

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPI ÜRETİM SÜREÇLERİNDE EKLEMELİ
ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMININ
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA
DEĞERLENDİRİLMESİ

Ayşe ÖDENİR BAKIR

Temmuz, 2024

İZMİR

**YAPI ÜRETİM SÜREÇLERİNDE EKLEMELİ
ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMININ
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA
DEĞERLENDİRİLMESİ**

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

Ayşe ÖDENİR BAKIR

**Temmuz, 2024
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

AYŞE ÖDENİR BAKIR tarafından **PROF. DR. AHMET VEFA ORHON** yönetiminde hazırlanan “**YAPI ÜRETİM SÜREÇLERİNDE EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMININ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Ahmet Vefa Orhon

Danışman

Prof.Dr. Müjde Altın

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Mustafa Emre İlal

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı ortaya koyma sürecinde; bilgisi ve tecrübesi ile bana yardımcı ve destek olan kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Ahmet Vefa ORHON'a; her koşulda moral ve motivasyonumu yükselten sevgili eşim Cesur BAKIR'a; benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ailem Ali ÖDENİR'e, Elena ÖDENİR'e, Alişan ÖDENİR'e, Zübeyde BAKIR'a ve İbrahim BAKIR'a; heyecanımı ve endişelerimi benimle yaşayan meslektaş ve arkadaşlarım Arş. Gör. Reyhan Merve DELİBAŞ'a, Arş. Gör. Betül PAKÖZ'e, Senanur ŞENGÜL'e ve üzerimde emeği olan bütün hocalarıma içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Ayşe ÖDENİR BAKIR

YAPI ÜRETİM SÜREÇLERİNDE EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMININ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZ

Endüstri devriminden günümüze kaynaklar hızlı bir şekilde tükenmekte; küresel ısınma, çevre kirliliği gibi küresel sorunlar baş göstermektedir. Dolayısıyla sürdürülebilirlik çalışmaları giderek önem kazanmaktadır. İnsan hayatında temel role sahip yapım sektörünün karbon ayak izini azaltmak adına atılan adımlar arasında yer alan EÜ (Eklemeli Üretim) teknolojileri 1980’li yıllardan beri gösterdiği gelişmelerle yapım sektöründe önemli bir yer edinmiştir. Araştırmaya açık bir alan olarak karşımıza çıkan EÜ teknolojileri hızlı, etkin, hatasız ve ekonomik yapı üretimine olanak tanımanın yanı sıra karmaşık geometriye sahip yüzeylerin üretimini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca EÜ ile artan otomasyon sayesinde iş gücü ve maliyetten tasarruf sağlanmakta, ölüm ve kaza riski azalmaktadır.

Bu tez kapsamında öncelikle çalışmanın temel kavramları (sürdürülebilir yapım, eklemeli üretim) açıklanmıştır. Ardından yapımda EÜ teknolojilerinin tanımı, gelişimi ve üretim ölçeği (maket, yapı bileşeni, yapı elemanı, yapı) hakkında bilgi verilmiştir. Yapılan literatür araştırması sonucunda elde edilen verilere dayanarak EÜ’ün ilişkili olduğu sürdürülebilirlik stratejileri belirlenerek EÜ ile sürdürülebilirlik arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Konuya dair somut veriler sunmak üzere çevresel, ekonomik ve/veya sosyal açıdan sürdürülebilir özellik taşıyan on altı adet güncel yapı örneği incelenmiştir. Bu bilgiler ışığında daha az maliyet ve iş gücü gereksinimi ile daha kısa sürede yapı üretimine yönelik etkili sonuçlar veren ve döngüsel ekonomiye büyük katkı sağlama potansiyeli taşıyan EÜ teknolojilerinin önümüzdeki yıllarda yapım sektöründe daha fazla yer alacağı ön görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Eklemeli üretim, üç boyutlu baskı, sürdürülebilirlik, yapım

ASSESSMENT OF THE UTILIZATION OF ADDITIVE MANUFACTURING IN BUILDING CONSTRUCTION IN TERMS OF SUSTAINABILITY

ABSTRACT

Since the industrial revolution, resources have been rapidly depleted; global problems such as global warming and environmental pollution arise. Therefore, sustainability studies are becoming increasingly important. AM (Additive Manufacturing) technologies, which are among the steps taken to reduce the carbon footprint of the construction industry, which has a fundamental role in human life, has gained an important place in the construction industry with the developments it has shown since the 1980s. AM technologies, which are an open field for research, not only enable fast, effective, error-free and economical structure production, but also facilitate construction of surfaces with complex geometries. In addition, thanks to the increased automation with AM, labor and cost savings are achieved, and the risk of death and accident is reduced.

Within the scope of this thesis, first the basic concepts (sustainable construction, additive manufacturing) of the study are explained. Then, information was given about the definition, development and production scale (model, building component, building element, building) of AM technologies in construction. Based on the data obtained as a result of the literature research, the sustainability strategies associated with AM were determined and the relationship between AM and sustainability was revealed. Sixteen current building examples that are environmentally, economically and/or socially sustainable were examined to provide concrete data on the subject. In the light of this information, it is predicted that AM technologies, which provide effective results for building production in a shorter time with less cost and labor requirements and have a great potential to contribute to the circular economy, will take more place in the construction industry in the coming years.

Keywords: Additive manufacturing, three dimension printing, sustainability, construction

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiv

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

1.1 Çalışmanın Temel Kavramları.....	1
1.1.1 Sürdürülebilir Yapım	1
1.1.2 Eklemeli Üretim (EÜ).....	2
1.2 Çalışmanın Önemi ve Amacı.....	4
1.3 Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemi	4
1.4 Çalışmanın Organizasyonu	5

BÖLÜM İKİ - YAPIMDA KULLANILAN EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ 7

2.1 Yapımda Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Tanımı ve Gelişimi.....	7
2.2 Eklemeli Üretimde Ölçek	13
2.2.1 Mimari Maket	13
2.2.2 Yapı Bileşeni ve Yapı Elemanı	14
2.2.3 Yapı.....	15

BÖLÜM ÜÇ - YAPIMDA KULLANILAN EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ 19

3.1 Eklemeli Üretimde Çevresel Sürdürülebilirlik	20
3.1.1 Eklemeli Üretimde Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	21
3.1.2 Eklemeli Üretimde Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı.....	27
3.1.3 Eklemeli Üretimde Etkin Malzeme Kullanımı	30
3.1.4 Eklemeli Üretimde Yeniden Kullanım ve Atık Yönetimi	32
3.1.5 Eklemeli Üretimde Prefabrikasyon	34
3.1.6 Eklemeli Üretimde Modüler Koordinasyon.....	36
3.1.7 Eklemeli Üretimde BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) Kullanımı	39
3.2 Eklemeli Üretimde Ekonomik Sürdürülebilirlik	40
3.3 Eklemeli Üretimde Sosyal Sürdürülebilirlik	42

BÖLÜM DÖRT - EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ İLE ÜRETİLMİŞ SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPI ÖRNEKLERİ 44

4.1 Europe Building.....	45
4.2 Urban Cabin.....	47
4.3 Dubai Ofis Binası	49
4.4 Gaia Evi	53
4.5 3BB Konut Topluluğu	55
4.6 İzolasyon Konutları	57
4.7 Striatus Köprüsü	59
4.8 Tecla	62
4.9 Dior Mağazası.....	65
4.10 Tova	67
4.11 Biohome3D	70
4.12 House Zero.....	72
4.13 Mighty Ev	74
4.14 Phoenix Köprüsü	77
4.15 AKF Pavyonu	80
4.16 Las Casitas Konutları.....	82

**BÖLÜM BEŞ - EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ’NİN YAPI
ÖRNEKLERİ ÜZERİNDEN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA
DEĞERLENDİRİLMESİ 85**

5.1 Çevresel Sürdürülebilirlik Kapsamında Avantajlar 93

5.2 Ekonomik Sürdürülebilirlik Kapsamında Avantajlar 94

5.3 Sosyal Sürdürülebilirlik Kapsamında Avantajlar 95

5.4 Değerlendirme ve Öneriler 95

KAYNAKLAR.....97



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1 Eklemeli üretimde dijital süreç	3
Şekil 1. 2 Eklemeli üretim (EÜ) teknolojilerinin alt kategorileri.....	3
Şekil 2. 1 Counter Crafting teknolojisinin çalışma prensibi.....	8
Şekil 2. 2 3B baskı teknolojisi ile üretilmiş ilk duvar	8
Şekil 2. 3 Radiolaria.....	9
Şekil 2. 4 Yapımda EÜ teknolojilerinin tarihteki gelişimini gösteren zaman çizelgesi	13
Şekil 2. 5 EÜ ile üretilmiş mimari maket örnekleri	14
Şekil 2. 6 Seramik malzeme ile basılan cisimler	15
Şekil 2. 7 Radiolaria Pavyonu baskı süreci ve sonuç ürün	16
Şekil 2. 8 KamerMaker EÜ teknolojisi (Dus Architects, b.t.a)	17
Şekil 2. 9 Micro-Home prototip üretimi (a) ve sonuç ürün (b).....	17
Şekil 3. 1 Yapımda eklemeli üretim teknolojileri ve sürdürülebilirlik stratejileri şeması.....	20
Şekil 3. 2 Uçucu kül (a) , yüksek fırın cürufu (b), mermer tozu (c)	22
Şekil 3. 3 RENCA'nın geliştirdiği alternatif beton (a) Alternatif betonla 3BB ile inşa edilmiş ilk yapı (b)	25
Şekil 3. 4 3BB ile toprak malzemeden üretilen duvarların yeşillenme süreci	26
Şekil 3. 5 Azure 3D Printed Homes firmasının kullandığı geri dönüştürülmüş şişelerden elde edilen plastik malzeme	27
Şekil 3. 6 Tensegrity aydınlatma elemanı görseli (a) klasik düğüm noktası (sol) ve EÜ ile üretilen düğüm noktası çeşitleri (orta ve sağ) (b)	28

Şekil 3. 7 Paslanmaz çelikten üretilen MX3D köprüsü	29
Şekil 3. 8 6 Bevis Marks Binası (a) EÜ ile üretilmiş plastik birleşim detayı (b).....	29
Şekil 3. 9 Henkel ve Aectual'ın geliştirdiği geri dönüştürülebilir biyoplastik	30
Şekil 3. 10 Kaynak etkinliği.....	30
Şekil 3. 11 Yhnova Evi yapım aşaması (a) duvar detayı (b).....	31
Şekil 3. 12 Atık çeşitleri.....	32
Şekil 3. 13 Entegre atık yönetimi şeması.....	33
Şekil 3. 14 Döngüsel ekonomi şeması	33
Şekil 3. 15 Roger Bruno Richard'ın sanayileşme dereceleri şeması	35
Şekil 3. 16 Winsun tarafından üretilen Dubai Ofis Binası (a), 10 prefabrik ev (b), beş katlı apartman (c)	35
Şekil 3. 17 Baoshan Yaya Köprüsü'nün montajı	36
Şekil 3. 18 Modüler koordinasyon	37
Şekil 3. 19 Eklemeli üretim ile modüler yapımın kombinasyonu.....	38
Şekil 3. 20 Zhouda Group'un inşa ettiği modüler villa.....	39
Şekil 3. 21 Yapımda eklemeli üretim sürecinde BIM'in yeri	40
Şekil 3. 22 Winsun'ın inşa ettiği on 3BB evden biri (a), villa projesi (b)	42
Şekil 3. 23 Nacajuca'da (a) ve Austin'de (b) inşa edilen 3BB konutları.....	43
Şekil 4. 1 Yapı ölçeği (duvarlar ve çatı) (a), yapı ölçeği (duvarlar ve temel) (b), yapı ölçeği (duvarlar) (c), yapı elemanı ölçeği (d), yapı bileşeni ölçeği (e).....	44
Şekil 4. 2 Cephede yer alan 3BB banklar	46
Şekil 4. 3 EÜ ile üretilmiş modüller.....	46
Şekil 4. 4 Sundurma (a) ve iç mekân (b).....	48

Şekil 4. 5 Farklı desen ve formlara sahip cephe	48
Şekil 4. 6 Vaziyet planı üzerinde gösterilen 6 adet blok.....	50
Şekil 4. 7 Modülün EÜ aşaması (a), EÜ sırasında demir donatının manuel olarak eklenmesi (b), modüllerin nakliyesi (c) ve yerinde montajı (d).....	50
Şekil 4. 8 Monte edilmiş modüllerin görünüşleri.....	51
Şekil 4. 9 Demir kafes kirişler.....	51
Şekil 4. 10 Dubai Ofis Binası'nın kaba inşaatı	52
Şekil 4. 11 Gaia evi temel yapımı	54
Şekil 4. 12 Doğal havalandırma sistemi (a), ve doğal atık kaynağı olan pirinç kabuğunun Gaia Evi'nde kullanımı	54
Şekil 4. 13 New Story tarafından inşa edilen konut topluluğu	56
Şekil 4. 14 Evlerin yerinde EÜ süreci (a), tamamlanmış hali (b)	56
Şekil 4. 15 İzolasyon konutunun dış ve iç görünüşleri	58
Şekil 4. 16 Farklı cephe tasarımına sahip birimler.....	58
Şekil 4. 17 Beton blokların eklemeli üretimi (a) bir çeşit blok (b) 53 adet blok (c) ..	60
Şekil 4. 18 Blokların nakliyesi	60
Şekil 4. 19 Betonarme kaide için hazırlanan kalıp (a) germe elemanları (b).....	61
Şekil 4. 20 Çelik ve ahşap iskele.....	61
Şekil 4. 21 3BB beton blokların boşluklu yapısı	61
Şekil 4. 22 Tecla'nın dış (a) ve iç mekân (b) görüntüsü	63
Şekil 4. 23 Tecla'nın yapımında kullanılan baskı malzemesi karışımları	64
Şekil 4. 24 Dior Mağazası'nın duvar baskısı için kurulan örtü sistemi (a) 3BB duvar nişlerine yerleştirilen çelik dikmeler (b).....	66

Şekil 4. 25 Dior Mağazası'nın üretiminde kullanılan malzeme.....	66
Şekil 4. 26 Tova plan (a) ve kesiti (b).....	68
Şekil 4. 27 Eğrisel yüzeyli 3BB duvar (a), duvardaki açıklıklar (b), duvardaki oyuklara oturtulan çatı strüktürü (c)	68
Şekil 4. 28 Tova duvar baskısında kullanılan sabır ağacı lifi (a) ve enzim katkılı su (b).....	69
Şekil 4. 29 BioHome 3D projesi	71
Şekil 4. 30 Fabrikada gerçekleştirilen baskı süreci (a) basılan modüllerin yerinde monte edilmesi (b).....	71
Şekil 4. 31 House Zero projesinin yapım aşaması (a), zemin kat planı ve 3BB duvarları (b)	73
Şekil 4. 32 House Zero iç mekân görüntüsü	73
Şekil 4. 33 Prefabrik 3BB duvarların montaj süreci	75
Şekil 4. 34 EÜ'in yanı sıra robotlarla gerçekleştirilen yüzey pürüzsüzleştirme (a), poliüretan köpük sıkımı (b) ve kaplama işlemleri (c)	76
Şekil 4. 35 Synthetic Stone (kompozit taş) malzeme (a) ve 3BB robotu (a),	76
Şekil 4. 36 Phoenix Körüsü bileşenlerinin şantiye alanına nakledilmesi (a), bileşenlerin yerinde montajı (b)	78
Şekil 4. 37 İskele yardımıyla donatısız ve harçsız bir araya getirilen 3BB beton bloklar	78
Şekil 4. 38 AKF Pavyonu 3BB duvarları.....	81
Şekil 4. 39 3BB Harç, 3BB Beton ve 3BB Düşük CO ₂ Beton'un CO ₂ salınımı karşılaştırmasına dair grafik.....	81
Şekil 4. 40 Konutların EÜ aşaması (a), tamamlanmış konut (b), iç mekan görüntüsü (c)	83

Şekil 4. 41 Uçucu kül (a), geopolimer beton baskı malzemesi (b), Las Casitas Konutları'nın 3BB duvarları (c).....	84
Şekil 5. 1 Sürdürülebilir yapı örneği sayısının yıllara göre değişimi.....	87
Şekil 5. 2 Sürdürülebilir yapı örneklerinin işlevsel dağılımı.....	87
Şekil 5. 3 Sürdürülebilir yapı örneklerinin üretim şekli bakımından dağılımı	90
Şekil 5. 4 Sürdürülebilir yapı örneklerinin üretim ölçeği ve üretim şekli bakımından dağılımı.....	90
Şekil 5. 5 Sürdürülebilirlik stratejilerin incelenen yapı örnekleri kapsamında uygulanma sıklığı.....	92

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2. 1 Yapımda ilk EÜ teknikleri.....	10
Tablo 3. 1 Çimento Özellikli Bağlayıcı Malzemeler üzerine yapılmış bazı çalışmalar.....	23
Tablo 4. 1 Europe Building özet tablosu.....	45
Tablo 4. 2 Europe Building özet tablosu.....	47
Tablo 4. 3 Dubai Ofis Binası özet tablosu	49
Tablo 4. 4 Gaia Evi özet tablosu	53
Tablo 4. 5 3BB Konut Topluluğu özet tablosu	55
Tablo 4. 6 İzolasyon Konutları özet tablosu	57
Tablo 4. 7 Stratus Köprüsü özet tablosu	59
Tablo 4. 8 Tecla özet tablosu	62
Tablo 4. 9 Dior Mağazası özet tablosu.....	65
Tablo 4. 10 Tova özet tablosu	67
Tablo 4. 11 Biohome3D özet tablosu.....	70
Tablo 4. 12 House Zero özet tablosu	72
Tablo 4. 13 Mighty Ev özet tablosu	74
Tablo 4. 14 Phoenix Köprüsü özet tablosu	77
Tablo 4. 15 AKF Pavyonu özet tablosu	80
Tablo 4. 16 Las Casitas Konutları özet tablosu	82
Tablo 5. 1 İncelenen sürdürülebilir yapı örneklerinin karşılaştırmalı künye bilgileri.....	86

Tablo 5. 2 İncelenen sürdürülebilir yapı örneklerinin karşılaştırmalı EÜ bilgileri... 89

Tablo 5. 3 İncelenen yapı örneklerinin karşılaştırmalı sürdürülebilirlik bilgileri..... 93



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Temel Kavramları

Bu başlık altında “sürdürülebilir yapım” ve “eklemeli üretim” kavramları genel hatlarıyla açıklanmıştır. Sürdürülebilir yapım kapsamında atılan başlıca adımlar ve eklemeli üretimin temel çalışma prensipleri incelenmiştir.

1.1.1 Sürdürülebilir Yapım

Sanayi devrimiyle başlayan ve günümüze dek artarak süregelen hızlı kentleşme, kontrolsüz ve verimsiz kaynak tüketimi, her türlü çevre kirliliği gibi çevresel sorunlar Dünya’nın doğal dengesini bozarak çevresel, sosyal ve ekonomik bağlamda küresel felaketlere sebep olmaktadır. Dünya’da kaynak tüketimi ve çevre kirliliği bağlamında kritik noktada bulunan ve sosyo-ekonomik gelişmeyi ve hayat kalitesini büyük ölçüde etkileyen inşaat sektöründe (Du Plessis, 2002) sürdürülebilirlik günümüz koşullarında oldukça önemlidir.

Çevreyi korumak, sosyal refahı ve ekonomik kalkınmayı sağlamak adına “sürdürülebilir kalkınma” olgusunu ele alan uluslararası platformlarda; Stockholm Konferansı (1972), Ortak Geleceğimiz Raporu (1987), Rio (Yeryüzü) Zirvesi (1992), Habitat II Zirvesi (1996), Rio+5 Zirvesi (1997), Johannesburg Zirvesi (2002) gibi önemli adımlar atılmıştır (Ozmehmet, 2008). Bu adımların neredeyse hepsinde yapım sektöründe sürdürülebilirliğin sağlanması için tartışmalar, “sürdürülebilir yapılı çevre” ve/veya “sürdürülebilir yapım” başlıkları altında gerçekleşmiş ve sonuç belgelere yansıtılmıştır (Hoşkara ve Sey, 2009). Rio Zirvesi’nde (1992) uluslararası platformda sürdürülebilir kalkınma planı olarak oluşturulan Gündem 21’de sürdürülebilir insan yerleşimlerine dikkat çekilmiştir (Du Plessis, 2002). Habitat II Zirvesi (1996) de sürdürülebilir insan yerleşimlerinin sürdürülebilir kalkınmada rolünü tanımlamak üzere yapılmıştır (Du Plessis, 2002). 1999’da ise Uluslararası Yapı ve İnşaat Araştırma ve Yenilik Konseyi (CIB) Sürdürülebilir Yapım Gündemi 21 belgesini kapsamlı bir araştırma sürecini başlatmak üzere yayınlanmıştır (Du Plessis, 2002).

Sürdürülebilir yapım, doğa ile yapım sektörü arasındaki uyumu yeniden sağlamayı ve sürdürmeyi amaçlayan bütünsel, insan onuruna yakışan yerleşim yerlerini meydana getiren aynı zamanda ekonomik eşitliği teşvik eden bir süreçtir (Du Plessis, 2002). Kibert'in (1994) tanımına göre sürdürülebilir yapım verimli kaynak kullanımını esas alarak ve ekolojik ilkelere bağlı kalarak sağlıklı bir yapıyı çevre oluşturulmasıdır. Huovila ve Koskela'nın (1998) tanımına göre ise sürdürülebilir yapım inşaat sektörünün sürdürülebilir kalkınma çalışmalarına verdiği cevaptır.

Geleneksel yapım ve sürdürülebilir yapımın her ikisi de kalite, maliyet ve zaman parametrelerini göz önünde bulundururken sürdürülebilir yapım geleneksel yapımdan farklı olarak yapım sürecini yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) (life cycle assessment, LCA) kapsamında ele almaktadır (Hoşkara ve Sey, 2009).

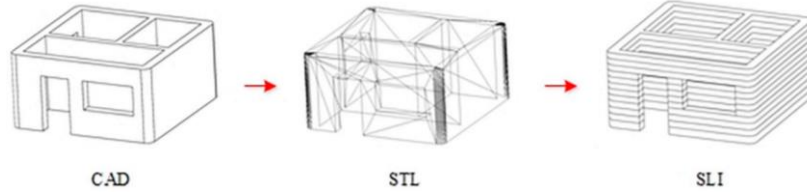
1.1.2 Eklemeli Üretim (EÜ)

Genel anlamıyla eklemeli üretim (EÜ), dijital ortamda üç boyutlu modeli hazırlanan nesneyi oluşturmak üzere (Ghaffar, Corker ve Fan, 2018) gerekli donanımına sahip bir makinenin üretim için özelleştirilmiş malzemeyi katmanlar halinde basmasıdır. Bu bağlamda “katmanlı üretim” olarak da isimlendirilir (Özer, 2020). Amerikan Test ve Malzeme Kurumu'na (American Society for Testing and Materials, ASTM) göre eklemeli üretim, 3B model verilerinden nesneler üretmek için malzemeleri katmanlar halinde birleştirme işlemidir.

Üretilmesi planlanan nesnenin üç boyutlu CAD (computer aided design) modeli oluşturulduktan sonra eklemeli üretim için “stereolithography” (STL) formatına dönüştürülür (Şekil 1. 1). Modelin yüzey geometrisini bağlantılı üçgen dizileriyle tanımlayan STL (stereolithography) dosya formatı bu nedenle sonradan “Standard Triangle Language” veya “Standard Tessellation Language” olarak da anılmaya başlanmıştır.

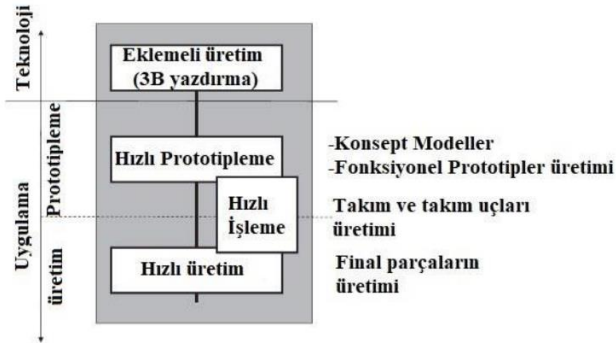
Günümüzde STL halen yaygın format olmakla birlikte son zamanlarda AMF, 3MF gibi çeşitleri ortaya çıkmıştır. (Paul ve Anand, 2015; Gonzales ve Alvarez, 2018). Son olarak elde edilen model Common Layer Interface (CLI), Layer

Exchange ASCII Format (LEAF), SliCe Format (SLC), SDR, STEP vb. (Kumar, 1997; Pratt, 2002; Calignano, 2017) yazılımlardan biri kullanılarak üst üste dizilen ince katmanlara bölünmektedir (Şekil 1. 1) ve üç boyutlu yazıcı aracılığı ile üst üste basılan katmanlar sonuç ürünü oluşturmaktadır (Gonzales ve Alvarez, 2018).



Şekil 1. 1 Eklemeli üretimde dijital süreç (Craveiro, Duarte, Bartolo ve Bartolo, 2019)

Yaklaşık 40 yıllık geçmişe sahip EÜ başlangıçta estetik ve ergonomik kaygılardan dolayı tasarım eksiklerini önceden görebilmek ve tasarım sürecinde ürünleri test etmek için ürünlerin üç boyutlu modellerini yapmak (hızlı prototipleme) üzere kullanılmıştır (Craveiro, Duarte, Bartolo ve Bartolo, 2019). Günümüzde ise EÜ teknolojileri uzay, savunma sanayi, otomotiv sanayi, havacılık, tıp, yapım gibi birçok alanda sonuç ürün üretmek üzere (hızlı üretim) kullanılmaktadır. EÜ teknolojilerinin gelişme sürecine bağlı olarak oluşan alt kategoriler Şekil 1. 2’de verilmiştir.



Şekil 1. 2 Eklemeli üretim (EÜ) teknolojilerinin alt kategorileri (Özer, 2020: Gebhardt, 2016)

Yapımda EÜ ise temelde bir robotun veya yazıcının inşaat malzemesini katmanlar halinde basarak yapı, yapı elemanı veya yapı bileşeni oluşturma sürecidir. Bu süreç son dönemlerde büyük ölçekli (yapı ölçeğinde) EÜ olarak da karşımıza çıkmaktadır.

1.2 Çalışmanın Önemi ve Amacı

Sanayi devriminden bu yana Dünya'nın kaynakları hızlı bir şekilde tüketilmekte; çevre kirliliği, küresel ısınma, iklim değişikliği gibi küresel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Sürdürülebilirlik çalışmalarının giderek önem kazandığı bu dönemde EÜ (Eklemeli Üretim) teknolojileri, diğer adıyla 3 boyutlu baskı (3BB) teknolojileri, 1980'li yıllardan beri gösterdiği gelişmelerle yapım sektöründe önemli bir yer edinmiş, araştırmaya açık bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma yapım süreçlerinde EÜ ile sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi birçok açıdan somut ve güncel yapı örnekleri üzerinden irdeleyerek literatüre ve uygulama sahasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Çalışmanın amacı, yapım süreçlerinde kullanılan EÜ teknolojilerini tanımlamak ve çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik ile ilişkisini temel başlıkları ile yapı örnekleri üzerinden irdelemektir. Bu bağlamda EÜ teknolojilerinin sürdürülebilir yapım olgusuna ne tür katkılar sağladığını ve gelecek uygulamalar için hangi potansiyelleri taşıdığını irdelemek/tartışmak bu çalışmanın hedefleri arasındadır.

1.3 Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemi

Bu çalışma kapsamında sürdürülebilir yapım ve EÜ teknolojileri hakkında genel bilgiler, yapımda EÜ teknolojilerin çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik ile ilişkisi ve bu teknoloji ile inşa edilmiş sürdürülebilir güncel yapı örnekleri irdelenmiştir. Bilimsel kaynaklardan elde edilen bilgiler ışığında EÜ teknolojilerinin yapım sektörüne sürdürülebilirlik açısından katkılarını tespit etmek amacıyla temel sürdürülebilirlik stratejileri belirlenmiş ve açıklanmıştır. Konuya daha iyi açıklık getirmek üzere 16 adet uygulanmış yapı örneği; yapım şekli, EÜ teknolojisi, baskı malzemesi açısından incelenmekle birlikte belirlenen sürdürülebilirlik stratejileri kapsamında değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda incelenen yapı örnekleri karşılaştırılarak EÜ teknolojilerinin sürdürülebilir yapıya katkıları saptanmış olup potansiyelleri tartışılmıştır.

Bu çalışma, amaç ve kapsam doğrultusunda literatür araştırmasına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. EÜ kapsamında sürdürülebilir yapım ile ilgili dünya çapında kurum ve kuruluşların sürdürülebilir faaliyetleri incelenmiş olup hayata geçirilen uygulama örnekleri değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda sürdürülebilir yapım stratejileri, yapımda eklemeli üretim teknolojilerinin sürdürülebilirliği ve ilgili örnekler ile ilgili literatürde bulunan bilimsel kaynaklar taranmıştır. Literatür taraması sırasında konuya dair Türkçe, İngilizce ve Rusça dillerinde anahtar kelimeler aratılarak ulaşılan geniş bir kaynak yelpazesinden yararlanılmıştır. İncelenen kaynaklar arasında makaleler, kitaplar, bildiriler, raporlar, tezler, broşürler, veri tabanları, internet siteleri yer almaktadır. Bu kaynaklardan sentezlenen veriler görseller kullanılarak ve şemalar oluşturularak desteklenmiştir.

1.4 Çalışmanın Organizasyonu

Çalışma 5 bölümden oluşmaktadır. Giriş niteliğinde olan BÖLÜM BİR’de öncelikle çalışmanın iki temel anahtar kelimesi olan “sürdürülebilir yapım” ve “eklemeli üretim” genel hatlarıyla açıklanmıştır. Çalışmanın önemi, amacı, kapsamı, yöntemi ve organizasyonu da bu bölümde açıklanmıştır.

BÖLÜM İKİ’de yapımda kullanılan eklemeli üretim teknolojilerinin tanımı ve gelişimi hakkında bilgi verilmiştir. Bölümün sonunda EÜ teknolojilerinin gelişiminde önemli görülen olaylar görselleştirilerek oluşturulan bir zaman çizelgesi sunulmuştur.

BÖLÜM ÜÇ’te yapımda kullanılan eklemeli üretim teknolojilerinin sürdürülebilirlik ile ilişkisi irdelenmiştir. Sürdürülebilirlik kavramının sacayaklarını oluşturan çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik göz önünde bulundurularak yapımda EÜ teknolojileri için sürdürülebilirlik stratejileri örneklerle desteklenerek irdelenmiştir. Sürdürülebilirlik stratejilerinden “alternatif yapı malzemeleri kullanımı”, “konvansiyonel yapı malzemelerinin sürdürülebilir kullanımı”, “yeniden kullanım ve atık yönetimi”, “etkin malzeme kullanımı”, “prefabrikasyon”, “modüler koordinasyon”, “BIM (Yapı Bilgi Modellemesi)” büyük oranda çevresel sürdürülebilirlik bağlamında incelenmiş olmakla birlikte “ekonomik

sürdürülebilirlik” ve “sosyal sürdürülebilirlik” başlıkları kapsamında da değerlendirilmiştir.

BÖLÜM DÖRT’te EÜ teknolojileri ile üretilmiş sürdürülebilir ve güncel 16 adet yapı örneği irdelenmiştir. Yapı örnekleri: “Europe Building”, “Urban Cabin”, “Dubai Ofis Binası”, “Gaia Evi”, “3BB Konut Topluluğu”, “İzolasyon Konutları”, “Striatus Köprüsü”, “Tecla”, “Dior Mağazası”, “Tova”, “Biohome3D”, “House Zero”, “Mighty Ev”, “Phoenix Köprüsü”, “AKF Pavyonu”, “Las Casitas Konutları”dır. Her bir yapı için özet tablo oluşturularak ağırlıklı olarak sürdürülebilir yönleri tartışılmıştır.

BÖLÜM BEŞ’te incelenen yapı örnekleri tablolar ve grafikler ile karşılaştırılarak EÜ teknolojilerinin yapım sektöründe sürdürülebilirliği (çevresel, ekonomik ve sosyal) nasıl sağladığı ve taşıdığı potansiyeller tartışılmıştır. Ek olarak çalışılan konuyu geliştirmek adına yapılabilecek araştırmalar öneri olarak sunulmuştur.

BÖLÜM İKİ

YAPIMDA KULLANILAN EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

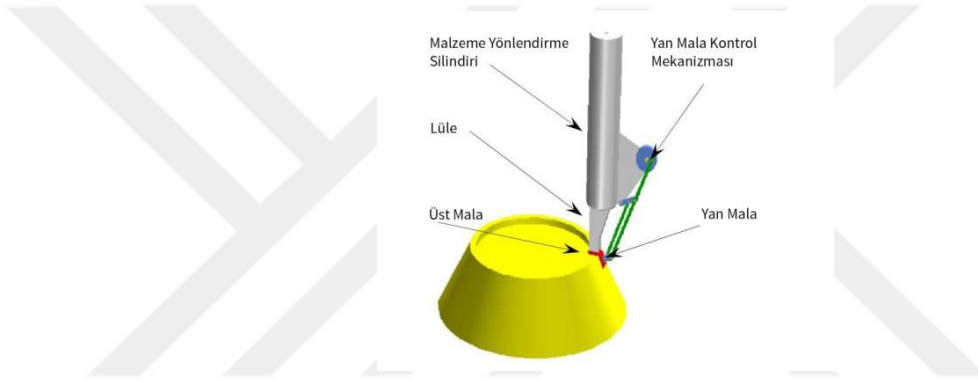
2.1 Yapımda Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Tanımı ve Gelişimi

Eklemeli üretim (katmanlı üretim/imalat, 3 boyutlu baskı, kısaca EÜ) Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM)'na göre 3 boyutlu model verisinden objeler üretmek üzere malzemeleri çoğunlukla katmanlar halinde birleştirme işlemi olarak tanımlamaktadır. Bir yapının veya yapı elemanlarının yapım/inşa sürecinde EÜ söz konusu olduğunda kullanılan baskı malzemesi yapı malzemesidir. Yapımda EÜ kavramı en genel hatlarıyla bir inşa robotunun dijital ortamda hazırlanan 3 boyutlu veri dosyasından yararlanarak 3BB tekniğine uygun bir yapı malzemesini katmanlar halinde birleştirerek hedeflenen ürünü üretmesi olarak tanımlanabilir. Söz konusu ürün, EÜ teknolojilerinin mimarlık alanında kullanımının ilk aşamasında sınırlı ölçekte bir prototip veya maket iken teknoloji gelişim gösterdikçe yapı elemanı, yapı bileşeni veya yapının kendisi olarak karşımıza çıkmıştır.

EÜ teknolojileri 1970'li yıllardan itibaren gelişim gösterirken 3DSistems firmasının kurucu ortağı Charles (Chuck) Hull 1983'te ilk 3B yazıcıyı icat etmiştir (Ponsford ve Glass, 2014; Micallef, 2015). Aynı zamanda stereolitografi (SLA) baskı tekniği de ortaya konmuştur (Ponsford ve Glass, 2014). SLA baskı tekniğinde, fotopolimer enine kesitleri sertleştirmek için ultraviyole lazer kullanılmaktadır (3DSistems, b.t.). Bu gelişmeyle birlikte ilk zamanlarında kompleks ve pahalı olan 3BB teknolojileri gelişimi hızlanarak havacılık, otomotiv sanayi, savunma sanayi, tıp gibi birçok alanda denenmeye başlamıştır (Hanger, Golonka ve Putanowicz, 2016).

Yapımda 3 boyutlu baskı tekniklerinin gelişimi 1990'ların ortalarında birbirinden bağımsız geliştirilen iki teknikle devam etmiştir (Gardiner, 2011). Bunlardan birincisi Pegna'nın geliştirdiği seçimsel kümelenme (selective aggregation) tekniğidir (Gardiner, 2011). Seçimsel kürlenme ile kum ve çimentonun biriktirilmesi üzerine kurulan teknik zamanla gelişim gösterememiş olsa da bu teknikle beraber büyük ölçekli EÜ'de ilk defa çimento kullanımı önerilmiştir (Pegna, 1997) .

1996 yılında Güney Kaliforniya Üniversitesi'ne bağlı Prof. Behrokh Khoshnevis'in Counter Crafting (CC) 3B baskı teknolojisini icat etmesi büyük ölçekli ürünlerin basılmasının ilk adımı olmuştur (Khoshnevis, 1998). CC teknolojisinin temel özelliği lüleye entegre edilmiş üst ve yan malalar sayesinde (Şekil 2. 1 Counter Crafting teknolojisinin çalışma prensibi (Khoshnevis, 2004)) pürüzsüz yüzeylerin basılmasına olanak sağlamasıdır (Khoshnevis, 1998). Bu teknik iki ayrı başlık sayesinde iki malzemenin aynı anda basılabilmesine de olanak vermektedir (Gardiner, 2011). Mimarlık alanında 3B basılmış ilk yapı elemanı ise Şekil 2. 2 3B baskı teknolojisi ile üretilmiş ilk duvar (Mankin, 2008)'de görünen 2004 yılında Counter Crafting teknolojisi ile basılan duvar olmuştur (Jamie, 2018).



Şekil 2. 1 Counter Crafting teknolojisinin çalışma prensibi (Khoshnevis, 2004)



Şekil 2. 2 3B baskı teknolojisi ile üretilmiş ilk duvar (Mankin, 2008)

2000'lerin ortalarında büyük ölçekli eklemeli üretim alanında dikkat çeken diğer iki teknik ise Concrete Printing ve D-Shape (Monolite) olmuştur. 2004 yılında Loughborough Üniversitesi'nden Eklemeli Üretim Araştırma Grubu (Additive

Manufacturing Research Group) tarafından fikri ortaya atılan Concrete Printing tekniği 2006’da “Serbest Biçimli Yapım” (Freeform Construction) adıyla Dr. Rupert Soar ve Dr. Richard Buswell tarafından geliştirildi (Gardiner, 2011). Bu tekniğin Contour Crafting ile arasındaki en önemli fark Concrete Printing tekniğinde lülenin hem yapı malzemesini hem ince detay malzemesini aynı prosesin içinde basmasını sağlayacak şekilde baskı çözünürlüğünü değiştirme kapasitesine sahip olmasıdır (Buswell, Soar, Gibb ve Thorpe, 2007).

2005 yılında, Enrico Dini büyük ölçekli mimari üretimler yapabilmek adına geliştirdiği D-Shape (Monolite) projesine dair ilk patentini alıp 2006’da bu sektöre öncülük eden Monolite UK şirketini kurmuştur (D-Shape, b.t.a). D-Shape tekniği diğer tekniklerden farklı olarak inorganik bir sıvı malzemenin kum karışımı malzeme yatağına kontrollü püskürtülmesiyle gerçekleştirilir (Dini, Chiarugi ve Nannini, 2008). Reaksiyona giren malzemeler yapım platformu içinde desteklendiğinden katalize edilen malzemenin katı hale gelmesi için hızlı bir dönüşüme gerek olmadığı için baskı süreci devam ederken alttaki katmanlarda kataliz reaksiyonu devam etmektedir (Gardiner, 2011). Bu teknik sayesinde alttaki katman üstteki katmandan farklı geometriye sahip olabilmekte, böylelikle gerçek anlamıyla serbest formlu yapı üretilebilmektedir. Bunun ilk örneği Andrea Morgante’nin tasarladığı Şekil 2.3’te görülen 6 m yüksekliğinde Radiolaria heykelidir.

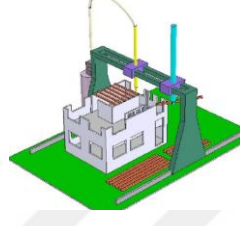
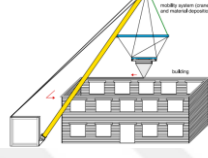


Şekil 2. 3 Radiolaria (Gardiner, 2011)

Zamanla geliştirilen Concrete Printing, Contur Crafting ve D-Shape teknikleri ve başlangıçta çalışılan diğer teknikler Tablo 2. 1’de verilmiştir. Seçimsel Kümelenme,

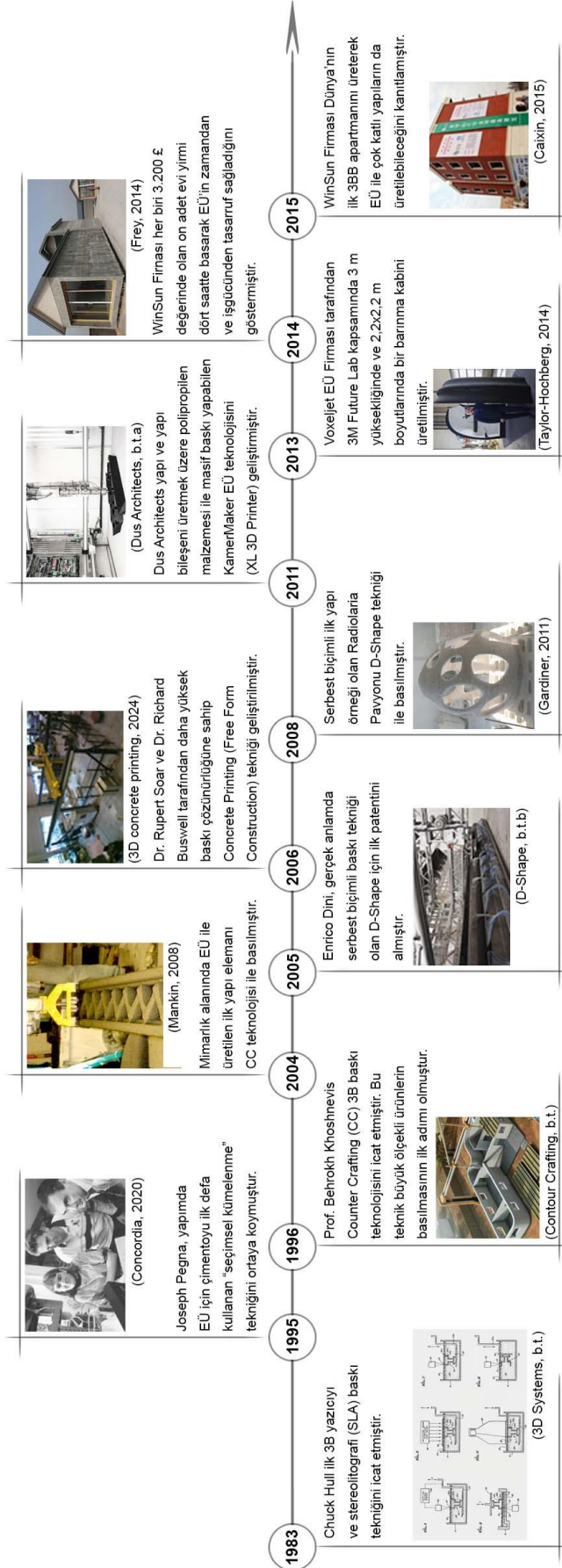
Robocrane, Concrete Deposition Technique, Mineraljet (Freeform Construction), Endless Machine tekniklerinin gelişimi sürdürülmemiştir.

Tablo 2. 1 Yapımda ilk EÜ teknikleri

Teknik	Temel Kaynak/Mucit	Görsel
Seçimsel Kümelenme (Selective agregation, Solid Freeform Construction)	Pegna, 1995	-
Contour Crafting (Portal vinç temelli beton biriktirme tekniği)	Khoshnevis, 1996	 (Khoshnevis, 2004)
Robocrane (Vinç temelli beton biriktirme tekniği)	Williams II, Albus Bostelman, 2004	 (Williams II vd., 2004)
D-Shape (Portal vinç temelli bağlayıcı püskürtme tekniği)	Dini vd., 2008	 (D-Shape, b.t.b)
Concrete Printing (İlk adı: Freeform Construction, Portal vinç temelli beton biriktirme tekniği)	Buswell vd., 2007	 (3D concrete printing, 2024)
Concrete Deposition Technique (Beton Biriktirme Tekniği)	Maxit Group- Bilgi paylaşımı yoktur	-
Mineraljet (Robotik kol temelli bağlayıcı püskürtme tekniği)	Rupert Soar, Freeform Construction Ltd.	-
Endless Machine (Robotik kol temelli polimer biriktirme tekniği)	Vander Kooij, 2010	 (Day, 2011)

Yapımda EÜ, bahsedildiği gibi üç temel teknik üzerine gelişimini sürdürmüştür. Yapımda EÜ teknolojilerinin tarihteki gelişimini özetlemek adına oluşturulan zaman çizelgesi Şekil 2. 4'te gösterilmiştir. Zamanla yeni EÜ teknolojileri geliştirilerek yapı ölçeğinde üretim hedefinin yanı sıra sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sürdürülebilirlik üzerine yapılan çalışmalar bölüm 3'te detaylı incelenmiştir.





Şekil 2. 4 Yapımda EÜ teknolojilerinin tarihteki gelişimini gösteren zaman çizelgesi

2.2 Eklemeli Üretimde Ölçek

2.2.1 Mimari Maket

EÜ, mimarlık alanında gerçek anlamda yapı üretiminden önce mimari maket üretiminde kullanılmıştır. Mimari maket fizibilite modeli, planlama modeli ve nihai proje modeli olmak üzere 3'e ayrılmaktadır (Ryder, Ion, Green, Harrison ve Wood, 2002). Maliyet, zaman, kullanılan malzemeler, karmaşıklık ve doğruluk bakımından birbirinden ayrılan maket tipleri ölçek bakımından değişkenlik göstermemekle birlikte boyutları tasarlanan projenin boyutlarına göre değişkenlik göstermektedir (Ryder vd., 2002). Bunlar arasında en az ayrıntı, doğruluk, maliyet ve zaman gerektiren model fizibilite modeli iken en fazla ayrıntı, doğruluk, maliyet ve zaman gerektiren model nihai proje modelidir. 1980'lere kadar sadece konvansiyonel tekniklerle üretilen bu modeller 1990'lardan günümüze EÜ teknolojilerinin geliştirilmesiyle birlikte zaman ve maliyetten tasarruf sağlanarak üretilebilmektedir.

1980'lerin başında ilk 3 boyutlu yazıcının icadı ve stereolitografi tekniğinin keşfi ile "hızlı prototipleme" (rapid prototyping) terimi ortaya çıkmıştır (Ryder vd., 2002). İlk zamanlarda bu terim 3BB alanında kullanılan teknolojileri kapsarken, "konsept modelleme" (concept modeling) ve "hızlı işleme" (rapid tooling) teknolojilerinin gelişmesiyle hızlı prototiplemenin kapsamı daralmıştır (Ryder vd., 2002). Mimari maket yapımında bu teknolojiler arasında konsept modelleme ve hızlı prototipleme teknolojileri kullanılmıştır (Wu, Wang ve Wang, 2016). Konsept modelleme, zayıf yüzey kalitesi ve düşük doğruluk vermesi (Ryder vd., 2002) sebebiyle mimari maket tipleri arasından fizibilite modeli üretiminde kullanılması uygundur. Konsept modelleme teknolojileri arasında en çok tanınanı Massachusetts Teknoloji Enstitüsü tarafından 1990'lı yıllar boyunca geliştirilen 3 Boyutlu Baskı (3BB) teknolojisidir (Wu vd., 2016, Ryder vd., 2002). Bu teknoloji sayesinde mimari maketler daha hızlı ve daha az maliyetle üretilebilmektedir (Wu vd., 2016, Ryder vd., 2002). Hızlı prototipleme, mimari maket yapımında konsept modellemeye göre daha geç kullanılmaya başlamıştır (Wu vd., 2016). Daha hassas baskı özelliği sayesinde planlama modeli veya nihai proje modeli gibi daha çok ayrıntı ve doğruluk gerektiren maketlerin üretiminde kullanılması uygundur. Fakat kullanılmaya

başladığı ilk zamanlarda, konvansiyonel yöntemlere kıyasla yüksek maliyet gerektirdiğinden (Ryder vd., 2002) kullanımı yaygınlaşmamıştır.

3B yazıcılar mimarlar tarafından günümüzde de proje fikirlerini somutlaştırma aracı olarak kullanılmaktadırlar. Son on yılda EÜ teknolojilerinin yaygınlaşması ile maliyetlerin azalması ve baskı kalitesinin geliştirilmesi ile daha ayrıntılı model üretimi olanağının sunulması sayesinde konvansiyonel yöntemlere kıyasla EÜ teknolojilerinin kullanılması daha cazip hale gelmiştir. EÜ teknolojileri ile üretilen maket örneklerinden bazıları Şekil 2. 5'te gösterilmiştir.



Şekil 2. 5 EÜ ile üretilmiş mimari maket örnekleri (S43D, b.t.; Dağ, 2020; 3D Baskı AI, 2022)

2.2.2 Yapı Bileşeni ve Yapı Elemanı

Yapı bileşeni yapı malzemelerinden meydana getirilen (Türkçü, 2015) küçük yapı parçaları olarak tanımlanabilir. Bunlara örnek olarak tuğla, döşeme kaplamaları, asma tavan bileşenleri örnek verilebilir. Yapı elemanı ise yapı malzemelerinin veya yapı bileşenlerinin bir araya getirilmesi ile üretilen, tek başına işlevsel olan ve mekânın tamamını veya bir bölümünü tanımlayan veya sınırlayan, mekânları bağlayan büyük ölçekli nesnelerdir (Türkçü, 2015). Bunlara örnek olarak taşıyıcı sistem elemanları (kolon, kriş, döşeme vb.), duvarlar, cephe elemanları, çatı, pencere ve kapılar örnek verilebilir.

EÜ ile yapı bileşeni ve elemanı üretimi üzerine 1990'lı yıllardan itibaren çalışmalar sürmektedir. Yapı malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen ilk çalışma Hinczewski, Corbel ve Chartier'in (1998) stereolitografi tekniği ile üç boyutlu seramik parçaların üretimi üzerine yaptığı çalışmadır. Bu çalışmayı takiben Khoshnevis, Bukkapatnam, Kwon ve Saito (2001) Counter Crafting (CC) teknolojisinde baskı malzemesi olarak seramik malzemenin kullanılması üzerine

çalışmışlardır. Bu çalışma kapsamında seramik malzemeden yapı bileşeni boyutlarında örnek cisimler üretilmiştir (Şekil 2.6) (Khoshnevis vd., 2001). Bunun yanı sıra 2004 yılında 3BB ile üretilmiş ilk yapı elemanı Khoshnevis'in geliştirdiği CC teknolojisi ile basılan beton duvardır (Şekil 2. 2). Loughborough Üniversitesi'nden bir grup araştırmacı ise serbest biçimli yapı elemanı üretebilecek üç boyutlu beton baskı (Concrete Printing) teknolojisini geliştirmek üzere çalışmalar yapmıştır (Lim, Buswell, Le, Austin, Gibb ve Thorpe, 2012). Bu temel çalışmalar ile EÜ teknolojilerin yapı bileşeni veya yapı elemanı üretiminde kullanılabileceği kanıtlanmıştır.



Şekil 2. 6 Seramik malzeme ile basılan cisimler (Khoshnevis vd., 2001)

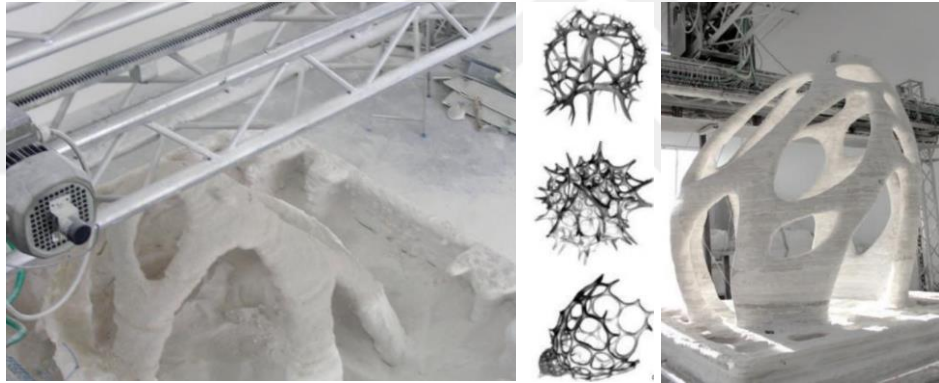
Winsun Firması yapı elemanlarını EÜ ile fabrikada üreterek birden fazla yapı inşa etmiştir (Hager, Golonka ve Putanowicz, 2016). Yapı elemanları; 6 m yüksekliğinde, 10 m genişliğinde ve 40 m uzunluğunda olan 3 boyutlu yazıcı ile basılmıştır (Hager vd., 2016). Örneğin 2015 yılında yapı elemanları Winsun'ın geliştirdiği bu yazıcı ile fabrikada üretilen 5 katlı konut binası inşa etmiştir. Bu yapı EÜ ile üretilmiş Dünya'nın en yüksek yapısı olarak karşımıza çıkmaktadır (Winsun, 2015). Bunun yanı sıra 6 Bevis Marks Binası'nın (2013) çatısına inşa edilen üst örtünün bağlantı elemanları, Arup Firması'nın tasarladığı tensegriti strüktüre sahip aydınlatma elemanının düğüm noktaları (bu iki örnek Bölüm Üç'te Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı başlığı altında incelenmiştir), Striatus (2021) ve Phoenix (2023) köprülerinin beton blokları (bu iki örnek Bölüm Dört'te incelenmiştir) EÜ ile yapı bileşeni üretimlerine birer örnektir.

2.2.3 Yapı

Yapımda EÜ'in ilk zamanlarında 3 boyutlu yazıcıların küçük boyutları ve kısıtlı baskı alanları nedeniyle büyük ölçekli (yapı ölçeği) üretim yapılamamaktaydı. Her ne

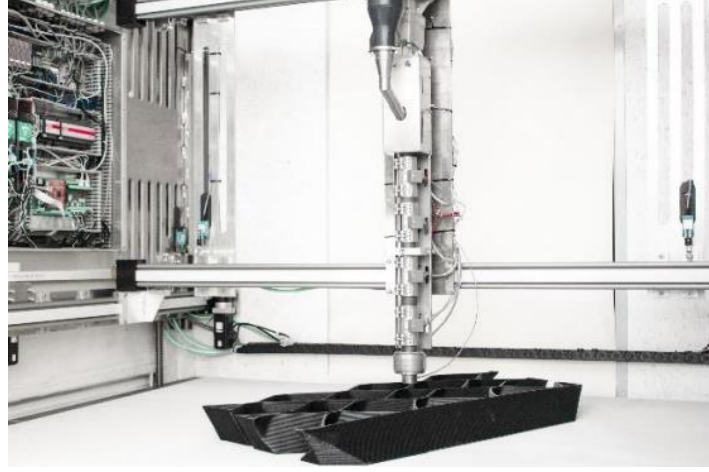
kadar Counter Crafting (CC) Teknolojisi yapımda büyük ölçekli üretim yapmak üzere geliştirilmiş (Khoshnevis, 1996) ve 2007’de Bosscher vd. CC teknolojisini bir adım ileri götürerek kablo destekli C^4 robotunu sunmuş olsa da gerçek anlamda yapı ölçeğinde üretim 2008 yılında başlamıştır. Bu tarihten itibaren yapı ölçeğinde üretim alanında beş temel gelişme yaşanmıştır.

EÜ teknolojisi ile ilk büyük ölçekli baskı 2008’de 3x3x3 m boyutlarında ve alt tablasıyla birlikte 500 kg olan Radiolaria Payonu’nun üretilmesiyle gerçekleştirilmiştir (Morgante, 2011). Radiolaria Pavyonu kum yatağına bağlayıcı püskürterek çalışan portal vinç temelli D-Shape teknolojisi ile serbest biçimli yapı olarak basılmıştır (Şekil 2. 7). Baskı malzemesi olarak bir inorganik bağlayıcı, kum veya mineral tozu, agrega olarak ise Kalsiyum Magnezyum Karbonat kullanılmıştır (Morgante, 2011). Radiolaria Pavyonu asıl basılması hedeflenen 3 katı büyüklüğünde “Radiolaria XL” tasarımının bir denemesi olarak üretilmiştir (Morgante, 2011).



Şekil 2. 7 Radiolaria Pavyonu baskı süreci ve sonuç ürün (Morgante, 2011)

2011 yılında Dus Architects yapı ve yapı bileşeni üretmek üzere 1,6*1,6*4,5 m boyutlarında polipropilen malzemesi (biyoplastik) ile masif baskı yapabilen KamerMaker EÜ teknolojisini (XL 3D Printer) geliştirmiştir (Şekil 2. 8) (Dus Architects, b.t.a). Bu teknoloji ile Dus Architects Canal House (Amsterdam, 2013-?) projesinin yapı bileşenlerini üretmenin yanı sıra geçici Europe Building (2015) ve bir konut prototipi özelliği taşıyan Urban Cabin (2016) yapılarını (bu yapılar Bölüm 4’te daha detaylı incelenmiştir) üretmiştir.



Şekil 2. 8 KamerMaker EÜ teknolojisi (Dus Architects, b.t.a)

2013'te Peter Ebner liderliğinde bir grup yüksek lisans öğrencisi, UCLA (Los Angeles Kaliforniya Üniversitesi) ve HUD (Huddersfield Üniversitesi) tarafından kurulan 3M Future Lab kapsamında taşınabilir bir yaşam kabini olan Micro-Home'u tasarlamışlardır (Klepanova, 2014). Tefrişleri dâhil Voxeljet EÜ Firması'nın danışmanlığında (Taylor-Hochberg, 2014) 3BB teknolojisi ile üretilmiş kabin 3 m yüksekliğinde (Teizer vd., 2018) ve 2,2x2,2 m boyutlarında olup bir insanın barınma ihtiyacını karşılamaktadır (Şekil 2. 9) (Taylor-Hochberg, 2014).



Şekil 2. 9 Micro-Home prototip üretimi (a) ve sonuç ürün (b) (Ebner ve UCLA futureLAB, b.t.)

Winsun Firması'nın 2014 yılında 6,6 m yüksekliğe, 10 m genişliğe ve 150 m uzunluğuna sahip 3 boyutlu yazıcıyı (Kudryavtseva ve Mesyachenko, 2016) geliştirmesi ve bu teknolojiyi kullanarak yapı üretmesi büyük ölçekli EÜ'in ticari boyutta önünü açmıştır. Fabrikada üretilen yapı elemanı ve/veya yapı bileşenlerinin yerinde monte edilmesi suretiyle yapı inşa etme tekniğini benimseyen Winsun EÜ ile

yapının bütününe inşa edilebilirliğini kanıtlamıştır (Wu vd., 2016). Benzer şekilde Qindaou Unique Technology Firması $12 \times 12 \times 12$ m boyutlarında 3 boyutlu yazıcı geliştirerek (Wu vd., 2016) yapımda büyük ölçekli EÜ'in gelişimine katkı sağlamıştır.

Günümüzde yapı ölçeğinde EÜ yapan başlıca firmalar ICON, WASP, COBOD, CyBe, BatiPrint, ApisCor, MX3D, Winsun, İSTON vb. olarak sıralanabilir. Genellikle tek katlı konut yapıları üretilmekle birlikte belediye binası, yaya köprüsü, ofis binası, cami, sağlık yapısı, okul vb. örnekler de mevcuttur.



BÖLÜM ÜÇ

YAPIMDA KULLANILAN EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapım sektörü dünya çapında çevresel etkisi en yüksek olan sektörler arasındadır. Bunun yanı sıra hayatımızı birçok yönden etkileyen bu sektör ekonomik ve sosyal açıdan da büyük etki potansiyeli taşımaktadır. Bunlar göz önünde bulundurularak yapım sektörü için daha çevreci, etkili ve insan odaklı çözümler aranmaktadır. Bu çalışmada EÜ teknolojilerinin çözümler arasında etkili olduğu çeşitli yapı örnekleriyle ortaya konmuştur. Kullanılan malzemeler, teknoloji, iş gücü, maliyet, zaman, işlevsellik bakımından daha etkili çözümler sunmak adına yapımda EÜ alanında birçok firma ve eğitim kurumu bu alanda yenilikçi ve sürdürülebilir yaklaşımlar sergilemektedir.

Bu bölümde EÜ teknolojileri sürdürülebilirliğin üç temel kolu olan çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik açısından irdelenmiştir. Çevresel sürdürülebilirlik daha geniş kapsamlı olduğundan alt başlıklar oluşturularak incelenmiştir. Her başlık yapımda EÜ kapsamında sürdürülebilirlik stratejisi olarak tanımlanmıştır. Şekil 3. 1’de görüldüğü gibi yapımda EÜ teknolojileri sürdürülebilirliğin alt başlıklarından; “alternatif yapı malzemeleri kullanımı”, “konvansiyonel yapı malzemelerinin sürdürülebilir kullanımı”, “yeniden kullanım ve atık yönetimi”, “etkin malzeme kullanımı”, “prefabrikasyon”, “modüler koordinasyon”, “BIM” (Yapı Bilgi Modellemesi) “ekonomik sürdürülebilirlik” ve “sosyal sürdürülebilirlik” kapsamında incelenmiştir.



Şekil 3. 1 Yapıda eklemeli üretim teknolojileri ve sürdürülebilirlik stratejileri şeması

3.1 Eklemeli Üretimde Çevresel Sürdürülebilirlik

Çevresel sürdürülebilirlik, sürdürülebilirlik olgusunun üç temel bileşeninden biridir. Genel bir bakış açısıyla, gelecek nesillere daha yaşanabilir bir Dünya bırakmak adına yenilenebilir kaynakların kullanımının artırılması ve yenilenemeyen kaynakların tüketiminin azaltılması amacı taşımaktadır (Güner, 2020).

Toplam enerji tüketiminin %40'ından, toplam katı atık üretiminin %40'ından, sera gazı (GHG) emisyonlarının %38'inden, su tüketiminin %12'sinden ve insan kaynaklı karbondioksit (CO₂) emisyonlarının %8'inden sorumlu olan yapı sektörü (Raza ve Zhong, 2022) için alternatif çözümlerin araştırılması önem arz etmektedir. Bu noktada EÜ teknolojileri amaç ve hedefleri bakımından çevresel sürdürülebilirliğe olumlu katkılar sunmaktadır. Baskı malzemeleri için geliştirilen atık malzeme kullanımı esaslı yaklaşımların benimsenmesi, etkin malzeme kullanımıyla üretim süreci boyunca atık miktarının en aza indirilmesi, prefabrikasyon ve modüler koordinasyon ile üretim sürecinin basitleştirilmesiyle üretim için gerekli enerjinin ve atık miktarının azaltılması EÜ teknolojilerinin çevresel sürdürülebilir yönleri arasındadır. Bu stratejiler doğrultusunda inşa edilen yapı örneklerinin sayısı her geçen gün artmaktadır. Bunun yanı sıra EÜ teknolojilerinin bilgisayar tabanlı olması, süreci basitleştiren ve bina hakkında bütün teknik bilgileri içeren bir modelin

oluşturulması anlamına gelen BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) ile uyumlu bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir. Bu da yapının yaşam döngüsü boyunca takip edilebilirliğini dolayısıyla verimliliği artırır.

3.1.1 Eklemeli Üretimde Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı

Beton; dayanıklılığı, erişilebilirliği, tasarım esnekliği, yangına karşı dayanıklılığı ve düşük maliyetli olması sebebiyle inşaat sektöründe kullanılan en yaygın malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır (Valipour, Yekkalar, Shekarchi ve Panahi, 2014). Fakat betonun ana bileşenlerinden biri olan Portland Çimentosu (PÇ) toplam CO₂ salınımının yaklaşık %7'sinden (IPCC, 2005), aynı zamanda beton üretimi sırasında salınan CO₂ gazının %79'undan sorumludur (Fernando, Gunasekara, Law, Nasvi, Setunge ve Dissanayake, 2021). Bu sebeple yapımda alternatif yapı malzemeleri (AYM) kullanımı üzerine araştırmalar sürmektedir. Yapım süreçlerinin çevresel etkilerini azaltan malzemeler olarak karşımıza çıkan AYM; geri dönüştürülmüş, atık veya yan ürünlerden, yenilenebilir doğal kaynaklardan elde edilmektedirler (Orhon ve Altın, 2020). Bu malzemeler direkt baskı malzemesi olarak kullanılabileceği gibi (örneğin: toprak, geri dönüştürülebilir plastik) baskı malzemesinde bir bileşen şeklinde de karşımıza çıkmaktadır.

Baskı, beton malzeme ile gerçekleştiriliyorsa çimentonun çevresel etkisini azaltmak için çimento yerine uçucu kül, yüksek fırın cürufu, atık beton tozu, mermer tozu, cam tozu, doğal puzolanlar, silis dumanı vb. alternatif bağlayıcı malzemeler kullanılabilir (Şekil 3. 2). Bu malzemeler literatürde çimento özellikli bağlayıcı malzemeler (SCMs: Supplementary Cementitious Materials) olarak adlandırılmaktadır. Bu maksatla alkali-aktif edilmiş malzeme olarak anılan çimento yerine bağlayıcı malzeme alternatifleri de mevcuttur. Temelde, alkali aktivatörlerle (sodyum silikat) aktive edilen bu malzemeler yüksek kalsiyumlu ve düşük kalsiyumlu olmak üzere ikiye ayrılır (Ekiz Barış, Tüter, Özkan ve Tanaçan, 2023). Alüminosilikat kaynağı olarak kullanılmak üzere olup kalsiyumca zengin olan malzemelerin (C tipi uçucu kül, yüksek fırın cürufu) alkaliler ile aktivasyonu sonucunda oluşan bağlayıcı malzeme “alkali aktive edilmiş malzeme”, kalsiyum oranı düşük olan malzemelerin ise alkali aktivasyonu sonucunda ortaya çıkan

malzeme “geopolimer” olarak adlandırılır (Ekiz Barış vd., 2023). Aslında geopolimer, çimento özellikli bağlayıcı malzemelerin bir alt kümesi olarak da tanımlanabilir. Bu tür malzemeler üzerine yapılan bazı çalışmalar Tablo 3. 1’de verilmiştir. Buna ek olarak Tablo 3. 1’de verilen malzemelerin bazıları tane boyutu ayarlanarak beton için gerekli agrega (örneğin: yüksek fırın cürufu, atık cam, atık beton) olarak kullanılarak doğal agrega ihtiyacını ortadan kaldırılabilir.



Şekil 3. 2 Uçucu kül (a) (Paköz, 2021) , yüksek fırın cürufu (b) (İnsapedia, 2019), mermer tozu (c) (Dönmez İnşaat, b.t.)

Söz konusu malzemelerle ilgili önemli nokta yan veya atık ürün olarak yakın çevrede tedarik edildiklerinde çevresel etkiyi azaltıyor olmalarıdır. Aksi takdirde üretimleri ve transferleri sırasında PÇ üretiminden daha fazla çevresel etkilerinin olma potansiyeli mevcuttur (Yao, Hu, Di Maio ve Cucurachi, 2020). Çimento özellikli bağlayıcı malzemelerin sürdürülebilirliğiyle ilgili dikkat edilmesi gereken konulardan biri de beton oluşturmak üzere kullanıldıklarında beraberinde alkali aktivatör olarak, yüksek üretim ısısı gerektirmesinden dolayı çevresel etkisi oldukça yüksek olan sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum silikatın ana malzemesi olan sodyum hidroksit (NaOH) kullanılması gerektiğidir (Raza ve Zhong, 2022). Bu problem silis kaynağı olan atık camın sodyum silikat yerine kullanılmasıyla çözülebilir (Torres-Carrasco ve Puertas, 2015).

Tablo 3. 1 Çimento Özellikli Bağlayıcı Malzemeler üzerine yapılmış bazı çalışmalar (Khan, Koç ve Al-Ghamdi, 2021, Ekiz Barış vd., 2023) (Belirtilen kaynaklardan yararlanılarak yazar tarafından eklemeler yapılmış ve yeniden yorumlanmıştır.)

Çimento Özellikli Bağlayıcı Malzemeler	Açıklama	Yapılan Çalışmalar
Uçucu Kül (Fly Ash)	Kömürle çalışan kazanların yan ürünü	Smith ve Durham, 2016; Seto vd.,2017; Raun ve Unluer.2017; Chen vd., 2017; Teh vd., 2017; McGrath vd.,2018; Kurda vd.,2018; de Matos vd.,2019; Ahmari vd., 2012; Ren ve Zhang, 2019; Kugler vd., 2023
Yüksek Fırın Cürufu (Blast Furnace Slug)	Cam üretiminde kullanılan fırınların yan ürünü	Pushkar, 2017; Meyer, 2009; Colangelo vd., 2018a
Mermer Atığı (Marble Waste)	Mermer işlendikten sonra artan parçalar	Singh vd., 2017; Colangelo vd., 2018a; Colangelo vd., 2018b
Cam Atığı (Waste Glass)	Cam atıkları	Deschamps vd., 2018; Ilcan vd., 2022; Cyr vd., 2012; Torres-Carrasco ve Puertas, 2015; Vafaei ve Allahverdi, 2017; Xiao vd., 2020; Ulugöl vd., 2021
Doğal Puzolanlar (Örn: Zeolit)	Kayaçların, doğal olarak meydana gelen veya endüstriyel olarak üretilen mineralleri	Valipour vd., 2014
Silis Dumanı (Silica Fume)	Silikon üretiminin yan ürünü	Aldred vd., 2006, Kazemian vd., 2017
Beton Atığı (Waste Concrete)	Yapım ve yıkım sonrası ortaya çıkan atık beton	Petrillo vd., 2016; Mah vd., 2018; Kurda vd.,2018; Ahmari vd., 2012; Ren ve Zhang, 2019; Huo vd., 2021; Komnitsas vd., 2015; Kugler vd., 2023
Cüruf (Salag)	Saf olmayan metallerin eritilmesi ile yüzeyde biriken hafif metallerin oksitlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürün	Gürsel Petek ve Ostertag, 2019;
Pişmiş Toprak Atıkları (Terracotta Waste)	Kırmızı Kil, Tuğla, Kiremit, Porselen, Seramik	Ilcan vd., 2022, Reig vd., 2013; Puertas vd., 2006; Tuyan vd., 2018, Komnitsas vd., 2015; Sun vd., 2013; Kugler vd., 2023; Ulugöl vd., 2021

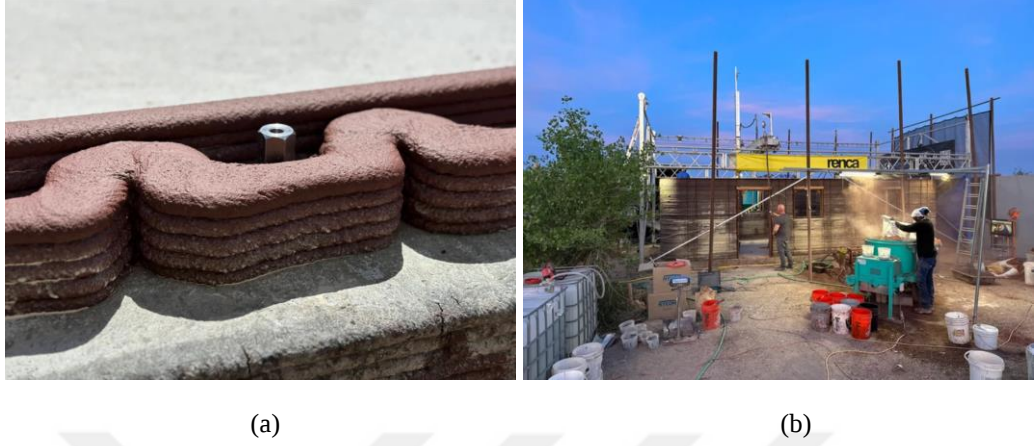
Yapılan çalışmalara göre çimento yerine uçucu kül kullanımında betonun reolojik özellikleri gelişmiştir ve stabilite ve basınç dayanımı artmıştır (Matos vd., 2019,

Ruan ve Unluer, 2017), aynı zamanda uçucu külün %20 oranında kullanılmasıyla çevresel etki %23 azalmıştır (Smith ve Durham, 2016). Demir veya çelik üretim tesislerinde yan ürün olarak çıkan yüksek fırın cürufunun beton bileşeni olarak kullanılması betonun dayanımını artırırken (Meyer, 2009) CO₂ salınımını ve enerji tüketimini azaltmaktadır (Colangelo, Forcina, Farina ve Petrillo, 2018a). Mermer atığı, yüksek fırın cürufu, yıkım sonrası atık beton agregası ve yakma külü üzerine yapılan araştırmada hepsinin çevresel etkiyi azalttığı sonucuna varılarak en az etkiye sahip yan/atık ürünün yüksek fırın cürufu olduğu ortaya konmuştur (Colangelo vd., 2018a). Çimento yerine %30, %20 ve %10 oranında zeolit kullanılması sırasıyla %64,3; %69,7; %60,3 oranında küresel ısınma potansiyelini azalttığı yönünde sonuçlar ortaya konmuştur (Valipour vd., 2014). Bakır cürufunun agrega olarak %40 ve %100 oranında kullanılmasıyla küresel ısınma potansiyeli sırasıyla %7 ve %35, tüketilen enerji %8 ve %40, partikül madde oluşumu %7 ve %35 azalmıştır (Gürsel Petek ve Ostertag, 2019). Bunların yanı sıra cam tozu (Deschamps, Simon, Tagnit-Hamou ve Amor, 2018) ve silis dumanı (Kazemian, Yuan, Cochran ve Khoshnevis, 2017) kullanımı da düşük ekolojik etki sağlamıştır. Tablo 3. 1'deki malzemelere dair çalışmalar bu malzemelerin dayanıklı bir beton için yeterli fiziksel özelliklere sahip olup daha düşük ekolojik etki sağlayabileceğini ve eklemeli üretim teknolojilerinde de kullanılabilirliğini kanıtlamıştır.

Çimento özellikli bağlayıcı malzemelerin 3BB'da kullanılması üzerine ilk çalışma Xia ve Sanjayang (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Toz esaslı 3BB üzerine gerçekleştirilen çalışmada bu malzemenin EÜ için gerekli özellikleri incelenmiş ve olumlu sonuçlar bulunmuştur (Xia ve Sanjayang, 2016).

Yapımda eklemeli üretim dünyasında RENCA adlı şirket 3BB için metalürji, elektrometalürji ve enerji santrallerinin yan ürünlerini PÇ yerine bağlayıcı malzeme olarak kullanarak normal betona göre %80 oranında daha az CO₂ salınımına sebep olan alternatif bir beton geliştirmiştir (Şekil 3. 3) (RENCa, bt). Bu beton yangına, suya, asitlere ve korozyona karşı dayanıklı olup durabilitesi ve donma-çözülme direnci yüksektir (Geopolymer International, b.t.). Atık malzemelerden oluşan bu beton için önemli nokta kullanılan atık malzemenin değişken mekanik özellikleri

sebebiyle betonun dayanıklılığı konusunda farklı etkiler oluşturabileceğidir. Bu sebeple bu malzemeler ile ilgili daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3. 3 RENCA'nın geliştirdiği alternatif beton (a) Alternatif betonla 3BB ile inşa edilmiş ilk yapı (b) (RENCa, b.t.)

Alternatif baskı malzemesi olarak toprak türü malzemelerin kullanılması da bu malzemelerin kolay ulaşılabilir ve geri dönüştürülebilir olması sayesinde çevresel etkiyi ve maliyeti azaltma potansiyeli taşımaktadır. Basılabilir toprak kökenli bir malzemede toprağa ek olarak genellikle su, kum, kireç ve lif bulunur. Birçok alanda eklemeli üretim yapan WASP (World's Advanced Saving Project) firması kendine özgü toprak kökenli 3BB teknolojileriyle başarılı bir şekilde birden fazla yapı inşa etmiştir. Bunlardan bazıları Gaia Evi, Tecla, Dior Mağazası ve Tova'dır. Bölüm 4'te bu yapılar daha detaylı incelenecektir. WASP, yapılarında ana malzeme olarak kil ve saman, bunun yanında pirinç kabuğunu baskı duvar boşluklarına doldurarak ısı yalıtım malzemesi olarak kullanmaktadır (Valente, Sibai ve Sambucci, 2019).

Virginia Üniversitesinden araştırmacılar içinde tohum bulunan ve bitki büyütebilen toprak 3BB mürekkebinin geliştirdiler. Bu malzeme diğer inşaat malzemelerine göre üretildiği toprak malzeme sayesinde zararlı gaz salınımını azaltır ve yeniden kullanılabilmesiyle döngüsel ekonomiye katkı sağlar (Aouf, 2022). Ayrıca bu malzeme ile basılan yapı elemanı 144 saat içinde damkоруğu (az suyla hayatta kalabilen bir etli bitki çeşidi) ile tamamen kaplanmakta (Şekil 3. 4) ve yetişen etli bitki ortamdaki karbondioksiti fotosentez yaparak azaltmaktadır (Aouf, 2022).



Şekil 3. 4 3BB ile toprak malzemeden üretilen duvarların yeşillenme süreci (Baharlou, 2022)

Plastik, yapımda eklemeli üretim sektöründe bir diğer alternatif malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapılan bazı çalışmalara göre atık plastiğin yapı bileşeni üretiminde kullanılması mümkündür ve olumlu sonuçlar ortaya çıkarır (Zaneldin, Ahmed, Mansour ve Hassan, 2021). Örneğin hafif beton tuğlaya göre atık plastik ile basılmış benzer bir yapı elemanı metrekare maliyetini %41 oranında düşürmüştür ve daha yüksek basınç dayanımına sahiptir (Zaneldin vd., 2021). Bunun yanı sıra aynı plastik malzeme alçı levhalara göre daha yüksek maliyete sahip olmasına rağmen 3 katı kadar daha fazla basınç dayanımına sahip olduğu için alternatif malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır (Zaneldin vd., 2021).

Atık plastik yapı bileşeni üretiminde kullanılmasının yanı sıra yapı ölçeğinde de kullanılabilir. Azure Printed Homes firması eklemeli üretimde birincil yapı malzemesi olarak geri dönüştürülmüş plastik şişeleri kullanarak (Şekil 3. 5) sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Genellikle küçük prefabrik evler tasarlayan Azure Printed Homes plastik şişelerde ve gıda paketlerinde bulunan polimer malzemeyi %60 oranında kullanır. Firma, geliştirdiği malzeme sayesinde %70 daha hızlı ve %30 daha az maliyetle ürettiği prefabrik evlerin duvarlarını basmanın yanı sıra çatısını ve döşemesini de aynı teknikle üretebilmektedir (Chang, 2023).



Şekil 3. 5 Azure 3D Printed Homes firmasının kullandığı geri dönüştürülmüş şişelerden elde edilen plastik malzeme (Chang, 2023)

Sonuç olarak, yapım sektöründe kullanılan EÜ teknolojileri için alternatif yapı malzemeleri çimento özellikli alternatif bağlayıcı malzemeler, toprak kökenli karışımlar, atık ve/veya yan ürün olan plastik olmak üzere 3 ana malzeme olarak sıralanabilir. EÜ sektöründe en yaygın kullanılan malzeme beton iken diğer malzemeler ve sürdürülebilirlikleri için de çalışmalar yürütülmektedir.

3.1.2 Eklemeli Üretimde Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı

Konvansiyonel yapı malzemeleri konvansiyonel yapımda kullanılan yapı malzemelerinin genel ismidir. Bu malzemelerden bazıları beton, metal, ahşap, cam, plastik vb. olarak sıralanabilir. Yapım sürecinde EÜ teknolojilerinin kullanımında bu malzemelerden bazılarının sürdürülebilirlik ilkeleri gözetilerek kullanıldığını görmekteyiz.

Yapımda EÜ teknolojilerinde kullanılan malzemelerden biri olan metalin bina ve yapı elemanı yapımında 3BB malzemesi olarak kullanılması maliyeti çok artıracığından topolojik optimizasyonu yapılmış küçük birleşim bileşenlerini üretmek daha etkili sonuçlar verecektir. Bu alanda Arup firması Hollanda'nın Lahey kentinde yer alan ve tensegrity strüktür ilkelerinden yararlanılarak tasarlanan bir aydınlatma elemanı projesinde (Şekil 3. 6 a), topolojik optimizasyonu yapılarak EÜ ile üretilen, çubuk ve kablo elemanları birbirine bağlayan çeşitli düğüm noktaları

tasarlamıştır (Şekil 3. 6 b). Arup, topolojik optimizasyon ve EÜ kullanılarak üretilen düğüm noktalarının konvansiyonel düğüm noktalarına kıyasla %75 daha hafif olduğunu ve toplam strüktür ağırlığını %40 oranında azaltacağını tahmin etmektedir (Galjaard, Hofman, Perry ve Ren, 2015). Ayrıca bu tasarım sayesinde minimum malzeme ile maksimum verim elde edilmiştir.



Şekil 3. 6 Tensegrity aydınlatma elemanı görseli (a) (Arup, b.t.) klasik düğüm noktası (sol) ve EÜ ile üretilen düğüm noktası çeşitleri (orta ve sağ) (b) (Galjaard vd., 2015)

Küçük ölçekte üretimin yanı sıra yapı ölçeğinde de 3BB malzemesi olarak korozyona, darbelere, depreme karşı dayanıklı, geri dönüştürülebilir metal çeşitleri kullanılarak sürdürülebilirlik sağlanabilir. MX3D firması WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) teknolojisi ile Amsterdam'da Joris Laarman Lab ve Arup işbirliğiyle tasarlanan paslanmaz çelikten köprü üreterek metal malzemenin büyük ölçekte de basılabileceğini göstermiştir (Şekil 3. 7) (MX3D, b.t.). Baskı malzemesi olarak 4,5 ton paslanmaz çelik ve 1100 km çelik tel kullanan 4 adet baskı ve kaynak yapan robotik kol ile 6 ay içerisinde üretilen köprü 12,5 m uzunluğunda ve 6,3 m genişliğindedir (MX3D, 2018). Kullanılan çeliğin korozyona dayanıklı olması sayesinde MX3D köprüsünün yaşam döngüsü boyunca bakım ihtiyacı azdır ve ömrü uzundur. Bu sayede tasarım; maliyet ve ham madde tüketimini indirgeyerek sürdürülebilirliğe katkıda bulunur.



Şekil 3. 7 Paslanmaz çelikten üretilen MX3D köprüsü (MX3D, b.t.)

3 boyutlu plastik baskı teknolojisini etkili bir şekilde kullanan yapım şirketlerinden biri Skanskadır. 6 Bevis Marks Binası'nın (Londra, 2013) teras katı için tasarlanan üst örtünün eklem noktalarında EÜ devreye girmektedir. Strüktür elemanlarının kaynak ile birleştirilmesi istenilen estetik görüntüyü bozacağı ve karmaşık geometriye sahip metal parçalar üretmek maliyeti artıracacağı için birleştirme elemanları plastik malzemeden EÜ ile üretilmiştir (Şekil 3. 8) (Camacho vd., 2018).



Şekil 3. 8 6 Bevis Marks Binası (a) (Skanska, b.t.) EÜ ile üretilmiş plastik birleşim detayı (b) (Fletcher Priest Architects, b.t.)

DUS Architects'in geliştirdiği 2*2*3,5 m boyutunda plastik malzemeden yapı inşa edebilen XXL 3D Printer teknolojisi ile Urban Cabin ve Europe Building (Bölüm 4'te incelenmiştir.) inşa edilmiştir. Konvansiyonel yapı malzemesi olan plastik yeniden yorumlanarak tamamen geri dönüştürülebilir baskı malzemesi olarak üretilip bu yapıların üretiminde kullanılmıştır (Şekil 3. 9). Biyoplastik olarak adlandırılan malzeme döngüsel ekonominin geri dönüşüm ve hammadde tedariki

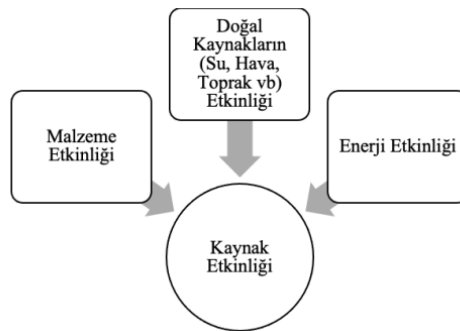
safhalarında çevresel etkiyi azaltmakta ve atık yönetimi sürecine olumlu etki etmektedir.



Şekil 3. 9 Henkel ve Aectual'ın geliştirdiği geri dönüştürülebilir biyoplastik (Ossip van Duivenbode, b.t.a)

3.1.3 Eklemeli Üretimde Etkin Malzeme Kullanımı

Genel anlamıyla etkin malzeme kullanımı aynı miktarda ve kalitede çıktı için daha az oranda malzeme kullanımı olarak açıklanabilir (Hiçyılmaz, Alataş ve Karakaya, 2022). Daha az malzeme kullanımının yanı sıra ürünün yaşam döngüsü boyunca atık miktarının da en aza indirilmesi etkin malzeme kullanımına bağlıdır. Malzeme etkinliği stratejilerinin kullanılması yeni hammadde ihtiyacını dolayısıyla hammadde üretiminde ortaya çıkan sera gazlarını büyük ölçüde azaltacaktır (IRP, 2020) ve yenilenemeyen kaynakların tükenmesini geciktirecektir. Şekil 3. 10'da görüldüğü gibi malzeme etkinliği aynı zamanda sürdürülebilirliğin temel hedeflerinden biri olan kaynak verimliliğinin bileşenlerinden biridir.



Şekil 3. 10 Kaynak etkinliği (Hiçyılmaz vd., 2022)

İnşaat sektöründe malzemenin etkin kullanılması ve oluşacak atıkların en aza indirilmesi için inşa edilecek yapının üretim teknolojisi en faydalı olacak şekilde seçilmeli ve yapı tasarımı etkin malzeme kullanımı stratejilerine uygun yapılmalıdır. BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) ve prefabrikasyonun sürece dâhil edilmesi malzeme kullanımını en aza indireceği gibi (IRP, 2020) EÜ teknolojileri de üretim sırasında sadece gerektiği kadar malzeme kullanmayı sağlayarak ve kalıp ihtiyacını ortadan kaldırarak atık malzeme oluşumunu önler.

BatiPrint3D firması; ilgili belediye, bir konut derneği ve Nantes Üniversitesi işbirliği ile Fransa/Nantes'te ürettiği Yhnova Evi projesinde (Şekil 3. 11 a) (Poullain, Paquet, Garnier ve Furet, 2018) ısı yalıtımı sağlaması amacıyla baskı malzemesi olarak poli-izosiyanat ve poliolün karışımı ile meydana gelen poliüretan köpük kullanmıştır. Poliüretan köpük duvarın iç ve dış olmak üzere iki katmanlı olarak 30 cm yüksekliğinde basıldıktan sonra arada kalan boşluğa beton dökülmüştür (Goidea, 2017). Beton için kalıp görevi gören köpük katmanlarını ayrılmaya karşı destekleyecek, düşeyde her 30 cm'de bir akrilik bağlantı elemanları kullanılmıştır (Şekil 3. 11 b) (Goidea, 2017). Burada EÜ teknolojisi ile üretilen ısı yalıtımı katmanının aynı zamanda dökülecek beton için kalıp görevi görmesiyle bir malzemenin iki amaca hizmet etmesi sağlanarak etkin malzeme kullanımı gerçekleştirilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 3. 11 Yhnova Evi yapım aşaması (a) duvar detayı (b) (Goidea, 2017)

3.1.4 Eklemeli Üretimde Yeniden Kullanım ve Atık Yönetimi

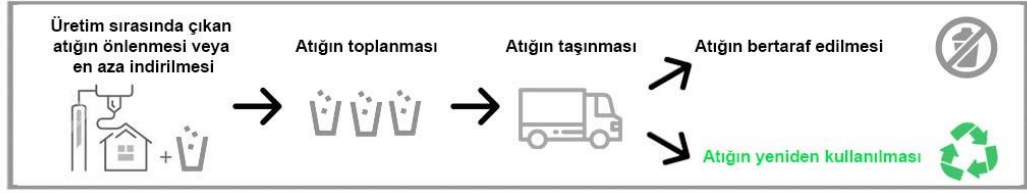
Herhangi bir üretim süreci sırasında ve sonrasında oluşan ve kullanım dışı kalan maddeler/malzemeler/bileşenler atık olarak nitelendirilir. Atıklar genel olarak katı, sıvı, gaz ve ambalaj atıklar olmak üzere 4'e ayrılmaktadır (Gündüzalp ve Güven, 2016) . Konumuzla ilişkisi olan inşaat ve moloz atıkları katı atıklara dahildir (Şekil 3. 12).



Şekil 3. 12 Atık çeşitleri (Gündüzalp ve Güven'in (2016) çalışmalarından yararlanılarak yazar tarafından oluşturulmuştur.)

Dünya yaşamını sürdürülebilir kılmak adına söz konusu atıkların belirli stratejiler kapsamında değerlendirilmesi gerekir. Buna bağlı olarak atık yönetimi doğrultusunda planlar oluşturulur. Atık yönetiminin bir bütün olarak değerlendirilip üretimin her aşamasında verimlilik ve etkinlik göz önünde tutularak hedef ve amaçların oluşturulmasına “entegre atık yönetimi” denir (Şekil 3. 13) (Bozkurt, 2012). Amacı çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak olan entegre atık yönetimi kapsamına giren katı atıklar için süreç sırasıyla; üretim sırasında çıkan atığın en aza indirilmesi, oluşan atığın toplanması ve taşınması, yok edilmesi veya yeniden kullanılması şeklinde ilerlemektedir.

Entegre Atık Yönetimi



Şekil 3. 13 Entegre atık yönetimi şeması (Bozkurt'un (2012) çalışması yorumlanarak yazar tarafından oluşturulmuştur.)

Doğrusal ekonomi modeline (al-kullan-at) göre atık ürün atık olarak kalır ve ekonomik ve çevresel açıdan faydalı olmadığı gibi kaynakların tükenmesi, çevre kirliliği gibi olumsuz etkilere sebep olur. Ekonomik, çevresel ve varsa sosyal olumsuz etkileri azaltmak için meydana gelen atık ürünlerin aynı veya farklı bir amaç doğrultusunda tekrar kullanılmasına “yeniden kullanım” denir. Yeniden kullanılabilen her malzeme veya eleman atık veya yan ürün olduğundan “yeniden kullanım” “alternatif yapı malzemeleri”ni kapsamaktadır.

Yeniden kullanım döngüsel ekonominin bir basamağı olup döngüdeki tasarım, üretim ve transfer aşamalarından sonra gelen kullanım aşamasında yer almaktadır (Şekil 3. 14) ve “devşirerek yeniden kullanım” ve “dönüştürerek yeniden kullanım” olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Orhon, 2020).



Şekil 3. 14 Döngüsel ekonomi şeması (Ödenir Bakır ve Orhon, 2024)

Devşirerek yeniden kullanım yapı veya yapı parçalarının tekrar kullanılmasını, dönüştürerek yeniden kullanım ise ürünlerin birtakım fiziksel ve kimyasal süreçlerden geçirilip hammaddeye dönüştürülerek tekrar kullanılmasını ifade etmektedir. Dönüştürerek yeniden kullanım da elde edilen hammaddenin kullanım

alanının bir önceki ile aynı veya farklı olmasına bağlı olarak geri dönüşüm ve ileri dönüşüm olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Geri dönüşümde hammadde aynı amaç için kullanılıyorken ileri dönüşümde hammadde farklı bir ürün üretmek için kullanılmaktadır.

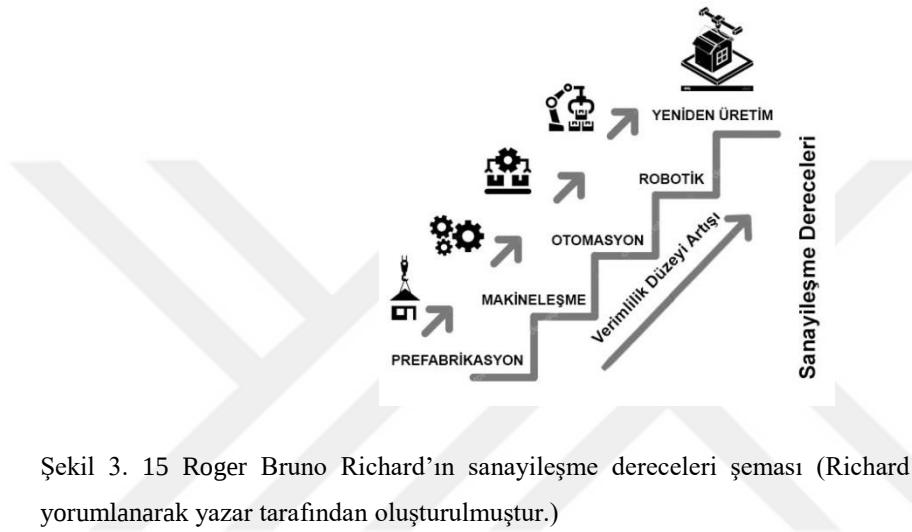
Yeniden kullanımın gerçekleştirilebilmesi için yapımda seçilen ilk hammaddenin geri dönüştürülebilir özelliklerde olması gerekir. Eklemeli üretimde de baskı malzemelerinin yeniden kullanılabilir olması, yapı ömrünü tamamladığında yeni bir hammadde ihtiyacı doğmadan tekrar basılabilmesi döngüsel ekonomiye katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra yapımda kullanılan 3BB malzemeleri, “alternatif yapı malzemeleri” başlığında da anlatıldığı gibi, hâlihazırdaki atık veya yan ürünlerden yararlanılarak oluşturulabilir.

Zaha Hadid Architects’in tasarladığı Striatum Köprüsü ve Phoenix Köprüsü, Dus Architects’in tasarladığı Urban Cabin ve Europe Building yapıları, WASP firmasının tasarladığı TECLA, TOVA, Dior Mağazası vb. yapıları büyük oranda geri dönüştürülebilir malzemelerden inşa etmektedir. Yapı ömrünü tamamladığında 3BB malzemesi birtakım fiziksel ve kimyasal süreçlerden geçirilerek tekrar kullanıma uygun hale getirilir. Bu da atığı azaltma ve önleme politikalarına büyük fayda sağlamakta ve yapımda EÜ teknolojilerinin yeniden kullanım alanında büyük potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır.

3.1.5 Eklemeli Üretimde Prefabrikasyon

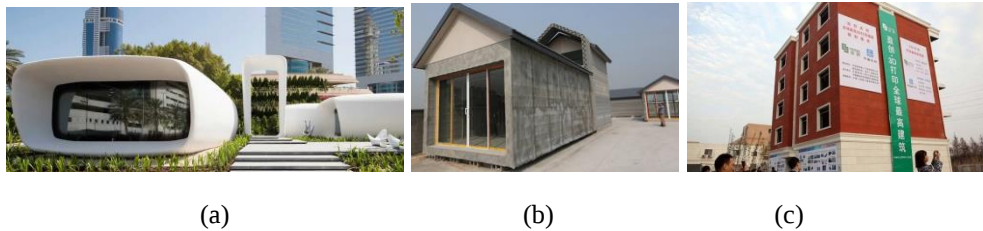
Roger Bruno Ricard’ın (2005) sanayileşme derecelerinden biri olan prefabrikasyon (Şekil 3. 15) Türkiye Prefabrik Birliği’ne (2018) göre, bina elemanlarının fabrikada üretilip şantiye alanına nakledilmesi ve yerinde montajın gerçekleştirilmesi sürecidir. İnşaat sürecini hızlandırmak ve basitleştirmek amacıyla yapı/yapı elemanı/yapı bileşeni fabrikada denetlenerek üretilirken atık üretimi, kirlilik ve gürültü minimum düzeye inmekte, üretim süresi, ve maliyet azalırken kalite, güvenlik, düzen, sürdürülebilirlik ve verimlilik artmaktadır (Chippagiri, Bras, Sharma ve Ralegaonkar, 2022) ve prefabrikasyon sayesinde üretim dışı hava koşullarından etkilenmeden yapılmaktadır. Daha verimli üretim için makineleşme, otomasyon ve robotik teknolojiler prefabrikasyon ile eş zamanlı kullanılmalıdır.

Prefabrikasyon; yapımda eklemeli üretim teknolojileri ile bütünleşik bir şekilde kullanıldığında Richard'ın (2005) ortaya koyduğu endüstrileşme derecelerinden en üst basamakta yer alan, yenilikçi süreçlerin geliştirilerek araştırma ve üretimin oldukça basitleştiği, “yeniden üretim” düzeyine çıkılarak sürdürülebilirlik potansiyeli artırılır. Özetle robotik inşa süreçleriyle desteklenen eklemeli üretim yoluyla prefabrikasyon; çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik sağlar (Volpe, Sangiorgio, Petrella, Coppola, Notarnicola ve Fiorito, 2021).



Şekil 3. 15 Roger Bruno Richard'ın sanayileşme dereceleri şeması (Richard'ın (2005) çalışması yorumlanarak yazar tarafından oluşturulmuştur.)

Yapımda EÜ'de fabrikada üretilecek olan ürün bir yapı olabildiği gibi yapı elemanı veya bileşeni de olabilir. Günümüzde birçok eklemeli üretim firmasının yapı elemanlarını fabrika ortamında üretim yapıp sahaya naklettiği görülmektedir. Winsun firması ürettiği Dubai Ofis Binası (Bölüm 4'te daha detaylı incelenecektir.), on adet ev (Kidwell, 2017), beş katlı apartman binası, otobüs durakları, izolasyon konutları vb. projeleriyle eklemeli üretimde prefabrikasyona öncülük etmiştir (Şekil 3. 16).



Şekil 3. 16 Winsun tarafından üretilen Dubai Ofis Binası (a) (Visit Dubai, b.t.), 10 prefabrik ev (b) (BBC, 2014), beş katlı apartman (c) (Caixin, 2015)

Tsinghua Üniversitesinden Prof. Xu Weiguo'un liderlik ettiği takım tarafından tasarlanan ve Wisdom Bay Yatırım Yönetimi Şirketi tarafından inşa edilen 26,3 m uzunluğunda ve 3,6 m genişliğindeki Baoshan Yaya Köprüsü'nün 176 adet beton yapı bileşeni fabrikada 2 adet robotik kol ile 450 saatte üretilip (Ravenscroft, 2019) yerinde geçici çelik bir iskele ve vinç yardımıyla (Yuan,2019) monte edilmiştir (Şekil 3. 17). Böylelikle şantiyede oluşabilecek olumsuz durumlar engellenmiş ve atık düzeyi minimuma indirilmiştir. Bunun yanı sıra maliyet azalmış ve yapım süresi kısalmıştır.

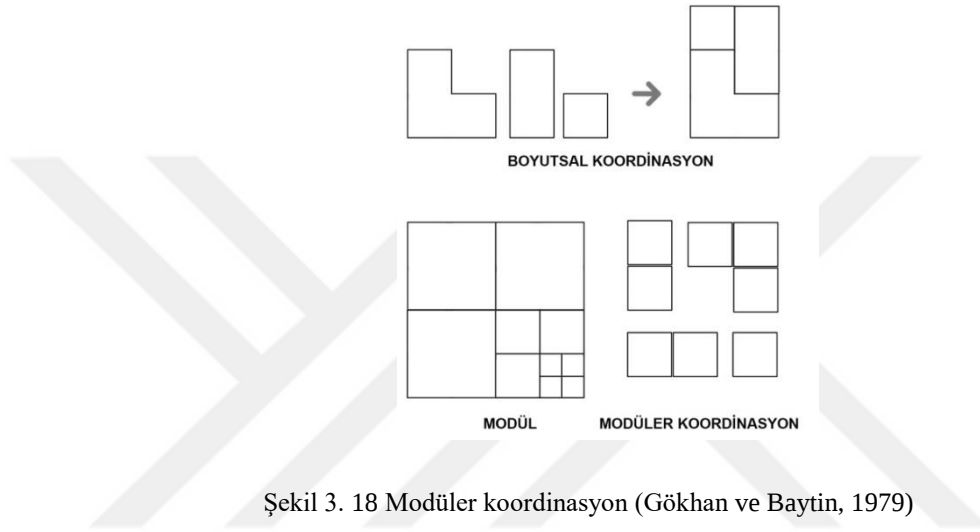


Şekil 3. 17 Baoshan Yaya Köprüsü'nün montajı (Yuan,2019)

3.1.6 Eklemeli Üretimde Modüler Koordinasyon

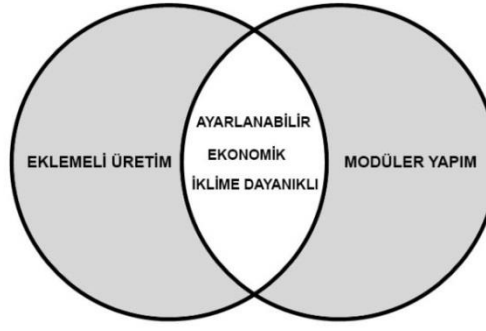
Belirli bir eyleme düzenli bir yaklaşım sağlamak için bazı kurallar ortaya koyma ve uygulama süreci olan “standartlaşma” (Gökhan ve Baytin, 1979) endüstrileşmenin gereği olarak karşımıza çıkmaktadır (Tokgöz ve Koçak 2009). Standartlaşmanın sağlanması için bileşenlerin tür sayısının azaltılması ve bileşenler arasındaki ilişkinin bir düzene oturtulması gerekmektedir (Gökhan ve Baytin, 1979). Bunun için de bir üretimde katsayı olarak tekrarlanan uygun bir boyut olan “modül”e ihtiyaç duyulmaktadır. Bir temel modül oluşturulup gerektiğinde bu modülün kendisi ve katları kullanılarak boyutsal koordinasyon sağlanır. Bu sayede tasarım esneklik kazanmaktadır. “Modüler Koordinasyon” (MK) ise üretilecek yapı elemanları veya bileşenlerinin bir temel modülle boyutsal koordinasyonu sağlanarak tasarlanmasıdır (Şekil 3. 18). MK’da temel amaç parça çeşitliliğini azaltarak üretimi basitleştirmek dolayısıyla süreden, malzemedan, iş gücünden, alandan tasarruf ederek, üretim

esnasında oluşan atık miktarını azaltarak sürdürülebilir yapım gerçekleştirmektir. Bu noktada modüler koordinasyonun prefabrikasyon ile de bağlantılı olduğu görülmektedir. Boyutsal koordinasyon içerisinde olan elemanların üretiminde verimliliği ve düzeni artırmak için mekanizasyon, otomasyon ve prefabrikasyon devreye girer. Dolayısıyla modüler parçalar endüstrileşmiş sistem içerisinde prefabrikasyonla imal edildiklerinde üretim süreci basitleşir ve daha sürdürülebilir hale gelir.



Şekil 3. 18 Modüler koordinasyon (Gökhan ve Baytin, 1979)

Endüstrileşme ve standartlaşma bağlamında yapım sektörü için önemli adım olan EÜ sayesinde modüler üretim yapmak oldukça kolaylaşmaktadır. Bununla birlikte EÜ ile üretilen parçalarda boyutsal hataların az olması üretim toleranslarının da düşük olmasını sağlar. MK kullanılarak EÜ teknolojileri ile üretilen yapılar ayarlanabilir, ekonomik ve iklime dayanıklı olması ile ön plana çıkmaktadır (Şekil 3. 19). Modüler yapı ayarlanabilir özelliği sayesinde büyüyen şehir popülasyonu içerisinde gerekli kapasite, alan veya fonksiyon değişikliğini karşılamak için olanaklar sunar (Bergh, Nieuw, Slob, Suarez ve Velema, 2022). Alanın büyütülmesi gerektiğinde modüller eklenerek alan genişletilebilir, alanın farklılaştırılması gerektiğinde modüller sökülüp tekrar monte edilir böylelikle mekân yıkım ve atık ürün olmadan biçimlendirilir, bir taşıma söz konusu olduğunda ise modüller sökülüp kolaylıkla başka bir alana inşa edilmek üzere taşınabilir (Bergh vd., 2022).



Şekil 3. 19 Eklemeli üretim ile modüler yapımın kombinasyonu (Bergh vd., 2022)

EÜ ile modüler yapım ekonomik olması yönüyle sürdürülebilirliğe birçok açıdan katkı sağlar. Her ne kadar eklemeli üretimde operatör başına düşen işçilik maliyeti normal inşaat işçilerine göre daha fazla olsa da sayısının az olması ve inşaat süresinin kısa olması süreci daha ekonomik hale getirir (Masera, Muscogiuri, Bongiovanni ve Colombo, 2017). Bunun yanında malzeme israfı azaldığı için maliyeti de azalır. Ayrıca modüler eklemeli üretim teknolojisinin olanak verdiği hücresel yapım sistemiyle daha hafif, dayanıklı (Panda, Leite, Biswal, Niu ve Garg, 2018), güçlü ve esnek yapılar iklim değişikliği sonucu ortaya çıkan sel, fırtına, aşırı sıcaklık gibi doğal afetlere karşı daha fazla koruma sağlayabilir.

Yapımda EÜ alanında modüler tasarıma verilebilecek örneklerden biri Şian kentinde Zhuoda Group Firması tarafından 2015 yılında inşa edilen, 3BB ile üretilen modüllerden oluşan 2 katlı villa projesidir. İnşaatın %90'ı fabrikada gerçekleşirken inşaat alanında bir vinç yardımıyla 6 modül üç saat içerisinde birbirine monte edilmiştir (Şekil 3. 20) (Doris, 2015; Wang, 2015). Villa 8 büyüklüğündeki depreme, yangına ve suya karşı dayanıklıdır (Eldlaal, 2015; Wang, 2015).



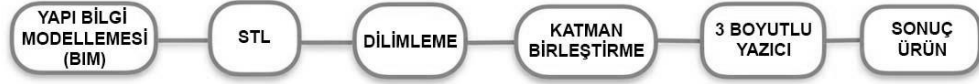
Şekil 3. 20 Zhouda Group'un inşa ettiği modüler villa (Wang, 2015)

3.1.7 Eklemeli Üretimde BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) Kullanımı

Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), disiplinler arası iletişim kurularak projede yapılması planlanan hedef ve amaçlara dair birçok verinin dijital ortamda 3 boyutlu bir model üzerinde toplandığı bir bilgi kaynağıdır. Diğer bir deyişle BIM, projelerin inşaat öncesi, sırası ve sonrası hakkında bilgi oluşturmak, depolamak, erişmek, iletişim kurmak ve sunmak için etkili bir dijitalleştirme platformudur (Chippagiri vd., 2022).

Baskı sürecinde kullanılan yazılımlar ve 3 boyutlu yazıcılar, konseptten sonuç ürüne kadar tasarımcıların ve inşaatı gerçekleştirenlerin sorunsuzca çalışmalarına ve 3 boyutlu yapının doğrudan üretilebilmesine olanak tanır, bu noktada BIM yazılımı inşa edilebilirlik sorunlarını çözerek proje kontrolünün ara adımlarını basitleştireceği için yapım süresini kısaltacaktır (Masera vd., 2017). Dolayısıyla EÜ ile BIM entegrasyonu daha sıkı bir zaman ve Yapımda EÜ'de BIM'in uygulanması disiplinler arası eşgüdümü ve verilerin kolay ulaşılabilir olmasını sağlarken yapının yaşam döngüsü boyunca planlama, maliyet hesabı, sürdürülebilirlik vb. (Özcan ve Erol, 2018) hedefler için adım atmayı kolay hale getirmektedir. Maliyet kontrolünün yanı sıra daha az öngörülemeyen ve değişken iş yüküne, konseptten mühendisliğe kadar projenin tüm aşamaları üzerinde daha fazla kontrole olanak sağlayabilir (Masera vd., 2017). EÜ sürecinde BIM ilk basamak olarak karşımıza çıkarken (Şekil 3. 21) (Sakin ve Kiroğlu, 2017), prefabrikasyon ve modülerleştirmede şeffaf bilgi dağıtımı için temel bir unsur olarak hizmet etmektedir (Teizer vd., 2018). Özetle, BIM'in var olması, performans ve montaj aşamalarının yanı sıra form bakımından

tasarım olanakları da dahil olmak üzere 3BB için yeni fırsatlara olanak tanımaktadır (Wu vd., 2016).



Şekil 3. 21 Yapımda eklemeli üretim sürecinde BIM'in yeri (Sakin ve Kiroğlu, 2017)

Liu, Ge, Zhou ve Zhang (2017) çalışmalarında BIM modelini 3BB STL formatına dönüştürme, STL formatını Cura 3D yazılımına aktarma ve 3B yazıcı için kullanılan G kodunu üretmek için yazdırma sürecini göstermektedirler. Zhihong, Yanjing, Yi ve Jiayue (2017) örnek proje olarak Urumçi Uluslararası Karayolu-Demiryolu Kombine Yolcu İstasyonu ve Kuzey Meydan Girişini kullanarak BIM ile EÜ etkileşimini tartışmaktadır (Sepasgozar, Shi, Yang, Shirowzhan ve Edwards, 2020). BIM destekli üretimde robotlarla inşa edilen yapılar (MOCAPE, Çağdaş Sanatlar Müzesi ve Planlama Sergisi) olsa da tam anlamıyla BIM ile EÜ'nin birlikte kullanıldığı inşa edilmiş yapı bulunmamaktadır.

3.2 Eklemeli Üretimde Ekonomik Sürdürülebilirlik

Ekonomik sürdürülebilirlik genel anlamda çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik ile bağlantılı olmakla birlikte temelde maliyet açısından kolay ulaşılabilirliği ve ekonomik kaynakların etkin yönetilmesini hedeflemektedir. İnşaat sektöründe çevresel sürdürülebilirlik adına yapılan birçok eylem ekonomik yönü de etkilemektedir. Örneğin malzemelerin yeniden ve/veya etkin kullanılarak hammadde ihtiyacının azaltılması; prefabrikasyon, modüler koordinasyon ve BIM'in uygulanmasıyla zamandan, malzemeden ve iş gücünden tasarruf sağlanması ekonomik sürdürülebilirliği sağlamaktadır. Yapımda EÜ bu tür sürdürülebilir stratejilere açık olmakla birlikte bu teknolojinin uygulanması başlı başına ekonomik sürdürülebilir sonuçlar ortaya koymaktadır. EÜ'de, otomasyon ve robotik sayesinde iş gücüne olan ihtiyaç ve insan kaynaklı yapım hataları azalır dolayısıyla iş gücü bakımından daha az maliyetli bir yapım süreci meydana gelir (Labonnote, 2016). Bunun yanı sıra robotların baskı esnekliği sayesinde karmaşık geometrili yüzeyler

konvansiyonel yapım sistemlerindeki gibi fazladan bir çaba ve maliyet gerektirmeden inşa edilebilir.

Tobi, Omar, Yehia, Al-Ojaili, Hashim ve Orhan (2018), İngiltere'de 90 m² kullanılabilir alana sahip ortalama büyüklükteki bir ev için EÜ teknolojisinin maliyet açısından uygulanabilirliğini yaşam döngüsü maliyet analizini (LCCA) kullanarak araştırmıştır. Bu çalışma ile daha az malzeme tüketimi ve işçilik maliyetinin ortadan kalkması sayesinde söz konusu evin konvansiyonel yapım sistemine göre %30 daha az maliyetle inşa edilebilir olduğu ortaya konmuştur (Tobi vd. 2018). Fakat çalışma kapsamında veri eksikliğinden dolayı teknoloji maliyeti hesaba katılmamıştır (Tobi vd. 2018).

Abdalla, Fattah, Abdallah ve Tamimi (2021) ise çalışmalarında ekstrüzyon esaslı eklemeli üretim ve yerinde dökme beton kullanan konvansiyonel yapıyı yaşam döngüsü maliyeti açısından karşılaştırdı. Bu çalışmaya göre BAE'nde tek katlı bir evin 3BB ile inşa edilmesi konvansiyonel yapıya oranla %78 oranında kazanç sağlamıştır (Abdalla vd. 2021). Sonuç olarak 3BB daha iyi bir eko-verimlilik göstermiştir.

Uygulama sahasında WinSun Firması Mart 2014'te her biri 3.200 £ değerinde olan on adet evi (Şekil 3. 22 a) yirmi dört saatte basarak (3D Construction Printing, 2019) zamandan ve iş gücünden büyük oranda tasarruf sağlayarak EÜ teknolojilerinin ekonomik açıdan etkili bir yapım sistemi olduğunu ortaya konmuştur. Aynı firma Ocak 2015'te ise üç günde üç kişilik ekiple 1100 m²'lik bir villa inşa etmiştir (Şekil 3. 22 b) (Winsun, b.t.a). Sonuç olarak EÜ teknolojileri ile yapımın daha kısa sürede ve daha az iş gücü ile gerçekleştirilmesi bu yapım sisteminin ekonomik sürdürülebilirlik potansiyeli taşıdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3. 22 Winsun'ın inşa ettiği on 3BB evden biri (a) (Frey, 2014) villa projesi (b) (Winsun, b.t.a)

3.3 Eklemeli Üretimde Sosyal Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik adına atılan adımlar temelde insan konforunu artırmak amacı ile gerçekleştirilmektedir. Sosyal sürdürülebilirlik ise genel olarak toplumsal refahın sağlanmasını, sağlık ve güvenliğin artırılmasını, yaşam kalitesinin yükseltilmesini amaçlamaktadır (Şenel, 2010). Geniş bir çerçeveden baktığımızda çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğin toplumsal fayda götüğünü dolayısıyla sosyal sürdürülebilirlik ile ilişkili olduğunu görmekteyiz.

Yapımda EÜ yoluyla çevresel sürdürülebilirlik kapsamında uygulanan stratejiler sonucunda sera gazı salınımları ve doğal kaynak tüketimi azalacağından iklim değişikliği, biyoçeşitliliğin azalması, doğa kirlilikleri vb. olumsuz etkilerin gerileyeceği ön görülmektedir. Bu da insan sağlığını ve yaşam kalitesini doğrudan olumlu yönde etkilemektedir.

Yapımda EÜ teknolojilerinin uygulanması otomasyonu artırıp iş gücüne olan ihtiyacı azaltmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde inşaat sektörü önemli bir iş kaynağı olduğundan yapım sürecinin tamamen otomasyon ile gerçekleştirilmesi işsizlik sorunlarına yol açabilir. Fakat aynı zamanda yeni bir iş alanı doğmaktadır. Bu iş alanı için kalifiye işçilerin yetiştirilmesi gerekmektedir. Ancak teknolojinin programlanabilir özelliği sayesinde gerekli becerinin edinilmesi kolaydır ve hata yapılma olasılığı azdır (Khan vd., 2021). Bunun yanı sıra EÜ yerel ve/veya atık malzeme kullanımını mümkün kılarak yerel pazarları canlandırma potansiyeline sahiptir. EÜ'nin sosyal açıdan bir diğer avantajı daha güvenli bir iş sahası alanı oluşturmasıdır. Konvansiyonel yapım sistemlerine kıyasla yaralanma ve ölüm riski

azdır. EÜ teknolojilerinin toplumsal faydalarından biri de yapım süresini önemli ölçüde azaltması sayesinde deprem, sel, savaş gibi olası afet durumlarında geçici barınma alanlarının daha hızlı inşa edilebilmesinin önünü açmasıdır. Ayrıca evsizlik sorunu yaşanan ülkelerde pratik, hızlı ve ekonomik çözüm modeli olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna örnek olarak ICON EÜ Firması'nın 2019 yılında Meksika'nın Nacajuca kentinde ve ABD'nin Austin kentinde inşa ettiği konut projeleri verilebilir (Şekil 3. 23) (Nacajuca'da inşa edilen konutlar Bölüm 4'te daha detaylı incelenmiştir). Bunun yanı sıra COVID-19 pandemisi sürecinde Winsun Firması virüse yakalanan hastaların sosyal izolasyonunu sağlamak üzere İzolasyon Konutları (Bölüm 4'te daha detaylı incelenmiştir) projesini hayata geçirmiştir.



(a)



(b)

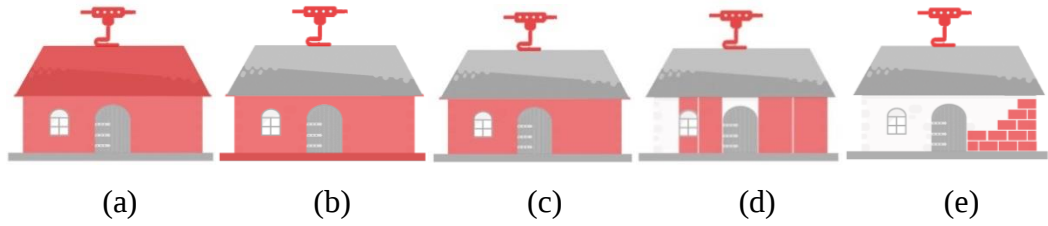
Şekil 3. 23 Nacajuca'da (a) (Perez, 2019) ve Austin'de (b) (ICON - 3D Tech, 2019) inşa edilen 3BB konutları

BÖLÜM DÖRT

EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ İLE ÜRETİLMİŞ SÜRDÜRÜLEBİLİR YAPI ÖRNEKLERİ

Bu bölümde sürdürülebilirlik ilkeleri gözetilerek eklemeli üretim ile üretilmiş 16 adet yapı örneği yapım çeşidi, üretim teknolojisi, kullanılan malzeme, sürdürülebilir yönleri açısından irdelenmiştir. Örnekler seçilirken tasarım aşamasından yıkım aşamasına kadar olan süreçte herhangi bir aşamada sürdürülebilir özellik taşımasına ve güncel olmasına dikkat edilmiştir. İncelenen yapı örnekleri; “Europe Building”, “Urban Cabin”, “Dubai Ofis Binası”, “Gaia Evi”, “3BB Konut Topluluğu”, “İzolasyon Konutları”, “Striatus Köprüsü”, “Tecla”, “Dior Mağazası”, “Tova”, “Biohome3D”, “House Zero”, “Mighty Ev”, “Phoenix Köprüsü”, “AKF Pavyonu” ve “Las Casitas Konutları”dır. Örnekler yapım yılı açısından kronolojik olarak sıralanmıştır.

İncelenen yapı örneklerine ait özet tablolarında “EÜ Teknolojisi” bölümünde yer alan “EÜ Ölçeği” bilgisi yazılı olarak verilmiş olmakla birlikte Şekil 4. 1’de yer alan grafik gösterimler ile desteklenmiştir. Grafiklerde kırmızı renk ile taranan alanlar EÜ ile üretilmiş öğeleri göstermektedir.

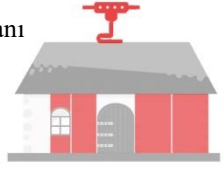


Şekil 4. 1 Yapı ölçeği (duvarlar ve çatı) (a), yapı ölçeği (duvarlar ve temel) (b), yapı ölçeği (duvarlar) (c), yapı elemanı ölçeği (d), yapı bileşeni ölçeği (e)

4.1 Europe Building

Europe Building Dus Architects tarafından EÜ ile inşa edilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4. 1 Europe Building özet tablosu

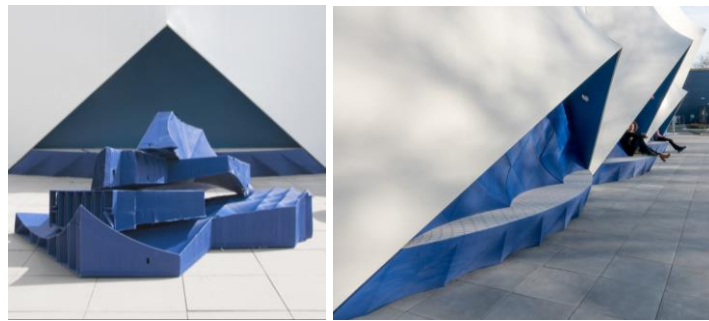
EUROPE BUILDING		
Künye	 (Ossip van Duivenbode, b.t.a)	Yapım Yılı : 2015 (Dus Architects, b.t.c) Yapım Yeri : Amsterdam/Hollanda (Dus Architects, b.t.c) Mimar/Tasarımcı : Dus Architects İşlev : Geçici toplantı binası (Severi, 2022) İnşaat Alanı : - İnşaat Süresi : -
EÜ Teknolojisi	 (Dus Architects, b.t.a)  (Ossip van Duivenbode, b.t.a)	Üretici: Dus Architects, Aectual Yapım Şekli: Fabrikada Yapım EÜ Teknolojisi: KamerMaker XL 3D Printer EÜ Mekanizması Çeşidi: Portatif portal vinç Baskı Malzemesi: Biyoplastik (Dus Architects, b.t.a) EÜ Ölçeği: Yapı elemanı (Cephe elemanları) 
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı	+
	Yeniden Kullanım	
	Etkin Malzeme Kullanımı	+
	Prefabrikasyon	+
	Modüler Koordinasyon	+
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+
	Sosyal Sürdürülebilirlik	
- Geri dönüştürülebilir plastik kullanılmıştır. - Yapı, fabrikada üretilen modüllerden oluşturulmuştur.		

Avrupa Birliği politikacılarının toplanacakları altı aylık etkinlik için tasarlanan Europe Building yapısının cepheleri EÜ ile inşa edilmiştir. Tarihi yelkenli gemilerden ilham alarak tasarlanan cephede, delegeler ve halk için sosyal alanlar oluşturan, beton zemin üzerine yerleştirilen bankların yer aldığı girintiler bulunmaktadır (Şekil 4. 2) (Dus Architects, b.t.c).



Şekil 4. 2 Cephede yer alan 3BB banklar (Ossip van Duivenbode, b.t.a)

Altı aylık etkinlik sona erdiğinde herhangi bir atık ürün oluşturulmadan cephe parçalarının geri sökülebilir ve baskı malzemesinin tekrar kullanılabilir olması sayesinde yeni baskı için yeni hammadde ihtiyacı ortadan kaldırılarak yapımın karbon ayak izinin küçülmesi hedeflenmiştir. Söz konusu baskı malzemesi Henkel Firması tarafından geliştirilen tamamen geri dönüştürülebilir biyoplastiktir (Dus Architects, b.t.c). Burada konvansiyonel yapı malzemesi olan plastiğın yeniden yorumlanarak sürdürülebilir bir yaklaşımla kullanıldığını görmek mümkündür. Bunun yanı sıra cephe, Dus Architects ve Aectual firmaları tarafından EÜ teknolojileri ile üretilen ve Heijmans Firması tarafından montajı yapılan modüllerden oluşmaktadır (Şekil 4. 3). Modüler koordinasyon sayesinde yapım süresi kısalmış ve kurulum için gerekli olan enerji ve iş gücü ihtiyacı azalmıştır.

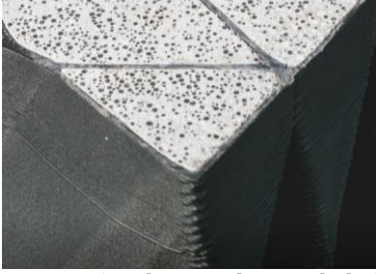


Şekil 4. 3 EÜ ile üretilmiş modüller (Ossip van Duivenbode, b.t.a)

4.2 Urban Cabin

Urban Cabin Dus Architects tarafından EÜ ile inşa edilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4. 2 Urban Cabin özet tablosu

URBAN CABIN			
Künye	 (Ossip van Duivenbode, b.t.b)	Yapım Yılı : 2015 (Dus Architects, b.t.b) Yapım Yeri : Amsterdam/Hollanda (Dus Architects, b.t.b) Mimar/Tasarımcı : Dus Architects İşlev : Konut prototipi (Dus Architects, b.t.b) İnşaat Alanı : 8 m ² (Dus Architects, b.t.b) İnşaat Süresi :-	
		Üretici: Dus Architects, Aectual Yapım Şekli: Fabrikada yapım EÜ Teknolojisi: KamerMaker XL 3D Printer EÜ Mekanizması Çeşidi: Portatif portal vinç Baskı Malzemesi: Biyoplastik EÜ Ölçeği: Yapı (Duvarlar ve çatı)	
EÜ Teknolojisi	 (Dus Architects, b.t.a)  (Sophia van den Hoek, b.t)		
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı		- Baskı malzemesi olarak geri dönüştürülebilir biyoplastik kullanılmıştır. - Afet bölgelerinde geçici konut ihtiyacını karşılayabilme potansiyeline sahiptir
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı	+	
	Yeniden Kullanım		
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon	+	
	Modüler Koordinasyon		
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik	+	

Bir dinlenme noktası olarak tasarlanan Urban Cabin sürdürülebilir barınma çözümleri için bir araştırma niteliği taşımaktadır. Dus Architects'in 3D Print Living Lab projesinin bir parçası olan bu prototip ile 3B baskı ile geçici barınma için sürdürülebilir ve özelleştirilebilir çözümler sunabilmek amaçlanmıştır (Dus Architects, b.t.b). 8 m² ve 25 m³ olan bu kabinin duvarları ve çatısı tek parça halinde EÜ ile üretilmiştir. Bir yarı açık mekân olarak sundurma ve kapalı mekân olarak dinlenme alanından oluşan yapı (Şekil 4. 4) afet bölgelerinde geçici konut ihtiyacını karşılayabilme potansiyeline sahiptir. Urban Cabin aynı zamanda farklı desen ve formdaki cepheleri (Şekil 4. 5) ile form optimizasyon çeşitlerini ve EÜ'de malzeme kullanımına yönelik akılcı çözümleri sergilemektedir (Dus Architects, b.t.b).



Şekil 4. 4 Sundurma (a) ve iç mekân (b) (Sophia van den Hoek, b.t)



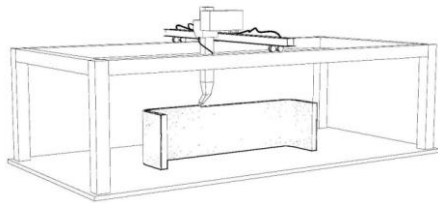
Şekil 4. 5 Farklı desen ve formlara sahip cephe (Sophia van den Hoek, b.t)

Ana bileşeni keten olan plastik baskı malzemesi Henkel ve Actual firmaları tarafından geliştirilmiştir (Koslow, 2016; Lanko, 2018). Biyoplastik adı verilen malzeme tekrar basılabilir özellikte olması sayesinde yapı ömrünü tamamladığında atık ürün oluşturulmayacaktır. Böylelikle ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik sağlanmış olacaktır.

4.3 Dubai Ofis Binası

Dubai Ofis Binası Winsun Firması tarafından EÜ ile inşa edilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.3'te verilmiştir.

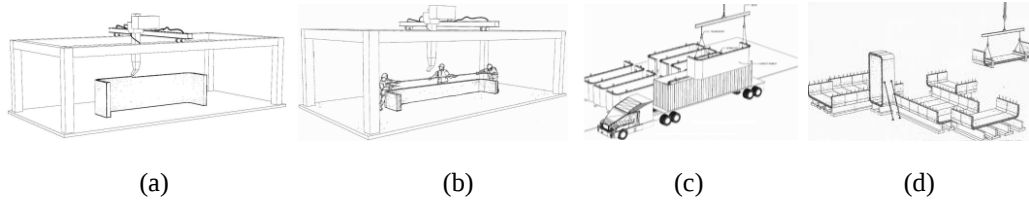
Tablo 4. 3 Dubai Ofis Binası özet tablosu

DUBAİ OFİS BİNASI			
Künye	 (Winsun, b.t.b)	Yapım Yılı : 2016 (Alawneh vd., 2018) Yapım Yeri : Dubai/BAE (Alawneh vd., 2018) Mimar/Tasarımcı : Gensler İşlev : Ofis binası İnşaat Alanı : 250 m ² (Winsun, 2020b) İnşaat Süresi : 19 gün (Winsun, b.t.b), her modülün baskı süresi 12 saat (Alawneh vd., 2018)	
		Üretici: Winsun Yapım Şekli: Fabrikada yapım EÜ Teknolojisi: Winsun 3D Printer (Alawneh vd., 2018) EÜ Mekanizması Çeşidi: Robotik kol Baskı Malzemesi: Beton (Alawneh vd., 2018) EÜ Ölçeği: Yapı elemanı (Duvar, zemin döşemesi ve çatıyı kapsayan U modüller)	
EÜ Teknolojisi	 (Alawneh vd., 2018)  (Alawneh vd., 2018)		
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı		- Yapı, fabrikada üretilen modüllerden inşa edilmiştir. - EÜ ile üretilen modüllerde aynı zamanda demir donatı kullanılarak daha dayanıklı, dolayısıyla uzun ömürlü yapı üretilmiştir. - Yapım sistemi betonarme olmasına rağmen kalıba ihtiyaç duyulmamıştır.
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı	+	
	Yeniden Kullanım		
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon	+	
	Modüler Koordinasyon	+	
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik		

EÜ teknolojileri ile üretilmiş Dünya'nın ilk ofis binası ünvanını taşıyan yapı mekânsal olarak 4'ü birbirine bağlı, 2'si bağımsız olan toplam 6 adet bloktan oluşmaktadır (Şekil 4. 6). Temeli konvansiyonel yapım sistemiyle inşa edilen yapının blokları için ise yerinde montajı sağlanan toplam 17 adet modül EÜ ile fabrikada üretilmiş ve Çin'den deniz yolu ile Dubai'ye nakledilmiştir (Alawneh, Matarneh ve El-Ashri, 2018). Dubai Ofis Binası'nın inşa süreci şematik olarak Şekil 4. 7'da gösterilmiştir.

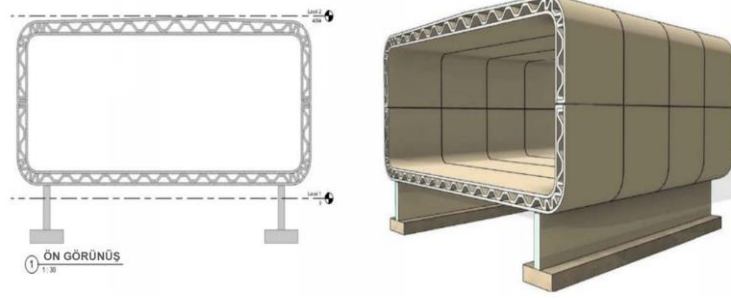


Şekil 4. 6 Vaziyet planı üzerinde gösterilen 6 adet blok (Alawneh vd., 2018) (Yazar tarafından yorumlanmıştır.)



Şekil 4. 7 Modülün EÜ aşaması (a), EÜ sırasında demir donatının manuel olarak eklenmesi (b), modüllerin nakliyesi (c) ve yerinde montajı (d) (Alawneh vd., 2018)

“U” formunda üretilen 4 çeşit modülün (Şekil 4. 8) en büyük olanı 8,1x2,1x2,1 m boyutlarındadır (Alawneh vd., 2018). Bu boyutlar Winsun'ın EÜ teknolojisinin kapasitesi ve nakliye için alan kapasitesine göre belirlenmiştir (Alawneh vd., 2018). Kullanılan 3B yazıcı 6 m yüksekliğinde, 10 m genişliğinde ve 40 m uzunluğundadır (Hager vd., 2016, Alawneh vd., 2018).



Şekil 4. 8 Monte edilmiş modüllerin görünüşleri (Alawneh vd., 2018)

Kafes kiriş sistem olarak tasarlanan beton modüllerin çekme dayanımını artırmak üzere EÜ sırasında nervürlü demirden üretilen ve önceden kaynaklanmış kafes kirişler manuel olarak yerleştirilmiştir (Şekil 4. 9) (Alawneh vd., 2018). Üretilen modüller, inşaat gerçekleştirilmeden önce geçilen açıklığa ağırlık yerleştirilerek test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda strüktürel dayanımın teorik olarak hesaplanan dayanıma kıyasla daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır (Alawneh vd., 2018). Bunun sonucunda üst modüle enine ardgerme yapılmış ve alt modülün açıklık uzunluğunu azaltmak adına iki sürekli temel eklenmiştir (Alawneh vd., 2018). Yapı, bu strüktürel kararlar doğrultusunda Şekil 4. 10'da gösterildiği gibi inşa edilmiştir. Montaj sırasında modüller arasındaki bağlantı modüllerin baskı boşlukları içinden geçirilen boyuna ardgerme elemanları ve çimentolu harç ile, modüller ve temel arasındaki bağlantı ise dübeller ve çimentolu harç ile sağlanmıştır.



Şekil 4. 9 Demir kafes kirişler (Alawneh vd., 2018)



Şekil 4. 10 Dubai Ofis Binası'nın kaba inşaatı (Alawneh vd., 2018)

Winsun Firması inşa ettiği bu örnek ile EÜ ile modüler koordinasyon sağlanabileceğini göstermiştir. Modüler koordinasyon stratejisinin benimsenmesi zamandan, iş gücünden ve maliyetten tasarruf sağlanmıştır. Bu yapı örneğinde aynı zamanda demir donatının (konvansiyonel malzeme) EÜ ile üretilmiş modüllerle bütünleştirilmesi yapının dayanımı artırılmış dolayısıyla yapı ömrü uzatılmıştır. Yapı ömrünün uzaması sonucunda birim zamanda gerekli inşaat azalacağından sürdürülebilirlik sağlanır.

4.4 Gaia Evi

Gaia evi WASP (World's Advanced Saving Project) EÜ Firması'nın Crane Wasp teknolojisi ile inşa ettiği ilk yapıdır. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4. 4 Gaia Evi özet tablosu

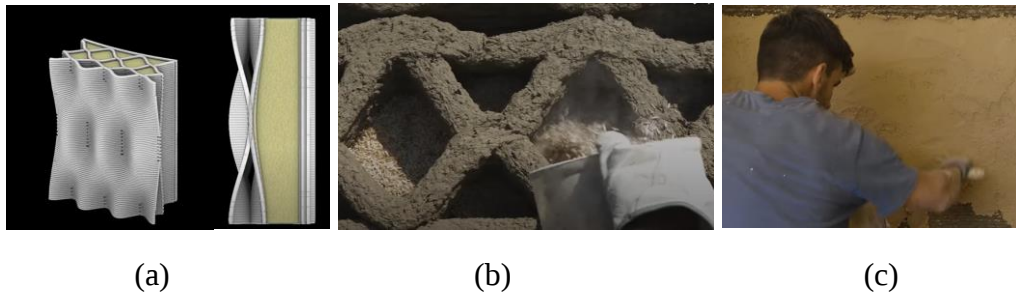
GAIA EVİ			
Künye	 (Chiusoli, 2018)	Yapım Yılı : 2018 (Chiusoli, 2018) Yapım Yeri : Massa Lombarda/İtalya (Chiusoli, 2018) Mimar/Tasarımcı : WASP İşlev : Konut İnşaat Alanı : 20 m ² (Chiusoli, 2018) İnşaat Süresi : 10 gün (Chiusoli, 2018)	
		Üretici: WASP (World's Advanced Saving Project) Yapım Şekli: Yerinde Yapım EÜ Teknolojisi: Crane Wasp (Chiusoli, 2018) EÜ Mekanizması Çeşidi: Kablo destekli vinç Baskı Malzemesi: Ham toprak, saman, pirinç kabuğu, kireç (Chiusoli, 2018) EÜ Ölçeği: Yapı (Duvarlar ve temel)	
EÜ Teknolojisi	 (3D WASP, 2018)  (3D WASP, 2018)		
			
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	+	• AYM olarak toprak kökenli baskı malzemesi kullanılmıştır. • Yerel malzeme kullanılmıştır. • Temel yapımında da EÜ kullanılarak daha az beton ve kalıp kullanılmıştır.
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı		
	Yeniden Kullanım	+	
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon		
	Modüler Koordinasyon		
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik		

Gaia Evi'nin temel ve duvar yapımı WASP firmasının Crane Wasp EÜ teknolojisi gerçekleştirilmiştir. EÜ teknolojisinin temel yapımında kullanılması temel için gerekli beton ihtiyacını azalmıştır (3D WASP, 2018). Ayrıca EÜ ile beton dökümü için kalıp ihtiyacı ortadan kaldırılarak etkin malzeme kullanımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 4. 11).



Şekil 4. 11 Gaia evi temel yapımı (3D WASP, 2018)

Duvar yapımı için baskı malzemesi, %25 yerel toprak (%30'u kil, %40'ı silt ve %30'u kum olan), %40 kıyılmış pirinç samanı, %25 pirinç kabuğu ve %10 kireç içeren karışım ıslak tava değirmeninde öğütülerek oluşturulmuştur (3D WASP, 2018). Yerel malzemelerin kullanılmış olması transfer ve hammadde ihtiyacını ortadan kaldırarak yapının çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik özelliklerini ön plana çıkarmıştır. Dünya'da büyük doğal atık kaynağı olan pirinç kabuğu aynı zamanda duvar boşluklarında ısı yalıtımını sağlamak ve doğal havalandırma sisteminin önüne geçmemek üzere ve sıva karışımında kullanılmıştır (Şekil 4. 12) (Chiusoli, 2018). Söz konusu doğal havalandırma sistemi duvarların Şekil 4. 12 a'da gösterildiği gibi eğrisel yüzey katmanları (düşey doğrultuda) halinde basılarak oluşturulmuştur. Yapının çatısı ise konvansiyonel yapım sistemiyle ahşap dikme ve kirişlerden inşa edilmiştir.



Şekil 4. 12 Doğal havalandırma sistemi (a), ve doğal atık kaynağı olan pirinç kabuğunun Gaia Evi'nde kullanımı (3D WASP, 2018)

4.5 3BB Konut Topluluğu

3BB Konut Topluluğu ICON Firması tarafından EÜ ile inşa edilmiştir. Bu konutlara ait bilgiler Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4. 5 3BB Konut Topluluğu özet tablosu

3BB KONUT TOPLULUĞU			
Künye	 (New Story, 2019)	Yapım Yılı : 2019 (Bauguess, 2019) Yapım Yeri : Nacajuca/Tobasco/Meksika (Bauguess, 2019) Mimar/Tasarımcı : ICON (Bauguess, 2019) İşlev : Konut İnşaat Alanı : 46,5 m ² (Bauguess, 2019) İnşaat Süresi : 24 saat (Bauguess, 2019)	
	 (New Story, 2022)  (Regan Morton, 2019)	Üretici: ICON Yapım Şekli: Yerinde yapım EÜ Teknolojisi: Vulcan II (Bauguess, 2019) EÜ Mekanizması Çeşidi: Portal vinç Baskı Malzemesi: Özelleştirilmiş beton EÜ Ölçeği: Yapı (Duvarlar)	
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı		- Sosyo-ekonomik açıdan sürdürülebilir olması hedeflenmiştir. - Gelir düzeyi düşük, evi olmayan ailelerin barındırılması hedeflenmiştir.
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı		
	Yeniden Kullanım		
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon		
	Modüler Koordinasyon		
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik	+	

Aşırı yoksulluk içindeki veya evsiz topluluklara konut çözümleri sağlamaya odaklanan ve kar amacı gütmeyen bir kuruluş olan New Story, Meksika'nın Tabasco eyaletine bağlı Nacajuca kentinde farklı inşaat teknikleri ile 100 adet konut inşa etmiştir (Kamin, 2021). Bu konutlardan 10'u 3BB firması olan ICON tarafından basılmıştır (Şekil 4. 13) (Bauguess, 2019). Her biri 46,5 m² olan konutlar, birkaç gün süren 24 saatlik bir baskı süreci ile hızlı ve pratik çözüm olarak hayata geçirilmiştir (Şekil 4. 14) (Bauguess, 2019). Her biri mutfak da içinde olduğu yaşam alanı, banyo ve iki odadan oluşan konutlar, kullanıcılardan alınan görüşler doğrultusunda tasarlanmıştır (New Story, 2019).



Şekil 4. 13 New Story tarafından inşa edilen konut topluluğu (New Story, 2022)



(a)



(b)

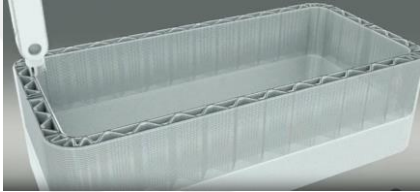
Şekil 4. 14 Evlerin yerinde EÜ süreci (a) (ICON, b.t.b), tamamlanmış hali (b) (Cegarra, 2021)

3BB Konut Topluluğu'nun sosyal sürdürülebilirliğe katkılarının yanı sıra depreme dayanıklılığı, 7,4 büyüklüğündeki Meksika depremine dayanması ile kanıtlanmıştır (Kamin, 2019). Bu konutlar ekonomik, dayanıklı ve hızlı inşa edilebilir özellikleriyle sürdürülebilirlikte ön plana çıkmaktadır.

4.6 İzolasyon Konutları

İzolasyon Konutları Winsun Firması tarafından Covid-19 Pandemisi sürecinde EÜ ile inşa edilmiştir. Bu konutlara ait bilgiler Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4. 6 İzolasyon Konutları özet tablosu

İZOLASYON KONUTLARI		
Künye	 (Winsun, 2020a)	Yapım Yılı : 2020 Yapım Yeri : Xianning/Çin (Carlota, 2020) Mimar/Tasarımcı : Winsun (Winsun, 2020a) İşlev : İzolasyon konutu (Winsun, 2020a) İnşaat Alanı : 10 m² (Winsun, 2020a) İnşaat Süresi : 2 saat (Carlota, 2020)
EÜ Teknolojisi	 (Winsun, 2020a)  (Winsun, 2020a)	Üretici : Winsun Yapım Şekli: Fabrikada yapım EÜ Teknolojisi: Winsun 3D Printer EÜ Mekanizması Çeşidi: Robotik kol (Carlota, 2020) Baskı Malzemesi: Beton, moloz EÜ Ölçeği: Yapı (Duvarlar, zemin Döşemesi ve çatı)
		
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	+
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı	
	Yeniden Kullanım	+
	Etkin Malzeme Kullanımı	+
	Prefabrikasyon	+
	Modüler Koordinasyon	
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+
	Sosyal Sürdürülebilirlik	+
- Pandemi için acil gerekli olan izolasyon konutu ihtiyacı karşılanmıştır. - Baskı malzemesi karışımında atık malzemeler kullanılmıştır.		

Çin'in Xianning kentinde bir hastanenin yakınına konumlandırılan İzolasyon Konutları'nın temel amacı korona virüse yakalanan hastaların sosyal çevreden izole olmasını sağlayarak pandeminin önüne geçmektir (3Dnatives, 2020). Her biri 10 m² ve 3,8x2,3x2,8 m boyutlarında olan ve 2 kişinin barınma ihtiyacını karşılayabilen bu konutlar (Şekil 4. 15) Winsun Firması'nın EÜ teknolojisi sayesinde 2 saatte basılmıştır (Carlota, 2020). 24 saat içerisinde 15 adet izolasyon konutu üretilmiştir (Carlota, 2020). Konutlar prefabrikasyon yöntemi ile üretilerek zamandan ve iş gücünden tasarruf sağlanmıştır. Winsun'ın EÜ teknolojisi hızlı inşa etme kabiliyeti sayesinde Covid-19 Pandemisi için acil çözüm olarak bu İzolasyon Konutları'nı üreterek sosyal sürdürülebilirliğe katkıda bulunmuştur. Bunun yanı sıra üretilen bu birimler diğer afetler söz konusu olduğunda da başarılı bir şekilde hızlı geçici barınma çözümü üretme potansiyeline sahiptir. Ayrıca bir kabuk sistem şeklinde üretilen ve iki cephesi ayarlanabilir olan birimler (Şekil 4. 16) birer modül olarak kullanılarak daha büyük mekan oluşturmak üzere birleştirilebilmektedir.



Şekil 4. 15 İzolasyon konutunun dış ve iç görünüşleri (Winsun, 2020a)



Şekil 4. 16 Farklı cephe tasarımına sahip birimler (Winsun, 2020a)

Bu proje kapsamında atık malzeme olan moloz baskı malzemesi karışımında kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda alternatif yapı malzemesi kullanımı gerçekleştirilmiş böylelikle hem çevresel hem sosyal sürdürülebilirlik sağlanmıştır. Kullanılan baskı malzemesi aynı zamanda geri dönüştürülebilir özelliktedir (Winsun, 2020a).

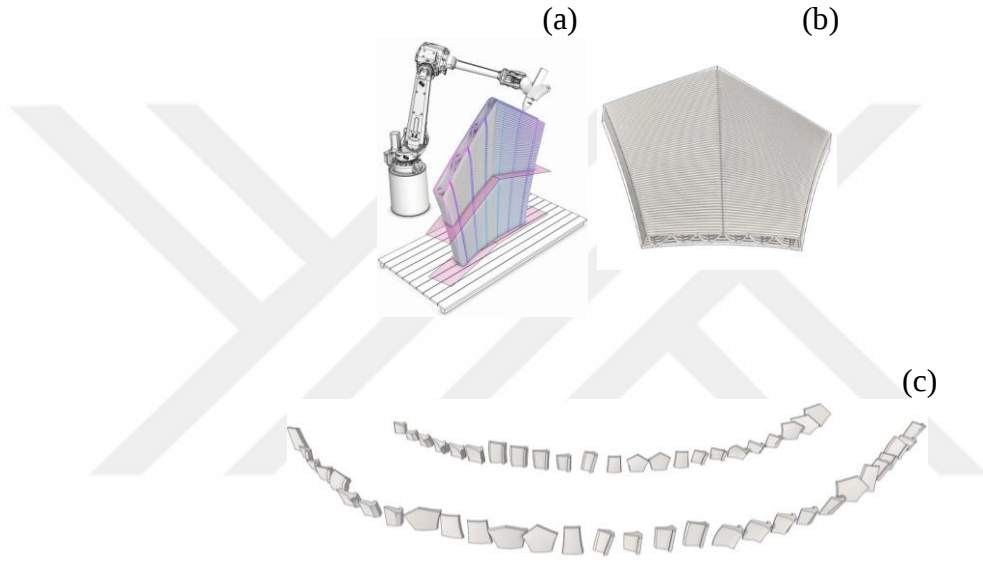
4.7 Striatus Köprüsü

Zaha Hadid Architects ve Zürich Federal Teknoloji Enstitüsü'nden bir grup araştırmacının tasarladığı Striatus Köprüsü Holcim ve Incremental3D Firması tarafından inşa edilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4. 7 Striatus Köprüsü özet tablosu

STRIATUS KÖPRÜSÜ			
Künye	 (NAARO, b.t.)	Yapım Yılı : 2021 (BRG, b.t.a) Yapım Yeri : Venedik/İtalya (BRG, b.t.a) Mimar/Tasarımcı : ETH Zurich Block Research Group (BRG), Zaha Hadid Architects Computation and Design Research Group (ZHACODE) (BRG, b.t.a) İşlev : Yaya Köprüsü, Üst Örtü Boyutları : 16,6 *11,4 m Yükseklik: 3,5 m (Bhooshan, 2022) İnşaat Süresi : -	
		Üretici: Holcim ve Incremental3D Yapım Şekli: Fabrikada Üretim, Yerinde Montaj EÜ Teknolojisi: 3B Beton Baskı EÜ Mekanizması Çeşidi: 6 Eksenli Robotik Kol (BRG, b.t.a) Baskı Malzemesi: Geri dönüştürülebilir beton EÜ Ölçeği: Yapı Bileşeni (Döşeme blokları) 	
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı		- Minimum malzeme ile maksimum dayanım elde edilmiştir. - Bu yapı için özel tasarlanan geri dönüştürülebilir malzeme kullanılmıştır. - Geleneksel kemer sistemi ile EÜ harmanlanarak etkin yapı sistemi geliştirilmiştir.
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı	+	
	Yeniden Kullanım		
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon	+	
	Modüler Koordinasyon		
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik		

BRG ve ZHACODE'nin tasarladığı Striatu Köprüsü Holcim ve Incremental3D firmaları tarafından Venedik Mimarlık Bienali sırasında inşa edildi (Dell'Endice vd., 2023). Köprü'nün en önemli özelliği 3BB ile üretilen beton bloklarının kemer ve tonozun çalışma prensibine (donatısız yığma sistem) dayanarak donatıya ihtiyaç duyulmadan bir arada durmasıdır. 16 m açıklık geçen bu köprü EÜ teknolojisi ile zemin ve korkuluk olmak üzere temel 2 çeşit olarak üretilen 53 adet beton bloktan oluşmaktadır (Dell'Endice vd., 2023). Her blok 6 eksenli robotik kol ile fabrikada basılıp (Şekil 4. 17) montaj için şantiye alanına nakledilmiştir (Şekil 4. 18).



Şekil 4. 17 Beton blokların eklemeli üretimi (a) bir çeşit blok (b) 53 adet blok (c) (Block Research group, 2021d)



Şekil 4. 18 Blokların nakliyesi (Block Research group, 2021b; Block Research group, 2021c)

Yerinde montaj yapmak üzere öncelikle köprü'nün zemine bastığı noktalarda çelik temel elemanların yerleştirileceği betonarme kaideler ve kaide üzerine oturan 5 adet çelik temel ayak inşa edilmiştir. Şekil 4. 19 a'da kalıp betonarme kaide için oluşturulmuş kalıp ve kaide üzerine monte edilecek olan çelik temel elemanlarının bağlantısını yapmak üzere yerleştirilen zemin vidaları gösterilmiştir. Bu çelik

ayakların dışa doğru kayma olasılığını azaltmak için geçici germe elamanları kullanılmıştır (Şekil 4. 19 b) (Dell’Endice vd., 2023). Daha sonra geçici çelik ve ahşap iskele kurulup bloklar, arasında herhangi bir yapıştırıcı malzeme veya donatı kullanılmadan sadece kauçuk malzeme yerleştirilerek kurulum yapılmıştır (Şekil 4. 20).



Şekil 4. 19 Betonarme kaide için hazırlanan kalıp (a) (Dell’Endice vd., 2023) germe elemanları (b) (Dell’Endice vd., 2023)



Şekil 4. 20 Çelik ve ahşap iskele (Dell’Endice vd., 2023)

Blokların boşluklu yapısı (Şekil 4. 21) ve donatısız bir araya gelmesi sayesinde etkin malzeme kullanımı gerçekleştirilmesinin yanı sıra kullanılan baskı malzemesinin tamamen geri dönüştürülebilir olarak tasarlanmasıyla yeniden kullanıma olanak tanınmıştır.



Şekil 4. 21 3BB beton blokların boşluklu yapısı (Block Research group, 2021a)

4.8 Tecla

Mario Cucinella Architects tarafından tasarlanan Tecla konut projesi WASP (World's Advanced Saving Project) EÜ Firması'nın Crane Wasp teknolojisi ile inşa edilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4. 8 Tecla özet tablosu

TECLA			
Künye	 (WASP Press Office, b.t.)	Yapım Yılı : 2021 (Martinez Aragay, 2023) Yapım Yeri : Massa Lombarda/İtalya (Martinez Aragay, 2023) Mimar/Tasarımcı : Mario Cucinella Architects, WASP (WASP Press Office, 2021) İşlev : Konut İnşaat Alanı : 60 m² (Martinez Aragay, 2023) İnşaat Süresi : 200 saat (WASP Press Office, b.t.)	
		Üretici : WASP Yapım Şekli: Yerinde Yapım EÜ Teknolojisi: Crane Wasp (WASP Press Office, b.t.) EÜ Mekanizması Çeşidi: 2 adet kablo destekli vinç Baskı Malzemesi: Toprak, silika kumu, pirinç kabuğu (WASP Press Office, b.t.) EÜ Ölçeği: Yapı (Duvarlar ve çatı)	
EÜ Teknolojisi	 (WASP Press Office, b.t.)  (WASP Press Office, b.t.)		
			
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	+	• AYM olarak toprak kökenli baskı malzemesi kullanılmıştır. • Yerel malzeme kullanılmıştır.
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı		
	Yeniden Kullanım	+	
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon		
	Modüler Koordinasyon		
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik		

İsmi “teknoloji” (technology) ve “kil”in (clay) ilk harflerinden oluşan Tecla projesi bir sosyal yaşam habitatu olarak tasarlanmıştır. Geri kalanını ileri tarihte tamamlamak üzere ilk etapta silindirik koordinat sistemine sahip iki adet vinç ile iki ana mekândan oluşan kubbeye benzer bir konut yapısı (Şekil 4. 22) inşa edilmiştir (WASP Press Office, b.t.).

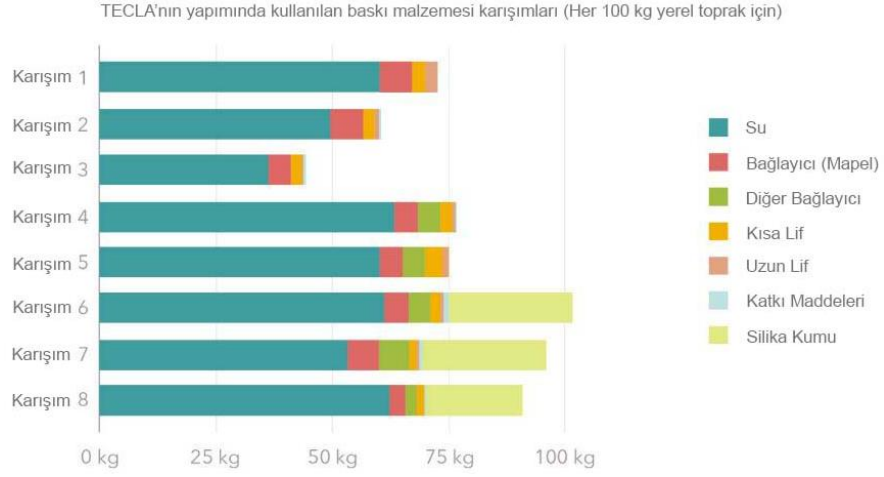


(a)

(b)

Şekil 4. 22 Tecla’nın dış (a) ve iç mekân (b) görüntüsü (Parkes, 2021)

Temel baskı malzemesi olarak inşaat sahasına yakın yerden elde edilen kil kullanılmıştır (WASP Press Office, b.t.). Baskı yüksekliği, kesit ve ortam koşulları değiştikçe kullanılmak üzere farklı karışım oranlarına sahip 8 baskı malzemesi hazırlanmıştır (Şekil 4. 23). %51-58 oranında kullanılan kil malzemesine ek olarak %28-35 oranında su, %12 oranında silika kumu, %1 oranında agrega (pirinç kabuğu) ve %1 oranında basılabilirliği, sağlamlığı, plastikliği ve katmanlar arası bağı geliştiren katkı maddeleri kullanılmıştır (Martinez Aragay, 2023).



Şekil 4. 23 Tecla'nın yapımında kullanılan baskı malzemesi karışımları (Martinez Aragay, 2023)

Tecla projesinde yerel malzemenin kullanılması malzeme transferi gerekliliğini ortadan kaldırarak hem maliyet hem de karbondioksit salınımı açısından sürdürülebilir katkıları olmuştur. Baskı malzemesi olarak toprak kökenli malzemenin kullanılması da geri dönüştürülebilirlik açısından faydalı olup çevreci bir çözüm ortaya konmuştur. WASP'ın benimsediği bu yaklaşım, endüstriyel atıkları sınırlayacak ve ulusal ve yerel ekonomiyi güçlendirecek, toplulukların refahını artıracak bir sürdürülebilir model sunmaktadır.

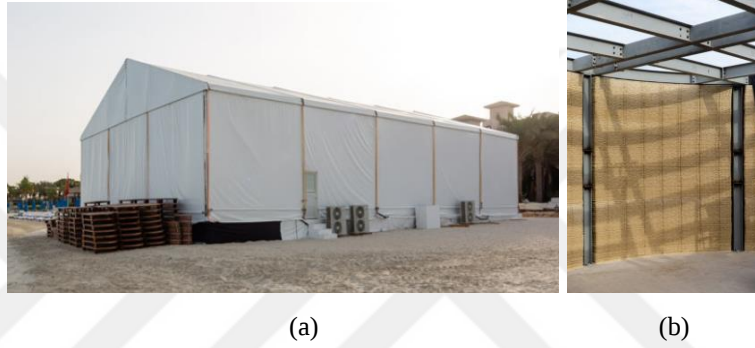
4.9 Dior Mağazası

Dior Mağazası WASP (World's Advanced Saving Project) EÜ Firması tarafından Crane Wasp teknolojisi ile geçici bir yapı olarak inşa edilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4. 9 Dior Mağazası özet tablosu

DIOR MAĞAZASI		
Künye		Yapım Yılı : 2021 (Morretti, 2021) Yapım Yeri : Dubai/BAE (Morretti, 2021) Mimar/Tasarımcı : WASP (Morretti, 2021) İşlev : Giyim Mağazası (Morretti, 2021) İnşaat Alanı : - İnşaat Süresi : 120 saat (Mikahila, 2021)
	(Morretti, 2021)	
EÜ Teknolojisi		Üretici: WASP (World's Advanced Saving Project) Yapım Şekli: Yerinde Yapım EÜ Teknolojisi: Crane Wasp (Morretti, 2021) EÜ Mekanizması Çeşidi: 2 adet kablo destekli vinç Baskı Malzemesi: Ham toprak, kum, pirinç kabuğu ve saman (Christian Dior, 2021) EÜ Ölçeği: Yapı (Duvarlar)
		
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	+
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı	
Yeniden Kullanım	Yeniden Kullanım	+
	Etkin Malzeme Kullanımı	+
Prefabrikasyon	Prefabrikasyon	
	Modüler Koordinasyon	
Ekonomik Sürdürülebilirlik	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+
	Sosyal Sürdürülebilirlik	
• AYM olarak toprak kökenli baskı malzemesi kullanılmıştır. • Yerel malzeme kullanılmıştır.		

Dior Mağazası, Dior Firması'nın özel giyim koleksiyonunun sergisini ve satışını gerçekleştirmek üzere Dubai'nin Jumeirah Sahili'nde bir platform üzerine inşa edilmiştir (Mikahila, 2021). İnşaat alanı, baskı sürecinin dış hava koşullarından etkilenmemesi için geçici bir çelik çerçeve sistem ve membran ile kapatılmıştır (Şekil 4. 24 a). Toplam 80 m² yüzey alanına sahip duvarları (Mikahila, 2021) EÜ ile inşa edilen yapının çatısı konvansiyonel yapım sistemi ile çelik ve cam malzemeden inşa edilmiştir. Çatıyı taşıyan çelik dikmeler EÜ ile inşa edilmiş duvarlarda oluşturulan nişlere yerleştirilmiştir (Şekil 4. 24 b). Böylece iç mekânda daha net bir dairesel alan oluşturularak kullanım rahatlığı sağlanmıştır.



Şekil 4. 24 Dior Mağazası'nın duvar baskısı için kurulan örtü sistemi (a) (Moretti, 2021) 3BB duvar nişlerine yerleştirilen çelik dikmeler (b) (Moretti, 2021)

Dairesel forma sahip iki adet mağaza biriminin duvarları EÜ ile tamamen doğal malzemeden üretilmiştir. Alternatif yapı malzemesi olarak yerel ham toprak, kum, pirinç kabuğu ve saman kullanılarak hazırlanan baskı malzemesi (Christian Dior, 2021) (Şekil 4. 25) sayesinde hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik sağlanmıştır. Malzemelerin yakın çevreden tedarik edilmesi transfer gerekliliğini ortadan kaldırarak ekonomik ve çevresel açıdan faydalı olmuştur. Bunun yanı sıra atık ürün olan pirinç kabuğu kullanılarak yeniden kullanım gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 25 Dior Mağazası'nın üretiminde kullanılan malzeme (Christian Dior, 2021)

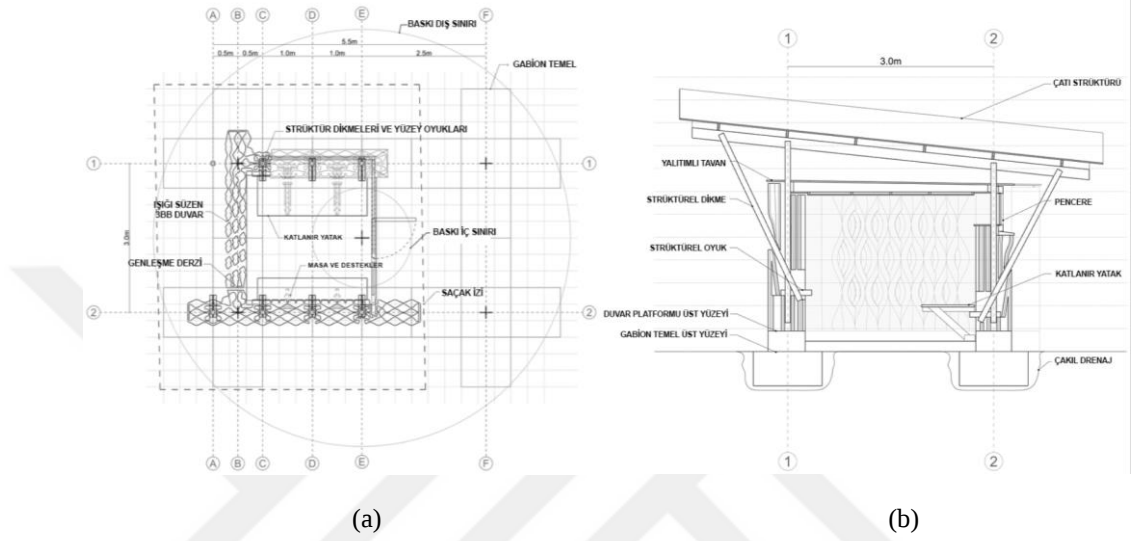
4.10 Tova

Tova Katalonya İleri Mimarlık Enstitüsü (Institute of Advanced Architecture of Catalonia: IAAC) ve WASP (World's Advanced Saving Project) EÜ Firması işbirliği ile inşa edilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4. 10 Tova özet tablosu

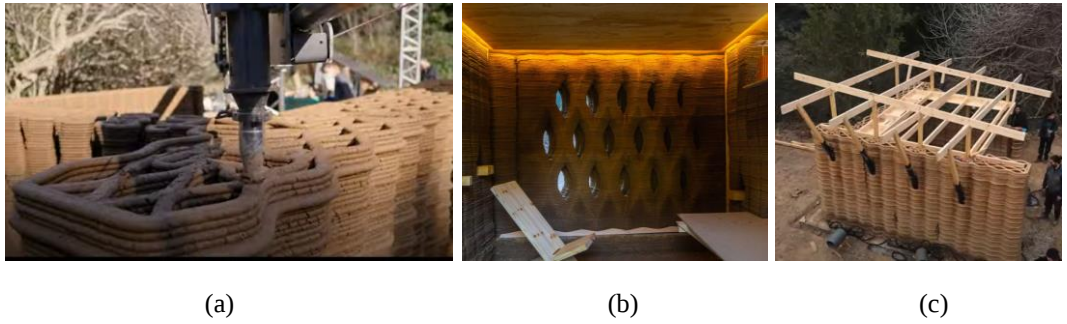
TOVA		
Künye	 (Severi, 2022)	Yapım Yılı : 2022 (Severi, 2022) Yapım Yeri : Barselona/İspanya (Severi, 2022) Mimar/Tasarımcı : IAAC (Severi, 2022) İşlev : Konut prototipi (Severi, 2022) İnşaat Alanı : 9 m ² (Coulleri, 2022) İnşaat Süresi : 7 hafta (Chadha, 2024)
EÜ Teknolojisi	 (IAAC, 2022)  (IAAC, 2022)	Üretici: WASP (World's Advanced Saving Project) Yapım Şekli: Yerinde Yapım EÜ Teknolojisi: Crane Wasp (Morretti, 2021) EÜ Mekanizması Çeşidi: Kablo destekli vinç Baskı Malzemesi: Toprak, ağaç lifi, yumurta akı (Severi, 2022) EÜ Ölçeği: Yapı (Duvarlar) 
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	+
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı	
	Yeniden Kullanım	+
	Etkin Malzeme Kullanımı	+
	Prefabrikasyon	
	Modüler Koordinasyon	
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+
	Sosyal Sürdürülebilirlik	
- AYM olarak toprak kökenli baskı malzemesi kullanılmıştır. - Yerel malzeme kullanılmıştır.		

İspanya'nın EÜ ile üretilmiş ilk yapısı olan Tova, yapım süreçlerinde salınan CO₂ miktarını azalmak üzere tek mekândan oluşan bir konut prototipi olarak inşa edilmiştir (IAAC, 2022). Yapının duvarları EÜ ile inşa edilirken temel ve çatısı sürdürülebilirlik ilkeleri gözetilerek konvansiyonel yapım sistemiyle inşa edilmiştir (Şekil 4. 26).



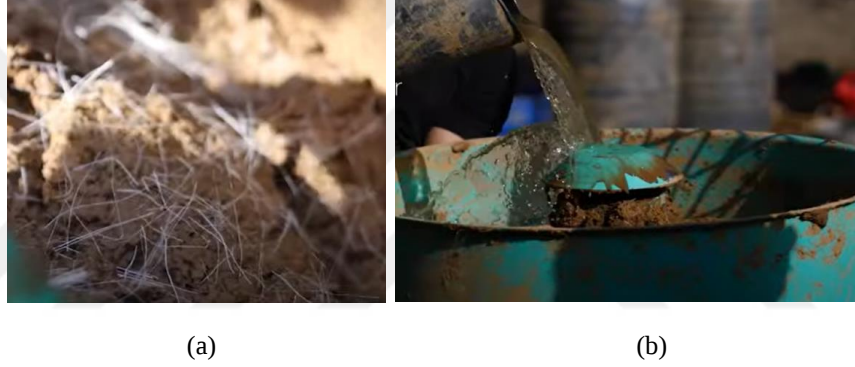
Şekil 4. 26 Tova plan (a) ve kesiti (b) (Coulleri, 2022)

Tova'nın 3BB duvarlarının eğrisel tasarımı (Şekil 4. 27 a) sayesinde doğal havalandırma sağlanmakla birlikte duvarlarda oluşturulan açıklıklar (Şekil 4. 27 b) iç mekânda gün ışığından yararlanmayı sağlamaktadır. WASP'ın inşa ettiği diğer yapılardan farklı olarak bu projede çatı strüktürüne ait dikmeler direkt temele indirilmek yerine duvarda baskı sırasında oluşturulan oyuklara oturtularak çatı, EÜ ile üretilmiş duvarlara taşınmıştır (Şekil 4. 27 c).



Şekil 4. 27 Eğrisel yüzeyli 3BB duvar (a) (IAAC, 2022), duvardaki açıklıklar (b) (Civera ve Harrak, 2022), duvardaki oyuklara oturtulan çatı strüktürü (c) (Hendrik Benz, 2022)

Yapının duvarlarını inşa etmek üzere optimize edilen baskı malzemesi için toprak inşaat alanının 50 m yarıçaplı çevresinden elde edilerek (Severi, 2022) transfer için gerekli olan enerji ve maliyetten tasarruf sağlanmıştır. Kullanılan ana malzemenin toprak olması ise yapı ömrünü tamamladığında malzemenin geri dönüştürülebilmesini kolaylaştırmıştır. Bunun yanı sıra yapının ömrünü ve hava koşullarına dayanıklılığını artırmak için baskı malzemesinde yumurta akı kullanılarak su geçirmez malzeme elde edilmiş (Chadha, 2024) ve yapının strüktürel ve elastik performansını artırmak üzere sabır ağacı lifleri ve enzim katkılı su kullanılmıştır (Şekil 4. 28) (IAAC, 2022). Sıfıra yakın salınım ve atıktan sorumlu Tova'nın karbon ayak izi yapı elemanlarının yaşam döngüsü göz önünde bulundurularak dijital ve fiziksel simülasyonlar ile test edilmiştir (Chadha, 2024).



Şekil 4. 28 Tova duvar baskısında kullanılan sabır ağacı lifi (a) ve enzim katkılı su (b) (IAAC, 2022)

4.11 Biohome3D

Biohome3D, Maine Üniversitesi İleri Yapılar ve Kompozit Merkezi ile Ingersoll Machine Tools EÜ Firması işbirliği ile inşa edilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4. 11 Biohome3D özet tablosu

BIOHOME3D			
Künye	 (Revitt, 2022)	Yapım Yılı : 2021 (Revitt, 2022) Yapım Yeri : Orono/Maine/ ABD Mimar/Tasarımcı : Maine Üniversitesi İleri Yapılar ve Kompozit Merkezi (ASCC) (Revitt, 2022) İşlev : Konut İnşaat Alanı : 55,7 m² (Revitt, 2022) İnşaat Süresi : Yarım gün (Revitt, 2022)	
EÜ Teknolojisi	 (Ingersoll Machine Tools, 2022)  (CNET, 2023)	Üretici: Ingersoll Machine Tools Yapım Şekli: Fabrikada Üretim (Ingersoll Machine Tools, 2022) EÜ Teknolojisi: MasterPrint 3X EÜ Mekanizması Çeşidi: Portal Vinç Baskı Malzemesi: Atık ahşap, biyoreçine (Maine Monitor, 2023) EÜ Ölçeği: Yapı (Duvarlar, zemin döşemesi ve çatıyı kapsayan modüller) 	
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	+	- Atık ahşap ve biyoreçine AYM olarak kullanılmıştır. - Geri dönüştürülebilir malzeme kullanılmıştır. - Yapı modüller halinde fabrikada üretilip yerinde monte edilmiştir..
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı		
	Yeniden Kullanım	+	
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon	+	
	Modüler Koordinasyon	+	
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik		

Maine Üniversitesi, Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı, MaineHousing ve Maine Teknoloji Enstitüsü işbirliği ve ABD Enerji Bakanlığı'nın "Hub and Spoke" programı kapsamında finansal desteği ile gerçekleştirilen Biohome3D projesi %100 geri dönüştürülebilir malzemeyle basılan ilk yapı olarak karşımıza çıkmaktadır (Revitt, 2022) (Şekil 4. 29). Aynı zamanda konut sıkıntısı yaşanan Maine için de sosyal sürdürülebilirliğin önünü açmaktadır. Bir oda, bir açık mutfaklı salon ve bir banyodan oluşan konut, geleceğin çevresel ve sosyal problemlerine çözüm olabilecek bir prototip olarak Maine Üniversitesi'nin İleri Strüktürler ve Kompozitler Merkezi yakınlarına konumlandırılmak üzere üretilmiştir.



Şekil 4. 29 BioHome 3D projesi (Maine Monitor, 2023)

Baskı malzemesi olarak alternatif yapı malzemesi olan atık ahşap ve reçine kullanılarak geri dönüşüm ve yeniden kullanım gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra 4 modülden oluşan konut fabrikada üretilip yerinde yarım gün içerisinde (Revitt, 2022) monte edilmiştir (Şekil 4. 30). Böylelikle yapım sürecinde atık oluşumu minimuma indirilmiştir. Duvar, tavan ve zemin 3BB ile üretilerek maksimum verimle bütüncül bir yapı elde edilmiştir.

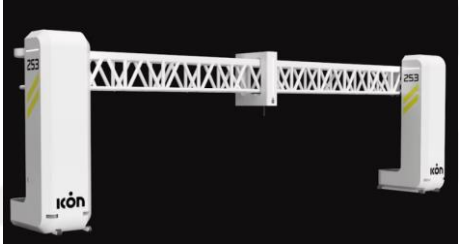


Şekil 4. 30 Fabrikada gerçekleştirilen baskı süreci (a) (Maine Monitor, 2023) basılan modüllerin yerinde monte edilmesi (b) (Maine Monitor, 2023)

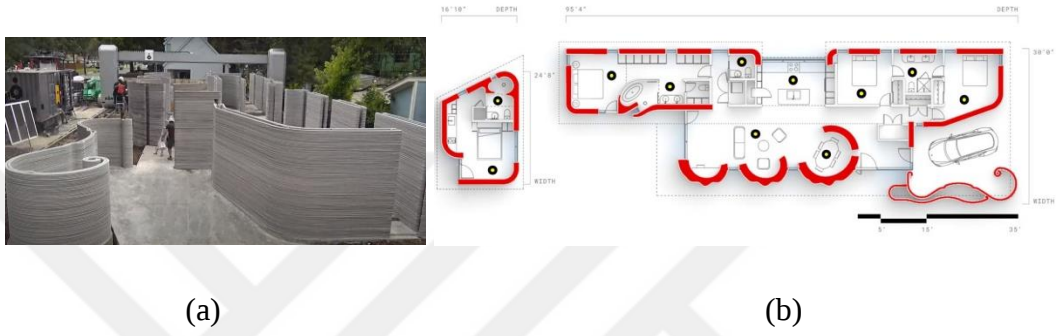
4.12 House Zero

Lake Plato ve San Anonio tarafından tasarlanan House Zero ICON Firması'nın Vulcan EÜ teknolojisi ile inşa edilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4. 12 House Zero özet tablosu

HOUSE ZERO			
Künye	 (ICON, b.t.a)	Yapım Yılı : 2022 (Carbonari vd., 2023) Yapım Yeri : Doğu Austin/Teksas/ABD (Carbonari vd., 2023) Mimar/Tasarımcı : Lake Flato (ICON, b.t.a), San Antonio (Dreith, 2022) İşlev : Konut İnşaat Alanı : 259,1 m ² (ICON, b.t.a) İnşaat Süresi : 8 gün (Jarett Gross, 2022)	
		Üretici : ICON Yapım Şekli : Yerinde Yapım EÜ Teknolojisi : Vulcan teknolojisi EÜ Mekanizması Çeşidi : Portal Vinç Baskı Malzemesi : Özelleştirilmiş beton, Lavacrete EÜ Ölçeği : Yapı (Duvarlar)	
EÜ Teknolojisi	 (ICON, b.t.a)  (ICON - 3D Tech, 2020)		
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı		- Konvansiyonel betonun özellikleri geliştirilerek basılabilir ve daha dayanıklı özel malzeme olan "Lavacrete" ile üretilmiştir. - Karmaşık geometrili yüzeyler ek maliyet ve çabaya gereksinim duyulmadan inşa edilmiştir.
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı	+	
	Yeniden Kullanım		
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon		
	Modüler Koordinasyon		
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik		

Lake Flato ve San Antonio tarafından tasarlanan House Zero projesi ICON firması tarafından 2022 yılında hayata geçirilmiştir. Bir salonu ve üç odası olan konutun bir de bağımsız misafir evi bulunmaktadır. Evin dış çeperinde bulunan duvarlar ICON'un Vulcan EÜ teknolojisi ile yerinde inşa edilmiştir (Şekil 4. 31). 3BB sayesinde duvarlarda eğrisel yüzeyler ek çabaya ve maliyete ihtiyaç duyulmadan kullanılarak estetik görüntüye ve iç mekânda işlevsel nişlere olanak tanınmıştır.



Şekil 4. 31 House Zero projesinin yapım aşaması (a) (ICON – 3D Tech, 2022), zemin kat planı ve 3BB duvarları (b) (ICON, b.t.a) (Yazar tarafından yorumlanmıştır.)

Vinç sistem mekanizması ile çalışan Vulcan teknolojisi firmanın patentini aldığı bir çeşit beton malzeme olan “Lavacrete”i baskı malzemesi olarak kullanmaktadır. Bu malzeme betona kıyasla daha dayanıklı (Jarett Gross, 2022) geçirimsiz ve ısı yalıtımlıdır (Baydil, 2022). EÜ konvansiyonel yapım sistemiyle bütünleşik kullanılarak daha etkili sonuca ulaşılmıştır. Dayanıklılığı artırmak amacıyla duvarlarda çelik donatı kullanılmasının yanı sıra iç duvarlar, çatı ve kirişler ahşaptan üretilmiştir (Dreith, 2022) (Şekil 4. 32). Bu yapı, konvansiyonel yapım sistemlerine göre daha düşük maliyetle ve daha kısa sürede inşa edilmiştir (Jarett Gross, 2022).

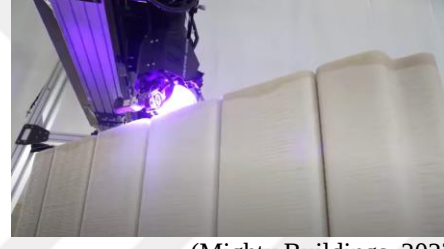
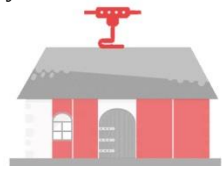


Şekil 4. 32 House Zero iç mekân görüntüsü (ICON, b.t.a)

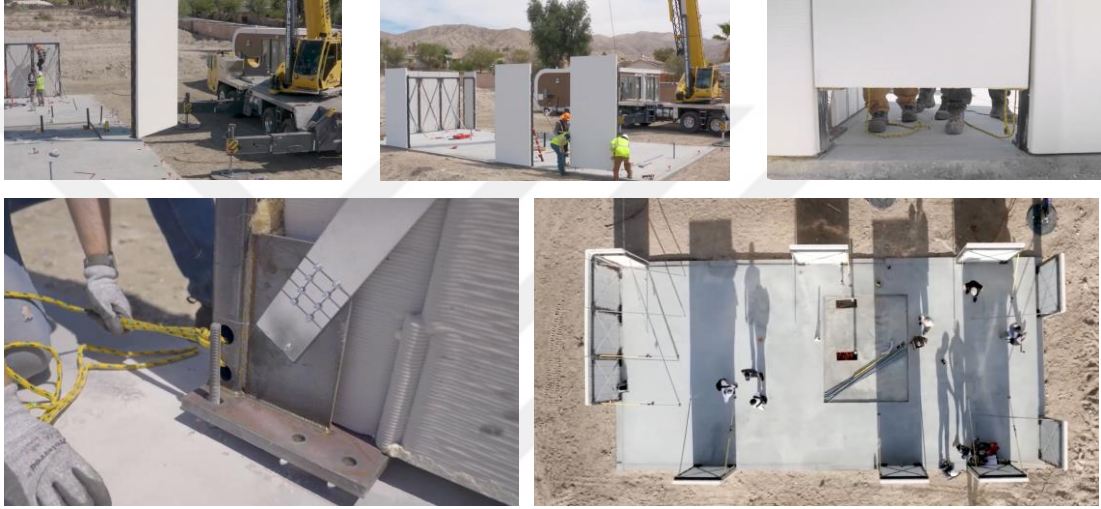
4.13 Mighty Ev

Mighty Ev Mighty Buildings tarafından EÜ ile inşa edilmiştir. Orijinal ismi “Mighty House” olan bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.13’te verilmiştir.

Tablo 4. 13 Mighty Ev özet tablosu

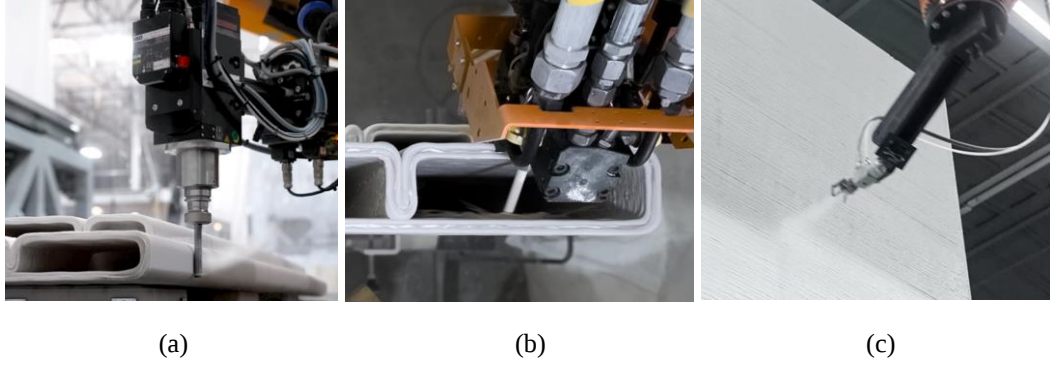
MIGHTY EV			
Künye	 (EYRC, b.t.)	Yapım Yılı : 2022 (Çamuşoğlu, 2023) Yapım Yeri : Palm Desert/Kaliforniya/ABD (EYRC, b.t.) Mimar/Tasarımcı : Ehrlich Yanai Rhee Chaney Architects (EYRC, b.t.) İşlev : Konut (EYRC, b.t.) İnşaat Alanı : 109 m ² (Mighty Buildings, b.t.a) İnşaat Süresi : -	
EÜ Teknolojisi	 (Mighty Buildings, 2023)  (Mighty Buildings, b.t.a)	Üretici: Mighty Buildings Yapım Şekli: Fabrikada yapım EÜ Teknolojisi: UV ışınları ile malzemeye sertlik kazandıran 3 boyutlu yazıcı EÜ Mekanizması Çeşidi: Portal vinç Baskı Malzemesi: Synthetic Stone (Sentetik taş) EÜ Ölçeği: Yapı elemanı (Duvar modülleri)	
			
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	+	- Prefabrikasyon ve modüler koordinasyon sayesinde zamandan, iş gücünden ve maliyetten tasarruf sağlanmıştır. - Geri dönüştürülmüş malzeme katkıları ile betona alternatif malzeme tasarlanarak daha sürdürülebilir inşaata olanak tanınmıştır.
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı	+	
	Yeniden Kullanım	+	
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon	+	
	Modüler Koordinasyon	+	
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik		

Mighty Ev, sürdürülebilirlik ve dayanıklılığı artırmak üzere EÜ ve parametrik tasarımdan yararlanılarak tasarlanan bir yapıdır (EYRC, b.t.). Bir yaşam alanı, iki oda ve iki banyodan oluşan yapının duvarları EÜ ile üretilen 22 adet modülden oluşmaktadır (Mighty Buildings, b.t.a). 3BB duvar panelleri taşıyıcı olmamakla birlikte fabrikada üretilip Şekil 4. 33’te gösterildiği gibi yerinde montajı yapılmıştır. Duvar panelleri ve çelik taşıyıcı sistem arasındaki boyutsal koordinasyon sayesinde modüler koordinasyon sağlanmış böylelikle daha basit bir üretim ve kurulum süreci gerçekleştirilmiştir.



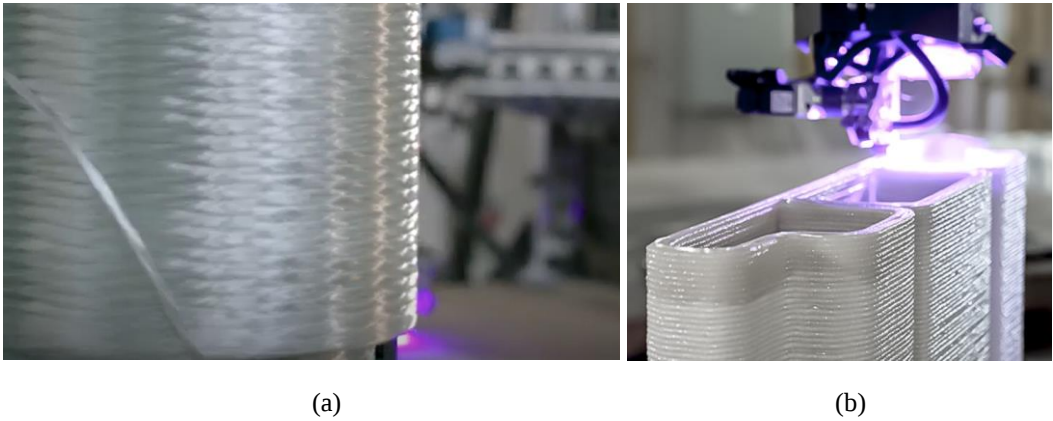
Şekil 4. 33 Prefabrik 3BB duvarların montaj süreci (Mighty Buildings, b.t.a)

Mighty Ev’in yapım sistemi, 4 kata kadar dayanıklı bina inşa etmeye olanak veren ve ana taşıyıcı sistemi çelik olan “Mighty Kit System” adı verilen yapım sistemidir (Mihgty Buildings, b.t.b). Firma, ısı yalıtımını sağlamak üzere poliüretan köpüğü duvardaki baskı boşluklarına sıkma, basılmış yüzeyleri pürüzsüzleştirme ve kaplama (boyama) işlemlerini de birer robot aracılığı ile sağlamakla üretim sürecinde otomasyon oranını artırmaktadır (Şekil 4. 34) (Mihgty Buildings, b.t.b).



Şekil 4. 34 EÜ'in yanı sıra robotlarla gerçekleştirilen yüzey pürüzsüzleştirme (a), poliüretan köpük sıkımı (b) ve kaplama işlemleri (c) (Mihgty Buildings, b.t.b)

Duvar üretiminde kullanılan baskı malzemesi Migty Building'in ürettiği "Synthetic Stone" adlı malzemedir (Şekil 3. 34 a). %60'ı geri dönüştürülen malzemelerden oluşan (EYRC, b.t.; Mighty Buildings, b.t.c) bu kompozit taş malzeme konvansiyonel betona kıyasla %30 daha hafif ve 5 kat daha dayanıklıdır (Mighty Buildings, b.t.b). Synthetic Stone, firmanın geliştirdiği, baskı malzemesinin dayanımını UV ışınları ile sağlayan 3BB robotu ile basılmaktadır (Şekil 4. 35 b). Mighty Buildings geliştirdikleri bu EÜ teknolojisi ile %95 daha az iş gücü gereksinimi, %45 daha az inşaat maliyeti , %90 daha az atık üretimi ve inşaat süresi, %80 daha fazla otomasyon, daha fazla enerji etkin inşaat süreci, daha hassas ölçekte yapı elemanı üretimi sağlamaktadırlar (Jarett Gross, 2020).

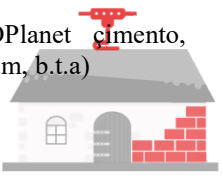
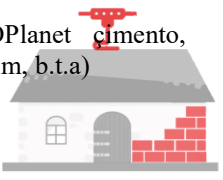


Şekil 4. 35 Synthetic Stone (kompozit taş) malzeme (a) (Jarett Gross, 2020) ve 3BB robotu (a) (Mihgty Buildings, b.t.b).

4.14 Phoenix Köprüsü

Zaha Hadid Architects ve Zürich Federal Teknoloji Enstitüsü'nden bir grup araştırmacının tasarladığı Phoenix Köprüsü Holcim ve Incremental3D firmaları tarafından hayata geçirilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4. 14 Phoenix Köprüsü özet tablosu

PHOENIX KÖPRÜSÜ			
Künye	 (Holcim, b.t.)	Yapım Yılı : 2023 (BRG, b.t.b) Yapım Yeri : Lyon/Fransa (Zaha Hadid Architects, 2024) Mimar/Tasarımcı : ETH Zurich Block Research Group (BRG), Zaha Hadid Architects Computation and Design Research Group (ZHACODE) (Zaha Hadid Architects, 2024) İşlev : Yaya köprüsü, Üst Örtü Boyutları : - İnşaat Süresi : -	
		Üretici: Holcim ve Incremental3D Yapım Şekli: Fabrikada Üretim, Yerinde Montaj EÜ Teknolojisi: 3B Beton Baskı, ECOCycle Döngüsel Teknoloji EÜ Mekanizması Çeşidi: 6 Eksenli Robotik Kol Baskı Malzemesi: ECOPlanet çimento, inşaat yıkım atıkları (Holcim, b.t.a) EÜ Ölçeği: Yapı bileşeni (Döşeme blokları)	
EÜ Teknolojisi	 (Holcim, b.t.a)  (Holcim, b.t.a)		
			
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	+	- Minimum malzeme ile maksimum dayanım elde edilmiştir. - Geri dönüştürülen malzeme kullanılmıştır. - Geleneksel kemer sistemi ile EÜ harmanlanarak etkin yapı sistemi geliştirilmiştir.
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı		
	Yeniden Kullanım	+	
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon	+	
	Modüler Koordinasyon		
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik		

Phoenix Köprüsü Holcim Firması'nın Lyon'daki İnovasyon Merkezi'nde, Striatu Köprüsü'nün beton bloklarının kısmı geri dönüştürülmesiyle (Holcim, 2023) bir benzeri olarak daha ekolojik yaklaşımlar sergilemek üzere inşa edilmiştir. Yaya köprüsünü oluşturan 3BB beton bloklar fabrikada üretilip Striatu Köprüsü inşaatı sırasında oluşturulan iskeleye benzer bir iskele oluşturularak yerinde monte edilmiştir (Şekil 4. 36). Fakat Phoenix Köprüsü için üretilen beton bloklar ve iskelenin ahşap elemanları kümeler oluşturacak biçimde birbirine fabrikada monte edilip şantiye alanına birlikte nakledilmiştir (Şekil 4. 36). İskele yardımıyla beton bloklar yığma kemer ve tonoz prensibine dayanarak donatı veya yapıştırma harcına ihtiyaç duyulmadan bir araya getirilmiştir (Şekil 4. 37). Hem bu sebeple hem de basılan beton blokların boşluklu yapısı sayesinde en az malzeme ile etkili bir strüktür oluşturularak etkin malzeme kullanımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 36 Phoenix Köprüsü bileşenlerinin şantiye alanına nakledilmesi (a) (Holcim, b.t.a) bileşenlerin yerinde montajı (b) (Holcim, b.t.a)



Şekil 4. 37 İskele yardımıyla donatısız ve harçsız bir araya getirilen 3BB beton bloklar (Holcim, b.t.a)

Striatus Köprüsü'nden farklı olarak Phoenix Köprüsü'nün inşaatında 10 ton geri dönüştürülmüş malzeme kullanılmıştır (Zaha Hadid Architects, 2024). 3BB malzemesi olarak kullanılan beton Holcim Firması tarafından ECOCycle döngüsel teknoloji kullanılarak geliştirilmiştir ve Striatus Köprüsü'nde kullanılan malzemeye kıyasla %40 daha az CO₂ salınımına sebep olmaktadır (Zaha Hadid Architects, 2024). Holcim Firması'nın EÜ için geliştirdiği ve Phoenix Köprüsü'nün beton bloklarında kullanılan beton için agrega ihtiyacı Striatus Köprüsü'nde kullanılan beton blokların geri dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Bunun yanı sıra beton karışımı elde etmek üzere kullanılan ve ECOPlanet olarak adlandırılan çimento Portland Çimentosu'na kıyasla %30 da az CO₂ salınımına neden olmaktadır (Holcim, b.t.b). Ayrıca bu projede döngüsel yapım, hesaplamalı tasarım ve EÜ birlikte kullanılarak %50 daha az malzeme kullanımı sağlanmıştır (Parametric Architecture, 2024).

4.15 AKF Pavyonu

AKF Pavyonu COBOD Firması'nın 3 boyutlu yazıcısı ile 3DCP Gruop tarafından EÜ ile inşa edilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.15'te verilmiştir.

Tablo 4. 15 AKF Pavyonu özet tablosu

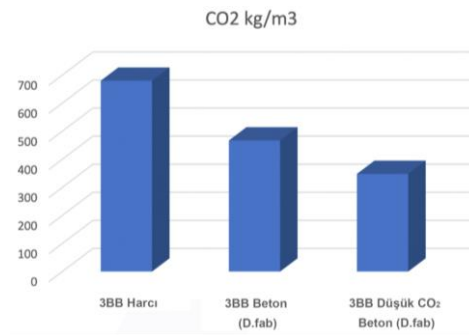
AKF PAVYONU			
Künye		Yapım Yılı : 2023 (COBOD, 2023) Yapım Yeri : Kopenhag/Danimarka (COBOD, 2023) Mimar/Tasarımcı : Saga Space Architects (Wakefield, 2023) İşlev : Misafir konutu, spor salonu, çamaşır odası (SAGA Space Architects, 2023) İnşaat Alanı : 72 m ² (COBOD, 2023) İnşaat Süresi : 5 gün (COBOD, 2023)	
	(3DCP Group, b.t.)		
EÜ Teknolojisi		Üretici: COBOD Yapım Şekli: Yerinde yapım EÜ Teknolojisi: COBOD BOD2 3D Printer (COBOD, 2023) EÜ Mekanizması Çeşidi: Portal vinç Baskı Malzemesi: Özelleştirilmiş beton (COBOD, 2023) EÜ Ölçeği: Yapı (Duvarlar)	
			
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı		Baskı malzemesi olarak daha düşük karbon ayak izine sahip beton kullanılmıştır.
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı	+	
	Yeniden Kullanım		
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon		
	Modüler Koordinasyon		
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik		

Kopenhag kentine bağılı Brondby beldesinin yeni yerleşim bölgesinde bulunan AKF Pavyonu sakinlerin spor alanı, misafir odası ve çamaşır odası ihtiyacını karşılamak üzere inşa edilmiştir (SAGA Space Architects, 2023). 72 m² inşaat alanına sahip olan yapının duvarları (Şekil 4. 38) COBOD BOD2 EÜ teknolojisi ile üretilmiştir (COBOD, 2023).



Şekil 4. 38 AKF Pavyonu 3BB duvarları (SAGA Space Architects, 2023)

AKF Pavyonu çimentonun karbon ayak izini azaltmak için, normal çimentodan %30 daha düşük karbon ayak izine sahip (Şekil 4. 39) olan özel çimento kullanılarak basıldı (COBOD, 2023). Düşük CO₂ çimento, yerel kum ve çakılla karıştırılarak Cemex ve COBOD tarafından geliştirilen D.fab katkı yöntemi kullanılarak 3 boyutlu basılabilir, %50 daha az karbon ayak izine sahip betona dönüştürüldü (COBOD, 2023). Konvansiyonel yapı malzemesi olan beton geliştirilerek daha sürdürülebilir hale getirilmiştir. Bunun yanı sıra eğrisel yüzeye sahip duvaralar EÜ sayesinde kalıp ve ekstra maliyete ihtiyaç duyulmadan inşa edilmiştir.

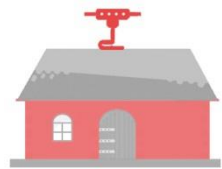


Şekil 4. 39 3BB Harç, 3BB Beton ve 3BB Düşük CO₂ Beton'un CO₂ salınımı karşılaştırmasına dair grafik (COBOD, 2023)

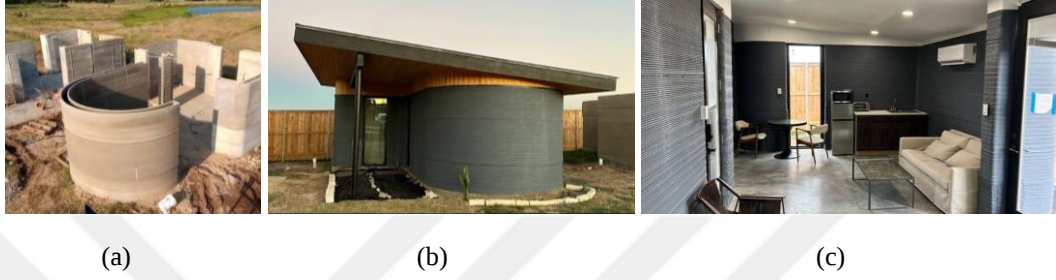
4.16 Las Casitas Konutları

Las Casitas Konutları Hive3D Builders ve Cybe firmaları tarafından EÜ ile inşa edilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler Tablo 4.16’da verilmiştir.

Tablo 4. 16 Las Casitas Konutları özet tablosu

LAS CASITAS KONUTLARI			
Künye	 (Hive3D Builders, b.t.)		Yapım Yılı : 2023 (Hive3D Builders, b.t.) Yapım Yeri : Round Top/Teksa/ABD (Hive3D Builders, b.t.) Mimar/Tasarımcı : Hive3D Builders İşlev : Konut İnşaat Alanı : 45-75 m2 (konut tipine göre değişmektedir) (CyBe, b.t.) İnşaat Süresi : 2 gün (her konut için) (CyBe, b.t.)
	 (Hive3D Builders, b.t.)  (CyBe, 2023)		Üretici: CyBe ve Hive3D Builders Yapım Şekli: Yerinde yapım EÜ Teknolojisi: CyBe Robot Crawler (RC) EÜ Mekanizması Çeşidi: Robotik Kol Baskı Malzemesi: Geopolimer beton (CyBe, 2023) EÜ Ölçeği: Yapı (Duvarlar) 
Önemli Sürdürülebilir Yönleri	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	+	- Çimento yerine bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül içeren geopolimer beton kullanılmıştır. - Atık malzemenin değerlendirilmesiyle hammadde ihtiyacı, çevre kirliliği, yapım maliyeti azaltılmıştır.
	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı		
	Yeniden Kullanım	+	
	Etkin Malzeme Kullanımı	+	
	Prefabrikasyon		
	Modüler Koordinasyon		
	Ekonomik Sürdürülebilirlik	+	
	Sosyal Sürdürülebilirlik		

Hive3D Builders, CyBe Eü firmalarının işbirliği ile inşa edilen Las Casitas Konutları tarihi Round Top kasabasında yer alan küçük kiralık evler olarak tasarlanmıştır (Şekil 4. 40) (CyBe, b.t.). Büyüklükleri 45-75 m² arasında değişen 5 adet konutun duvarları portatif CyBe Robot Crawler teknolojisi ile 25 cm kalınlığında üretilerek çerçeveli sistemlere göre daha dayanıklı olması sağlanmıştır (CyBe, b.t.).



Şekil 4. 40 Konutların EÜ aşaması (a) (Hive3d Builders, 2024a), tamamlanmış konut (b) (Hive3d Builders, 2024b), iç mekan görüntüsü (c) (Hive3d Builders, 2024c)

Duvar yapımında kullanılan geopolimer beton üretiminde çimento yerine alternatif bağlayıcı olarak Eco Materials Technologies ve Green Cement iş birliği ile tasarlanan tescilli puzolanik çimento (PuzzoSlag) kullanılmıştır (CyBe, 2023). Bu bağlayıcı malzeme kömür yakıtlı elektrik santrallerinden atık ürün olarak çıkan uçucu kül (Şekil 4. 41 a) içermektedir (Eco Material Technologies, 2022). Farklı endüstri kaynaklarından elde edilen uçucu küllerin kalite bakımından değişkenlik göstermesi sebebiyle PuzzoSlag için kullanılan uçucu kül tek bir kaynaktan alınarak ürünün sabit kalite ve dayanıma sahip olması hedeflenmiştir (Eco Material Technologies, 2022). PuzzoSlag ile üretilen geopolimer beton (Şekil 4. 41) normal betona göre daha güçlü ve neme daha dayanıklı (Starredsky, 2023) olmasının yanı sıra CO₂ emisyonlarını %93 oranında azaltmaktadır ve daha az maliyetlidir (CyBe, 2023). Çimento yerine PuzzoSlag kullanılarak üretilen baskı malzemesi ile basılan Las Casitas Konutları ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler sunmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. 41 Uçucu kül (a) (Eco Material Technologies, b.t.), geopolimer beton baskı malzemesi (b) (CyBe, b.t.), Las Casitas Konutları'nın 3BB duvarları (c) (CyBe, b.t.)

BÖLÜM BEŞ

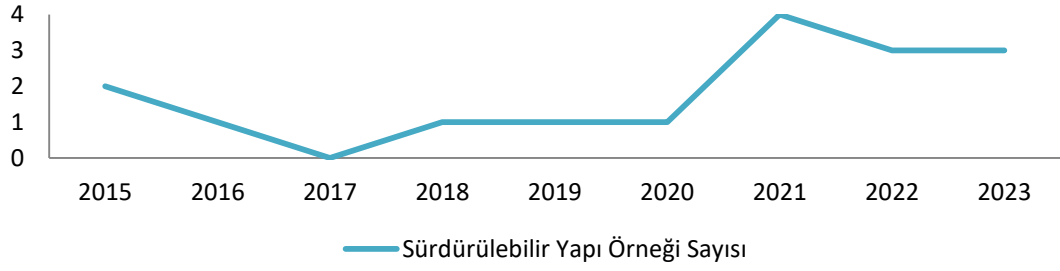
EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ'NİN YAPI ÖRNEKLERİ ÜZERİNDEN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Bölüm 4'te incelenen 16 adet sürdürülebilir yapı örneği EÜ teknolojilerinin yapım sektörüne sürdürülebilirlik bağlamında nasıl katkılar sunduğunu tartışmak üzere irdelenmiştir. Her bir yapı örneği için oluşturulan özet tablolarında Bölüm 3'te incelenen sürdürülebilirlik stratejileri kapsamında bilgiler yer almaktadır. Bu bilgilere dayanarak EÜ teknolojilerinin çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik çerçevesinden sağladığı avantajlar ortaya konmuştur.

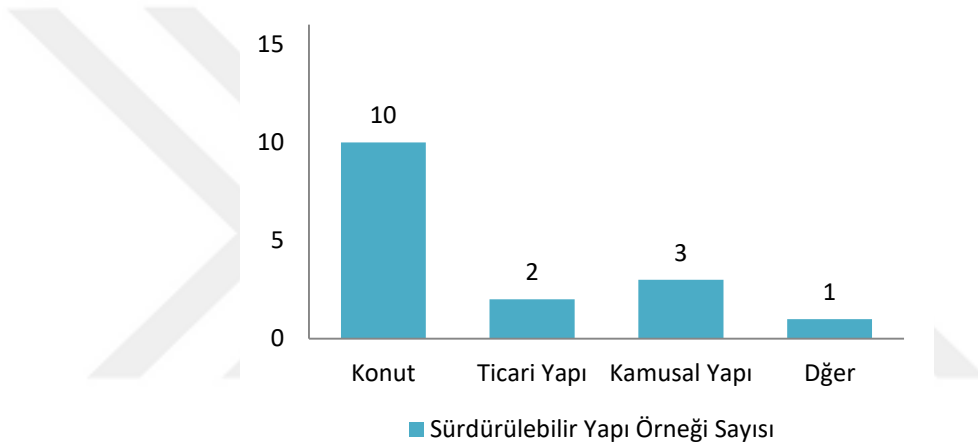
İncelenen yapı örneklerine ait künye bilgileri Tablo 5. 1'de verilmiştir. Tablo 5. 1'e göre 2010'lu yılların ortalarından itibaren Hollanda, BAE, ABD, İtalya, İspanya, Fransa, Çin, Danimarka gibi birçok ülkede EÜ ile sürdürülebilir yapılar inşa edilmiştir. Günümüze yaklaştıkça inşa edilen yapı sayısının arttığı görülmektedir (Şekil 5. 1). Bu yapıların büyük çoğunluğu konut olmasının yanı sıra ticari ve kamusal işlevli yapılar da inşa edilmiştir (Şekil 5. 2). Büyüklükleri 260 m² ile 8 m² arasında değişmekle birlikte yapım süreleri inşa etme amacına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin prototip olarak inşa edilen yapılar kısa bir sürede inşa edilme ihtiyacı olmadığından EÜ'in potansiyeli bağlamında çok kısa sürede inşa edilmemişlerdir. Fakat acil barınma gerektiren durumlarda İzolasyon Konutları gibi yapıların oldukça hızlı bir şekilde inşa edilebildikleri açıktır.

Tablo 5. 1 İncelenen sürdürülebilir yapı örneklerinin karşılaştırmalı künye bilgileri

Yapı	Yılı	Yeri	Mimarı	İşlevi	İnşaat Alanı (m ²)	İnşaat Süresi
Europe Building	2015	Amsterdam/ Hollanda	Dus Architects	Toplantı Binası	-	-
Urban Cabin	2015	Amsterdam/ Hollanda	Dus Architects	Konut prototipi	8	-
Dubai Ofis Binası	2016	Dubai/BAE	Gensler	Ofis binası	250	19 gün
Gaia Evi	2018	Lassa Lombarda/ İtalya	WASP	Konut	20	10 gün
3BB Konut Topluluğu	2019	Nacajuca/ Meksika	ICON	Konut	46,5	24 saat
İzolasyon Konutları	2020	Xianning/Çin	Winsun	İzolasyon konutu	10	2 saat
Striatus Köprüsü	2021	Venedik/İtalya	BRG ve ZHACODE	Yaya köprüsü	-	-
Tecla	2021	Lassa Lombarda/ İtalya	Mario Cucinella Architects	Konut	60	200 saat
Dior Mağazası	2021	Dubai/BAE	WASP	Giyim mağazası	-	120 saat
Tova	2022	Barselona/ İspanya	IAAC	Konut prototipi	9	7 hafta
Biohome3D	2022	Orono/ABD	ASCC	Konut	55,7	0,5 gün
House Zero	2022	Doğu Austin/ABD	Lake Flato	Konut	259,1	9 gün
Mighty Ev	2022	Palm Desert/ ABD	EYRC	Konut	109	-
Phoenix Köprüsü	2023	Lyon/Fransa	BRG ve ZHACODE	Yaya köprüsü	-	-
AKF Pavyonu	2023	Kopenhag/ Danimarka	Saga Space Architects	Misafir konutu, spor salonu, çamaşır odası	72	5 gün
Las Casitas Konutları	2023	Round Top/ABD	Hive3D Builders	Konut	45-75	2 gün



Şekil 5. 1 Sürdürülebilir yapı örneği sayısının yıllara göre değişimi



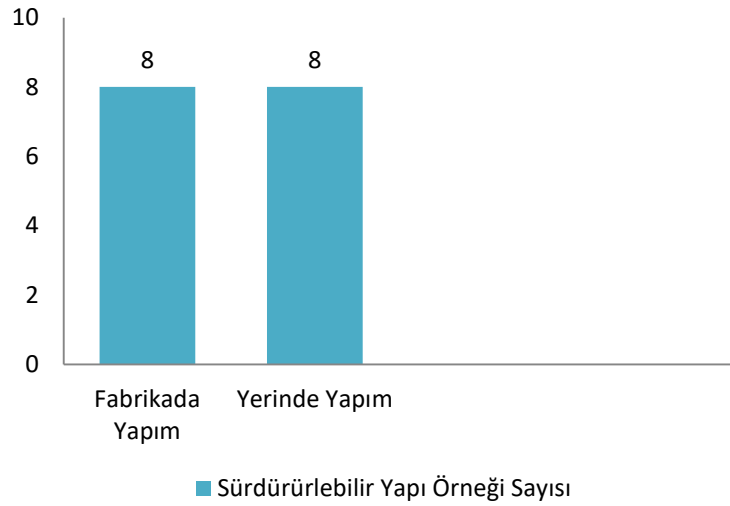
Şekil 5. 2 Sürdürülebilir yapı örneklerinin işlevsel dağılımı

İncelenen yapılar Tablo 5. 2’de yapım şekli, EÜ ölçeği, EÜ firması, EÜ teknolojisi, EÜ mekanizması çeşidi, baskı malzemesi açısından karşılaştırılmıştır. Tablo 5. 2 ve Şekil 5. 3’e göre sürdürülebilir yapı örnekleri yapım şekli bakımından eşit dağılım göstermektedir. Yapım şekli EÜ firmasının üretim teknolojisine bağlı olarak değişmekle birlikte hem fabrikada yapım hem de yerinde yapım örnekleri sürdürülebilirlik potansiyeli taşımaktadır. Yerinde yapım söz konusu olduğunda sadece yapı ölçeğinde üretim gerçekleştirilmiştir (Şekil 5. 4). Burada yapı ölçeğinden kasıt genellikle yapının duvarlarının bir bütün olarak basılmasıdır. Bu tür EÜ teknolojilerinde basılan katmanların düşey yükünü taşıyan bir zemine ihtiyaç duyulduğundan çatı elemanı EÜ ile basılamamaktadır. Ancak kubbe benzeri yapılarda hem alt katman basılmakta olan katmana destek sağladığında hem de baskı

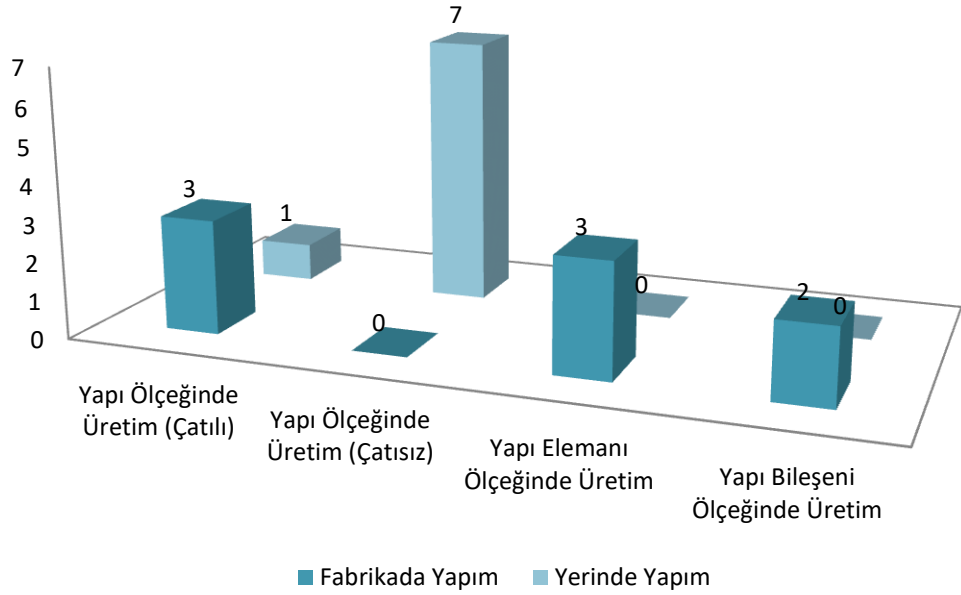
malzemesi sertleşme süresi hassas bir şekilde ayarlandığında çatı, duvarın devamı şeklinde basılabilmektedir (örneğin: Tecla). Fabrikada üretilen bazı yapı ölçeğinde örneklerde ise duvarlar ile birlikte çatının da basıldığını görmekteyiz (örneğin: Urban Cabin, Biohome3D). Bu da baskı malzemesi ve EÜ teknolojisi ile yakından ilişkilidir. Duvarlarla birlikte çatının da basılabilir olması çatı için gerekli ek maliyeti, iş gücünü, zamanı azaltarak sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Yapı elemanı veya yapı bileşenlerinin de fabrikada üretim kapsamında üretildiğini görmekteyiz (Şekil 5. 4). Genellikle tek parça halinde transferi mümkün olmayan veya zor olan yapılar için bu yöntem tercih edilmiştir. Fabrikada üretim (prefabrikasyon) ile otomasyon artar. Otomasyonla kolaylaşan ve basitleşen üretim süreci sayesinde zamandan, maliyetten ve iş gücünden tasarruf sağlanır. Bunun yanı sıra atık miktarı en aza indirilerek etkin malzeme kullanımı gerçekleştirilir. EÜ firmasının geliştirdiği teknoloji doğrultusunda değişkenlik gösteren EÜ mekanizması çeşidi ise temelde vinç ve robotik kol olarak ikiye ayrılmakla birlikte diğer parametrelere bağlı değildir. Baskı malzemesi bağlamında birçok sürdürülebilirlik stratejisinin uygulandığını görmekteyiz. Alternatif yapı malzemeleri kullanımı (örneğin: toprak, geopolimer beton, moloz, atık ahşap, biyoreçine), konvansiyonel yapı malzemelerinin sürdürülebilir kullanımı (örneğin: özelleştirilmiş beton çeşitleri), etkin malzeme kullanımı (EÜ teknolojilerinin uygulandığı bütün örnekler), yeniden kullanım (örneğin: atık ahşap, moloz) stratejileri incelenen yapı örneklerinde karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 5. 2 İncelenen sürdürülebilir yapı örneklerinin karşılaştırmalı EÜ bilgileri

Yapı	Yapım Şekli	EÜ Ölçeği	EÜ Firması	EÜ Teknolojisi	EÜ Mekanizması Çeşidi	Baskı Malzemesi
Europe Building	Fabrikada yapım	Yapı elemanı	Dus Architects, Aectual	KamerMaker XL 3DPrinter	Portatif portal vinç	Biyoplastik
Urban Cabin	Fabrikada yapım	Yapı	Dus Architects, Aectual	KamerMaker XL 3DPrinter	Portatif portal vinç	Biyoplastik
Dubai Ofis Binası	Fabrikada yapım	Yapı elemanı	Winsun	Winsun 3D Printer	Robotik kol	Beton
Gaia Evi	Yerinde yapım	Yapı	WASP	Crane Wasp	Kablo destekli vinç	Ham toprak, saman
3BB Konut Topluluğu	Yerinde yapım	Yapı	ICON	ICON	Portal vinç	Özelleştirilmiş beton
İzolasyon Konutları	Fabrikada yapım	Yapı	Winsun	Winsun	Robotik kol	Beton, moloz
Striatus Köprüsü	Fabrikada yapım	Yapı Bileşeni	Holcim ve Incremental3D	3B Beton Baskı	Robotik kol	Geri dönüşütürülebilir beton
Tecla	Yerinde yapım	Yapı	WASP	Crane Wasp	Kablo destekli vinç	Toprak, silika kumu, pirinç kabuğu
Dior Mağazası	Yerinde yapım	Yapı	WASP	Crane Wasp	Kablo destekli vinç	Ham toprak, kum, pirinç kabuğu ve saman
Tova	Yerinde yapım	Yapı	WASP	Crane Wasp	Kablo destekli vinç	Toprak, ağaç lifi, yumurta akı
Biohome3D	Fabrikada yapım	Yapı	Ingersoll Machine Tools	MasterPrint 3X	Portal vinç	Atık ahşap, biyoreçine
House Zero	Yerinde yapım	Yapı	ICON	Vulcan	Portal vinç	Özelleştirilmiş beton
Mighty Ev	Fabrikada yapım	Yapı elemanı	Mighty Buildings	UV Işınlı 3B Yazıcı	Portal vinç	Sentetik taş
Phoenix Köprüsü	Fabrikada yapım	Yapı bileşeni	Holcim ve Incremental3D	3B Beton Baskı	Robotik kol	Geri dönüşütürülebilir beton
AKF Pavyonu	Yerinde yapım	Yapı	COBOD	COBOD BOD2	Portal vinç	Özelleştirilmiş beton
Las Casitas Konutları	Yerinde yapım	Yapı	CyBe ve Hive3D B. Builders	CyBe Robot Crawler	Robotik kol	Geopolimer beton



Şekil 5. 3 Sürdürülebilir yapı örneklerinin üretim şekli bakımından dağılımı



Şekil 5. 4 Sürdürülebilir yapı örneklerinin üretim ölçeği ve üretim şekli bakımından dağılımı

İncelenen yapılar Tablo 5. 3'te Bölüm 3'te irdelenen sürdürülebilirlik stratejileri kapsamında karşılaştırılmıştır. “Etkin malzeme kullanımı” ve “ekonomik sürdürülebilirlik” stratejileri EÜ teknolojilerinin uygulanmasıyla sağlandığından her yapı örneği için geçerlidir (Şekil 5. 5). Her EÜ sürecinde malzemenin gerektiği kadar basılması, atık miktarının minimuma indirilmesi ve kalıp ihtiyacının olmaması “etkin

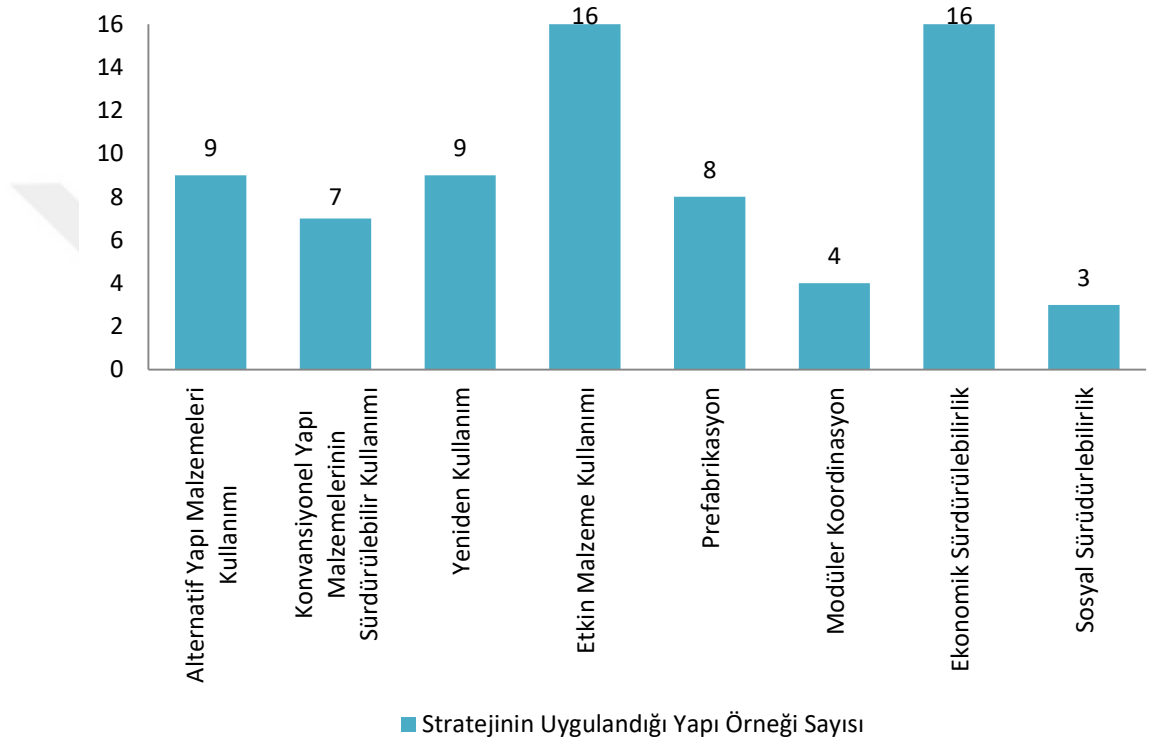
malzeme kullanımı”nı sağlarken aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliği de sağlamaktadır. Yapımda EÜ’de otomasyonun artmasıyla birlikte iş gücüne olan ihtiyacın azalması, zamandan tasarruf sağlanması ve olası yapım hatalarının azalması sonucunda da ekonomik sürdürülebilirlik sağlanmaktadır.

“Alternatif yapı malzemeleri kullanımı”, “konvansiyonel yapı malzemelerinin sürdürülebilir kullanım”, “yeniden kullanım”, “prefabrikasyon”, “modüler koordinasyon” ve “sosyal sürdürülebilirlik” izlencelerinin uygulanıp uygulanmadığı (Şekil 5. 5) ise yapı örneği özelinde benimsenen sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda değişmektedir. “BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) kullanımı” stratejisi potansiyelleri açısından Bölüm 3’te incelenmiştir fakat BIM uygulanarak EÜ ile inşa edilen bir yapı örneği bulunmadığından değerlendirme kapsamı dışında tutulmuştur.

Tablo 5. 2’ye göre incelenen yapı örneklerinde alternatif yapı malzemeleri olarak toprak, geri dönüştürülmüş beton, moloz, atık ahşap, biyoreçine, pirinç kabuğu, saman, çimento yerine uçucu kül kullanılmış olduğu görülmektedir. Bu tür malzemeler atık ürünler olarak da nitelendirilebilir. Atık ürünlerin alternatif baskı malzemesi olarak değerlendirilmesi aynı zamanda “yeniden kullanım” stratejisi kapsamına girmektedir. Yeniden kullanım, döngüsel ekonomide döngünün tamamlanabilmesi için en önemli aşamadır.

İncelenen yapı örnekleri bağlamında beton ve plastik malzemenin yeniden yorumlanarak geri dönüştürülebilir hale getirildiği söylenebilir. Bu tür malzemelerin kullanımı ise “konvansiyonel yapı malzemelerinin sürdürülebilir kullanımı” stratejisi kapsamında değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra Bölüm 3’te bu strateji başlığı altında incelenen bazı örneklerde (örneğin: MD3X Köprüsü) de görüldüğü gibi metal malzeme de yapımda EÜ süreçlerinde kullanılmaktadır ve geri dönüştürülmesi kolay olan malzemeler arasındadır. Metal malzeme diğer malzemelere kıyasla pahalı olduğundan küçük birleşim detaylarının üretimi için daha uygundur. Yapımda EÜ teknolojilerinin sosyal sürdürülebilir yönü ise sonuç ürünü hızlı ortaya koyma potansiyeli sayesinde afet durumlarında acil/geçici barınma ve ekonomik açıdan durumu zayıf olan ailelerin barınma ihtiyacını karşılamasının mümkün olmasıdır.

Yapımda EÜ’de prefabrikasyonun ve modüler koordinasyonun uygulanması iş gücü, zaman ve maliyetten tasarruf sağlamakla birlikte atık miktarını en aza indirerek çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. İncelenen yapı örnekleri arasında modüler koordinasyonun uygulandığı her koşulda prefabrikasyonun da gerçekleştirildiğini görmekteyiz (Tablo 5. 3).



Şekil 5. 5 Sürdürülebilirlik stratejilerin incelenen yapı örnekleri kapsamında uygulanma sıklığı

Tablo 5. 3 İncelenen yapı örneklerinin karşılaştırmalı sürdürülebilirlik bilgileri

Sürdürülebilirlik Stratejileri Yapı	Alternatif Yapı Malzemeleri Kullanımı	Konvansiyonel Yapı Malzemelerinin Sürdürülebilir Kullanımı	Yeniden Kullanım	Etkin Malzeme Kullanımı	Prefabrikasyon	Modüler Koordinasyon	Ekonomik Sürdürülebilirlik	Sosyal Sürdürülebilirlik
Europe Building		+		+	+	+	+	
Urban Cabin		+		+	+		+	+
Dubai Ofis Binası		+		+	+	+	+	
Gaia Evi	+		+	+			+	
3BB Konut Topluluğu				+			+	+
İzolasyon Konutları	+		+	+	+		+	+
Striatu Köprüsü		+		+	+		+	
Tecla	+		+	+			+	
Dior Mağazası	+		+	+			+	
Tova	+		+	+			+	
Biohome3D	+		+	+	+	+	+	
House Zero		+		+			+	
Mighty Ev	+	+	+	+	+	+	+	
Phoenix Köprüsü	+		+	+	+		+	
AKF Pavyonu		+		+			+	
Las Casitas Konutları	+		+	+			+	

5.1 Çevresel Sürdürülebilirlik Kapsamında Avantajlar

- Baskı malzemesi olarak alternatif yapı malzemelerinin (çimento yerine alternatif bağlayıcı malzemeler, toprak, atık plastik) kullanılması yolu ile yeni hammadde ihtiyacının azaltılması, atık yönetimine katkıda bulunulması ve yeniden kullanımın sağlanması

- EÜ'nün tasarım ve uygulama esnekliği sayesinde konvansiyonel yapı malzemelerinin etkin bir biçimde kullanılması

- Basılan baskı malzemesini yeniden basmak üzere konvansiyonel yapı malzemeleri esaslı geri dönüştürülebilir yeni malzemelerin tasarlanması

- Atık ürünlerin baskı malzemesi karışımında kullanılarak döngüsel ekonomi kapsamında yeniden kullanımın gerçekleştirilmesi ve atık yönetimine katkıda bulunulması

- Baskı sırasında gerektiği kadar malzeme kullanılarak ve kalıp ihtiyacının ortadan kaldırılarak etkin malzeme kullanımının sağlanması dolayısıyla kaynak verimliliğinin sağlanması

- EÜ teknolojilerinin prefabrikasyon ile uyum sağlaması dolayısıyla yapım sürecinin basitleştirilmesi, yapım süreci boyunca en az atık oluşumunun sağlanması ve yapım sürecinin hava koşullarından etkilenmeden maksimum verimlilikle gerçekleştirilmesi

- EÜ teknolojilerinin modüler koordinasyon esaslı üretim yapabilmesiyle üretim, kurulum ve geri dönüşümün daha kolay hale getirilmesi

- EÜ teknolojilerinin dijital tasarım esaslı olması sayesinde BIM (Yapı bilgi modellemesi) ile uyumlu olması dolayısıyla yapıların yaşam döngüsü takibinin kolaylaşmasıdır.

5.2 Ekonomik Sürdürülebilirlik Kapsamında Avantajlar

- Yeni hammadde ihtiyacının azalması sonucunda malzeme için gerekli maliyetin azalması

- EÜ ile otomasyonun artması, prefabrikasyon ve modüler koordinasyonun uygulanması sonucunda iş gücüne olan ihtiyacın azalması dolayısıyla iş gücü maliyetinin azalması

- EÜ ile yapım sürecinin hızlı hale gelmesiyle zamandan dolayısıyla maliyetten tasarruf sağlanması

- Dijital tasarım, robotların hareket kabiliyetleri ve baskı malzemesinin baskı sırasında dayanım kazanması sayesinde kalıba, fazladan maliyet ve çabaya ihtiyaç duyulmadan serbest biçimli yapı üretiminin mümkün olması

- EÜ teknolojileri BIM (Yapı bilgi modellemesi) ile bütünleşik uygulandığı takdirde fizibilite çalışmalarının kolaylaşması ve ön maliyet hesabında daha tutarlı sonuçlar elde edilmesi

5.3 Sosyal Sürdürülebilirlik Kapsamında Avantajlar

- EÜ ile artan otomasyon sayesinde yapım süreci sırasında yaralanma ve ölüm riskinin azalmasının yanı sıra inşaat işçiliği bakımından daha rahat çalışma koşullarının sağlanması
- Afet sonrası gerekli acil barınma veya düşük gelirli aileler için gerekli barınma ihtiyacına hızlı ve etkili bir şekilde konut üretimi olanağının sağlanması

5.4 Değerlendirme ve Öneriler

Yapılan araştırma göz önünde bulundurulduğunda EÜ teknolojilerinin yapımda kullanılması sürdürülebilirliğin üç sacayağı açısından da önemli potansiyeller taşıdığını söylemek mümkündür. Gün geçtikçe sürdürülebilir yapı örneği sayısı artmakta böylelikle EÜ teknolojilerinin yapım sektöründeki alanı genişlemektedir. Söz konusu yapı örnekleri Dünya'nın birçok yerinde inşa edilmiştir. Bundan yola çıkarak otomasyonu artıran EÜ teknolojilerinin önümüzdeki yıllarda yapım sektöründe daha fazla yer alacağı dolayısıyla daha az maliyet ve iş gücü gereksinimi ile daha kısa sürede yapı üretimine yönelik etkili sonuçlar alınacağı ön görülmektedir. EÜ, özellikle afet sonrası ihtiyaç duyulan acil ve geçici barınma için önemli bir alternatif çözüm olarak görülmektedir.

EÜ teknolojileri ile yatay elemanların (döşeme, kiriş, çatı vb.) diğer elemanlar (duvar, kolon vb.) ile bütüncül olarak basılabilirliği malzemenin niteliğine bağlı olmakla birlikte en çok tercih edilen beton malzeme ile bütüncül baskısı şimdilik mümkün olmamaktadır. Bu sebepten dolayı EÜ teknolojileri ile birlikte konvansiyonel yapım sistemlerinin bütünleşik olarak uygulanmasının daha etkin sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Özellikle yapım süreçlerinin prefabrikasyon ve modüler koordinasyon ile gerçekleştirilmesi EÜ ile konvansiyonel yapımın bir arada uygulanmasının önünü açmaktadır. Bunun yanı sıra yapımda EÜ süreçlerinde atık malzemelerin baskı malzemesi olarak değerlendirmesine yönelik çaba yapım sektörünün karbon ayak izini azaltacağı ön görülmektedir. Ekonomik açıdan ise teknolojinin henüz yaygınlaşmamasından kaynaklı dezavantajları bulunmasına

rağmen konvansiyonel yapıım sistemlerine kıyasla kullanılan malzeme niteliği, etkin malzeme kullanımı ve sürdürülebilir odaklar doğrultusunda ön plana çıkmaktadır.

Yapımda EÜ teknolojilerinin bu çalışma kapsamında ortaya konan sürdürülebilirlik özellikleri ve potansiyelleri göz önünde bulundurularak bu alanda yapılacak bilimsel çalışmalara yönelik öneriler:

- daha net sonuçlar elde etmek adına yapı örneklerine yönelik hammadde tedarikinden, yapı ömrünü tamamladıktan sonra ortaya çıkan atıkların bertarafına veya yeniden değerlendirilmesine kadar gerçekleşen tüm süreçleri veya bu süreçlerden bazılarını ele alan yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarının yapılması,

- alternatif yapı malzemeleri kullanılarak geliştirilen baskı malzemelerinin özelliklerinin geliştirilmesi adına bu malzemelere yönelik deneysel çalışmaların çoğaltılması,

- BIM'in yapımda EÜ teknolojilerinde kullanılmasının önünü açmak adına örnek yapı tasarımına yönelik çalışmaların yapılması,

- EÜ ile prefabrikasyon ve modüler koordinasyon doğrultusunda üretilen yapı bileşeni veya yapı elamanlarının bağlantı çözümlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaların yapılması olarak sıralanabilir.

Sonuç olarak yapımda EÜ gelişmeye devam eden bir teknoloji olduğundan araştırmaya ve üzerinde çalışılmaya açık bir alandır. Yapılan araştırma önerileri doğrultusunda çalışmaların yürütülmesi bu teknolojinin sürdürülebilirlik potansiyelini, yapıım sektöründe uygulama alanlarını ve uygulama çözümlerini ortaya koymaya yardımcı olacağı ön görülmektedir.

KAYNAKLAR

- 3D Baskı Al, (7 Ocak 2022). 14 Mayıs 2024. *Mimari 3d Baskı İle Maket Üretimi*.
<https://3dbaskial.com/mimari-projelerin-3d-yazici-ile-uretimi/>
- 3D concrete printing, (2 Nisan 2024). 10 Mayıs 2024. *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/3D_concrete_printing
- 3D Construction Printing, (29 Kasım 2019). 3 Mayıs 2024. *Winsun 3D Prints 10 houses In 24 Hours In 2014* [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=YzqGfJDdbDM>.
- 3D WASP, (14 Aralık 2018). 9 Mayıs 2024. *Gaia | 3D printed earth house with Crane WASP | Presentation Video* [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=KPaOCWrZJ94>.
- 3DCP Group, (b.t.). 28 Mayıs 2024. *AKF Pavilion*. 3dcp.
<https://www.3dcp.dk/projects/akf-pavilion?slug=akf-pavilion>
- 3Dnatives, (24 Şubat 2020). 25 Mayıs 2024. *Coronavirus: How 3D printed houses can help to fight the virüs* [Video]. YouTube.
https://www.youtube.com/watch?v=RM3t_XSF_-U
- 3DSistems, (b.t.), 11 Nisan 2023, *What Is Stereolithography?*
<https://www.3dsystems.com/stereolithography>
- Abdalla H., Fattah K.P., Abdallah M., Tamimi A.K. (2021) Environmental Footprint and Economics of a Full-Scale 3D-Printed House. *Sustainability*, 13(21), 11978.
<https://doi.org/10.3390/su132111978>
- Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V. ve Zhang, L. (2012). Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and Building Materials*, 35, 718-729.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.044>
- Alawneh, M., Matarneh, M. ve El-Ashri, S. (2018). The world's first 3D-printed office building in dubai. *PCI/NBC*.
https://www.pci.org/PCI_Docs/Papers/2018/32_Final_Paper.pdf

- Aldred, J. M., Holland, T. C., Morgan, D. R., Roy, D. M., Bury, M. A., Hooton, R. D., ...ve Jaber, T. M. (2006). *Guide for the use of silica fume in concrete*. (Rapor No: ACI 234R-06, 2012'de Revize edildi) ACI-American Concrete Institute Committee. http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20234R-06%20R12%20Guide%20for%20the%20Use%20of%20Silica%20Fume%20in%20Concrete_MyCivil.ir.pdf
- American Society for Testing and Materials. (2010). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies* (ASTM F2792-10). <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/F2792-10.htm>.
- Aouf, R. S., (5 Eylül 2022) 16 Şubat 2024. *University of Virginia 3D-Prints Living Soil Walls That Sprout Greenery*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2022/09/05/university-of-virginia-3d-printed-soil-seed-walls/>
- ArchDaily. (9 Ocak 2024). 1 Nisan 2024. *Phoenix Bridge / Zaha Hadid Architects*. <https://www.archdaily.com/1011966/phoenix-bridge-zaha-hadid-architects>
- Arup. (b.t.). 20 Mart 2024. *Interactive lighting integrated in a tensegrity structure*. <https://www.arup.com/projects/grote-marktstraat>
- Baharlou, E., (2022). *UVA researchers have 3D-printed living walls that sprout greenery* [Fotoğraf]. <https://www.dezeen.com/2022/09/05/university-of-virginia-3d-printed-soil-seed-walls/>
- Bauguess, B., (12 Kasım 2019). 6 Mayıs 2024. *3D-printed Homes in Nacajuca, Mexico with New Story*. ICON. <https://www.iconbuild.com/projects/3d-printed-homes-in-nacajuca-mexico-with-new-story>.
- Baydil, S. (10 Mart 2022). 26 Mart 2024. *ICON ve Lake Flato'dan 3B Baskı Yoluyla İnşa Edilen Konut: House Zero*. Arkitera. <https://www.arkitera.com/haber/icon-ve-lake-flatodan-3b-baski-yoluyla-insa-edilen-konut-house-zero/>
- BBC. (25 Nisan 2014). 4 Mart 2024. *China: Firm 3D prints 10 full-sized houses in a day*. <https://www.bbc.com/news/blogs-news-from-elsewhere-27156775>

- Bergh, J., Nieuw, C., Slob, W., Suarez, M. E. ve Velema, P. L. (Mart 2022). *Modular 3D printing construction: towards affordable, adjustable and climate resilient housing*. Science-Policy Brief for the Multistakeholder Forum on Science, Technology and Innovation for the SDGs. <https://sdgs.un.org/sites/default/files/2022-05/2.4.4-14-van%20den%20Bergh%20-Modular%203D%20printing%20construction.pdf>
- Bhooshan, S., Bhooshan, V., Dell’Endice, A., Chu, J., Singer, P., Megens, J., ... ve Block, P. (2022). The Striatu bridge: computational design and robotic fabrication of an unreinforced, 3D-concrete-printed, masonry arch bridge. *Architecture, structures and construction*, 2(4), 521-543. <https://doi.org/10.1007/s44150-022-00051-y>
- Block Research Group. (18 Mayıs 2021a). Striatu- Teaser [Video]. Vimeo. <https://vimeo.com/551894206>
- Block Research Group. (9 Temmuz 2021b). 3D Concrete Printing [Video]. Vimeo. <https://vimeo.com/573105446>
- Block Research Group. (9 Temmuz 2021c). On-Site Assembly [Video]. Vimeo. <https://vimeo.com/573104959>
- Block Research Group. (9 Temmuz 2021d). Robotic 3D Printing Concrete [Video]. Vimeo. <https://vimeo.com/573140021>
- Bosscher, P., Williams II, R. L., Bryson, L. S., ve Castro-Lacouture, D. (2007). Cablesuspended robotic contour crafting system. *Automation in construction*, 17(1), 45- 55. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.02.011>
- Bozkurt, S. (2012). *Evsel Nitelikli Katı Atıkların Geri Dönüşüm Olasılıkları ve Bertaraf Yöntemlerinin Araştırılması* [Doktora Tezi]. Çukurova Üniversitesi.
- BRG. (b.t.a). 27 Mart 2024. *Striatu - 3D concrete printed masonry bridge, Venice, Italy, 2021*. Block Research Group. <https://www.block.arch.ethz.ch/brg/project/striatu-3d-concrete-printed-masonry-bridge-venice-italy-2021>

- BRG. (b.t.b). 1 Nisan 2024. *Phoenix - A permanent 3D concrete printed masonry bridge, Lyon, France, 2023*. <https://www.block.arch.ethz.ch/brg/project/phoenix-3d-concrete-printed-masonry-bridge-lyon-france-2023>
- Buswell, R. A., Soar, R. C., Gibb, A. G. ve Thorpe, A. (2007). *Applying future industrialised processes to construction* [Bildiri]. CIB World Building Congress. 1-11.
- Buswell, R. A., Thorpe, A., Soar, R. C. ve Gibb, A. G. (2008). Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. *Automation in Construction*, 17(8), 923-929. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.03.001>
- Caixin. (19 Ocak 2015). 4 Mart 2024. *苏州数幢3D打印建筑集中亮相*. <https://photos.caixin.com/2015-01-19/100775775.html>
- Calignano, F., Lorusso, M., Pakkanen, J., Trevisan, F., Ambrosio, E. P., Manfredi, D., ve Fino, P. (2017). Investigation of accuracy and dimensional limits of part produced in aluminum alloy by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(1), 451-458. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8788-9>
- Camacho, D. D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R. ve Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry—A forward-looking review. *Automation in construction*, 89, 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>
- Carbonari, L. T., Toralles, B. M., Silva, L. F., Librelotto, L. I. ve Giglio, T. G. F. (2023). 3D Printing With Cementitious Materials: A Comparative Analysis of Residential Projects. *MIX Sustentável*, 9(4), 27-39. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n4.27-39>
- Carlota, V. (26 Şubat 2020). 25 Mayıs 2024. *Winsun 3D prints isolation wards to curb coronavirus outbreak*. 3D Natives. <https://www.3dnatives.com/en/winsun-coronavirus-260220205/>

- Cegarra, A., (2021). *3-D printed houses in Nacajuca, Mexico* [Fotoğraf]. The New York Times. <https://www.nytimes.com/2021/09/28/business/3D-printing-homes.html>
- Chadha, K., Dubor, A., Cabay, E., Tayoun, Y., Naldoni, L. ve Moretti, M. (2024). Additive Manufacturing for the Circular Built Environment: Towards Circular Construction with Earth-Based Materials. *A Circular Built Environment in the Digital Age* içinde (111-128). Cham: Springer International Publishing. <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/86890/978-3-031-39675-5.pdf?sequence=1#page=128>
- Chang, B. (5 Ocak 2023). 26 Şubat 2024. See inside 2 3D-Printed Tiny Home ADUs in LA made from recycled Plastic. <https://www.businessinsider.com/see-inside-3d-printed-tiny-homes-from-recycled-plastic-california-2023-1>
- Chen, Y., Veer, F. ve Copuroglu, O. (2017). A critical review of 3D concrete printing as a low CO2 concrete approach. *Heron*, 62(3), 167-194. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.12323.71205>.
- Chippagiri, R., Bras, A., Sharma, D. ve Ralegaonkar, R. V. (2022). Technological and Sustainable Perception on the Advancements of Prefabrication in Construction Industry. *Energies*, 15(20), 7548. <https://doi.org/10.3390/en15207548>
- Chiusoli, A. (29 Eylül 2018). 9 Mayıs 2024. *The first 3D printed house with earth Gaia*. 3dwasp. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/>
- Christian Dior, (3 Kasım 2021). 21 Mayıs 2024. The Making of the Dior Cruise 2022 Pop-Ups at Dubai's Jumeirah Beach [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=RE1BSjgqjyo>
- Civera, G. ve Harrak, M. (2022). 22 Mayıs 2024. Prototype TOVA / Posgrado 3D Printing Architecture IAAC [Fotoğraf]. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/988078/prototype-tova-posgrado-3d-printing-architecture-iaac>

- CNET. (29 Ocak 2023). 3 Nisan 2024. Meet the Recycble, 3D-Printed Home [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=QYlhrjMq59o>
- COBOD, (12 aralık 2023). 28 Mayıs 2024. First Low Co2 Concrete Building 3d Printed In Copenhagen; A 72 M2 Large Community Building. <https://cobod.com/first-low-co2-3d-printed-building-in-copenhagen/>
- Colangelo, F., Forcina, A., Farina, I. ve Petrillo, A. (2018a). Life Cycle Assessment (LCA) of different kinds of concrete containing waste for sustainable construction. *Buildings*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/buildings8050070>.
- Colangelo, F., Petrillo, A., Cioffi, R., Borrelli, C. ve Forcina, A. (2018b). Life cycle assessment of recycled concretes: a case study in southern Italy. *Sci. Total Environ.*, 615, 1506-1517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.107>.
- Coulleri, A. (2022). 22 Mayıs 2024. *Prototype TOVA / Posgrado 3D Printing Architecture* IAAC [Fotoğraf]. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/988078/prototype-tova-posgrado-3d-printing-architecture-iaac>
- Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., ve Bartolo, P. J. (2019). Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. *Automation in Construction*, 103, 251-267. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>
- CyBe, (10 Temmuz 2023). 28 Mayıs 2024. *Game-Changer in Additive Manufacturing: Mixed on Site Carbon Neutral Alternative to Cement Unveiled* [Basın Bülteni]. <https://cybe.eu/hive3d/>
- CyBe, (b.t.). 29 Mayıs 2024. Las Casitas. <https://cybe.eu/cases/las-casitas/>
- Cyr, M., Idir, R. ve Poinot, T. (2012). Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science*, 47(6), 2782-2797. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-6107-2>.

- Çamuşoğlu, (18 Ocak 2023). 28 Mayıs 2024. *Mighty Buildings'in 3D Baskılı Net Sıfır Yapısı*. EkoYapıDergisi. <https://www.ekoyapidergisi.org/mighty-buildings-in-3d-baskili-net-sifir-yapisi>
- Dağ, E., (2020). 14 Mayıs 2024. *Mimarlıkta 3D Yazıcı Uygulamaları ve 3D Baskı* [Fotoğraf]. 3d3teknoloji. <https://3d3teknoloji.com/blog/mimarlikta-3d-yazici-uygulamalari-ve-3d-baski/>
- Day, K., (28 Mart 2011). 10 Mayıs 2024. *An Interview with Dirk Vander Kooij*. Cool Hunting. <https://coolhunting.com/design/dirk/>
- Dell'Endice, A., Bouten, S., Van Mele, T. ve Block, P. (2023). Structural design and engineering of Striatum, an unreinforced 3D-concrete-printed masonry arch bridge. *Engineering Structures*, 292, 116534. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116534>
- Deschamps, J., Simon, B., Tagnit-Hamou, A. ve Amor, B. (2018). Is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in concrete. *J. Clean. Prod.*, 185, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.021>.
- Dini, E., Chiarugi, M., ve Nannini, R. (26 Haziran 2008). *Method And Device For Building Automatically Conglomerate Structures*. U.S. Patent Application No. 11/908,993.
- Doris, (20 Temmuz 2015). 13 Mart 2024. *Zhuoda Group Unveils 3D Printed Modular Home – Update: Was It All Made Up?*. 3Printr. <https://www.3printr.com/zhuoda-group-unveils-3d-printed-modular-home-2729994/>
- Dönmez İnşaat, (b.t.). 13 Mart 2024. *Mermer Tozu* [Fotoğraf]. http://www.donmezinsaat.com.tr/urun_mermer-tozu_178_16_65
- Dreith, B. (4 Mart 2022). 26 Mart 2024. *ICON and Lake Flato build 3D-printed House Zero in Austin*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2022/03/04/icon-lake-flato-3d-printed-house-zero-austin/>

D-Shape, (b.t.a). 12 Aralık 2023. *Enrico Dini – Pioneering 3D Construction Printing*. <https://d-shape.com/enrico-dini/>

D-Shape, (b.t.b). 10 Mayıs 2024. *3D Printing Technology*. <https://d-shape.com/3d-printing/>

Du Plessis, C. (2002). Agenda 21 for sustainable construction in developing countries (Rapor No. Bou/E0204) The International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), United Nations Environment Programme-International Environmental Technology Centre (UNEP-IETC) ve Council of Scientific and Industrial Research (CSIR).

Dus Architects, (b.t.a). 16 Mayıs 2024. *XL 3D Printer*. Houseofdus. <https://houseofdus.com/work/#project-kamermaker>

Dus Architects, (b.t.b). 22 Mayıs 2024. *Urban Cabin*. Houseofdus. <https://houseofdus.com/project/urban-cabin/dus>

Dus Architects, (b.t.c). 22 Mayıs 2024. *Europe Building*. Houseofdus. <https://houseofdus.com/project/europe-building/>

Ebner P. ve UCLA Future LAB, (b.t.). 21 Mayıs 2024. *3D printed house constructed by 3M futureLAB* [Fotoğraf]. Designboom. <https://www.designboom.com/architecture/3m-futurelab-3d-printed-house-by-ucla-hud-04-06-2014/>

Ebner, P. ve UCLA futureLAB. (b.t.). *Student Works: 3D printing the new millenial domicile with UCLA and HUD* [Fotoğraf]. Archinect. <https://archinect.com/features/article/99718581/student-works-3d-printing-the-new-millenial-domicile-with-ucla-and-hud>

Eco Material Technologies, (30 Ağustos 2022). 30 Mayıs 2024. *PuzzoSlag* [Basın Bülteni]. https://greencement.com/wp-content/uploads/2022/08/EM-TB-PozzoSlag_8-30-22.pdf

Eco Material Technologies, (b.t.). 30 Mayıs 2024. *Fly Ash*. EcoMaterial. <https://ecomaterial.com/products-and-technologies/fly-ash/>

- Ekiz Barış, K., Tüter, R., Özkan, C. ve Tanaçan, L. (2023, Mart 15-18). Yapım ve Yıkım Atıklarının Jeopolimer Malzeme Teknolojisinde Değerlendirilmesi [Bildiri]. 3rd International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies (ISSRIS'23). Balıkesir, Türkiye. https://www.researchgate.net/publication/369384690_Yapim_ve_Yikim_Atiklarin_in_Jeopolimer_Malzeme_Teknolojisinde_Degerlendirilmesi_Evaluation_of_Construction_and_Demolition_Wastes_in_Geopolymer_Materials_Technology
- Eldlaal, F. M. A. (2015). Creative visions of modern technology within the framework of the educational process service in the of faculties of Fine Arts “Cooperative learning and interior design”. The Journal of Macro Trends in Technology and Innovation, 3(1), 136-158. <https://macrojournals.com/assets/docs/13TIFa.634143.pdf>
- EYRC, (b.t.). 28 Mayıs 2024. *Mighty House | Palm Desert, Ca.* Eyrc. <https://www.eyrc.com/work/the-mighty-house>
- Fernando, S., Gunasekara, C., Law, D. W., Nasvi, M. C. M., Setunge, S. ve Dissanayake, R. (2021). Life cycle assessment and cost analysis of fly ash–rice husk ash blended alkali-activated concrete. *Journal of Environmental Management*, 295, 113140. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113140>.
- Fletcher Priest Architects. (b.t.). 24 Şubat 2024. *6 Bevis Marks* [Video]. <https://www.fletcherpriest.com/projects/6-bevis-marks>
- Frey, T. (24 Nisan 2014). 04 Mart 2024. *Disposable Houses*. Futurist Speaker. <http://www.futuristspeaker.com/business-trends/disposable-houses/>
- Galjaard, S., Hofman, S., Perry, N. ve Ren, S. (17-20 Ağustos 2015). Optimizing structural building elements in metal by using additive manufacturing [Bildiri]. IASS 2015 Amsterdam Symposium: Future Visions – Emerging Technologies: 3D Printing and Robotics, 1-12. Amsterdam, Hollanda. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
- Gardiner, J. (2011). *Exploring the emerging design territory of construction 3D printing - project led architectural research* [Doktora Tezi]. RMIT University.

- Gebhardt, A. ve Hötter, J. S. (2016). Additive Manufacturing, 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich: HANSER Publications.
- Geopolymer International. (b.t.). *Geopolymer Applications* [Broşür].
https://drive.google.com/file/d/1-amr6_KAUX9qpFBsk4h8rtvZ6PiwxA40/view
- Ghaffar, S. H., Corker, J., ve Fan, M. (2018). Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*, 93, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>
- Goidea, A., (2017). *Batiprint3D Project Report* [Rapor], University of Nantes.
<http://www.3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/Batiprint3D.pdf>
- Gonzales, D. S. ve Alvarez, A. G. (2018). *Additive Manufacturing Feasibility Study&Technology Demonstration*. European Defence Agency AM State of the Art&Strategic Report. https://eda.europa.eu/docs/default-source/projects/eda-am-study-and-strategic-report_v6.pdf
- Gökhan, Ç. ve Baytin, D., (1979). Yapımda endüstrileşme, *Mimarlık Dergisi*, 156(1), 72-79. <http://dergi.mo.org.tr/dergiler/4/350/5079.pdf>
- Gündüzalp, A. A. ve Güven, S. (2016). Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya Belediyesi ve semt tüketicileri örneği. *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*, 9(1), 1-19.
https://www.researchgate.net/profile/Aysel-Guenduezalp/publication/295693401_Waste_and_Waste_Types_Waste_Management_Recycling_and_Consumer_Cankaya_Municipality_and_Instance_of_Neighbourhood_Consumers/links/56cc765f08ae1106370d924b/Waste-and-Waste-Types-Waste-Management-Recycling-and-Consumer-Cankaya-Municipality-and-Instance-of-Neighbourhood-Consumers.pdf
- Güner, U., (2020). *Çevresel Sürdürülebilirlik*. Utku Güner.
- Gürsel Petek, A. ve Ostertag, C. (2019). Life-cycle assessment of high-strength concrete mixtures with copper slag as sand replacement. *Advances in civil engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6815348>

- Hager, I., Golonka, A. ve Putanowicz, R. (2016). 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?. *Procedia Engeneering*, 151, 292 – 299. <https://doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.357>
- Hiçyılmaz, B., Alataş, S. ve Karakaya, E. (2022). Sanayide karbonsuzlaşma: malzeme etkinliği stratejilerinin rolü. *Çevre Şehir ve İklim Dergisi*, 1(2), 81-118. <https://dergipark.org.tr/en/pub/csid/issue/72150/1120787>
- Hinczewski, C., Corbel, S. ve Chartier, T. (1998), Stereolithography for the fabrication of ceramic three- dimensional parts, *Rapid Prototyping Journal*, 4(3), 104-111. <https://doi.org/10.1108/13552549810222867>
- Hive3d Builders. (22 Nisan 2024a). 30 Mayıs 2024. *Sustainable construction is here. Explore how our eco-friendly 3D printed houses are making a difference.* [Fotoğraf]. Facebook. <https://www.facebook.com/photo/?fbid=122178278888025568&set=pcb.122178278936025568>
- Hive3d Builders. (26 Nisan 2024b). 30 Mayıs 2024. *Discover the speed and scalability of 3D printed construction. Transforming landscapes and lives faster than ever before* [Fotoğraf]. Facebook. <https://www.facebook.com/photo/?fbid=122179160078025568&set=pcb.122179160138025568>
- Hive3d Builders. (29 Mart 2024c). 30 Mayıs 2024. *Step into futuristic homes with innovative construction. Where every corner is a testament to quality, elegance, and affordability.* [Fotoğraf]. Facebook. <https://www.facebook.com/photo/?fbid=122173057748025568&set=pcb.122173057970025568>
- Hive3D Builders. (b.t.). 29 Mayıs 2024. The Casitas @ The Halles. <https://hive3dbuilders.com/projects>
- Holcim, (14 Aralık 2023). 1 Nisan 2024. *Holcim Launches Phoenix, The First-Of-Its-Kind Circular 3d-Printed Concrete Bridge.*

<https://www.holcim.com/media/company-news/phoenix-circular-3D-printed-concrete-bridge>

Holcim. (b.t.a). 1 Nisan 2024. *Phoenix Rises from Striatus*.
<https://www.holcim.com/who-we-are/our-stories/phoenix-bridge>

Holcim. (b.t.b). 3 Nisan 2024. *ECOPLANET*. <https://www.holcim.com/what-we-do/our-building-solutions/cement/ecoplanet>

Hoşkara, E. ve Sey, Y. (2009). Ülkesel Koşullar Bağlamında Sürdürülebilir Yapım. *İTÜDERGİSİ/a*, 7(1), 50-61.
http://itudergi.itu.edu.tr/index.php/itudergisi_a/article/viewFile/267/226

Huo, W., Zhu, Z., Chen, W., Zhang, J., Kang, Z., Pu, S. ve Wan, Y. (2021). Effect of synthesis parameters on the development of unconfined compressive strength of recycled waste concrete powder-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 292, 123264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123264>.

Huovila, P. ve Koskela, L. (1998). Contribution of the principles of lean construction to meet the challenges of sustainable development. 6th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Guarujá, São Paulo, Brazil. 13-15. https://www.researchgate.net/profile/Lauri-Koskela-2/publication/228706368_Contribution_of_the_principles_of_lean_construction_to_meet_the_challenges_of_sustainable_development/links/00b495289507cc3f3c000000/Contribution-of-the-principles-of-lean-construction-to-meet-the-challenges-of-sustainable-development.pdf

IAAC. (18 Ekim 2022). 21 Mayıs 2024. IAAC builds TOVA: Spain's first 3D printed prototype using earth [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=17K4KwTJtC8>

ICON – 3D Tech. (10 Eylül 2019). 27 Mayıs 2024. *ICON 3D Printing for the Homeless in Austin* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=is2UVodNph>

- ICON - 3D Tech. (2 Mart 2022). 28 Mart 2024. *ICON's House Zero - 3D-printed Home Pushing Boundaries of Sustainable Architecture & Design* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=c4X_tT5syCA
- ICON - 3D Tech. (21 Şubat 2020). *ICON - 3D Printing Homes with Vulcan II* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=9MZcuMjZ2vU>
- ICON. (b.t.a). 25 Mart 2024. *House Zero*. https://codex.iconbuild.com/collection/exploration_id/floorplan/floor_plan_exploration_house_zero_id/?dollhouse_mode=true
- ICON. (b.t.b). 6 Mayıs 2024. *ICON homes being printed in Nacajuca, Mexico* [Fotoğraf]. https://dmuvf4m79e02w.cloudfront.net/NewStoryProject_ICON_Mexico_PhotoCredit_JoshuaPerez_4.jpg
- Ilcan, H., Sahin, O., Kul, A., Yildirim, G. ve Sahmaran, M. (2022). Rheological properties and compressive strength of construction and demolition waste-based geopolymer mortars for 3D-Printing. *Construction and Building Materials*, 328, 127114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127114>.
- Ingersoll Machine Tools. (23 Kasım 2022). 3 Nisan 2024. *University of Maine's BioHome3D House 3D Printed with MasterPrint®* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=9ur6LiZCfi8>
- IPCC. (2005). *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. UNEP Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf
- IRP. (2020). *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*. Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N. A report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.3542680>

- İnsapedia, (28 Haziran 2019). 13 Mart 2024. *Yüksek Fırın Cürufu* [Fotoğraf].
<https://insapedia.com/yukse-firin-curufu/>
- Jamie, D. (31 Ocak 2018). 10 Nisan 2023. *3D printing: The future of construction*.
3D Natives. <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-construction-310120184/>
- Jarett Gross, (22 Ağustos 2020). 29 Mayıs 2024. *Tiny House made with 3D Printed Synthetic Stone | Mighty Buildings Raised \$30M from Silicon Valley* [Video].
YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=zfPCJJbnj6k>
- Jarett Gross. (2 Mart 2022). *How ICON 3D Printed House Zero* [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=HYPLR7f9zno>
- Kamin, D., (29 Eylül 2021). How an 11-Foot-Tall 3-D Printer Is Helping to Create a
Community. *The New York Times*.
<https://www.nytimes.com/2021/09/28/business/3D-printing-homes.html>
- Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E. ve Khoshnevis, B. (2017). Cementitious
materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing
mixture. *Construction and Building Materials*, 145, 639-647.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>
- Khan, S. A., Koç, M. ve Al-Ghamdi S. G. (2021). Sustainability assessment,
potentials and challenges of 3D printed concrete structures A systematic review
for built environmental applications. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127027.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127027>
- Khoshnevis, B. (1998). Innovative rapid prototyping process makes large sized,
smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials, *Materials
Technology*, 13(2), 52-63. <https://doi.org/10.1080/10667857.1998.11752766>
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting-related robotics
and information technologies. *Automation in construction*, 13(1), 5-19.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>
- Khoshnevis, B. (25 Haziran 1996). *Additive fabrication apparatus and method*. USA
patent application 08/382,869.

<https://patentimages.storage.googleapis.com/22/9b/ed/318df740d845a3/US5529471.pdf>

Khoshnevis, B., Bukkapatnam, S., Kwon, H. ve Saito, J. (2001). Experimental investigation of contour crafting using ceramics materials. *Rapid Prototyping Journal*, 7(1), 32-42. <https://doi.org/10.1108/13552540110365144>

Kibert, C. J. (1994). Establishing principles and a model for sustainable construction [Bildiri]. Proceedings of the First International Conference on Sustainable Construction, CIB Task Group 16, Tampa, Florida, USA.

Kidwell, J. (2017). *Best practices and applications of 3D printing in the construction industry* [Lisans Tezi, Kaliforniya Politeknik Devlet Üniversitesi]. Digital Commons Cal Poly.

Klepanova, E. (16 Mayıs 2014). 17 Mayıs 2024. *Student Works: 3D printing the new millennial domicile with UCLA and HUD* [Proje Anlatımı]. Archinect. <https://archinect.com/features/article/99718581/student-works-3d-printing-the-new-millennial-domicile-with-ucla-and-hud>

Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G. ve Galetakis, M. (2015). Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. *Advanced Powder Technology*, 26(2), 368-376. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2014.11.012>.

Koslow, T. (30 Ağustos 2016). 23 Mayıs 2024. *DUS Architects Constructs 3D Printed "Urban Cabin" in Amsterdam*. 3dprint. <https://3dprint.com/147687/dus-architects-urban-cabin/>

Kudryavtseva, I. S. ve Mesyachenko, A. A. (2016). 3D printery v stroitel'stve. Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Innovatsii v stroitel'stve, (2), 38-41. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25897847_50982797.pdf

- Kugler, F., Krcmar, W. ve Teipel, U. (2023). Influence of brick flour or concrete rubble on the mechanical properties of fly-ash-based geopolymers. *Ziegelindustrie Int*, 1, 20-32.
- Kumar, V. ve Dutta, D. (1997). An assessment of data formats for layered manufacturing. *Advances in Engineering Software*, 28(3), 151-164. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(96\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(96)00050-6)
- Kurda, R., Silvestre, J.D. ve de Brito, J. (2018). Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. *Resour. Conserv. Recycl.*, 139, 407-417. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.004>.
- Labonnote, N., Ronnquist, A., Manum, B., & R  ther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in construction*, 72, 347-366. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>
- Lanko, A. (2018). Additive technologies in construction of temporary housing for victims of natural disasters and other emergencies. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017* içinde (1102-1108). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_119
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. ve Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction*, 21, 262-268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>
- Liu, W., Ge, Y., Zhou, Z. ve Zhang, S. (2017). Multi-source BIM Information Fusion Technology. *J. Inf. Technol. Civil Eng. Archit.*, 9, 23–28. <https://doi.org/10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2017.05.04>
- Mah, C.M., Fujiwara, T., Ho, C.S., (2018). Life cycle assessment and life cycle costing toward eco-efficiency concrete waste management in Malaysia. *J. Clean. Prod.* 172, 3415-3427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.200>

- Maine Monitor. (5 Şubat 2023). 3 Nisan 2024. Building the future: University of Maine home to world's largest 3D printer [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=X1ihWUuZN2E>
- Mankin, E. (2008). 10 Nisan 2023. *Caterpillar Inc. Funds Viterbi 'Print-A-House' Construction Technology.* USC Viterbi. <https://viterbi.usc.edu/news/news/2008/caterpillar-inc-funds.htm>
- Martínez Aragay, J. (2023). *Rephrasing construction: the emergence of 3D printed clay building* [Lisans Tezi, Katalonya Teknik Üniversitesi]. UPCommons. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/388054>
- Masera, G., Muscogiuri, M., Bongiovanni, A. ve Colombo, M. (2017). Towards a new digital craft. Potential and limitations of 3D printing in architecture and construction. *ISTeA. Re-shaping the construction industry. Maggioli Editore*, 83-92.
- Matos, J., Solgaard, A., Santos, C., Silva, M. S., Linneberg, P., Strauss, A., ... ve Akiyama, M. (2018). Life cycle cost, as a tool for decision making on concrete infrastructures. In Hordijk, D., Luković, M. (Ed.), *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. içinde (1832-1839). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_210.
- McGrath, T. E., Cox, S., Soutsos, M., Kong, D., Mee, L. P. ve Alengaram, J. U. (2018). Life cycle assessment of geopolymer concrete: A Malaysian context. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 431, 092001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/431/9/092001>
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement Concr. Compos.*, 31(8), 601-605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>.
- Micallef, J. (2015). *Beginning design for 3D printing*, Apress.
- Mighty Buildings, (b.t.a). 28 Mayıs 2024. *Build quality, sustainable homes faster*. <https://www.mightybuildings.com/projects-and-designs>

- Mighty Buildings, (b.t.b). 28 Mayıs 2024. *Quality and speed with a revolutionary kit of parts*. <https://www.mightybuildings.com/product>
- Mighty Buildings, (b.t.c). 28 Mayıs 2024. *Confronting two crises*. <https://www.mightybuildings.com/sustainability>
- Mighty Buildings, (10 Ocak 2023). 28 Mayıs 2024. Mighty Buildings Overview [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=AwbX9uS_nDA
- Mikahila, L. (9 Kasım 2021). 21 Mayıs 2024. *WASP 3D-Printed Dior Pop-up Store Using EcoFriendly Materials*. 3D Natives. <https://www.3dnatives.com/en/wasp-3dprinted-dior-store-eco-friendly-materials-091120>
- Moretti, F. (8 Kasım 2021). 17 Mayıs 2024. *WASP 3D prints a unique concept store in collaboration with Dior*. 3dwasp. https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-pop-up-store-wasp-dior/?_gl=1*ygekjf*_up*MQ..*_ga*MTgzNzU4NzU0MS4xNzE1OTMyNzc2*_ga_T6FJKDX4T8*MTcxNTk1MDk4NS4yLjAuMTcxNTk1MDk4NS4wLjAuMA.
- Morgante, A. (2011). Radiolaria pavillion. R. Glynn ve B. Sheil, (Ed.), *Fabricate 2011: making digital architecture* içinde (232 – 235). Londra, UCL Press.
- MX3D. (1 Nisan 2018). 20 Mart 2024. *MX3D printed bridge update 2018* [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=STAHy6hTP14>
- MX3D. (b.t.). 27 Şubat 2024. *MX3D Bridge*. <https://mx3d.com/industries/mx3d-bridge/>
- NAARO. (b.t.). 27.03.2024. Striatus [Fotoğraf]. <https://www.naaro.com/projects/striatus/>
- New Story. (10 Mart 2022). 27 Mayıs 2024. *New Story | Welcome Home, Nacajuca* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=FvmyaQLOnAw>
- New Story. (11 Aralık 2019). 27 Mayıs 2024. *New Story + ICON + Échale | “3D Printed Housing for Those Who Need It Most”* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=PbgCu0aUobE>

Orhon, A. V. (2020). Sürdürülebilir Mimarlık Olgusuna Döngüsel Ekonomi Perspektifinden Eytışimsel Bir Bakış. *Ege Mimarlık*, 108(4), 10-117. https://www.researchgate.net/publication/346596608_Surdurulebilir_Mimarlik_Olgusuna_Dongusel_Ekonomi_Perspektifinden_Eytisimsel_Bir_Bakis_A_Dialectic_View_on_Sustainable_Architecture_through_the_Circular_Economy_Perspective

Orhon, A. V. ve Altın, M. (2020), Utilization of Alternative Building Materials for Sustainable Construction, (ed.) İ. Dinçer, C. Ö. Colpan ve M. A.Ezan (Ed.), Environmentally-Benign Energy Solutions (727-750) Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20637-6_36

Ossip van Duivenbode. (b.t.a). 24.02.2024. *Europe Building* [Fotoğraf]. Houseofdus. <https://houseofdus.com/project/europe-building/>

Ossip van Duivenbode. (b.t.b). 23.05.2024. *Urban Cabin / DUS Architects* [Fotoğraf]. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/794855/urban-cabin-dus-architects>

Ozmehmet, D. E. (2008). Dünyada ve Türkiye Sürdürülebilir Kalkınma Yaklaşımları. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 3(12), 1853-1876. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/179214>

Ödenir Bakır, A. ve Orhon, A. V. (26-28 Haziran 2024). *Yapımda Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Sürdürülebilirliğinin Döngüsel Ekonomi Çerçevesinden Değerlendirilmesi* [Bildiri]. 5th International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, Ankara, Türkiye. https://www.eurasiansciencetech.org/bildiri%20taslaklar%C4%B1/Proceeding_Book_EurasianSciEnTech_2024.pdf

Özcan, U. ve Erol, İ., (14-16 Kasım 2018). *Sürdürülebilir Tasarımda Yapı Bilgi Modellemesi (BIM)* [Bildiri]. International Congress On Engineering And Architecture, Alanya. Türkiye.

- Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606-621. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.626011>
- Paköz, B. (2021). [Fotoğraf]. Kişisel fotoğraf arşivi.
- Panda, B., Leite, M., Biswal, B. B., Niu, X. ve Garg, A. (2018). Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures. *Measurement*, 116, 495-506. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.037>
- Parametric Architecture. (18 Mart 2024). 3 Nisan 2024. *Holcim and ZHACode collaborated to 3D-print the Phoenix, using 10 tons of recycled material*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Kvrg0pVGOhs>
- Parkes, J., (23 Nisan 2021). 9 Mayıs 2024. *Tecla house 3D-printed from locally sourced clay*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2021/04/23/mario-cucinella-architects-wasp-3d-printed-housing/>
- Paul, R. ve Anand, S. (2015). A new Steiner patch based file format for additive manufacturing processes. *Computer-Aided Design*, 63, 86-100. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.01.002>
- Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 5, 427-437. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(96\)00166-5](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(96)00166-5)
- Perez, J. (2019). 27 Mayıs 2024. First Set of Homes Completed in Mexico on the World's First 3d-Printed Community Alongside New Story and Echale [Fotoğraf]. Iconbuild. <https://www.iconbuild.com/newsroom/2019-from-the-lab-to-new-homes>
- Petrillo, A., Cioffi, R., De Felice, F., Colangelo, F. ve Borrelli, C. (2016). An environmental evaluation: a comparison between geopolymer and OPC concrete paving blocks manufacturing process in Italy. *Environ. Prog. Sustain. Energy*, 35(6), 1699-1708. <https://doi.org/10.1002/ep.12421>.

- Ponsford, M. ve Glass, N. (14 Şubat 2014). 9 Nisan 2023. *'The night I invented 3D printing'*. CNN. <http://edition.cnn.com/2014/02/13/tech/innovation/the-night-i-invented-3d-printing-chuck-hall/>
- Poullain P., Paquet E., Garnier S. ve Furet B. (2018). *On site deployment of 3D printing for the building construction – The case of YhnovaTM* [Bildiri]. In MATEC Web of Conferences, 163. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816301001>
- Pratt, M. J., Bhatt, A. D., Dutta, D., Lyons, K. W., Patil, L. ve Sriram, R. D. (2002). Progress towards an international standard for data transfer in rapid prototyping and layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 34(14), 1111-1121. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00189-0](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00189-0).
- Puertas, F., Barba, A., Gazulla, M. F., Gómez, M. P., Palacios, M. ve Martínez-Ramírez, S. (2006). Ceramic wastes as raw materials in Portland cement clinker fabrication: characterization and alkaline activation. *Materiales de Construcción*, 56(281), 73-84. <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i281.94>.
- Pushkar, S. (2017). Waste and by-product status of slag and concrete environmental damage. *Can. J. Civ. Eng.*, 44 (9), 743-750. <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0036>.
- Pushkar, S. (2019). Life-cycle assessment of the substitution of sand with coal bottom ash in concrete: two concrete design methods. *Appl. Sci.*, 9(17), 3620. <https://doi.org/10.3390/app9173620>.
- Raun, S. ve Unluer, C. (2017). Influence of supplementary cementitious materials on the performance and environmental impacts of reactive magnesia cement concrete. *J. Clean. Prod.*, 159, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.044>.
- Ravenscroft, T. (5 Şubat 2019). 11 Mart 2024. *World's longest 3D-printed concrete bridge opens in Shanghai*. Deezen. <https://translate.google.com/details?sl=en&tl=tr&text=World%27s%20longest%203D-printed%20concrete%20bridge%20opens%20in%20Shanghai&op=translate>

- Raza, M. H. ve Zhong, R. Y. (2022). A sustainable roadmap for additive manufacturing using geopolymers in construction industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 186, 106592. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106592>.
- Regan Morton. (2019). 27 Mayıs 2024. Vulcan II Printing A 500 Sq Ft Home At Community First! Village [Fotoğraf]. Iconbuild. <https://www.iconbuild.com/newsroom/2019-from-the-lab-to-new-homes>
- Reig, L., Tashima, M. M., Soriano, L., Borrachero, M. V., Monzó, J. ve Payá, J. (2013). Alkaline activation of ceramic waste materials. *Waste and Biomass Valorization*, 4, 729-736. <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9197-z>.
- Ren, X. ve Zhang, L. (2019). Experimental study of geopolymer concrete produced from waste concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(7), 04019114. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002750](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002750).
- RENCA. (b.t.). 6 Şubat 2024. Geopolimer Cement. <https://www.renca.org/geopolymer-101>
- Revitt, M. (2022). *Celebrating the Climate Change Institute's 50th anniversary, first 100% bio-based 3D-printed home, and more!* [Broşür]. <https://umaine.edu/news/blog/2022/11/21/first-100-bio-based-3d-printed-home-unveiled-at-the-university-of-maine/>
- Richard, R. B. (2005). Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics. *Automation in construction*, 14(4), 442-451. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.09.009>
- Ryder, G., Ion, B., Green, G., Harrison, D. ve Wood, B. (2002). Rapid design and manufacture tools in architecture. *Automation in construction*, 11(3), 279-290. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00111-4](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00111-4).
- S43D. (b.t.). 14 Mayıs 2024. 3d Yazıcılarla Mimari Maket Yapımı [Fotoğraf]. <https://s43d.com/3d-baski-hizmetleri/3d-yazicilarla-mimari-maket-yapimi/#>

- SAGA Space Architects. (2023). 28 Mayıs 2024. *3D-printed Community House*. Saga. <https://www.saga.dk/projects/akf>
- Sakin, M. ve Kiroglu, Y. C. (2017). 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*, 134, 702-711. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562>
- Sepasgozar, S. M., Shi, A., Yang, L., Shirowzhan, S. ve Edwards, D. J. (2020). Additive manufacturing applications for industry 4.0: A systematic critical review. *Buildings*, 10(12), 231. <https://doi.org/10.3390/buildings10120231>
- Seto, K. E., Churchill, C.J. ve Panesar, D.K. (2017). Influence of fly ash allocation approaches on the life cycle assessment of cement-based materials. *J. Clean. Prod.*, 157, 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.093>.
- Singh, M., Choudhary, K., Srivastava, A., Singh Sangwan, K. ve Bhunia, D. (2017). A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. *J. Build. Eng.*, 13, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.07.009>.
- Skanska. (b.t.). 24 Şubat 2024. *New techniques and material in the heart of the city*. <https://www.skanska.co.uk/expertise/projects/57267/6-Bevis-Marks>
- Smith, S.H. ve Durham, S.A. (2016). A cradle to gate LCA framework for emissions and energy reduction in concrete pavement mixture design. *Int. J. Sustain. Built Environ.*, 5(1), 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.01.001>.
- Sophia van den Hoek, (b.t.). 23 Mayıs 2024. *Urban Cabin / DUS Architects* [Fotoğraf]. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/794855/urban-cabin-dus-architects>
- Starredsky. (2023). 29 Mayıs 2024. 3D Printing. StarredSkyDevelopment. <https://www.starredskydevelopment.com/about-3>
- Sun, Z., Cui, H., An, H., Tao, D., Xu, Y., Zhai, J. ve Li, Q. (2013). Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic. *Construction and Building Materials*, 49, 281-287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.063>.

- Şenel, A. (2010). *Sürdürülebilir bina yapım ilkelerinin ve yeni yaklaşımların incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Taylor-Hochberg, A. (16 Mayıs 2014). 17 Mayıs 2024. *Student Works: 3D printing the new millenial domicile with UCLA and HUD*. Archinect. <https://archinect.com/features/article/99718581/student-works-3d-printing-the-new-millenial-domicile-with-ucla-and-hud>
- Teh, S.H., Wiedmann, T., Castel, A. ve de Burgh, J. (2017). Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia. *J. Clean. Prod.*, 152, 312-320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.122>.
- Teizer, J., Blickle, A., King, T., Leitzbach, O., Guenther, D., Mattern, H. ve König, M. (2018). BIM for 3D Printing in Construction. *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice* içinde (421-446). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_26
- Tobi, A. M., Omar, S. A., Yehia, Z., Al-Ojaili, S., Hashim, A. ve Orhan, O. (2018). *Cost viability of 3D printed house in UK*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 319, p. 012061, Yogyakarta, Indonesia. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/319/1/012061>
- Tokgöz, H., Koçak, Y. (2009), Modüler Koordinasyonun Bina Tasarımına Uygulanması. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 020, 83-92. <https://dergipark.org.tr/en/pub/dpufbed/issue/36099/405717>
- Torres-Carrasco, M. ve Puertas, F. (2015). Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. *Journal of cleaner production*, 90, 397-408. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.074>.
- Tuyan, M., Andiç-Çakır, Ö. ve Ramyar, K. (2018). Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer. *Composites Part B: Engineering*, 135, 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.013>.

- Türkçü, H., Ç. (2015). *YAPIM – İlkeler – Malzemeler – Yöntemler – Çözümler* (5. Baskı, 13-15). Birsen Yayınevi.
- Ulugöl, H., Kul, A., Yıldırım, G., Şahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D. ve Ashour, A. (2021). Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124358>.
- Vafaei, M. ve Allahverdi, A. (2017). High strength geopolymer binder based on waste-glass powder. *Advanced Powder Technology*, 28(1), 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.09.034>.
- Valente, M., Sibai, A. ve Sambucci, M. (2019). Extrusion-based additive manufacturing of concrete products: revolutionizing and remodeling the construction industry. *Journal of Composites Science*, 3(3), 88. <https://doi.org/10.3390/jcs3030088>.
- Valipour, M., Yekkalar, M., Shekarchi, M. ve Panahi, S. (2014). Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments. *J. Clean. Prod.*, 65, 418-423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.055>.
- Vander Kooij, D., (1 Aralık 2010). *2010, Endless Process, Dirk Vander Kooij* [Video]. Vimeo. <https://vimeo.com/17358934>
- Visit Dubai. (b.t.). 4 Mart 2024. *Geleceğin Ofisi*. <https://www.visitdubai.com/tr/places-to-visit/the-office-of-the-future>
- Volpe, S., Sangiorgio, V., Petrella, A., Coppola, A., Notarnicola, M. ve Fiorito, F. (2021). Building envelope prefabricated with 3D printing technology. *Sustainability*, 13(16), 8923. <https://doi.org/10.3390/su13168923>
- Wakefield, E. (19 Aralık 2023). 28 Mayıs 2024. Copenhagen receives first low CO2 concrete 3D printed building. VoxelMatters. <https://www.voxelmatters.com/copenhagen-receives-first-low-co2-concrete-3d->

printed-

building/#:~:text=The%20building%20was%20created%20using,30%25%20lower%20than%20normal%20cement.

Wang, L. (25 Temmuz 2015). 13 Mart 2024. *Chinese company 'builds' 3D-printed villa in less than 3 hours*. Inhabitat. <https://inhabitat.com/chinese-company-builds-3d-printed-villa-in-less-than-3-hours/>

WASP Press Office. (b.t.). 9 Mayıs 2024. *The challenge of TECLA, the eco-sustainable 3D printed habitat, took form. "From the shapeless earth to the earth as house shaped"*. 3dwasps. https://www.dropbox.com/sh/emizcvzuat21bvi/AABFquTghyjdWpAzJy3Wh34ha/Tecla%202021_3D%20Printing%20Release/Tecla%20WASP-ENG_19012020.docx?dl=0

Williams II, R. L., Albus, J. S. ve Bostelman, R. V. (2004). Self-contained automated construction deposition system. *Automation in Construction*, 13(3), 393-407. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.01.001>

Winsun, (18 Ocak 2015). 24 Mayıs 2024. *Winsun is the world's highest 3D printed building*. Winsun Global. https://winsun-global.com/News/news_inner/id/467

Winsun, (18 Şubat 2020a). 25 Mayıs 2024. *Yingchuang 3D printed isolated house public welfare recruitment plan Q & A*. Winsun Global. https://winsun-global.com/News/news_inner/id/533

Winsun, (21 Şubat 2020b). 24 Mayıs 2024. *Yingchuang manufactures world's first 3D printed commercial building listed in Guinness World Records*. Winsun Global. https://winsun-global.com/News/news_inner/id/549

Winsun, (b.t.a). 3 Mayıs 2024. *Surplus and world's first 3 d printing 1100 m² hardcover villa*. Winsun3D. https://winsun3d.com/En/News/news_inner/id/466

Winsun, (b.t.b). 24 Mayıs 2024. *Winsun is the world's first 3D printed office building*. Winsun Global. https://winsun-global.com/News/news_inner/id/465

- Wu, P., Wang, J. ve Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>
- Xia, M. ve Sanjayan, J. (2016). Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications. *Materials & Design*, 110, 382-390. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.136>.
- Xiao, R., Ma, Y., Jiang, X., Zhang, M., Zhang, Y., Wang, Y., ... ve He, Q. (2020). Strength, microstructure, efflorescence behavior and environmental impacts of waste glass geopolymers cured at ambient temperature. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119610. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119610>. Zaha Hadid Architects. (5 Ocak 2024). 1 Nisan 2024. *Phoenix: the new 3D-Printed Concrete Bridge*. <https://www.zaha-hadid.com/2024/01/05/phoenix-the-new-3d-printed-concrete-bridge/>
- Yao, Y., Hu, M., Di Maio, F. ve Cucurachi, S. (2020). Life cycle assessment of 3D printing geo-polymer concrete: An ex-ante study. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 116-127. <https://doi.org/10.1111/jiec.12930>.
- Yuan, G. (12 Ocak 2019). 11 Mart 2024. *The world's largest concrete 3D printed pedestrian bridge* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=C5e0PfTMXGU>
- Zaneldin, E., Ahmed, W., Mansour, A. ve Hassan, A. E. (2021). Dimensional stability of 3D printed objects made from plastic waste using FDM: potential construction applications. *Buildings*, 11(11), 516. <https://doi.org/10.3390/buildings11110516>
- Zhihong, L., Yanjing, D., Yi, Y. ve Jiayue, Y. (2017). BIM Application in the Project of Urumchi International Highway-railway Combined Passenger Station and Its North Square Entrance. *Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture*, 9(1), 28-34. <https://doi.org/10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2017.01.05>