betonun basınç dayanımı geri dönüştürülmüş cam kullanılarak üretilen betonun basınç dayanımına göre daha yüksek çıkmıştır. Halbuki geri dönüştürülmüş cam içeren betonun akıcılığı kum içeren betonun akıcılığından daha yüksek olmuştur. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanılarak üretilen fiber takviyeli harcın eğilme ve basınç dayanımı araştırılmıştır. Karbon, cam ve bazalt lifleri incelenmiştir. Lif kullanımı sonucunda eğilme ve basınç dayanımlarında iyileşme görüldüğü sonucuna varılmıştır (Allouzi ve ark., 2020).

5.7.2. Yapısal Bütünlük

Katmanlı 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapımda, homojen bir yapı oluşturulurken katmanların birbirine yapıştırılması gerekmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilen duvarlarla ilgili olarak, ekstrüde edilebilir beton, taze betonu ayakta tutmak için herhangi bir kalıp çalışması kullanılmadığından stabiliteyi ve yapısal bütünlüğü korumalıdır. Katmanların yerleştirilmesi arasındaki süre, altındaki katmanın dayanımı ve katmanların birbirine yapışma kabiliyeti ile ilgili olduğundan mutlaka planlanmalıdır. Katmanlar arasındaki bağ kuvveti, yapının yapısal performansını tanımlamaktadır. Maksimum agregası boyutu daha küçük olan karışımlar (agreganın çimentoya oranı 1.15 olduğunda) daha yüksek basınç dayanımı değerleri vermiştir. Daha kısa sertleşme süreleri, katman arayüzünde daha az homojen yapılara neden olan soğuk derzler üretmiştir. Katmanların yüksekliği daha küçük olduğunda ve katmanların yerleştirilmesi arasındaki zaman aralığı daha kısa olduğunda basınç dayanımı daha yüksek olmuştur. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilmiş beton üzerinde farklı gömme uzunlukları ve çeşitli kablo türleri ile çekme testi yapılmıştır. Ayrıca 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilmiş kirişler üzerinde kablolarla dört noktalı eğilme testi yapılmıştır. 3 boyutlu

beton baskı teknolojisi ile üretilmiş betondaki bağ dayanımı, dökme betonun bağ dayanımına kıyasla çok düşük olmuştur (Allouzi ve ark., 2020).

5.7.3. Yatay Döşemelerin Yapısal Tasarımı

Yatay zeminlerin inşası, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi için zordur. Örneğin, önceden basılmış kirişlere ince çelik levhalar eklenebilmektedir. Daha sonra bu kirişler (sahalarla birlikte) robot kollar ile alınıp yapı üzerine yerleştirilebilmektedir. Son olarak, 3 boyutlu yazıcı, düzenlenmiş kirişlerin üzerine beton uygulaması gerçekleştirebilmektedir. ETH Zürih Mimarlık Bölümü, 2 cm kalınlığında bir beton zemin levhası tasarlamıştır. Bu yeni döşeme sistemi, takviyeyi ince dikey nervürlerle değiştirmektedir ve bu da sistemin ağırlığında önemli ölçüde azalma sağlamaktadır. Geleneksel levhalarla karşılaştırıldığında, bu zeminler yükleri desteklemek için kavisli olarak tasarlanmıştır. Bu sistem, Gotik katedrallerdeki tonozlu tavanlardan ilham almıştır. Bu durumda artık çelik donatılara gerek kalmamaktadır. Bu da donatıların maliyetinden ve yerleştirme zamanından tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca, tipik beton zeminlere göre % 70 daha hafif zeminler ile sonuçlanan daha az beton kullanılmasına neden olmaktadır. Bu sistemi benimseyen iki katlı bir misafir çatı katı, Dubendorf'taki NEST araştırma binasında test edilecektir (Allouzi ve ark., 2020).

5.7.4. Yapısal Davranış

3 boyutlu beton baskı prosedürü kullanılarak inşa edilen birçok yapısal sistemin davranışı test edilmiştir. Bu teknoloji sürecinde iki farklı yöntem tercih edilmiştir. Birincisi duvarların sürekli yazdırılması olmuştur. İkincisi ise yazdırılan bölümlerin manuel montajı olmuştur. Hwang, betonla doldurulmuş üç beton kalıp duvarı örneğini ve bir çıplak duvar kalıbını test etmiştir. Form duvarları basılmıştır ve 28 gün kürlenmiştir. Makine beton duvar formunu uygularken, bağlar manuel olarak katmanlar arasına yerleştirilmiştir. Yatayda her 25,4 mm'de bir ve dikeyde 50,8 mm'de bir bir bağ yerleştirilmiştir. Testler, Güney Kaliforniya Üniversitesi'ndeki bir Üiversal Test Makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler kopana kadar eksenel basınç yüklerine maruz bırakılmıştır. Numuneler, bu duvarların basınç dayanımının tutarsız sonuçlarıyla sonuçlanan standart kapatma yöntemlerine tabi tutulmamıştır. Kontur işçiliği prosedürüyle yapılan beton duvarın dayanıklı olduğu ve taze betonu tutabildiği

gözlenmiştir. WASP, Napoli II. Federico Üniversitesi ve Pavia Üniversitesi arasındaki işbirliği, iki takviyeli kiriş inşa edilmesiyle sonuçlanmıştır. Bu kirişlerden birisi düz kiriş diğeri de kavisli kiriş olmuştur. Temel fikir, yapısal segmenti ayrı ayrı basmak ve ardından bu segmentleri birleştirerek nihai 3 boyutlu şekilleri oluşturmak olmuştur. Montaj tamamlandıktan sonra, çubukların segmentleri yazdırırken oluşan deliklerden ankrajlanmasıyla çelik takviyeler harici olarak monte edilmektedir. Buna göre, uygun ankrajı sağlamak için harç uygulanabilmektedir. Düz bir 3 boyutlu beton baskılı betonarme kiriş üzerinde üç noktalı eğilme testi yapılmıştır. Ölçülen yüke göre iki temel aşama belirlenmiştir. Bu aşamalar doğrusal elastik aşama ve doğrusal olmayan aşamadır. Doğrusal elastik aşama kirişin çatlamadığı veya bağlantısının kesilmediği aşama olarak vurgulanabilmektedir. Doğrusal olmayan aşama ise çatlakların meydana geldiği veya arayüz arızasının meydana geldiği aşama olarak bilinmektedir (Allouzi ve ark., 2020).

5.8. 3D Baskı Harç Bileşenleri

5.8.1. Agregalar

3D beton baskı sürecinde agrega boyutunun uygun seçilmesi kritik bir konudur. Nozulun çapı genellikle sınırlı olduğundan iri agregalar tıkanmalara ve ekstrüzyon problemlerine neden olabilir. Ayrıca, iri agregalar, katmanlı üretimde homojen bir karışım oluşturmayı zorlaştırarak stabilite sorunlarına yol açabilir. İnce agrega kullanımı, basılı yapı yüzeyinin daha düzgün olmasını sağlarken, çimento hamurunun ekstrüzyonunu kolaylaştırır ve karışımın akışkanlık özelliklerini iyileştirir. Bunun yanı sıra, karışımdaki bağlayıcı oranı ve katkı maddeleri de baskı sürecinde büyük önem taşır. Süper akışkanlaştırıcılar ve viskozite düzenleyici katkıları kullanılarak, agrega-çimento matrisi arasındaki ayrışmanın önüne geçilebilir ve daha stabil bir baskı süreci sağlanabilir. Bu oran ($D_{nozzle} / D_{max} > 4.94$) 3D beton baskı sürecinde agregaların nozuldan sorunsuz geçmesi için önemli bir kriter olarak görülmektedir. Granüler malzemelerin silo benzeri sistemlerden akışı konusunda yapılan deneyler, partikül boyutunun ve dağılımının ekstrüzyon sürecine doğrudan etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle, 3D beton baskıda nozul çapının ve maksimum agrega boyutunun iyi dengelenmesi gerekmektedir. Eğer oran düşük olursa (yaklaşık 4.94'ün altına inerse), tane sıkışması meydana gelebilir ve baskı sürecinde akış kesintiye uğrayabilir. Daha küçük agrega boyutları, daha akışkan ve homojen bir karışım oluşturarak baskı katmanlarının stabilitesini artırır (Uygunoğlu ve Özgüven, 2019).

5.8.2. Su/Çimento Oranı

3D beton baskıda çökme olmadan üst üste katman eklemek, ancak aynı zamanda nozuldan sorunsuz geçebilecek akışkanlıkta bir karışım elde etmek büyük bir tasarım zorluğudur. Bu süreçte, karışımın reolojik özelliklerinin dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir. Eğer harç fazla akışkan olursa, katmanlar üst üste eklendiğinde yayılma ve çökme meydana gelebilir. Ancak, aşırı kıvamlı bir karışım da ekstrüzyon sürecini zorlaştırarak nozulda tıkanmalara neden olabilir. Tiksotropik (dinlenme halinde jelleşen, kesme kuvveti uygulandığında akışkanlaşan) beton tasarımları öne çıkmaktadır. Hızlı priz alan bağlayıcılar veya katkıları kullanılarak alt katmanın erken dayanım kazanması sağlanabilir. Su/bağlayıcı oranı dikkatle ayarlanarak akışkanlık ve dayanım dengesi sağlanmalıdır. Su/çimento oranının düşük tutulması dayanım açısından kritik bir gerekliliktir. Ancak bu durumda işlenebilirliği sağlamak için süper akışkanlaştırıcılar devreye girmektedir. Süper akışkanlaştırıcılar, çimento tanelerinin daha iyi dağılmasını sağlayarak karışımın hem akıcı olmasını hem de yüksek dayanımını korumasını mümkün kılmaktadır. Nozul tipine bağlı olarak su/çimento oranının değişmesi de önemli bir noktadır. Küçük çaplı nozullar için daha akışkan bir karışım gerekebilirken, büyük nozullar için daha kıvamlı bir harç gerekebilir. Burada kritik olan nokta, fazla akışkan karışımın yayılmasını önlemek için tiksotropik özelliklere sahip bir yapı geliştirmektir. Su/çimento oranı sadece işlenebilirlik için değil, aynı zamanda hidrasyon sürecinin kontrolü ve katman stabilitesi açısından da kritik bir faktördür. Minimum su kullanımı, daha hızlı priz alma ve erken dayanım kazanımı açısından avantaj sağlarken, kimyasal ve mineral katkıları bu süreci optimize ederek hem akışkanlık hem de dayanımı korumaya yardımcı olur. Ayrıca, suyun saflığı konusu da önemli bir detay. Yabancı maddeler içeren su, çimento hidrasyonunu olumsuz etkileyebilir ve kimyasal reaksiyonları bozarak hem dayanımı düşürebilir hem de işlenebilirliği olumsuz etkileyebilir (Uygunoğlu ve Özgüven, 2019).

5.8.3. Kimyasal ve Mineral Katkıları

Kimyasal ve mineral katkıları 3D baskı betonunun akışkanlığını artırırken dayanımı korumak ve hatta geliştirmek için büyük önem taşır. Reolojik özelliklerin kontrolü, yani karışımın viskozitesi, akıcılığı ve kesme inceliği gibi parametreler, nozuldaki akışkanlık ve katman stabilitesi açısından kritik faktörlerdir. Chen ve arkadaşlarının 2020

yılında yaptığı çalışmalar, su/çimento oranının ince çimentonun reolojik özellikleri üzerindeki etkisini ortaya koyarken, genellikle daha ince çimento tanelerinin akıcılığı artırdığı, su ihtiyacını değiştirdiği, yazdırılabilirliği etkilediği belirtilmektedir. Uçucu kül ve silis dumanı, 3D baskı betonlarının reolojisini büyük ölçüde etkileyen iki önemli mineral katkıdır. Uçucu kül genellikle çökme akış çapını artırarak harcın akışkanlığını artırabilir. Ancak belirli oranlardan sonra özellikle partikül şekli ve boyut dağılımına bağlı olarak viskoziteyi artırabilir. Yani çok ince uçucu kül oranları, karışımın aşırı kıvamlı hale gelmesine neden olabilir. Silis dumanı ise çok ince partikül boyutu ve yüksek yüzey alanı nedeniyle su ihtiyacını artırarak çökme akış çapını düşürür. Aynı zamanda pozzolanik reaksiyonlar yoluyla dayanımı artırırken karışımı daha kompakt hale getirdiği için 3D baskı için katman stabilitesini iyileştirebilir. Baskı işlemi için optimal reoloji sağlamak adına, uçucu kül ve silis dumanı gibi katkıları genellikle belirli oranlarda süper akışkanlaştırıcılarla birlikte kullanılır. Silis dumanının yüksek inceliği ve pozzolanik reaktivitesi, 3D baskı betonlarının hem reolojik hem de mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Silis dumanı kullanımı viskoziteyi artırır. Nozuldan ekstrüzyonu zorlaştırabilir ama katman stabilitesini iyileştirir. Basınç altında akışkanlaşma sağlar. Bu, taze betonun yazdırılabilirliğini artırır. Ayrışma riskini azaltır. Agreganın ayrışması ve su segregasyonunu engeller. Yoğunluğu artırabilir. Ancak düşük yoğunluklu malzemelerle denge sağlanabilir. Düşük yoğunluklu malzemelerin eklenmesi, harcın toplam ağırlığını azaltarak alt katmanların deformasyonunu önleme açısından kritik bir avantaj sağlar. Bu, katmanlar arası stabiliteyi artırarak çatlak oluşumunu engellemek için etkili bir yöntemdir. Perlit, pomza veya genişletilmiş kil gibi hafif agregalar eklenerek yoğunluk azaltılabilir. Hollow microspheres (boşluklu mikroküreler) kullanılarak ağırlık düşürülebilir ve izolasyon özellikleri iyileştirilebilir. Hava sürükleyici katkıları ile daha düşük yoğunluk sağlanabilir ancak bu, baskı stabilitesine zarar verebilir (Uygunoğlu ve Özgüven, 2019).

5.9. 3D Baskı Taze Harç Özellikleri

3D baskı harcının tasarımında reolojik ve mekanik gereksinimlerin dengelenmesi oldukça kritik bir konudur. Harcın pompalanabilir, ekstrüde edilebilir, yapışkan ve stabil olması gerekir. Harcın nozul içinde tıkanma olmadan akabilmesi için yeterli akışkanlığa sahip olması gerekir. Süper akışkanlaştırıcılar (PCE vb.) kullanılarak viskozite kontrol edilebilir. Harç, nozulu terk ederken bütünlüğünü korumalıdır. Lif katkıları ve polimer

katkılar ile bu özellik geliştirilebilir. Üst katmanın ağırlığı altında çökmemeli ve dağılmamalıdır. Düşük su/çimento oranı ve viskoziteyi artırıcı katkıları bu konuda kritik rol oynar. Filamentler arasındaki aderansın yüksek olması gerekir. Kimyasal bağlayıcılar (örneğin lateks katkıları) ile aderans artırılabilir. 3D baskı harcının tasarımında çelişen gereksinimlerin dengelenmesi, mühendislik açısından en büyük zorluklardan biridir. Özellikle işlenebilirlik, erken dayanım ve reolojik değişkenlik arasındaki denge çok iyi ayarlanmalıdır. Su miktarını artırmadan akışkanlık sağlamak için süper akışkanlaştırıcılar (PCE vb.) eklenmelidir. Uçucu kül veya silis dumanı gibi mineral katkıları su ihtiyacını azaltarak işlenebilirliği iyileştirebilir. Taze harcın viskozitesi zaman içinde değişmelidir (reolojik adaptasyon). Örn: Reoloji düzenleyiciler (metilselüloz vb.) kullanılarak harcın kıvamı zamanla sertleşecek şekilde optimize edilebilir. Bağ dayanımını artırmak için polimer katkıları veya lifler eklenebilir. Çabuk priz almayı sağlamak için alçı, kalsiyum alüminat çimentosu gibi katkıları düşünülebilir. Baskı sırasında taze harcın akıcı olması gerekirken, katmanlar üst üste geldikçe stabil hale gelmesi gerekmektedir. Bu yüzden "zamanla değişen reoloji" yaklaşımı benimsenmelidir. Örneğin, geciktirici içeren bir harç, belirli bir sürede akışkanlığını koruyup ardından hızla katılaşabilir. 3D baskı harçlarının işlenebilirlik tayini geleneksel beton harçlarından farklıdır ve mevcut standartlar bu yeni üretim yöntemi için tam anlamıyla yeterli olmayabilir. Çökme deneyi, yayılma çapı ve penetrasyon deneyi, 3D baskı harçlarının işlenebilirliğini değerlendirmek için mevcut alternatifler arasında yer alsa da, bu testlerin 3D baskı sürecine tam uyumlu olup olmadığı hâlâ tartışmalıdır. Çökme-Yayılma Deneyi (TS EN 1015-3), geleneksel çimento harçlarının akışkanlık ve yayılma kapasitesini belirlemek için kullanılır. Ancak 3D baskı için harcın pompalanabilirliği, nozuldan çıkış sonrası akışkanlığı ve şekil stabilitesi açısından yeterli bilgi sağlamayabilir. Penetrasyon Deneyi (TS EN 1015-4), harcın kıvam değişimini zamana bağlı olarak belirlemek için uygulanabilir. Erken priz alma sürecinin izlenmesi için avantajlıdır. Ekstrüzyon testi malzemenin 3D baskı nozulu içerisindeki akış davranışını değerlendirmek için kullanılır. Pompalanabilirlik ve nozuldan çıkış anındaki stabilite ölçülebilir. Reometre testlerinin uygulanması ile harcın akma gerilmesi (yield stress), viskozite ve tiksotropi özellikleri incelenebilir. Rotasyonel ve osilasyonel reometreler ile yapılan ölçümler, zamana bağlı reolojik değişimleri belirlemek için kritik olabilir. Harcın üç boyutlu baskı sırasında kendi ağırlığını taşıyabilme kapasitesini ölçmek için uygulanır. Literatürde silis dumanının 3D baskı yazdırılabilir harç karışımlarındaki reolojik etkileri konusunda farklı sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir. Bu farklılıkların temel sebeplerinden biri, kullanılan silis dumanının

fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişkenlik göstermesi olabilir. Parçacık boyutu dağılımı, spesifik yüzey alanı ve yüzey enerjisi gibi faktörler, silis dumanının harç içindeki dispersiyonunu ve suyla etkileşimini değiştirebilir. Daha ince silis dumanı parçacıkları, çimento hamuru içindeki suyu daha fazla bağlayarak akıcılığı azaltabilir, bu da viskozitenin artmasına neden olabilir. Çimento hamurundaki diğer bileşenlerle (örneğin süper akışkanlaştırıcı, mineral katkıları) olan etkileşimi, akma gerilmesi ve plastik viskoziteyi farklı yönlerde etkileyebilir. Ahari ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada silis dumanının plastik viskoziteyi azaltırken akma gerilmesini artırdığı belirtilmiştir. Bu durum, silis dumanının parçacıklar arası bağlanmayı artırmasıyla ilgili olabilir. 3D baskı yazdırılabilir harç karışımlarına lif eklenmesi, geleneksel betonlarda olduğu gibi malzemenin mekanik ve reolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Lif miktarı arttıkça taze harcın iç yapısında bir ağ oluşarak harcın akışkanlığını sınırlandırır. Bu durum, harcın daha rijit hale gelmesine ve çökme miktarının azalmasına neden olur. Liflerin su tutma kapasitesi ve viskoziteye etkisi nedeniyle harcın kıvamı sabit kalabilir. Bazı lif türleri (örneğin polipropilen veya bazalt lifleri) düşük dozajlarda akıcılığı belirgin şekilde değiştirmediklerinden, batma derinliği aynı kalabilir. Lifler, özellikle 3D baskı sürecinde katmanlar arası aderansı artırarak erken yaş çatlaklarını önleyebilir. Eğilme dayanımı artarken, basınç dayanımında da iyileşme görülebilir. Ancak lifin türü, boyutu ve oranı bu etkinin derecesini belirler. Bu bağlamda, lif katkılı harçların 3D baskı süreçlerinde kullanılabilirliğinin daha fazla araştırılması gerekmektedir (Uygunoğlu ve Özgüven, 2019).

5.10. 3D Baskı Harçlarının Sertleşmiş Haldeki Özellikleri

3D baskı yazdırılabilir harçların mekanik dayanımını incelemek için yapılan çalışmalar, basılı nesnelerin yönlülüğünün ve baskı katmanlarının, dayanım özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Baskı yönü, özellikle baskı sırasında katmanlar arasındaki bağların gücünü etkiler. Genellikle, 3D baskı malzemeleri, katmanlar arasındaki zayıf bağlar nedeniyle, baskı yönüne paralel olmayan yönlerden daha düşük dayanım gösterebilir. Nerella ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, baskı katmanlarının yönüne dik doğrultuda yapılan testlerde daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu durum, katmanlar arasındaki bağların daha güçlü olduğu bir yönü işaret edebilir. 3D baskı ile üretilen numunelerde farklı geometrik şekiller (küp ve prizma) kullanılarak dayanım testlerinin yapılması, baskı yönündeki etkiyi daha iyi anlamamıza

olanak sağlar. 28 gün sonunda, baskı yönü D1 ve D3 doğrultusunda toplanan örneklerin, diğer yönlerden toplanan örneklere kıyasla daha yüksek dayanım gösterdiği gözlemlenmiştir. Kontrol numuneleri ile basılı örneklerin karşılaştırılması, 3D baskı harçlarının mekanik özelliklerini daha ayrıntılı bir şekilde anlamamıza yardımcı olur. Basılı örneklerdeki dayanım gelişimi, baskı işlemi ve kullanılan malzemelerin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bu gözlemler, 3D baskı teknolojisiyle üretilen harçların dayanımının optimize edilmesi için baskı yönünün dikkatlice seçilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, 3D baskı harçlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için katmanlar arasındaki bağları güçlendirecek stratejilerin geliştirilmesi önemli olacaktır. Bu konuda daha fazla deneysel veriye sahip olmak, uygulamalı mühendislik çözümleri geliştirmek açısından faydalı olabilir. Haddelenmiş numunelerde yüksek mekanik dayanımın gözlemlenmesi, 3D baskı süreçlerinde kullanılan ekstrüzyon işleminin etkilerini vurgulamaktadır. Ekstrüzyon işleminde, taze harca uygulanan basınç, harç karışımının daha yoğun bir matris yapısına dönüşmesini sağlar. Bu yoğun matris, taze harç içerisindeki hava boşluklarını minimize ederek, malzemenin mekanik özelliklerini güçlendirir. Ekstrüzyon sırasında oluşan daha yoğun yapılar, özellikle içsel bağların güçlenmesine yol açar, bu da numunelerin mekanik dayanımını artırır. Ekstrüzyon işlemi, aynı zamanda harç içindeki boşluk oranını da azaltır. Hava boşluklarının minimize edilmesi, dayanım üzerinde büyük bir etkidir, çünkü boşluklar betonun zayıf noktaları olarak işlev görür ve dayanımını düşürür. Bu, 3D baskı süreçlerinde boşlukların optimize edilmesi gerektiğini ve daha az boşluklu yapıların daha yüksek mekanik performans sergileyebileceğini gösterir. Yapılan araştırmalarda, haddelenmiş numunelerin kontrol numunelerinden daha yüksek mukavemet gösterdiği belirtilmiştir. Bu durum, ekstrüzyon sırasında uygulanan basıncın ve matris yoğunluğunun artırılmasının, daha iyi dayanım sağladığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, 3D yazdırılabilir harçların mekanik performansını artırmak için ekstrüzyon parametrelerinin, özellikle basınç uygulama derecesinin optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu tip araştırmalar, 3D baskı betonu üretimi sırasında daha dayanıklı yapılar oluşturmak için süreç parametrelerinin hassas şekilde ayarlanmasını sağlayabilir. Nerella ve arkadaşları yaptığı çalışmada, tek katmanlı haddelenmiş numunelerin D1 ve D3 doğrultusunda yapılan yüklemelerde kontrol numunelerine göre % 11 ile % 15 daha yüksek dayanım gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu sonuç, haddelenmiş numunelerdeki mekanik dayanımın ekstrüzyon işlemine bağlı olarak arttığını ve özellikle belirli yönlerden (D1 ve D3 doğrultuları) daha iyi performans sergilediğini göstermektedir.

Ekstrüzyon işleminde taze harca uygulanan basınç, harcın matris yapısını daha yoğun ve homojen hale getirir. Bu, malzemedeki mikro boşlukların azalmasına ve harcın içyapısının sıkılaşmasına neden olur. Sıkı bir yapı, bağların güçlenmesini sağlar ve dolayısıyla malzemenin dayanımını artırır. Bu da, ekstrüzyon işleminden sonra elde edilen numunelerin, daha az boşluklu ve daha güçlü bir yapıya sahip olmasını sağlar. Ekstrüzyon sırasında, harcın daha düzgün bir şekilde yerleşmesi ve katmanlar arası bağların güçlenmesi, özellikle 3D baskı süreçlerinde malzeme kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlar. Daha az boşluk, malzemenin daha az zayıf noktaya sahip olmasını sağlar, bu da mekanik dayanımda artışa yol açar. Bu bakış açısıyla, ekstrüzyon parametrelerinin (örneğin, uygulanan basınç, ekstrüzyon hızı ve malzeme özellikleri) mekanik özellikleri optimize etmek için önemli bir rol oynadığını vurgulamak önemli. 3D baskı süreçlerinde kullanılan harçların performansını geliştirmek için bu parametrelerin dikkatlice ayarlanması gerekebilir. Nerella ve arkadaşları yaptığı çalışmada eğilme dayanımının da baskı yönüne bağlı olarak farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Basınç dayanımındaki gibi, eğilme dayanımında da baskı yönünün etkisi önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Ancak, basınç dayanımından farklı olarak eğilme dayanımında, farklı baskı yönlerinde yapılan testler sonucunda, D1 ve D2 doğrultularındaki örneklerin 28 günlük kontrol numunelerine kıyasla % 6 ile % 12 daha düşük eğilme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, baskı yönünün mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gösteriyor. Eğilme dayanımında, özellikle baskı yönünün paralel olduğu ve dik olduğu doğrultularda, materyalin iç yapısal bağlantıları ve katmanlar arasındaki bağların farklılık göstermesi nedeniyle farklı dayanım değerleri elde edilebilir. 3D baskı işlemi sırasında katmanlar arasındaki bağlar, eğilme dayanımını doğrudan etkileyebilir. Yönlü baskılar, belirli yönlerden daha güçlü bağlar oluşturabilirken, diğer yönlerde daha zayıf bağlara sahip olabilir. D1 ve D2 doğrultularında yapılan testlerde gözlemlenen dayanım farkları, baskı yönünün eğilme yükü altında malzemenin nasıl davranacağı üzerinde doğrudan bir etkisi olduğunu göstermektedir. Katmanlar arasındaki hizalanma, eğilme testi sırasında malzemenin deforme olma şekli üzerinde belirleyici olabilir. Bu bulgular, 3D yazdırılabilir harçlarda dayanımın sadece basınç testleriyle değil, eğilme testleriyle de yönlü olarak incelenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Aynı zamanda, baskı yönüne bağlı olarak değişen mekanik özelliklerin, 3D baskı ile üretilen yapıların performansını etkileyebileceği anlaşılmaktadır. Bu tür farklar, tasarım ve baskı yönü optimizasyonunun 3D yazdırılabilir malzeme kullanımı açısından önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. 3D baskılı beton

numunelerde nozul şeklinin mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkisi vardır. Özellikle eğilme dayanımı açısından D2 yönünde test edilen numunelerde elde edilen % 14'e kadar daha yüksek dayanım, baskı sürecindeki parametrelerin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Dairesel nozul farklı açılarda baskı yapmaya daha uygundur ve daha karmaşık geometrilerin oluşturulmasını kolaylaştırır. Boncuklar arası temas alanı daha küçük olduğundan, katmanlar arası bağ zayıf olabilir ve bu da daha düşük mekanik dayanım ile sonuçlanabilir. Dikdörtgen/kare nozul daha geniş temas alanı sunduğundan, katmanlar arası bağ kuvveti daha yüksek olabilir ve bu da daha yüksek dayanım anlamına gelir. Konumlandırma açısından daha fazla hassasiyet gerektirir ve yanlış hizalanma durumunda baskı doğruluğunu etkileyebilir. 3D baskılı beton numunelerde zayıf derzler boyunca kırılma eğilimleri gözlemlenmiştir. Bu durum özellikle eğilme dayanımı ve basınç altında çatlama mekanizmasını etkileyebilir. Nozulun seçimi, katmanlar arası bağın kuvvetini ve mekanik bütünlüğü doğrudan etkileyerek betonun son dayanım özelliklerine katkıda bulunur. Mekanik özelliklerin artırılması için baskı yönü, nozul şekli ve katman yapısının optimize edilmesi gerekmektedir. Yapısal dayanıklılığı artırmak için haddelenmiş ekstrüzyon teknikleri veya farklı nozul geometrilerinin kullanımı incelenebilir (Uygunoğlu ve Özgüven, 2019).

5.11. 3D Baskılı Beton ve Özellikleri

3DPC, karmaşık ve kişiselleştirilmiş yapıların oluşturulmasını sağlayan yenilikçi bir inşaat yöntemidir. Bu teknik, malzeme israfının azaltılması, daha hızlı inşaat süreleri ve karmaşık özelliklere sahip benzersiz tasarımlar üretme kapasitesi gibi faydalar sunmaktadır. Katman katman bir teknik kullanarak karmaşık yapıların tasarlanmasını ve inşa edilmesini sağlar. 3DPC geleneksel olarak geleneksel betona kıyasla daha fazla çimento hacmi kullanır. Bu ayarlama, baskıya elverişli reolojik özellikler sağlar. Dahası, 3D baskılı betonun özelliklerini anlamak, hem basıldığı taze halindeki hem de sertleşmiş halindeki performansını optimize etmek için gereklidir. Taze beton, işlenebilirlik, pompalanabilirlik, ekstrüde edilebilirlik, inşa edilebilirlik, şekil tutma ve açık kalma süresi gibi baskı süreci için önemli olan özellikler sergiler. Öte yandan, betonun sertleşmiş özellikleri yapısal bütünlüğünü, dayanıklılığını ve estetiğini belirler. Bunlar basınç dayanımı, eğilme dayanımı, gözeneklilik ve çekme dayanımını içerir. 3DCP yöntemlerinin türleri ve bunların taze ve sertleşmiş özellikleri aşağıda tartışılmaktadır (Afful ve Yalçınkaya, 2024).

5.11.1. 3D Betonun Karışım Tasarımı ve Beton Özellikleri

Bu bölümde, 3D beton yazımı için yüksek performanslı, elyaf takviyeli ve ince agregalı betonun karışım tasarımı ve beton özelliklerine ilişkin deneysel sonuçlar sunulmaktadır. 3D beton, tabaka tabaka yapısal bileşenlerin oluşturulabilmesi için bir nozuldan ekstrüde edilerek (pompalanabilir şekilde) tasarlanmıştır. 3D yazdırma, geleneksel beton üretim yöntemlerinden farklı olarak, kalıplama gerektirmeden mimari ve yapısal bileşenlerin inşa edilmesini sağlayan yeni bir dijital kontrollü üretim tekniğidir. Yapılan çalışmalar, bu betonda en kritik taze beton özelliklerinin ekstrüde edilebilirlik (pompalanabilirlik) ve üst üste taşıtabilirlik (inşa edilebilirlik) olduğunu ve bunlarla ilişkili olan işlenebilirlik ve çalışılabilirlik süresi (open time) parametrelerinin de önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu özellikler, kullanılan bileşen malzemeler ve karışım oranları, süperakışkanlaştırıcı, priz geciktirici, priz hızlandırıcı ve polipropilen elyaflarının miktarı ile önemli ölçüde etkilenmektedir. Le ve arkadaşları, 3D yazım sürecinde taze betonun en kritik özelliklerinin ekstrüde edilebilirlik (pompalanabilirlik) ve inşa edilebilirlik (katların kendini taşıması) olduğunu belirtmişlerdir. Ekstrüzyon, betonun, beton pompasından, iletim hortumlarından ve püskürtücü nozuldan geçme kapasitesi olarak tanımlanmıştır. Betonun işlenebilirliğinin, karışım oranlarından (çimento esaslı bağlayıcı/agrega oranı, su/bağlayıcı oranı, katkı kullanımı, lif miktarı) etkilendiği ifade edilmiştir. İyi bir ekstrüde edilebilirlik, kendiliğinden yerleşen beton ve püskürtme beton ilkelerinin karışım tasarımına birlikte uygulanmasıyla elde edilmiştir. 3D eklemeli üretim yönteminde, alt tabakaların üst tabaka baskınının ağırlığıyla minimum deformasyona uğraması, aynı zamanda alt katmanın tabakalar arası aderans (bağlantı) oluşturabilmesi için üst katmanlarla bağlanması gerektiği vurgulanmıştır. İnşa edilebilirlik, başlangıçtaki işlenebilirliğe ve çalışılabilirlik süresine (işlenebilirliğin zamanla istenilen seviyede devamlılığı) bağlıdır. Ayrıca, iyi bir ekstrüde edilebilirlik ve sürekli bir akış oranı sağlamak için uygun işlenebilirlik ve uzun bir çalışılabilirlik süresine ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir. Ancak bu durumda bir ikilemle karşılaşıldığına dikkat çekilmiş, kısa bir işlenebilirlik süresi, malzemenin sertleşmesine, betonun akış hızının ve baskı hızının yavaşlamasına ve iletim hortumunda tıkanmaya (blokaj) neden olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan, uzun bir işlenebilirlik süresinin ekstrüzyon kabiliyetini artırdığı ve tabakalar arası bağlanmaya yardımcı olduğu, ancak inşa edilebilirlik açısından katmanların deformasyonuna yol açabileceği ifade edilmiştir. Tabakaların kendi ağırlığını taşıma kabiliyetinin, betonun reolojisine ve taze betonun kayma gerilmesine

bağlı olduğu belirtilmiştir. Zamanla yapının yıkılmadan inşasına devam edilebilmesi ve mevcut katmanların kararlılığının sağlanabilmesi için, betonun kayma gerilmesinin bu yükü karşılayacak seviyede olması gerektiği ifade edilmiştir. Ancak bu noktada, yeni bir çelişkinin ortaya çıktığına dikkat çekilmiştir. Çimento hamurunun, ekstrüzyon (pompalanma) yapılabilmesi için yeterince sıvı olması ve aynı zamanda yapının mekanik stabilitesinin korunabilmesi için yeterince sağlam olması gerektiği vurgulanmıştır. Bu çelişkinin bir başka ifadesi ise, ekstrüzyon esnasında hem yeterli akışkanlığın sağlanması hem de taşıtılabilirlik için betonun yapısal gelişiminin sürdürülebilmesi gerektiğidir (Özalp ve ark., 2018).

Kullanılan Malzemeler ve Karışım Tasarımı

Betonun karışım tasarımı, taze ve sertleşmiş betonun performans gereksinimlerini karşılayacak şekilde yapılmalıdır. Literatür araştırmalarına göre, 3D yazıcılarda kullanılacak betonların, geleneksel betonun performansına ek olarak, işlenebilirlik, çalışabilirlik süresi (open time), ekstrüde edilebilirlik (pompalanabilirlik) ve katmanların kendi kendini taşıyabilme (inşa edilebilirlik) gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir. Ayrıca, standart taze beton özelliklerinden farklı olarak, 3D yazıcılara uygun beton tasarımında betonun reolojik özelliklerinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Betonun çalışma süresinin uzatılması, kayma dayanımının artırılması gerektiğinde temel ilkelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu amaçla, karışıma ilave edilen katkılar, betonun viskozitesini artırmadan kaymayı önleyici özellikler katarak kayma dayanımını artırmaktadır. Bu katkılardan viskozite düzenleyici katkılar, başlıca betonun kayma dayanımını artırmak ve üst üste eklenen beton tabakalarının kaymasını engellemek için kullanılır. Viskozite düzenleyici katkılar kullanılmadığında, beton, standart viskozite seviyesinde fazlasıyla kayma eğilimi göstermektedir. Ancak, viskozite düzenleyici kullanımı ile aynı viskozite seviyesinde beton, kaymasını önleyici bir özellik kazanır ve bu da çalışabilirlik süresinin artmasını sağlar. Ayrıca, 3D yazıcı tekniğiyle üretilen betonun kaymasını engellemek ve çalışabilirlik süresini uzatarak verimi artırmak amacıyla, reoloji düzenleyici kıvamı ayarlayan katkılar da bu çalışmada kullanılmıştır. Bu katkılar, betonun kaymasını yüksek oranda önlemekte ve bu sayede 3D yazıcıyla yapılan üretim sürecinde daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır (Özalp ve ark., 2018). Viskozite düzenleyiciler, betona tiksotropik özellik katarak reolojisini değiştirir. Bu özellik sayesinde beton, güç uygulandığında viskozitesini azaltarak rahat işlenebilir ve iyi bir pompalama sağlar. Güç uygulaması durduğunda ise viskozite artar, böylece

beton iyi bir kayma direnci gösterir. Ayrıca, betonda su tutma özelliği olan kıvam ayarlayıcı kimyasallar kullanıldığında, harç içerisindeki belirli bir miktar su, arzu edilen bir süre boyunca kimyasalın bünyesinde hapsolür ve bu sayede harcın çalışma süresi kontrol edilebilir hale gelir. Özellikle çalışabilirlik süresinin artırılması için betonun reolojisini düzenleyen bu katkılar gereklidir. Bu çalışmada, pompalamayı kolaylaştıran ve kaymayı önleyen viskozite düzenleyici ve çalışma süresini uzatan kıvam ayarlayıcı katkıları kullanılmıştır. Bu katkıları sayesinde betonun viskozitesini artırmaya gerek kalmadan kaymayı önleyici özellikler sağlanmıştır, böylece işlenebilirlik ve pompalama kolaylığı artırılmıştır. Ayrıca, yapılan çalışmalarda çok daha uzun çalışabilirlik süreleri elde edilmiştir. Beton tasarımı çalışmalarda, literatür araştırmaları ve deneyimler doğrultusunda, nozul ağız çapına bağılı olarak 0-1,5 mm aralığında dayanımı yüksek silis kumu kullanılmıştır. Silis kumu, hem malzeme içeriğinin temizliği hem de agreganın yüksek dayanımı nedeniyle tercih edilmiştir. CEM I 42,5 R ve BPC 52,5 çimentolar bağlayıcı olarak seçilmiştir ve başlangıç çalışmalarda mineral katkıları (uçucu kül, silis dumanı vb.) karışıma dahil edilmemiştir. Betonun arzu edilen işlenebilirliğini sağlamak ve su/bağlayıcı oranını düşürmek amacıyla, hem erken hem de ileri yaş beton dayanımını artırmak için yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı (SA) katkı kullanılmıştır. 3D beton karışım oranları şu şekildedir: çimento: su: ince kum (0-1,5 mm): kimyasal katkı = 1: 0,30: 1,5: 0,02. Karışımlarda kullanılan çimento miktarı yaklaşık olarak 800 kg/m³tür. Su azaltıcı SA kimyasal katkı miktarı, çimento ağırlığına oranla % 1,5-% 2 arasında değişmektedir. Betonun rötre ve çatlak oluşumunu azaltmak amacıyla polipropilen mikro fiberler, tüm karışımlara 600 gr/m³ olarak ilave edilmiştir. 3D yazıcı ile yazım süresince yeterli bir çalışabilirlik süresi elde edebilmek için beton karışımına priz geciktirici ilave edilmesine yönelik çeşitli deneme çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca, bazı çalışmalarda inşa edilebilirliği sağlamak amacıyla priz hızlandırıcılar da kullanılmıştır (Özalp ve ark., 2018).

Taze Beton Özellikleri

Betonların reolojik özelliklerinin belirlenmesinde birçok deney yöntemi kullanılmaktadır. Bu deneyler arasında en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri çökme deneyidir. Ancak, çökme (slump) değeri işlenebilirliği tanımlamak için tek başına yeterli bir yöntem değildir. Çünkü aynı çökme değeri, agreganın tane şekli, kullanılan kimyasal katkı tipi ve diğer faktörlere bağılı olarak farklı işlenebilirliklere karşılık gelebilir. Çökme deneyi, agrega nem durumu gibi faktörlere bağılı olarak beton

karışımlarında stabilitenin izlenmesi açısından faydalı olsa da, betonun sıkıştırılabilmesi, pompalanabilmesi ve pompa iletim borusunda hareket etme gibi özellikler hakkında doğrudan bilgi vermez. Bununla birlikte, bu çalışmada betonun taze beton davranışının zaman içerisindeki değişimini incelemek amacıyla, betonun işlenebilirlik özelliğinin zamanla değişiminin izlenmesi için çökme deneyi bir değişim parametresi olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, betonun işlenebilirlik özelliklerinin zamanla nasıl değiştiğini daha iyi anlayabilmek ve kontrol edebilmek için önemlidir (Özalp ve ark., 2018).

5.12. 3D Baskılı Betonun Depreme Dayanıklı Yapı İnşaatında Potansiyel Kullanımı

Henüz gelişiminin ilk aşamalarında olan 3D beton baskı teknolojisi üzerine araştırmalar farklı konularla devam etmektedir. Bu teknoloji inşaat sektöründe nispeten yeni olmasına rağmen, bazı ülkeler teknolojiyi çeşitli inşaat projelerinde başarıyla uygulamıştır. Özellikle 3D baskı teknolojisi, deprem gibi doğal afetler sonrasında hızlı ve ekonomik konut üretme kabiliyetine sahiptir. İnşaat ve kullanıma geçmeden önce bu yaklaşımın sismik yapısal güvenlik ve güvenilirlik gösterdiğini doğrulamak zorunludur. Bu nedenle, 3D baskılı beton elemanların davranışının deneysel, analitik ve sayısal çalışmalarla araştırılması gerekmektedir. Sismik performansı ortaya koymayı amaçlayan bu çalışmaların ilk adımı, 3B basılı beton malzeme ve elemanların basınç yüklemesi altında karakterizasyonu olmalıdır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı 3B basılı betonun basınç davranışını deneysel olarak araştırmak ve 3B betonun sismik performans açısından potansiyeli hakkında öngöründe bulunmaktır. Bu amaca ulaşmak için, robotik kollu yazıcı kullanılarak on sekiz kısa kare kolon numunesi üretilmiştir. Numunelerin bir kısmı dolgunsuz tutulmuş, bir kısmı ise iki farklı hazır betonla (tip I ve tip II) doldurulmuştur. Her bir kare numunenin kesit boyutları 300 x 300 mm ve numunelerin yüksekliği 500 mm'dir. Katman genişliğinin katman kalınlığına oranı tüm numuneler için üç sabit değerde tutulmuştur. Dokuz özdeş numune 20 mm kalınlığında ve 60 mm genişliğinde katmanlara sahiptir (Grup A). Grup A'nın üç numunesi dolgunsuz bırakılmış, üçü (I) tipi betonla doldurulmuş (28 günde 25 MPa hedef ortalama basınç dayanımı) ve kalan üçü (II) tipi betonla doldurulmuştur (28 günde 50 MPa hedef ortalama basınç dayanımı). Diğer dokuz numune (Grup B) 10 mm kalınlığında ve 30 mm genişliğinde katmanlara sahip olmuştur. Grup B'deki üç numune doldurulmadan bırakılmış, üçü (I) tipi betonla doldurulmuş ve kalan üçü (II) tipi betonla doldurulmuştur. Ayrıca, malzeme karakterizasyonu amacıyla, aynı beton prizma şeklinde basılarak 200 mm yüksekliğinde

ve 100 mm çapında sondaj karotları elde edilmiştir. Ayrıca, basılı numuneleri doldurmak için kullanılan hazır betonun malzeme özelliklerini değerlendirmek amacıyla, her beton tipi için 300 mm yüksekliğinde ve 150 mm çapında üç silindirik numune dökülmüştür. Basılan betonların ortalama basınç ve yarmada çekme dayanımları, baskı yönüne dik olarak alınan numuneler için 28 günde sırasıyla 32 MPa ve 3,2 MPa olarak belirlenmiştir. Görüldüğü üzere yarmada çekme dayanımı basınç dayanımının % 10'u olarak bulunmuştur. (I) tipi beton ve (II) tipi betonun standart silindirik numunelerinin 28 günlük ortalama basınç dayanımları sırasıyla 22,8 MPa ve 48,8 MPa olarak belirlenmiştir. (I) tipi beton ve (II) tipi betonun ortalama yarmada çekme dayanımları sırasıyla 2,2 MPa ve 4,2 MPa olarak hesaplanmıştır. Görülebileceği gibi, yarmada çekme dayanımları basınç dayanımının % 10'u civarındadır. Kare kısa kolonlar, 5000 kilonewton (kN) kapasiteli bir Instron universal test makinesi kullanılarak basınç yüklerine maruz bırakılmıştır. Testler, betonun zaman içinde dayanım kazanması nedeniyle oluşabilecek olası farklılıkları ortadan kaldırmak için kare numunelerin üretiminden en az 120 gün sonra gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre her bir numune için eksenel yük-eksenel şekil değiştirme eğrileri, eksenel gerilme-eksenel şekil değiştirme eğrileri, elastisite modülü, basınç dayanımı ve buna karşılık gelen şekil değiştirme değeri ve göçme mekanizması belirlenmiştir. Grup A ve Grup B'deki 3D baskılı numunelerin (doldurulmamış numuneler) ortalama basınç dayanımları sırasıyla 22 ve 18 MPa olarak hesaplanmıştır. Grup A ve Grup B'deki (I) tipi betonla doldurulmuş numuneler için ortalama maksimum basınç yükü değeri sırasıyla 1593 ve 1795 kN olarak hesaplanmıştır. Son olarak, (II) tipi hazır beton ile doldurulan Grup A ve Grup B'deki numuneler için ortalama maksimum basınç yükü değeri sırasıyla 2526 ve 2380 kN olarak hesaplanmıştır. Numuneler, kenarlardan kaynaklanan neredeyse düşey çatlakların yayılmasıyla çökme sergilemiştir. Kare numunelerin testlerine başlamadan önce basılı beton ve hazır beton numuneleri (tip I ve tip II) basınç yükü altında test edilmiştir. Sondaj karotlarının ortalama basınç dayanımları, baskı yönüne dik olarak alınan numuneler için 35 MPa, baskı yönüne dik diğer yönler için ise 36 ve 39 MPa olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, ortalama basınç dayanımı üzerindeki yön etkisinin yüksek olmadığını göstermektedir. Hazır betondan (I) ve (II) için standart silindirik numunelerin ortalama basınç dayanımları sırasıyla 29 ve 55 MPa olarak bulunmuştur (Meran ve Arslan, 2023).

5.13. İklim Değişikliğinin 3B Beton Yazıcılar ile Üretilmiş Yapılar Üzerindeki Etkisi

3D beton baskısı, kalıp gerektirmemesi, karmaşık geometrilerin kolaylıkla inşa edilebilmesi ve düşük maliyeti sayesinde inşaat atıklarının azalması ve işgücüne bağımlılığın azalması gibi faydalarıyla inşaat sektörünün gelişimini arttırmak için büyük bir potansiyele sahiptir. 3D beton baskı teknolojileri, basılabilir beton bileşenlerinde geleneksel inşaat yöntemleriyle kullanılamayan geri dönüştürülmüş ve yüksek performanslı malzemelerin kullanılmasına olanak sağlayacaktır. Bu faydalara rağmen, 3D baskılı yapı elemanlarının termal ve enerji performansına ilişkin temel araştırmaların eksikliği nedeniyle inşaat sektöründe hala standart değildir. Gerçek bir 3D baskılı beton binanın enerji performansını ve iklim değişikliğinin 3D baskılı beton binalar üzerindeki etkisini araştıran daha da az çalışma vardır. Enerji tüketiminin çevre üzerindeki etkileri ve enerji tüketimi ile hakim hava koşulları arasındaki ilişki önemli bir endişe kaynağı haline gelmektedir. İklim değişikliği nedeniyle, yerel iklim ve binalar arasındaki denge, binalar için benzersiz bir tehdit oluşturan önemli bir değişime karşı savunmasızdır. Bu tezin temel amacı, iklim değişikliğinin 3D beton baskılı yapıları nasıl etkileyeceğini incelemek ve 3D baskılı yapıların enerji verimliliğini geleneksel binalarla karşılaştırmaktır. Ayrıca, İSTON Fabrikası'nda yer alan Türkiye'deki ilk 3D beton baskılı ofisin yerinde denenmesi yoluyla inşaat sektöründe kullanılan beton için 3D baskı tekniklerine dayalı kapsamlı bir analiz sunmaktadır (Üğütmen ve Dino, 2023).

5.14. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisini Değerlendirme Faktörleri

Genel olarak bir konuyu farklı açılardan incelemek farklı sonuçlar gösterebilir. Binaların 3D baskı yöntemiyle değerlendirilmesi tartışmasında da bu konuya farklı perspektiflerden bakılabilir. Genel olarak, nispeten sınırlı sayıda çalışma bu konuyu araştırmış ve genellikle bu şekilde projelerin maliyetlerini ve zamanını incelemeye odaklanılmıştır. Bu çalışmada bu konunun maliyet açısından incelenmesinin yanı sıra diğer yönleri de kısaca ele alınmıştır (Givkashi ve ark., 2023).

5.14.1. Maliyet

Maliyet, herhangi bir projenin üç ana ayağından biridir. Genel olarak, bir inşaat yönteminin yaygınlaşması için maliyetlerinin bilinmesi gerekir. Literatürde, 3D baskının binalarda kullanılmasının kalıplamanın ortadan kalkması, işçiliğin ve inşaat süresinin azalması nedeniyle maliyetlerde büyük bir düşüşe yol açtığı yaygın olarak ifade edilmektedir. Bu bulgular hala tartışılmaktadır ve çelişkili görüşler bildirilmiştir. İnşaat sektöründe kullanılan metal, polimer ve seramik bazlı 3D baskılı parçaların maliyet analizi üzerine çok sayıda literatür bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada 3DPC ile ilgili yapılan araştırmalara odaklanılmıştır. Çizelge 5.1, 3DPC yapıların ekonomik değerlendirmesinde yapılan çalışmaları özetlemektedir. Genel olarak maliyetlerin iki kategoriye ayrıldığı kabul edilmektedir: malzeme, inşaat, işçilik, ekipman maliyetlerini içeren doğrudan maliyetler ve genel giderler, vergiler, sigorta, idari maliyetler ve karı içeren dolaylı maliyetler (Givkashi ve ark., 2023).

Çizelge 5.1. 3DPC'nin ekonomik değerlendirmesindeki çalışmalara genel bir bakış

Çalışma	Sonuç	Yıl
Buswell ve arkadaşları	Yetenekli bir operatöre duyulan ihtiyaç ve 3DPC'de beton karışımının sağlanmasındaki hassasiyet nedeniyle, bu teknolojinin yaygın kullanımı şu anda bir dereceye kadar imkansız olarak kabul edilmektedir.	2018
Khoshnevis ve arkadaşları & Labonnote ve arkadaşları	3DPC'nin geleneksel proseslere kıyasla en cazip özelliği maliyet tasarrufu değil, karmaşık 3D şekiller üretebilmesidir.	1998, 2016
Schutter ve arkadaşları	3DPC malzeme maliyetleri geleneksel inşaat maliyetlerinden daha düşük olabilir (daha az malzeme atığı). Yine de, nano kil, nano silika ve bazı kimyasal katkı maddeleri gibi pahalı katkı maddeleri mevcutsa, geleneksel maliyetlerden daha yüksek olabilirler.	2018
Yang ve arkadaşları	Geleneksel inşaatın aksine, 3DPC için genel bir anlayış ve fiyatlandırma temeli olmadığını, bunun da gerçek maliyet hesaplamasından büyük bir sapmaya yol açabileceğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, yazarlar 3DPC yapılarının maliyetini yerinde ve saha dışında hesaplamak için doğru bir yöntem önermiş, ancak maliyet tasarrufu sağlayan bir vaka çalışması göstermemişlerdir.	2018
Mechtcherine ve arkadaşları	Kalıp, basit geometrik konfigürasyonlar için bile yapısal işlerin toplam maliyetinin yaklaşık % 30'unu oluşturmaktadır, bu nedenle 3DPC önemli maliyet tasarrufu sağlayabilir.	2019

Çizelge 5.1. 3DPC'nin ekonomik değerlendirmesindeki çalışmalara genel bir bakış (devamı)

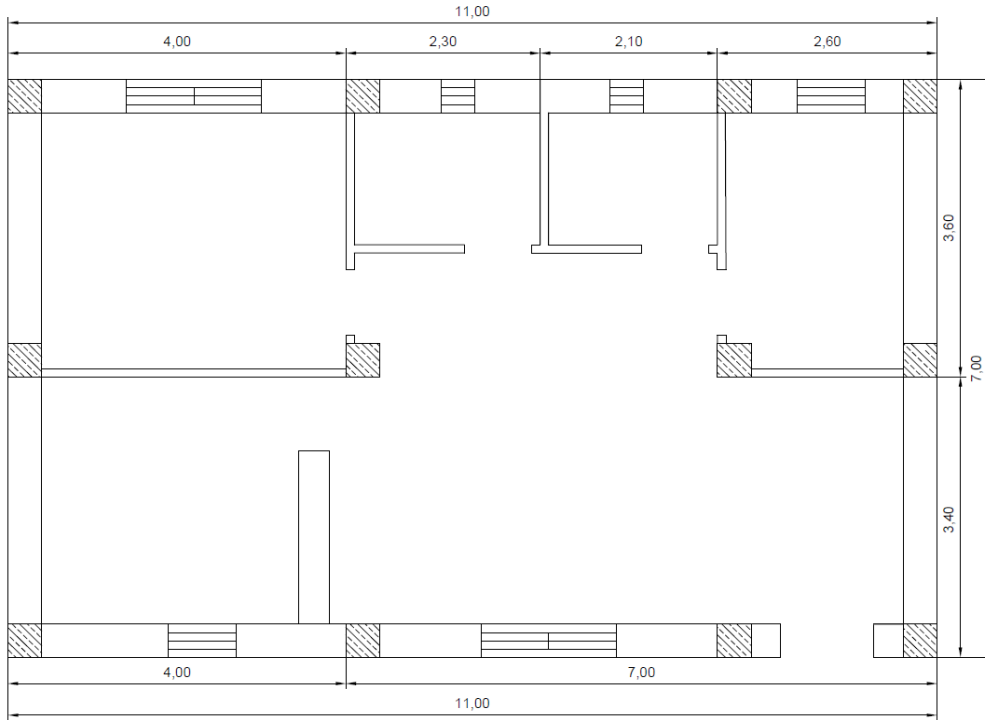
Schmitt	Kalıplar maliyetlerin % 28'inden sorumlu bulunmuştur; bu oran işçilik maliyetleri ve gereken zaman nedeniyle karmaşıklığa bağlı olarak daha yüksek olabilir.	2001
Aitcin	Geleneksel betonlama yöntemine karşı eklemeli imalat teknolojisinin maliyet ve ürün karşılaştırmasını araştırmışlardır. Yazarlar, 20 m uzunluğunda, 0,305 m kalınlığında ve 4 m yüksekliğinde bir duvardan oluşan varsayımsal bir yapıyı ele almışlardır. Onlara göre, bu teknolojiyi kullanmanın maliyeti geleneksel inşaata yakındı. Ancak 3DPC teknolojisini kullanmanın ve bunu bir maliyete dönüştürmenin daha yüksek verimliliği nedeniyle, 3D baskı teknolojisi daha uygun fiyatlıdır.	2016
Ji ve arkadaşları	Bir elektrik dağıtım direği basmışlardır. Yazarlar, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla uygulama süresinde % 30 azalma ve malzeme atığında % 60 tasarruf sağlandığını bildirmişlerdir. Ayrıca, toz kirliliği azaltılarak daha temiz ve düzenli bir inşaat sahası elde edilmiştir.	2019
Nather ve arkadaşları	3DPC ile geleneksel yığma yapılar arasında, toplam maliyette yaklaşık % 25 tasarruf ve uygulama süresinde dört ila altı kat azalma sağlamıştır. Toplam maliyetin yaklaşık % 5'ini oluşturan ekipman maliyetleri 3DPC ile %265 oranında artmıştır.	2019, 2017
Soto ve arkadaşları	3DPC'nin maliyet yapısının geleneksel inşaata kıyasla önemli ölçüde farklı olduğunu bildirmiştir.	2018
Schach ve arkadaşları	Yazarlara göre, geleneksel yığma yapılar, duvar alanı yaklaşık 35.000.000 metre olan Almanya'daki toplam inşaatın % 75'ini oluşturmaktadır. Eğer duvarların sadece % 1'i bu teknoloji ile basılırsa, mevcut sonuç 350.000 metre basılı duvar ve 20 milyon avruluk bir pazar hacmi olacaktır.	2017
Yang ve arkadaşları	Onlara göre, bu teknoloji enerji tüketimini ve atık miktarını etkili bir şekilde azaltmıştır. 3DPC'nin inşaat malzemesi tüketimini yüzde 60, inşaat süresini yüzde 50 ila 70 ve işçilik maliyetlerini yüzde 50 ila 80 oranında azaltabileceğini iddia etmiştir.	2018

İnşaat maliyetleri açısından, sadece duvarların ve yapısal dikey bileşenlerin inşasının 3D baskı yoluyla yapıldığı ve çatı bileşenleri, doğrama ve tesislerin uygulanması gibi diğer

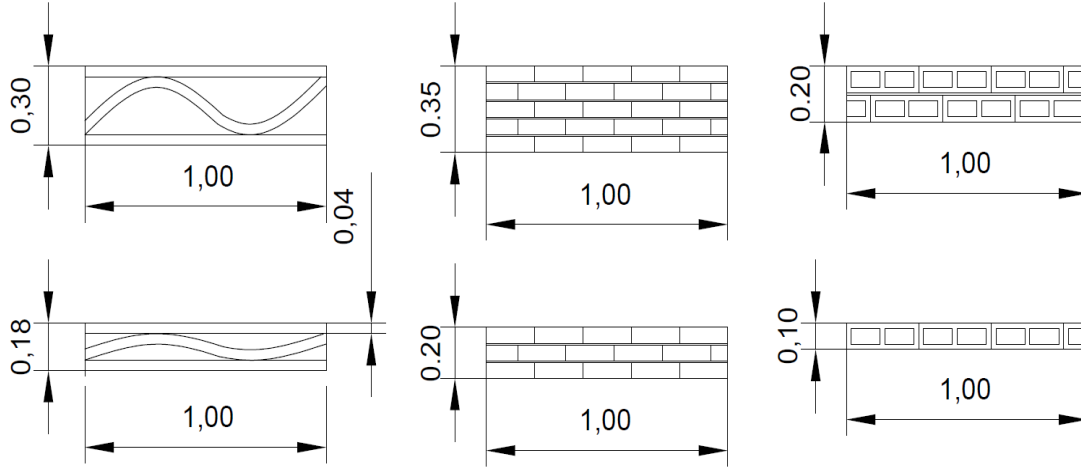
süreçler dikkate alındığında, sıradan beton ve yığma binalar da dahil olmak üzere diğer tekniklere benzer olduğu unutulmamalıdır. farklı tekniklerde toplam proje maliyetlerinin, benzer faaliyetlerin maliyetinin tahmini için aynı kabul edilir (Givkashi ve ark., 2023).

Malzeme Maliyeti

Farklı yöntemler arasındaki inşaat maliyetlerini değerlendirmek için öncelikle bir metreküp normal beton ve baskı beton ile inşaat malzemelerinin çalıştırılma maliyeti hesaplanmıştır. (Çizelge 5.2). Ayrıca, kullanılan çelik kiriş ve kolon kesitleri için birim uzunluk maliyeti hesaplanmıştır. Çizelge 5.2'ye göre, bir metreküp 3DPC'nin maliyeti sıradan beton ve yapı malzemelerinin 2 katından fazladır (sırasıyla % 110 ve % 105 artış). 3DPC'de daha fazla çimento malzemesinin, özellikle mikro silika ve kimyasal katkıların kullanılması, sıradan betona kıyasla maliyetin artmasının nedenidir. Örneğin, 3DPC'nin karışım tasarımında mikrosilika eklemenin maliyeti toplam maliyetin yaklaşık % 8,5'idir. Yığma malzemelerde, geleneksel beton gibi çimento ve agrega maliyeti olmasına rağmen, miktarı çok daha azdır. Yığma malzemelerin metreküp başına ana maliyeti preslenmiş tuğlalarla ilgilidir ve kullanılan harç sadece bunlar arasındaki bağlantıdan sorumludur. İncelenen binanın planı Şekil 5.1'de görülmektedir. Şekil 5.2'de farklı inşaat yöntemlerinin iç ve dış duvar detayları sunulmuştur (Givkashi ve ark., 2023).



Şekil 5.1. İncelenen binanın planı



Şekil 5.2. Farklı inşaat yöntemlerinin iç ve dış duvar detayları; a) 3DPC, b) yığma yapılar, c) beton ve metal yapılar

Çizelge 5.2. 3DPC ve geleneksel beton için kullanılan karma tasarım bileşenlerinin maliyeti \$ (milyon tümen)

Malzemeler	3DPC	Geleneksel Beton	Yığma
Tuğla	-	-	13.73 (0.549)
Agrega	6.08 (0.243)	7.99 (0.319)	1.2 (0.048)
Çimento	13.86 (0.554)	7.7 (0.308)	1.15 (0.046)
Mikro silika	2.8 (0.112)	-	-
Katkılar	10.24 (0.41)	-	-
Toplam maliyet	32.98 (1.319)	15.69 (0.627)	16.08 (0.643)

3DPC ve geleneksel beton için kullanılan karışım tasarımı Çizelge 5.3'te görülmektedir (Givkashi ve ark., 2023).

Bununla birlikte, yığma malzemelerin ve geleneksel betonun metreküp başına maliyeti birbirine yakındır. Bu betonun bir metreküp maliyeti daha yüksek olmasına rağmen, boşluklu yapı ve malzemelerin optimum kullanımı nedeniyle, bu yöntemde kullanılan beton miktarı, duvar yüzeyinin birimi başına geleneksel betonlama yönteminden daha düşüktür. Bu da 3DPC'nin maliyetinin birim alan başına normal betondan ve hatta yapı malzemelerinden daha düşük olmasına ve kullanımının ekonomik açıdan haklı

görülmesine neden olmaktadır. Yani baskılı yapıda yüzey birimi başına kullanılan beton miktarı 0,23 metreküpe eşittir. Beton çerçeve yönteminde ise bu miktar bir metrekarelik yüzeyde 0,28 metreküpe ulaşmaktadır. Sonuçlar önceki çalışmalarla tutarlıdır (Givkashi ve ark., 2023).

Çizelge 5.3. 3DPC ve geleneksel beton için kullanılan karışım tasarımı

Malzemeler	3DPC (Kg/m ³)	Geleneksel beton (Kg/m ³)
Agrega	1350	1775
Çimento	630	350
Mikro silika	70	-
Su	250	175
Katkılar	6,3	-

Doğrudan İnşaat Maliyetleri

Önceki bölümde belirtildiği gibi, bu çalışmada malzeme, işçilik ve ekipman dikkate alınarak sadece iskelet ve duvarların (çatı hariç) inşa edilmesinin doğrudan maliyetleri hesaplanmıştır. Her bir inşaat yönteminin maliyetleri Çizelge 5.4'te ayrı ayrı gösterilmiştir. İnşaat yöntemleri arasında sadece betonarme iskelette kalıp kurma ve uygulama maliyeti vardır. Ayrıca, yığma çerçeve yönteminde, dikey bağların varlığı nedeniyle, malzeme ve işçilik maliyeti ve yapımı için dikkate alınan beton ve inşaat demiri miktarları kullanılmaktadır. Ayrıca, Şekil 5.3 her bir farklı yöntemin maliyet değerlerini göstermektedir. Çizelge 5.4 ve Şekil 5.3'ten elde edilen sonuçlara göre, 3D baskı yöntemini kullanan yapının her bir metrekaresinin maliyetinin diğer yöntemlerden daha düşük olduğu açıktır ve bu da literatürle tutarlıdır. Yapı planının alanı dikkate alındığında, 3D baskı yönteminde doğrudan inşaat maliyetleri 49,08 milyon tümendir ve bu da yüzey birimi başına 0,64 milyon tümendir. Betonarme ve çelik çerçeveden oluşan iki yöntemin inşa maliyeti neredeyse benzerdir ve diğer değerlerden daha yüksektir. Sonuçlar, bu binanın inşasında 3DPC kullanımının, yığma malzeme kullanımına kıyasla inşaat maliyetlerinde % 12'lik bir azalmaya ve beton ve çelik çerçevelere kıyasla maliyetlerde % 34'lük bir azalmaya neden olduğunu göstermektedir. Kalıplama, beton çerçeve yönteminin maliyetlerini artırmıştır ve 3D baskı yönteminden önemli ölçüde

farklıdır. Yapının nihai maliyetinin, çatı ve marangozluk ve tesis maliyetleri de dahil olmak üzere bu yöntemler arasındaki diğer benzer süreç ve faaliyetlerin maliyetinin doğrudan inşaat maliyetlerine eklenmesiyle elde edildiği açıktır (Givkashi ve ark., 2023).

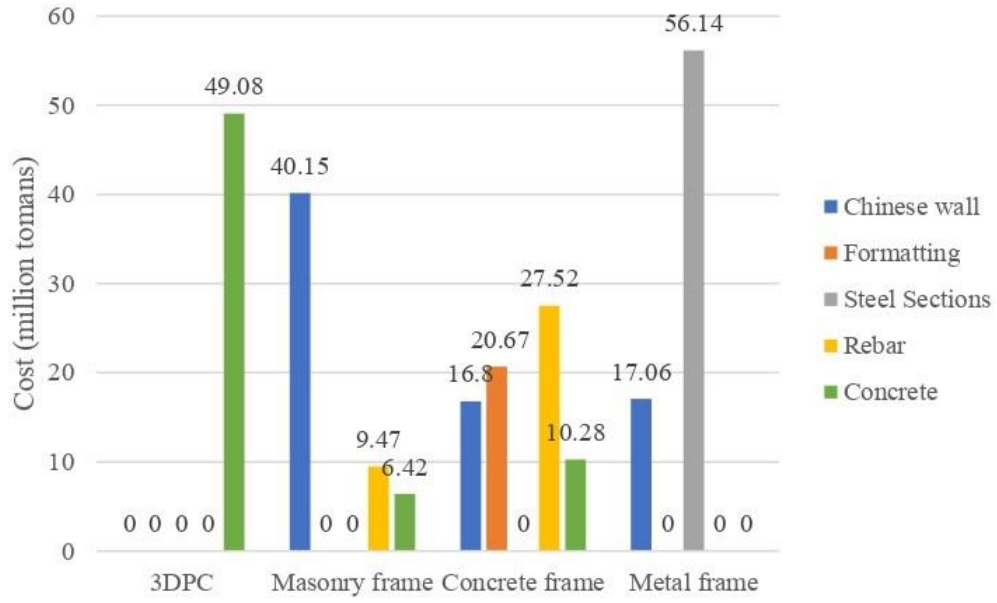
Çizelge 5.4. Farklı üretim yöntemlerinde parça maliyetlerinin ayrıştırılması \$ (milyon tümen)

Yapım Yöntemi	3DPC	Yığma Çerçeve	Beton Çerçeve	Çelik Çerçeve
Beton	1227 (49.08)	160.5 (6.42)	257 (10.28)	-
Donatı	-	236.75 (9.47)	688 (27.52)	-
Çelik Kesitler	-	-	-	1403.5 (56.14)
Biçimlendirme	-	-	516.75 (20.67)	-
Çin Duvarı	-	1003.75 (40.15)	420 (16.8)	426.5 (17.06)

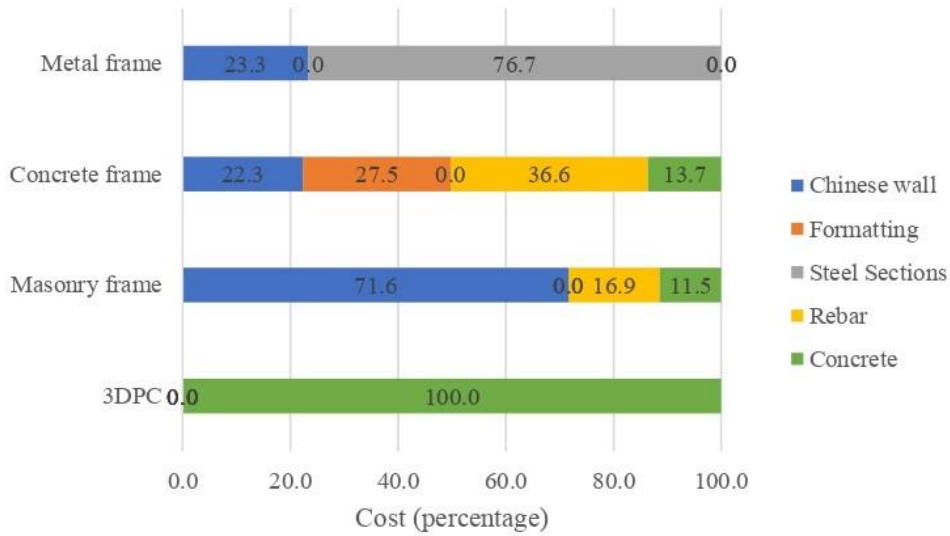
Çizelge 5.4. Farklı üretim yöntemlerinde parça maliyetlerinin ayrıştırılması \$ (milyon tümen) (devamı)

Toplam İnşaat Maliyeti	1227 (49.08)	1401 (56.04)	1882 (75.28)	1830 (73.2)
Birim Alan Başına Maliyet	15.93 (0.64)	18.19 (0.73)	24.44 (0.98)	23.77 (0.95)

Bu nedenle, diğer maliyetler de eklendiğinde, 3D baskı yönteminin toplam maliyet azaltma yüzdesi diğer inşaat yöntemlerine kıyasla daha düşük olacaktır. Aslında, farklı inşaat yöntemlerinin maliyeti arasındaki fark daha küçük olacaktır. Şekil 5.4 ayrıca farklı yöntemlerde çerçeve yapı bileşenlerinin her birinin maliyetinin yüzde payını göstermektedir. 3D baskı ve yığma çerçeve yöntemlerinde, doğrudan inşaat maliyetlerinin çoğunun tek bir süreçle ilgili olduğu açıktır, ancak diğer iki yöntemde, özellikle beton çerçeve durumunda, etkili faktörlerin çeşitliliği artmaktadır. Sadece beton çerçeve yöntemiyle yapılan inşaatta, doğrudan inşaat maliyetleri içinde yaklaşık % 27'lik bir paya sahip olan kalıplama maliyeti yükselmektedir.



Şekil 5.3. Farklı inşaat yöntemlerinin kalem bazında farklı inşaat yöntemlerinin maliyeti (milyon tümen)



Şekil 5.4. Kalem bazında farklı üretim yöntemlerinin maliyeti (yüzde)

Bu çalışmada yapı inşaatının nihai maliyetlerinin sadece bir kısmının dikkate alındığı ve farklı inşaat yöntemlerinin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesi için farklı faktörlerin göz önünde bulundurulması gerektiği unutulmamalıdır. Daha karmaşık mimarinin,

kalitede artışın ve zamanda önemli bir azalmanın etkisi maliyetlerde de görülmelidir. 3DPC maliyetlerinin büyük bir kısmını oluşturan malzemeler açısından bile, çimento ikamelerinin kullanılması ve kullanılan çimento miktarının azaltılması bu betonların ekonomik avantajına katkıda bulunabilir. Bu inşaat yönteminin henüz başlangıç aşamasında olduğunu ve özellikle dayanıklılığı ve performansı konusunda daha fazla çalışma yapılması gerektiğini de belirtmek gerekir, böylece nihayetinde arzu edilen bir seçenek olarak sunulabilir (Givkashi ve ark., 2023).

5.14.2. Zaman

Maliyetin yanı sıra zaman da inşaat projelerinde çok önemli bir parametredir, öyle ki projelerin hem ekonomik hem de zaman açısından verimli olması gerekir. İnşaat süresi ne kadar kısa olursa, yatırımın geri dönüşü o kadar hızlı olur; sonuç olarak projenin toplam maliyetleri azalır ve yatırım karı artar. Bu faktör özellikle enflasyonun olduğu ekonomilerde öne çıkmaktadır. 3DPC'nin sadece binanın iskelet ve strüktüründe kullanılabildiği, marangozluk, mekanik ve elektrik tesisatı gibi diğer kısımlarda sürecin geleneksel konvansiyonel tekniklerle aynı olduğu, sadece bu kısımda proje süresinin azaltılmasının mümkün olduğu düşünülmektedir. Çeşitli çalışmalar proje süresini araştırmıştır ve Batikha ve arkadaşları çeşitli çalışmalara dayanarak 3D baskı yöntemini kullanarak iki katlı bir binanın inşaat süresini tahmin etmek için aşağıdaki ilişkiyi sunmuştur (Givkashi ve ark., 2023);

$$\text{Zaman (gün)} = 0.074 \times (\text{metrekare cinsinden toplam alan}) + 15$$

5.14.3. İşgücü

İnşaat sektörü projelerinin temel ayaklarından biri de işçilik sorunudur. Bu sütundaki sorunlar nedeniyle projelerin durdurulması veya geciktirilmesi sık rastlanan bir durumdur. Otomasyonun inşası için her zaman gündeme getirilen avantajlardan biri, özellikle işgücü eksikliğinden (basit işçilik bile) muzdarip alanlarda işgücünün önemli ölçüde azaltılmasıdır. Çeşitli çalışmalar, bu şekilde inşaatın sahadaki işçiliği % 50-80 oranında azaltılabileceğini belirtmektedir. Buna ek olarak, sahada bulunan insan sayısının azaltılmasıyla insan kaynakları yönetimi, maliyet gibi konuların da büyük ölçüde çözüldüğü açıktır. Batikha ve arkadaşları 3D baskının geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla işgücü gereksinimlerini % 50 oranında azalttığını göstermiştir. Ancak prefabrik

inşaat yöntemine kıyasla yine de daha fazla işçilik gerekmektedir (Givkashi ve ark., 2023).

5.14.4. Kalite

Projelerde uygun ve arzu edilen kalitenin sağlanması, inşaat sektörünün, başka bir deyişle tüm sektörlerin temel zorluklarından biridir. Bir projede doğru kaliteye ulaşılması, bu çalışmada yer almayan çeşitli parametrelere bağlıdır. Geleneksel inşaat yönteminde, projede yer alan insan kaynaklarının performansı, diğer bir deyişle becerisi, projelerin kalitesindeki önemli faktörlerden biridir. Dolayısıyla bu bağlamda insan kaynakları yönetimi konusu her zaman gündeme gelmektedir. Binanın 3D baskı sürecinin işçiliğin azalmasına ve insan müdahalesinin maksimum düzeyde ortadan kaldırılmasına yol açtığı ve sürecin mekanik sistemlere dayandığı düşünüldüğünde, hata ve kusur sayısı sifıra bile yaklaşabilir. Otomasyon süreçlerinin doğruluğu her zaman diğer endüstrilerde kalitenin artmasına yol açmıştır (Givkashi ve ark., 2023).

5.14.5. Güvenlik

İnşaat sektörü dünyadaki en tehlikeli sektörlerden biridir. Dolayısıyla kazaların ve ölümlerin yaklaşık üçte biri bu sektörde meydana gelmektedir. Bu olgu, işgücünün insan davranışını ve atölyedeki aşırı kalabalığı içeren çeşitli faktörlerin etkisi altındadır. Proje süreçlerinde işgücünün varlığı ortadan kaldırıldığında veya en aza indirildiğinde, kaza olasılığının, özellikle de projede bulunan kişilerin fiziksel yaralanmalarının azaldığı söylenebilir. Şantiyelerin 3DPC tarafından düzenli hale getirilmesi de bu nedene katkıda bulunacaktır (Givkashi ve ark., 2023).

5.15. Mimarlık

Herhangi bir yapının ve binanın önemli yönlerinden biri mimarisidir. Bu mimari ilk bakışta insanları cezbeden bir yapıdır. Geleneksel inşaat yöntemlerini kullanmanın sınırlamalarından biri de mimari sınırlamalardır. Bazı yapılarda özel ve karmaşık bir mimari sağlamak mümkün olabilir, ancak projenin maliyetini, süresini ve komplikasyonlarını kesinlikle artıracaktır. 3DPC'nin temel avantajlarından biri, yapıları

geometrik özgürlük ve esneklikle uygulama ve inşa etme olasılığıdır ve başka bir deyişle, daha verimli yapısal tasarıma yol açar (Givkashi ve ark., 2023).

5.16. Çevre Dostu

Betonun tüm dünyada inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan bir malzeme olduğu ve temel olarak çimentoya dayandığı düşünüldüğünde, bu malzeme sera gazlarının, özellikle de karbondioksit gazının emisyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, araştırmacılar her zaman çimento tüketimini azaltmak veya başka malzemelerle değiştirmek için çözümler aramaktadır. Baskı yapılar için kullanılan betonla ilgili olarak, karışım tasarımına bağlı olarak, bu karışımların normal betondan daha yüksek miktarlarda çimento içerdiği düşünüldüğünde, metreküp beton başına daha fazla CO₂ ürettikleri çeşitli çalışmalarla kanıtlanmıştır. Ancak baskılı yapıların boşluklu yapısı ve optimum geometrisi nedeniyle bu yapılar metrekare başına daha az beton tüketmektedir ve çalışmalar bu inşaat yönteminin metal yapılarda bile diğer yöntemlerle karşılaştırıldığını göstermektedir. Daha az CO₂ üretirler. Bu yöntemin çevre dostu olabileceği ve hatta bu betonların karışım tasarımında çimento ikameleri kullanılarak daha stabil olabileceği görülmektedir (Givkashi ve ark., 2023).

5.17. Yapının Ağırlığı

Bilindiği üzere metal karkas yapıların ağırlığı betonarme yapılara göre çok daha azdır. Öte yandan deprem nedeniyle yapıya etkiyen kuvvetlerin yapının ağırlığı ile doğrudan bir ilişkisi olduğu tespit edilmiştir, dolayısıyla deprem nedeniyle yapıya etkiyen kuvvetlerin incelenmesi açısından bu hususa dikkat etmek gerekmektedir. Yapılan çalışmalar 3DPC yapıların geleneksel betonarme ve çelik yapılara göre birim alan başına daha fazla, prefabrik yapılara göre ise daha az ağırlığa sahip olduğunu göstermiştir (Givkashi ve ark., 2023).

5.18. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Fonksiyonelliğinin ve Uygulamasının Değerlendirilmesi

5.18.1. Malzemeler

Beton dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Beton maliyeti düşük ve dayanıklı bir yapı malzemesidir. Bu sebeplerden dolayı 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde en yaygın kullanılan malzeme beton olmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde reoloji kontrolü mutlaka yapılmalıdır. Sonuç olarak 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde uygulanabilirliği etkileyen en temel faktör malzeme uyumudur. Mevcut, basılabilir malzemelerin sınırlı olması ve yeni malzemelerin geliştirilmesi ve standartlaştırılması ihtiyacı, özellikle malzeme kontrolünün daha zor olduğu uzak ortamlarda, 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin benimsenmesine ek zorluklar getirmektedir. Her farklı projede yazdırılan karışımın bileşimi mutlaka incelenmelidir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapımda başarı kriteri için önemli bir bakış açısı taze beton özellikleridir. Çünkü taze beton özellikleri sertleşmiş beton özellikleri hakkında da fikir sahibi olmamıza olanak sağlar. Betonla ilgili diğer önemli bir husus betonda deformasyon oluşabilmesi ve hatta beton taze halde iken çökme eğilimi gösterebilmesidir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde pompalanabilirlik ve basılabilirlik oldukça önemlidir. Diğer yandan kalıp olmadan şeklini koruyabilmesi inşa edilebilirlik olarak tanımlanmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapımda uygulanabilirlik için üretilmiş betonun yukarıda belirtilen tüm özellikleri aynı anda sergileyebilmesi gerekmektedir. Yüksek performanslı betonun reolojik özellikleri ve sertleşme özelliklerinden dolayı basılması zor olabilmektedir. Bazı araştırmacılar uygulanabilir, yazdırılabilir malzeme yelpazesini genişletmek amacıyla kükürt, kireçtaşı, uçucu kül, iri agrega, bakır cürufu ve kil içeren alternatif çimento bazlı malzemelerin basılabilirliğini incelemiştir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde reolojik özelliklerin kontrolü katkı maddeleri ile sağlanabilmektedir. Bununla birlikte, uzak ortamlarda katkı maddelerinin ve karışımların tedarik edilmesi zor olabilmektedir ve bu durum da malzeme reolojisi ve performansını optimize etme zorluğunu artırmaktadır. Agrega gradasyonu, agrega inceliği, agrega tane boyutu malzeme performansını etkilemektedir. Örneğin, ince agrega miktarının artırılması akma gerilimini artırmaktadır. Sonuç olarak şekil stabilitesi ve şekil tutma özelliği iyileşmektedir. Beton karışımında ne kadar az kum veya ince agrega varsa,

karışımın ekstrüde edilmesi o kadar kolaylaşmaktadır. Bununla birlikte, tane boyutunun artırılması boşluklara, daha zayıf bağlara ve daha düşük akma gerilimine neden olabilmektedir. Uzak bir ortamda malzeme kalitesini ve derecesini kontrol edememek, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretim için zorluklar doğurabilmektedir (Schuldt ve ark., 2021).

5.18.2. Yapısal Dizayn

3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanarak yapım süreci daha fazla geometrik karmaşıklık ve özgürlüğe izin vererek mimarların ve mühendislerin binaları tasarlama şeklini dönüştürme potansiyeline sahiptir. Artan yapısal karmaşıklık, muadilleriyle aynı dayanımı daha düşük bir kütlede elde edebilen içi boş yapıların ve ağırlık, performans ve verimlilik standartlarını karşılamak için optimize edilmiş yapıların inşasına izin vermektedir. Ek olarak, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilmiş yapı, konvansiyonel yapıya kıyasla aynı dayanıma ve gelişmiş mekanik ve termal özelliklere sahip olmaktadır. Bina bilgi modellemesinin 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile birlikte kullanılması yapısal optimizasyon sağlamaktadır. Bileşenler konvansiyonel yapımda olduğu gibi tasarım ve yapım kolaylığı için standartlaştırılmak yerine desteklemeleri gereken yüklere göre tasarlanmaktadır ve yazdırılmaktadır. Bu potansiyel faydalar mevcut olsa da, bu bölüm, yapısal performansı optimize etme, güçlendirmeyi otomatikleştirme ve kod ve standart eksikliği altında çalışma dahil olmak üzere 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin çeşitli yapısal zorluklarını vurgulamaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilen yapının yapısal performansı, hem baskı parametreleri hem de genel baskı kalitesi ile ilgili olmaktadır. Sonuç olarak, öngörülebilir, tekrarlanabilir sonuçlar sağlamak için sıkı süreç kontrolü gerekmektedir. Güvenilirlik ve tekrarlanabilirlik, malzeme, işçilik ve zaman kısıtlamalarının ilk baskı denemesinde garantili başarı gerektirdiği uzak ortamlarda özellikle önemli olmaktadır. Malzeme özellikleri, katman kalınlığı, katman süresi, baskı yolu, baskı hızı, pompa hızı, nozül boyutu, nozül şekli ve nozül ayırma mesafesi gibi parametrelerin tümü, baskı çözünürlüğü, bağ kuvveti ve basılı yapının deformasyona direnme yeteneği ile ilgilidir. Bunun bir sonucu olarak, birkaç çalışma, malzeme özellikleri, baskı hızı, yapı geometrisi ve tahmin edilen dayanım ve rijitlik gibi parametreleri kontrol etmek için modeller oluşturarak ve bunları tamamlanmış yapının performansı ile ilişkilendirerek yapısal ve malzeme performansını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu optimizasyon modelleri,

bireysel parametreler için tasarım yapmak yerine parametreleri toplu olarak dikkate almaktadır. Betonun zayıf çekme dayanımına karşı koymak ve yük taşıma kapasitesini iyileştirmek için çelik takviyenin otomatik olarak yerleştirilmesi ihtiyacı, yapısal performans için başka bir zorluk teşkil etmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapılan yapım süreci, konvansiyonel güçlendirme yöntemleriyle birlikte kullanılabilirken, bu yöntemler tasarım özgürlüğünü sınırlayabilmektedir ve otomasyonun inşaat endüstrisine getirdiği faydaları (yani işçilik ve maliyet) kısıtlayabilmektedir. Sonuç olarak, bazı güncel araştırmalar, alternatif güçlendirme seçeneklerine ve ardgerme takviyesi, elyaf takviyesi, kablo takviyesi ve çelik ekstrüzyon takviyesi gibi çok malzemeli baskı teknolojisine odaklanmıştır. Ayrıca, bazı çalışmalar robotik kullanımı yoluyla inşaat demiri kurulumunu otomatikleştirme olasılığını incelemiştir. Bir karışım ne kadar akıcı ise baskı süresi daha uzun olmaktadır. Sonuç olarak katmanlar arasında bağ ve yapısal dayanımda azalma meydana gelmektedir. Katmanlar arası yapıştırma, yazdırılan bir bileşenin stres konsantrasyonlarına yol açabilecek kusurlardan arınmış homojen, yekpare bir yapı gibi davranmasını sağlamaktadır. Katmanlar arasındaki sürenin azaltılması, katmanların birbirine karışmasına izin vererek bağlanma ve eğilme dayanımının iyileştirilmesine yardımcı olurken, katmanlar arasındaki sürenin artırılması, gelişmiş şekil kararlılığı ve azaltılmış deformasyon sağlamaktadır. Ek olarak, katmanlar arasında daha fazla zaman olması arayüzde artan boşluk oluşumuna ve gözenekliliğe neden olmaktadır. Bu da katmanlar arası bağlanmayı olumsuz etkileyen iki ek faktör olarak tanımlanmaktadır. Katman kalınlığı, yüzey temas alanı ve yüzey nem içeriği dahil olmak üzere katmanlar arası bağ kuvvetini etkileyen birkaç ek faktör söz konusu olmaktadır. Belirli bir uygulama için yeterli yapıştırma ve istenen yapısal performansı sağlamak için bu faktörlerin her biri uzak ortamlarda dikkatle izlenmelidir ve kontrol edilmelidir. Sonuç olarak, baskı yönünün yapının yük taşıma kapasitesi üzerinde gözle görülür bir etkisi söz konusu olmaktadır. Baskı yolu yönünde basınç dayanımı ve elastisite modülünün en yüksek ve diğer iki yönde daha zayıf olduğunu bulmuştur. Diğer çalışmalar da yükleme direncinin ve mekanik özelliklerin yükleme yönüne bağlı olarak değiştiğini kaydetmiştir. Bazı araştırmalar, baskı parametrelerini, mekanik özellikleri ve yapısal performansı kontrol etme ve tahmin etme zorluğu nedeniyle 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin güvenilirliğini sorgulamaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisini düzenleyen kod ve standartların olmamasıyla bu teknolojinin kullanımı halen istenilen düzeyde olmamaktadır. Ayrıca, konvansiyonel yapım süreçleri için geçerli olan testler, 3 boyutlu

beton baskı teknolojisi ile yapılmış yapılar için geçerli olabilmekte veya olmayabilmektedir. Uzak ortamlardaki 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapılmış yapım süreçlerinde kod ve standart eksikliğinin sorun teşkil etmeyeceği vurgulanabilir. Ancak askeri üslerde 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanılacağına kodlara ve standartlara bağlılık gerekebilmektedir. Kalıcı kalıbı beton veya poliüretan köpükten basmak ve onu geleneksel betonla doldurmak için hibrit bir 3 boyutlu beton baskı/konvansiyonel beton yaklaşımı kullanmak, hem otomatik takviyenin sınırlamalarını hem de 3 boyutlu beton baskı teknolojisini yöneten kod ve standartların eksikliğini azaltma potansiyeline sahiptir. Bu hibrit yöntem, kalıbın geleneksel takviye çerçevesi etrafına basılmasını sağlamaktadır ve mevcut geleneksel kodlara göre tasarımı kolaylaştırmaktadır. Bu yöntem ayrıca 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile uyumlu olmayacak dolgu malzemelerinin kullanımına da olanak sağlamaktadır (Schuldt ve ark., 2021).

5.18.3. Süreç Verimliliği

Bir inşaat projesinin zaman kısıtlamaları genellikle kapsam, işçilik ve maliyetle ilgili kararları etkilemektedir. Bu sebepten dolayı 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanılarak yapımın potansiyel faydalarından biri, bu teknolojinin daha kısa sürede daha yüksek kaliteli binalar inşa etme olasılığı sağlamasıdır. Konvansiyonel yapım teknolojisinden farklı olarak 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile sürekli olarak baskı yapılabilir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapılan bir evin konvansiyonel yöntemlerle 200 m²'lik bir ev inşa etmekten yaklaşık üç kat daha hızlı inşa edildiği vurgulanabilir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde kalıplamaya gerek yoktur. Konvansiyonel yapım teknolojisinde kalıpları inşa etmek ve kaldırmak için minimum 3 güne ihtiyaç duyulmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ayrıca tasarım süresini % 60'a kadar azaltabilmektedir ve inşaat sürecini iyileştirmek ve verimsizlikleri ortadan kaldırmak için görevlerin standartlaştırılması ve sürekli süreç iyileştirme dahil olmak üzere yalın inşaat ilkelerinden yararlanabilmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile hızlı yapım gerçekleştirebilme olanağının sağlanması doğal bir afete müdahale etmenin veya bir askeri üs kurmanın gerekli olduğu durumlarda büyük önem taşımaktadır. Baskı hızını optimize etmenin hassas bir denge olduğu belirtilebilmektedir. Eğer baskı çok hızlı olursa bir yapının kendi ağırlığını desteklemesi için gereken erken dayanım gelişimi engellenmiş olur. Eğer baskı çok yavaş olursa azaltılmış bağlanmadan dolayı katmanlar arasında

soğuk derzler meydana gelebilmektedir. Baskı hızını etkileyen faktörler arasında filament boyutu, baskı hassasiyeti, katman kalınlığı, baskı yolu (eğrilere karşı açılarının kullanımı dahil), malzeme tutarlılığı ve malzeme birikme hızı yer almaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde baskı süresi büyük bir önem taşımaktadır. Baskı süresi ile ilgili veri sağlama hususunda birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, yazdırma süresi yanıltıcı olabilmektedir. Çünkü yalnızca yazıcının çalıştığı ve aktif olarak malzemenin ekstrüzyon yapıldığı süre dikkate alınmalıdır. Geçen süre (kurulum, malzeme hazırlama, baskı duraklamaları ve temizleme dahil bir baskı üzerinde çalışılan toplam süre) veya yapım süresi (baskının başlangıcından sonuna kadar geçen toplam süre) oldukça önemlidir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretim esnasında yazıcı herhangi bir sorunla karşılaşursa, yerinde ek yazıcılar mevcut değilse, sorun giderme gerçekleşirken inşaat durdurulmalı veya manuel yöntemlere geçilmelidir. Yedek parçaların veya vasıflı bakım personelinin sınırlı olduğu uzak bölgelerde, bu fazlalık eksikliği potansiyel olarak inşaat zaman çizelgesini geciktirebilmektedir. Ek olarak, betonun katılaşmadan önce pompada ve hortumda kalabileceği süre sınırlı olduğundan, baskı duraklamaları ve gecikmeleri mutlaka yakından izlenmelidir (Schuldt ve ark., 2021).

5.18.4. İşçilik

3 boyutlu beton baskı teknolojisinin en belirgin faydalarından biri, inşaat işçiliği gereksinimlerinin azalması ve daha fazla kalite kontrol potansiyeli ile sonuçlanan artan süreç otomasyonudur. Süreç otomasyonunun, şantiyede azalan risk, azaltılmış işgücü eksiklikleri, azaltılmış insan hataları ve insanlar ile makineler arasında artan karşılıklı bağımlılık dahil olmak üzere birçok olumlu ve olumsuz sonucu vardır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile proses otomasyonu, aktif savaş bölgeleri veya nükleer serpinti olan yerler gibi tehlikeli uzak ortamlarda yardımcı olabilmektedir. Ancak yerel ekonominin konvansiyonel yapım işlerine bağlı olduğu uzak ortamlarda çok fazla tercih edilmemektedir. İnşaat sektörü, yüksek ölüm, yaralanma ve hastalık oranları nedeniyle en tehlikeli sektörlerden birisi olarak vurgulanabilir. İş sahasındaki potansiyel tehlikeler arasında kaymalar, takılmalar ve düşmeler yer almaktadır. İş sahasında göz, cilt ve solunum yolu tahrişi söz konusu olabilmektedir. İşçiliğe daha az bağımlılık yaralanma riskini azaltmaktadır ve insanların potansiyel tehlikelere maruz kalmasını ortadan kaldırarak saha güvenliğini artırmaktadır. Uzak ortamlar doğası gereği tehlikeli

olabileceğinden, tehlikeli koşullara maruz kalan işçi sayısını sınırlama fırsatı değerlidir. İnşaat endüstrisini 3 boyutlu beton baskı teknolojisi yoluyla otomatikleştirmek, uzak yerlerde mevcut vasıflı işgücü eksikliğinden kaynaklanan işgücü eksikliklerini azaltmaya da yardımcı olabilmektedir. İnsan hataları, konut inşaatındaki toplam kusurların % 80'inden fazlasını oluşturmaktadır. Otomatik bir süreç yardımı ile yeniden işleme için gereken süre ve maliyet azaltılabilmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisine yönelik yaklaşım, tamamen otomatik ve hatta otonom bir süreç oluşturmak olsa da, endüstri bu teknolojiyi halen istenilen düzeyde kullanmamaktadır. Son olarak, sosyo-ekonomik istikrarı sağlamak için özellikle geleneksel inşaat endüstrisine bağımlı alanlarda, inşaat otomasyonunun faydalarının inşaat işlerini ortadan kaldırmanın maliyetlerine karşı tartılması gerekecektir (Schuldt ve ark., 2021).

5.18.5. Lojistik

3 boyutlu beton baskı teknolojisi inşaat lojistiği ve yönetimini basitleştirme fırsatı sunmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi malzeme ve ekipman için hazırlık sürelerini kısaltarak ve ortaya çıkan bileşenler ve yapılar için üretim sürelerini azaltarak tedarik zincirini kısaltabilmektedir. Nakliye lojistiği ve tedarik zinciri gecikmelerinin en aza indirilmesi, uzak dağ köyleri gibi ulaşılması zor konumlarda yardımcı olmaktadır. Konvansiyonel yapım teknolojisi ile yapılmış yapılarda olduğu gibi, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilmiş yapılarda da yerel kaynaklı veya mevcut ve erişilebilir olduğunda yerinde malzemeleri kullanmak amaçlanmıştır. Yerel malzemelerin kullanılması, uzak, ulaşılması zor yerlere malzeme nakliye lojistiğini azaltmaktadır veya hatta ortadan kaldırmaktadır ve kapsamlı malzeme envanterlerini depolama ve sürdürme ihtiyacını azaltmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi aynı zamanda bir işi tamamlamak için gereken işçi sayısını da azaltmaktadır, bu da basitleştirilmiş ulaşım lojistiği anlamına gelmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin kullanılması ile her gün daha az insan uzak bir yere seyahat gerçekleştirir ve iş sahasına gidip gelir. Benzer şekilde, 3 boyutlu beton baskı teknolojsi konvansiyonel teknolojide olan ağır ekipmana olan ihtiyacı ortadan kaldırdığı için (basılı bileşenlerin kaldırılıp yerine taşınması gerekmedikçe), daha az ekipmanın planlanması ve şantiyeye gidip gelmesi söz konusu olmaktadır. İnşaat sektöründe birçok 3 boyutlu yazıcılar, hafif, taşınabilir ve montajı kolay olacak şekilde tasarlanmıştır. Konvansiyonel yapım yöntemlerine benzer şekilde yapılar modüler bileşenler olarak basılabilmektedir, yerinde monte edilebilmektedir veya

bir mobil yazıcı kullanılarak tam bir varlık olarak yerinde basılabilmektedir. Yapılar modüler bileşenler olarak basılır ve daha sonra yerlerine taşınırsa, bileşenlerin kaldırma, taşıma ve kurulum sırasında oluşan baskıları tolere edecek ve nakliye sırasında talaş, çatlak veya diğer hasarları önleyecek şekilde tasarlanması gerekecektir. Bununla birlikte, bu saha dışı yaklaşımın avantajları arasında gelişmiş kalite, üretim hızı ve saha güvenliği sayılabilmektedir. Öte yandan, bileşenleri veya yapıları yerinde yazdırmak, hazırlık görevlerini, nakliye gereksinimlerini ve kurulum adımlarını en aza indirmektedir. Ayrıca, her şey yerinde basıldığından ve yazdırılan bileşenler yazıcının hacmiyle sınırlandırıldığından ölçeklenebilirlik gibi konularda yardımcı olabileceğinden, varışta ve kurulumda hasarları yerinde çözme ihtiyacını da ortadan kaldırmaktadır. Ancak, yerinde 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin kullanımı konvansiyonel yapım teknolojisindeki gibi hava şartlarına bağlı olmaktadır. Uzak ortamlarda hava ile ilgili zorluklar daha da yüksek derecede olabilmektedir (Schuldt ve ark., 2021).

5.18.6. Çevresel Etki

İnşaat sektörü, dünyadaki malzeme kaynak tüketiminin % 40'ını, enerji tüketiminin % 40'ını, sera gazı emisyonlarının % 38'ini ve katı atık üretiminin % 40'ını oluşturmaktadır. Özellikle beton, çimento üretimi için gereken enerji yoğun süreç nedeniyle dünyadaki karbondioksit emisyonlarının % 8'inden sorumludur. Sonuç olarak, uygun fiyatlı, sürdürülebilir, geri dönüştürülebilir inşaat bileşenlerinin oluşturulması, giderek yaygınlaşan bir araştırma odağı haline gelmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapım, yapının yaşam döngüsü boyunca malzeme tüketimini, enerji kullanımını, emisyonları ve atıkları azaltma potansiyeline sahiptir. Araştırmacılar, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımının, konvansiyonel yapım teknolojisi kullanımına kıyasla çevresel etkiyi % 50'ye kadar azaltabileceğini tahmin etmektedir. Baskı işleminin çevresel etkisi, malzeme üretim sürecinin çevresel etkisine kıyasla ihmal edilebilir düzeyde olmaktadır. Bina bilgi modellemesinin kullanımı, fazla tasarımdan kaçınarak ve yalnızca gerekli beton ve donatının kullanılmasını sağlayarak malzeme optimizasyonunu mümkün kılarken, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapım bu bireysel, optimize edilmiş tasarımları gerçeğe dönüştürmektedir. Ek olarak, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapım, yalnızca gerekli malzeme miktarını kullanan ek bir süreç olduğundan, hem bileşenden hem de kalıptan aşırı üretimi ve malzeme israfını azaltmaya ve ortadan kaldırmaya önemli oranda yardımcı olmaktadır. Bir çalışma, 3 boyutlu beton

baskı teknolojisi ile yapının malzeme tüketimini % 40'a kadar azaltılabileceğini belirtirken, diğer bir çalışma ise % 30'a kadar azaltılabileceğini vurgulamaktadır. 3 boyutlu yazıcılar tamamen elektrikli olabildiğinden, yazdırma işleminin kendisi yerel çevresel etkiyi azaltabilmektedir. Bir çalışma, yazıcı işlemleri sırasındaki elektrik talebinin, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilmiş bir duvarın toplam yaşam döngüsü emisyonlarının ve çevresel etkisinin yalnızca % 2'sini oluşturduğunu vurgulamaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımı aynı zamanda, akaryakıt ile çalışan ağır inşaat ekipmanlarına ve bir şantiyede işe gidip gelen işçilere olan ihtiyacı azaltarak ya da potansiyel olarak ortadan kaldırarak, ulaşım etkisini, yakıt tüketimini ve ilgili inşaat emisyonlarını azaltmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi konvansiyonel yapım teknolojisine kıyasla nispeten sessizdir ve gürültü kirliliğini azaltmaktadır (Schuldt ve ark., 2021).

5.18.7. Maliyet

İnşaat sektörü yılda 3 trilyon dolarlık bir hacmi olan bir sektör olarak belirtilebilmektedir. Sonuç olarak, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımının cazibesi, toplam maliyetleri azaltma ve maliyet etkinliğini artırma potansiyelidir. Örneğin, bir çalışma, yapısal bir duvar inşa etmenin farklı yöntemlerini karşılaştırmıştır ve 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin, beton kagir birimlerle inşa etme maliyetinden % 10-25 ve yerinde dökme inşaat maliyetinden % 25-37 daha düşük olduğunu vurgulamıştır. Bu maliyet tasarrufları sonucunda ekonomik inşaat yöntemlerinin afet sonrası uzak ortamlarda çok önemli olduğu söylenebilmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde 4 ana bileşen büyük önem taşımaktadır. Bu bileşenler planlama ve tasarım, malzemeler, işçilik ve makinedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde kalıp ihtiyacına gerek duyulmaması maliyet bakımından bir avantaj sağlamaktadır. İskele, beton kalıplar ve bunlarla ilgili tüm emek tipik olarak toplam inşaat maliyetinin % 35-60'ını oluşturmaktadır. Sonuç olarak 3 boyutlu beton baskı teknolojisi maliyet açısından önemli derecede tasarruf sağlayabilmektedir. Kalıp ihtiyacını ortadan kaldırmak aynı zamanda hem malzemeyi hem de işçiliği azaltmaktadır ve inşaat sürecinde zaman alan bir adımı ortadan kaldırmaktadır. Malzeme israfını azaltmak için tasarımı optimize ederek malzeme maliyetleri azaltılabilmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde beton karışımının reolojisini kontrol etmek ve basılabilirliği iyileştirmek için katkı maddelerine ihtiyaç duyulduğunda malzeme maliyetleri artabilmektedir. Bir projenin toplam maliyetinin %

50'sini oluşturan işgücü maliyeti de yüksek olabilmektedir. Konvansiyonel yapım teknolojisinde işçilik maliyetleri genellikle malzeme maliyetlerinden daha yüksekken, 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde bu durum tersine dönmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde işçilik maliyetleri malzeme maliyetlerinin yarısından daha az olmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapımda konvansiyonel yapım teknolojisine göre daha az denetim söz konusu olmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımı ile genel giderlerin azaltılabilmektedir, üretkenlikte artış ve hata olasılığında azalma söz konusu olmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapımda modelleme, bina bilgi modellemesi ve diğer teknolojilerdeki gelişmeler nedeniyle inşaat planlama ve tasarım maliyetlerinin düşmesi beklenmektedir. Bu faydalar, dijital verilerin yeniden kullanılabilirliğinin, konvansiyonel yapım teknolojisi ile yapımla karşılaştırıldığında planlama maliyetlerinin ihmal edilebilir düzeyde olacağı toplu konutlar veya askeri kışlalar gibi büyük ölçekli uygulama durumlarında artacaktır. Büyük ölçekli yazıcılar inşaat sektöründe nispeten yeni ve az bulunduğundan, pahalı ön maliyetlere ve bilinmeyen devam eden bakım maliyetlerine sahip olma eğiliminde olmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımı yaygınlaştıkça endüstriyel rekabetin bir sonucu olarak maliyetlerin düşmesi beklenmektedir. Bir çalışma, somut bir yazıcının işletme ve bakım maliyetlerinin saatte yaklaşık 75 ABD dolarına eşit olduğunu varsaymaktadır. Bununla birlikte, teknolojiyi kullanmanın maliyeti genellikle toplam baskı maliyetlerinin hesaplanmasında dikkate alınmamaktadır. Bu durum da basılı bir yapının veya bileşenin maliyetinin olduğundan az tahmin edilmesine yol açmaktadır (Schuldt ve ark., 2021).

5.19. 3DPC ve 3DPRC'nin mekanik davranışı

5.19.1. 3D baskılı betonun mekanik özellikleri

Bu çalışmada, 3D yazıcıdan ekstrüde edilen betonun mekanik performansını değerlendirmek amacıyla basınç ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyleri, 3D yazıcı nozul ağzından alınan 100×100×100 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde uygulanmıştır. Eğilme dayanımı deneyleri, 100×100×500 mm boyutlarındaki prizma numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Beyaz çimento içeren karışımların, erken yaşta daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Portland çimentolu betonlarda, priz hızlandırıcı katkı kullanımı, basınç dayanımını erken yaşta artırırken, priz geciktirici katkının betonun nihai

dayanımına daha olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Bu sonuçlar, 3D baskı betonlarının işlenebilirlik ve mekanik dayanım özelliklerinin optimize edilmesi için çimento türü, su/çimento oranı ve katkı miktarlarının dikkatlice belirlenmesi gerektiğini göstermektedir. Beyaz çimentolu karışımların 28 günlük basınç dayanımı 60 MPa değerini aşmıştır. Portland çimentolu karışımlar, CEM I 42,5 R çimentosunun dayanım sınıfına bağlı olarak beyaz çimentolu karışımlara kıyasla daha düşük basınç dayanımı göstermiştir. Yüksek dayanımlı betonlar, literatürde minimum 400 kg/m³ çimento içeriği ve 50 MPa üzeri basınç dayanımı ile tanımlanmaktadır. Bu çalışmada üretilen Portland çimentolu ve beyaz çimentolu 3D baskı betonlarının 60-65 MPa aralığında basınç dayanımına sahip olduğu göz önüne alındığında, yüksek dayanımlı beton sınıfına girdiği anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar, 3D baskı betonlarının uygun karışım tasarımı ile yüksek dayanım değerlerine ulaşabildiğini ve geleneksel yüksek dayanımlı betonlarla karşılaştırılabilir mekanik özellikler sergilediğini göstermektedir. Beyaz çimentolu karışımların eğilme dayanımı, Portland çimentolu karışımlara kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Literatürde betonun eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı yaklaşık 0,175 olarak kabul edilmektedir. Agregat türü ve özellikleri (tane şekli, yüzey yapısı vb.), kür süresi gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu çalışmada Normal Portland Çimentosu içeren betonda eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı 0,157 iken Beyaz Çimento içeren betonda eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı 0,184 olmuştur. Bu sonuçlar, beyaz çimentolu karışımın eğilme dayanımı açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, 3D baskı betonlarında çimento türünün mekanik performans üzerindeki etkisinin belirgin olduğu anlaşılmaktadır (Özalp ve ark., 2018).

Biyomedikal, havacılık, otomotiv ve enerji gibi çeşitli endüstrilerde yeni malzemeler oluşturmak ve yüksek boyutsal doğruluk ve yüksek mekanik özelliklere sahip 3D baskılı nesneler üretmek için hesaplamalı modelleme ve eklemeli üretim teknolojisini birleştirmek zordur. Önceki araştırmalara göre, ekstrüzyon sırasındaki taze akışkanlık 3DPC teknolojisinin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Çeşitli çalışmalar, betona silis dumanı eklendiğinde hidrasyon sırasında kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) oluştuğunu göstermektedir. C-S-H, betonun dayanıklılığını ve mekanik özelliklerini geliştirir, böylece 3D baskılı beton katmanları arasında bir bağ oluşturur. 3D baskılı betonun geometrisine göre, katmanlar ve farklı donatı türleri arasındaki arayüz bağı, mekanik özellikler ve 3D baskılı betonun kırılma modları geleneksel betondan farklıdır. Bu

nedenle, beton 3D baskı için henüz bir tasarım teorisi bulunmamaktadır. 3D baskılı betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli bir faktör, ince agregaların çimento ve su arasındaki dağılımıdır. İnce agregaların eklenmesi nedeniyle, bu boyutların ekstrüzyon agregalarının boyutunu aşması için nozülün çok dar olması gerekir. Diğer 3D baskılı beton türlerinin aksine, farklı çalışmalar doğal kumun yerine geri dönüştürülmüş agrega ve endüstriyel atık içeren betonun daha düşük beton mekanik özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Bir diğer önemli faktör de betonun karışım özellikleridir. Araştırmaya göre, 3D baskılı betonun basınç dayanımı, aynı bileşime sahip dökme betondan daha azdır. Bu nedenle, 3D baskılı beton yazıcıların sıkıştırması azaldığında, dayanım kaybı katsayısı basınç dayanımındaki azalmayı bulmak için kullanılır. Örnek olarak, Fclass uçucu kül ve silis dumanı betona eklendiğinde, mukavemet kaybı katsayısını azaltmaya yardımcı olurlar. Örneğin, su-bağlayıcı oranı ve yüzey nemi durumu mekanik özellikleri değiştiren iki önemli faktördür. Sonuçlar, yüzeydeki serbest suyun beton basımında önemli bir konu olmasına rağmen, çimento matrisinin bağlanması nedeniyle betona daha fazla su eklenmesinin betonun basınç dayanımını zayıflatacağını göstermiştir. Çekme ve basınç dayanımları ile ilgili bir diğer faktör de anizotropik özelliklerdir. Beton anizotropik yönde basıldığında katmanlar arasındaki direnç artar. Bir diğer konu ise basılan diziler arasındaki zaman aralığı ve hızdır. Zaman aralığının kısa olması durumunda duvarlar çökebilir, zaman aralığının uzun olması durumunda ise katmanlar arasındaki bağ zayıflar. Son olarak, çeşitli araştırmalar, lif, katkı tozu ve farklı agrega türlerinin eklenmesinin betonun mukavemetini artırabilmesine rağmen, yapının geometrisinin, beton karıştırma yönteminin, suyun bağlayıcıya oranının vb. betonun dayanımını artırabileceğini göstermektedir (Momeni ve ark., 2025).

3DPC teknolojileri için farklı uygulamalar vardır. 3DPC teknolojisindeki en büyük zorluklar binanın dayanımını, akışkanlığını, termal ve akustik davranışını ve betonun reolojisini iyileştirmektir. Diğer zorluklar ise katmanların kontrolü, katman özellikleri ve büyük ölçekli yazıcıların tasarlanması ile ilgilidir (Momeni ve ark., 2025).

3DPC teknolojisini kullanmanın sayısız faydası vardır. Örneğin, inşaat süresini, karbon ayak izini, işgücü gereksinimlerini ve inşaat ve işletme giderlerini azaltırken geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını artırma fırsatları vardır. 3DPC teknolojisini geleneksel inşaat yöntemlerine göre kullanmanın başlıca faydalarından biri, geleneksel blok ve harç yapımına göre daha hızlı inşaat yapılmasına olanak sağlamasıdır. Ekonomik açıdan, sıfır atık, düşük işçilik maliyeti ve karmaşık elemanlar oluşturmak için daha hızlı

ve daha doğru bir yoldur. 3D baskılı beton köprüler, otobüs durakları, mimari konular, yerinde inşaat binaları ve güçlendirilmiş 3D baskılı beton gibi çeşitli yapılarda kullanılabilir. 3DPC teknolojisinin yaygın uygulaması inşaat süresini azaltmak ve farklı form ve tasarımlarda bina yapılarını desteklemektir (Momeni ve ark., 2025).

5.19.2. 3DPRC'nin mekanik özellikleri

3DPRC'nin dayanımını artırmak için önemli bir faktör yardımcı malzeme kullanımıdır. Auxetic malzemelerin enerji emici olduğu ve negatif Poisson oranlarına sahip olduğu bilinmektedir. Evans ve arkadaşları 1991 yılında bu tür malzemeyi “auxetic” olarak adlandıran ilk kişilerdir. Lakes 1987 yılında ilk kez -0,7 Poisson oranına ulaşmıştır. Auxetic malzemeler kayma direnci, girinti direnci, potansiyel enerji, emilim kapasitesi ve kırılma direnci gibi yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Yardımcı malzemelerin arzu edilen mekanik özellikleri nedeniyle, birçok araştırmacı betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için bu tür malzemelerin kullanımına ilgi duymaktadır. Zhong ve arkadaşları 2022 yılında enerji emme performansı ve düşük yoğunluk için betonu yardımcı malzeme ile güçlendirmiştir. Betonu güçlendirmek için alaşımlı auxetic malzeme kullanmışlardır. Auxetic malzeme ile güçlendirilmiş betonun basınç dayanımının zirvesini geliştirdiğini anlamışlardır. Gödek ve arkadaşları 2023 yılında, farklı takviyeli çimento matrisi desenleriyle basılan 3D betonun etkisini incelemişlerdir. Malzeme olarak PLA, ABS ve polietilen tereftalat glikol (PETG) ile basılan bal peteği ve üçgen desenleri analiz etmişlerdir. Bal peteği deseni farklı malzemelerle kullanıldığında, yük sapmasının saptmaya dönüştüğünü sertleştiğini bulmuştur. 3DPRC üzerine yapılan bir başka araştırmada, Barri ve arkadaşları 2023 yılında iletken bir çimento matrisini auxetic polimer kafeslerle güçlendirmiştir. Bu süreçte çimento, mekanik stres altındaki katmanlar arasında elektriksel temas ile grafit tozu ile iletken hale getirilmiştir. Oksetik polimer ağları sistemi, % 15'ten fazla sıkıştırılabilirlik döngüsü yükleme iyileştirmesi sağlamıştır. Güçlendirilmiş 3D baskılı beton üzerine yapılan birçok çalışma, beton 3D baskılı polimer ile güçlendirildiğinde eğilme dayanımının artabileceğini bulmuştur. Betona 3D baskılı polimer eklemenin bir diğer olumlu etkisi de gerilme davranışını gerilme yumuşaması ve gerilme sertleşmesi açısından değiştirmesidir. Örneğin, Katzer ve Szatkiewicz 2020 yılında çimento harcını bal peteği ile güçlendirdiklerinde ve yükseklik-kalınlık oranının yüksek olduğunu tespit ettiklerinde, eğilme dayanımı 6 kN'den fazla artmıştır ve gerinim davranışı gerinim sertleşmesine dönüşmüştür. Başka bir örnekte, Salazar ve arkadaşları

2020 yılında UHPC'yi polimerlerle üretilen bir 3D baskı kafesi ile güçlendirmiştir. Sonuçlar, UHPC'ye kafes yapısı eklendiğinde eğilme dayanımının arttığını ve kirişin gerinim davranışının gerinim sertleşmesine geçtiğini göstermektedir. Diğer çalışmalar farklı sonuçlar göstermektedir. Örneğin, Hematibahar ve arkadaşları 2023 yılında yüksek performanslı betonu (YPB) 3D baskı kabuk yapısıyla güçlendirdiğinde, kirişin eğilme deformasyonu kontrol numunelerine kıyasla iyileşmesine rağmen eğilme dayanımı azalmıştır ve eğilme gerinimi gerinim yumuşamasına dönüşmüştür. Başka bir örnekte, UHPC 3D baskı kafes kirişlerle güçlendirilmiştir. Yazarlar, kirişin davranışı gerinim yumuşamasına dönüşürken eğilmenin iyileştiğini anlamışlardır. Güçlendirilmiş 3D baskılı beton eğilme dayanımını artırabilir. Bu tür bir takviye bazen gerinimi gerinim yumuşamasına veya gerinim sertleşmesine dönüştürebilir. 3D baskı ile güçlendirilmiş beton ile çelik donatılı beton arasındaki farklar çoğunlukla beton kirişlerin gerilme davranışıyla ilgilidir. Çelik donatı ile güçlendirilmiş beton, şekil değiştirme davranışını şekil değiştirme sertleşmesine dönüştürebilir. Örneğin, Belay ve arkadaşları 2024 yılında çelik inşaat demiri ve GFRP ile güçlendirilmiş beton ile BFRP'yi karşılaştırmıştır. Beton farklı tipte inşaat demiri ile güçlendirildiğinde, şekil değiştirme davranışının şekil değiştirme sertleşmesine dönüştüğünü bulmuşlardır. Başka bir çalışma, beton çelik inşaat demiri ile güçlendirildiğinde, eğilme gerinim davranışının gerinim sertleşmesine dönüştüğünü göstermiştir. Betonarme kirişler ile güçlendirilmiş 3D baskılı beton arasındaki farklar genellikle çelik ve inşaat demiri türleri aracılığıyla betonarmenin şekil değiştirme sertleşmesi davranışı açısından ortaya çıkmaktadır (Momeni ve ark., 2025).

5.20. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin İkili Özelliği

Sanayi ve inşaat yapım ürünleri hayatta en yaygın iki ürün olarak sınıflandırılmaktadır. Endüstriyel ürünler, partiler ve kategoriler halinde tek tip prosedürlere göre fabrikalarda üretilirken, inşaat yapım ürünleri nihai olarak şantiyede, önceden onaylanmış tasarımlara göre belirtildiği gibi doğrudan temel üzerine inşa edilmektedir. Bileşenlerin tasarımı belirli bir ülke veya bölgede standartlaştırılmış ve tekdüze olmasına rağmen, her yapı için inşaat yönetimi ve inşaat yöntemleri, doğal kaynaklar, teknikler ve ekonomik farklılıklar gibi farklı nedenlerden dolayı yapı malzemesi birbirinden belirgin şekilde farklılık göstermektedir. Bu nedenle, her yapı ürünü benzersiz bir şekilde inşa edilmektedir. Yapı ürünü boyutlarının büyük olması durumunda fabrikada muhafaza edilmesi zor olacağından dolayı açık ortamda sahada üretilmektedir. İnşaat sektöründe prefabrike

bileşenlerin fabrikalarda üretildikten sonra açık havada montajının yapılması gerekmektedir. Yapım sahası dışında 3 boyutlu beton baskı teknolojisini kullanarak 3 boyutlu yazıcılarla (robotlarla) üretim gerçekleştirilebilir. Üretilen yapı elemanları şantiyeye taşınmakta ve montajı gerçekleştirilmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisini kullanarak yerinde yapım için, 3 boyutlu yazıcılar önceden belirlenmiş konuma yerleştirilmektedir ve yapılandırılmış binayı, tipik endüstriyel üretim süreci olan otomatik kontrolle yazmaktadır. Sonuç olarak 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin hem endüstriyel hem de inşaat üretim süreci olarak karakterize edildiği önemli bir gerçektir (Yang ve ark., 2018).

5.21. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinde Maliyet Tahmini

Maliyet tahmini, bir programın, projenin veya operasyonun maliyetinin yaklaşık olarak hesaplanmasıdır. Maliyet tahmini, maliyet tahmin sürecinin ürünüdür. Maliyet tahmini tek bir toplam değere sahiptir ve tanımlanabilir bileşen değerlerine sahip olabilir. İnşaat maliyet tahmini, fiziksel bir yapı inşa etmenin maliyetini tahmin etme sürecidir. Proje sahipleri, bir projenin kapsamını ve fizibilitesini belirlemek ve bütçe tahsis etmek için maliyet tahminlerini kullanır. Yükleniciler, bir projeye teklif verip vermemeye karar verirken bunları kullanır. İyi bir maliyet tahmini, inşaatçının para kaybetmesini önler ve müşterinin fazla ödeme yapmaktan kaçınmasına yardımcı olur (Akhil ve ark., 2021).

5.21.1. Geleneksel Konutun Maliyet Tahmini

Tahmin, çeşitli miktarların ve belirli bir iş veya proje için yapılması beklenen harcamaların hesaplanması veya hesaplanması tekniğidir. Tahmin hazırlamak için gerekenler aşağıda sunulmuştur (Akhil ve ark., 2021);

- Önemli noktaların plan, görünüş ve kesit gibi çizimleri
- İşçilik ve malzemelerin özellikleri hakkında ayrıntılı şartname
- Cari yılın standart oran çizelgesi

Tahmin ve maliyetlendirme ihtiyacı hakkında önemli hususlar aşağıda sunulmuştur (Akhil ve ark., 2021);

- Tahmin, iş hakkında bir fikir verir ve dolayısıyla fizibilitesi belirlenebilir, yani projenin mevcut fonlarla yapılıp yapılamayacağı belirlenebilir.
- Tahmin, işin tamamlanması için gereken süre hakkında bir fikir verir.
- Tahmin, ihaleyi davet etmek ve sözleşmeyi düzenlemek için gereklidir.
- Tahmin, işin yürütülmesi sırasında harcamaların kontrol edilmesi için de gereklidir.

Tahmin, çeşitli miktarların ve belirli bir iş veya proje için yapılması beklenen harcamaların hesaplanması veya hesaplanması tekniğidir. Tahmin hazırlamak için gerekenler aşağıda verilmiştir (Akhil ve ark., 2021);

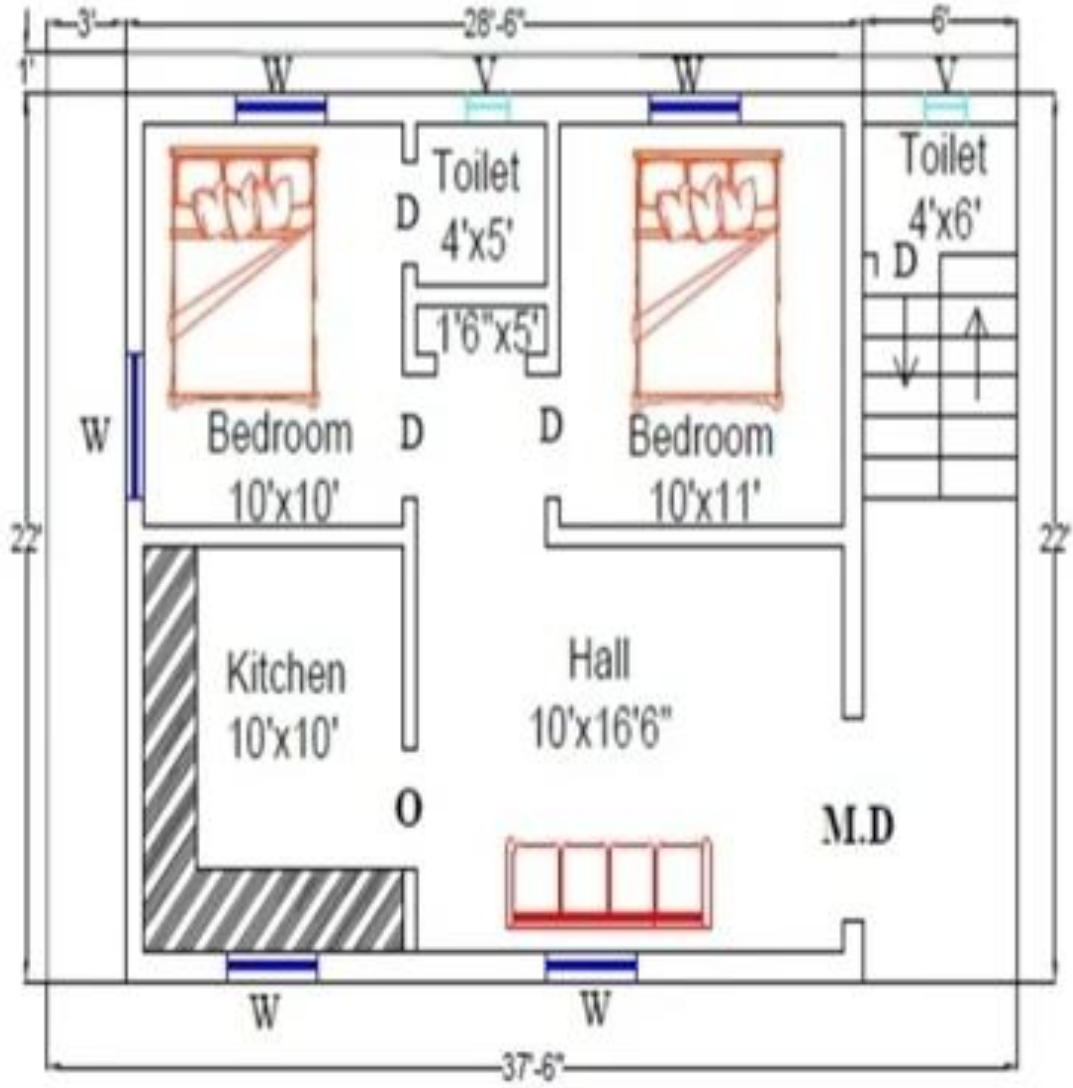
- Önemli noktaların plan, görünüş ve kesit gibi çizimleri
- İşçilik ve malzemelerin özellikleri hakkında ayrıntılı şartname
- Cari yılın standart oran çizelgesi.

Tahmin için prosedür aşağıda sunulmuştur (Akhil ve ark., 2021);

- Ayrıntılı tahmin hazırlama
- Her bir iş biriminin oranının hesaplanması
- Tahmin özetinin hazırlanması
- Tahmin hazırlamak için gerekli veriler
- Çizim
- Şartname
- Oranlar

5.21.2. Geleneksel Olarak Yapılmış Bir Evin Maliyet Tahmini

İncelenen geleneksel olarak yapılan evin planı Şekil 4.5'te sunulmuştur (Akhil ve ark., 2021).



Şekil 5.5. İncelenen geleneksel olarak yapılan evin planı

7	SUPER STRUCTURE							
	Brick work in cm 1.5 using							
	first class brick including							
	conveyance of bricks,							
	curing etc							
	G. FLOOR							
	Long wall	2	31.5	0.75	10	472.5		
	Cross wall	3	20.5	0.75	10	461.25		
	Cross wall	1	10	0.75	10	75		
	Cross wall	2	5	0.75	10	75		
	Parapet wall	1	110	0.75	2.5	206.25		
	Deduction							
	Main Door (M.D)	1	5	0.75	7	-26.25		
	Door(D)	2	3	0.75	7	-31.5		
	Door(D1)	2	2.5	0.75	7	-26.25		
	open(O)	1	3	0.75	7	-15.75		
	Window(W)	1	5	0.75	4	-15		
	Window(W1)	3	4	0.75	4	-36		
	Window(W2)	1	3	0.75	3	-6.75		
	Ventilator(V)	2	2	0.75	2	-6		
						1126.5	300/cft	337950
8	R.C.C items							
	Steel,Cement,shuttering							
	charges all etc .Complete							
	R.C.C footing	11	3	4	1.5	198		
	R.C.C Column	11	1	0.75	21.25	175.3125		
	Lintel	1	144	0.75	0.5	54		
	Roof beam	1	18	1	0.75	13.5		
	Roof slab G.F	1	34.5	22	0.6	455.4		
	staircase	1	18	3	0.4	21.6		
						917.8125	400/ cft	367125
9	Supplying and fixing door&windows							
	in teak wood							
	Main Door (M.D)	1	5		7	35		
	Door(D)	2	3		7	42		
	Door(D1)	2	2.5		7	35		
	open(O)	1	3		7	21		
	Window(W)	1	5		4	20		
	Window(W1)	3	4		4	48		
	Window(W2)	1	3		3	9		
	Ventilator(V)	2	2		2	8		
						218	800/sqft	174400
10	Ceiling plastering in C.M 1:3							
	over R.C.C Surfaces							
	including curing etc							
	G. FLOOR							
	Hall	1	16.5	10		165		
	kitchen & dining	1	10	10		100		
	Bed room 1	1	10	10		100		
	Bed room 2	1	11	10		110		
	Bed room 1	1	5	4		20		
	Bed room 2	1	6	4		24		
	Pooja	1	5	1.6		8		
						527	50/sqft	26350

Şekil 5.6. Geleneksel olarak yapılan evin maliyetinin belirlenmesi

Şekil 5.6. Geleneksel olarak yapılan evin maliyetinin belirlenmesi (devamı)

7	SUPER STRUCTURE							
	Brick work in cm 1.5 using							
	first class brick including							
	conveyance of bricks,							
	curing etc							
	G. FLOOR							
	Long wall	2	31.5	0.75	10	472.5		
	Cross wall	3	20.5	0.75	10	461.25		
	Cross wall	1	10	0.75	10	75		
	Cross wall	2	5	0.75	10	75		
	Parapet wall	1	110	0.75	2.5	206.25		
	Deduction							
	Main Door (M.D)	1	5	0.75	7	-26.25		
	Door(D)	2	3	0.75	7	-31.5		
	Door(D1)	2	2.5	0.75	7	-26.25		
	open(O)	1	3	0.75	7	-15.75		
	Window(W)	1	5	0.75	4	-15		
	Window(W1)	3	4	0.75	4	-36		
	Window(W2)	1	3	0.75	3	-6.75		
	Ventilator(V)	2	2	0.75	2	-6		
						1126.5	300/cft	337950
8	R.C.C items							
	Steel,Cement,shuttering							
	charges all etc .Complete							
	R.C.C footing	11	3	4	1.5	198		
	R.C.C Column	11	1	0.75	21.25	175.3125		
	Lintel	1	144	0.75	0.5	54		
	Roof beam	1	18	1	0.75	13.5		
	Roof slab G.F	1	34.5	22	0.6	455.4		
	staircase	1	18	3	0.4	21.6		
						917.8125	400/ cft	367125
9	Supplying and fixing door&windows							
	in teak wood							
	Main Door (M.D)	1	5		7	35		
	Door(D)	2	3		7	42		
	Door(D1)	2	2.5		7	35		
	open(O)	1	3		7	21		
	Window(W)	1	5		4	20		
	Window(W1)	3	4		4	48		
	Window(W2)	1	3		3	9		
	Ventilator(V)	2	2		2	8		
						218	800/sqft	174400
10	Ceiling plastering in C.M 1:3							
	over R.C.C Surfaces							
	including curing etc							
	G. FLOOR							
	Hall	1	16.5	10		165		
	kitchen & dining	1	10	10		100		
	Bed room 1	1	10	10		100		
	Bed room 2	1	11	10		110		
	Bed room 1	1	5	4		20		
	Bed room 2	1	6	4		24		
	Pooja	1	5	1.6		8		
						527	50/sqft	26350

Şekil 5.7. Geleneksel olarak yapılan evin maliyetinin belirlenmesi (devamı)

duvar yapmanın metre karesi başına 27 dolara mal olmaktadır (fit kare başına yaklaşık 183 Rs) (Akhil ve ark., 2021).

SI NO	DESCRIPTION OF WORK	NOS.	L(feet)	B(feet)	D(feet)	QUANTITY	RATE PER	TOTAL AMOUNT
	Foundation							
1	Earth work excaavation in all soil expect rock portion upto 4'0" depth							
	Long wall	2	31.5	3	4	756		
	Cross wall	3	20.5	3	4	738		
	Cross wall	1	10	3	4	120		
	Cross wall	2	5	3	4	120		
	column footing	11	5	5	6.75	1856.25		
						3590.25	15/cft	53853.75
2	P.C.C cement concret in 1:4:8 foundation including cost all cost all materials including labour charges							
	Long wall	2	31.5	3	0.25	47.25		
	Cross wall	3	20.5	3	0.25	46.125		
	Cross wall	1	10	3	0.25	7.5		
	Cross wall	2	5	3	0.25	7.5		
	column footing	11	5	5	0.25	68.75		
						177.125	50/cft	8856.25
3	R.R masonry in cm 1:6 for foundation including cost all materials and labour charge							
	Long wall	2	31.5	3	3.75	708.75		
	Cross wall	3	20.5	3	3.75	691.875		
	Cross wall	1	10	3	3.75	112.5		
	Cross wall	2	5	3	3.75	112.5		
						1625.625	40/cft	65025
4	BASEMENT							100000

Şekil 5.9. 3D Baskılı Evin Maliyetinin Belirlenmesi

5	SUPER STRUCTURE							
	G. FLOOR							
	Long wall	2	31.5	0.75	10	630		
	Cross wall	3	20.5	0.75	10	615		
	Cross wall	1	10	0.75	10	100		
	Cross wall	2	5	0.75	10	100		
	Parapet wall	1	110	0.75	2.5	275		
	Deduction							
	Main Door (M.D)	1	5	0.75	7	-35		
	Door(D)	2	3	0.75	7	-42		
	Door(D1)	2	2.5	0.75	7	-35		
	open(O)	1	3	0.75	7	-21		
	Window(W)	1	5	0.75	4	-20		
	Window(W1)	3	4	0.75	4	-48		
	Window(W2)	1	3	0.75	3	-9		
	Ventilator(V)	2	2	0.75	2	-8		
						1502	183/Sqft	274866

6	ROOFING	1	37.5	0.6	22	825	183/Sqft	150975	
7	Supplying and fixing door&windows in teak wood								30000
	Main Door (M.D)	1	5		7	35			75000
	Door(D)	2	3		7	42			
	Door(D1)	2	2.5		7	35			
	open(O)	1	3		7	21			30000
	Window(W)	1	5		4	20			
	Window(W1)	3	4		4	48			25000
	Window(W2)	1	3		3	9			
	Ventilator(V)	2	2		2	8			
						218	800/sqft	174400	13500
8	flooring concrete in CC 1:4:8 MIX &Top finished with vetrified tile	1				862	120/Sqft	103440	1104196

				OTHERS					
9	EXTERNAL AND INTERNAL FINISHING				L.S				30000
10	PAINTING				L.S				75000
11	ELECTRICAL WORK				L.S				30000
12	PLUMBING&SANITARY WORK				L.S				25000
13	MICILLNEOUS ITEM				L.S				13500
					TOTAL				1104196

Şekil 5.10. 3D Baskılı Evin Maliyetinin Belirlenmesi-(devamı)

Proje, bu teknolojinin talep ettiği ve gerektirdiği detaylara göre çeşitli veri ve bilgileri içermektedir. Bunu yapmak için, inşaatta 3d baskı teknolojisi ile ilgili çok sayıda dergi ve makaleye başvurmak zorunda kalınmıştır (hepsi şekiller listesinde ve proje referansları bölümünde belirtilmiştir). Bu projeyi gerçekleştirmenin maliyeti ve masrafları ile ilgili bilgilerin yanı sıra çeşitli teknikler ve yöntemler karşılaştırılmıştır. Bu şirketlerden biri de “APIS COR” adlı Rus merkezli inşaat şirketi olmuştur. Bu projede, Apis Cor tarafından kullanılanlara göre 3d yazıcı ve hammaddeler birleştirilmiştir. 3d yazıcıya ve Apis Cor'da kullanılan hammaddelere göre, 3d baskılı duvarın metrekare başına maliyeti 27 \$ olmuştur ve bu da metrekare başına yaklaşık 183 Rs'dir. Her iki ev inşa yöntemi (yani geleneksel yöntem ve 3d baskı yöntemi) arasında maliyet tahmini yapıldıktan sonra, nihayet her iki yöntemin toplam harcamasına ulaşılabilmektedir. Geleneksel yöntem kullanılarak yapılan evin toplam maliyetinin 16,13,836.25 Rs olduğu tahmin edilirken, 3d baskı teknolojisi kullanılarak yapılan aynı evin toplam tahmini maliyeti 11,04,196 Rs olarak bulunmuştur. Bu nedenle istatistiklere bakarak, 3d baskı teknolojinin geleneksel inşaat tekniklerine kıyasla maliyeti % 33'e kadar düşürülmüştür. Yazıcı gün boyu ara vermeden yaklaşık 2-3 gün çalışabilmektedir (Akhil ve ark., 2021).

5.22. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Maliyet Hesaplamasını Etkileyen

Faktörlerin Analizi

Endüstriyel ve yapım ürünlerinin maliyet hesaplama formülleri aşağıda sunulmuştur;

Endüstriyel ürün maliyeti = malzeme maliyeti+işçilik maliyeti+üretim maliyeti. Çizelge 5.5'te 3 boyutlu beton baskı teknolojinin ikili özelliği sunulmuştur.

Çizelge 5.5. 3 boyutlu beton baskı teknolojinin ikili özelliği

Özellikler	Endüstriyel Ürün Özellikleri	Yapım Ürünü Özellikleri	3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Özellikleri
Maliyet hesaplama özellikleri	Harman üretimi. Toplam maliyet her ürün etrafında paylaşılır.	Maliyet yapım ürün bileşenine göre hesaplanır.	Her bir 3 boyutlu baskı teknolojisi ile üretilen birimin maliyeti ayrı ayrı hesaplanır.

Çizelge 5.5. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin ikili özelliği-(devamı)

Maliyet hesaplamasında zamanla farklılık	Maliyet üretimden sonra hesaplanır.	İhale süreci esnasında yapımdan önce maliyet hesaplanır. Yapım esnasında öngörülemeyen faktörler sebebiyle nihai maliyet değişecektir.	Hem endüstriyel hem de yapım ürünlerinin özellikleri ile karakterize edilir. Çünkü maliyet yapımdan önce hesaplanır.
Maliyet hesabını belirleyen taraf	Maliyet hesaplaması üretici tarafından belirlenir.	Maliyet hem işin sahibi hem de müteahhit tarafından hesaplanır. Tek taraf nihai maliyeti belirleyemez.	Yalnızca yapım ürününün özellikleri ile karakterize edilir. Çünkü maliyet hem iş sahibi hem de müteahhit tarafından ihale sürecinde belirlenir.
Maliyet hesaplaması kompozisyonu	Benzer sektör payı, benzer üretim prosesi ve hammadde. Maliyet kompozisyonları geometrik bölgelerdeki belirgin varyasyonlar haricinde stabildir.	Geometrik bölgeler ve geometrik coğrafi koşullar boyunca her yapım ürünü için belirgin varyasyonlar vardır.	Yalnızca endüstriyel ürünün özellikleri ile karakterize edilir. Çünkü maliyet kompozisyonları farklı geometrik bölgeler boyunca stabildir.

Çizelge 5.6'da 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde maliyet hesaplamasını etkileyen faktörler verilmiştir.

Çizelge 5.6. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde maliyet hesaplamasını etkileyen faktörler

Ürün özellikleri	Etkileyen faktörler		Konvansiyonel yapım	Yapım sahası dışında 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretim		Yerinde 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretim
				Yazdırma	Birleştirme	
Hem endüstriyel hem de yapım ürünü	İşçilik maliyeti		√	√	√	√
	Makine maliyeti		√		√	
	Malzeme maliyeti		√	√	√	√
	Vergi			√		√
	Fayda		√	√	√	√
Yapım ürünü	Ölçüm alma maliyeti	Güvenlik, sağlık ve çevre	√		√	√
		Gece çalışmaları için ilave maliyet	√		√	√
		İkinci çıkarma maliyeti	√		√	√
		Kış yağmurlu sezonda ilave maliyet	√		√	√
		Yapım maliyeti ve ekipman korunması	√		√	√
		Kalıplama ücreti	√			
		Beton kalıp işleri ve destek ücreti	√			

	Masraflar	Kirlilik boşaltma maliyeti	√	√	√	√
	Yönetim ücreti				√	
Endüstriyel ürün	Üretim maliyeti	Detaylı dizayn maliyeti		√		√
		Yazdırmada elektrik ve su masrafları		√		√
		Ekipman amortismanı		√		√
		Maddi olmayan amortisman		√		√
		Maaşlar		√		√
		İşgücü koruma gideri		√		√
		Çevre koruması ücreti		√		√
		Makine bakım esnasındaki kayıp		√		√

Çizelge 5.6. 3 D baskı teknolojisinde maliyet hesaplamasını etkileyen faktörler-(devamı)

Çizelge 5.7’de yazdırılan bileşenlerin maliyet hesaplaması görülmektedir.

Çizelge 5.7. Yazdırılan bileşenlerin maliyet hesaplaması

No	Maliyet kompozisyonu	Maliyet hesaplaması
(1)	Fabrika fiyatı	$= (a) + (b) + (c) + (d)$
	(a) 3 boyutlu beton baskı teknolojisi yazdırma maliyeti	=doğrudan işçilik maliyeti ve malzeme maliyeti
	(b) Üretim maliyeti	=detaylı dizayn maliyeti+yazdırma için elektrik ve su masrafları+ekipman amortismanı+maddi olmayan amortisman+maaşlar+işgücü koruma gideri+çevre koruması ücreti+mevsimsel maliyet+makine bakım esnasındaki kayıp
	(c) Yönetim ücreti	=yönetim maliyeti+muhasabe maliyeti+satış maliyeti
	(d) Fayda	Üreticiler tarafından belirlenir
(2)	Taşıma ücreti	$= \text{taşıma uzaklığı} \times \text{birim fiyat}$
(3)	KDV	Yerel düzenlemelere göre
	Yazdırılan bileşenlerin nihai maliyeti	$= (1) + (2) + (3)$

Yapım ürünü maliyeti=ekipman maliyeti+inşaat kurulum maliyeti+inşaat maliyeti (diğer maliyetler)+yedek maliyetler+faiz

İnşaat kurulum maliyeti alt mühendislik görevlerine göre ya da maliyet kompozisyonuna göre hesaplanabilir. Alt mühendislik görev bazlı hesaplaması aşağıdaki gibidir;

$$\text{İnşaat kurulum maliyeti} = \text{alt mühendislik maliyetleri} + \text{ölçümleri alma maliyeti} + \text{diğer maliyet} + \text{masraflar} + \text{vergiler}$$

Maliyet kompozisyon bazlı hesaplaması aşağıdaki gibidir;

$$\text{İnşaat kurulum maliyeti} = \text{işçilik maliyeti} + \text{malzeme maliyeti} + \text{ekipman maliyeti} + \text{yönetim maliyeti} + \text{faiz} + \text{masraflar} + \text{vergiler}$$

Maliyetin farklı faktörler tarafından etkilendiği belirgindir. Endüstriyel ve yapım ürünü kompozisyonları farklıdır. Analizi basitleştirmek için bu çalışmada borç olmadığı ve öngörülme faktörlerin olmadığı varsayılmıştır. Maaşlar, sigorta, ödenek ve ihtiyat fonu işçilik maliyetlerinin kalemleridir. Vergiler yetki düzenlemelerine göre belirlenir. Sigorta ve konut bütçesi işçilik maliyet kalemleri arasında yer almaktadır. Hâlbuki kirlilik boşaltma maliyeti ayrı olarak listelenmiştir. Yazdırılan elemanları taşıma maliyeti iki farklı yöntemle hesaplanabilir. Birinci seçenekte yazdırma firması teslimattan sorumludur. Yazdırma maliyeti % 17 KDV 'de eklenerek üretim maliyeti olarak belirtilebilir. Diğer seçenekte ise taşıma lojistik bir firma tarafından gerçekleştirilir. KDV oranı gerçek vakalara göre hesaplanacaktır (Yang ve ark., 2018).

Çizelge 5.8'de yerinde montaj maliyet maliyet hesaplaması görülmektedir.

Çizelge 5.8. Yerinde montaj maliyet hesaplaması

No	Maliyet kompozisyonu	Maliyet hesaplaması
(1)	Alt mühendislik ücreti	$= \sum [(a) \times (b)]$
(a)	Birim maliyet	$= (i) + (ii) + (iii) + (iv)$
(i)	İşçilik maliyeti	$= \text{İşçilik miktarı} \times \text{birim işçilik maliyeti}$
(ii)	Malzeme maliyeti	$= \text{Malzeme miktarı} \times \text{birim malzeme maliyeti}$

Çizelge 5.8. Yerinde montaj maliyet hesaplaması (devamı)

(iii)	Makine maliyeti	= Makine miktarı x birim makine maliyeti
(iv)	Yönetim maliyeti	=[(i) + (iii)] x yönetim ücreti oranı
(v)	Kar	Üreticiler tarafından belirlenir
(vi)	KDV	Üreticiler tarafından belirlenir
(b)	Alt mühendislik miktarı	
(2)	Önlem alma maliyeti	=(c) + (d)
(c)	Önlem alma maliyeti (sayılabilir)	= $\sum((b) \times \text{oran})$
(d)	Önlem alma maliyeti (sayılamaz)	= (vii) + (viii)
(vii)	Güvenlik inşaatı	= taban miktar x güvenlik inşaatı oranı
(viii)	Diğer ölçümler	= taban miktar x yönetim tarafından belirlenen diğer ölçümlerin oranı
(3)	Diğer proje maliyeti	Geçici meblağlar, günlük çalışma maliyeti, sözleşme yönetim ücreti
(4)	Kirlilik boşaltma maliyeti	Gerçek maliyete göre
	Yerinde montaj maliyeti	= (1) + (2) + (3) + (4)

5.23. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisinin Maliyet Hesaplama Yöntemi

3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapılmış az sayıda yapı mevcuttur. Çünkü 3 boyutlu beton baskı teknolojisi yeni bir teknolojidir. Bu teknoloji ile ilgili uluslararası bir standart mevcut değildir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasından dolayı bu teknolojiyi kullanarak üretim yapmak zordur. Bu araştırma 3 boyutlu beton baskı teknolojisi maliyet hesaplaması ile ilgili önemli katkılar sağlamaktadır (Yang ve ark., 2018).

5.23.1. Yapım sahası dışında 3 boyutlu beton baskı teknolojisi maliyet hesaplaması

Yapım sahası dışında 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretim süreci iki aşama içermektedir. Birincisi yapı bileşenlerinin yazdırılması, diğeri de elemanların sahada şantiyede yerinde montajıdır. Üretilen malzemelerin işçilik ve malzeme maliyeti montaj aşamasındaki işçilik ve malzeme maliyeti içinde yer almamaktadır. Yerinde 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanılması durumunda ise tüm maliyet bileşenlerin yazdırma maliyeti ile montaj maliyetinin toplamıdır (Yang ve ark., 2018).

Yapım sahası dışında 3 boyutlu beton baskı teknolojisi maliyet hesaplaması

Yapı bileşeni baskı aşaması, geleneksel yapıya kıyasla yalnızca 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde karakteristik bir aşamadır. Toplam fiyat, üretim periyodu esnasında üretim maliyeti ve tüm masrafları içermektedir. Günümüzde hala 3 boyutlu beton baskı teknolojisi için standardize bir üretim prosesi yoktur. Toplam üretim maliyeti yazdırma maliyeti (doğrudan malzeme, doğrudan maaş) ve üretim maliyetini içerir. Üretim periyodu esnasındaki masraflar yönetim maliyeti, muhasebe ve satış maliyetini içerir. Yazdırma faizi yazdırılan elemanların maliyeti içinde yer almaktadır. Çünkü 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilen son ürün montajı yapılan ürün olarak adlandırılmaktadır. Tüketim vergisi ve kaynak vergisi 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilen bileşenlere uygulanmaz. Genellikle yönetim maliyeti üretim sürecindeki tüm masrafları içermektedir (Yang ve ark., 2018).

Montaj aşamasındaki maliyet yapısı

Geçici meblağlar iş sahibi ve yüklenici arasındaki sözleşmelerde belirtilmektedir. Sözleşme yönetim ücreti ihale dökümanlarına göre hesaplanmaktadır (Yang ve ark., 2018).

5.23.2. Yapım sahası dışında 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde maliyet hesaplamasının analizi

Yapım sahası dışında 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin maliyeti yazdırma maliyeti ve montaj maliyetini içermektedir (Yang ve ark., 2018).

5.24. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi için 3 Boyutlu Beton Baskı Maliyet Fayda Analizi

Büyük ölçekli eklemeli üretim, ağırlıklı olarak yüksek ilk kurulum maliyetleri ve gereken malzemeler nedeniyle oldukça pahalı bir süreç olarak görülmektedir. Son zamanlarda malzemelerin ortaya çıkışı (ör. polimerler ve çimento bazlı), 3 boyutlu beton baskı teknolojilerini belirgin avantajlara sahip alternatif yöntemler olarak etkilemiştir. Günümüzde konvansiyonel inşaat yöntemlerinde maliyetlerin yaklaşık % 50'si iskeleden ve işle ilgili giderlerden kaynaklanmaktadır. İngiltere’de tipik bir evin boyutları 5 m x 3 m olan duvarı düz duvar ve yüksek düzeyde hizmet görmüş duvar olarak düşünülmüştür ve maliyet karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımında maliyetler karşılaştırıldığında katkı maddesiyle üretilen duvarın, yüksek oranda hizmet verilen bir duvarın maliyetinin neredeyse yarısı kadar olduğu sonucuna varmıştır. Yapı sektöründe başta işçilik, malzeme ve gerekli ekipman olmak üzere çeşitli maliyetler söz konusu olmaktadır. Dolayısıyla bu bölümde, etkileri analiz etmek için bu maliyet analizleri parçalanmıştır. Çeşitli çalışmalar, inşaat elemanına bağlı olarak, geleneksel inşaat yöntemleri kullanılarak tek başına kalıbın maliyetlerin yaklaşık % 28-50'sini oluşturduğunu tahmin etmektedir. Sadece bu değil, kalıp aynı zamanda önemli miktarda ön döküm hazırlığı gerektirmektedir ve ortama önemli miktarda CO2 eklemektedir. Çizelge 4.9'da gösterildiği gibi, farklı beton duvar inşaatı türleri için maliyet dökümü üzerine bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, giderlerin çoğunluğunun düz duvarlar için artan işçilik ve kavisli duvarlar için malzemeler (kalıp) ile geleneksel uygulamalardan kaynaklandığını göstermektedir. Bu büyük ölçüde geleneksel yöntemlerde gerekli olan kalıbın hazırlanmasından kaynaklanmaktadır (Ranjha ve ark., 2018). Basit konvansiyonel betonlarda maliyetlerin % 50'sinden fazlasını oluşturan işçilik ile işçilik oranları, malzeme maliyetleriyle karşılaştırıldığında genellikle daha yüksektir. Konvansiyonel yerinde beton dökümünde maliyetler yüksek olmaktadır.

Çizelge 5.9. Farklı beton duvar yapıları için işçilik, malzeme, ekipman maliyetlerinin yüzde olarak dağılımı

Yapım Yöntemi	Gider Türü		
	İşçilik	Malzeme	Ekipman
Düz duvar/konvansiyonel	% 56	% 23	% 21
Düz duvar/robot	% 36	% 45	% 18
Kavisli duvar/konvansiyonel	% 22	% 75	% 3
Kavisli duvar/robot	% 38	% 44	% 18

Konvansiyonel yerinde yapımda genellikle marangozlar, çelik tamirciler, genel işçiler, operatörler vb. gerekmektedir. Örneğin çalışanların saatte minimum 50 dolar çalışma ücreti söz konusu olmaktadır (Ranjha ve ark., 2018). Çizelge 4.10'da gösterildiği gibi, basit, düz bir beton döküm oranı daha ucuz olmaktadır ve işçilik maliyetlerini 4.009 \$'a düşürmektedir. Oysa karmaşık kıvrımlı şekillerin inşa edilmesi, önemli malzeme maliyetleri eklemektedir ve geleneksel yöntemler kullanılarak maliyetlerin % 75'ine neden olmaktadır. Sonuç olarak, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi, ilk kurulum ve kullanılan malzemeler için pahalı bir teknoloji olarak belirtilebilmektedir. Bu teknoloji inşaat sektörü için alternatif, sürdürülebilir, uygun maliyetli bir çözüm sunmaktadır (Ranjha ve ark., 2018).

Çizelge 5.10. Farklı beton duvar inşaatı türleri için işçilik, malzeme, ekipman maliyetlerinin dolar cinsinden dağılımı

Yapım Yöntemi	Maliyet Tipi (Dolar)			Toplam Maliyet (Dolar)
	İşçilik	Malzeme	Ekipman	
Düz duvar/konvansiyonel	4009 \$	1684 \$	1518 \$	7211 \$
Düz duvar/robot	11082 \$	7808 \$	3203 \$	22092 \$
Kavisli duvar/konvansiyonel	11941 \$	41211 \$	1518 \$	54669 \$
Kavisli duvar/robot	12013 \$	8043 \$	3207 \$	23262 \$

Bu bölümde maliyet fayda analizi ve karşılaştırmalı çalışma yapılmıştır. Maliyet fayda analizinin temel amacı, 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin getirilerini ve ilgili faydalarını belirlemektir. Çalışma, karayolu kamu-özel sektör ortaklıklarını değerlendirmiştir. Bu çalışma bir maliyet modeli geliştirmiştir. Maliyet modelinde alt kümeler yer almaktadır. Bu kümeler planlama ve operasyon, tedarik, dizayn ve mühendislik, yapım, operasyon ve bakım, sistematik riskler ve belirsizlikler içermektedir. Bu çalışmada ikinci aşama olarak önceki araştırmalardan kaydedilen verilerle bir durum çalışması kullanılmıştır. Bu, beton baskı teknolojisinin faydalarının belirlenmesini içermektedir. Faydalar zaman tasarrufu, işçilik maliyeti tasarrufu, çevresel faydalar, güvenlik faydaları, diğer faydalar ve yapım sırasındaki dezavantajların ortadan kalkması olarak vurgulanabilir. Güvenlik ve çevresel faydalara ilişkin bilgiler, ilgili Avustralya standartlarıyla ve Paris 2020 anlaşması gibi iklim değişikliği hedeflerini karşılama potansiyeliyle karşılaştırılmıştır. Üçüncü ve son adım, geleneksel yöntemlere kıyasla maliyet ve faydaların belirlenmesidir. Analiz için geliştirilen kriterler, önemli roller oynayan ekonomik, sosyal ve çevresel faktörler olarak üçlü alt çizgi analizini içermektedir. Odak, geleneksel maliyet avantajından sosyo-çevresel faktörlere aktarılmıştır. Analizi tamamladıktan sonra, iki yöntem ve bunun inşaat endüstrisi üzerindeki etkisi arasında tam bir karşılaştırma sağlamak için sonuçlar mühendislik planından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar, inşaat endüstrisinin mevcut dönüşümünün, bu teknolojileri geniş çapta benimsemek için kullanmak için ileriye doğru bir adım atmayı gerektirdiğini göstermiştir. 3 boyutlu beton baskı sınırlamalarıyla ilgili zorlukların üstesinden gelen yeni yaklaşım, maliyet avantajlarını ve yalnızca çevre üzerindeki etkiyi önermektedir (Ranjha ve ark., 2018).

5.25. Performans Standartları için Prototip Testi ve Doğrulama

Bu bölümde, inşaat endüstrisinde bir zorluk olan yaşam döngüsü değerlendirmeleri için eklemeli imalat tarafından inşa edilen yapılar üzerine bir çalışma yürütülmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilen betonların özelliklerini test etmek için oldukça fazla sayıda araştırma gerçekleştirilmektedir. Nesnelerin performansı katman yönüne ve tane boyutlarına bağlı olduğundan, beton özelliklerinin eklemeli imalatı geleneksel yöntemlerden farklılık göstermektedir. Bu, geçerli bina standartları ve yönetmelikleri ile yapıların gerekli işlevsel özelliklerinin test edilmesi anlamına gelmektedir. Yapısal performansı sağlayan en önemli faktör kuşkusuz en önemli kriter yük taşıma

kapasitesidir. Farklı yük yönlerinde yoğunluk, çekme ve basınç dayanımlarını ölçmek için serbest biçimli yapılar yazdırılmıştır. Farklı koşullar altında betonun mukavemeti ve gerilme kapasitesi test edilmiştir. Taşıyıcının yanı sıra dayanıklılık, su buharı difüzyon direnci, ısı özellikleri ve yangına dayanıklılık gibi diğer özelliklerin de inşaat sektöründe kullanım için önemli bir unsur olduğu vurgulanmaktadır. Belirlenen yapılarda 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımının zorlukları sunulmuştur (Ranjha ve ark., 2018);

- Çekme dayanımını ve eğilme hareketini iyileştirmek için yapısal performans ve çelik güçlendirme ihtiyacı söz konusu olmaktadır. Beton yalnızca basınç dayanımını sağlamaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde çimento karışımının higroskopikliği ve akışkanlığı ile ilgili sorunlar söz konusu olmaktadır.
- 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde beton katmanlarının ve katmanlar arasındaki bağların sertleşmesi ve temperlenmesi bir kullanım zorluğu olarak vurgulanabilmektedir.

Çizelge 5.11. Karışım oranları

Malzeme	Karışım Oranları (kg/m ³)				
	Karışım 1	Karışım 2	Karışım 3	Karışım 4	Karışım 5
Kum	1612	1485	1362	1241	1123
Çimento	376	446	513	579	643
Uçucu kül	107	127	147	165	184
Silika dumanı	54	64	73	83	92
Su	150	178	205	232	257

3 boyutlu beton baskılı beton karışımlarının yukarıdaki tüm özelliklerini etkileyen birçok başka faktör vardır. Birincisi çimento karışımıdır. Karışımın iyi bir biçimde yazdırılabilmesi için homojen olması gerekmektedir ve farklı karışımlar farklı özelliklere sahip olacaktır. 28 gün sonra 110 MPa basınç dayanımı üretmek için 3:2 kum-bağlayıcı oranı ve % 70 çimento, % 20 uçucu kül ve % 10 silis dumanı ile optimum karışımı geliştirmek için Çizelge 4.11'de gösterilen farklı karışım oranlarını denenmiştir. Yüzey neminin iç katman mukavemetini etkilediği ve kuru yüzeyin katmanlar arasında bağ oluşturmadığı bulunmuştur. Birbirine kenetlenmenin bağlanma mukavemetini % 26

artırdığı vurgulanmıştır. Su içeriği ve katman kalınlığı gibi diğer faktörlerin 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilen yapıların özellikleri üzerinde etkili olduğunu keşfetmiştir (Ranjha ve ark., 2018).

5.26. Uygulamalar: uzak yerlerde tamamlanmış ve planlanmış 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapım

3 boyutlu beton baskı teknolojinin farklı kullanım alanlarına sahip bir teknoloji olduğu vurgulanabilmektedir (Schuldt ve ark., 2021).

5.26.1. İzole ortam vaka çalışması: uzay yerleşimleri

Uzay, yalıtılmış bir ortamın başlıca örneğidir. Coğrafi olarak uzaktır ve emek, ekipman ve malzemeye erişim yoktur. Yerleşik bir inşaat endüstrisi veya sürecinden yoksundur. Aşırı sıcaklıklar, yüksek radyasyon, toz fırtınaları ve ay depremleri gibi zorlu koşullara maruz kalmaktadır. Bununla birlikte, uzay için bir 3 boyutlu baskı teknolojisi yönteminin başarılı bir şekilde geliştirilmesi ile özellikle sürdürülebilir konut inşası olmak üzere Dünya üzerinde 3 boyutlu baskı teknolojisi kolaylaşabilir. Bazalt, kükürt ve geri dönüştürülmüş plastikler ve metaller gibi uzay yapımında kullanılması önerilen bazı malzemeler de Dünya'da mevcuttur ve mevcut bazı inşaat malzemelerinden daha çevre dostu olabilir. Ek olarak, uzayda malzemeleri çıkarmak ve işlemek için geliştirilen yöntemler, yerinde kaynaklardan daha fazla yararlanmak ve herhangi bir endüstriyel ekipman arasında en yüksek bakım maliyetlerinden ve çalışma saati başına arıza oranlarından bazılarını sahip olan toprak işleme ekipmanıyla ilgili mevcut sorunları azaltmak için Dünya'da kullanılabilir. Avrupa Uzay Ajansı, insanlı uzay araştırmalarında bir sonraki adım olarak bir ay köyü kurulmasını önermiştir ve Dünya'nın azalan kaynaklarını ve giderek sıklaşan doğal afetleri hafifletmenin bir yolu olarak, yüzyılın sonuna kadar uzayda insan kolonizasyonu hedeflenmektedir. 3 boyutlu baskı teknolojisi ile üretilen bir yapı, hava, su, yiyecek ve ulaşım gibi insan desteği gereksinimlerini en aza indirmek için insan gelmeden önce Ay ve Mars'ta barınak ve yaşam alanları oluşturmak için uzayda kullanılabilmektedir. Sonuç olarak astronotların güvenliğini artırılabilir. Ayrıca ay tozu girişimi azaltılabilir. Yerleşim uzayda kurulduktan sonra, 3 boyutlu baskı, yapıların bakımı ve yapısal onarımların kolaylaştırılması için de yararlı olabilmektedir. Uzayda 3 boyutlu baskılı konstrüksiyonun kullanılması, inşa edilmiş bileşenleri fırlatma

kuvvetlerine ve uzay yolculuğuna dayanacak şekilde tasarlama ihtiyacını ortadan kaldırmak ve uzay fırlatmalarında kütle ve hacmi en aza indirmek gibi çeşitli potansiyel lojistik avantajlar sunmaktadır. Malzemeleri yerel olarak tedarik ederek Dünya'dan gönderilen malzeme, malzeme ve ekipman kütlesini azaltır. Fırlatma maliyetlerinde de tasarruf sağlanabilir. Bir çalışma, malzemeleri Mars'a taşımanın kilogram başına 1 milyon dolara kadar mal olabileceğini vurgulamaktadır (Schuldt ve ark., 2021).

Birkaç çalışma, ay ve Mars'ta bulunan bol miktarda yerinde malzeme kaynaklarından, yani regolitten, yüzyıllarca süren mikrometeorit çarpmalarından sonra ayın yüzeyinde üretilen ezilmiş kaya ve tozdan yararlanmayı önermektedir. Magmatik bir kaya olan bazalt, özellikle Mars'ta yaygın olan ve betonda temel bir bileşen veya alternatif bağlayıcı olarak kullanılabilen bir malzeme olan kükürtün uzayda 3 boyutlu baskı teknolojisi ile yapımda kullanılabileceği vurgulanabilir. Uzayda 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanımı ile yapımda mikro yerçekimi ve sınırlı çekiş ile vakum benzeri bir ortamda çalışan bir yazıcı geliştirmek ve radyasyon mikrometeorit etkilerinden önemli ölçüde koruma sağlayabilen basınçlı yapılar üretmek ve astronotlara yaşamak ve çalışmak için bir alan sağlamak gibi benzersiz zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, uzayda karşılaşılan bazı zorluklar, Dünya'da 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanımı ile yapım uygulamasında karşılaşılan, yerleşik yedekliliğe sahip bir yazıcı geliştirme, aşırı sıcaklıklarda ve toz fırtınalarında çalışma yeteneği, sismik yüklere dayanıklılık ve yeteneği gibi zorluklarla paraleldir. Uzayda yapımın benzersiz bir avantajı, Ay'daki yapısal yüklerin Dünya'dakilerin sadece altıda biri olması ve daha az zaman, malzeme ve enerji gerektiren daha ince yapıların inşasına olanak sağlamasıdır (Schuldt ve ark., 2021).

Çeşitli araştırmalar, uzayda 3 boyutlu baskı teknolojisi ile yapımda olası bir çözüm olarak kontur işçiliğine işaret etmektedir. Başka bir çalışma, düzensiz ay veya gezegen yüzeylerinden geçebilen ve yüzeyleri stabilize etmek ve duvarlar, kasalar oluşturmak için çeşitli baskı kafaları kullanabilen büyük ölçekli, güneş enerjisiyle çalışan bir yazıcı olan All-Terrain Hex-Limbed Extra-Terrestrial Explorer robot sistemini önermiştir. Uzayda 3 boyutlu baskı teknolojisi ile yapıma yönelik ek yaklaşımlar arasında, NASA ile Made In Space, Inc. arasındaki bir ortaklık tarafından oluşturulan ve hem 3 boyutlu baskıyı hem de hassas robotik montajı birleştiren bir platform olan Archinaut olmuştur. Bu platform daha sonra yaşam, araştırma, depolama, iletişim ve diğer gerekli işlevler için kubbeler inşa etmek için kullanılabilen erimiş bazaltik malzemenin üçgen panellere ekstrüde edilmesi için bir yöntem kullanmıştır (Schuldt ve ark., 2021).

5.26.2. Uzak ortam vaka çalışması: düşük gelirli konut

Austin merkezli bir inşaat teknolojileri şirketi olan ICON, evleri ve yapıları yazdırmak için tescilli bir beton karışımı kullanan portatif, portal tarzı bir yazıcı geliştirmiştir. ICON'un ilk projesi, Mart 2018'de Austin, Teksas'ta yerinde basılan 32,5 m²'lik (350 ft²) bir konsept olmuştur. Bu ev Uluslararası Bina Kodu standartlarına göre inşa edilmiştir ve 10.000 \$'a mal bu ev yaklaşık 47 saatlik toplam baskı süresinde tamamlanmıştır. Bu kavram kanıtı, daha fazla teknoloji ve süreç geliştirme için bir temel oluşturmaktadır ve ülkenin en yoksul bölgelerinden biri olan Meksika'nın Tabasco kentinde ekonomik açıdan dezavantajlı kişiler için evler inşa etmek üzere kar amacı gütmeyen bir konut kuruluşuyla ortaklık kurmuştur. Ortaklığın amacı, 2020'nin sonuna kadar sismik aktiviteye dayanacak şekilde tasarlanmış 50 müstakil evden oluşan bir topluluk inşa etmektir. 2019'un sonlarında, 18 aylık planlama ve teknolojilerinin ardından ICON, basılı ilk iki evin inşaatını tamamlamıştır. Basılı evlerden birisinin görüntüsü Resim 4.1'de gösterilmektedir. Her biri 46,5 m² olan iki yatak odalı ev birkaç güne yayılmış 24 saatlik bir baskı süresinde tamamlanmıştır. Konut almak üzere seçilen Meksika'da yaşayan 50 ailenin ortalama aylık aile geliri 76.50 dolardır ve 50 aile daha önce güvenli olmayan, derme çatma barınaklarda yaşamıştır. Bu uygulama, yapısal tasarım, süreç verimliliği, işçilik, çevresel etki ve maliyet alanlarında 3 boyutlu baskı teknolojisinin uygulanabilirliğini göstermektedir. Bu uygulamada 3 boyutlu baskı teknolojisi ile yapımın uygulanabilirliğine yönelik en büyük zorluk, baskı yerine gönderilmesi gereken tescilli bir malzemenin kullanımı ve ilgili nakliyesi olmuştur (Schuldt ve ark., 2021).

5.26.3. Sefer ortamı vaka çalışması: askeri yapılar

Amerika Birleşik Devletleri Ordusu Mühendisler Birliği Mühendis Araştırma ve Geliştirme Merkezi İnşaat Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı (ERDC-CERL), özel tasarımı tasarımı üretebilen güvenilir, kullanıcı dostu 3 boyutlu beton baskı teknolojisi geliştirmek için 2015 yılında Otomatik Sefer Yapıları İnşası (ACES) programını kurmuştur. Yerel olarak mevcut malzemeler kullanılmıştır ve sahada talep üzerine askeri keşif yapıları yapılmıştır. ACES programının hedefleri arasında malzeme kullanımının azaltılması, daha güçlü, daha dayanıklı yapılar inşa etmek, işgücü gereksinimlerinin en aza indirilmesi, inşaatın lojistik ve tedarik taleplerinin azaltılması yer almıştır. Programın odak noktası, keşif ortamlarında 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile inşaatın kullanılması

olmuştur. Program, Caterpillar ve ERDC-CERL arasındaki işbirliğine dayalı bir araştırma ve geliştirme anlaşması kapsamında tasarlanan ve inşa edilen ACES Lite adlı bir prototip portal tarzı 3 boyutlu beton baskı sistemini kullanmıştır. Yazıcı, son derece taşınabilir, montajı kolay ve minimum personel tarafından çalıştırılabilecek şekilde tasarlanmıştır (Schuldt ve ark., 2021).



Resim 5.1. ICON tarafından yapılan 3D Baskılı bir ev



Resim 5.2. 3D Baskılı Kulübeler

Mayıs 2016'dan bu yana ACES ekibi, 3 m²'lik bir askeri giriş kontrol noktası, iki adet 48 m²'lik beton kışla kulübesi (B-kulübe), 10 m'lik 3 boyutlu baskılı beton köprü ve 7 m²'lik bir askeri savunma savaş pozisyonu dahil olmak üzere birçok baskıyı tamamlamıştır. Resim 5.2'de kulübeler görülmektedir. İkinci kışla kulübesinin basımı sırasında odak noktası verimlilik olmuştur. İkinci kulübe 5 günü kapsayan 14 saatlik baskı süresinde tamamlanmıştır. Bu projelerin her biri, matbaacıların yerel kaynaklı malzemeleri kullanma ve kontrolsüz çevre koşullarında çalışma yeteneğini vurgulamıştır ve ABD

ordusunu sağlam, konuşlandırılabilir inşaat teknolojilerine sahip olmaya bir adım daha yaklaştırmıştır (Schuldt ve ark., 2021).

5.27. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi ile İlgili Türkiye’de Yapılan Endüstriyel

Ölçekte Üretimler

Bu çalışma sürecinde, 3D yazıcı tasarımı ve pompalama sistemi ile nozul üzerinde yapılan geliştirmeler oldukça kritik bir rol oynamıştır. Başlangıçta yapılan araştırmalar sonucunda 3D beton yazıcısının tasarımı özel olarak gerçekleştirilmiş, ihtiyaçlar doğrultusunda süreçte çeşitli düzeltmeler yapılmıştır. Özellikle, pompa ve nozul arasındaki senkronizasyon sağlanarak, yazıcıda kullanılan betonun işlenebilirliği ve kıvamı korunmuştur. Bu önemli geliştirme, nozul ve beton pompasının uyumlu çalışmasını sağlayarak, betonda oluşabilecek tıkanmaların önüne geçilmesini mümkün kılmıştır. Bu tür tıkanmalar, 3D beton yazıcılarında sık karşılaşılan bir sorun olup, yapılan bu iyileştirmelerle verimliliğin artırılması sağlanmıştır. Bu yaklaşım, 3D yazıcıların uzun süreli çalışmalarda daha güvenilir ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayarak, üretim süreçlerini optimize etmiştir. Çalışmaların sonunda, endüstriyel olarak 3D beton yazıcı ile üretilen ürünler, Resim 4.3’te görülebilmektedir. Bu yazıcı, 300x250x200 cm boyutlarında bir çalışma alanına sahip olup, yaklaşık 200x100x60 cm ölçülerindeki bir ürünün 40 dakika gibi bir sürede üretilebildiğini göstermektedir. Bu süre, yazıcının verimliliğini ve hızını gösteren önemli bir parametre olup, 3D beton yazıcılarının endüstriyel üretimde hızlı ve etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu gelişme, endüstriyel ölçekte beton üretiminin hızlandırılması ve daha esnek üretim süreçlerinin oluşturulması adına önemli bir adım olarak değerlendirilebilir (Özalp ve ark., 2018).



Resim 5.3. İSTON’da geliştirilen 3D beton yazıcı kullanılarak üretilen ürünler

5.28. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknoloji ile İlgili Dünyadaki Mevcut Gelişmeler

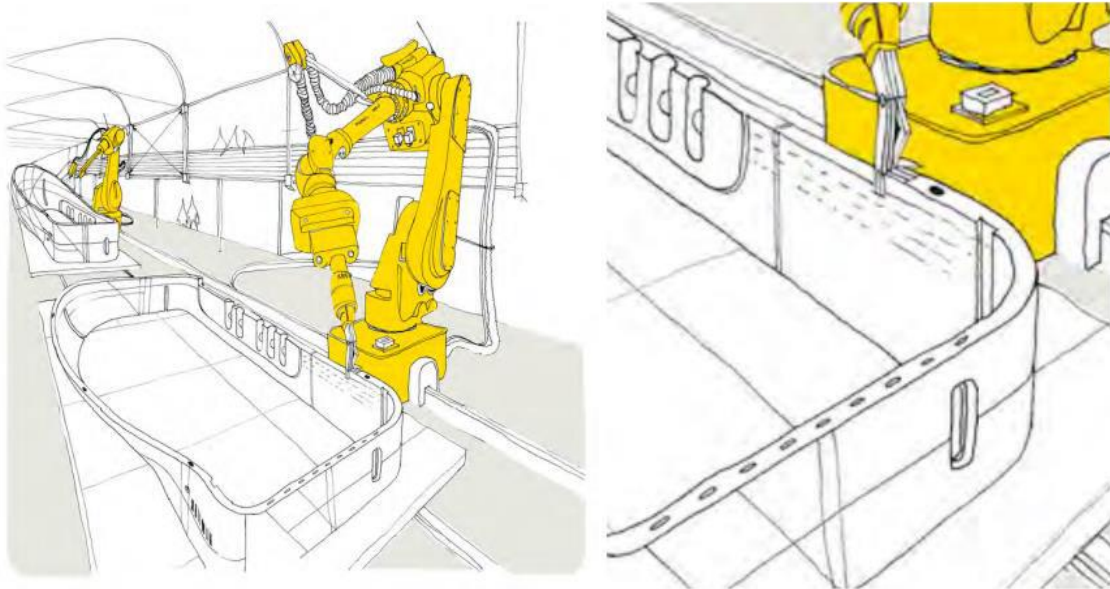
Yapı endüstrisi, 3D yazıcıların kullanıldığı eklemeli üretim yöntemindeki gelişmeleri yakından takip etmektedir ve bu teknolojiyi daha büyük ölçekli projelere entegre etmeyi amaçlamaktadır. Beton ve çimento esaslı malzemelerin 3D yazıcılarla kullanımı, son yıllarda mimarlık ve inşaat alanlarında büyük ilgi görmektedir. Bu kapsamda, süreç küçük ölçekli yapısal olmayan uygulamalarla başlamış ve zamanla daha büyük projelere evrilmiştir. Örneğin, tezgâhlar ve çocuk oyun kaleleri gibi basit uygulamalar, ilerleyen yıllarda bir ofis binası, yaya köprüsü, laboratuvar, bisiklet ve yaya köprüleri, konut yapıları, motorlu araçlar için trafik köprüleri ve ofis-otel kompleksleri gibi büyük ölçekli yapılara dönüşmüştür. Tay ve arkadaşları, 2013 yılından itibaren 3D beton yazım teknikleri ile ilgili bilimsel yayınların yalnızca sayısal olarak değil, aynı zamanda içerik bakımından da önemli ölçüde arttığını ortaya koymuştur. Bilinen ilk 3D baskı tekniği, 1998 yılında Khoshnevis tarafından "Contour Crafting" olarak adlandırılan yöntemdir. Bu teknik, polimer, seramik bulamaç, çimento ve çeşitli diğer malzemelerin kullanıldığı katmanlı bir imalat yöntemi olarak geliştirilmiştir. Contour Crafting yöntemi, yalnızca dünya üzerindeki yapı projeleriyle sınırlı kalmamıştır, aynı zamanda uzay araştırmaları kapsamında da ilgi görmüştür. Bu bağlamda, NASA tarafından desteklenen projelerde, bu teknolojinin Ay ve Mars gibi gök cisimlerine insan yerleşimi için kullanılabileceği öngörülmüştür. Mevcut uzay yerleşimi önerilerinin çoğu, dünya üzerinde üretilen yapısal elemanların taşınarak hedef sahada birleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Ancak bu yaklaşım, yüksek maliyetli ve büyük ölçekli uygulamalar için uygulanabilir olmaktan uzaktır. Bunun yerine, 3D baskı teknolojisi ile yerinde bulunan malzemelerin kullanılması önerilmiş ve bu yöntem sürdürülebilir bir çözüm olarak değerlendirilmiştir. Bu alanda yapılan akademik çalışmalardan biri de Loughborough Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü tarafından yürütülmüştür. Araştırmacılar, 3D eklemeli üretim yöntemi için yüksek performanslı bir beton geliştirmiş ve bu betonun 28. gününde 100 MPa basınç dayanımı ve 12 MPa eğilme dayanımı gibi yüksek dayanım özelliklerine ulaşmasını amaçlamıştır. Bu çalışmada, karışım tasarımında yalnızca mekanik dayanım değil, aynı zamanda işlenebilirlik, ekstrüde edilebilirlik ve taşıtılabilirlik gibi 3D baskı sürecine özgü gereksinimler de dikkate alınmıştır. Çinli Yingchuang firması, büyük ölçekli yapı elemanlarının hızlı üretimini sağlamak amacıyla geniş boyutlara sahip bir 3D yazıcı geliştirmiştir. Bu yazıcı, 150 metre uzunluğa, 10 metre genişliğe ve 6,6 metre yüksekliğe sahiptir. Firma, bu sistemle önce iç ve dış duvarları basmakta, ardından yapı

içinde zikzak formunda bir iç dolgu oluşturarak yapısal bütünlüğü sağlamaktadır. Bu yöntem sayesinde Yingchuang, çok katlı konutlar, beş katlı apartmanlar ve 1.100 metrekare büyüklüğünde yapılar inşa etmeyi başarmıştır. Bunun yanı sıra, Amerika Birleşik Devletleri'nde Minnesota merkezli inşaatçı Andrey Rudenko, Contour Crafting tekniğine benzer bir üretim yöntemi geliştirmiştir. Ancak Rudenko'nun yöntemi, 5 mm katman yüksekliği gibi daha ince katmanlarla üretim yapabilme yeteneği ile dikkat çekmektedir. Bu yaklaşım, daha yüksek hassasiyet ve detaylı baskılar elde edilmesini sağlamaktadır. Hollanda merkezli CyBe Additive Industries firması, baskıdan yalnızca birkaç dakika sonra yeterli dayanıma ulaşan özel bir harç geliştirmiştir. Firma, standart bir robot koluna baskı kafası entegre ederek 3D beton baskı süreçlerini optimize etmektedir. Öte yandan, Slovenya'da faaliyet gösteren BetAbram firması, ticari kullanıma yönelik 3D beton yazıcılar üretmektedir. Firma, farklı ölçeklerde yazıcı modelleri geliştirerek piyasaya sunmuş ve 3D baskı yöntemiyle üretilen bir merdiven örneğiyle bu teknolojinin potansiyelini gözler önüne sermiştir. Emerging Objects firması ise, baskı sürecinde kullanılan karışımın işlenebilirliğini artırmak amacıyla ince agrega ve lif takviyeli çimento kullanmaktadır. Çalışmalarında, iki farklı bağlayıcıdan yararlanılmaktadır: biri alkol bazlı bağlayıcı, diğeri ise üstün yapışma özelliklerine ve yüksek dayanımlı yapıya sahip suda çözünebilen sentetik polimerdir. Bunun yanı sıra, Neri Oxman liderliğindeki "The Mediated Matter" araştırma grubu, yenilikçi baskı teknikleri üzerine çalışmalar yürütmektedir. Grup, hızlı üretim süreçleri için özel olarak geliştirilen bir malzeme önermiştir. Bu malzeme, betonun yoğunluğunu kontrol etmek amacıyla alüminyum tozu ve kireç içeren bir beton köpüğü karışımına dayanmaktadır. Catalonia İleri Mimarlık Enstitüsü (IAAC), 3D yazıcı teknolojisine uygun minyatür baskı tekniğini geliştirmiştir. Bu yöntem, herhangi bir ölçekte beton yapıları eş zamanlı olarak yazdırabilen üç küçük robot ailesi kullanılarak uygulanmaktadır. Öte yandan, kil, kum ve çamur karışımını temel alan farklı bir 3D baskı yöntemi de bulunmaktadır. Bu yöntemi geliştiren WASP (World's Advanced Saving Project) girişimi, özellikle üçüncü dünya ülkelerinde düşük maliyetli barınaklar üretmeyi hedeflemektedir. İtalyan şirketi, farklı ölçeklerde 3D baskılı konut modelleri geliştirerek ticari kullanım için yazıcılarını satışa sunmayı planlamaktadır. Elde edilecek gelirin ise, ihtiyaç duyulan bölgelerde konut inşasında kullanılması amaçlanmaktadır. Son yıllarda, 3D beton baskı teknolojisinin altyapı projelerinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu teknoloji, hızlı üretim süreçleri ve maliyet verimliliği sunarak çeşitli projelerde tercih edilmeye başlanmıştır. Örneğin, Eindhoven Teknoloji Üniversitesi tarafından geliştirilen ve 2017 yılında

kullanıma açılan bisiklet köprüsü, bu alandaki önemli uygulamalardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, Birleşik Arap Emirlikleri'nde Dubai'deki bazı ofis binaları ve Filipinler'deki Lewis Grand Hotel'in belirli bölümleri de 3D baskı teknolojisiyle katmanlar halinde inşa edilmiştir (Özalp ve ark., 2018).

5.29. 3D Baskılı Beton Yapılarda Güncel Uygulamalar

Mimar James Bruce Gardiner, 3D baskı teknolojileri kullanılarak inşa edilmek üzere tasarlanan birçok önemli projenin arkasındaki baş mimarlardan biridir. FreeFAB Tower Projesi, 3D baskı teknikleri kullanılarak üretim için tasarlanan tarihteki ilk projedir. Bu projede modüler ve 3D üretimi birleştiren hibrit bir yaklaşım planlanmıştır. Bu proje, o zamandan beri çok sayıda büyük ölçekli 3B üretim projesi gerçekleştiren Winsun için bir başlangıç noktası olmuştur. Ayrıca, 3D inşaatta çok eksenli robotik kolların kullanımı için bir örnek oluşturmuştur. MX3D ve Branch Technology gibi şirketler bu projenin izinden giderek mevcut projeleriyle başarıya ulaşmaya devam etmiştir. Şekil 5.11'de FreeFAB projesinin imalatında kullanılacak yazıcılar için üretim hattının bir taslağı gösterilmektedir (Bayrak ve Sarıtaş, 2024).



Şekil 5.11. Kontur İşleme Tekniği Kullanılarak Endüstriyel Robotik Kollar Tarafından Basılmış Parçalar için Üretim Hattı Şeması (Bayrak ve Sarıtaş, 2024)



(a)



(b)

Resim 5.4-Çin’de Winsun Firması tarafından üretilen yapılar: (a) 4800\$ maliyeti olan 300 m² tek katlı yapı (b) 5 katlı yapı

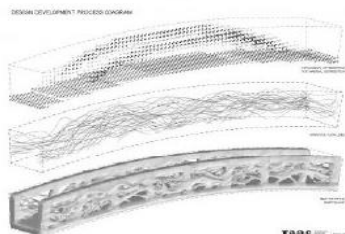
Resim 5.4-a, Winsun tarafından beton yazıcıyla üretilen düşük maliyetli yapıyı göstermektedir. Şirket yapıyı 3D beton yazıcısıyla ürettiği prefabrik parçaları şantiyeye taşıyarak ve parçaları birleştirerek inşa etmiştir. Şirketin bu şekilde inşaat maliyetlerini % 80'e kadar düşürdüğü ifade edilmiştir. Firma 2014 yılında Çin'de bir günde ürettiği tek katlı binaların maliyetini 5.000 doların altında tutmuştur. Ayrıca firma aynı yöntemle 5 katlı bir bina inşa etmiştir, Resim 5.4-b’de görüldüğü üzere Winsun firmasının bu şekilde Dubai’ye prefabrik eleman göndererek gerçekleştirdiği projeleri de bulunmaktadır (Bayrak ve Sarıtaş, 2024).



(a)



(b)



(c)

Resim 5.5. (a) Yaroslavi Evi'nin yapımında kullanılan malzeme M-300 kum betonu adı verilen çimento esaslı bir karışım (b) İSTON tarafından inşa edilen Türkiye'deki ilk 3DPC yapı (c) Alcobendas'ın ilk 3D baskılı yaya köprüsü

İnşa edilen ilk konut projesi Rusya'da Yaroslavi adı altında 298,5 m² olmuştur. 2015 yılında fabrikada yaklaşık 600 adet Yaroslavi üretilmiştir ve sahada montajı yapılmıştır. Resim 5.5-a'da gösterilen konut sadece sunum amacıyla inşa edilmemiştir. Yaşam için kullanılmaktadır. Öte yandan, Türkiye'de İSTON tarafından inşa edilen ilk 3DPC yapı Resim 5.5-b'de gösterilmektedir. Bu yapının taşıyıcı sistemi analiz ve tasarım amaçlı RC kolonlardan oluşmakta olup, RC kolonlar basılı 3DPC duvarlar sayesinde kalıba ihtiyaç duyulmadan inşa edilmiştir. 2016 yılında dünyanın ilk 3D baskılı yaya köprüsü İspanya'nın Madrid kentindeki Castilla-La Mancha kent parkında açılmıştır. Köprü'nün toplam uzunluğu 12 metre, genişliği ise 1,75 metre olup mikro betonarme olarak basılmıştır. Mimari tasarım Katalonya İleri Mimarlık Enstitüsü (IAAC) tarafından yapılmıştır. Yaya köprüsünü inşa etmek için kullanılan 3D yazıcı D-Shape tarafından üretilmiştir. Resim 5.5-c'de tasarım ve 3D modelleme aşamasına ilişkin diyagram ve imalat sonrası kullanımdaki fotoğraf sunulmuştur. Gensler tarafından tasarlanan ve sektörün önde gelen firmalarından Winsun tarafından üretilen Office of the Future isimli ofis, 3D baskı teknolojisi kullanılarak inşa edilen ilk ticari bina olarak tarihe geçmiştir. Bu sayede işçilik maliyetlerini ve imalat atıklarını % 30 oranında azaltmayı başarmıştır. Resim 5.6'da gösterilen ofis binasının tüm parçalarının basılması sadece 17 gün sürmüştür ve basılan parçaların montajı ise 2 gün daha sürmüştür (Bayrak ve Sarıtaş, 2024).



Resim 5.6. Geleceğin ofisi - 3D baskılı ofis; elektrik, su, telekomünikasyon ve hatta iklimlendirme sistemleri ile tamamen işlevsel bir bina

Apis Cor'un Dubai Belediyesi için gerçekleştirdiği rekor kıran proje, Resim 5.6'da gösterilen, bugüne kadar 3D olarak basılmış en büyük binadır. İki katlı 650 metrekarelik alan Apis Cor'un kendi geliştirdiği yazıcı tarafından basılmıştır. Bina geleneksel temeller üzerine oturmaktadır ve kolonlar için 3D baskılı kalıp beton ve inşaat demiri ile güçlendirilmiştir. Çatı ve pencere hala geleneksel çözümlerle yerinde durmaktadır. Şirket ayrıca 2019 yılında SEArch+ ile birlikte NASA'nın 3D baskılı Habitat Yarışmasını kazanarak uzayda yaşamaya bir adım daha yaklaşmıştır. Resim 5.7'de Apis Cor'un 3D baskı makinesinin sahada hareket ettirilmesi görülmektedir (Bayrak ve Sarıtaş, 2024).



Resim 5.7. Apis Cor'un 3D baskı makinesi, binanın farklı bölümlerini inşa edebilmesi için yeniden konumlandırmak üzere bir vinç kullanılarak sahada hareket ettirilmiştir (Bayrak ve Sarıtaş, 2024)

Apis Cor'un sektörü etkileyen bir diğer projesi de Moskova yakınlarındaki Stupino kasabasında yer alan bir binadır. Projenin özel olmasının en büyük nedenlerinden biri, tüm ana bileşenlerin sahada inşa edilmiş olmasıdır. Bu sayede nakliye ve montaj maliyetleri azalmıştır ve toplam 3D baskı süresi sadece 24 saat sürmüştür. Katı elementler ve sıvı poliüretan karışımı kullanan Apis Cor, ısı yalıtım özelliklerine sahip bu malzeme ile yerinde baskı gerçekleştirmiştir. Resim 5.8, bu 24 saatlik inşaat sürecinden bir aşamayı göstermektedir (Bayrak ve Sarıtaş, 2024). Tüm inşaat maliyeti yaklaşık 10.000 dolardır ve -35 °C'ye kadar düşük sıcaklıklara dayanabilmektedir. Bu teknoloji türü, geleneksel inşaat yöntemlerine alternatif sağlayabilir ve böylece uygun fiyatlı konutlar yaratabilir.



Resim 5.8. 24 saatlik inşaat sürecinden bir aşama (Bayrak ve Sarıtaş, 2024)

Resim 5.9’da gösterilen yaklaşık 400 m²’lik 2 katlı villa 3D yazıcı ile yerinde inşa edilmiştir. İnşaat yaklaşık 45 gün sürmüştür. Villanın duvarları 25 cm kalınlığındadır ve yaklaşık 20 ton C30 sınıfı betondan yapılmıştır. Resim 5.8’de bitmiş hali gösterilen binanın üretim süreci diğer 3DPC binalardan farklıdır ve tüm baskı süreci sahada gerçekleşmiştir (Bayrak ve Sarıtaş, 2024).



Resim 5.9. Winsun Şirketi Tarafından Basılan Bina (Bayrak ve Sarıtaş, 2024)

ABD Ordusu Mühendisler Birliği tarafından yürütülen ACES projesinde, 3DPC inşaatı ile ilgili olarak, ordunun ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla yerel olarak mevcut malzemelerden elde edilen beton kullanılarak özel tasarımı keşif yapıları için sahada hızlı inşaat yöntemlerinin araştırılması amaçlanmaktadır. Saha denemeleri sonucunda duvarların chevron tipi (Resim 5.10) geometrisinin yapısal stabilite ve çatlamaya karşı en uygun formu sağladığı belirtilmiştir. Bu yapıların deprem yüklerine karşı davranışlarının belirlenmesinin önemli olduğu projenin sonuçları arasındadır ancak bu konuda projenin çıktılarına ilişkin herhangi bir veriye rastlanmamıştır (Bayrak ve Sarıtaş, 2024).



Resim 5.10. ABD Ordusu Mühendisler Birliği tarafından yürütülen ACES Projesi kapsamında inşa edilen 3DPC yapıları

Çığır açan birkaç 3DPC projesini inceledikten sonra, bu yenilikçi inşaat yönteminin sektörü yeniden tanımlamaya hazır olduğu açıkça görülmektedir. Dönüştürücü potansiyelini tam olarak kavramak için, 3DPC'nin yapısal bütünlüğünü ve işlevselliğini destekleyen temel mekanik özelliklerin kısa bir incelemesini yapmak çok önemlidir (Bayrak ve Sarıtaş, 2024).

5.30. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Kullanılarak Üretilmiş Yapı Örnekleri

5.30.1. Çin'de 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Kullanılarak Yapılmış Yapılar

2014 yılında Çinli WinSun Dekorasyon Tasarım Mühendisliği Şirketi, yalnızca 24 saat içinde her biri yaklaşık 100 m² olan 10 farklı ev basmıştır. WinSun süreci, yapıyı parça parça oluşturmak için kullanılan 3 boyutlu yazıcıya aktarılan bir CAD çizimiyle başlatmıştır. Bu evler, geri dönüştürülmüş moloz, cam elyafı, çelik, çimento, beton ve bağlayıcıdan yapılmış atık malzemelerden inşa edilmiştir. 2015 yılında WinSun, altı katlı (1100 m²) bir apartman basmıştır (Allouzi ve ark., 2020).

5.30.2. Dubai'de 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi ile Yapılmış Ofis

3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi kullanarak üretilen ilk ofis 2016 yılında Dubai'de inşa edilen ofis olmuştur. Ofis binasının yapımında WinSun teknolojisi kullanılmıştır. Burada duvarlar ve levhalar, yan taraflarına katman katman basılmıştır ve ardından dikey olarak eğilmiştir. Bu bina 250 m²'lik tek katlı bir bina olmuştur ve Gensler tarafından Dubai Gelecek Vakfı'nın (DFF) genel merkezi olarak Birleşik Arap Emirlikleri Ulusal Komitesi için tasarlanmıştır. Bu ofis binasının yapım süreci 17 gün olmuştur ve maliyeti ise 140.000 \$ maliyet civarında olmuştur. Çin ve Birleşik Krallık'ta güvenilirlik açısından

test edildikten sonra özel bir çimento karışımı kullanılmıştır. Ofisin stabilitesini garanti etmek için ark şekli uygulanmıştır (Allouzi ve ark., 2020).

5.30.3. Suudi Arabistan Projesi

2017 yılında WinSun şirketi, Riyad merkezli Al-Mobty Contracting Firması ile 1,5 milyar dolarlık bir anlaşma imzalamıştır. Anlaşma şartlarına göre WinSun, 30 milyon metrekarelik 3 boyutlu beton baskılı inşaat alanına eşit olan 1,5 milyon uygun fiyatlı ev inşa etmek için Al-Mobty'ye yüz adet 3 boyutlu yazıcı kiralamıştır. Suudi Arabistan'daki ciddi konut krizine çözüm 3 boyutlu beton baskı teknolojisi olmuştur. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi, konvansiyonel inşaat yöntemlerine göre çok daha uygun maliyetli olmuştur. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde daha az malzeme kullanımı, daha az işçilik gerektirir ve daha hızlı yapım söz konusu olmaktadır (Allouzi ve ark., 2020).

5.30.4. 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi ile Üretilmiş Yaya Beton Köprüsü

İlk 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilmiş beton yaya köprüsü İspanya'nın Alcobendas şehrinde yapılmıştır. Köprü açıklık uzunluğu 12 metre, genişliği ise 1,75 metre olmuştur. Birbirine uyan 8 ayrı parçadan yapılmıştır. Bu projede, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile üretilen betonun kalıp gerektirmemesi, esneklik ve herhangi bir şekle uyarlanabilirlik ve inanılmaz derecede sağlam bir mimari tasarım gibi avantajları ön plana çıkmıştır (Allouzi ve ark., 2020).

5.30.5. Ürdün'de 3 Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi Uygulamaları

Ürdün'deki mimari mirasın korunması dikkate alındığında, Ürdün'de bir milyondan fazla mülteciye barınak sağlanması elzemdir. Ayrıca, Yeni Amman Şehri projesi, şehir planlama aşamasında dahil edilecek böyle bir prosedürü gerektirmektedir. Sonuç olarak yapı sektöründe 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin kullanımı önemli bir hal almıştır. Ekipman maliyeti tüm proje için yazıcının boyutuna bağlı olmaktadır. BetAbram iki yazıcı üzerinde çalışmaktadır. 2x12x6 m yazıcı yaklaşık 27000\$, 2x16x9 m yazıcı ise 44000\$'a satılacaktır. Yüklenicinin bir çok yapıyı basmak için kullanılacak böyle bir yazıcıya sahip olması beklendiği için buna bağlı olarak ekipman maliyeti makul görülmüştür. Ayrıca bu maliyet, daha az kullanımdan kaynaklanan maliyet tasarrufuna

kıyasla makul görülmektedir. Resim 5.11’de çelik ile dıştan bağlanan basılı segmentlerden oluşan betonarme kirişler sunulmuştur (Allouzi ve ark., 2020).



Resim 5.11. Çelik ile dıştan bağlanan basılı segmentlerden oluşan betonarme kirişler

Yerel Vaka Çalışması ve Simülasyon Süreci

Bu bölüm, Ürdün'deki inşaat yapım tekniklerini ve malzemelerini özetlemektedir. Diğer yandan bu bölümde Ras Alain Çok Amaçlı Salon'un beton işleri ve maliyeti ile ilgili seçilmiş örnek olay incelemesi analiz edilmiştir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin etki mekanizması, Ras Alain Çok Amaçlı Salon'da uygulanarak gösterilmektedir. Başlangıçta Ras Alain Çok Amaçlı Salonunun önerilen modeli Revit yazılımında oluşturulmuştur. Daha sonra model, nozulun yolunu temsil eden önceden tanımlanmış malzeme biriktirme yolunu oluşturmak için stereolitografi dosyasına (STL) dönüştürülerek katmanlara bölünmüştür. Ayrıca, araştırmacılar 3 boyutlu beton baskı teknolojisini araştırmışlardır ve Ras Alain Çok Amaçlı Salon ile ilgili tasarım ve beton maliyetine ilişkin geleneksel inşaat verilerini, aynı bina 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile inşa edilmişse beklenen verilerle karşılaştırarak 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin etkisi hakkında kesin bir görüntü üretmişlerdir. Genel olarak, 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin maliyet avantajları, inşaat süresini, inşaat atığını, tüm binada bulunan enerjiyi ve geleneksel inşaat araçları ve geleneksel çerçeve gibi geleneksel gereksinimleri en aza indirme kabiliyeti açısından ölçülmektedir. Maliyet tasarrufu, yazıcının günler boyunca metrekare başına üç dakikalık bir oranla sürekli çalışmasından kaynaklanmaktadır. İnşaat süresi tasarrufu sayısallaştırılmamıştır. Bu çalışmada tasarım değişikliğine ve malzeme maliyeti tasarrufuna odaklanılmıştır (Allouzi ve ark., 2020).

Seçilmiş Vaka Çalışması: Ras Alain Çok Amaçlı Salon

Bu bölümde, Ürdün'deki konvansiyonel yapıyı analiz etmek için Ras Alain Çok Amaçlı Salonu'nun analitik bir çalışması yapılmıştır. Ayrıca, aynı bina 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanılarak inşa edilmişse, malzeme maliyeti ile maliyeti karşılaştırmak için Amman Büyükşehir Belediyesi'nden mimari ve yapısal çizimler toplanmıştır ve analiz

edilmiştir. Ohud Güneydoğu Amman'da yer alan Ras Alain Çok Amaçlı Salonu, geleneksel form, taş kaplama ve beton konstrüksiyona sahip tek katlı bir yapı olarak vurgulanmıştır. Ayrıca, daha iyi devlet projelerinin daha düşük maliyet ve daha hızlı sürede inşa edilebilmesi için 3 boyutlu beton baskı teknolojisini uygulayan hedef grup olan devlete ait bir kamu binasıdır. Binanın toplam alanı 350 metrekare (m²) dir. Ayrıca 477 m² dış duvar alanı ve 438 metreküp (m³) toplam beton hacmine sahiptir. Greater Amman'a göre maliyet 240.716 Ürdün Dinarı'na (JD) mal olmuştur. Belediye Binası, Revit yazılımı kullanılarak modellenmiştir ve her bölge, işlevine göre ayrı bir bölge olarak temsil edilmiştir. Öncelikle dış duvarlar, iç duvarlar ve betonarme işlerin zemin kotu üzerindeki inşaat işleri anlatılmıştır. Ardından malzeme metrajı ve maliyet tahmini yapılmıştır (Allouzi ve ark., 2020).

Beton İşleri

Taşın arkasındaki dış duvarlar için 20 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanılmaktadır. Merdivenler ve döşemeler için 25 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanımı tercih edilmektedir. Kolon, döşeme, kiriş ve merdivenlerin betonarme elemanları için ise 30 MPa basınç dayanımına sahip bir beton kullanılmaktadır (Allouzi ve ark., 2020).

Dış Duvarlar

Ras Alain Çok Amaçlı Salonun dış duvarı, içten dışa 10 cm'lik sıvalı içi boş beton blok duvar, 3 cm'lik ekstrüde polistren yalıtım ve 17 cm'lik beton tabakaya eklenmiş 5 cm'lik taş kaplamadan oluşan geleneksel bir duvar olarak belirtilmiştir (Allouzi ve ark., 2020).

İç Duvarlar

Ras Alain Çok Amaçlı Salonun iç duvarları 10 cm ve 20 cm kalınlığında içi boş beton bloktan yapılmıştır (Allouzi ve ark., 2020).

Yapım Problemleri

Ras Alain Çok Amaçlı Salonun inşaatı sırasında aşağıdaki sorunlarla karşılaşmıştır (Allouzi ve ark., 2020):

- Korumasız kenarlar, kötü iskele yapısı ve portatif merdiven kullanılmaması nedeniyle düşme kazaları yaşanmıştır.

- Toplam beton hacmi 438 m³ olmasına rağmen müteahhit 455 m³ beton tüketmiştir. 17 m³ beton boşa gitmiştir.
- Yavaş işçilik nedeniyle inşaatın tamamlanması bir hafta gecikmiştir.

Malzemenin Maliyeti

Bu kısım, her bir dış duvarın, iç duvarın ve beton elemanın maliyetini hesaplamaktadır. Ras Alain Çok Amaçlı Salonun zemin kotu üzerindeki inşaat işlerinin toplam maliyeti 57.947 JD Ürdün Dinarı olmuştur (Allouzi ve ark., 2020).

Boyutlu Beton Baskı Teknolojisi ile Ras Alain Çok Amaçlı Salon Yapımı

Bu bölümde yapı, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi sürecine uyum sağlamak için yeniden tasarlanmıştır. İnşaat işleri miktarları Revit yazılımı ile hesaplanmıştır. Tahmini maliyet daha sonra aynı yapı için konvansiyonel yapım yöntemi kullanılarak inşa edildiğinde bir önceki bölümde hesaplanan maliyetle karşılaştırılmıştır. 3 boyutlu yazdırma işlemi, temel olarak, model STL dosyasına dönüştürüldükten ve takım yolu tanımlandıktan sonra yapım süreci ve süresinin değerlendirilebileceği yazıcının nozül yolunu tanımlayan önceden tanımlanmış malzeme biriktirme yoluna dayanmaktadır. Bina modeli önce STL dosyasına dönüştürülmektedir ve siparişi 3 boyutlu yazıcıya göndermek için katmanlara dilimlenmektedir. Tek bir katmanın düzeni, kenar ve köşelerden oluşan bir modele dönüştürülmektedir. Kenarlar duvarları temsil etmektedir ve köşeler kesişme noktalarını, köşeleri veya duvar parçalarının bitiş noktalarını temsil etmektedir. Ras Alain Çok Amaçlı Salon örneğinde, 3 boyutlu yazdırma süreci şu şekilde özetlenmiştir (Allouzi ve ark., 2020):

- Ras Alain Çok Amaçlı Salonun 3 boyutlu modeli Revit yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur.
- Revit için STL dış aktarıcı kurulmuştur.
- Görünürlük grafiklerinde, pencere ve kapılar gibi yazdırma için gerekmeyecek ekstra kategoriler kapatılmıştır.
- Revit'teki Eklentiler sekmesinden, Revit düğmesi için STL dış aktarıcı seçilmiştir.

- STL'yi Dışa Aktar iletişim kutusundan kutusunda, STL formatı ikili olarak ayarlanmıştır ve ardından STL dosyasını adlandırmak ve dışa aktarmak için kaydet düğmesi seçilmiştir.
- Model STL dosyasına dönüştürülmüştür ve katmanlara dilimlenmiştir.

3 boyutlu baskı teknolojisi ile yazdırma sürecinde baskı emri, tüm yapı basılana kadar sırasıyla katmanların yazdırılacağı 3 boyutlu yazıcıya gönderilmelidir. Sonuç olarak, Ras Alain Çok Amaçlı Salonun 3 boyutlu baskı teknolojisi ile sahada yapılması beklenen inşaat aşamaları, Revit sonuçlarına dayalı olarak gösterilmektedir (Allouzi ve ark., 2020).

Beton Malzemesi

Ras Alain Çok Amaçlı Salon örneğinde, yapının kalitesini korurken beton döküm sürecini hızlandırmak ve vibrasyona ihtiyaç duymamak için kendiliğinden yerleşen beton kullanılmıştır. Öte yandan, ekstrüde kendiliğinden yerleşen beton, beton karışımının kohezyonunu iyileştiren lifler kullanarak kalıp, agrega ve inşaat demiri sorununu ele almıştır. Ekstrüde kendiliğinden yerleşen beton, dış duvarlar, iç duvarlar, döşemeler, kirişler, sütunlar ve merdivenler için kullanılmıştır (Allouzi ve ark., 2020).

Çerçeve

İlk önce 12 m'lik döşeme seviyesini desteklemek için çelik çerçeveler inşa edilmiştir. Çelik çerçeveler yerine çelik bir birbirine bağlanan 3 boyutlu baskılı kiriş segmentlerini kullanmak için bir kılavuzun varlığı önemli hale gelmiştir (Allouzi ve ark., 2020).

Dış Duvar

Ras Alain Çok Amaçlı Salonun dış duvarı ayrı kalıp malzemeleri kullanılmadan 3 boyutlu baskı teknolojisi ile yapılmıştır. Konvansiyonel betonla inşa edilen dış duvarlardan üç kat daha güçlü olan içi boş çekirdek duvarları oluşturmak için kendiliğinden yerleşen beton katmanları kademeli olarak inşa edilmiştir. Ek olarak, bu duvarlar aynı anda sıhhi tesisat ve elektrik armatürleri ve hatta altyapı boruları eklemek için özelleştirilebilmiştir. 30 cm kalınlığı oluşturmak için nozül, dış kenarları 5 cm kalınlığında oluşturmuştur, ardından merkezi eksenlerin 2,5 cm kalınlığını oluşturmuştur ve son olarak merkezi eksenlerin iki yanında 2,5 cm kalınlığında zikzak çizgisi oluşturmuştur. Tüm duvarlar yapıldıktan sonra üzeri taşla kaplanmıştır (Allouzi ve ark., 2020).

İç Duvar

Ras Alain Çok Amaçlı Salonun 3 boyutlu baskı ile iç duvarı iki tipte inşa edilmiştir: Birinci tip 10 cm kalınlığında masif çekirdekli duvar olmuştur. İkinci tip ise 15 cm kalınlığında içi boş bir duvar olup, burada ekstrüzyon nozulu 2,5 cm kalınlığında dış kenarları oluşturmuştur ve ardından duvarın bütünlüğünü sağlamak için 2,5 cm kalınlığında zikzak çizgi oluşturmuştur (Allouzi ve ark., 2020).

Lentolar

Önce lentolar basılmıştır ve sırayla her açıklığın üzerine yerleştirilmek üzere binanın kenarına yerleştirilmiştir. Daha sonra robotik kollar her bir lentoyu tutmuştur ve gerekli duvar katmanları basıldıktan sonra doğru yere yerleştirmiştir. Son olarak, nozul, lentolar arasına beton katmanları yerleştirmeye devam etmiştir ve döşeme seviyesine kadar üzerlerine beton yerleştirmeye devam etmiştir (Allouzi ve ark., 2020).

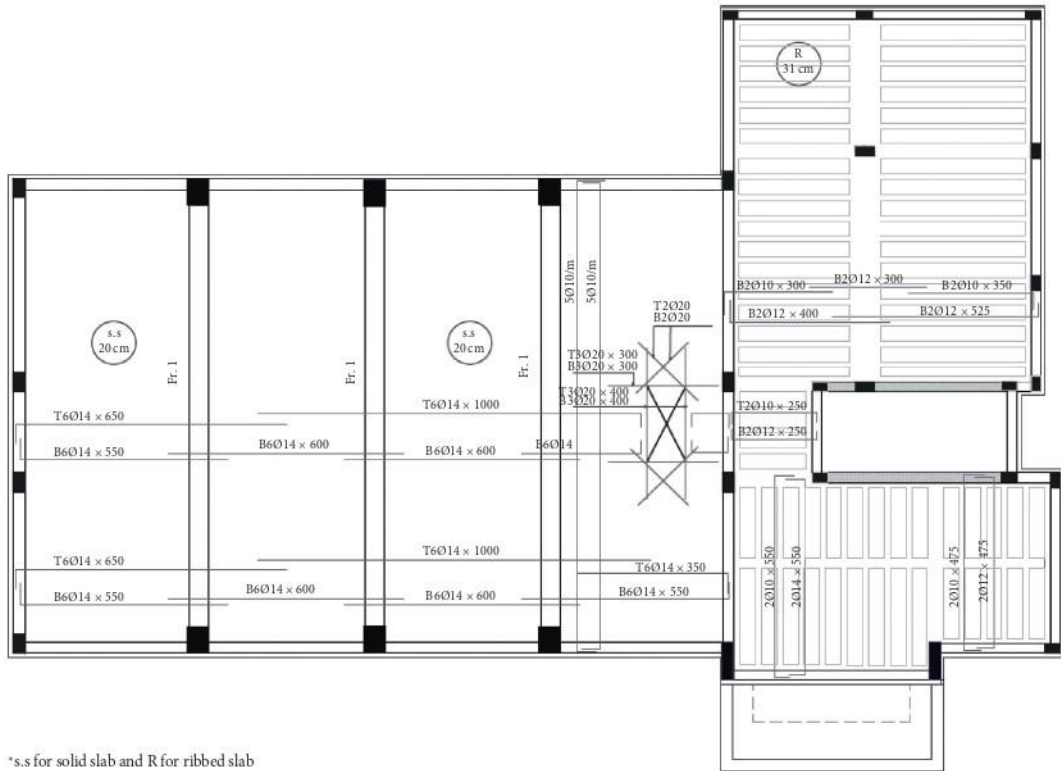
Döşemeler

Halihazırda 3 boyutlu baskılı kirişlere eklenmiş ince çelik levhalar önce hazırlanmıştır ve yazıcının bir kenarına yerleştirilmiştir. Daha sonra bu levhalar eklenmiş kirişler robot kollar tarafından alınmıştır ve döşeme hizasına duvarların düşey donatısı bu çelik levhaların kenarlarındaki deliklerden geçecek şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra çelik levhaları duvar takviyelerine sıkıştırmak için vidalar yerleştirilmiştir ve döndürülmüştür. Son olarak, 3 boyutlu yazıcı, levhayı bitirmek için düzenlenmiş kirişlerin üstüne beton uygulaması yapabilmıştır (Allouzi ve ark., 2020).

Malzeme Maliyeti

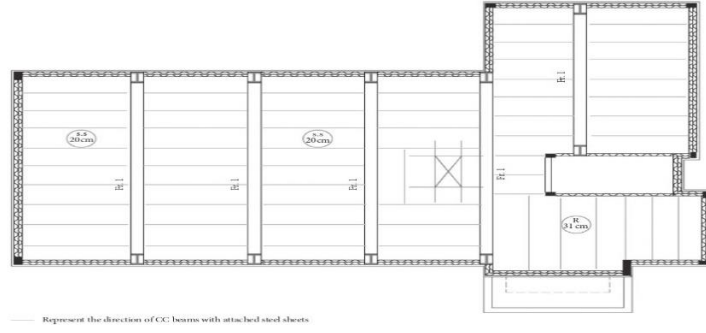
Dış duvarların, iç duvarların ve beton elemanların yer üstü seviyesini oluşturan malzemelerin miktarları Revit kullanılarak hesaplanmıştır. Toplam miktar 325 m³'e eşittir ve 3 boyutlu baskı teknolojisi ile inşa edilen ekstrüde kendiliğinden yerleşen betonun maliyetinin m³ başına yaklaşık 27.3 Ürdün Dinarı JD olduğu tahmin edilmektedir. Beton malzemenin toplam maliyetinin 8872,5 Ürdün Dinarına (JD) eşit olduğu belirtilmiştir. Ürdün'deki bir yapıda konvansiyonel inşaata alternatif olarak 3 boyutlu baskı teknolojisinin uygulama etkinliği araştırılmıştır. Analiz yapıldığında 3 boyutlu baskı teknolojisi ile inşa edilen Ras Alain Çok Amaçlı Salonun, taş kaplama ve yalıtım işleri hariç 8.872,5 Ürdün Dinarına (JD) mal olduğu belirtilmiştir. Aksine, konvansiyonel yapım teknolojisi ile 57.947 Ürdün Dinarına (JD) mal olduğu vurgulanmıştır. İki yapım

teknolojisi karşılaştırıldığında taş kaplama ve yalıtım işleri hariç konvansiyonel yapım teknolojisi ile inşaat yapımının $57.947 - 2.560 - 2.7950 - 1.150 = 26.287$ Ürdün Dinarına (JD) eşit olduğu belirtilmiştir. Öyle ki, Ras Alain Çok Amaçlı Salon için 8.872,5 Ürdün Dinarına (JD) eşit olan 3 boyutlu baskıya dayalı beton maliyeti, 26.287 Ürdün Dinarına (JD) eşit olan konvansiyonel yapım teknolojisi ile ortaya konulan inşaat maliyetinden daha düşüktür. Sonuç olarak, 3 boyutlu baskı, Ürdün'de uygulandığı takdirde, konvansiyonel yapım teknolojisi ile ortaya konulan inşaat malzemesi maliyetinin % 65'ini azaltmaktadır. Proje (sadece bu bina için değil) için gerekli yazıcı boyutu ve hızına ve bu belgede belirtilmeyen gün içindeki çalışma saatlerine bağlı olduğundan, ekipman maliyeti, yapım süresi ve işçilik maliyetleri burada hesaplanmamıştır. Bu çalışma, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi ile yapımdaki gelişmelerin kapsamlı bir incelemesini ortaya koymuştur. Bu araştırma, konvansiyonel yapım teknolojisi ile ortaya konulan bir yapıya alternatif bir inşaat yöntemi (3 boyutlu baskı) sunmuştur. 3 boyutlu yazdırma özellikleri, 3 boyutlu yazdırmanın konvansiyonel çözümlerin getirdiği sorunları nasıl çözdüğünü vurgulamak için özetlenmiştir. Şekil 5.12'de konvansiyonel yapım planı görülmektedir (Allouzi ve ark., 2020).



Şekil 5.12. Konvansiyonel Yapım Planı (Allouzi ve ark., 2020)

Ekonomik olarak 3 boyutlu beton baskı teknolojisi, karmaşık elemanlar ve düşük işçilik maliyetleri için daha hızlı ve daha doğru bir inşaat yöntemidir ve sıfır atık oluşturmaktadır. Metrekare başına yaklaşık üç dakikalık bir inşaat hızında, mütevazı büyüklükteki 230 metrekarelik (m^2) bir ev, yaklaşık dört kişilik bir işgücü ile yaklaşık 18 veya 19 saatte inşa edilebilmektedir. 3 boyutlu baskı teknolojisi, mimari esneklik ve yüksek hassasiyetle geleneksel prosedürlerin yapamadığı şekilleri elde edebildiğinden, mimari olarak daha verimli ve ilginç tasarımlar yaratabilmektedir. Çevre açısından, 3 boyutlu beton baskı teknolojisi, tüketilen ham maddeleri, üretilen CO₂ emisyonunu ve tüketilen somutlaşmış enerjiyi azaltan sürdürülebilir bir süreç olarak kabul edilebilmektedir. Yapısal olarak, betonun düşük çekme dayanımını ve beton katmanları arasındaki düşük bağ direncini aşmak için malzeme seçimi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada basılı yapılara ilişkin dört örnek olay incelemesi sunulmuştur. Çin'de, devasa bir 3 boyutlu yazıcıyla 24 saatte on ev basılmıştır. Her ev yaklaşık 100 m² olmuştur. Hızlı süreç ve düşük işçilik maliyetleri nedeniyle her bir küçük konutun maliyeti 5.000 \$'dan az olmuştur. Çinde bu konutları yapan şirket 3 boyutlu beton baskı teknolojisini kullanarak altı katlı bir apartman yapmıştır. Konvansiyonel yapım teknolojisi ile üretilen inşaata kıyasla % 70 zaman tasarrufu sağlayan bir ev inşa etmek için malzemelerin % 60'ına ihtiyaç duyulmaktadır. Dubai'de bir ofis, WinSun firmasınınca zeminin, duvarların ve tavanın hepsi katman katman basılmıştır ve ardından dikey olarak eğildiği tilt-up teknolojisi kullanılmıştır. 250 m²'lik ofis 17 gün içinde 140.000 \$ maliyetle inşa edilmiştir ve tamamlanmıştır. Maliyet, benzer büyüklükteki konvansiyonel yapım teknolojisi ile yapılmış binalara kıyasla % 50'den fazla azalmıştır. WinSun şirketi, vatandaşlarının ciddi bir barınma sorunu yaşadığı Suudi Arabistan'da 1,5 milyon konut inşa etmesi için Al-Mobty'ye 100 adet 3 boyutlu yazıcı kiralamak üzere anlaşma imzalamıştır. İlk 3 boyutlu baskılı beton yaya köprüsü İspanya'nın Alcobendas şehrinde yapılmıştır. Köprü açıklık uzunluğu 12 metre, genişliği 1,75 metre olmuştur. Köprü birbirine oturan 8 ayrı parçadan inşa edilmiştir. Ürdün'de, mülteciler için barınak sağlanması ve Yeni Amman Şehri projesinin planlanması, bu araştırmaya, çevresel ve mimari faydaların yanı sıra, zamandan ve inşaat maliyetinden tasarruf etmek için 3 boyutlu beton baskı teknolojisini kullanma konusunda ilham verdi. Müteahhitlerin birçok farklı yapıyı inşa etmek için 3 boyutlu yazıcı kullanmaları beklendiğinden, ekipman maliyeti makul sayılabilmektedir. Şekil 5.13'te Kontur İşçiliği yapımı planı sunulmuştur (Allouzi ve ark., 2020).



Şekil 5.13. Kontur İşçiliği yapım planı (Allouzi ve ark., 2020)

Daha sonra model, nozulun yolunu temsil eden önceden tanımlanmış malzeme biriktirme yolunu oluşturmak için stereolitografi (STL) dosyasına dönüştürülerek katmanlara bölünmüştür. Bu çalışmada Ras Alain Çok Amaçlı Salon miktarlarıyla ilgili konvansiyonel yapım teknolojisi ile yapılan inşaat verilerini ve aynı bina 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanılarak inşa edilmişse beklenen verileri karşılaştırarak 3 boyutlu baskının etkisine ilişkin kesin bir görüntü oluşturmuştur. Ras Alain Çok Amaçlı Salon için aynı inşaat işleri için yapılan bu karşılaştırma sonucunda, 3 boyutlu baskı teknolojisinin Ürdün'de konvansiyonel yapım teknolojisi maliyetinin % 65'ini azalttığı vurgulanmıştır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin bir afet sırasında evler, kuleler, köprüler ve acil durum sığınakları için kullanılabileceği özellikle belirtilebilecek hususlardandır (Allouzi ve ark., 2020).

Bu çalışmada inşaat süresini ve maliyetini azaltma kabiliyetine göre 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin konvansiyonel yapım teknolojisine göre alternatif olarak uygulanabileceği vurgulanmıştır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin kullanım zorunluluğunun yönetmeliklerde yer alması gerektiği belirtilmiştir. Müteahhitler ve mühendisler için 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin teşvik edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Mühendislik öğrencilerine 3 boyutlu beton baskı teknolojisi süreçleri hakkında ders verilmesi gerektiği belirtilmiştir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin potansiyel etkisini daha fazla değerlendirmek için gelecekteki yapılması planlanan çalışmaların önerilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Allouzi ve ark., 2020).

5.30.6. Güney Afrika’da Bilim ve Yenilik Departmanının (DSI) 3 Boyutlu Beton

Baskı Teknolojisi Proje Programı ve Pilot Uygulaması

Bilim ve Yenilik Departmanı (DSI), Güney Afrika'da insan yerleşimleri için sürdürülebilir bir program başlatmıştır ve 3 boyutlu beton baskı teknolojilerinin pilot uygulaması ve gösterimi için çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bilim ve Yenilik Departmanı (DSI), 3 boyutlu beton baskı teknolojisini ülkedeki konut tesliminde devrim yaratma potansiyeline sahip dönüştürücü bir teknoloji olarak tanımlamıştır. Bu programın amacı, ev inşaatı için çevreye duyarlı ve yıkıcı olmayan 3 boyutlu beton baskı teknolojilerinin transferini teşvik etmek, kolaylaştırmak ve finanse etmek olmuştur. Ayrıca, “know-how” transfer etmek ve yerel kapasitelerin ve teknolojilerin geliştirilmesini ve güçlendirilmesini desteklemek de önem taşıyan bir husus haline gelmiştir. Bu teknolojilerin pilot uygulaması ve gösterimi, çeşitli mimari tipolojiler kullanılarak en az 50 evin 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımı ile yazdırılmasını içermiştir. Johannesburg Üniversitesi (UJ) bir rapor hazırlamıştır. Bu raporda 3 boyutlu beton baskı teknolojileri ve konvansiyonel yapım yöntemleri (tuğla ve harç) arasında karşılaştırmalı bir maliyet analizi yapmak için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ülkedeki kapsamlı sosyal konut birikimi göz önüne alındığında, Güney Afrika hükümetinin insan yerleşimlerini etkili ve verimli bir şekilde sağlamak için sürdürülebilir bir 3 boyutlu beton baskı teknolojisi programını ön plana çıkarması zaruri hale gelmiştir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde konvansiyonel yapım yöntemine göre daha hızlı yapım söz konusu olmaktadır. Yerel işgücü istihdamını (sayı ve zaman olarak) azaltması ve yerel ekonomiye katkısı (yerel malzeme satın alma ve yerel işgücü istihdamı) azaltması bu teknolojinin dezavantajları arasında sayılabilmektedir. Sonuç olarak 3 boyutlu beton baskı teknolojsinin zaman ve maliyet açısından avantajlarını ölçmek zorunlu hale gelmiştir. 3 boyutlu beton baskı teknolojsinin daha az yerel iş gücü istihdam edip etmediğini ve yerel ekonomiye daha az katkısı olup olmadığını da belirlemek gerekmektedir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi konvansiyonel yapım teknolojisine göre avantajlar içermektedir. Örneğin konvansiyonel yapım yönteminde 60 metrekarelik dış duvarların ve 31 metrekarelik iç duvarların sadece üst yapısını inşa etmek için en az 4 işçiye ihtiyaç duyulmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde ise 2 kişi yeterli olabilecektir. Ayrıca hızlı yapımdan dolayı inşaat süresi de azalmış olacaktır. Bu teknolojide kullanılan 3 boyutlu baskı sistemine ve duvarın kalınlığına bağlı olarak

minimum 300 mm/s gibi bir hız söz konusu olmaktadır. Bu hızla tüm duvar sistemini basmak için en az beş saat süre yeterli olmaktadır. Johannesburg Üniversitesi (UJ) Bilim ve Yenilik Departmanı (DSI) tarafından yaptırılan evler ile ilgili kapsamlı bir rapor hazırlamıştır. Bu raporda konvansiyonel yapım yöntemi ile 3 boyutlu beton baskı teknolojisi arasında karşılaştırmalı bir maliyet analizi gerçekleştirilmiştir (Ntakana ve ark.).

Proje Geçmişi

DSI, Güney Afrika'da sürdürülebilir insan yerleşimleri için 3 boyutlu baskı teknolojilerinin pilot uygulaması ve gösterimi için bir program başlatmıştır. DSI, 3 boyutlu baskı teknolojisini ülkedeki konut tesliminde devrim yaratma potansiyeline sahip dönüştürücü bir teknoloji olarak tanımlamıştır. Bu programın amacı, ev inşaatı için çevreye duyarlı ve yıkıcı olmayan 3 boyutlu baskı teknoloji transferini teşvik etmek, kolaylaştırmak ve finanse etmektir. Ayrıca, “know-how” transfer etmek ve yerel kapasitelerin ve teknolojilerin geliştirilmesini ve güçlendirilmesini desteklemektir. Bu teknolojilerin pilot uygulaması ve gösterimi, çeşitli mimari tipolojiler kullanılarak en az 50 evin 3 boyutlu baskısını içermektedir. Johannesburg Üniversitesi, hangi teknolojinin pilot olarak kullanılacağını belirlerken, 3 boyutlu baskı teknolojisinin konvansiyonel inşaa yöntemi kadar iyi olup olmadığı bağlamında temel kriterler belirlemiştir. Bu kriterler daha hızlı yapım, düşük yapım maliyeti, kolay bakım, iş yaratma potansiyeli olarak vurgulanmıştır (Ntakana ve ark.).

Bilim ve Yenilik Bölümü

Bilim ve Yenilik Bölümü Johannesburg Üniversitesi'nin proje işbirlikçisi ve fon sağlayıcısıdır (Ntakana ve ark.).

Johannesburg Üniversitesi

DSI ile iş birliği içinde araştırma ekibi söz konusu olmuştur (Ntakana ve ark.).

Yaşam Döngüsü Maliyetlemesinin Arka Planı

Johannesburg Üniversitesi (UJ), DSI'ye Güney Afrika'da 3 boyutlu baskı teknolojilerinin uygulanmasına ilişkin tavsiyelerin önerildiği başka raporlar da sunmuştur. Bu raporlardan biri “3 boyutlu yazıcıların kullanılabilirliği” ile ilgili olup, uluslararası olarak mevcut 3 boyutlu yazıcıları tanımlamaktadır ve ayrıntılı bir maliyet ve işlevsel performans karşılaştırması yapmaktadır. Raporlarda belirtildiği gibi 3 boyutlu baskının

avantajlarından biri, 3 boyutlu baskı teknolojisinin konvansiyonel ev inşaatı yönteminden daha hızlı yapım imkanı sağlamasıdır. Ülkedeki kapsamlı sosyal konut birikimi göz önüne alındığında, Güney Afrika hükümetinin sürdürülebilir insan yerleşimlerini etkili ve verimli bir şekilde sağlamak için 3 boyutlu baskı teknolojisi de dahil olmak üzere yenilikçi seçenekleri keşfetmesi gerekmektedir. Bu raporlar ayrıca, 3 boyutlu baskı teknolojisinin yerel işgücü istihdamını azaltması ve yerel ekonomiye katkıyı azaltması olmak üzere iki dezavantajını vurgulamıştır. Sonuç olarak 3 boyutlu baskı teknolojisinin zaman ve maliyet avantajlarını ölçmek zorunlu hale gelmiştir. Ayrıca 3 boyutlu baskı teknolojisinde yerel emeğin ne ölçüde kullanıldığının ve yerel ekonominin büyümesine katkısının belirlenmesi gerekmektedir (Ntakana ve ark.).

5.30.6.4.1. Amaç İfadesi

Pilot projenin nihai hesabına dayalı olarak konvansiyonel yapım yöntemine kıyasla 3 boyutlu baskı teknolojilerinin maliyet ve zaman avantajının, işgücü katkısının ve yerel ekonomik katkısının nicel bir analizi ve değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca 3 boyutlu baskı teknolojisinin tüm yaşam döngüsü maliyet analizi yapılmıştır (Ntakana ve ark.).

Maliyet Karşılaştırmasının Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, insan yerleşimlerinin sağlanmasında 3 boyutlu baskı teknolojilerinin benimsenmesini destekleyen bilimsel kanıtlar sağlamaktır. Bu çalışmanın amaçları bina yöntemlerini karşılaştırmak için bir kıyaslama geliştirmek, 3 boyutlu baskı teknolojilerindeki yatırım fırsatlarını değerlendirmek, sosyal faydaları ölçmek ve inşaat yöntemlerinin uygulanabilirliği ve/veya tavsiye edilebilirliği hakkında makul sonuçlar geliştirmek olmuştur (Ntakana ve ark.).

Çalışmanın Kapsamı

Çalışmanın kapsamı, Nisan 2018 itibariyle insan yerleşimleri dairesi tarafından yayınlanan standart 40 metrekairelik konut yapımından oluşmaktadır (Ntakana ve ark.).

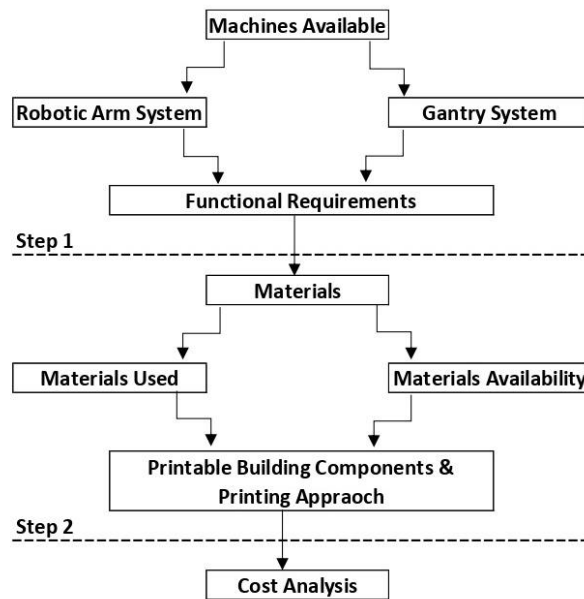
Tanımlar

3 boyutlu baskı teknolojisi şekil, boyut ve boyut olarak değişen nesneler oluşturmak için plastikler, kompozitler veya biyomalzemeler gibi malzemeleri katmanlayarak üç boyutlu nesneler oluşturmak için bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) olarak vurgulanabilmektedir. Kesin hesap, inşaat sözleşmesi tutarının (gerekli tüm düzeltmeler dahil) sonuçlandırılması anlamına gelmektedir ve işverenin yükleniciye ödeyeceği

üzerinde anlaşmaya varılan tutarı ifade etmektedir. Nihai özet ise inşaatçının işi, ön hazırlıklar, geçici meblağlar, birincil maliyet meblağları, olasılıklar ve KDV dahil olmak üzere inşaat projesi için öngörülen tüm maliyetlerin özeti anlamına gelmektedir (Ntakana ve ark.).

Metodoloji

Bu çalışma pilot bir 3 boyutlu baskı projesi için maliyet tasarruflarını belirlemeye yönelik bir ön nicel çalışmadır. Johannesburg Üniversitesi tarafından Bilim ve Yenilik Departmanı (DSI) için hazırlanan raporların birisinde (makine kullanılabilirlik raporu) 3 boyutlu baskı teknolojilerine ait iki sistem (robotik kol sistemi ve gantry sistemi) tanımlanmıştır. Aşağıdaki diyagramda gösterildiği gibi, bu çalışmadaki ilk adım, bu iki sistemin işlevselliğini ve üretimde yer alacak malzemelerin yerel olarak bulunup bulunmadığını anlamak olmuştur. İkinci adım ise bu iki sistemin hangi yapı bileşenlerini yazdırabileceğini ve evlerin basılmasında benimsenecek yol veya sistem yaklaşımının analiz edilmesi olmuştur. Makine bulunurluk raporunda, bu sistemlerin malzemenin yurt içinde bulunabilirliği ve bu pilot projenin geldiği seviye göz önünde bulundurularak sadece duvarlara baskı yapılabileceği tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu adımda, konvansiyonel tuğla ve harç kullanılarak ev yapım yöntemi ile maliyet merkezlerinin analizi karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Diğer yapı bileşenlerinin de yazdırılıp yazdırılamayacağı bu çalışmada değerlendirilmeye çalışılmıştır. Şekil 5.14'te metodolojik yaklaşım sunulmuştur (Ntakana ve ark.).



Şekil 5.14. Metodolojik Yaklaşım (Ntakana ve ark.)

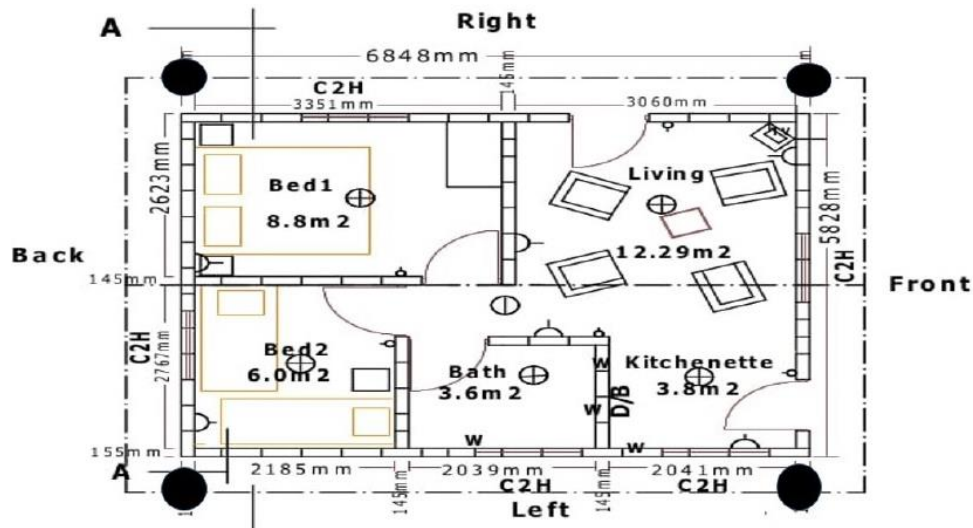
Metraj cetvellerinin (metraj) geleneksel yapısı kullanılmıştır. Çizelge 5.12'de sunulan bu metraj, ön ve genel, temellerden yüzey yataklarına, üstyapı (üst yapı veya beşik uçlar dahil duvar plakası seviyesine kadar duvarlar), çatılar (yapı ve kaplama), sıhhi tesisat (yağmur suyu tesisatı dahil), kapılar ve pencereler (çerçeveler, kaplamalar ve camlar dahil), duvar ve zemin kaplamaları ve elektrik tesisatını içermektedir. Son olarak, üçüncü adım verileri toplamak, harmanlamak ve sonuçları yorumlamak olmuştur (Ntakana ve ark.).

Çizelge 5.12. Düşük gelirli bir ev için standart metrajlar

Description	
Milestone 1: Foundations	
Milestone 2: Wallplates	
Milestone 3: Roofing	
Milestone 4: Rain Water Goods	
Milestone 5: Electrical	
Milestone 6: Ceiling	
Milestone 7: Painting	
Milestone 8: Aprons	
Milestone 9: Plaster	
Milestone 10: Doors	
Milestone 11: VIPToilet	

Dikkate alınan tipolojiler

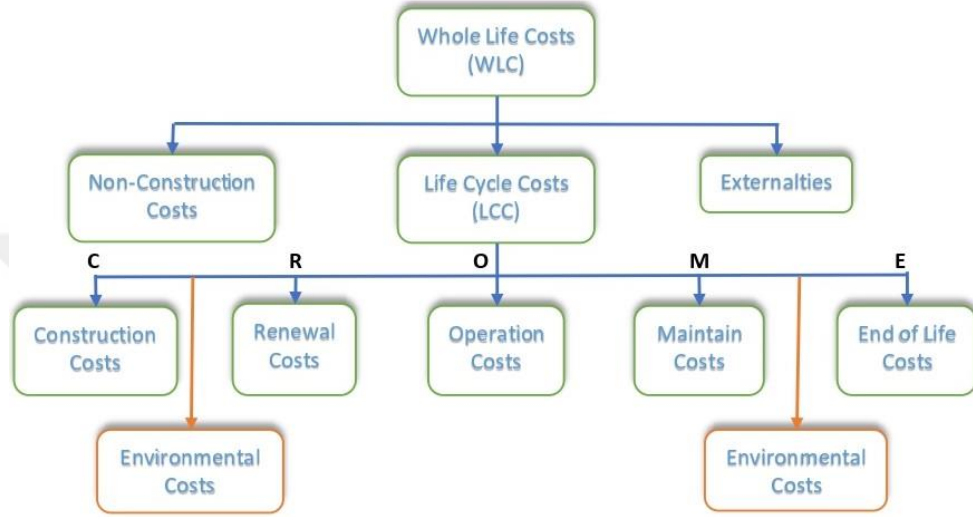
Bu çalışma için standart bir sübvansiyonlu ev planı seçilmiştir. Bu ev, aşağıdaki Şekil 5.15'te gösterildiği gibi iki yatak odası, bir banyo, bir oturma alanı ve bir mini mutfaktan oluşan 40 metrekarelik bir evdir (Ntakana ve ark.).



Şekil 5.15. Tipik sübvansiyon evi kat planı

Yaşam Döngüsü Maliyetlendirme Plan Yapısı

Yaygın bir yaşam döngüsü maliyeti (YDM) plan yapısı kullanılmaktadır ve bunun kullanılmasının yararı, müşteriler ve profesyoneller tarafından anlaşılan standart sunum ve benzer projelerin kolaylıkla karşılaştırılması ve kıyaslanmasıdır. Bu YDM için kullanılan kavramsal bir plan yapısı aşağıdaki Şekil 5.16'da sunulmuştur (Ntakana ve ark.).



Şekil 5.16. LCC Ön Plan Yapısı

Yukarıdaki maliyet merkezlerine dahil edilecek maliyetlerin kapsamı açık olmalıdır ve Bilim ve İnovasyon Bakanlığı ile mutabık kalınmalıdır. Yukarıdaki maliyet merkezleri aşağıdaki gibi ön maliyetleri içerecektir (Ntakana ve ark.):

- **İnşaat dışı maliyetler:** Arazi edinimi ile ilgili maliyetler, ücretler, ilgili yükümlülükler, vb.)
- **Dışsallıklar:** Bir varlıkla ilişkili olan ancak edinimin işlem maliyetlerine yansıtılmayan maliyetler (örneğin yeni bir su şebekesi), dolayısıyla bir maliyet oluşur ancak bu maliyet müşteri veya yüklenici tarafından karşılanmaz.
- **İnşaat maliyetleri:** Bunlar saha maliyetlerini veya halihazırda sahip olunan sahanın fırsat maliyetlerini içerir (örn. yasal ücretler, damga vergisi, vb. saha edinim maliyetleri değil).
- **Finansman masrafları:** Profesyonel ücretler; inşaat maliyetleri; vergi ödenekleri (sermaye ekipmanı ödeneği, sermaye kazancı, kurumlar vergisi, vb.); yasal masraflar; geliştirme hibeleri planlama kazancı; ve üçüncü taraf maliyetleri (örneğin ışık hakkı, aşırı yelken ücretleri, yol izinleri ve irtifak hakkı, vb.)

- **Çevresel maliyetler:** Geri dönüşüm, karbon emisyonları, yenilenebilir enerji vb. ile ilgili maliyetler. Bu maliyetler inşaat öncesinde ve sırasında ve bir varlığın elden çıkarılması öncesinde ve sırasında ortaya çıkabilir.
- **İşletme maliyetleri:** Genellikle yumuşak tesis yönetimi maliyetleri olarak adlandırılır; genellikle tesisin işletilmesi ve yönetilmesinde ortaya çıkan tüm maliyetler olarak yorumlanır (yani ücretler ve diğer yerel vergiler, atık yönetimi, sigortalar, enerji verimliliği, vb.)
- **Bakım maliyetleri (yenileme ve idame maliyetleri olarak ikiye ayrılır):** Genellikle sert tesis yönetimi maliyetleri olarak adlandırılır; genellikle varlığın belirtilen işlevsel performansının devamını sağlamak için yapılan tüm maliyetler olarak yorumlanır (yani yeniden dekorasyon, periyodik denetim faaliyeti, periyodik bakım ve bileşen değiştirme faaliyetleri, vb.)
- **Kullanım ömrü sonu maliyetleri:** Bu özellikle bertaraf ve yıkım maliyetlerini içerir. Yukarıdaki maliyetlerden bazıları bu LCC'ye dahil edilmemiştir. Bu bir ön LCC'dir, proje pilot olarak uygulandıktan ve tüm maliyetler belirlendikten sonra nihai bir LCC gerçekleştirilecek ve hatta plan yapısı revize edilebilecektir (Ntakana ve ark.).

Karşılaştırmalı Maliyet Analizi

Bina sistemlerinin güvenli, uygun ve verimli olarak kabul edilmesi için farklı Güney Afrika Ulusal Bina Yönetmelikleri performans gereklilikleri vardır. Bunlar iklim, malzeme mevcudiyeti, beceri mevcudiyeti, bina standartları ve sosyal kabul edilebilirlik ile ilgilidir. Bu nedenle, 3D baskılı devlet sübvansiyonlu evlerin performansı, titiz bir değerlendirme ve analizden önce Güney Afrika bağlamında değerlendirilmelidir. Bu raporda, bu evlerin tasarımı, teslimatı ve montajı, sonraki değerlendirmeleriyle birlikte ele alınmaktadır. Hem tasarım hem de inşa edilebilirlik Güney Afrika koşulları için değerlendirilmiştir (Ntakana ve ark.).

Pilot Proje

Bu bir ön karşılaştırmalı fayda-maliyet analizidir. İnsan Yerleşimleri Departmanı (DHS) tarafından yayınlanan bir konut sübvansiyonu ölçeği kullanılmıştır. DHS tarafından sunulan üç sübvansiyon kategorisi bulunmaktadır: standart 40 metrekarelik konutlar, engelliler için 45 metrekarelik konutlar ve gaziler için 50 metrekarelik konutlar.

Aşağıdaki Çizelge 5.13'te gösterildiği üzere, 3DCP'nin değer önerisine ilişkin sonuçları analiz etmek için 01 Nisan 2018 tarihi itibarıyla standart 40 metrekarelik bir konut için sübvansiyon miktarı kullanılmıştır (Ntakana ve ark.).

Çizelge 5.13. Geleneksel tuğla ve harçla inşa yönteminin nihai özeti

Housing Subsidy Quantum (with no variations)		
	Targeted Unit Cost	Total Amount
Contract Value	107,825.08	5,391,254.00
P&G Amount	9,041.92	452,096.00
	116,867.00	R 5,843,350.00
CONVENTIONAL COSTS OF CONSTRUCTION		
Foundations	30,129.58	1,506,478.75
Wall Plates\ Blockwork	23,414.03	1,170,701.30
Roofing	15,951.01	797,550.50
Finishes	21,934.64	1,096,731.98
Electrical	4,666.26	233,313.00
VIP Toilet	7,938.23	396,911.50
Tank Stand & Rain Water Goods	4,973.17	248,658.50
Sub-Total	109,006.91	5,450,345.53

Yukarıdaki çizelgeden, tüm ön hazırlıklar ve genel (P&Gs) dahil olmak üzere konut sübvansiyon miktarının (yalnızca inşaat maliyetleri) R116,867.00 olduğu görülmektedir. İnşaat malzemeleri maliyetleri ve hesaplanan işçilik dikkate alındığında, 2020/21 mali yılı itibarıyla inşaat maliyetleri 109.006,91 R olacaktır. Bu iki maliyet arasındaki fark, proje yönetimi, işlerin katibi, transfer maliyetleri ve yararlanıcı idaresi maliyetleridir (Ntakana ve ark.).

Standart Metrajlar

Bir inşaat projesi için farklı fiyatlandırma yöntemleri vardır. Genel olarak, yüklenicilerin fiyatı, aksi belirtilmedikçe, malzeme, işçilik, tesis, vergiler, genel giderler ve kârı içerir. Bununla birlikte, inşaat maliyetleri üç ana maliyet merkezinde yer alır: ön hazırlık ve genel, malzeme ve işçilik. Keşif bedelinin fiyatlandırılmasında, yüklenicinin keşif bedelinde öngörülen yapılacak iş miktarının yanında bir ücret oranı doldurması gerekmektedir. İşin fiyatı, miktarın yüklenici tarafından öngörülen oranla çarpılmasıyla belirlenecektir. Bu oran, ilgili ön hazırlıkları ve genel, malzeme ve işçilik maliyetlerini

içerecektir. Metraj, temeller/alt yapı ile başlayıp üst yapı, çatı montajı, hizmetler, bitişler ve dış işler ile ilerleyerek binanın çeşitli bileşenlerine göre yapılandırılmıştır. Aşağıdaki bölümlerde, 3D baskı maliyetlerinin nerelerde tasarruf sağlayabileceğini değerlendirmek için bu bina bileşenleri ayrıntılı olarak tanımlanmaktadır (Ntakana ve ark.).

Ön Hazırlık ve Genel

Ön hazırlıklar, yüklenici tarafından şantiyenin kurulması, şantiye yönetimi vb. hususları içerir. Teklif dosyasının bu bölümünün fiyatlandırılmasında, yüklenicilerin söz konusu projenin ilgili kalemlerini ayrı ayrı fiyatlandırmaları gerekmektedir. İlgili idari maliyetlerin kapsamı doğrudan projenin süresiyle ilgilidir: yüklenicinin sahada bir ofis tutması ne kadar uzun sürerse, ön hazırlık maliyetleri de o kadar artar. 3D baskı açısından, baskı gerçekleşmeden önce makinelerin montajı ve kalibrasyonu ve daha sonra makinenin sökülmesi ve temizlenmesi dikkate alınmalıdır. Daha sonra projenin nihai hesabında düzeltilmesi gerekecek olan ve ön hazırlık niteliğinde olmayan diğer maliyetler arasında geçici toplam ve ana maliyet toplamaları yer almaktadır. Bunlar, ihale sırasında uzmanlık gerektiren ya da tam olarak belgelenmemiş işleri karşılamak üzere keşfe konulan tutarlardır. Ayrıca, bütçe ödenekleri kâr, atanmış veya seçilmiş alt yüklenicilerin katılımı, ayrı bir sözleşme kapsamında yürütülen işlerin yerinde teslim alınması, koordinasyon ve seçilmiş veya atanmış alt yüklenicilerin sayısını kapsamaktadır. 3D makinelerin bir evi basması için beklenen süreyle birlikte, maliyet tasarruflarının çoğunun maliyet merkezinde tahakkuk etmesi de beklenmektedir (Ntakana ve ark.).

Altyapı/Temeller

Herhangi bir bina projesi için alt yapı, ilgili toprak işleri, beton, kalıp, takviye, duvar ve su yalıtımını içerir. Evin inşa edildiği toprağın yapısına bağlı olarak, Güney Afrika'daki düşük gelirli konut stokunun çoğu için normalde bir radye temel kullanılır. Bu temel türü beton, kalıp, takviye ve su geçirmezlikten oluşur ve basılması çok mümkündür. Beton, 3D baskı için kullanılan katkı maddelerine kıyasla pahalıdır. Dolayısıyla maliyet tasarrufu bu maliyet merkezinde de tahakkuk edecektir. Şerit temel, beton, kalıp, donatı, su yalıtımı ve duvardan oluşan düşük gelirli konutlar için kullanılabilecek bir başka temel türüdür. Gelecekte, bu tür bir temelin basılması halinde, maliyet tasarrufu da sağlanabilecektir (Ntakana ve ark.).

Üstyapı

Üst yapı, bitiş kat seviyesinden beşik uçlar dahil duvar plakası yüksekliğine kadar duvarları içerir. Çoğu 3D baskı projesi bu çok basit bina bileşeni üzerinde test edilmiştir. Araştırmalar, çoğu 3D baskı makinesinin yalnızca duvar sistemini basabildiğini ortaya koymaktadır. Basılabilecek başka bina bileşenlerinin de olup olmadığını araştırmaya ve doğrulamaya ihtiyaç vardır (Ntakana ve ark.).

Çatı İnşaatı

Çatı konstrüksiyonu, çatı yapısını (çelik veya ahşap makaslar, aşıklar veya çiteler ve destekler), çatı kaplamasını (kiremit veya oluklu demir) ve yağmur suyu donanımlarını (ön paneller, mavna panelleri, oluklar ve iniş boruları) içerir. Sonuncusu geleneksel çatı yapım yöntemleridir (Ntakana ve ark.).

Kapılar ve Pencereler

Kapılar ve pencereler, içte ve dışta kullanılan tüm malzemeleri (ahşap, alüminyum veya çelik), metal işleri (kapı ve pencere çerçeveleri) ve demir doğramaları içerir. Pencereler için, çelik çerçeveler kullanılıyorsa, camlar da dahildir. Bu bina bileşeninde herhangi bir tasarruf sağlanmayacaktır, bunlar sadece duvarlar ve çatı basıldıktan sonra yapılan donanımlardır (Ntakana ve ark.).

Yüzey İşlemleri

Gerekli bitiş türüne bağlı olarak (mimari şartnameye göre), bunlar sıva (iç ve dış), zeminlere şap, fayans (zeminler ve duvarlar), boya (iç ve dış) ve tavanları (gerekli tüm bağlantı parçaları dahil) içerir. 3D baskılı evlerin çoğunda son işlemlere gerek yoktur. Bu yapı bileşenlerinin bazılarında veya tamamında maliyet tasarrufu sağlanabilir (Ntakana ve ark.).

Sihhi Tesisat

Sihhi tesisat, boru tesisatı ve sihhi tesisat armatürlerini içerir. Yoğun emek gerektiren bu bina bileşeninden zaman açısından fayda sağlanabilir. Örneğin, borular baskı yapılmadan önce yerlerine yerleştirilebilir ve böylece duvarları kovalama maliyeti azaltılabilir. Kovalamanın binanın yapısal bütünlüğünü etkileme gibi potansiyel bir olumsuz etkisi vardır (Ntakana ve ark.).

Elektrik Tesisatları

Bir elektrik tesisatı, kanallar, bağlantı parçaları, dağıtım panoları vb. içerir. Yukarıdaki bina bileşenine benzer şekilde, kanallar için duvarları takip etmekten kaçınarak maliyet tasarrufu sağlanacaktır (Ntakana ve ark.).

Yaşam Döngüsü Maliyetlendirmesi: Seçenek Değerleme

İnşaat Maliyetleri

Bu analiz için, “Yazıcı Kullanılabilirlik Raporu”nda bildirildiği gibi, iki 3D baskı sistemi geleneksel bina yöntemleriyle ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Ancak, bu iki 3D sistem de sadece duvarları basabilmektedir. BoQ her bir maliyet merkezinde birim başına bir oran gerektirdiğinden ve bu oran işçilik, malzeme ve genel giderler ile karı içerdiğinden, her bir maliyet merkezindeki işçilik katkısını çıkarmak şimdilik mümkün değildir (Ntakana ve ark.).

Robotik Kol Sistemi

Tipik olarak, bir robotik kol sistemi yüzeye sabitlenmiş dikey bir metal çerçeve üzerine yerleştirilir (Apis-cor, 2019). Robotik kol, betonu rezervuardan nozüle taşıyan bir hortuma bağlanır. Robotik kol daha sonra nozülü programlanan konumlara hareket ettirir. Aşağıdaki Resim 5.12'de tipik bir robotik kol sistemi gösterilmektedir (Ntakana ve ark.).



Resim 5.12. Robotik kol sistemi (Ntakana ve ark.)

Aşağıda Çizelge 5.14'te, yukarıda açıklandığı gibi her bir maliyet merkezi için karşılaştırmalı maliyet gösterilmektedir. Bu analizin amaçları doğrultusunda, tablodaki rakamlar duruma göre yukarı veya aşağı yuvarlanmıştır (Ntakana ve ark.).

Çizelge 5.14. Robotik Kol Sistemi için Maliyet Karşılaştırması (Ntakana ve ark.)

COST OF CONSTRUCTION	CONVENTIONAL	ROBOTIC ARM	% SAVINGS
Foundations	30,129.58	30,129.58	0.00%
Wall Plates\ Blockwork	23,414.03	22,088.36	5.66%
Roofing	15,951.01	15,951.01	0.00%
Finishes	21,934.64	21,934.64	0.00%
Electrical	4,666.26	4,666.26	0.00%
VIP Toilet	7,938.23	7,938.23	0.00%
Tank Stand & Rain Water Goods	4,973.17	4,973.17	0.00%
Sub-Total	109,006.91	107,681.24	1.22%

Bu özel durum senaryosundaki inşaat maliyetleri, yukarıdaki tabloda gösterildiği gibi tüm maliyet merkezleri dahil olmak üzere, robotik kol sistemi için KDV hariç 107.681,24 R ve geleneksel inşaat yöntemleri için KDV hariç 109.006,91 R'dir. Bu, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla ev basarken % 1,22'lik bir inşaat maliyet-fayda oranına işaret etmektedir. Bu karşılaştırma sadece bir maliyet merkezinde (duvarlar) yapılmıştır. Bir makine kurmak ve 40 metrekaarelik bir evin sadece duvarlarını basmak pahalıdır. Gelecekte, 3D baskının diğer maliyet merkezleri (yani temeller, çatılar, tank ayakları, vb.) için uygulanabilirliği üzerine bir araştırma yapılması gerekmektedir (Ntakana ve ark.).

Gantry Sistemi

Gantry sistemi, standart çelik profiller kullanılarak tasarlanmış bir yapıdan oluşur. Gantry yazıcının tabanı genellikle standart bir universal kiriş, düz çelik taban veya yazıcı tertibatının yatay hareketi için bir rayın kaynaklandığı izole bir çelik tabandır. Baskı kafası tertibatı, kafa tertibatının dikey hareketini sağlamak için lineer yataklara monte edilir. Baskı kafası, baskı kafasının yatay hareketini sağlamak için planörlerden sarkar. Baskı malzemesi için esnek hortum da kolay hareket sağlamak için planör sistemine bağlanmıştır. Aşağıdaki Resim 5.13'te gantry sistemi gösterilmektedir (Ntakana ve ark.):



Resim 5.13. Gantry sistemi

Aşağıda Çizelge 5.15'te, yukarıda açıklandığı gibi her bir maliyet merkezi için karşılaştırmalı maliyet gösterilmektedir. Bu analizin amaçları doğrultusunda, tablodaki rakamlar duruma göre yukarı veya aşağı yuvarlanmıştır (Ntakana ve ark.).

Çizelge 5.15. Gantri sistemi için maliyet karşılaştırması (Ntakana ve ark.)

COST OF CONSTRUCTION	CONVENTIONAL	GANTRY	% SAVINGS
Foundations	30,129.58	30,129.58	0.00%
Wall Plates\ Blockwork	23,414.03	21,091.36	9.92%
Roofing	15,951.01	15,951.01	0.00%
Finishes	21,934.64	21,934.64	0.00%
Electrical	4,666.26	4,666.26	0.00%
VIP Toilet	7,938.23	7,938.23	0.00%
Tank Stand & Rain Water Goods	4,973.17	4,973.17	0.00%
Sub-Total	109,006.91	106,684.24	2.13%

Bu özel durum senaryosundaki inşaat maliyetleri, yukarıdaki tabloda gösterilen tüm maliyet merkezleri dahil olmak üzere, gantry sistemi için KDV hariç R106,684.24 ve geleneksel inşaat yöntemleri için KDV hariç R109,006.91'dir. Bu, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla konutun basılmasında % 2,13'lük bir inşaat maliyet-fayda oranına işaret etmektedir. Bu karşılaştırma yalnızca bir maliyet merkezinde (duvarlar) yapılmıştır (Ntakana ve ark.).

Yerel Ekonomik Katkı

İnşaat sektörü Güney Afrika'da en çok istihdam sağlayan sektörlerden biri olup ülkenin Gayri Safi Yurtiçi Hasılasına (GSYİH) katkıda bulunmaktadır. Sektör, ülkedeki işgücünün % 8'inden fazlasını istihdam etmekte ve inşaat üretimi ülkenin GSYİH'sinin yaklaşık % 4'ünü oluşturmaktadır. İnşaat faaliyetleri genellikle yerel işgücü istihdamı ve inşaat malzemelerinin yerel olarak satın alınması gibi saha faydaları sağlamaktadır. Geleneksel inşaat yöntemleri, yerel işgücü istihdamı ve inşaat malzemelerinin, özellikle de ince agrega, çimento, tuğla ve kereste gibi önemli bir nakliye etkisi olan malzemelerin yerel olarak satın alınması açısından daha büyük bir yerel ekonomik güç bırakma eğilimindedir (Ntakana ve ark.).

Malzeme Satın Alma

3D baskı katkı teknolojileri genellikle endüstriyel (cam, cüruf vb.), tarımsal (pirinç kabuğu külü ve uçucu kül) ve inşaat ve yıkım (geri dönüştürülmüş duvar) atıklarından farklı malzeme bileşimleri kullanır. Baskı, hem geleneksel hem de geri dönüştürülmüş malzemeler kullanarak aynı anda birden fazla bileşen üretebilir ve birden fazla renk kullanabilir. Bazı teknikler, inşaat sırasında sarkan özellikleri destekleyen çözünebilir malzemelerin kullanımını içerir. Bazı makineler malzeme esnekliğine sahiptir; bu nedenle yerel kaynaklı malzeme tasarımları kullanılabilir. Diğerleri ise sadece üreticilerin önceden paketlenmiş karışım tasarımlarına göre öngörülen malzemeleri kullanmaktadır. Önceden paketlenmiş malzemeler sadece kum, Portland çimentosu ve su ilavesi gerektirmektedir. Bu malzemelerin ve gerekli işgücünün çoğu genellikle fabrikaya yakın bir yerden temin edilebilmekte, ancak bu fabrika bazen inşaat sahasından uzakta olabilmektedir. Bu koşullar altında, işgücü istihdamı ve malzeme alımı fabrikanın coğrafi konumu ile inşaat sahası arasında bölünecektir (bölünmenin derecesi kullanılan yazıcının türüne bağlı olacaktır). Bu nedenle, yerel ekonomik katkının miktarı inşaat sahasının konumundan etkilenecektir. Örneğin uzak bölgelerde malzemeler kolaylıkla bulunamayabilir. Bu nedenle bu tür malzemelerin bulunması muhtemel en yakın merkezden tedarik edilmesi gerekebilir (Ntakana ve ark.).

İşgücü

İnşaat sektörü genellikle nispeten düşük beceri düzeyine sahip işçilerin istihdam edildiği ve sadece inşaat projesi süresince gelir sağlayabilen bir sektör olarak bilinmektedir. Ekonomik faaliyetlerin kısıtlı veya sınırlı olduğu bölgelerdeki inşaat projeleri, sınırlı bir

süre için de olsa belli bir düzeyde istihdam sağlayabilir. Bu durumda, yerel beceriler geliştirilerek yerel işgücü için gelecekteki fırsatlar iyileştirilir. 3D baskı katkı teknolojileri, yoğun yerinde baskıdan saha dışı baskıya (örneğin modüllerin/panellerin basılması) kadar çeşitli inşaat yöntemlerini kapsamaktadır. Yerinde baskı, makineyi çalıştırmak için yalnızca iki kişi ve beton karıştırıcıyı beslemek için iki vasıfsız işçi gerektirmektedir. İnsan yerleşiminin geliştirilmesi için, 40 metrekaresel bir evin üst yapısını inşa etmek üzere 2 duvarcı ve 2 vasıfsız işçi gerekmektedir. Bu, geleneksel tuğla ve harç inşaat yöntemlerine kıyasla gerekli yerel becerilerin sayısını azaltmaz, ancak inşaat için gerekli farklı bir beceri türünü ortaya çıkarır. Bununla birlikte, dünya genelinde inşaat alanındaki çağdaş eğilim saha dışı inşaata doğru ilerlemektedir. Bunun nedeni, kontrollü bir ortamda çalışıldığında kalite kontrolünün daha iyi olması ve çalışma koşullarının (iş sağlığı ve güvenliği) saha içi inşaata kıyasla daha iyi olmasıdır. Şantiye içi istihdamdan şantiye dışı istihdama geçişin inşaat işgücü piyasası üzerinde bariz etkileri vardır, örneğin şantiye dışı (fabrika bazlı) istihdam, çalışma koşulları şantiyedekinden daha güvenli ve rahat olduğu için insana yakışır istihdam olarak algılanmaktadır. Buna rağmen bazı insanlar kontrollü bir ortamda çalışmaktansa sahada çalışmayı tercih etmektedir. Ayrıca, fabrika bazlı istihdam, yerinde istihdama kıyasla daha kalıcı olma eğilimindedir. Örneğin, fabrika tabanlı bir yazıcı, bu tür ürünler için pazar talebi olduğu sürece ülkenin herhangi bir yerinde montaj için modüller üretebilir. Bu, projeye özgü olma eğiliminde olan ve çalışanların sözleşmenin sonunda feshe tabi olduğu yerinde istihdamın tersidir. Ayrıca, modüllerin basımı inşaat sektöründen ziyade imalat sektörüyle daha yakından ilgili olduğu için bu tür istihdam, çalışanlara beceri kazandırma eğilimindedir. Kullanılan 3D baskı sisteminin türüne bağlı olarak üst yapı değerinin bir kısmı da yerel işgücü için kullanılabilir (örneğin sıva ve boyama). Yerel işgücü için harcanan değer miktarı, inşaat projesinin konumundan da etkilenebilir (Ntakana ve ark.).

Zamanın Etkisi

Herhangi bir inşaat projesinde, temel proje parametrelerinin zaman, maliyet ve kalite olduğu iyi bilinmektedir. Çizelge 5.16'da geleneksel, robot kollu ve gantry sistemi olmak üzere üç yapı alternatifinin karşılaştırması sunulmaktadır. Ancak, 3DCP için aşağıdaki tabloda kullanılan malzeme, işçilik ve makine maliyetlerinin geçici (şirket bazlı oranlar) olduğunu vurgulamak önemlidir. Yerel malzemeler belirlendikten ve pilot projede uygulandıktan sonra maliyetler analiz edilecek ve denetlenecektir (Ntakana ve ark.).

Çizelge 5.16. Temel proje parametrelerinin karşılaştırılması (Ntakana ve ark.)

Technology	Material required (kg)	Delivery time (h)	Material (costs/m ²)	Labour (costs/m ²)	Equipment/machine (costs/m ²)	Total (costs/m ²)
Brick and mortar	25 760	16	R 140	R 81	R 17	R 238
Robotic arm system	23 000	15.5	R 108	R 11	R 80	R 199
Gantry System	19 920	12	R 108	R 18	R 60	R 186

Analiz ve Hesaplamalar

Anahtar Değişkenler

3D baskılı evlerin yaşam döngüsü maliyetleri aşağıdaki temel değişkenler kullanılarak analiz edilmiştir (Ntakana ve ark.):

- Analiz dönemi: 30 Yıl (genellikle müşteri tarafından karar verilir); Gelecekteki maliyetler için faiz oranı: 11,5 (özel müşteriler için borçlanma maliyetini veya alternatif yatırım kaybını temsil eder);
- İskonto oranı: % 1 ile % 5 arasında (özel müşteriler için borçlanma maliyetini veya alternatif yatırım kaybını temsil eder);
- Bakım faaliyetleri arasındaki döngüler veya aralıklar (tipik olarak analize dayanır);
- Yapılacak iş için birim oranları (tipik olarak analize dayanır) (Ntakana ve ark.)

Duyarlılık ve Risk Analizi

Hassasiyet, 3D baskılı evin tüm yaşam döngüsündeki riski yönetmek için analiz edilmiştir. Bu bağlamda, öncelikle değişkenler, örneğin analizin LCC dönemi ve faiz oranları değiştirilmektedir. İskonto oranındaki değişiklikler, aşağıdaki Çizelge 5.17’de gösterildiği gibi geleneksel bir inşaat yöntemi için gerçek zamanlı maliyetlere dayalı iskonto oranını değiştirerek analiz edilmiştir (Ntakana ve ark.).

Çizelge 5.17. Gerçek zamanlı maliyetlere göre iskonto oranının değiştirilmesi

(Ntakana ve ark.)

Cost heading	Year in which cost occur	Expected yearly cost	Discount factors for 1%	NPV 1%	Discount factors for 3%	NPV 3%	Discount factors for 5%	NPV 5%
Wallplate	1	23,414.03	0.9901	23,182.00	0.9709	22,732.00	0.9524	22,299.00
Painting	5	4,269.47	0.9515	4,062.00	0.8626	3,682.00	0.7835	3,345.00
Rain Water Goods	10	4,973.17	0.9053	4,502.00	0.7441	3,700.00	0.6139	3,053.00
Painting	10	4,269.47	0.9053	3,865.00	0.7441	3,176.00	0.6139	2,621.00
Apron	15	3,990.44	0.8613	3,437.00	0.6419	2,561.00	0.4810	1,919.00
Painting	15	4,269.47	0.8613	3,677.00	0.6419	2,740.00	0.4810	2,053.00
Doors	20	4,227.98	0.8195	3,465.00	0.5537	2,340.00	0.3769	1,593.00
Painting	20	4,269.47	0.8195	3,499.00	0.5537	2,363.00	0.3769	1,609.00
Painting	25	4,269.47	0.7798	3,329.00	0.4776	2,039.00	0.2953	1,260.00
Total NPV		57,952.96	-	53,018.00	-	45,333.00	-	39,752.00

İskonto faktörleri, iskonto için seçilen kümülatif yüzde oranını temsil etmek üzere denklemlerde kullanılan yıllık iskonto oranıdır. Bu nedenle, örneğin yıllık % 3 iskonto oranı ilk yıl için 0,9709 iskonto faktörü üretir. 10. yılda toplam iskonto faktörü 0.7441, 20. yılda ise 0.5537'dir. Temel durum kullanılarak değişen döngülerde % 3 iskonto oranıyla 3D baskılı evler için gelecekte beklenen maliyetlerin toplam net bugünkü değeri birim başına 45.333,00 R'dir. Ancak, bu maliyetler borçlanma oranı ile geleceğe yönelik olarak bileşik hale getirilebilir ve daha sonra bugünkü maliyetlere indirgenebilir. Aşağıdaki Çizelge 5.18'de, gelecekteki maliyetlerin yıllık % 11,5 borçlanma oranıyla bileşik hale getirildiği duyarlılık analizi sunulmaktadır (Ntakana ve ark.).

Değişen döngülerde % 3 iskonto oranıyla 3D baskılı evlerin gelecekteki bileşik maliyetlerinin toplam net bugünkü değeri birim başına R131.959,00'dır. Bu, maliyet merkezlerinin ortak tahmini hizmet ömrüne dayanmaktadır. Bununla birlikte, aşağıdaki Çizelge 5.19 iyimser ve kötümser tahmini hizmet ömrüne dayalı toplam NPV'yi göstermektedir (Ntakana ve ark.).

Çizelge 5.18. Gelecekteki bileşik maliyetler ile duyarlılık analizi-konvansiyonel

(Ntakana ve ark.)

Cost heading	Year in which cost occur	Expected yearly cost	Discount factors for 1%	NPV 1%	Discount factors for 3%	NPV 3%	Discount factors for 5%	NPV 5%
Wallplate	1	23,414.03	0.9901	23,182.00	0.9709	22,732.00	0.9524	22,299.00
Painting	5	6,724.41	0.9515	6,398.00	0.8626	5,800.00	0.7835	5,268.00
Rain Water Goods	10	12,336.57	0.9053	11,168.00	0.7441	9,179.00	0.6139	7,573.00
Painting	10	10,590.95	0.9053	9,587.00	0.7441	7,880.00	0.6139	6,501.00
Apron	15	15,590.59	0.8613	13,428.00	0.6419	10,007.00	0.4810	7,499.00
Painting	15	16,680.75	0.8613	14,367.00	0.6419	10,706.00	0.4810	8,023.00
Doors	20	26,016.88	0.8195	21,321.00	0.5537	14,404.00	0.3769	9,805.00
Painting	20	26,272.18	0.8195	21,531.00	0.5537	14,546.00	0.3769	9,901.00
Rain Water Goods	20	30,602.40	0.8195	25,080.00	0.5537	16,943.00	0.3769	11,533.00
Painting	25	41,378.69	0.7798	32,265.00	0.4776	19,762.00	0.2953	12,219.00
Total NPV		209,607.45	-	178,327.00	-	131,959.00	-	100,621.00

Çizelge 5.19. İyimser ve kötümser tahmini hizmet ömrü (ESL)-konvansiyonel

(Ntakana ve ark.)

Cost heading	Year in which cost occur (base case)	Expected yearly cost	Cumulative Cost		
			Base Case	Optimistic ESL	Pessimistic ESL
Wallplate	1	23,414.03	23,414.03	23,414.03	23,414.03
Painting	5	6,724.41	4,269.47	7,497.72	5,951.11
Rain Water Goods	10	12,336.57	4,973.17	15,173.98	9,499.16
Apron	15	15,590.59	3,990.44	20,969.34	10,211.83
Doors	20	26,016.88	4,227.98	37,984.64	14,049.11
Total NPV			40,875.09	105,039.71	63,125.24

Tahmini hizmet ömürleri % 20 oranında artırılır ve azaltılır ve en yakın yıla yuvarlanır. Azalan veya artan ESL'nin faizi hesaplanır ve iyimser veya kötümser ESL'ye ulaşmak için temel duruma eklenir veya çıkarılır. Örneğin, 6.724,41 R tutarındaki öngörülen maliyetlerle boyama için ESL 5 yıldır. İyimserler bu ESL'yi % 20 artıracak ve en yakın yıla (6 yıl ESL) yuvarlayarak maliyetleri R7,497.72'ye çıkaracaktır. Ancak kötümserler için ESL 4 yıla indirilerek maliyetler R5,951.11'e düşürülür. Dolayısıyla iyimserler için toplam NBD 105.039,71 R ve kötümserler için 63.125,24 R'dir (Ntakana ve ark.).

LCC Bulguları

LCC'nin hesaplamaları aşağıdaki Çizelge 5.20'de özetlenmiştir (Ntakana ve ark.).

Çizelge 5.20. LCC isteğe bağlı değerlendirme özeti (Ntakana ve ark.)

LCC OPTIONAL APPRAISAL	CONVENTIONAL		ROBOTIC ARM		GANTRY SYSTEM	
	per unit	50 units	per unit	50 units	per unit	50 units
Total Life Cycle Cost (Present Worth)	701,317.00	35,065,850.00	679,779.00	33,988,950.00	672,512.00	33,625,600.00
Life Cycle (Cost)/Savings to Baseline			21,539.00	1,076,950.00	28,806.00	1,440,300.00
LEAST LIFE CYCLE COST (YES/NO)	NO		NO		YES	

Evleri basmak için gantry sistemi kullanılırsa, birim başına mevcut değerde temel duruma göre belirlenen yaşam döngüsü maliyeti / tasarrufu 28.806,00 R'dir. Pilot çalışma sonrasında 50 ünite için toplam R1,440,300.00, müşteriye maliyet-fayda olarak görülebilir. Bunlar ön tahminlerdir, elbette özellikle robotik kol sistemi kullanılarak baskı maliyetini büyük ölçüde düşürecek olan katkı maddelerinin yerel olarak üretilmesi gibi diğer faktörler dikkate alınmamıştır. Yukarıdaki tablo, robotik kol sisteminin kullanılması halinde müşteriye birim yaşam döngüsü maliyeti başına 21.539,00 R maliyet-fayda sağladığını ve bunun 50 birim için 1.076.950,00 R tutarında olduğunu göstermektedir (Ntakana ve ark.).

Terminal ve Artık Değerler

Terminal değerler, LCC analiz dönemi sırasında arızalanan bir sistem veya bileşenin hurda değerini temsil eder. Örneğin, kurşun kaplamaların değiştirilmesinde kurşunun hurda değeri dikkate alınmalı ve bu değer LCC hesaplamasına terminal değer olarak dahil edilmelidir. Kalıntı değerler: bir varlığın çalışma döneminin sonundaki değerini temsil eder. Kalıntı değeri belirlemenin yaygın yöntemi, doğrusal amortisman yöntemine dayanmaktadır (Ntakana ve ark.).

Kullanım Sonrası

Bu aşamada, LCC tahminlerinin doğruluğunun ölçülebileceği veriler kullanıma sunulacaktır. LCC denetimleri önceden belirlenmiş aralıklarla gerçekleştirilecek ve binanın diğer performans özellikleriyle birlikte kullanım sonrası değerlendirme raporunda raporlanacaktır. Ayrıca, raporlama verilerini geliştirmek için binada yapılan değişiklikler ekonomik performans ölçütleri kullanılarak değerlendirilecek ve raporlanacaktır (yani, gerçek enerji tüketimi tipik olarak tahmini enerji tüketimine karşı izlenir) (Ntakana ve ark.).

Sürdürülebilirlik ve Enerji Verimliliği Değerlendirmesi

BREEAM ve LEED gibi metodolojiler, sürdürülebilirlik açısından alınan yeni ve yenileme projelerine ilişkin kararları desteklemek için bir LCC hesaplamasının arzu edilirliğini ortaya koymaktadır. LCC, sürdürülebilir tasarımın yalnızca nicel olan ekonomik yönlerinin değerlendirilmesini destekleyebilir. Niceliksel olmayan hususlara kavramsal bir niceliksel değer verilmesi halinde (örneğin trafik akışında bozulma veya sağlık üzerindeki etkiler) bu hususlar ayrıca tanımlanmalı ve temel hesaplamanın dışında tutulmalıdır. Kullanılan 3D baskı sistemine ve duvarın kalınlığına bağlı olarak, saniyede minimum 300 mm'lik bir yerleşim hızı gerekir. Bu durumda tüm evin basılması en az beş saat sürecektir. 3D baskının, 2 + 2 işçinin 60 metrekarelik dış duvarların ve 31 metrekarelik iç duvarların üst yapısını inşa etmek için bir veya iki gün sürebileceği geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla inşaat süresini azaltabileceğine dair bir ön kanıt vardır. Yapılan yaşam döngüsü maliyetlendirme analizinden aşağıdaki bulgular elde edilmiştir (Ntakana ve ark.):

- 3D baskı katkı teknolojilerinin geleneksel muadillerine göre daha ucuz bir inşaat yöntemi olduğunu kanıtlayan ön kanıtlar vardır.
- Tasarrufların kesin miktarı, kullanılan sistemin türüne ve kullanıldığı yere bağlıdır.
- Tasarrufları doğrudan karşılaştırmalı bir şekilde tahsis etmek, 3D baskı sisteminin fiyatlandırma yapısı nedeniyle zor olabilir (bir parça koleksiyonundan ziyade bir sistem fiyatlandırılır).
- Sistemler sadece duvarları basabildiğinden, tasarruflar sadece iki maliyet merkezinde (duvarlar ve ön hazırlık ve genel) gerçekleşiyor gibi görünmektedir (Ntakana ve ark.).

Zamanın etkisinin hala araştırılması gerekmektedir. Genel tasarrufa en büyük katkının inşaat süresindeki azalma olduğu ve bunun da K&G'lerden tasarruf sağladığı yönünde bir ön yargıya varılabilir. Dolayısıyla bu çalışma, 3D baskı katkı teknolojilerini bir tesisi daha hızlı, daha kaliteli ve daha düşük inşaat maliyetiyle teslim etmek için alternatif bir yöntem olarak görmektedir. Ancak, yukarıda belirtilenlerin daha ayrıntılı ve DSİ'yi tatmin edecek şekilde belirlenmesi için pilot proje sırasında veri toplanacaktır. İleriye dönük olarak, 50 konutluk pilot proje sırasında aşağıdakileri belirlemek için veri toplanacaktır (Ntakana ve ark.):

- Müşteriye sağlanan zaman ve maliyet faydaları için nihai hesabın denetlenmesi
- Projede zaman ve maliyet faydalarının bulunduğu alanların belirlenmesi
- Projedeki potansiyel diğer zaman ve maliyet faydalarının analiz edilmesi
- Yerel işgücü istihdamının analiz edilmesi
- Yerel ekonomik katkının analiz edilmesi ve bulguların kayıt altına alınması

5.30.7. Dubai Al Aweer'de Bulunan 3D Baskılı Konut Villası Projesine Genel Bakış

İnşaat sektörü, 3D baskı teknolojisinin gelişiyile birlikte önemli bir dönüşüm geçirmektedir. Bu yeniliğin en önemli örneği Dubai, Al Aweer'de bulunan 3D baskılı konut villasıdır. Bu proje yalnızca en son inşaat tekniklerini sergilemekle kalmıyor, aynı zamanda sürdürülebilir ve verimli bina uygulamalarında yeni bir ölçüt oluşturmaktadır (Alqaryouti ve ark., 2024).

3D Baskılı Villaya Genel Bakış

Al Aweer 1st, Dubai, BAE'de yer alan villa, 300 metrekarelik bir inşaat alanına sahip 754 metrekarelik bir alana yayılmıştır. Dört ana yatak odası, bir ziyaretçi odası alanı, bir servis bloğu ve geleneksel bir Arap oturma odası bulunan tek katlı bir yapıdır. Villa, katman katman inşaatı içeren ve malzemelerin hassas ve verimli kullanımıyla sonuçlanan gelişmiş 3D beton baskı teknolojisi kullanılarak inşa edilmiştir. Villanın inşaatı 1 Mart 2023'te başlamıştır ve 15 Kasım 2023'te tamamlanmıştır. Bu da bu büyüklükteki bir proje için inanılmaz derecede verimli bir zaman çizelgesidir. Yaklaşık 3.400 AED/m² bütçe ile proje, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla maliyet etkinliğini vurgulamaktadır (Alqaryouti ve ark., 2024).

Guinness Dünya Rekoru Başarısı

Villa, 3D baskı teknolojisi alanındaki başarısıyla en büyük 3D baskılı villa dalında Guinness Dünya Rekorunu elinde bulundurmaktadır. Bu çığır açan başarı, 7 Aralık 2023 tarihinde Birleşik Arap Emirlikleri'nin Dubai kentinde gerçekleşmiştir. Rekorun kategorisi, konut binası inşaatının büyüklüğü ile ilgilidir. Bu başarı sadece projeyi küresel spot ışığına yerleştirmekle kalmaz, aynı zamanda 3D baskı teknolojisinin inşaat sektöründe devrim yaratma potansiyelini de vurgulamaktadır (Alqaryouti ve ark., 2024).

Projenin Amaç ve Hedefleri

Bu proje, sürdürülebilir konut binalarının inşasında 3D beton baskının yeteneklerini göstermektedir. 3.400 AED/m²'lik bir bütçeyle, 3D baskının zaman verimliliğini ve tasarım esnekliğini sergilerken atık ve karbon emisyonlarını azaltmak hedeflenmiştir. Dubai, Al Aweer'deki 3D baskılı villa, Guinness Dünya Rekoru potansiyeli ile mimari yenilik ve sürdürülebilir bina uygulamalarının bir sembolüdür. Daha sürdürülebilir bir gelecek için inşaat sektöründe 3D baskının yaygın olarak benimsenmesinin önü açılmalıdır (Alqaryouti ve ark., 2024).

Tasarım Konsepti ve Malzeme Seçimi

Kavramsallaştırma ve Mimari Tasarım

Dubai'deki 3D baskılı villa, mimari inovasyonda büyük bir ilerleme sergilemiştir. Geleneksel inşaat sınırlamalarını aşarak karmaşık yapılara ve şekillere olanak sağlayan 3D baskı teknolojisinin potansiyelini ortaya koymaktadır. Yeşil bina girişimleriyle tanınan Dubai'de yer alan villa, çevresel sürdürülebilirliğe olan bağlılığı yansıtmaktadır. Bu proje, ileri teknoloji çağında çağdaş mimariyi yeniden şekillendiren yenilikçi tasarım ve ekolojik sorumluluğun birleşimini örneklemektedir. Resim 5.14, villanın 3D Beton Baskı (3DCP) ile mümkün kılınan karmaşık geometrilere ve yenilikçi tasarım öğelerine sahip 3D modelini göstermektedir (Alqaryouti ve ark., 2024).



Resim 5.14. 3DCP ile mümkün kılınan karmaşık geometrileri ve yenilikçi tasarım unsurlarını sergileyen villanın 3D modeli (Alqaryouti ve ark., 2024)

3D Baskı İçin Malzeme Seçimi

3DCP villa projesinde yapılar ve 3D baskı için yeşil beton kullanılmıştır. Yeşil beton, çevre dostu veya geri dönüştürülmüş malzemeler kullanarak çevresel etkiyi azaltır. Performansı ve dayanıklılığı artırır ve karbon ayak izini azaltır. Kullanılan yeşil beton Dubai Belediyesi ve Danışmanı tarafından onaylanmış ve S.S LOOTAH fabrikası tarafından tedarik edilerek belirli kalite standartlarını ve yönergelerini karşılamıştır. Yönetmelikler, villada kullanılan yeşil beton için şu kriteri belirtmektedir. Temeller, kolonlar, kirişler ve döşemeler gibi alt yapılar için, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS) ile minimum çimento ikamesi, su-çimento oranına ve nominal beton kaplamasına bağlı olarak % 36 ila % 80 arasında olmalıdır (Alqaryouti ve ark., 2024). Zeminler, duvarlar, çatılar ve cepheler gibi üst yapılar için, GGBS ile minimum çimento ikamesi, basınç dayanımı sınıfına, su-çimento oranına ve nominal beton örtüsüne bağlı olarak % 26 ila % 80 arasında olmalıdır. Yeşil beton için GGBS kullanımı, çimento üretimi ve kullanımının çevresel etkilerini azaltırken beton yapıların dayanıklılığını ve performansını artırabilir (Alqaryouti ve ark., 2024).

Çevresel ve Sürdürülebilirlikle İlgili Hususlar

Projenin tasarımı ve inşasında temel çevresel ve sürdürülebilirlik faktörleri dikkate alınmıştır. Buna sera gazı emisyonlarını, enerji tüketimini ve atık oluşumunu azaltmak için betonda çevre dostu veya geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması da dahildir. Villa ayrıca enerji ve su kullanımını en aza indirmek için güneş ısıtıcıları gibi enerji tasarrufu stratejileri ve teknolojileri de içermektedir. Ayrıca, inşaat yöntemi olan 3D beton baskı, malzeme israfını azaltmaktadır ve daha düşük bir karbon ayak izine sahiptir. Proje aynı zamanda sürdürülebilir yapı malzemelerine odaklanmaktadır. Dubai'nin yeşil bina sistemine uymakta ve termal performansı iyileştirmek için yenilikçi tasarım kullanmaktadır. Özetle, 3D baskılı villa projesinin çevresel ve sürdürülebilirlik hususları kapsamlı olup yeşil bina uygulamalarının çeşitli yönlerini ele almaktadır. Bunlar arasında sürdürülebilir malzemelerin kullanımı, enerji ve su tasarrufu önlemleri, yeşil bina standartlarına bağlılık ve termal verimlilik için yenilikçi tasarım yer almaktadır ve bunların tümü projenin genel çevresel sorumluluğuna ve sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır (Alqaryouti ve ark., 2024).

3D Baskı Sürecine Detaylı Bir Bakış

Villa projesinde, beton malzeme katmanlarını biriktirerek karmaşık şekiller ve yapılar oluşturmak için robotik bir kol veya portal sistemi kullanan yenilikçi bir teknoloji olan 3D beton baskı kullanılmıştır. Bu teknoloji, artan hız ve hassasiyetle özelleştirilmiş ve karmaşık tasarımlar üretme kabiliyeti de dahil olmak üzere birçok avantajı nedeniyle son yıllarda popülerlik kazanan bir eklemeli üretim biçimidir. Projenin hazırlık ve tasarım aşamasında, 3D baskı süreci için özel bir yazılım kullanılarak villanın ayrıntılı bir dijital modeli oluşturulmuştur. Bu model, beton katmanlarının doğru bir şekilde biriktirilmesine rehberlik ederek hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Projede, geleneksel betona çevre dostu bir alternatif olan, geri dönüştürülmüş malzemelerden yapılan ve üretim sırasında daha az enerji tüketen yeşil beton kullanılmıştır. Bu malzeme, 3D baskıya uygunluğu ve projenin çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumu nedeniyle seçilmiştir. 3D baskı süreci, dijital bir plana dayalı olarak beton malzemenin katman katman biriktirilmesini içermektedir. Malzeme akışı, katman kalınlığı ve kuruma süreleri üzerindeki hassas kontrol, yapısal bütünlüğü sağlamıştır ve karmaşık şekil ve yapıların oluşturulmasını mümkün kılmıştır (Alqaryouti ve ark., 2024).

Lojistik Zorluklar ve Çözümler

Proje ekibi, gerekli özelliklere sahip yeşil betonun tutarlı bir şekilde tedarik edilmesini sağlamak için malzeme tedarikçileriyle yakın bir şekilde çalışmıştır. Bu, malzemenin kalitesini, gücünü ve dayanıklılığını ve zamanında teslimatı garanti altına almak için titiz testleri içermektedir. 3D beton baskı projesi, 3D baskı teknolojisi, mühendislik ve mimarlık alanlarında uzmanlık gerektirmektedir. Ekip, projenin kalite standartlarını karşılamasını sağlamak için işbirliği yapmıştır. 3D baskıda tutarlı kaliteyi korumak çok önemlidir. Proje, yönetmeliklere uygunluğu sağlamak için düzenli kontroller de dahil olmak üzere baskı sürecinin her aşamasında sıkı kalite kontrol önlemleri uygulamıştır. Çalışma ortamı, sıcaklık ve nem değişimleri gibi zorluklar ortaya çıkarmıştır. Bunlar dikkatli bir şekilde programlanarak ve gerektiğinde kontrollü ortamlar kullanılarak ele alınmıştır. Proje ekibi baskı süreci boyunca çevresel koşulları yakından izlemiştir ve tutarlı kaliteyi sağlamak için ayarlamalar yapmıştır. Dış mekan baskı ortamı, sıcaklık ve nem değişimleri gibi zorluklar ortaya çıkarmıştır. Bunlar, tutarlı kaliteyi korumak için

baskı süreci sırasında yakından izlenerek ve gerekli ayarlamalar yapılarak ele alınmıştır (Alqaryouti ve ark., 2024).

İşbirliği ve Proje Yönetimi Stratejileri

Projede mimarlar, mühendisler, 3D baskı uzmanları ve çevre danışmanları yenilikçi projenin başarısını sağlamak için yakın işbirliği içinde çalıştılar. Etkili iletişim, proje zamanlamasında esneklik ve düzenleyici kurumlarla düzenli güncellemeler çok önemliydi. Bu yaklaşım, ekibin 3D beton baskı teknolojisinin karmaşıklıklarının üstesinden gelmesini ve sürdürülebilir ve teknolojik açıdan gelişmiş inşaatta yeni bir standart belirlemesini sağladı. Resim 5.15, inşaat aşamasında 3DCP villanın 3D görünümünü göstermektedir (Alqaryouti ve ark., 2024).



Resim 5.15. İnşaat aşamasında 3DCP Villa (Alqaryouti ve ark., 2024)

Proje Başarısının Değerlendirilmesi

Proje, kararlaştırılan zaman dilimi ve bütçe dahilinde verimli bir şekilde tamamlanarak 3D beton baskının etkinliğini ortaya koymuştur. 3D baskı kullanımı daha fazla tasarım esnekliği ve karmaşıklığı sağlamıştır. Ayrıca proje, yeşil beton kullanarak çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine başarıyla ulaşmıştır. Projenin verimlilik ölçümleri, 3D baskının hızını, maliyet etkinliğini, en aza indirilmiş malzeme atığını ve azaltılmış sera gazı emisyonlarını ve enerji tüketimini vurgulamıştır (Alqaryouti ve ark., 2024).

Sürdürülebilir İnşaat Uygulamaları Üzerindeki Etkisi

Proje, sürdürülebilir inşaat malzemeleri için yeni bir standart belirleyerek 3D baskı için yeşil betonun yenilikçi bir kullanımını sergilemiştir. Villa, sürdürülebilir bina uygulamalarını göstermek için güneş panelleri gibi yenilikçi teknolojileri entegre ederek enerji ve kaynak verimliliği için bir model olarak tasarlanmıştır. 3D baskı kullanımı, hassas malzeme kullanımına olanak tanıyarak minimum atıkla sonuçlanmış ve sürdürülebilir inşaatla atık azaltmanın önemini vurgulamıştır. 3D beton baskı süreci, malzeme israfının azaltılması ve kalıp ve iskelenin ortadan kaldırılması nedeniyle geleneksel yöntemlere kıyasla daha az enerji gerektirmektedir. Çizelge 5.21'de gösterildiği gibi, 1 m² dış yük taşıyıcı duvar için dört inşaat senaryosunun enerji tüketimini tahmin etmek için bir çalışma yapılmıştır (Alqaryouti ve ark., 2024).

Çizelge 5.21. Dört inşaat senaryosunun enerji tüketimi (Alqaryouti ve ark., 2024)

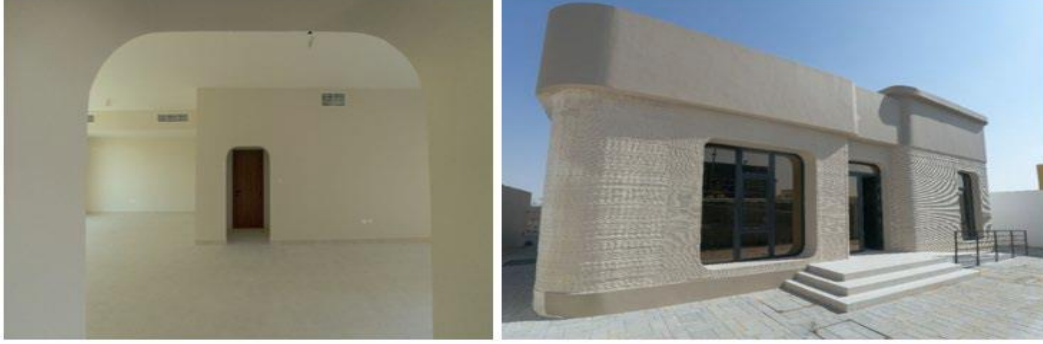
Scenario	Description	Energy Consumption (MJ/m ²)
S1	Conventional construction with conventional concrete and reinforcement	117.6
S2	3DCP with conventional concrete and reinforcement	62.4
S3	3DCP with conventional concrete without reinforcement	50.4
S4	3DCP with lightweight concrete without reinforcement	42.0

Çizelge 5.21'de, 3DCP senaryolarının enerji tüketimi, % 47 ila % 64 arasında değişen tasarruflarla geleneksel inşaat senaryosunununkinden önemli ölçüde daha düşüktür. Hafif beton kullanımı veya takviye elemanlarının kaldırılması malzeme ağırlığını ve hacmini azaltarak enerji tüketimini düşürmektedir. 3DCP senaryolarının ana enerji kaynakları arasında 3D yazıcı, beton mikseri ve pompa için elektrik bulunurken, geleneksel inşaat senaryosunda inşaat ekipmanı ve makineler için birincil enerji kaynağı dizeldir. 3DCP senaryolarının karbon ayak izleri de geleneksel inşaat senaryosuna göre daha düşüktür ve % 46 ile % 63 arasında değişen oranlarda azalmaktadır (Alqaryouti ve ark., 2024).

Dubai İnşaat Sektörüne Katkı

Dubai inşaat sektöründeki teknolojik ilerlemenin istisnai bir örneği olan proje, kentin yenilikçi inşaat yöntemlerini benimsemedeki öncü konumunu yükseltmektedir. Dubai'nin sürdürülebilir kalkınma vizyonu ve yeşil bina kodlarına sıkı sıkıya bağlılığıyla uyumlu yeşil bina uygulamalarını entegre etmektedir. Villanın çığır açan 3D baskı teknolojisi kullanımı, en son teknolojinin avantajlarını göstererek gelecekteki inşaat projeleri için bir model oluşturmaktadır. Ayrıca, projenin yenilikçi ve çevre dostu yaklaşımı Dubai'de

Çevresel sorumluluk ve inşaat inovasyonu için yeni bir standart oluşturmaktadır. Yeşil bina uygulamalarının kullanımını teşvik ederek diğerklerini de teşvik etmektedir. Resim 5.16 bitmiş ve render edilmiş 3DCP villasını göstermektedir (Alqaryouti ve ark., 2024).



Resim 5.16. Render edilmiş 3DCP Villa (Alqaryouti ve ark., 2024)

Dubai'deki 3D Baskılı Villa projesi, sürdürülebilir bina uygulamalarıyla sorunsuz bir şekilde entegre edilen yenilikçi inşaat teknolojisini ortaya koyarak sektör için yeni ölçütler belirlemiştir. Bu proje önemli bir kilometre taşını temsil etmektedir ve sürdürülebilir inşaatın sektörü dönüştürme potansiyelini ortaya koymuştur. Projenin 3D baskı kullanımını atık ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltarak sürdürülebilir inşaat için öncü bir model oluşturmuştur. Villa projesi, evre dostu inşaat için Yeşil Bina Sistemini takip etmiş, yerel bina yönetmeliklerine uygunluğ sağlarken onaylı yeşil beton ve 3D baskı kullanmıştır. Proje, sürdürülebilir bina uygulamaları için yeni bir ölçüt oluşturmakta, en son teknoloji ve evre dostu yöntemler kullanarak nc bir yaklaşım sergilemektedir. Farklı coğrafi bölgelerdeki konut, ticari ve kamu binaları için etkileri vardır. Ayrıca, köprüler ve acil durum barınakları gibi altyapı inşaatlarına da uygulanabilir. Gelecekteki araştırmalar, çeşitli çevresel koşullar ve bölgesel malzemeler için ölçeklenebilirliğini ve optimizasyonunu keşfetmelidir (Alqaryouti ve ark., 2024).



6. 3 BOYUTLU BETON BASKI TEKNOLOJİSİ İLE İLGİLİ BİBLİYOGRAFİK ANALİZ

3 boyutlu beton baskı teknolojisindeki araştırmalar 2015 yılında farkedilebilir bir şekilde başlamıştır. Araştırma, baskı uygulamaları, yöntemler, işgücü analizi, lojistik, maliyet, verimlilik, çevresel etki, yapısal tasarım ve hatta uzay uygulamalarına doğru genişlemiştir. Araştırmadaki bu hızlı büyüme ve uygulanabilirlik hususlarının genişlemesi, bu alanda gelecekteki araştırmaların birçok benzersiz fırsat ve zorluk sunduğunu göstermektedir. Dünyada bu teknoloji ile ilgili 2019 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde gerçekleştirilmiş yayın sayısı 63 iken en çok atfı İngilterede gerçekleştirilmiş yayınlar almıştır. Singapurda 44 yayın, Çinde 37 yayın, Avustralyada 32 yayın, Hollandada 26 yayın, Almanyada 19 yayın, İngilterede 19 yayın, Fransada 14 yayın, Rusya Federasyonunda 14 yayın, İsviçrede 10 yayın yapılmıştır. Toplamda 41 farklı ülkede 3 boyutlu beton teknolojisi çalışılmıştır ve 297 yayın yapılmıştır. Toplam 297 yayının 149'unu dergi makaleleri, 129'unu konferans bildirileri, 18'ini değerlendirme yayınları ve 1 konferans değerlendirme yayını oluşturmaktadır. Yayınların % 44,9'u mühendislikte, % 22,6'sı malzeme biliminde, % 8,3'ü bilgisayar biliminde, % 5'i çevre biliminde, % 4,3'ü fizikte ve % 3,7'si enerji alanlarında yapılmıştır (Schuldt ve ark., 2021).

3D baskı bina ve inşaat alanına olan ilgi son yıllarda artmıştır. İlgideki artış bu disiplinindeki literatürün kalitesini artırırken, araştırmacıların araştırma gelişimine genel bir bakış sunmalarını zorlaştırmıştır. Yayın sayısını haritalamak, araştırma eğilimini kavramak için etkili bir yol olabilir. Belirli bir disiplinindeki araştırma gelişimini anlamak için, literatür taramasını sistematik olarak yakalamak önemlidir. Bina ve inşaat için 3D baskı alanındaki araştırma geliştirme eğilimini anlamak faydalı olacaktır (Shahzad ve ark., 2022).

6.1. Veri Kaynağı Analizi ve Metodoloji

Bu inceleme analizi için Science Direct, Web of Science ve Scopus olmak üzere iki çok disiplinli bilimsel araştırma veri tabanı incelenmiştir. Yaklaşık 12000 dergi ve 160.000 konferans bildirisi yukarıda bahsedilen bu veri tabanları tarafından kapsanmaktadır. Yalnızca B&C endüstrisi uygulamaları için 3D baskı ile doğrudan ilgili olan dergi makaleleri ve konferans bildirileri seçilmiştir. Araştırma içeriğini rafine etmek için Boolean operatörü, alıntılar ve parantezler kullanılırken, kitap incelemeleri ve diğer alakasız içerikler gibi diğer yayınlar hariç tutulmuştur. Web of Science araması sırasında, ilk aramanın anahtar kelimeleriyle eşleşen 1767 yayın bulunmuş ve 374'ü elenmiştir. Scopus için 2124 yayın bulunmuş ve 308'i toplamda dikkate değer bulunmuştur. Science Direct örneğinde, Science Direct'in sınır kriterleri nedeniyle toplam 1445 yayından 326'sı elenmiştir. Dolayısıyla, bu yayınlar mükerrerlik açısından taranmış ve uygunluk açısından başlıklarına ve özetlerine göre kategorize edilmiştir (Shahzad ve ark., 2022).

6.2. Taranan Veri Sonuçları ve Tartışmalar

Tarama sürecinden 132 yayın seçilmiştir ve temsil edilen çalışmaya göre sınıflandırılmıştır. Aynı zamanda, akıllı yol tekniği ile dinamik döküm, tuğla döşeme tekniklerinin otomasyon yöntemi ve sıkışmış yapılarla ilgili bir çalışma gibi tarama sürecinde bulunan yenilikçi araştırma çalışmaları düşünülmüştür (Shahzad ve ark., 2022).

6.2.1. 2002'den 2022'ye Yayınların Çıktı Özellikleri

B&C için 3D baskı çalışmalarının ilk 15 yılında, 2002'den 2016'ya kadar 43 yayın söz konusu olmuştur. 2017'den 2022'ye kadar, B&C'de 3D baskı ile ilgili toplam 89 yayın bulunmaktadır. Bunlar ilk 15 yılda yayınlananların iki katından biraz fazla olmuştur. Bu araştırma, özellikle son altı yılda B&C uygulamaları için 3D baskıya olan ilginin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. İstatistiklerden ve araştırmadan, 2002'den 2012'ye kadar konferans bildirilerinin dergi yayınlarından daha yüksek sayıda olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca, 2013'ten itibaren, dergi yayınlarının sayısının konferans bildirilerine kıyasla iyi bir hızda ve daha yüksek bir oranda başladığı görülebilir. Sonuç olarak, dergi yayınları günümüze kadar konferans bildirilerinin önüne geçmiştir. Bu

önemli değişiklik, bu yenilikçi disiplinde kapsamlı ve heyecan verici araştırmaların başladığını göstermektedir (Shahzad ve ark., 2022).

6.2.2. B&C için 3D baskı Yayınların Kökeni

B&C uygulamaları için 3D baskı araştırmalarında farklı ülkelerin katkısını temsil etmek üzere yalnızca ilk yazarlı yayınlar dikkate alınmıştır. Seçilen makaleler, ABD ve İngiltere'nin B&C için 3D baskı disiplini araştırmalarına en fazla katkıda bulunduğunu göstermektedir. Listedeki toplam yayınların yaklaşık % 51'i bu iki ülkeden tespit edilirken, onları toplam yayınların yaklaşık % 15'ini ortaklaşa gerçekleştiren Singapur ve Çin takip etmektedir. Amerika Birleşik Devletleri ve Birleşik Krallık'tan gelen yayınların çoğu Güney Kaliforniya Üniversitesi, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü ve bu alandaki diğer birkaç tanınmış üniversiteden gelmektedir ve bu çalışma için seçilen yayınların % 33'ünden fazlasını oluşturmaktadır. B&C araştırmalarında 3D baskının küresel eğilimi, bilimsel araştırmaların küreselleşmesine doğru ilerlemektedir ve geri kalan ülkeler ABD ile aralarındaki farkı giderek kapatmaktadır (Shahzad ve ark., 2022).

6.2.3. Başlıca Araştırma Bulguları

B&C için 3D baskının gelişim eğilimini kontrol etmek amacıyla, seçilen yayınlar derinlemesine bilgi edinmek için sınıflandırılmıştır. Sonuçlar, yazarların çoğunun belirlenen yayınlarda neredeyse altı araştırma kategorisine odaklandığını göstermektedir, çünkü her makale birden fazla araştırma ilgi alanı içermektedir, bu nedenle yayınlar ilgi alanları temelinde ayrı ayrı gruplandırılmıştır. Hangi araştırma ilgi alanlarının her bir makalenin kapsamını belirleyeceği tamamen öngörülemez. Araştırmayı aynı araştırmacı grubu yürüttüğü için, diğer araştırma ilgi alanları bu makalenin inceleme amaçlarına göre ilgisiz bağlam nedeniyle elenmiştir. Bu çalışmanın yürütülme amacı sadece karşılaştırmadır ve bu altı odaklanmış araştırma kategorisinden bahsetmek uygun görünmektedir. Detaylı açıklamalar ileride belirtilmiştir. Baskı tekniği analizi, malzemenin ekstrüzyonu için bir nozül kullanılması gibi yenilikçi bir fikir ve düzgün bir akış için uygun bir malzeme dağıtım yöntemi gibi baskı amaçlı malzeme dağıtımı için yeni yöntemleri içermektedir. Bu tür araştırmalar çoğunlukla seçilen yayınlarda gözlemlenmiştir ve geleneksel baskı tekniklerinden farklıdır. Bu yazıcılar, Yoshida'nın tanımladığı gibi baskı ve ekstrüzyon yöntemi kategorisini içermiştir. Çalışmaları esas

olarak malzeme analizi, mimari tasarım ve inşaatı dayandırmaktadır. Bazı malzeme analizi yayınları genellikle malzemeyi analiz etmiştir ve özelliklerini geliştirmiştir. Bu veri analizi, 3D baskı tekniğı kullanılarak kaç katman inşa edilebileceğini kontrol etmek için yapıldıktan sonra, bu araştırma veri analizine ve malzeme analizine katkıda bulunur. Bahsetmeye değeri bir diğeri kategori de gözlemlenen kontrol sistemidir. B&C için 3D baskı işletim sistemi için yararlı olabilecek gerekli bir görevi yerine getirmek için verilen komutla bir cihazı veya makineyi kontrol etmekle ilgili bir kavram vardır, bu nedenle yayından seçilmiş ve bahsedilmiştir. Veri analizi bilgisayar sistemine ve kullanılan yazılıma bağlıdır. Ayrıca verilerin birbirleriyle nasıl değış tokuş edildiğine de bağlıdır. Verilen bilgiyi veya komutu işleyerek fiziksel bir nesne oluşturmaya yardımcı olur. Mimari tasarım, seçilen yayınların çoğunda tartışılmaktadır. Burada belirtilmesi uygun olan şey, bazen mimari tasarımın bir 3D baskı katmanı mekanizması veya prosedürü kullanılarak inşa edilmesinin imkansız olmasıdır. Bir nesnenin eğrilik gösterimini kullanmak en iyisidir, aksi takdirde onu inşa etmek için basit tekniklerle imkansızdır. Gözlemlenen bir diğeri şey de, önceki kişiler tarafından yapılan çalışmaları ve bol miktarda inceleme makalesini ve yazarlar tarafından gösterilen birçok örneğı içeren literatür taraması olmuştur. Baskı tekniğı analizi, baskı sürecini ve diğeri teknik özellikleri kontrol etmek için gantri veya robotik sistemle ilgilenir, çünkü bununla ilgili bazı mükemmel araştırmalar bulunmuştur. Malzeme analizi, ürün yüzey kalitesi ve diğeri işlevsel olarak derecelendirilmiş bileşenlerin üretimine odaklanmaktadır. Malzeme analizine ilgi duyulmasının başlıca nedeni olan baskı yapı malzemesi özellikleri ve karakteristikleri ayarlama girişimleri de gerçekleştirilmiştir (Shahzad ve ark., 2022).

6.3. Seçilmiş Yayın Başlıkları İncelemesi

Yayın başlığı sonuçlarının analizi, yazarların tarama sürecinde seçilen yayın başlıklarında bazı kelimeleri sıklıkla kullandığını göstermektedir. “Beton” kelimesi uzak geçmişteki yayınlarda pek fark edilmemiştir. Sadece birkaç yıl önce 3D baskı için malzeme seçenekleri arttıkça başlamıştır. Alternatif olarak, büyük ölçekli ve serbest formlu inşaat gibi bazı kelimelerin kullanımı son on yılda azalmıştır ve bunun olası bir nedeni, yazarların bu kelimeyi kullanmaktan hoşlanmaması veya bazen bu kelimelerin gerçek anlamını karşılamaması olabilir. Örneğın, bir çalışmada da gözlemlendiğı gibi, malzeme ekstrüzyonu kullanan serbest formlu yapılar, büyük konsolların ve açılarının basılamaması nedeniyle imkansızdır (Shahzad ve ark., 2022).

6.3.1. B&C'de 3D Baskı Son Teknolojileri

Seçilen yayınlar büyük  lekli 3D baskının hızlı gelişimini temsil etmektedir ve çoğu yazar bunu (1) bağlayıcı püskürtme tekniği ve (2) malzeme biriktirme ve ekstrüzyon teknikleri olarak adlandırılan iki ana teknik olarak kategorize etmiştir. Bu tekniklerin temel prensibi, malzeme katmanlarını tek tek birbiri üzerine biriktirerek fiziksel bir nesne oluşturmaadır. Bu teknik, 2 boyutlu şekli gösteren bir CAD modeli yardımıyla başlamıştır ve modeli işleyip komutu çalıştırdıktan sonra 3 boyutlu bir prototip şekli oluşturmuştur. Seçilen toplam yayın sayısının yalnızca yüzde 10'u, bu bölümde tartışılacak olan bağlayıcı püskürtme tekniğine odaklanmıştır (Shahzad ve ark., 2022).

Bağlayıcı Püskürtme

Bağlayıcı püskürtme, nesnelerin bir toz yatağı üzerinde bir bağlayıcının katmanlanmasıyla oluşturulduğu bir 3D baskı işlemidir. Bağlayıcı, toz malzemenin yapı tepsisi üzerindeki ince tabakası boyunca yayılan küçük damlacıklar halinde püskürtülür. Bu yöntem, 2D kesitli bileşenlerin iki parçasını tozun her katmanı üzerinde birleştirir. İşlem, nihai nesne tamamlanana kadar devam eder. Bir elektrikli süpürge kullanılarak, bağlanmamış malzeme çıkarılabilir ve malzeme geri dönüştürüldükten sonra başka bir 3D baskı görevi için tekrar kullanılmaya uygun hale getirilebilir. Bu yöntem, boşlukları ve sarkan özellikleri olan karmaşık geometriler üzerinde çalışabilir. Katmanlar arasındaki mesafenin dar olması nedeniyle bu yöntemle elde edilen yüzey kalitesi mükemmeldir. Katman kalınlığı çok önemlidir. Bağlayıcının iki bileşen veya kesit arasındaki penetrasyonuna bağlıdır ve bunu ölçer; katman çok kalınsa, bağlayıcının katmanlar arasına tamamen nüfuz etmesi zordur (Shahzad ve ark., 2022).

Malzeme Biriktirme Yöntemi

Malzeme biriktirme yöntemi (MDM), kaynaşmış biriktirme modellemesine (FDM) benzer şekilde malzemenin CAD modelini takip ettiği ve çıktığı bir 3D baskı işlemidir. Ekstrüde edilen malzeme, ağırlığını ve katmanlar üzerine gelen katmanları herhangi bir çökme veya deformasyon olmadan taşıyabilmelidir. Birçok otomatik sistem, bu bölümde tartışılacak olan üretim için MDM'yi kullanmaktadır (Shahzad ve ark., 2022).

ubuk Dağıtıcı

ubuk dağıtıcı, Yoshida tarafından geliştirilen bir cihazdır ve yemek çubuğu malzemesi kompozitlerinin sürekli olarak beslenmesini sağlayan bir tür elle yardım baskı cihazıdır.

Ahşap tutkalı ile kaplanmış yemek çubukları bu işlem sırasında rastgele düşürülür ve daha sonra hacim bazlı analizler kullanılarak değerlendirilen gözenekli bir yapı oluşturur. Cihaz temelde iki ana araç tarafından yönlendirilmektedir; bunlardan biri derinlik kamerası, ikincisi ise gerçek zamanlı projektördür. Basit bir renk kodu kullanan bu iki araç, yemek çubuklarının bırakıldığı yeri bildirmeye yardımcı olmaktadır. Projektör kullanılırken düşük ışık koşulu vardır. Farklı yük koşulları uygulanarak bazı mekanik özellikler test edilmiştir ve sonuçlar yük taşıma kabiliyetlerinin yeterince iyi olmadığını göstermektedir, ancak bu yöntem karmaşık mimari tasarım yaparak estetik amaçlı kullanım için yenilikçidir (Shahzad ve ark., 2022).

Kontur İşçiliği (CC)

Kontur işleme, malzemeyi sistematik bir şekilde katman katman ekstrüde etmek için gantry tabanlı bir sistem kullanan bir işlemdir. Malaların faydası, pürüzsüzlük ve yüzey doğruluğu konusunda yazıcıyı yönlendirmeleridir. Malalar nesnenin şekline göre farklı açılarda ayarlanabilir, bu da malzemenin katmanlarının daha kalın olduğu durumlarda bile yüzey kalitesi için ekstra bir fayda sağlar. Bazı yazarlar, seçilen yayınlarda açık malzeme ve bileşimleri tanımlamaktadır. Ayrıca elektrik, sıhhi tesisat ve yapısal takviye için CC tekniği kanallarının kullanılabileceği de belirtilmektedir (Shahzad ve ark., 2022).

Flow-Based Fabrication

MIT araştırmacıları, su bazlı polisakkarit jellerin ve doğal kompozitlerin ekstrüzyonunu sağlayan altı robotik kolun uç efektörüne bağlanan tek bir pnömatik sistem tasarladı. Basılı parçaların tasarımı ve imalatı iki boyutludur (2D). Yüksek sertlik, hafiflik ve yüksek aşınma ve direnç, ileri imalat malzeme yapılarının özellikleri olacaktır. Bu çalışma geçici hafif gölgeleme yapılarından mimari amaçlı oldukça karmaşık otomatik yapılara kadar birçok uygulamaya sahiptir (Shahzad ve ark., 2022).

6.4. Dijital İnşaat

MIT'de çalışan araştırmacılar tarafından geliştirilen bir sistem, yerinde algılama özelliği ile analizler ve imalat için kullanılabilir. Sistem küçük bir robotik kol aracılığıyla yüksek hızlara, doğruluğa ve erişim kolaylığına ulaşmayı amaçlamaktadır. Tüm sistem, kaba konumlandırma için kullanılan büyük bir bom etrafında tasarlanmıştır. Bir ivmeölçer ve zemin referans sensörü, kapalı döngü sistemi için uç efektörü doğru bir şekilde

konumlandırmıştır. Hızlı kürlenme süresine ve yüksek yalıtım değerine sahip bir malzemenin kullanılmasına ihtiyaç olmuştur. Bu nedenle baskı malzemesi olarak poliüretan köpük seçilmiştir. 12 fit uzunluğundaki bir duvarın tamamlanması beş dakika sürecektir. Nihai bir yüzey kalitesi elde etmek için, uç efektör, eksiltici imalat için bir freze kafası olarak değiştirilebilir ve istenen yüzey kalitesi için uygundur (Shahzad ve ark., 2022).

6.4.1. Küçük Kurucu

Koordineli bir sistem yapısı, in situ inşaat imalatı için üç küçük robottan oluşur. Bu robotlar hafif, kompakt boyutlu ve hızlı hareket kabiliyetine sahiptir. Baskı işlemi sırasında, her küçük robotun Nan tarafından ayrıntılı olarak açıklanan, gerçekleştirmesi gereken benzersiz bir özelliği vardır. Ekstrüzyon hızı robotların hareketi ve hızına göre belirlenir, bu nedenle bu robotlar için ikili bileşenli bir reçine malzemesi hazırlanmıştır. Hortumda malzeme tıkanmasını önlemek için kürlenme süresi akış hızı ve robot hareket hızı ile uyumlu olmalıdır. Gerekli kürlenme süresi özelliğini karşılamak için, çevresel koşullara göre harici bir ısı kaynağı uygulanabilir, bu da ısı kaynağının kimyasal etkisini kullanarak malzemenin kürlenme süresini ayarlamaya yardımcı olacaktır (Shahzad ve ark., 2022).

6.4.2. Mesh-Kalıp Yapım Tekniği

Bu teknik, üç boyutlu uzayda serbestçe in situ yapılar basabilmektedir. Bu amaçla, yapıları basmak üzere termoplastik polimer malzemeyi ekstrüde etmek için altı eksenli dev bir robot kullanılmıştır. Baskı sürecinin yüksek düzeyde kontrolü için, baskı sırasında nozülde basınçlı hava kullanılmış ve yapıların uzayda serbestçe dokunması kolaylaştırılmıştır. İlgili bir araştırma uygulaması, yapıların beton için takviye görevi gördüğünü ortaya koymuştur. Daha sonra beton kalıbın üzerine dökülür ve daha sonra yüzeyin pürüzsüzlüğünü elde etmek için elle malalanır. Bu teknik, zaman tüketimini azaltarak ve büyük ölçekli uygulamalar için uygun hale getirerek karmaşık yapıların üretilmesini sağlar. Aynı zamanda, farklı yoğunluklarda ağ basılabilmektedir. En heyecan verici şey ise, betonun çekme kuvvetinin ağırlıklı varlığıyla artması ve sonuçta geleneksel çelik takviyenin yerini almasının olası bir yoludur (Shahzad ve ark., 2022).

6.5. Yapı Bilgi Modellemesi (BIM)

Bina inşaat yönetimi, bir inşaat sürecinin tüm yaşam döngüsünü kapsar ve bununla başa çıkmanın en iyi yolu BIM'dir. Örneğin, planlama, çizelgeleme, tesis yönetimi ve tahmin. BIM, inşaat sektörünün her zaman karşılaştığı yenilik eksikliği ve devam eden süreçte düşük verimlilik gibi sorunlara çözüm sağlama potansiyeline sahiptir. BIM ayrıca geometrik verilerle başa çıkmak için ekipman, malzeme, mevcut kaynaklar ve üretim verileriyle de ilgilenir. Bu teknik, uygulama aşamalarında farklı ekipler arasındaki işbirliği eksikliğinin üstesinden gelmeye yardımcı olur ve mekanik konstrüksiyon ve 3D baskı gibi otomasyon uygulamaları için önemli bir platform sağlar. BIM'e dayalı bir 3D baskı yapısı, sadece tek bir yazılım veya arayüz kullanarak her adımda sürecin tamamlanması için gereken süreyi hızla azaltabilir. İnşaat sektöründeki yaygın sorunlardan biri de tasarımın sürekli değişmesidir ve BIM bu sorunla da etkili bir şekilde başa çıkmaktadır. 3D baskı kalıp gerektirmedikinden, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla tasarım üzerinde çok az etkiyle hızlı ve ani değişiklikler yapılabilir. Yazıcının kontrol verilerini, malzeme teslimatını ve daha sonra süreç performansını depolayarak ve sentezleyerek baskı sürecini etkili bir şekilde otomatikleştirebilir. BIM, inşaat sektöründe birincil bir dil olarak görülmekte ve inşaat endüstrileri tarafından takip edilen standart bir yöntemdir. 3D baskı, inşaat sektöründe oyun değiştirici bir etkiye sahip olduğu gibi, BIM de işgücü ve maliyet tasarrufu açısından birçok fayda sağlayabilir. Ne yazık ki, 3D baskı ve BIM arasındaki iş birliğinde yeterli araştırma yapılmamıştır, ancak araştırmacılar için 3D baskı ve BIM arasındaki araştırma boşluğunu doldurmak için potansiyel bir fırsat vardır (Shahzad ve ark., 2022).

6.6. B&C'de Beton 3D Baskı

İngiltere'deki Loughborough Üniversitesi'nden bir grup araştırmacı, CAD modeline göre fiziksel bir nesne oluşturmak için betonu malzeme olarak katman katman ekstrüde eden bir kontur işleme sistemine benzer bir beton baskı sistemi kurmuştur. Beton, dünya çapında birincil inşaat malzemelerinden biri olarak kullanılmaktadır. Bir inşaat malzemesi olarak yüksek termal direnç, düşük maliyet, iyi dayanıklılık, yüksek mukavemet, iyi akış kazanma yeteneği ve farklı şekillerde kalıplama gibi çeşitli faydaları vardır. Üç betonarme (RC) yapı bileşeni olabilir: beton, donatı ve kalıp. Araştırmalar, kalıbın toplam maliyetin ve zamanın sırasıyla % 35-54'ünü ve % 50-75'ini oluşturduğunu

göstermektedir. Bununla birlikte, yeni bir teknik olan Beton 3D baskı sayesinde inşaat şirketleri geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla çok fazla zaman ve maliyet tasarrufu sağlayabilir. Birleşik Krallık istatistiklerine göre, Birleşik Krallık inşaat sektörü yılda yaklaşık 54 Mt inşaat ve yıkım (C&D) atığı üretmekte ve bunun sadece % 9'u kırıldıktan sonra yeniden kullanıma gitmektedir. Malzemenin karıştırılması ve kullanımı geleneksel olanlara kıyasla sistematik bir şekilde olacağından, 3D Beton baskı inşaatının benimsenmesinin inşaat atıklarını kontrol edebilmesi memnuniyetle karşılanmaktadır. Sonuç olarak, ekonomik olacaktır, zaman kazandıracaktır, iyi bir üretkenlik sağlayacaktır ve bu inşaat israfı nedeniyle küresel ısınmayı azaltarak iyi bir çevresel etkiye yardımcı olacaktır (Shahzad ve ark., 2022).

6.7. 3D Baskı İnşaat Sistemleri

3D baskı inşaatının en önemli avantajı, standart olmayan geometrilere sahip karmaşık yapıları ve nesneleri hızlı bir şekilde üretmesidir. 3D baskı inşaat süreçleri, kurucuları tarafından verilen isimlerle üç ana kategoriye ayrılabilir Kontur İşçiliği, D-Şekil ve beton baskı. Bu süreçler ayrıntılı olarak tartışılmaktadır ve erişilebilir durumdadır. Bu süreçleri inşaat amacıyla kullanmak için ekstrüzyon ve pompalama yaklaşımları olmak üzere iki tür yaklaşım kullanılmaktadır. Her iki yaklaşımda da ilk adım 3D CAD modelini modelin 2D katmanlarına dilimlemektir. Ardından, bir nesneyi yazdırmak için tüm temel gereksinimler, baskı hızı, malzemenin ekstrüzyon hızı ve ürünün istenen son şeklini elde etmek için nesnenin diğer koordinat bilgileri gibi okunabilir bir dilde yazıcıya verilir. 3D beton yazıcıları, nozullar, pompalar ve kontrol sistemleri ve besleme mekanizmaları bu bölümde ele alınacaktır. Bu sistem parçaları, yüksek kaliteli 3D baskılı ürünler elde etmek için mükemmel bir kombinasyonda olmalıdır (Shahzad ve ark., 2022).

Robotların boyutları genellikle sabittir ve bu da ihtiyaçlara göre ölçeklendirmeyi zorlaştırır. Bununla birlikte, serbestlik dereceleri altı kollu robotlarda daha uygundur ve 4 kollu gantry yazıcıya kıyasla birçok değerli işlemi gerçekleştirmelerini sağlar. Ayrıca, gantry yazıcıların kullanılması, robotik yazıcıları kullanmak yerine baskı nesnesinin çok az karmaşıklığa sahip olduğu durumlarda uygundur. Gantry yazıcılar gibi robotik yazıcılar da yüksek maliyet ve kollarda daha az ağırlık gerektirir. Gantry yazıcıların boyutu, sahaya ve kullanıma bağlı olarak küçük ölçekli laboratuvar yazıcılarından büyük bina inşaatı ölçekli yazıcılara kadar değişmektedir. Çin'deki Win sun İnşaat Şirketi de beş

katlı bir apartman dairesi ve bir malikane de dahil olmak üzere birden fazla ev inşa etmek için aynı gantry yazıcı tekniğini kullanmıştır. Bu inşaat için kullanılan malzeme cam elyafı, çimento, sertleştirici maddeler, kum ve bazı geri dönüştürülmüş inşaat malzemesi atıklarından oluşmaktadır. İnşa edilen tüm evler tamamen 3D baskılı olmamıştır. Parçaları şirkette hazırlamışlardır ve daha sonra sahada monte etmişlerdir. Bir başka Hollanda şirketi olan CyBe katkı maddeleri, CC tekniğini kullanarak 5 dakika içinde dayanılabilir güç kazanabilen bir harç basmıştır. Deneyleri yüksek hız ve iyi bir stratejiyle gerçekleştirmek için altı eksenli robotik kola sahip bir baskı kafası kullanmışlardır. Bir robotun gantry yazıcıya göre ilave dönme eksenini, tasarımcının daha karmaşık geometrileri kolayca basmasını sağlar. Bir Rus Şirketi 58 m² baskı alanı sağlayan vinç tipi bir yazıcı inşa etmiştir. 3D betonda, baskı kafası hızının boncuk boyutlarını etkilediği gözlemlenmiştir. Örneğin, baskı kafası hızı daha yüksek olduğunda, malzeme katmanı birikimi yeterli olmayacaktır ve boncuk boyutu kısa olacaktır. Öte yandan, baskı kafası çok yavaş hızlanırsa, biriken malzeme tabakası nozül deliğinden daha yüksek olacaktır, boncuk boyutlarını artıracaktır ve malzemeyi de boşa harcayacaktır. Önceki araştırmalardan biri, iki katman arasındaki zaman aralığının 11 ila 60 saniye arasında olduğunu ve bunun da 1,1 ila 6 m/saat hızında bir 3D sütun oluşturulmasına olanak sağladığını fark etmiştir. Beton yapım süreçlerinde ekstrüzyon hızı genellikle 15 ila 125 mm/s arasında değişmektedir. Yüzeyin kalitesinin, 15x70 mm olan ekstrüzyon plakası boyutuna bağlı olarak ekstrüzyon hızını yaklaşık 200 mm/s ile sınırladığı görülmektedir. Sonuç olarak, 3D inşaat baskısı için malzemeden malzemeye değişebilir (Shahzad ve ark., 2022).

6.9. Beton Ekstrüzyon Nozulları

Malzeme katmanının şekli ve boyutu, baskı kafasının uç kısmı olan nozüle bağlıdır. Baskı kafasının ucundaki uygun bir nozül, yatak katmanları üzerindeki malzeme katmanlarının istenen şekil ve kalitesini elde etmek için gereklidir. Bu nozulu elde etmek için yazıcı, katmanların çökmesini önlemek amacıyla yola teğet olmalıdır. Dairesel, dikdörtgen, kare ve eliptik gibi çeşitli nozul delik şekilleri kullanılmaktadır. Ayrıca, daha iyi bir yüzey kalitesi için yan malzeler de kullanılabilir. Araştırma sonuçları, dairesel şekilli orifis nozülünün, bir nesnenin baskısı sırasında baskı açısı veya köşelerindeki özgürlük gibi diğer orifis şekillerinden daha fazla avantaja sahip olduğunu göstermektedir. Bazı çalışmalar, kare orifisin yüzey bitirme ve imalat kolaylığı açısından eliptik orifisten çok

daha iyi olduğunu göstermektedir. Nozul deliği boyutları, basılacak nesnenin şekline ve boyutuna göre değişir. Dairesel deliklerin boyutu kullanımda yaklaşık 4-24 mm arasında değişirken, dikdörtgen gibi diğer delik şekilleri 9x6 mm ila 38x15 mm arasında değişmektedir. Mevcut nozullar yaklaşık 0,05-0,1 L/s malzeme sağlamaktadır. Bununla birlikte, 3D baskı yapımı için, nozülün ekstrüzyon hızı yaklaşık 1 L/s'dir ve kabaca tahmin edilen 2 L/s'ye kadar bir hız gerçekçi bir hedef oran olarak kabul edilir ve yazdırılacak nesnenin şekline ve tasarımına göre birden fazla nozül deliği kullanılabilir (Shahzad ve ark., 2022).

6.10. Pompalama, Besleme ve Kontrol Sistemi

3D baskı yapım sisteminin temel parçalarından biri, parçacıkları ayırmadan malzemeyi makul bir dağıtım hızında pompalamaktır. Pompa, malzemeyi karıştırıcıdan bir boru veya hortum aracılığıyla, gerekli nesneyi yazdırmak için malzemenin ekstrüde edildiği nozüle besler. Pompa, büyük parçacık boyutlu agrega ve su/çimento (w/c) oranı aralığındaki zorlukların üstesinden gelerek malzemeyi karıştırma ünitesinden nozüle taşıyabilmelidir. Taze malzemenin yüksek viskozitesinin korunması, yaklaşık 1 ila 5 MPa arasında değişen nispeten daha yüksek pompalama basıncı gerektirir. Yüksek basınçta pompalama sırasında boruda malzeme tıkanması meydana gelebilir ve bu da bulaşma tabakasının kaybına neden olabilir. Besleme sistemi, Nozul ve malzeme özellikleri arasındaki denge, sorunsuz bir baskı süreci ve ürün elde etmek için çok önemlidir. Pompalama hızı, malzemenin fazladan birikmesini önlemek için özellikle açılarda nesne boyutu ve şekli ile ilgili olarak yönetilebilir. Şekil süreksizliklerini ve nozül ekstrüzyon hareketini takip etmek için pompalama hızını ayarlamak önemlidir. Bu nedenle, nozül hareketinin, yazıcı hızının ve malzeme pompalamasının eş zamanlı kontrolü için eksiksiz bir tek üniteli kontrol sistemi daha iyidir. Çökmeyi önlemenin etkili bir yolu, malzemenin ayarını artırmak için katkı maddelerini karıştırıcıda karıştırmak yerine, malzeme nozüldeyken bir aşamada malzemeye kimyasal katkı maddeleri koymaktır (Shahzad ve ark., 2022).

6.11. 3D Yazdırılabilir Malzemelerin Özellikleri

Viskozite, kullanılabilir süre, kayma gerilimi ve mukavemet, yeni hazırlanmış malzemenin temel özellikleridir ve pompalanabilirlik, ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik ile doğrudan ilişkilidir. Akışkanlık, malzemenin sertleşme vb. gibi malzeme

özelliklerini etkilemeden basılmasını sağlayan mevcut süreye bağlı olarak değişir. Genellikle Vicat aparatı ilk ve son priz süresini ölçmek için kullanılır. Karıştırma ve ilk ayar zamanı arasındaki süre açık zaman olarak adlandırılır. Aynı zamanda, pompa kabiliyeti ve ekstrüde edilebilirlik, Reometrelerin ölçebildiği kayma gerilimi ve viskozite tarafından doğrudan etkilenebilir. Ayrıca, slump testi dolaylı olarak taze malzemenin kayma gerilimini ölçebilir. Malzemenin yeşil mukavemeti, herhangi bir çökme veya şekil bozukluğu olmaksızın yatak katmanları üzerindeki sonraki katmanların yükünü taşıyacak kadar yeterli olmalıdır (Shahzad ve ark., 2022).

6.11.1. Pompalanabilirlik

Pompalanabilirlik, malzemenin basınç koşulları altında ilk özellikleriyle birlikte hareketliliği anlamına gelir. Hem nozülde hem de pompada ihtiyaç duyulan malzeme durumu zıttır, örneğin pompadaki malzeme yumuşak olmalıdır, bu da hareket etmesi kolay olacaktır. Öte yandan nozüldeki malzeme şekli koruyacak kadar sert olmalıdır. Beton farklı boyut ve parçacıklardan oluşan heterojen bir malzemedir, bu nedenle pompalanabilirlik sistemi optimize edilmeli ve malzemeyi pompalamak için yeterince iyi olmalıdır. Pompalanabilirliği artırmak için kabul edilebilir macun içeriği ve tanelerin harç kıvamı gereklidir. Çalışmalar, kayar boru reometrelerinin geçirgenliği ölçmek için uygun olduğunu öne sürmüştür (Shahzad ve ark., 2022).

6.11.2. Ekstrüde Edilebilirlik

Örneğin, önceden dökülmüş içi boş çekirdek döşeme elemanlarının üretimi gibi yaygın beton ekstrüzyon işlemi, nozülden zorlanan plastik benzeri bir karışımı içerir ve bu tür bir üretim için yüksek kesme kuvveti ve sıkıştırma kuvveti gereklidir. 3D baskı yapımında, yazıcının türüne (gantry, robotik, vinç) boyutuna ve çalışma hacmine, örneğin uzunluk, genişlik ve yüksekliğe bağlıdır. Bu iki parametre, gerekli mesafe boyunca taze malzeme pompalanması hakkında bilgi verir. Pompalama için tiksotropik beton istenir ve nozul aşamasındaki taze beton malzemesi geleneksel olanlardan daha az yoğundur. Sertlik, nesnenin şeklini korumak ve nesnenin katmanlarının hızlı bir şekilde inşa edilmesi için gereklidir. Nozülde ayrışmadan kaçınılmalıdır çünkü bu noktada nozülün boyutu dağıtım borusuna kıyasla küçülür ve bu da nozül ucunda basınca neden olabilir. Beton malzemenin iyi tiksotropik ve geçirgenlik özelliklerini elde etmek için malzeme

içerikleri ve oranları dikkatle seçilmelidir. Öte yandan, bu aşamadaki başarısızlık malzeme dağıtım borusunun veya nozülün tıkanmasına yol açabilir (Shahzad ve ark., 2022). Ekstrüde edilebilirlik, taze betonun bir huni ve pompalama sistemi aracılığıyla sürekli bir katman olarak beslenmesi gereken bir nozula nakil kabiliyeti ile ilgilidir. Bu özellik, betonun pompalanması ve püskürtülmesi konusundaki önceki araştırmalarda daha çok ele alınmıştır. Ancak 3D yazıcı teknolojisi kullanıldığında, taze beton ekstrüzyon yerine bir partikül akımı olarak sistemden çıkmaktadır. Yani, beton doğrudan bir katman halinde oluşturulmak yerine, sistemde akışkan bir şekilde hareket eder. Ekstrüzyonla beton katmanlarının oluşturulmasından pek çok araştırma söz etmektedir, ancak bu özellik için uygun bir deney yöntemi henüz net bir şekilde tanımlanmamıştır. Bu da, 3D yazıcılar ile yapılan beton yazımı sürecinde betonun ekstrüde edilebilirliğini değerlendirmek için standart bir test yöntemi eksikliğini işaret etmektedir (Özalp ve ark., 2018).

6.11.3. İşlenebilirlik

Çökme deneyi, betonun işlenebilirliğini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir testtir. Bu yöntem, beton karışımının kıvamını hızlı ve basit bir şekilde ölçmek için tercih edilmektedir. Ancak, çökme deneyi sadece kayma dayanımı ile korelasyon gösterdiği için, betonun reolojik özelliklerinden plastik viskozite hakkında herhangi bir bilgi vermez. Bu nedenle, çökme testi yalnızca tek değişkenli bir test olarak kabul edilir ve betonun tam reolojik karakterizasyonu için yetersizdir. Betonun akışkan davranışını tam anlamak için kayma dayanımı ve plastik viskozite gibi daha fazla parametrenin değerlendirilmesi gerekir. Bu eksikliği gidermek için "iki noktalı deney" yöntemleri, yani betonun kayma dayanımı ve plastik viskozitesini birlikte inceleyen testler daha doğru ve kapsamlı bir reolojik değerlendirme sağlar. Le ve arkadaşlarının çalışmasında, 3D yazıcılarda kullanılacak betonun işlenebilirliğini kayma dayanımı ile ilişkilendirerek, süper akışkanlaştırıcı katkı kullanarak kayma dayanımını azaltmak için katkı miktarının artırılmasının işlenebilirliği iyileştirdiği gösterilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkının oranının bağlayıcıya oranla % 0,5'ten % 1'e çıkarılması, kayma dayanımının 2,60 kPa'dan 0,55 kPa'ya düşmesine neden olmuştur. Bu da işlenebilirliğin artırılmasında önemli bir faktör olarak süper akışkanlaştırıcı katkı miktarının kontrol edilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, 3D yazıcılarla beton üretimi konusunda işlenebilirliğin iyileştirilmesinin, kayma dayanımının azaltılması ve uygun katkıların kullanılmasıyla

mümkün olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, 3D baskı betonunun taze haldeki işlenebilirlik özellikleri su/çimento oranı ve süperakışkanlaştırıcı (SA) katkı oranı değiştirilerek değerlendirilmiştir. İlk olarak, çimentoya ağırlıkça % 1 oranında SA katkısı eklenerek ve su/çimento oranı 0,30 olan bir karışım hazırlanmıştır. Ancak bu karışımda çökme değeri elde edilememiş ve beton basılamamıştır. Bu, düşük su/çimento oranının betonun yeterli işlenebilirliğe sahip olmamasına yol açtığını göstermektedir. Daha sonra, aynı karışımın su miktarı artırılarak su/çimento oranı 0,40'a çıkarıldığında, 200 mm çökme değeri elde edilmiştir. Ancak, bu durumda betonun kendi ağırlığını taşıyamayacak kadar zayıf olduğu ve yalnızca 3 sıradan fazla basılamadığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, yüksek su/çimento oranının betonun işlenebilirliğini artırmakla birlikte, mekanik özellikler ve taşıma kapasitesi üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Son olarak, çalışmada su/çimento oranı 0,30 ve SA'nın çimentoya ağırlıkça % 2 oranında kullanıldığı karışımdan 190 mm çökmeli beton elde edilmiştir. Bu beton, rahatlıkla basılabilir ve kendi ağırlığını taşıyabilir özelliklere sahip olmuş, bu da hem işlenebilirliğin sağlanması hem de erken yaş dayanımının artırılmasının önemli olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, su/çimento oranının azaltılmasının, erken yaş dayanımı üzerinde olumlu bir etki yarattığını ve 3D yazıcılarla beton üretiminde başarılı bir işlenebilirlik sağlandığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, 3D baskı betonları için hem işlenebilirliği sağlayan hem de yeterli dayanımı koruyan karışım tasarımlarının önemini vurgulamaktadır (Özalp ve ark., 2018).

6.11.4. Çalışabilirlik Süresi

Çalışabilirlik süresi (open time) genellikle çimento esaslı malzemelerde, taze betonun işlenebilirliğinin sona erdiği zaman dilimini tanımlamak için kullanılır. Bu süre, betonun ekstrüde edilebildiği (pompalanabildiği) ve işlenebilirliğinin sürdüğü periyodu ifade eder. Çalışılabilirlik süresi genellikle Vicat cihazı ile ölçülen priz süresiyle ilişkilidir, ancak bu cihaz yalnızca betonun başlangıç ve nihai priz sürelerini belirlemek için kullanılır ve taze betonun işlenebilirlik değişimini tam anlamıyla karakterize edemez. Le ve arkadaşlarının tanımına göre, çalışılabilirlik süresi, betonun ekstrüde edilebilme (veya pompalanabilme) seviyesinde olduğu bir süre olarak belirlenmiştir. Bu süre boyunca beton, uygun şekilde şekil alabilir ve taşınabilir. Çalışılabilirlik süresinin sona ermesi, kayma dayanımının başlangıçtaki değerden 0,3 kPa arttığı noktada gerçekleşir. Bu artış, betonun işlenebilirliğinde bir azalma olduğunu ve aynı zamanda basılma zorluğunun artmaya

başladığını gösterir. Başka bir deyişle, kayma dayanımındaki bu artış, betonun artık daha zor basılabilir hale geldiğini ve 3D yazıcıda kullanılamaz hale geldiğini işaret eder. Bu açıklama, taze betonun işlenebilirlik özelliklerinin daha ayrıntılı ve doğru bir şekilde belirlenmesi için kayma dayanımı ve çalışma süresinin izlenmesinin önemini vurgulamaktadır. Betonun taze haldeki davranışlarının doğru değerlendirilmesi, 3D yazıcı ile başarılı bir şekilde beton üretimi için kritik bir faktördür. Araştırmacılar, 0,9 kPa üzerindeki kayma dayanımına sahip betonların ekstrüde edilemediğini, bu durumun beton iletim borularında ve nozulda tıkanmalara yol açtığını tespit etmişlerdir. Öte yandan, 0,3 kPa altında kayma dayanımına sahip betonların ise katmanlar halinde yazıldığında zamanla kendi ağırlığını taşıyamadığı belirlenmiştir. Bu nedenle, arzu edilen çalışabilirlik süresi için kayma dayanımı değerinin 0,3 kPa ile 0,9 kPa arasında olması gerektiği kabul edilmiştir. Bu çalışma, 3D beton baskı süreçlerinde reolojik parametrelerin kritik önemini vurgulamaktadır. Betonun ekstrüzyon sürecinde akışkanlığını koruyarak pompalanabilir olması, ancak aynı zamanda yazılan katmanların stabilitesini kaybetmemesi için belirli bir aralıkta kalması gerekmektedir. Bu tür sınır değerler, 3D yazıcıyla üretilecek beton karışımlarının tasarımında önemli bir referans noktası oluşturmaktadır. Çalışmada, BPÇ 52,5 ve CEM I 42,5 R çimentolarıyla hazırlanan beton karışımlarının işlenebilirlik süreleri incelenmiştir. Zamanla değişen çökme test sonuçlarına ek olarak, betonun pompalanabilirliği mutfak işlerinde kullanılan krema sıkma aparatı benzeri bir beton sıkma hunisi yardımıyla kontrol edilmiştir. Şekil 2’de verilen grafik incelendiğinde, hem beyaz çimento (BPÇ 52,5) hem de Portland çimentosu (CEM I 42,5 R) içeren karışımların, herhangi bir karıştırma işlemi yapılmadığında 15-30 dakika içinde önemli ölçüde işlenebilirlik kaybına uğradığı ve pompalanamaz hâle geldiği görülmüştür. Bu bulgu, betonun pompada veya iletim hortumlarında tıkanması gibi uygulama sırasında sıkça karşılaşılan sorunlarla doğrudan ilişkilidir. 3D yazıcı tekniğiyle üretilecek betonların çalışabilirlik süresinin uzatılması için karışımın belirli aralıklarla yeniden karıştırılmasının etkili bir yöntem olduğu ortaya konmuştur. Bu yaklaşım, taze betonun reolojik özelliklerini koruyarak ekstrüzyon sürecinin sorunsuz ilerlemesine yardımcı olabilir. Çalışmada hem beyaz çimento (BPÇ 52,5) hem de Portland çimentosu (CEM I 42,5 R) içeren karışımlar, 5 dakikada bir, 1 dakika süreyle karıştırılmış ve bu yöntemle çalışabilirlik süresinin 60 dakikaya kadar uzatılabildiği belirlenmiştir. Bu durum, taze betonun işlenebilirliğini kaybetmeden daha uzun süre pompalanabilir ve ekstrüde edilebilir durumda kalmasını sağlamaktadır. Ancak, 3D yazıcı tekniğinde sürekli karıştırma ekipmanlarının kullanımı her zaman

pratik olmayabilir. Bu nedenle, çalışabilirlik süresini ayarlamak için priz hızlandırıcı veya priz geciktirici katkıları kullanılabilir. Çalışmada, çimento miktarının ağırlıkça % 0,3'ü kadar priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkıları kullanılarak işlenebilirlik üzerindeki etkileri incelenmiş ve çökme miktarındaki değişimler Şekil 3'te verilmiştir. Bu deneyler, farklı katkıların betonun reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirerek, 3D yazıcı ile üretilen betonların stabilitesini ve uygulanabilirliğini artırmaya yönelik önemli bulgular sunmaktadır. Priz geciktirici katkıları çimentoya ağırlıkça % 0,3 oranında katıldığında, hem beyaz çimento hem de standart Portland çimentosu içeren karışımlarda 30 dakika boyunca aynı işlenebilirlik korunmuştur. Bu, priz geciktiricilerin betonun çalışabilirlik süresini uzatma konusunda etkili olduğunu göstermektedir. Öte yandan, priz hızlandırıcı katkıların % 0,3 oranında kullanılması durumunda beyaz çimentolu betonun 15 dakika, standart Portland çimentolu betonun ise 30 dakika içinde pompalanamaz hâle geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, priz hızlandırıcı katkıların betonun erken yaş dayanım gelişimini hızlandırırken aynı zamanda işlenebilirlik süresini önemli ölçüde kısalttığını göstermektedir. Bu bulgular, 3D yazıcı ile beton üretiminde priz süresini kontrol etmenin işlenebilirlik açısından kritik olduğunu ve uygun katkı kullanımının süreç yönetimi açısından önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır (Özalp ve ark., 2018).

6.11.5. İnşa Edilebilirlik (Taşıtılabilirlik)

Katmanların nesnenin şeklini koruma, kendi kendini destekleme ve yatak katmanlarının çökme ve şekil deformasyonu olmaksızın sonraki katmanların ağırlığını taşımasını sağlama özellikleri; tüm bu özellikler malzemenin inşa edilebilirliğini ifade eder. Katmanlardaki kusur, birbirini takip eden malzeme katmanları eklendiğinde dengesiz bir şekilde yol açabilir. Geleneksel çalışmalarda kalıp vardır, bu nedenle bu konuda endişe yoktur, ancak 3B beton baskı kalıpsız bir tekniktir, bu nedenle iyi sonuçlar elde etmek için betonun kendi kendini desteklemesi gerekir. Malzemenin özelliklerini iyileştirmek yerine basılı malzemenin inşa edilebilirliğini sağlamanın birkaç yolu vardır. Yapısal inşa edilebilirliği değiştirmenin en basit yolu nozül şeklinin değiştirilmesidir. Örneğin, iki boncuk arasındaki temas alanı dairesel orifisli bir nozülde dikdörtgen olana göre daha azdır ve temas alanı yapının inşa edilebilirliğini artırmaya yardımcı olacaktır. Yapılabilirliği iyileştirmenin bir başka yolu da tek bir nozül veya çoklu nozül başlığı kullanarak bitişik katmanların sayısını ve katmanların hücresel yapısını artırmaktır. Bununla birlikte, tek bir nozülün başlangıç ve bitiş noktası aynı olmalıdır, ancak çoklu

nozül başlıkları için gerekli değildir (Shahzad ve ark., 2022). Bu çalışmada, 3D baskı betonunun inşa edilebilirliğini değerlendirmek amacıyla farklı çökme değerlerine sahip betonların taşıtılabilirliği görsel olarak incelenmiştir. Geleneksel betonların aksine, 3D baskı betonlarının kendi kendini taşıyabilmesi gerektiğinden, inşa edilebilirlik önemli bir parametredir. Beyaz çimento içeren karışım, erken yaş dayanımlarının yüksek olması nedeniyle 200 mm çökme değerine kadar başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Portland çimento içeren karışım, daha geç dayanım kazandığı için ancak 170 mm çökme değerine kadar taşıtılabilir bulunmuştur. Portland çimentolu karışıma priz hızlandırıcı katkı eklenmesi, priz süresini kısaltarak 200 mm çökme değerinde bile kendi ağırlığını taşıyabilen ve 3D yazıcıyla başarılı bir şekilde basılabilen betonların üretilmesini sağlamıştır. Bu sonuçlar, 3D baskı betonlarında priz süresi ve işlenebilirlik arasındaki hassas dengenin, kullanılan çimento türü ve katkı maddeleriyle optimize edilebileceğini göstermektedir. Özellikle priz hızlandırıcı katkılar, yüksek kıvamdaki betonların bile erken yaşta yeterli dayanım kazanmasını sağlayarak inşa edilebilirliği artırabilir (Özalp ve ark., 2018).

6.11.6. Akışkanlık Kontrolü

Akışkanlık, taze beton malzemenin performansını sağlayan 3D yazdırılabilir malzemenin çok önemli bir parametresidir. Akışkanlık kontrolü, malzemenin herhangi bir tıkanma olmaksızın dağıtım sisteminden nozüle doğru pompalanacak kadar iyi olmasını sağlar. Tane boyutuna bağlıdır ve daha geniş tane boyutu, taze haldeki bir malzeme karıştırıcısının iyi bir akışkanlık kazanmasına yardımcı olur. İnce toz katkılar, malzemenin bağlanmak ve boyut olarak büyümek yerine çimento harcının iyi akışkanlığını sağlayan akışkan bir şekil almasına yardımcı olur. Fazla miktarda ince toz katılması viskozitede ve partiküller arası sürtünme kuvvetlerinde artışa neden olabilir. Sonuç olarak, akışkanlık üzerinde olumsuz bir etki olacaktır. Çalışmalar, bir süperakışkanlaştırıcı eklenmesinin akışkanlığı iyileştirebileceğini ve suyun bağlayıcı malzemeye oranının artmasının da akışkanlığı iyileştirdiğini kanıtlamıştır (Shahzad ve ark., 2022).

6.11.7. Zaman Kontrolünün Ayarlanması

Sürekli bir akış ve malzeme katmanlarının biriktirilmesi için, doğru baskı malzemesinin korunması için uzun bir süre gerekir. Bununla birlikte, malzemenin nozülde ekstrüde edildikten sonra erken mukavemet için kısa bir priz süresine de ihtiyacı vardır. Priz süresi özelliği çoğunlukla geciktirici ve hızlandırıcı katkılara bağlıdır ve çalışmalar, geciktirici veya hızlandırıcı miktarını değiştirerek her malzemenin gerekli ilk ve son priz süresini elde edebileceğini göstermektedir. Araştırma sırasında gözlemlenen öneri, hızlandırıcı ilavesinin su ile seyreltilmiş karıştırma yerine kuru karıştırmada olması ve karıştırma hızının ve süresinin sırasıyla 20 saniyede 52 rpm olması gerektiğini göstermektedir. Çalışmalar, geciktiricinin priz süresi üzerindeki etkisini kanıtlamıştır; örneğin, sodyum tetra borat ve % 0,1 ila % 0,3 arasında değişen karışım oranı, jelleşme süresini yaklaşık 29 dakikadan 110 dakikaya kadar ve nihai priz süresini 50 ila 148 dakikaya kadar hafifçe artırabilir (Shahzad ve ark., 2022).

6.11.8. Basınç Dayanımı

Betonun sertliği ve dayanımı, Portland çimentosuna kıyasla küçük boyutlu ince toz katkıları kullanılarak artırılabilir, boşlukları doldurmaya ve paketleme yoğunluğunu artırmaya yardımcı olur, bu da iyi bir basınç dayanımı sağlar. Silis dumanı ve uçucu kül genellikle SiO_2 bakımından zengindir ve malzemenin mekanik dayanımını etkiler ve dayanımı artırmaya yardımcı olur. Bu iki bileşen sistemin hidrasyon sürecini etkiler ve beton malzemenin veya çimento harçlarının mekanik dayanımını artırarak malzemeyi daha yoğun ve daha kompakt hale getirir. Kütlece % 10 silis dumanı kullanımının betonun dayanımını % 8-20'ye kadar artırdığı bildirilmektedir. Silis dumanının etkisi katkının başlangıç aşamasında belirgin değildir. Etkisini üç gün sonra gösterir. Silis dumanı katkı miktarı arttıkça beton dayanım oranı 1 gün/28 gün azalır ve yaklaşık % 6 ila % 30 arasında değişir. Erken aşamalarda gerektiği kadar dayanım kazanmak için çalışmaz. Betonun 3 günlük dayanımı ağırlıkça % 4 nano- SiO_2 eklenerek % 81'e kadar artırılmıştır. Çalışmalar, yedi günlük ve 28 günlük numunelerin silis dumanı ve SiO_2 ilavesiyle karşılaştırıldığını, sonuçların SiO_2 içeren numunelerin dayanımının diğerlerinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. İyi bir dayanım elde etmek için dağıtıcı maddelerin partikülleri etkili bir şekilde dağıtması gerekir. Malzemeye büyük miktarda uçucu kül katılmasının beton dayanımında düşüşe yol açacağı belirtilmektedir. Uçucu kül,

mukavemeti artırmak için yavaş çalışır ancak daha sonraki aşamalarda yükselir. Bir araştırma da yüksek miktarda kireçtaşı tozunun erken aşamalarda basınç dayanımını düşüreceğini öne sürmüştür (Shahzad ve ark., 2022).

6.11.9. Büzülme Kontrolü

Her ne zaman bozulursa, basılan nesnenin boyutsal doğruluğu ve kararlılığı, genellikle baskı performansını etkileyen büzülmeden sorumludur. İyi akışkanlık ve ekstrüde edilebilirlik sağlamak için, hidrasyon işlemi için gereken hacmin ötesinde yüksek su içeriği gereklidir. Fazla suyun buharlaşması, basılı nesneyi priz süresi ve sertleşme aşamaları sırasında büzülmeyle doğru yönlendirir. 3D baskılı nesnelerde, geleneksel yöntemlere kıyasla alanın çoğu açık ve çevresel koşullarla serbestçe temas halinde olduğundan, suyun nesneden kolayca buharlaşmasına neden olur ve büzülme meydana gelir. Büzülmeyi kontrol etmek için olası çözümler, mineral katkı içeriğini artırmak ve kompozitlerin büzülmesini önlemek için ince agregalar kullanmaktır. Büzülmeyi azaltmak için uçucu kül ilavesinin önemli etkileri olduğu gösterilmiştir; çimentonun % 80 uçucu kül ile değiştirilmesi büzülmeyi yaklaşık % 67 oranında azaltabilmektedir. Uçucu kül ve sülfaloüminat çimentosunun birlikte kullanılması halinde kuru koşullarda büzülme % 80'e kadar azalmaktadır. Silis dumanının % 10 ila % 15 oranında eklenmesi betonun otojen büzülmesini % 33 ila % 50 arasında değişen oranlarda artırabilir (Shahzad ve ark., 2022).

6.11.10. Kimyasal Katkı Maddelerinin Seçimi

Süperakışkanlaştırıcı

Hazırlama sırasında betonun işlenebilirliğini ve dayanımını korumak için, süperakışkanlaştırıcı olarak bilinen bir kimyasal ekleyerek daha az su kullanmak mümkündür. Negatif yüklü süperakışkanlaştırıcı, hapsedilen suyu serbest bırakmak için çimento partiküllerini iterek malzemenin iyi akış kabiliyeti kazanmasını sağlar. Araştırmalar, süperakışkanlaştırıcı ilavesinin hidrasyon sürecini değiştirmedığını ancak kristal yapıyı iyileştirerek süreci geliştirdiğini göstermektedir. Süperakışkanlaştırıcı dört ana gruba ayrılır ve piyasalarda kolayca bulunabilir. Ancak, aynı gruptan olsalar bile, moleküllerin farklı kimyasal yapıları nedeniyle dayanım, priz süresi ve akış üzerindeki etkileri farklıdır (Shahzad ve ark., 2022).

Hızlandırıcı

3D beton baskısı, genellikle nozülünden çıktıktan sonra gelecek katmanın ağırlığını taşıyabilmesi için malzemenin hızlı bir şekilde priz almasını gerektirir. Bu nedenle hızlandırıcı, betonun yeterli erken dayanım elde etmesini sağlayan bir katkı maddesidir. Hızlandırıcı bileşimler, priz süresini kısaltarak ve malzemenin prizini hızlı bir şekilde artırarak hızlı bir hidratasyon süreci üzerinde çalışır. Hızlandırıcılar alkali veya alkali içermeyen bir grup olabilir (Shahzad ve ark., 2022).

Geciktirici

Geciktirici, çimento partiküllerinin yüzeyinde çözünmeyen bir tabaka oluşturarak çimentonun hidratasyon sürecini geciktirmek için kullanılır. Araştırmacılar, uygun bir geciktirici etki elde etmek için Tartarik asit, sitrik asit ve sodyum glukonat kullanılmasını önermektedir (Shahzad ve ark., 2022).

Viskozite Değiştirici Maddeler (VMA)

Viskozite modifiye edici maddeler suda çözünür ve beton akışını ve reolojik özelliklerini değiştirmek için sıklıkla kullanılır. Viskozite modifiye edici maddelerin küçük dozajları bile çimento harçlarını önemli ölçüde etkiler ve akışkanlığı ve boyutsal kararlılığı iyileştirir. VMA, toz ihtiyacını azaltırken yine de gerekli boyut kararlılığına ve akış özelliklerine sahiptir. VMA, Van der Waals etkileşimi yoluyla molekülleri birbirine bağlamış ve ekstra su hareketini durdurarak plastik viskozitenin artmasına yol açmıştır. Dikkat edilmesi gereken nokta, 3D baskı malzemesi viskozitesinin artması durumunda daha yüksek pompalama basıncına ihtiyaç duyulmasıdır (Shahzad ve ark., 2022).

7. MEVCUT SINIRLAMALAR, ZORLUKLAR VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

İnşaat sektöründe 3D baskının karmaşık geometri ve yapılar inşa etme yeteneği, tasarım özgürlüğü ve özelleştirme gibi faydalarının yanı sıra, önceki araştırmalardan gözlemlenen birkaç sınırlama, zorluk ve dezavantaj vardır. Bu sınırlamalar ve dezavantajların üstesinden gelmek için daha fazla araştırma yapılması ve teknolojinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bölümde, geleneksel inşaat endüstrisinin 3D İnşaat baskısından tam olarak yararlanabilmesi için okuyucuya ve araştırmacılara keşfetmeleri için yeni bir yön sağlamak üzere sınırlamalar ve gelecekteki çalışmalar tartışılacaktır (Shahzad ve ark., 2022).

7.1. 3D İnşaat Baskısının Sınırlamaları

20. yüzyılın ilk on yıllarından bu yana her üretim alanı otomasyon ve teknolojiye neredeyse ilerleme kaydetmiştir (Shahzad ve ark., 2022):

- Büyük ölçekli üretim için otomatik imalat teknolojileri uygun değildir.
- Otomasyon teknolojisi geleneksel tasarım yaklaşımlarına uygun değildir.
- Diğer üretim endüstrileriyle karşılaştırıldığında, üretim oranı önemli ölçüde küçüktür.
- Pahalı otomatik ekipmanlar ilgi ve cazibeyi azaltır.

Farklı alanlar, malzemeler ve müşteri gereksinimleri nedeniyle, her bina diğerlerinden farklıdır ve prototipini yansıtır. Farklılıklara rağmen, çoğu tasarımcı sonunda 3D baskının inşaat sektörüne önemli ölçüde katkıda bulunacağına inanmaktadır. Tasarımcılar, 3D inşaat baskı sürecinin başlangıçta yavaş olduğu ve ilerleyen aşamalarda geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı hale geldiği konusunda hemfikirlerdir. Şekil 13, hem 3D inşaat sürecinin sürekli bir çizgi ile hem de geleneksel sürecin dalgalı çizgi çizgileriyle zaman almasıyla zaman tüketimini göstermektedir. 3D inşaat baskısı için bileşenler önemli ölçüde ağır ve büyük boyutludur ve sistemin bu parçalarını taşımaktan ve kaldırmaktan mümkün olduğunca kaçınılmalıdır. Diğer önemli sorun, UV veya ısıtmalı geleneksel

sistemlere kıyasla ortam koşullarında gerçekleştirilmesini zorlaştıran malzeme hassasiyetidir. Daha az kontrol edilebilirdir. İşlem sırasında göz önünde bulundurulması gereken diğer sınırlamalar sıralanmıştır (Shahzad ve ark., 2022).

- Nozülün rölanti süresinin çok uzun olması halinde beton malzeme katılaşacak ve makineyi bloke edecektir.
- Zaman aralığı minimum kürlenme süresinden daha kısa olamaz, bu nedenle ilk katman herhangi bir çökme veya deformasyon olmaksızın sonraki katmanların yükünü taşıyabilmelidir.
- Malzemenin sonraki katmanları hızlı bir şekilde yapışabilmelidir çünkü zaman aralığı sonraki katmanlar arasında belirli bir sınırı aşmamalıdır.
- Nozulların biriken katmanlarla çarpışmasına izin verilmemelidir. Böyle bir durumda, nozül engellerden kaçınmak için düz bir çizgide hareket edemez (Shahzad ve ark., 2022).

Bu faktörlerden ve malzeme sınırlamalarından elde edilen sonuçlar, şu anda ağır inşaat ve çok katlı binalar için geleneksel inşaat yöntemlerine devam edilmesini ve 3D İnşaat baskısı yardımıyla küçük, hafif inşaat yapılmasını önermektedir. Herhangi bir sınırlama olmaksızın 3D inşaat baskısını desteklemek için teknolojiyi geliştirmeye ve başarıya ulaşana kadar beklemeye ihtiyaç vardır ve 3D inşaat baskısı ağır inşaatların yapılmasını sağlayacaktır (Shahzad ve ark., 2022).

7.2. 3D İnşaat Baskısının Zorlukları

7.2.1. İstikrar ve Akış Dengesi

3D beton baskı için iki duruma sahip bir malzemeye ihtiyaç vardır ve her iki durum da zıt özelliklere sahiptir. Örneğin, malzemenin ekstrüzyonundan önce, pompalanması kolay olmalı ve tutarlı bir akışa sahip olmalıdır. Nozülden ekstrüzyondan sonra, malzeme gelecek katmanların yüklerini taşıyacak kadar kararlı ve sağlam olmalıdır. Bu, deneyler sırasında birçok kez karşılaşılan bir zorluktur (Shahzad ve ark., 2022).

7.2.2. İşlenebilirliği Korumak

İyi baskı sonuçları elde etmek için malzemenin işlenebilirliği kritik faktörlerden biridir. Bununla birlikte, malzemenin sertleşmesi zaman alır ancak karıştırılır karıştırılmaz işlenebilirliğini hızla kaybeder. Malzemenin işlenebilirliğini korumak ve iyi baskı ürünü sonuçları elde etmek için su azaltıcı maddeler gibi katkı maddelerinin eklenmesine ihtiyaç vardır. Genellikle, baskı malzemesi üzerinde çalışırken bu zorlukla karşılaşmıştır (Shahzad ve ark., 2022).

7.2.3. Ekstrüzyon Sonrası Deformasyon Olmaması

3D baskı süreci, malzeme katmanlarının tek tek biriktirilmesiyle ilerler. Her katman bir sonraki katmanın yükünü taşıyacak kadar güçlü olmalıdır ve her gelen katman bir önceki katman tarafından yüklenmelidir. Katmanın yükü bir önceki katmanın üzerine bindiğinde genellikle bir malzeme sorunu ortaya çıkar; bu bir çökme sorunu gösterir. Bu zorluk için çökme olmayan malzeme kullanılarak bir çaba gösterilmiştir, ancak çökme olmayan malzeme malzemeyi pompalarken bir sorun yaşar, bu nedenle deneyler sırasında karşılaşılan bir zorluktur (Shahzad ve ark., 2022).

7.2.4. Köşelerde Çatlak Oluşmasını Önlemek

3D konstrüksiyon üzerinde çalışırken karşılaşılan bir diğer yaygın sorun da basılacak nesnenin köşelerinde çatlama olmasıdır. Köşelerdeki çatlama, köşelerdeki hızlı nozül hızı nedeniyle meydana gelir. Dolayısıyla bu, ürünün mukavemetinde genel olarak karşılaşılan bir zorluktur. Bunlar, önceki çalışmaların gözden geçirilmesi sırasında gözlemlenen bazı zorluklardır. Aşağıdaki bölüm gelecekteki çalışmaları önerecek ve araştırmacılar için araştırma boşluğunu vurgulayacaktır (Shahzad ve ark., 2022).

7.3. Çoklu Nozul Kombinasyonu

Çok nozullu bir kombinasyon, 3D inşaat baskısında yüksek başarıları ve sorun çözümlerini mümkün kılabilir. Tek bir yazıcıda birden fazla nozul kullanılarak yapılabilir ve nesnenin farklı bölümlerinde aynı anda bir yazıcı kullanılarak inşaat işi eskisinden daha hızlı yapılabilir, bu da kısa sürede hızlı üretime yol açar. Bununla birlikte, sistem

karmaşık hale gelecek ve tüm sürecin ele alınması için uygun planlamaya ihtiyaç duyulacaktır. Ayrıca, basılacak parçanın hibrit yapı gereksinimine göre farklı nozüllerden aynı anda farklı malzemeler kullanmak da bir avantajdır (Shahzad ve ark., 2022).

7.4. 3D İnşaat Baskı Hibrit Sistemleri

3D inşaat baskısı için hibrit sistemler geliştirilebilir. Yapılar için farklı malzemeler ve çeşitli bileşenler kullanılabilir. Yapısal ve yapısal olmayan uygulamalar için, gelecekteki çalışma projelerinde B&C'de 3D baskı için farklı sınıf malzeme türleri kullanılabilir. İnşa edilen binaların sürekli izlenmesi için malzemede sensör ve aktüatörlerin kullanılması önemli ölçüde faydalı olacaktır. Bunlar, inşaat aşamasında bile gerçek zamanlı izleme sağlayacaktır. Bununla birlikte, yük taşıma özelliklerini ve geliştirilmiş yapısal tasarım takviyesini elde etmek için sensörlerin kullanılması betonla birlikte kullanılabilir (Shahzad ve ark., 2022).

7.5. Yeni Malzeme Geliştirme

Araştırmacılar için hala zorlu bir görev olan çimento, kum, flaş ve liflerin farklı kombinasyonlarını kullanarak 3D İnşaat baskısı için malzeme geliştirmek üzere çeşitli dostane çabalar yürütülmüştür. 3D baskının başarısı büyük ölçüde her uygulamaya göre özelliklere sahip yeni malzemelerin geliştirilmesine bağlıdır. Malzeme, hafiflik, ısı yalıtımı, düşük maliyet, iyi priz süresi, yeterli mekanik mukavemet ve gelecekteki karmaşık ve büyük ölçekli inşaatlarda etkili olmak için iyi akış kabiliyeti gibi işlevsellik katma değerleri içermelidir. Bununla birlikte, çoğu araştırmacının inandığı gibi, 3D baskının geleceği parlaktır ve karmaşık ve büyük ölçekli yapıları basma potansiyeline sahiptir (Shahzad ve ark., 2022).

7.6. Güçlendirme Özelliği

Betonun düşük çekme dayanımı ve sünekliği, B&C'de 3D baskı için bir başka büyük zorluktur. Çelik takviye eklemek bu sorunu çözebilir, ancak 3D baskı işlemi durumunda, çeliğin otomatik olarak takviye edilmesi geleneksel olana kıyasla kolay değildir. Gömme ve ard germe donatıları otomatik yerine manuel olarak yerleştirilebilir. Dikey yöndeki çekme mukavemeti, nozülün arkasındaki zımba tabancasına benzer bir çelik ekstrüzyon

tabancası kullanılarak artırılabilir. Ancak filamente nüfuz eden çelik zımbanın kuvvetini kontrol etmek zor olacaktır. İki kuvvet olasılığı olabilir: kuvvet çok büyükse taze beton tahrip olurken, çok küçük bir kuvvet varsa penetrasyon olmayacaktır. Çelik donatıda liflerin kullanılması beton malzemenin sünekliğini artıracaktır (Shahzad ve ark., 2022).

7.7. Baskı Parametrelerinin Optimizasyonu

3D Beton baskı, baskı hızı, malzemenin akış hızı ve baskı malzemesi katmanlarının kalınlığı gibi baskı parametrelerinden önemli ölçüde etkilenir, çünkü bu özellikler yapım sürecinde önemli bir rol oynar. Bu parametreleri ayarlamak için önlemler gereklidir. Bir şeyler ters giderse, ciddi başarısızlıklara ve kötü baskı kalitesine yol açacaktır. Baskı sürecindeki en büyük sınırlama, düzensiz malzeme katmanlarına neden olan boşluk oluşumudur. Çalışmalar, bu katmanlama etkisinin katman kalınlığının doğru seçilmesiyle kontrol edilebileceğini, ancak katman kalınlığının çok küçük olması durumunda ürünü tamamlamak için gereken sürenin daha fazla olacağını göstermiştir. Dolayısıyla, bir nesneyi basmak için baskı süresi, katman kalınlığı ve çıktı ürünün yüzey kalitesi dikkate alınmalıdır. Son olarak, genel yüzey kalitesi, taşlama veya sıvama gibi son işlemler kullanılarak iyileştirilebilir (Shahzad ve ark., 2022).

7.8. 3D Beton Baskı için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)

İnşaat sektöründe, endüstrilerin çevre üzerindeki etkisi daha önemli olmakla birlikte, Beton 3D baskı, geleneksel yöntemlere kıyasla inşaat sırasında malzeme israfı olmadan yeşil ve temiz bir inşaat süreci sağlamıştır. Araştırmacılar, dijital olarak üretilmiş mimaride malzeme açısından verimli tasarım kullanmanın çevresel faydalarını vurgulamışlardır. Bu çalışmalarda ana odak noktası, bir dereceye kadar ilgili ve gerekli olan 3D baskı yerine dijital imalatı. Bu çalışmada bir araştırma boşluğu vardır ve LCA, ürün ömrü ve sürecinin tüm aşamalarının çevresel etkilerini ve 3D baskı iyileştirmesinin çevre üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılmalıdır (Shahzad ve ark., 2022).

7.9. Beton 3D Baskı için Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi (LCCA)

Geçmiş çalışmalarda ekonomiye ilişkin temel bir anlayış eksikliği bulunmaktadır ve 3D beton baskıda yardımcı olabileceği için gelecekteki araştırmalara dahil edilmelidir. Bu

şekilde, maliyet ve tasarım parametreleri arasındaki ilişkinin erken bir analizi önerilebilir. LCCA'nın birincil amacı, mümkün olan en düşük toplam tasarım, üretim oranı, parça imhası, ürün kullanımı ve ürün geliştirme maliyetini elde etmektir. LCCA sisteminin 3D beton baskı süreciyle birleştirilmesi tüm süreç aşamalarından tasarruf sağlayacaktır. Süreç, üretim oranını, toplam maliyeti ve ürün tasarımını iyileştirecektir (Shahzad ve ark., 2022).

7.10. Güvenlik ve Beceri Gereksinimi

İnşaat sahasında güvenlik, çalışmalarda gözlemlenen ve kanıtlanan en büyük zorluklardan biridir. Önleyici güvenlik sistemleri tasarlanırken çarpışma, makine üzerine düşme ve makinelerin devrilmesi gibi durumlar göz önünde bulundurulmalıdır. Baskı işlemi sırasında işçilerin makinelerin hareketli parçalarıyla çarpışmasını önlemek için fiziksel bir bariyer gereklidir. Kazaları önlemek için çalışma sahasına bir güvenlik video kamerası kurulmalı ve inşaat sırasında güvenlik yönetimi personeli tarafından sürekli olarak izlenmelidir. Bir diğer önemli zorluk da işçilerin hem robotik hem de inşaat sahası çalışmalarında deneyim sahibi olması gerekliliğidir. Baskı parametreleri ve malzeme özellikleri bilgisi, tasarımın kalitesini ve sınırlamalarını önemli ölçüde etkiler. Son araştırmalar bu alandaki hızı gösterdiğinden, 3D baskı endüstrisinin 2022 yılına kadar önemli ölçüde büyümesi beklenmektedir. Bu nedenle, mevcut çalışanların geleneksel yöntemler yerine 3D beton baskı için yeni becerilere ihtiyacı vardır ve tüm zorlukları anlamak ve üstesinden gelmek için çok fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Shahzad ve ark., 2022).

7.11. Taze Halde Reoloji ve Ampirik Özellikler

3D baskılı beton, pompalanabilirliğini, ekstrüde edilebilirliğini ve izin verilen sürede inşa edilebilirliğini sağlamak için tiksotropik karaktere sahip olmalıdır. Tiksotropi, karıştırma nedeniyle kayma deformasyonu askıya alındığında betonun plastik viskozitesini geri kazanma yeteneğinin bir göstergesidir ve ekstrüzyon öncesi ve sonrası reolojiyi temsil eder. 3D beton baskısı için, yüksek statik ve dinamik akma gerilmesine, yüksek viskoziteye ve genellikle taze durumda iyi işlenebilirliğe sahip bir karışım gereklidir. 3D baskıda betonun yüksek işlenebilirliği, 3D baskı ekipmanının nozulları aracılığıyla

betonun pompalanabilirliğini ve basılabilirliğini desteklemenin yanı sıra 3D baskı ekipmanının bütünlüğünü korumak için arzu edilir (Uribe-Pinzon ve ark., 2021).

7.12. Mekanik Özellikler

3D baskılı beton katmanlar veya filamentler halinde dikey olarak döküldüğünden, bu malzeme heterojendir ve esas olarak anizotropik mekanik özellikler sunar, yani malzemenin yönüne bağlı olarak özellikler değişir. Bununla birlikte, diğer çalışmalar 3D baskılı betonun anizotropisinin uygun şekilde yürütülen bir ekstrüzyon işlemi ile azaltılabileceğini belirtmiştir. 3D baskılı betonun mekanik özellikleri, baskılı elemanı oluşturan farklı katmanlar veya filamentler arasındaki yapışmaya bağlıdır; bu yapışma tamamen baskı performansından, baskı yolundan, nozulün şeklinden ve boyutundan, temas halindeki farklı katmanların veya filamentlerin su emme oranından vb. etkilenir. Katman biriktirme yönündeki 3D baskılı betonun basınç dayanımı, geleneksel betonun basınç dayanımı ile karşılaştırılabilir ve ana yönde (katman biriktirme yönü) test edilen 3D baskılı beton için sırasıyla 102 MPa ve 8 MPa'ya kadar basınç dayanımları ve eğilme dayanımları rapor edilmiştir. Benzer şekilde, ana yönde, 3D baskılı beton sırasıyla 36,6 GPa ve 0,28 mertebesinde elastisite modülü ve Poisson oranı elde edebilir. Bu nedenle, 3D baskılı betonun ana yöndeki mekanik özellikleri, geleneksel yerinde dökme betonun aynı mekanik özelliklerine benzerdir (Uribe-Pinzon ve ark., 2021).

7.13. Dayanıklılık Özellikleri

Katmanlar arası bağ, 3D baskılı betonun dayanıklılığını ve taşınma olaylarını incelemek için anahtardır. Önceki çalışmalar, 3D baskılı betonun karbonatlaşma direnci ve klorür iyonu penetrasyon direncinin geleneksel betonunkilere benzer olduğunu göstermiştir (Uribe-Pinzon ve ark., 2021).

7.13.1. Geçirimsizlik Özellikleri ve Donma-Çözölmeye Direnç

Numune hazırlama ve kür sürecinde 3D yazıcı nozul ağzından alınan 100x200 mm boyutlarındaki silindirik numuneler, her deney için 50x100 mm boyutlarındaki disk numunelere kesilmiştir. 28 gün boyunca su küründe bekletilen numuneler kılcal su emme deneyi (ASTM C 1585), hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyi (ASTM C 1202), donma-

çözülme dayanımı (EN 12390-9) deneyine tabi tutulmuştur. Kılcal su emme deneyinde numune yan yüzeyleri geçirimsiz hale getirilerek sabit su seviyesinde bekletilmiştir. 8. gün sonunda tartım yapılarak su emme miktarı belirlenmiştir. Hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyinde numunelerden geçen akım Coulomb (C) cinsinden ölçülmüştür. Daha düşük Coulomb değeri, klor iyonlarına karşı daha yüksek dayanım anlamına gelir. Donma-çözülme dayanımı deneyinde numuneler 28 çevrime tabi tutulmuştur. Her 7 çevrim sonunda yüzeyde oluşan kopmalar tartılmıştır. 28 çevrim sonunda toplam yığılımlı kütle kaybı hesaplanmıştır. Deney sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Bu deneyler, 3D baskı betonlarının dayanıklılık performansını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Kılcal su emme deney sonuçları incelendiğinde 8 gün sonunda suyun ilerleme miktarı 1,1 mm-1,3 mm arasında değişmektedir. Beyaz çimento ile üretilen betonun kılcal su emme değerleri daha düşük çıkmıştır. Bu durum, beyaz çimentolu betonun içyapısının daha geçirimsiz olduğunu göstermektedir. Daha düşük kılcal su emme değeri, betonun suya karşı daha dayanıklı olduğu ve uzun vadede daha az bozulmaya uğrayacağı anlamına gelir. Özellikle 3D baskı teknolojisiyle üretilen betonların geçirimsizlik açısından performansının yüksek olması, yapıların uzun ömürlü olması için önemli bir avantajdır. Donma-çözülme deneyinde beyaz çimento ile üretilen betonun kütle kaybı daha düşük olmuştur. Her iki karışımda da kütle kaybı 1,0 kg/m²’den düşük çıkmıştır, bu da EN 12390-9 standardına uygun bir performans sergilemektedir. Bu, betonların donma ve çözülme çevrimlerine karşı dayanıklı olduğunu ve uzun süreli kullanımda dayanım kaybı yaşamayacağını gösterir. Hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyinde beyaz çimento içeren beton, Portland çimentosu kullanılan betona göre daha düşük klor iyonu geçirimsizliği göstermektedir. Bu, beyaz çimentolu betonun daha az boşluk içerdiği ve daha sıkı bir yapıya sahip olduğuna işaret eder. Her iki karışımda da klor iyonu geçirimsizliği, 2000-4000 Coulomb arasında olup, orta sınıf olarak değerlendirilmiştir (ASTM C 1202 standardına göre). Bu, betonların orta derecede korumalı bir yapıya sahip olduğunu ve klor iyonlarının geçişini engellediğini gösterir. Bu sonuçlar, beyaz çimentolu betonların daha iyi performans sergileyerek yapıların dayanıklılığını artırabileceğini ve korozyona karşı daha dirençli olduğunu ortaya koymaktadır (Özalp ve ark., 2018).

7.14. 3 Boyutlu Baskılı Betonda Takviye Çeliği

²Bu malzemenin düşük gerilme mukavemetini ve düşük sünekliğini (seramik malzemelerin ayırt edici özelliği) telafi etmeye izin verdiği ve yatay ve dikey yüklere

karşı yapısal uygulamalar için kullanımını geliştirdiği için 3D baskılı betonda takviye çeliği sağlanmalıdır. Öte yandan, inşaat demiri veya elektro-kaynaklı donatı ağının 3D baskılı betona dahil edilmesi yapısal olarak baskı süreciyle uyumlu değildir, bu nedenle dahil edilmesi için farklı alternatifler incelenmiştir. Beton baskı karışımına takviye uygulanmasındaki bazı gelişmeler, kısa çelik liflerin, kırılmış camın, polimerlerin, bazaltın, karbon mikrofiberlerin ve karbon nanotüplerin dahil edilmesini, ön takviyenin ve dış takviyenin sağlanmasını düşünmüştür. Çalışmalar, kısa liflerin ve/veya nanotüplerin dahil edilmesinin 3D baskılı betona yüksek çekme dayanımı, yüksek süneklik, darbe yüklerine, dinamik yüklere ve patlama yüklerine daha iyi tepki vermenin yanı sıra 3D baskılı betonun ortotropik davranışını azalttığını, katmanlar arası bağ dayanımını artırdığını, priz büzülmesini azalttığını ve baskılı beton elemanların erken yaş mekanik dayanımını artırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, bazı çalışmalar, donatı liflerinin baskılı betona 10 kg/m³'ten daha fazla miktarda verilmemesi, yani liflerin % 1'inden fazlasının karışıma dahil edilmemesi gerektiği, çünkü bunun işlenebilirliği (karışımın tasarlandığı gibi akması açısından işlenebilirlik) % 4 oranında etkileyeceği ve baskı ekipmanının bütünlüğünü etkileyeceği, ancak eğilme dayanımını % 20 oranında artıracığı konusunda uyarmaktadır (Uribe-Pinzon ve ark., 2021).



8. 3 BOYUTLU BETON MALİYETİ KARŞILAŞTIRMASI (USD)

Sunulan veriler incelendiğinde, 3 boyutlu beton baskı teknolojisiyle farklı şirketler tarafından üretilmiş 1 metrekare duvarın maliyetlerini USD bazında karşılaştırmalı olarak Çizelge 8.1’ de gösterilmektedir. Apis Cor (Rusya), 3B baskı ile en düşük maliyetli üretimi gerçekleştiren firma olarak öne çıkarken, Winsun (Çin) ve ICON (ABD) gibi şirketler de benzer düşük maliyetlerle dikkat çekmektedir. Geleneksel yöntemlerle üretilen düz ve kavisli duvarların maliyetleri ise 3B baskıya kıyasla belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, tezde detaylı olarak ele alınan 3B beton baskı teknolojisinin özellikle iş gücü, kalıp ve zaman tasarrufu açısından sağladığı avantajların doğrudan maliyetlere yansıdığını göstermektedir. İlgili maliyet analizleri, 3B baskının yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da geleneksel inşaat yöntemlerine güçlü bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 8.1: Şirket Bazlı 1 m² 3B Beton Duvar Maliyetleri(USD)

Sıra	Şirket / Proje Adı	Yöntem / Açıklama	Maliyet (\$ / m ²)
1	Apis Cor (Rusya)	3D baskı ev projesi (düz geometri)	27
2	Winsun (Çin)	Yığma tipi 3DPC yapı	29
3	ICON (ABD)	Geleneksel betonlu 3D yazıcı ile konut	29,5
4	Geleneksel İnşaat (Kontrol Grup)	Düz duvar, manuel yapım	72,11
5	Robotik Sistem (Prototip, Kavisli)	3D baskı robot, eğrisel duvar	73
6	Robotik Sistem (Prototip, Düz)	3D baskı robot, düz duvar	71
7	Konvansiyonel Eğrisel Yapı	Geleneksel yöntem, kavisli form	168



9. GENEL SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tezinde 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin inşaat süreçlerine entegrasyonda pratik bir yaklaşım sergilediği belirtilmiştir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin benzersiz özellikleri nedeniyle büyük ilgi gören yeni inşaat tekniklerinden birisi olduğu vurgulanmıştır. Çalışmanın vurguladığı potansiyeli ortaya çıkarma, veri tabanını genişletme, olanak/sınır ve avantaj/dezavantajları belirleme gerekliliği, 3 boyutlu beton baskı teknolojisinin inşaat sektöründeki geleceği için kritik öneme sahiptir. Özellikle iş gücü ve süresindeki azalma, malzeme kaybının minimize edilmesi, tasarım esnekliği gibi avantajlar, bu teknolojiyi geleneksel yöntemlere karşı oldukça cazip kılmaktadır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde maliyet kompozisyonu konvansiyonel yapım teknolojisindeki maliyet kompozisyonuna göre farklıdır. 3 boyutlu beton baskı teknolojisinde zaman maliyeti konusu mutlaka üzerinde çalışılması gereken önemli bir husustur. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi, özellikle üretim süreci için büyük potansiyele sahip faydalı bir inşaat yöntemidir. İnşaat süresini kısaltması, insan iş gücünü inşaat sürecinden çıkararak daha güvenli bir şantiye ortamı yaratması ve amorf şekiller oluşturabilmesi 3D beton baskısını benzersiz bir inşaat yöntemi haline getirmektedir. Daha yüksek malzeme maliyetine rağmen 3 boyutlu beton baskı teknolojisi geleneksel yapım yöntemine göre daha büyük bir ekonomik avantaja sahiptir. 3 boyutlu beton baskı teknolojisi kullanımında yapım hızının artması projenin nihai maliyetinin düşürülmesine büyük ölçüde yardımcı olacaktır.



KAYNAKLAR

- Afful, M.K., Yalçinkaya, Ç.** (2024). *Finite Element Modeling to Predict the Mechanical Properties of 3D Printed Concrete*, A Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering, Structural Program, İzmir.
- Akbaba, A. İ., Akbulut, E.** (Mart 2021). 3 Boyutlu Yazıcılar ve Kullanım Alanları, *ETÜ Sentez İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, Sayı: 3, 19-46.
- Akhil, P., Vishnu, K., Vaishak, H.** (2020-21). 3D Printing in Construction, *Project Report*, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree of Bachelor of technology in civil engineering, Department of Civil Engineering, College of Engineering Trikaripur.
- Allouzi, R., Al-Azhari, W., Allouzi, R.** (2020). Research Article, Conventional Construction and 3D Printing: A Comparison Study on Material Cost in Jordan, *Hindawi Journal of Engineering*, Article ID 1424682, <https://doi.org/10.1155/2020/1424682>, 14 pages.
- Alqaryouti, Y., Suwaidi, M.A., Alkhuwaili, R.M., Kolthoum, H., Youssef, I., Imam, M.A.** (2024). A Case Study of the Largest 3D Printed Villa: Breaking Boundaries in Sustainable Construction, *E3S Web of Conferences* 586, 01002, ICSCE 2024, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458601002>.
- Artuğ, S., Altun, M. C.** (11-14 April 2019). 3 Boyutlu Baskı Teknolojisinin Bina Üretiminde Kullanım Olanaklarının Güncel Örnekler Üzerinden İncelenmesi, *4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry 2019*, Antalya, Türkiye.
- Aygün, C., Kaman, D.Ö.** (Eylül 2021). *Mikronize Kalsit Katkılı Üç Boyutlu Yazdırılabilir Çimentolu Karışımlarda Deneysel ve Sayısal Modelleme Çalışması*, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Bilim Dalı, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Bayrak, A.T., Sarıtaş, A.** (January 2024). *3D Printed Concrete: Multiscale Mechanical Characterization and Computational Modeling*, A Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering.

- Breland, J. S.** (December 2017). *3D Printing Concrete Structures and Verifying Integrity of their G-Code Instructions: Border Wall a Case Study*, Dissertation Submitted to the Graduate School, the College of Science and Technology, and the School of Computing at the University of Southern Mississippi in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
- B. Khoshnevis, R. Dutton** (1998). Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials, *Materials Technology*, 13(2), 53-56.
- B.G. de Soto, I. Agustí-Juan, J. Hunhevicz, S. Joss, K. Graser, G. Habert, B.T. Adey** (2018). Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall, *Automation in construction*, 92, 297-311.
- Chamatete, K., Yalçinkaya, Ç.** (June 2024). *Assessment of the Thermal Insulation Performance of 3D Printed Concrete Walls*, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir.
- Çatalakaya, Z.B., Kılınç, K.** (Eylül 2023). *3D Beton Yazıcı Teknolojisinin Dünya'daki Mevcut Durumu*, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Evangelista, L., and de Brito, J.** (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.* 29, 397–401. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004.
- Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S., and Iribarne, M.** (2015). Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyp. J.* 21, 14–33. doi:10.1108/rpj-07-2013-0067.
- Givkashi, M.R., Deheshti, A.R., Shahhosseini, V., Moodi, F.** (2023). Feasibility of construction of buildings with the 3D printing concrete from different methods perspectives focusing on economic evaluation, *AUT Journal of Civil Engineering*, 7(1), 3-12, DOI: 10.22060/ajce.2023.22191.5830.
- G. De Schutter, K. Lesage, V. Mechtcherine, V.N. Nerella, G. Habert, I. Agustí-Juan** (2018). Vision of 3D printing with concrete-Technical, economic and environmental potentials, *Cement and Concrete Research*, 112, 25-36.
- G. Ji, T. Ding, J. Xiao, S. Du, J. Li, Z. Duan** (2019). A 3D printed ready-mixed concrete power distribution substation: Materials and construction technology, *Materials*, 12(9), 1540.
- Hambach, M., and Volkmer, D.** (2017). Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *Cem. Concr. Compos* 79, 62–70. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001.
- H. Yang, J.K. Chung, Y. Chen, Y. Li** (2018). The cost calculation method of construction 3D printing aligned with internet of things, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 1, 1-9.

- Inozemtcev, A., Duong, T. Q.** (2019). Technical and economic efficiency of materials using 3D-printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete, *E3S Web of Conferences* 97, 02010, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702010>, FORM-2019.
- Kul, A., Yıldırım, G.** (2024). *Green and Digital Transformation Towards Circular Economy in the Construction Industry: Upcycling of Construction and Demolition Wastes from Diverse Sources and Their Integration into 3D Printing Technology*, Submitted to Graduate School of Science and Engineering of Hacettepe University as a Partial Fulfillment to the Requirements for be Award of the Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering.
- Meran, R.P., Arslan, M.İ.** (October 2023). *A Preliminary Investigation for Potential Use of 3D Printed Concrete in Earthquake Resistant Construction*, M.Sc. Thesis, İstanbul Technical University, Department of Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Programme.
- Momeni, K., Vatin, N.I., Hematibahar, M., Gebre, T.H.** (January 2025). Differences between 3D printed concrete and 3D printing reinforced concrete technologies: a review, *Frontiers in Built Environment*, DOI 10.3389/fbuil.2024.1450628.
- M. Näther, V.N. Nerella, M. Krause, G. Künze, V. Mechtcherine, R. Schach** (2017). Beton-3D-Druck-Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. *Abschlussbericht*.
- Ntakana, K., Alabi, S. A., Mahachi, J.**, Preliminary Cost Benefit Analysis: A Cost Comparison Between the Three-Dimensional (3D) Printing (Additive) Technologies and the Conventional Brick and Mortar Low-Cost Housing Developments, *Cost-Benefit Analysis Report*, School of Civil Engineering & the Built Environment, University of Johannesburg.
- N. Labonnote, A. Rønquist, B. Manum, P. Rütther** (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities, *Automation in construction*, 72, 347-366.
- Özalp, F., Yılmaz, H. D., Yaşar, Ş.** (Eylül-Ekim 2018). 3D Yazıcı Teknolojisine Uygun Sürdürülebilir ve Yenilikçi Betonların Geliştirilmesi, *Hazır Beton*, 62-70.
- Özbay, E., Özbay, F. A.** (June 2022). 3D Printers and Applications, Current Research in Engineering, Chapter 3.
- Panda, B., Paul, S. C., and Tan, M. J.** (2017). Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Mater. Lett.* 209, 146–149. doi:10.1016/j.matlet.2017.07.123.
- Pessoa, S., Guimaraes, A. S., Lucas, S. S., and Simoes, N.** (2021). 3D printing in the construction industry - a systematic review of the thermal performance in

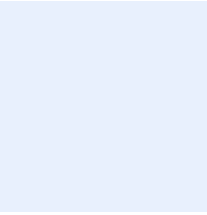
buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 141, 110794. doi:10.1016/j.rser.2021.110794.

- P.-C. Aïtcin** (2016). Accelerators, in: Science and technology of concrete admixtures, Elsevier, pp. 405-413.
- Ranjha, S., Kulkarni, A., Sanjayan, J.** (26th -28th November 2018 (Monday-Wednesday). 3D Construction Printing-A Review with Contemporary Method of Decarbonisation and Cost Benefit Analysis, 1st International Conference on 3D Construction Printing (3DCP) in conjunction with 6th International Conference on Innovative Production and Construction (IPC 2018), Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia.
- R.A. Buswell, W.L. De Silva, S.Z. Jones, J. Dirrenberger** (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, *Cement and Concrete Research*, 112, 37-49.
- R. Schmitt** (2001). Die Schalungstechnik: Systeme, Einsatz und Logistik, John Wiley & Sons.
- R. Schach, M. Krause, M. Näther, V. Nerella** (2017). CONPrint3D: Beton-3D-Druck als Ersatz für den Mauerwerksbau, *Bauingenieur*, 92(9), 355-363.
- Schuldt, S. J., Jagoda, J. A., Hoisington, A. J., Delorit, J. D.** (2021). Review, A systematic review and analysis of the viability of 3D-printed construction in remote environments, *Automation in Construction*, 125, 103642.
- Shahzad, Q., Umair, M., Waqar, S.** (September 2022). Bibliographic analysis on 3D printing in the building and construction industry: Printing systems, material properties, challenges, and future trends, *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, Vol. 7, Issue 3, pp. 198-220.
- Sönmez, S., Kesen, U., Dalgıç, C.**, 3 Boyutlu Yazıcılar, 6. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, 471-481.
- Tarhan, Y., Şahin, R.** (2020). Dijital Üretimli Çimento Esaslı Kompozitlerin Donma-Çözülme Direnci ve Boşluk Yapılarının İncelenmesi, Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2020, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tümer, M. B.** (2020). Üç Boyutlu Yazıcılar ve Günümüz Mimarisinde Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Işık Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi İç Mimarlık Bölümü, Işık Üniversitesi.
- Uribe-Pinzon, S., Mosquera, M., Cardenas-Pulido, J., Higuera, C.** (2021). Advances and current trends on the use of 3D printed concrete for building fabrication, *IEEE*.
- Uygunoğlu, T., Özgüven, S. B.** (2019). İnşaat Mühendisliği 3D Teknolojisinde Kullanılan Harçların Reolojik Özelliklerinin Araştırılması, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3:2, 189-197.

- Uygunoğlu, T., Özgüven, S. B., Topçu, İ. B.** (2019). 3D Teknolojisi ile Yapı Malzemesi Üretimindeki Gelişmeler, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3:3, 279-288.
- Üğütmen, F.S., Dino, İ.G.** (January 2023). *Climate Change Impact on a 3D Printed Concrete Building*, A Thesis Submitted to the Graduate School of Architecture of Middle East Technical University, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Architecture in Architecture.
- V. Mechtcherine, V.N. Nerella, F. Will, M. Näther, J. Otto, M. Krause** (2019). Large-scale digital concrete construction–CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing, *Automation in construction*, 107, 102933.
- Yang, H., Chung, J. K. H., Chen, Y., Li, Y.** (2018). The cost calculation method of construction 3D printing aligned with internet of things, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 147, <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1163-9>.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler		
Adı Soyadı		
Doğum Yeri		
Doğum Tarihi		
Uyruğu		
Telefon		
E-Posta Adresi		
Web Adresi	-	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	
Fakülte	
Bölümü	
Mezuniyet Yılı	

Yüksek Lisans	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	

Doktora	
Üniversite	-
Enstitü Adı	-
Anabilim Dalı	-
Program Adı	-

Makale ve Bildiriler
-