

**KATMANLI ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ İLE ÜRETİLEN
GİYİLEBİLİRLERDE HİBRİT YAPILARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR
TASARIM VE ÜRETİM BAKIMINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şükran ÖZKAN

**Enformatik Anabilim Dalı
Bilgisayar Ortamında Sanat ve Tasarım Programı**

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Bülent Onur TURAN

HAZİRAN 2022

MİMAR SİNAN GÜZEL SANATLAR ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KATMANLI ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ İLE ÜRETİLEN
GİYİLEBİLİRLERDE HİBRİT YAPILARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR
TASARIM VE ÜRETİM BAKIMINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şükran ÖZKAN

**Enformatik Anabilim Dalı
Bilgisayar Ortamında Sanat ve Tasarım Programı**

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Bülent Onur TURAN

HAZİRAN 2022

Şükran ÖZKAN tarafından hazırlanan “Katmanlı Üretim Teknolojileri İle Üretilen Giyilebilirlerde Hibrit Yapıların Sürdürülebilir Tasarım ve Üretim Bakımından Değerlendirilmesi” adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

.....
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Enformatik Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Bülent Onur TURAN _____

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Nazım Ziya PERDAHÇI _____

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Suzan GİRGİNKAYA AKDAĞ ____

Üye : _____

Üye : _____

Bu tez, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım klavuzuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ücret karşılığı başka kişilere yazdırmadığımı (dikte etme dışında), uygulamalarımı yaptırmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

Şükran ÖZKAN

2022





Teşekkürler,



ÖNSÖZ

Tez danışmanım ve mentörüm Dç. Dr. Bülen Onur Turan’a, bu yolculukta bana sürekli anlayış ve teşvik ile rehberlik ettiği için teşekkür etmek isterim. Araştırma konumun belirlenmesinde yaratıcı vizyonu, çağdaş anlayışıyla yol gösterdiği ve araştırma sürecinde bilgi ve deneyimleriyle desteği için teşekkürü borç bilirim. Araştırmamı akademik bir çerçevede geliştirebilmem, sayenizde oldu, önerileriniz, stratejileriniz ve anlatımınız için teşekkür ederim.

Tez savunmamda bulunan çok kıymetli hocalarımız Dr. Öğr. Üyesi Nazım Ziya Perdahçı ve Dr. Öğr. Üyesi Suzan Girginkaya Akdağ’a kendi disiplinlerinin bakış açısıyla araştırmamın gelişmesindeki yardımlarından ötürü teşekkür ederim. Nazım hocam, tezimin yöntem bakımından, bilimsel bir temele oturarak uygun hale gelmesi için, her zamanki zarif ve yapıcı eleştirinizle yönlendirdiğiniz için teşekkür ediyorum. Suzan hocam, araştırmamın şekillenmesinde yaratıcı bakış açınız ve yorumunuzla değer kattığınız için çok teşekkür ederim.

Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Salih Ofloğlu’na ayrıca teşekkür etmek isterim. Bölüme kabulümden bu güne, entelektüel teşvikleri ve her anlamda destekleri için kendisine ve kıymetli hocamız nezdinde bölümün diğer değerli öğretim üyeleri Doç. Dr. Seher Başlık, Dr. Öğr. Gör. Sertaç Karsan, Dr. Öğr. Gör. Salih Akkemik, Dr. Öğr. Gör. Kemal Şahin’e teşekkürü borç bilirim. Bilgisayar Ortamında Sanat ve Tasarım Bölümündeki kıymetli hocalarıma, yarattığınız çok disiplinli, paylaşım ve katılımlı, ilham dolu bir çalışma ortamı için ayrıca teşekkür etmek isterim.

Değerli ailem, hayatımın her aşamasında büyük bir özveriyle gösterdiğiniz manevi destek, anlayış, sonsuz güven ve teşvik için sizlere teşekkürü borç bilirim.

Ocak, 2022
Şükran ÖZKAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
TABLO LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.1.1 Araştırma Soruları	4
1.2 Yöntem	4
1.2.1 Veri Toplama Yöntemi	5
1.2.2 Tezin Analiz Yöntemi	5
1.3 Kapsam ve Kısıtlamalar	5
2. KÜRESEL ÜRETİM TRENDLERİNE GENEL BAKIŞ	7
2.1 Endüstriyel Evrim	7
2.1.1 Endüstrileşmenin Küresel Etkileri	10
2.2 İnsan Endüstri Değer Zincirinin Evrimi	12
2.2.1 Paradigmal Değişim	13
3. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK	17
3.1 Sürdürülebilir Kalkınmanın Önemi	17
3.2 XXI. Yüzyılın Sürdürülebilir Üretim Trendleri	20
3.2.1 Sürdürülebilir Üretim	21
3.2.2 Döngüsel Üretim	23
3.2.3 Endüstri 4.0 ve Akıllı Üretim.....	25
4. KATMANLI ÜRETİM.....	27
4.1 Üç Boyutlu (3B) Baskı Teknolojisinin Gelişimi.....	28
4.1.1 Üç Boyutlu (3B) Baskı Teknoloji Türleri	30
4.1.1.1 Stereolitografi.....	30
4.1.1.2 Sayısal Işık Projeksiyonu	30
4.1.1.3 Seçici Lazer Sinterleme.....	31
4.1.1.4 Kaynaştırılmış Biriktirme Modelleme	31
4.1.1.5 PolyJet Modelleme.....	32
4.1.2 Üç Boyutlu (3B) Baskı Malzemeleri	33
4.1.2.1 Polimerler.....	34
4.2 Dört Boyutlu (4B) Baskı Teknolojisi	35
4.2.1 Dört Boyutlu (4B) Baskının Akıllı Malzemeleri	36
4.2.1.1 Dört Boyutlu (4B) Biyo Baskı	38
4.2.2 Malzeme Tasarım Konsepti	39

4.3 Üç Boyutlu (3B) Baskı Sürecinin Uygulama Aşamaları.....	40
4.3.1 Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD).....	41
4.3.1.1 Üç Boyutlu Tarama	41
4.3.1.2 Üç Boyutlu Modelleme ve Sayısal Tasarım Araçları.....	42
4.3.1.3 Parametrik Tasarım ve Algoritma	43
4.3.2 Üç Boyutlu (3B) Baskı Dosya Standartları	45
4.3.3 Üç Boyutlu (3B) Baskı için Temel Tasarım Kuralları	47
4.3.4 Katmanlı Üretim Teknolojisinin Seçimi	50
4.3.5 Çevrimiçi Hizmet Platformları	51
5. TASARIM, MALZEME ve KATMANLI ÜRETİM DEĞERLENDİRMESİ	53
5.1 Sürdürülebilirlik için Tasarım	53
5.2 Malzeme Ekolojisi.....	56
5.3 Katmanlı Üretim Teknolojileri ile Üretilmiş Giyilebilir Uygulamalar	57
5.3.1 Seçici Lazar Sinterleme Teknolojisi Uygulamaları	57
5.3.2 Kaynamış Biriktirme Modelleme Teknolojisi Uygulamaları.....	63
5.3.3 Stereolitografi Teknolojisi Uygulamaları.....	64
5.3.4 Sayısal Işık Projeksiyonu Teknolojisi Uygulamaları	65
5.3.5 PolyJet Modelleme Teknolojisi Uygulamaları.....	66
5.4 Analiz Yöntemi	74
5.4.1 Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (SYDD).....	75
5.4.2 Niteliksel Analiz.....	76
5.4.3 Önceki Çalışmalar	80
6. ARAŞTIRMA SORULARININ TARTIŞILMASI	89
6.1 Araş. Sr. 1: 3B Baskı Yöntemi, Giyilebilir Uygulamalara Ne Tür Bir Tasarım Yeniliği Getirmektedir?.....	91
6.1.1 Mikro Seviyede Malzeme Tasarım Özellikleri	92
6.1.2 Makro Seviyede Parça Tasarım Özellikleri	95
6.1.3 Alan Düzeyinde Ürün Tasarım Özellikleri.....	98
6.2 Araş. Sr. 2: Katmanlı Üretim, Çok Malzemeli, Çok İşlevli, Özelleştirilmiş Parçalar Üretebilmesi Bakımından, Sürdürülebilir Bir Üretim Yöntemi Midir?...101	
6.3 Araş. Sr. 3: Tasarım Sürecinde Nesnel ve Görselleştirme Becerilerinin Kombinasyonu Bakımından Katmanlı Üretim ve 3B Baskı Tasarımı İçin 3B CAD Araçlarının Olanakları Nelerdir?.....106	
6.4 Araş. Sr. 4: Katmanlı Üretimin Avantajları ve Kısıtlamaları Nelerdir?.....109	
6.4.1 SYDD Değerlendirmesi	110
6.5 Döngüsel Ekonomide Katmanlı Üretimin Sürdürülebilirliği.....119	
6.5.1 Hammadde.....	121
6.5.2 Tasarım.....	123
6.5.3 Üretim.....	124
6.5.4 İşlem Sonrası, Dağıtım.....	125
6.5.5 Kullanım.....	125
6.5.6 Toplama, Geri Dönüş, Atık.....	126
7. SONUÇLAR.....	127
7.1 Bulgular.....	127
7.1.1 Vaka İncelemesine Dair Bulgular.....	127
7.1.1.1 Giyilebilir Ürünlerde Katmanlı Üretimin Mikro Seviyede Özellikleri.....	128
7.1.1.2 Giyilebilir Ürünlerde Katmanlı Üretimin Makro Seviyede Özellikleri.....	128

7.1.1.3 Giyilebilir Ürünlerde Katmanlı Üretimin Ürün Seviyesinde Özellikleri.....	129
7.1.2 Sistematik Literatür Taramasına Dair Bulgular.....	131
7.1.3 3B CAD ve 3B Baskı Entegrasyonuna Dair Bulgular.....	132
7.1.4 SYDD Analizine Dair Bulgular.....	133
7.2 Strateji ve Eylem Önerileri.....	134
7.3 Gelecek Çalışma Önerileri.....	135
7.4 Sonuç.....	136
KAYNAKÇA.....	139
EKLER	151
EK A.1 : Katmanlı Üretim Teknolojileri Tablosu.....	151



KISALTMALAR

3BB-(3DP)	: Üç Boyutlu Baskı
4BB-(4DP)	: Dört Boyutlu Baskı
6R	: R Stratejisi
AB	: Avrupa Birliği
ABS	: Akrilonitril Bütadiyen Stiren
AMF	: Eklemeli Üretim Formatı
ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
BDT-(CAD)	: Bilgisayar Destekli Tasarım
BDÜ-(CAM)	: Bilgisayar Destekli Üretim
BİT-(ICT)	: Bilgi ve İletişim Teknolojileri
BM-(UN)	: Birleşmiş Milletler
BT-(CT)	: Bilgisayarlı Tomografi
CDLP	: Sürekli Doğrudan Işık İşleme Teknolojisi
DARPA	: ABD Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı
DLP	: Sayısal Işık İşleme Teknolojisi
E4.0-(I4.0)	: Endüstri 4.0
ESE-(TBL)	: Sürdürülebilir Kalkınma (Ekoloji-Sosyal-Ekonomi)
FDM	: Kaynaştırılmış Biriktirme Modelleme Teknolojisi
ISO	: Uluslararası Standizasyon Örgütü
KÜ- (AM)	: Katmanlı Üretim
LCA	: Yaşam Döngüsü
MJ	: Malzeme Püskürtme
MRI	: Manyetik Rezonans Görüntüleme
NACFAM	: ABD Ulusal Gelişmiş İmalat Konseyi
NURBS	: Düzgün Olmayan Rasyonel Temelli Eğri
PLA	: Polilaktik Asit (Bio-polimer)
SD-(IR)	: Sanayi Devrimi
SK-(SD)	: Sürdürülebilir Kalkınma
SLA	: Stereolitografi
SP	: Sürdürülebilirlik Prensipleri
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
SSKÇ-(FSSD)	: Stratejik Sürdürülebilir Kalkınma Çerçevesi
STL	: Standart Mozaik Dili
SYDD-(SLCA)	: Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
TPE	: Termoplastik Poliüretan Elastomer
TPU	: Termoplastik Poliüretan
UV	: Ultra Viyole
WCED	: Dünya Çevre Kalkınma Komisyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Üretim paradigmalarının evrimi	14
Çizelge 4.1 : Üç boyutlu baskı süreçleri ve teknolojilerin karşılaştırması.....	32
Çizelge 4.2 : 3B baskı teknolojilerinin standart yapı boyutları	48
Çizelge 4.3 : 3B baskı teknolojilerinin temel tasarım yönergeleri	49
Çizelge 5.1 : Bazı rehberli soru örneklerini içeren SLCA 2.0 şablonu	82
Çizelge 5.2 : SLCA (Adım 5) ürün sürdürülebilirliği değerlendirme için soru yapıları	83
Çizelge 5.3 : Belirlenen zorluklara yönelik çözümler (Adım 7) için beyin fırtınası yapılırken ortaya çıkabilecek strateji ve eylem örnekleri	84
Çizelge 5.4 : SYDD analizi için olası sonuçların renk matrisi	85
Çizelge 5.5 : Sürdürülebilir yaşam döngüsü değerlendirme yönteminde rehberlik edecek analiz soruları.....	87
Çizelge 6.1 : Katmanlı üretim teknolojileri ile üretilen giyilebilirler tasarım analizi	91
Çizelge 6.2 : Akademik ve uygulama literatüründe yıllara göre çalışma dağılımı .	101
Çizelge 6.3 : Akademik literatürde temaların dağılımı	102
Çizelge 6.4 : Akademik literatürde çalışmaların tema değişimi.....	103
Çizelge 6.5 : Akademik literatürde çalışmalarda yöntem değişimi	104
Çizelge 6.6 : Sürdürülebilir yaşam döngüsü değerlendirmesi (SYDD)	110
Çizelge 6.7 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (Hammalzeme)	111
Çizelge 6.8 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (Tasarım)	113
Çizelge 6.9 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (Üretim)	115
Çizelge 6.10 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (İşlem Sonrası, Dağıtım)	116
Çizelge 6.11 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (Kullanım)	117
Çizelge 6.12 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (Toplama, Geri Dönüşüm, Atık)	118
Çizelge 7.1 : SYDD sonuçları renk matrisi.....	134



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1 : Üç boyutlu baskı malzemeleri	33
Tablo 4.2 : Üç boyutlu baskı üretim sürecinde temel adımlar	40
Tablo 5.1 : Katmanlı üretim teknolojileri giyilebilir uygulamalar.....	70
Tablo 5.2 : SYDD analizi için Everard ve Blume'nin önerdiği soruların tablosu.....	84
Tablo 5.3 : Natural Step (SKÇÇ)'nin sürdürülebilirlik prensipleri.....	88
Tablo 6.1 : Katmanlı üretimin sürdürülebilirlik avantaj ve kısıtlamalar özeti.....	120
Tablo 6.2 : Katmanlı üretimin benimsediği döngüsel ekonomi stratejileri tablosu..	121
Tablo 6.3 : Sürdürülebilir ve döngüsel üretim için biyo-malzeme avantajları	122
Tablo 7.1 : Tek malzemeli tasarlanmış yapılara dair bulgular.....	128
Tablo 7.2 : Çok malzemeli tasarlanmış yapılara dair bulgular.....	128
Tablo 7.3 : Serbest biçimli tasarlanmış geometrilere dair bulgular.....	129
Tablo 7.4 : Özelleştirme ve kişiselleştirme tasarımlarına dair bulgular.....	129
Tablo 7.5 : Doğrudan montaj tasarımlarına dair bulgular.....	130
Tablo 7.6 : Gömülü nesne, akıllı yapıların tasarımına dair bulgular.....	130
Tablo 7.7 : Sistemik literatür taramasına dair bulgular.....	131
Tablo 7.8 : SYDD analiziyle ulaşılan bulguların özeti.....	133
Tablo 7.9 : Katmanlı üretim uygulamaları için inovasyon aşaması strateji ve eylem önerileri tablosu.....	134



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Ekoljik aşım 2030 göstergeleri.....	11
Şekil 2.2 : AB, 2040 vizyonu ile dönüşüm dalgaları	16
Şekil 3.1 : Sürdürülebilir kalkınmanın üç boyutu.....	18
Şekil 3.2 : Döngüsel üretimin esasları	24
Şekil 4.1 : Gelişen teknolojilerin 2013 hype döngüsü	29
Şekil 4.2 : Dört boyutlu baskı şekil değişimi	35
Şekil 4.3 : Akıllı malzemelerin sınıflandırılması	37
Şekil 4.4 : BioLogic ikinci cilt , BioLogic kumaş yapısının programlanması	38
Şekil 4.5 : X,y, ve z eksenini gösterimini kullanan Kartezyen koordinatları	45
Şekil 4.6 : Sayısal model ile 3B baskılı fiziksel nesne arasındaki işlemler.....	46
Şekil 5.1 : Crystallizasyon üst ve Escapism alt-üst giyim	58
Şekil 5.2 : N-12 bikini ve yapı detayı, (katmanlı üretim giyim uyg.).....	58
Şekil 5.3 : Voltage elbise ve Bio Piracy elbise, (katmanlı üretim uyg.).....	59
Şekil 5.4 : Smoke elbise ve Synapse elbise, (katmanlı üretim uyg.)	60
Şekil 5.5 : Spider elbise, (katmanlı üretim uyg.)	60
Şekil 5.6 : Kinematic elbise ve yapı detayı	61
Şekil 5.7 : Kinematic Yapraklı Elbise	61
Şekil 5.8 : Black Panther filmi kostümü ve Pangolin elbise.....	62
Şekil 5.9 : Bomber ceket ve Mezuniyet koll.'dan elbise, Meso Hücresel yapılar.....	63
Şekil 5.10 : Minimal ayakkabı, 4B baskılı üretim uygulaması	63
Şekil 5.11 : Hybrid Holism elbise	64
Şekil 5.12 : Magnetic Motion elbise ve Hacking Infinity elbise	64
Şekil 5.13 : FutureCraft 4B ayakkabı ve taban yapı detayı (adidas)	65
Şekil 5.14 : Anthoza pelerin ve yapı detayları	66
Şekil 5.15 : DNA ayakkabı (katmanlı üretim uygulaması)	66
Şekil 5.16 : Cares of the Gaze üst ve Synapse kask prototipi	67
Şekil 5.17 : Vespers koleksiyonu (seri1-maske3, seri2-maske1, seri3-maske2).....	67
Şekil 5.18 : Biomimikri koleksiyonu, Harmonograf elbise ve Pangolin elbise.....	68
Şekil 5.19 : Ludi Naturae koleksiyonu, Yapraklı elbise ve yapı detayı	69
Şekil 5.20 : Greta-Oto elbise ve Setae ceket.....	69
Şekil 5.21 : Katmanlı üretim ve 3B baskı teknolojileri ile üretilmiş giyilebilir uygulama alanı kavram döngüsü.....	78
Şekil 5.22 : AB'nin Döngüsel ekonomi yaşam döngüsü aşamaları.....	86
Şekil 6.1 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, “Meso hücresel kumaş” yapılarıyla giyilebilir moda ürünleri.....	92
Şekil 6.2 : Katmanlı üretim ile üretilmiş:“Kafesli orta taban” ve “Hücresel orta taban” yapıları.....	93
Şekil 6.3 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, çok malzemeli “değişken özellikli” giyilebilir moda, aksesuar ve sanatsal ürünler.	94

Şekil 6.4 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, “işlevsel derecelendirilmiş” yapılı ve “Ölçekli hiyerarşik” yapılı giyilebilir moda ürünü.....	95
Şekil 6.5 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, "interaktif giysi" ve "interaktif kask"	95
Şekil 6.6 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, “Serbest biçimli geometrik” yapılı giyilebilir moda ürünleri.....	96
Şekil 6.7 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, “Kişiselleştirilmiş”, “Seri Özelleştirilmiş”, “Özelleştirilmiş” performans ayakkabısı.....	97
Şekil 6.8 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, çok malzemeli ve çok renkli “Doğrudan tekstile 3B baskı” uygulamalı giyilebilir moda ürünleri	97
Şekil 6.9 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, “Zincir-posta” yapılı, “Yaylı geçme” yapılı, “Mafsal” yapılı, “Menteşe” yapılı giyilebilir moda projeleri.....	99
Şekil 6.10 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, “Gömülü nesne” hibrit yapılı interaktif moda projeleri.....	100
Şekil 6.11 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, 4B baskı ile “Kendinden montaj ve Gömülü şekil değişimi” yapılı Aktif ayakkabı, Bio-baskı ile “Gömülü şekil değişimi” yapılı Aktif giyim.....	100
Şekik 6.12 : Kinematik fold web simülasyon uygulaması.....	107
Şekik 6.13 : Danit Peleg'in 3B simülasyon destekli web tasarım uygulaması.....	108
Şekik 7.1 : Katmanlı üretim tasarımı ve "3B Baskılı Giyilebilir" alanı tasarım kavram görseli.....	130
Şekil EK A.1 : Katmanlı üretim teknolojileri tablosu	151

KATMANLI ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ İLE ÜRETİLEN GIYİLEBİLİRLERDE HİBRİT YAPILARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR TASARIM VE ÜRETİM BAKIMINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Sürdürülebilir bir üretim yöntemi olarak kabul edilen katmanlı üretim, moda endüstrisi de dâhil farklı endüstri ve araştırma alanlarında birçok uygulama ile kullanılmaktadır.

Tez kapsamında dört araştırma sorusuna yanıt aranmıştır; (1) 3B baskı yöntemi, giyilebilir uygulamalara ne tür bir tasarım yeniliği getirmektedir? (2) Katmanlı üretim, çok malzemeli, çok işlevli, özelleştirilmiş parçalar üretebilmesi bakımından, sürdürülebilir bir üretim yöntemi midir? (3) Tasarım sürecinde, nesnel ve görselleştirme becerilerinin kombinasyonu bakımından, katmanlı üretim ve 3B baskı tasarımı için 3B CAD araçlarının olanakları nelerdir? (4) Katmanlı üretimin avantajları ve kısıtlamaları nelerdir?

Sistematik bir literatür incelemesi yoluyla araştırma sorularının tartışılmasına kavramsal bakış sağlanmıştır. Polimer ile üretilen giyilebilir projelerin tasarım analizi, katmanlı üretim tasarımında “biomimetik” yapı özelliklerini belirlemiştir. Sürdürülebilir yaşam döngüsü değerlendirmesi, katmanlı üretim teknolojilerindeki ilerlemeyi ve malzeme inovasyonundaki gelişmeyi netleştirmiştir. Katmanlı üretimin ürün yaşam döngüleri boyunca sunduğu sürdürülebilir çözümler, raporlanarak çalışmada sunulmuştur.

Yeni malzemeler ve gelişmiş tasarım yöntemleri, “Katmanlı Üretim için Tasarım” kavramının önünü açmıştır. Bu tasarım yaklaşımı, giyilebilir moda ürünlerinde katmanlı üretimin hibrit malzeme yapıları oluşturmaya olanak tanımaktadır. Katmanlı üretimin tasarım özgürlüğü, özelleştirilmiş tasarım, yüksek karmaşıklık, malzeme verimliliği, güçlü yapılar, düşük hacim, enerji tasarrufu, atık yönetimi gibi konularda görülmektedir.

Anahtar Kelime: 4B Baskı, Giyilebilir Teknoloji, Katmanlı Üretim, Sürdürülebilirlik, Vücut Mimarisi.



EVALUATION OF HYBRID STRUCTURES IN WEARABLES MANUFACTURED WITH ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES IN TERMS OF SUSTAINABLE DESIGN AND MANUFACTURING

SUMMARY

Additive manufacturing, which is accepted as a sustainable production method, is used with many applications in different industries and research areas, including the fashion industry.

Within the scope of the thesis, answers to four research questions were sought; (1) What kind of design innovation does 3D printing bring to wearable applications? (2) Is additive manufacturing a sustainable production method in that it can produce multi-material, multi-functional, customized parts? (3) What are the possibilities of 3D CAD tools for additive manufacturing and 3D print design in terms of the combination of objective and visualization skills in the design process? (4) What are the advantages and limitations of additive manufacturing?

A conceptual perspective was provided to the discussion of research questions through a systematic literature review. The design analysis of the wearable projects produced with the polymer determined the "biomimetic" structure properties in the additive manufacturing design. The sustainable life cycle assessment has clarified progress in additive manufacturing technologies and improvement in materials innovation. Sustainable solutions offered by additive manufacturing throughout product life cycles are reported and presented in the study.

New materials and advanced design methods have paved the way for the concept of "Design for Additive Manufacturing". This design approach allows additive manufacturing to create hybrid material structures in wearable fashion products. The design freedom of additive manufacturing can be seen in issues such as customized design, high complexity, material efficiency, strong structures, low volume, energy saving, waste management.

Keywords: 4D Printing, Additive Manufacturing, Body Architecture, Sustainability, Wearable Technology.



1. GİRİŞ

Günümüz üretiminde, neredeyse tüm ürün türlerinde sürdürülebilir ve özelleştirilmiş ürünlere doğru bir dönüşüm yaşanmaktadır. Bu dönüşümün arkasındaki teknolojiler genel olarak sayısal fabrikasyon, üretken imalat ya da hızlı üretim olarak nitelendirilmektedir. Üretken imalat genelinde katmanlı üretim veya eklemeli üretim, daha yaygın kullanımıyla üç boyutlu baskı teknolojilerine artan bu ilginin kaynağı yüksek kalite ve fiyatlandırma avantajında yatmaktadır. Katmanlı üretim teknolojisi, özelleştirme maliyeti ve karmaşık şekillerin maliyetini sıfıra indirmesiyle (Lipson ve Kurman, 2013) önem kazanmaktadır.

Dönüşen üretim kavramıyla birlikte tasarım anlayışında da “katmanlı üretim tasarımı” ve üç boyutlu baskı (3BB) tasarımına doğru bir gelişme görülmektedir. Katmanlı üretimin, tasarlama ve üretme biçimine getirdiği dönüşümle, geleneksel şekillendirme teknikleri atlanmakta, tasarımcılara baştan sona üstün, fonksiyonel ve daha akıllı ürünler üretmek için verimli çalışma imkânı tanınmaktadır. Sayısal tasarım yöntemleri ile sayısal üretim tekniklerinin yakınsaması; “Endüstriyel Tasarım, Mimari, Mühendislik, Moda ve diğ.” tasarım disiplinlerini birbirine yaklaştırmış, tasarım alanında yeni bir yaklaşımla “Vücut Mimarisi” tasarımının önünü açmıştır. Vücut mimarisi kavramı, moda ürünleri yanında, (vücut ölçeğinde) geniş bir alandaki insan vücuduna yönelik tasarım ürünlerini içeren, 3B baskı tasarımını ifade etmekte (Leach, 2017), malzeme zekası alanına da odaklanarak, dört boyutlu baskıyı (4BB) da kapsamaktadır.

Sanal ortamda 3B modelleme yazılımını kullanarak tasarım yapmak, temel giyim tasarım becerilerinde örtük bilginin, sanal boyuta uygun şekilde aktarılmasını gerektirmektedir. Parametrik tasarım sistemlerine materyalizasyon ve üretim süreçlerinin entegrasyonu, sayısal modellerin doğrudan parametrik sistemde geliştirilebilir olması, tasarım süreçlerinde tektonik yapıyı malzeme-yapı biçimine çevirerek, malzeme-tasarımına, giyilebilir ürünlerde hibrit malzeme yapılarına olanak tanımaktadır. Malzeme kısıtlamaları nedeniyle, katmanlı üretim teknolojisi

kullanılarak üretilen giyim ürünleri, “aksesuar ve ayakkabı pazarı hariç” kitlesel kişiselleştirme için henüz uygun değildir.

Moda ürünlerinde kumaş top halinde gelerek, kesme-dikme süreciyle tasarıma dahil olurken, çağdaş uygulamalar sunan katmanlı üretim ile daha az işleme ihtiyaç duyulduğu gibi aynı zamanda ürünlerin çok daha az malzeme kullanılarak, couture modaya göre çok daha hızlı ve sürdürülebilir bir şekilde üretilebileceği görülmektedir. Bu bakımdan, katmanlı üretimin geleneksel tedarik zincirini bozma potansiyeliyle ekolojik ve sosyal açılardan sürdürülebilir çözümler sunması beklenmektedir.

Bu tez çalışması; sistematik literatür taraması, vaka incelemesi ve ‘Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi’ (SYDD) olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Amaca odaklı sistematik literatür taraması ile akademik literatürdeki gelişmeler tespit edilmiş ayrıca bu tespitler dört araştırma sorusunun tartışılmasına kavramsal bakış sunmuştur. Akademik ve uygulama literatüründen (giyilebilir uygulamalarda kullanıldığı) belirlenen katmanlı üretim (KÜ) teknolojilerinin, sosyal ve ekolojik sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumluluğu belirlenerek, avantaj ve zorlukları tespit edilmiştir. Katmanlı üretim ile üretilen, (polimere dayalı) giyilebilir moda projeleri, tasarım bakımından değerlendirilmiş, tasarım çözümlemesinde hem yapısal ve hem de malzeme kullanım olanakları belirleyici olmuştur. Malzeme inovasyonu, ürün tasarımında gelişme gösteren “katmanlı üretimin (biomimetik) tasarım” yapılarının ayrıntılı analizi ortaya konmuştur. Ayrıca 3B CAD araçlarının katmanlı üretim ve 3B baskı tasarımına sağladığı olanaklar değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, döngüsel ekonominin her yaşam döngüsü aşaması altında değerlendirme sunulmuştur. Stratejik sürdürülebilirlik perspektifiyle güçlü ve zayıf yönleri belirlenen KÜ teknolojileriyle ilgili, ürün inovasyon sürecinde sosyal ve ekolojik sorunların nasıl ele alınacağına yönelik eylem önerileri oluşturulmuştur. Ürün tasarım aşamalarında alınan kararların, ürünün tüm yaşam döngüsü davranışında belirleyici olduğu bilinmektedir. Üretim verimliliğini artırma ve malzeme israfını azaltma bakımından, Stratejik düşünme yeteneğiyle geriye dönük değerlendirme vizyonu, kaynakların geleceği olmayan ürünler veya teknolojileri geliştirmeye harcanmasını önleme (Hallstedt, vd., 2013) açısından yol sağlayabilir.

Tezin Amacı

Katmanlı üretim alandaki akademik ve uygulama literatürü, ürünlerde interaktif sistemlerin birleşimine, ürün yapılarında akıllı, çok malzemeli, çok işlevli bileşenlerin kullanımlarına olanak tanıyan 4B baskılı özelleştirilmiş ürünlere doğru ilerlemektedir. Üretimde dönüşüm sunmasının yanı sıra katmanlı üretime, çevresel etki bakımından da beklentiler yüksektir. Katmanlı üretim literatürünün, temiz üretim yöntemi, E4.0'ın akıllı üretim teknolojisi, sürdürülebilir üretim teknolojisi, döngüsellliği sağlama beklentisi gibi etiketler altında tartışmalarla geliştiği görülmektedir. Katmanlı üretimin, üretimde sürdürülebilirlik için katkısı olduğu açıktır ancak malzeme ve enerji girdileri önündeki en büyük engeldir. Bu bakımdan katmanlı üretimin literatürde en çok ekolojik etkilerinin (malzeme, enerji, atık) tartışıldığı görülmektedir. Yaşam döngüsü perspektifinde sosyo-ekolojik etkilerin belirlenmesiyle, tasarım süreciyle başlayacak bilinçli seçimler (bileşen tasarımı, katman kalınlığı, çözünürlük, işlem süreci, malzeme özelliği vs.) katmanlı üretimin sürdürülebilir çözümler sunmasına katkı sağlayabilir. Sürdürülebilirlik ve inovasyon odağında katmanlı üretimin sunacağı faydalar ile sürdürülebilir kalkınma hedefleri yakalanabilir.

Bu bağlamda tezin amacı; katmanlı üretimin akademik ve uygulama literatüründe gelişimini tespit etmektir. Literatürde, katmanlı üretimi sürdürülebilirlik yaklaşımıyla ele alarak, tasarım olanakları bakımından inceleyen Türkçe bir çalışma görülmemiştir. Ayrıca katmanlı üretim teknolojileriyle üretilmiş, (polimer malzemeli) giyilebilir vaka analizi bakımından yapılmış kapsamlı bir çalışma ve Türkçe kaynak da görülmemiştir. Tez kapsamında ele alınacak vakaları tek bir sınıf altında toplamak oldukça güçtür. Bazı uygulama örnekleri bir moda-giyim ürünü, bazıları daha işlevsel, akıllı giyilebilirlik özellik barındırabilmekte veya tamamen sanat nesnesi olarak değerlendirilebilmektedir. Vaka değerlendirmesinde, katmanlı üretim yöntemleriyle üretilmiş olan giyim, ayakkabı, aksesuar gibi vücut mimarisi anlayışındaki ürünlere odaklanılacaktır. Ayrıca, giyilebilir uygulamalarda kullanılan katmanlı üretim teknolojilerinin SYDD ile sürdürülebilirlik zorluklarını, fırsatlarını belirleyerek araştırma desteklenecektir. Kapsamlı bir değerlendirilmeyle bulguların literatürdeki açığı kapatma adına anlamlı bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1.1.1 Araştırma Soruları

- 3B baskı yöntemi, giyilebilir uygulamalara ne tür bir tasarım yeniliği getirmektedir?
 - 3B baskılı giyilebilir alanındaki malzeme inovasyonu ne şekilde gelişme göstermektedir?
- Katmanlı üretim, çok malzemeli, çok işlevli, özelleştirilmiş parçalar üretebilmesi bakımından, sürdürülebilir bir üretim yöntemi midir?
- Tasarım sürecinde, nesnel ve görselleştirme becerilerinin kombinasyonu bakımından, katmanlı üretim ve 3B baskı tasarımı için 3B CAD araçlarının olanakları nelerdir?
 - 3B CAD programlarının bileşenleri ve yetenekleri 3B baskı tasarım sürecine nasıl yardımcı olmaktadır?
- Katmanlı üretimin avantajları ve kısıtlamaları nelerdir?
 - Katmanlı üretim sırasında israftan kaçınılıyor mu?
 - Katmanlı üretim sonrasında üretim atığı yaratılıyor mu?
 - Katmanlı üretim, enerji açısından verimli bir şekilde optimize ediliyor mu?

1.2 Yöntem

Katmanlı üretimin sürdürülebilirlik değerlendirmesi için bu çalışmada, literatürde “Sustainable Life Cycle Assessment” (SLCA) olarak geçen bir değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. SLCA kavramı, çalışma kapsamında Türkçe’ye “Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi” (SYDD) olarak çevrilmiştir. SYDD yaklaşımının, bir teknolojiyi “sürdürülebilirlik perspektifiyle” inovasyon aşamasında stratejik değerlendirme için kullanıldığı, literatürde geçmektedir. Üç yönlü yürütülecek araştırmanın (sistemik literatür taraması, vaka analizi ve KÜ teknolojisi SYDD’si) verileri, dört araştırma sorusunun tartışılmasında kullanılacaktır. SYDD, yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirliğin önemli noktalarını geriye dönük bakış açısıyla, nitel şekilde belirlemek için sürdürülebilirlik ilkeleri kullanır. Tez kapsamında, nitel araştırma veri toplama yöntemlerinden gözlem ve yazılı doküman incelemesi, içerik analiziyle kullanılacaktır. Niteliksel içerik analizi elde edilen verilerden araştırma sorusuna ilişkin, kodlama şemaları, tema ve alt temalar oluşturmaya yönelik sistematik bir yöntem olduğu ve yöntemlerin birleştirilmesini desteklediği için seçilmiştir.

1.2.1 Veri Toplama Yöntemi

Çalışmanın verileri, elde edilen bulguların geçerlilik ve güvenilirliğine katkı sunması bakımından veri çeşitlemesi yöntemiyle (sistemik literatür tarama, vaka inceleme ve SYDD) elde edilecektir. Akademik makalelerin yanı sıra gri literatürden yıllık raporlar, stratejik plan, doküman, süreli ve süresiz yazılı doküman, film, video ve fotoğraf gibi görsel malzemeler de veri setlerine dâhil edilecektir. Böylece, çoklu veri toplama yöntemine dayanan nitel araştırmanın güvenilirliği de artacaktır. Araştırma alanıyla ilgili hâlihazırda internet üzerinde var olan (e-kitap, e-sergi, web sayfası vb.) çeşitli veri türleri de sürece dâhil edilecektir.

1.2.2 Tezin Analiz Yöntemi

Literatürden seçilen vakalar, öncelikle üretildikleri katmanlı üretim teknolojileri altında kategorize edilecek, sonraki aşamada; ürün, yıl, tasarım ekibi, teknolojik önem, kullanılan malzeme, tasarım yöntemi ve üretim yaklaşımı bakımından analiz edilecektir. Her bir vaka, ilgili tasarım kategorileri altında kodlanarak çözümlenecek ve vaka değerlendirmesi sunulacaktır. Katmanlı üretimin, yaşam döngüsü boyunca zayıf ve güçlü yönlerini, sosyal ve ekolojik etki bakımından belirlemek için niteliksel bir “SYDD” analizi kullanılacaktır. Nitel içerik analizi, elde edilen verilerin daha yakından incelenmesini ve bu verileri açıklayan kavram ve temalara ulaşılmasına imkân tanımaktadır.

1.3 Kapsam ve Kısıtlılıklar

Bu bağlamda tezin kapsamı; giyilebilir uygulama örneklerinde kullanılan katmanlı üretim “SLA, SLS, FDM, CDLS ve PolyJet” teknolojileri ve “polimere dayalı” giyilebilir uygulamalarla sınırlandırılmıştır. Giriş bölümü ardından, ikinci bölümde küresel üretim trendleri altında endüstriyel evrim ve üretim paradigmalarındaki gelişimlere değinilecektir. Üçüncü bölümde, sürdürülebilir üretim trendlerine değinilecek katmanlı üretime, E4.0 bağlamı altında giriş yapılacaktır. Dördüncü bölümde, seçilen katmanlı üretim teknolojileri kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır. Beşinci bölümde, polimere dayalı, giyilebilir ürünler hem yapı ve malzeme bakımından hem de üretildikleri katmanlı üretim teknolojileri altında incelenecektir. Altıncı bölümde, araştırma soruları tartışılacaktır. Bulgular ve sonuç ise yedinci bölümde sunulacaktır.



2. KÜRESEL ÜRETİM TRENDLERİNE GENEL BAKIŞ

İnsanlık tarihinde hiçbir tarihsel olay sanayi devrimleri kadar derinden etkili olmamış, yaşanan her bir değişim, yaşam kalitesinde iyileşme ve toplum yapısında değişiklikleri de beraberinde getirmiştir (Schwab, 2016). Yeni teknolojilerin geliştirildiği ve tanıtıldığı dönemlerden daha fazlası olan sanayi devrimleri, geniş toplumsal dönüşümle bağlantılı ve eşzamanlı olan belirli bir dizi özelliğe sahip teknolojik değişim zamanlarıdır (Davis ve Philbeck, 2019).

2.1 Endüstriyel Evrim

İlk üretken devrim avcılıktan yerleşik hayata geçen toplumların tarımsal üretime başlamasıyla toplumsal, köklü bir değişimle yaşanmıştır. James Watt'ın icat ettiği buhar makinesinin üretime yeni bir yön vermesiyle Buhar Çağı da denmekte olan ve demiryollarının inşasıyla tetiklenen, 1760 ve 1840 yılları arasında kapsayan Birinci Sanayi Devrimi (1.SD), önce İngiltere'de ortaya çıkmış, ardından Avrupa'ya yayılmıştır. Buhar gücü ve mekanize üretimin birleşimiyle, kapasite ve üretkenlikteki bu dinamik artış, kentleşmeye, bölgesel ve küresel pazar ekonomilerinin büyümesine ve batı yarım kürede yükselen bir orta sınıfa yol açmıştır (Davis ve Philbeck, 2019). *“Avrupalılarca sömürge köleliğinin devrimi dünyanın diğer bölgelerine ihraç edilerek, özgürleşen herkesin sanayileşmiş moderniteye katılabilmesiyle modern kölelik”* sağlanmıştır (Caradonna, 2014). Dokuma sanayisinde, çelik üretimindeki artışla gemicilik ve demiryolları sanayisinde gelişmeler yaşanmıştır (Jensen, 1993).

1867 ve 1914 yılları arasında tarihlendirilen İkinci Sanayi Devrimi (2.SD), bilim ve teknolojinin daha iyi bir yaşama ilerleme yolu olduğuna dair, bir sistem değişikliği dalgasıdır. Girişimcilerin bilimi üretimin amaçlarına uygulamasıyla bu çağ, bilim ve mühendisliğin ürünlerini görmüştür (Davis ve Philbeck, 2019). Elektriğin ve montaj hattının gelişimi, seri üretimi mümkün kılmış, makineleşmiş modern fabrikalar ve kentsel bir işçi sınıfı etrafında merkezlenen özgür ekonominin uygulanması başarılmıştır (Caradonna, 2014). Buharlı gemi, demiryolu, telefon, telgraf ve kablo sistemleri dâhil olmak üzere modern ulaşım ve iletişim tesislerinin doğuşuyla birlikte,

seri üretim ve dağıtım sistemleri gibi yenilikler (Jensen, 1993), bir sonraki sanayi devrimi olan bilgi çağı için bir ortam yaratmıştır.

1960'larda başlayan Üçüncü Sanayi (sayısal devrim) Devrimi (3.SD), bilgi teorisinde ve verilerin gücünde bir adım değişikliği getirmiştir. Yarı iletkenlerin, ana bilgisayar hesaplamasının (1960'lar), kişisel bilgisayarların (1970'ler / 1980'ler) ve internetteki (1990'lar) hızlı gelişmelerin üretimi otomatikleştirmesiyle dönüşüm gerçekleşmiştir. Artan bilgi işlem gücüne yönelik hızlı ilerleme, birçok yönden daha birbirine bağlı ve karmaşık bir dünyaya yol açmıştır (Schwab, 2016; Davis ve Philbeck, 2019). Nükleer faaliyetler, genetik bilimi ve benzeri konularda ortaya çıkan yenilikleri, biyoteknoloji, yeni malzemeler, elektronik perakende gibi birçok kavramla devam eden süreç, tüm endüstri değer zincirinde sayısal entegrasyonu mümkün kılan dönüşüm yaratmıştır.

Her sanayi devrimi sırasında, ülkelerin ulusal güçleri ve kapasiteleri, hükümetlerinin ve ekonomilerinin yanıt verme yeteneğine ve vermemesine bağlı göreceli olarak değişmektedir. İmalat sanayiine dayalı olan ilk sanayi devrimi, gelişmenin teknolojik yeniliklerle ilgili olduğu ilk Kondratiev uzun dalgasının temel bir parçasıdır (Jovane ve diğ, 2008). Yaşanmakta olan Dördüncü Sanayi Devrimi (4.SD) yalnızca bir dizi artan teknolojik ilerlemeden ibaret değildir. Değerin yaratılma, değiş tokuş edilme, bireyler, organizasyonlar ve tüm ekonomiler arasında dağıtılma biçiminde geniş kapsamlı değişim olan bir kargaşadır (Schwab, 2019). 4.SD, beşinci Kondratiev uzun dalgasıyla ilgilidir; ürünlerden süreçlere ve şirketlere, ilgili eğitim, araştırma ve teknolojik geliştirme ve yenilik faaliyetlerine kadar tüm imalat sektörlerini ilgilendirmektedir (Jovane ve diğ, 2008).

4.SD terimi, 21. yüzyılın başlarında, gelişen sosyal normlardan ve ulusal politik tutumlardan ekonomik kalkınmaya ve uluslararası ilişkilere kadar, gelişen teknolojilerin neredeyse tüm insani gelişimi üzerindeki etkisini çerçevelemek ve analiz etmek için kullanılmıştır. 4.SD fikri genellikle, 2011 ve 2015 yılları arasında Almanya'da ortaya çıkan ve sayısal teknolojilerin üretime uygulanması girişimi olan "Endüstri 4.0" ile eşanlamlı olarak kabul edilir.¹ Bu iki terim birbiriyle ilgisiz değildir, ancak farklı şeyler anlatmaktadır (Davis ve Philbeck, 2019).

"Avrupa bağlamında yeni bir sanayi devrimi tartışması, başlangıçta yeni sayısal teknolojiler ve bunların büyüme ve üretim için uygulamaları, dolayısıyla Endüstri 4.0 ile ilişkilendirilmiştir. Dördüncü Sanayi Devrimi'nin kapsamlı konsepti daha geniş bir dizi bağlantılı konu ve teknolojileri hesaba katar, çünkü Endüstri 4.0 daha geniş ekonomik, politik ve sosyal sistemlere değil, belirli bir sektörün etkisine

Yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve yayılmasında kaynak gereksinimi ve “teknolojik sıçrama”, çevrelerinden veya önceki teknolojik olanaklardan bağımsız değildir, önceki sanayi devrimlerinden gelen mevcut altyapıya, becerilere ve zihniyetlere dayanmaktadır. Yeni teknolojiler, tam potansiyelleriyle çalışmak ve vaatlerini yerine getirmek için bu sistemlerin yükseltilmesi ve ek yatırım gerektirme eğilimi gösterirler (Schwab, 2019). Schwab tarafından, sürmekte olan dördüncü sanayi devriminin diğer üçü kadar güçlü ve yıkıcı etkiye sahip olup, bozulma ve yenilik hızının, yayılma hızını yönlendirmekte olduğu aktarılır. 4.SD, 2.SD'nin elektrik ve telekomünikasyon sistemlerine dayanan, 3.SD'nin sayısal teknolojilerinin veri merkezli temellerinin mümkün kıldığı hızlı bilgi alışverişi üzerine kurulmuştur (Davis ve Philbeck, 2019). Yaşanmakta olan değişimler çoğunlukla tüketici üzerinde olumlu bir etki yaratmış, verimliliği artırmış ve önümüzdeki otuz yılda toplumu etkileyecek yirmi üç büyük değişikliğe odaklanan etki alanıyla, üç ana bölüme (hız, paradigmal değişim ve dönüşüm) ayrılmıştır (Schwab ve Davis, 2018). Fiziksel, sayısal ve biyolojik alanlarda gelişen bu teknolojilerin sürekli yakınsaması, endüstrileri derinden dönüştürmekte, yeni iş modelleri yaratmakta, üretim, tüketim ve ulaşım/teslimat sistemlerini yeniden yapılandırmaktadır. Üç ana alandaki dönüştürücü teknolojiler ve her alanda meydana gelen mega trendlerin eşlik ettiği süreç detayları aşağıda verilmektedir: (Roy, 2020).

- Fiziksel alandaki gelişmeler; otonom araçlar, 3D baskı, gelişmiş robotik ve yeni malzemeleri içermektedir.
- Sayısal alandaki gelişmeler; sensörlerdeki gelişmeler ve Nesnelerin İnterneti (IoT), uzaktan izleme, blok zincir ve paylaşım ekonomisinin yükselişi dahil olmak üzere diğer aygıtları bağlama araçları yer almaktadır.
- Biyolojik alandaki gelişmeler; genetik alanında ve sentetik biyoloji gibi ilgili alanlarda biyolojik yenilikler şeklinde yer almaktadır.

Sayısal, fiziksel ve biyolojik dünyaları kapsayan yeni teknolojilerin ortaya çıkması ve en güçlülerin, bir araya gelip birbirlerini güçlendirmesiyle yaşanan değişim, dünyanın dört bir yanına yayılan çağdaş teknolojik kültürde 4.SD, Sheila Jasanoff'un "sosyoteknolojik tahayyül" olarak adlandırdığı, “*arzu edilen geleceklerin, kolektif olarak sahiplenilen ve icra edilen vizyonlarıdır ve aynı zamanda, bilim ve teknolojiye ilerlemelerle ulaşılabilen ve bunları destekleyen sosyal yaşam ve sosyal düzenler*” (Jasanoff, 2015) şeydir.

odaklanır. Aslında her ikisi de aynı iç görüden kaynaklanır, ancak birinin odağı diğerinden daha dardır” Bkz. Avrupa Parlamentosu Rapor Özeti, “Üretkenlik ve büyüme için Endüstri 4.0 Sayısalleşmesi”.

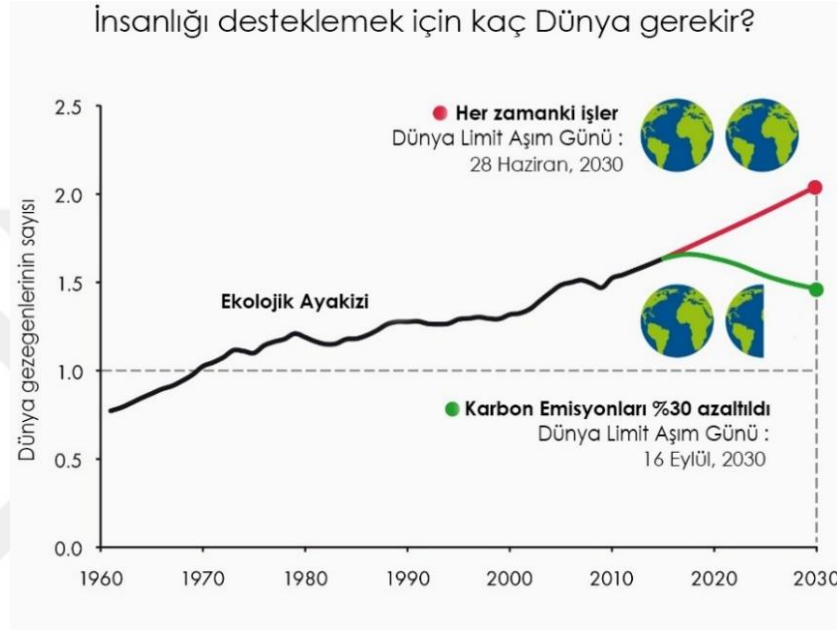
4.SD kavramı, bilgi işlem gücü, yenilenebilir enerjiler, katmanlı (eklemeli) üretim, biyoteknoloji, yapay zeka, robotik, Blockchain, nöro-teknolojiler, nesnelerin interneti, ‘Derin Geçiş’ başlıklı ek implante edilebilir teknolojiler, giyilebilir internet, akıllı şehirler, büyük veriler ve diğer pek çok yeni teknolojinin karmaşıklıkla birlikte, bireyler ve kuruluşların insanlar ve teknoloji arasındaki etkileşimi anlamalarına yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Otonom araçlardan biyolojik olarak tasarlanmış insanlara kadar, yeniçağ sektörlerine, paydaş gruplarına ve sosyal normlara teknik ve etik zorlukları da beraberinde getirmektedir. Alberto Melucci'nin (1996, 12) belirttiği gibi, *"gelecek geçmişten doğarken, geçmişin de sürekli olarak gelecek tarafından şekillendirildiği de aynı derecede doğrudur."* Bu görüşe göre teknolojik sistemler, geçmişteki kültürel başarılarla ve ileriye dönük umut verici ve ulaşılabilir geleceklere veya kaçınılması gereken geleceklere işaret ederek, çifte sembolik bir işleve hizmet etmektedir. Bilim ve teknoloji, iki yüz yıla yakın bir süredir insan toplumlarını yeniden tasavvur etme ve yeniden icat etme çabalarına dâhil olmuştur (Jasanoff, 2015).

2.1.1 Endüstrileşmenin Küresel Etkileri

Günümüzde küresel bir aşırılık durumu yaşanmaktadır. Dünya nüfusunun sanayi devrimi sırasında yükselmeye başladığı uzmanlarca belirtilmektedir. Binlerce yıl boyunca (1800'lere kadar) homo sapiens nüfusu, 1 milyarın oldukça altında olmuştur (Caradonna, 2014). 2021 itibarıyla 7,9 milyara yükselmiş olan dünya nüfusunun, BM verilerine göre 2100 yılına kadar 10,9 milyara çıkması beklenmektedir (Url-1). Bu, gıdaya, enerjiye ve barınmaya ihtiyaç duyan ve küresel ekosistemler üzerinde büyük baskılar oluşturan çok sayıda insan demektir. Nüfus artışı sürdürülebilir kalkınmayı tehlikeye atmaktadır, dolayısıyla ekolojik sınırları aşmamak için kaynakların kullanım verimliliğinin yükseltilmesi gerekmektedir (Jovane ve diğ, 2008).

Sanayileşmenin ilk adımı olarak görülmekte olan tekstil ve moda endüstrisinin, olumsuz çevresel etkisi endişe vericidir. İnsanlar, dünyanın (sanayi öncesi döneme göre) yaklaşık 1,0 °C ısınmasına sebep olmuştur. Tekstil ve moda endüstrisi, BM 2019 verilerine göre küresel seragazı emisyonunun %10'u (Saha ve diğ, 2021) ile petrolden sonra en kirletici ikinci endüstridir (Rinaldi, 2019; Saha ve diğ, 2021). Moda tüketimindeki patlama, kaynak kullanımında ve atık üretiminde büyük artışlara neden olurken (Rinaldi, 2019), her yıl 3 milyar \$ değerinde tekstil ve moda ürün atığının çöp sahasına gittiği tahmin edilmektedir (Saha ve diğ, 2021). Seragazı emisyonları mevcut

şekilde devam ederse, küresel ısınmanın 2030 ile 2052 yılları arasında 1,5 °C sınırını geçeceği öngörülmektedir (Url-2). Dünya ekonomisinde en büyük endüstrilerden biri olan moda (Rinaldi, 2019), maliyet ve verimlilik temelli değer zinciri nedeniyle geri dönüşü olmayan ekolojik ve sosyal zararlar vermeye devam etmektedir (Saha ve diğ, 2021). Sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğu önleme, ekolojik sistemler ve yaşam alanları üzerindeki birçok kalıcı etkinin önlenmesi için 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşmak gerekmektedir (Url-2).



Şekil 2.1 : Ekolojik aşım 2030 göstergeleri, (Url-4).

11,3 milyar hektarı oluşturan dünya yüzeyinin yaklaşık dörtte biri, kaynakların yenilenmesine katkıda bulunan biyolojik olarak üretken alan olarak kabul edilebilmektedir. Yeryüzünde kişi başına düşen ortalama biyolojik kapasite miktarı, 1.8 küresel hektar biyolojik kapasite ile sonuçlanmaktadır. Yapılan hesaplamalar, ekolojik ayak izinin biyolojik kapasiteyi çoğunlukla aştığını göstermektedir. Şekil 2.1'deki diyagram eğrileri, insanlığın toplam ekolojik ayak izini ve bunun 1961'den 2030'a kadar olan CO2 kısmını göstermektedir (Url-4). Doğal kaynaklar, gezegenin onları yenileme kapasitesi ile sınırlıdır. Özellikle metaller ve fosil yakıtlar sınırlı kaynaklardır (Wijk ve Wijk, 2015). Fosil yakıt bazlı lifler için, özütleme hızı ile yenilenme hızı arasındaki dengesizlik (bu, petrol için yaklaşık bir milyon yıldır) dolayısıyla petrol bazlı lifler de yenilenemez olarak tanımlanırlar (Fletcher ve Grose, 2012). Şekil 2.1'de görüleceği gibi 1985 sonrasında küresel düzeyde kaynak tüketimi, ekolojik kapasiteden daha yüksek olmuştur. 2050 yılı için, yenilenebilir doğal

kaynaklara olan ihtiyacın karşılanması için iki Dünya'nın biyolojik kapasitesinin gerekli olduğu tahmin edilmektedir. Örneğin, petrol kaynaklarına ilişkin tahminler 1 milyar ile 3 milyar varil arasında değişmektedir ve en yüksek petrolün 2008 ile 2020 yılı arasında olduğu tahmin edilmektedir (Jovane ve diğ, 2008). Dolayısıyla, lif üretiminde daha az fosil yakıt enerjisi kullanmak ve böylece üretilen karbondioksit miktarını azaltmak, “pik petrol²” gibi seviyeleri deneyimlediğimiz için hem çevresel hem de ekonomik olarak (Fletcher ve Grose, 2012) zorunluluktur. Doğal (yenilenemeyen) kaynakların tüketimi ve sınırlı miktarı nedeniyle emtia fiyatları da hızla artmaktadır. UNESCO ve Dünya Ekonomik Forumu'na göre, muhtemelen şu anda küresel ekonomiyi istikrarsızlaştıran finansal erimeden daha büyük küresel etki "su iflası" gerçeğinde (Fletcher ve Grose, 2012) yatmaktadır. Küreselleşmenin yanı sıra, iklim değişikliği, yaşlanan nüfus, halk sağlığı, yoksulluk ve sosyal dışlanma, biyolojik çeşitlilik kaybı, artan atık hacmi, toprak kaybı ve ulaşım sıkışıklığı gibi temel sorunlarda hızla artmaktadır. Tüm bunlara karşılık, biyokütle (mahsuller, bitkiler ve ağaçlar) yenilenebilir bir kaynaktır. Dolayısıyla, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılamak istiyorsak, biyo-tabanlı bir ekonomiye geçilmesi gerekmektedir (Wijk ve Wijk, 2015).

2.2 İnsan Endüstri Değer Zincirinin Evrimi

İmalat; ürünlerden, ürün yaşam döngülerini sürdüren süreçlere, üretimin doğrudan veya hizmetler, zenginlik ve istihdam yoluyla yarattığı sektörlerdeki işletmelere kadar, sanayileşmiş toplumun belkemiğidir. Ülkelerin sanayileşmesi, sanayi devriminin başlangıcından itibaren imalat yoluyla gerçekleşmiştir (Jovane ve diğ, 2008). İmalat, işletmeler tarafından sağlanan ürünler, süreçler ve hizmetler aracılığıyla insan ihtiyaçlarından endüstri yanıtına kadar uzanan “İnsan-Endüstri Değer Zincirini” kapsamaktadır. İmalatın, zenginlik, iş yaratma ve yaşam kalitesi konusunda önemi büyüktür. Endüstriyel çağın başlangıcından günümüze kadar çeşitli etkenlerle tetiklenen imalat sanayi, birçok devrim geçirmiş, ekolojik, ekonomik, sosyal ve teknolojik bağlam değişikliklerine ve evrimin itici gücü olan talep değişikliklerine yanıt vermek için “*Esnek Otomasyondan Sürdürülebilir Üretime*”

² 'Pik petrol' terimi, herhangi bir sonlu kaynağın bir noktada optimum çıktı seviyesine (zirve) ulaşacağı ve ardından (petrolün) daha riskli hale geleceğidir. Petrol sahaları yaşlandıkça daha az üretken hal alarak, çıkarılması daha zor ve pahalı hale geleceği gerçeğini yansıtır (Fletcher ve Grose, 2012).

kadar çeşitli endüstriyel paradigmalar geliştirilmiştir (Jovane ve diğ., 2003). Endüstride 19. yüzyılda buhar, 20. yüzyılda otomasyon itici güç olurken 21. yüzyılda itici güç sürdürülebilirliğe dayanmaktadır (O'Brien, 1999). Toplumun daha iyi bir çevreye ve dolayısıyla temiz ürünlere olan ihtiyacına dayanan ve yeni bir paradigmal yaklaşım olarak ele alınan sürdürülebilir üretim kavramı, toplumun çevre konusunda bilgilenmesi, farkındalıklarının arttırılması ve oluşturulan bilincin satın alma davranışlarına yansıtılması şeklinde gelişmektedir. Tüketim eğilimi, özelleştirilmiş sürekli değişen ürünlerin talebine doğru kaymış, buna paralel olarak, toplumda çevre dostu ürün talebi de giderek önemini artırmıştır.

2.2.1 Paradigmal Değişim

Ekolojik, ekonomik, sosyal ve teknolojik bağlam, “talep paradigmaları” ile endüstriyel “tepki paradigmaları” arasındaki kavramsal etkileşim ve değişiklikler, insanın yeni ihtiyaçlarını, biyo ve nano-teknolojiler gibi yeni alanlara, yeni çevresel gereksinimlere, büyüyen bir küreselleşme içinde endüstriyel yapının yeniden yapılandırılmasına kadar uzanmaktadır. Üretim, kavramsal ve operasyonel düzeyde uzun bir talep-yanıt işlemleri dizisinin merkezi olarak görülebilmektedir. Paradigmalar, üretimi ve evrimini tanımlayan makro özellikler olarak düşünülebilmektedir. Bir teknoloji paradigması, bir dizi bağlam ihtiyacına yanıt vermek için entegre ve nihai hale getirilmiş bir dizi olanak olarak değerlendirilebilir. Deneyim ve/veya etkinleştirici teknolojilerin geliştirilmesi yoluyla yeni bir paradigma gelişebilir. Belirli bir zaman ve bağlamda başlar ve farklı teknolojik ve coğrafi yerlerde geçmiş ve yeni paradigmalarla bir arada var olabilir (Jovane ve diğ., 2003). Taylorizm; bilimsel temelli üretim yönetimi, neredeyse tüm üretim süreçleri ve sistemlerinin organizasyon modelini karakterize eden, insanlar için işlerin temel süreçlere göre bölündüğü paradigmalar olarak formüle edilmiştir (Cunha ve Maropoulos, 2007). 21. yüzyılda metodolojiler değişmiş, bilgisayarlar tüm süreçlere entegre olmuştur. İnovasyon, üretimi bilgi tabanlı ve sayısal üretim süreçlerini kullanan bilgiye dayalı yeni bir Taylorizm'e dönüştürmüştür. Yıllar içinde piyasa rekabeti ve toplum tarafından yönlendirilen dört ana gereksinim “*daha düşük fiyatlara duyulan ihtiyaç, özelleştirme ihtiyacı, yenilik ihtiyacı, çevre bilincine duyulan ihtiyaç*” ortaya çıkmıştır. Bu tür gereksinimler, farklı üretim paradigmalarının karşı karşıya kaldığı ana ortak gereksinimleri “*verimlilik, özelleştirme, çeviklik*” tetikleyerek üretimi etkilemiştir. Üretim paradigmaları, bağlam ihtiyaçlarına yanıt vermek için benimsenen üretim

stratejileri olarak değerlendirilebilir. Tüketim malları imalatında, üretim paradigmaları (Jovane ve diğ., 2003), “Zanaat Üretimi, Seri Üretim, Esnek Üretim ve Kitlesele Özelleştirme ve Sürdürülebilir Üretim” olarak (Çizelge. 2.1’de) tanımlanmaktadır.

Her paradigmanın çok farklı tipte bir teknoloji etkinleştiricisi ve paradigma ilkelerine uyan süreç etkinleştirici olmuştur. Değişen toplum ihtiyaçları ve pazar gereksinimleri ile paradigmaların ve bunlara karşılık gelen üretim sistemlerinin gelişmesiyle, üç ana gereksinim “verimlilik, özelleştirme, çeviklik” göz önüne alındığında; “Otomasyon, Kitlesele Özelleştirme ve Çevik Üretim” her biri yıllar içinde ortaya çıkan belirli üretim paradigmalarına karşılık gelmiştir (Jovane ve diğ., 2003).

Çizelge 2.1 : Üretim paradigmalarının evrimi, (Guo ve diğ., 2020).

Üretim Paradigmaları	Zanaat Üretimi	Seri Üretim	Yalın/Esnek Üretim	Kitlesele Özelleştirme	Sürdürülebilir / Kişisele Özel Üretim
Period	Endüstri 1.0	Endüstri 2.0	Endüstri 3.0		Endüstri 4.0
Teknoloji ve Süreç Etkinleştirici	Su ve buharla çalışan mekanik üretim makineleri	Elektrik enerjisiyle çalışan seri üretim hatları	Üretim otomasyonu için elektronik ve ICT sistemleri		Akıllı üretim için, Iot, CPS, Sayısal ikiz, Blok zinciri ve Katmanlı üretim
Market	Ürün başına çok küçük hacim, özelleştirilmiş ürün, yüksek fiyat	Talep>Arz sabit Son derece yüksek hacimli özdeş ürünler, düşük maliyet	Arz>Talep Yüksek hacimli çeşitlendirilmiş ürünler, ekonomik maliyet	Küreselleşme, değişen talep Büyük miktarda neredeyse kişiselleştirilmiş ürün, rekabetçi maliyet.	Çevre, Küçük miktarlarda son derece kişiselleştirilmiş ürünler, azaltılmış maliyet.
Müşteri Katılımı	Tasarla, imal et, monte et, teslim et, sat	Satmak	Topla, sat	Topla, sat	Tasarla, imal et, monte et, teslim et, sat
Bağlantı ve Paylaşım	Çok düşük	Düşük	Düşük	Yüksek	Çok yüksek

Zamanla çevre bilincinin önemi artmış ve bu sosyal itici güçten iki ana etki doğmuştur:

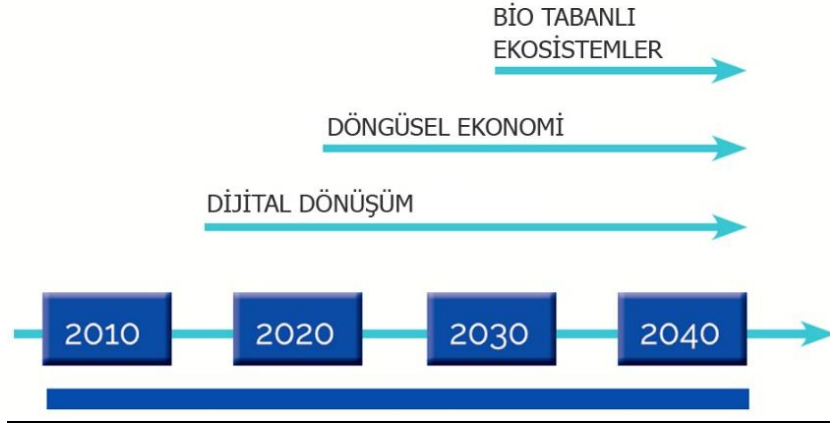
- ürünleri sık sık güncelleme gerekliliği,
- yaşam döngüsü yönetiminin önemini vurgulama gerekliliği.

İlki, çoğunlukla çevik üretime yönelik üretim paradigmaları tarafından ele alınan bir inovasyon yönü olarak kabul edilmiştir. İkincisi ise sürdürülebilir üretim paradigmasında ele alınır (Jovane ve diğ., 2003) ve yeni materyallerin yanı sıra ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarını hesaba katan bir tasarım üzerinde odaklanmaktadır.

AB'nin 2020 üretim vizyonuna yönelik manufuture girişimiyle, bütünsel ağ üretiminde uygulanan, sürdürülebilirlik ve refaha yönelik bilim ve teknoloji temelli başlattığı vizyon; ürünlerin tüm yaşamları boyunca optimizasyonuna ve değer yaratmasına yöneliktir. Ürünlerin özelleştirilmesi, üretimin, ürüne yakın hizmetlerin ve geri dönüşüm gereksinimlerini ve kullanımını anlamayı içerir. Bu anlayış, üreticilerin her bir ürünün ömrünü takip etmesine ve her bir ürünün faydalarını en üst düzeye çıkarmasına olanak tanımaktadır (Cunha ve Maropoulos, 2007).

2030 vizyonunda ise AB manufuture platformu, hedeflerinde “bilim ve teknoloji” zorlukları; üretim sistemine değer katmak, yatay ve dikey entegrasyon, döngüsel ekonomiye giden yola dair bütün alt başlıklarda katmanlı üretimin hakim olduğu bir üretim anlayışı görülmektedir: (ManuFuture HLG., 2019)

- Üretim teknolojisi ve endüstriyel ekipmanları: Katkılı İmalat, katma değerli katkılı imalat, hibrit süsreçler, hibrit malzemelerin etkili işlenmesi, yeni malzemeler, yapılar ve üretim süreçlerine entegrasyonu, Biyodan ilham alan üretim platformları...
- Sayısal Dönüşüm: Karmaşık ürünlerdeki “(çok malzemeli, 3D baskılı, yüksek düzeyde özelleştirilmiş ürün) ve (hareket halindeki veriler)” sıfır kusurlu üretim, sensör sistemleri, kişiye özel ürünler için sayısal ve akıllı üretim platformları, simülasyon sistemleri, sanal üretim sistemleri, giyilebilir şeylerin interneti, yeni tasarım ve mühendislik araçlarının geliştirilmesi, üretimde sayısal araçlar, üretimde bilgi ve veri füzyonu...
- Nano teknolojiler ve malzemeler: Akıllı hibrit ve çoklu malzemeler, gelişmiş çok fonksiyonlu malzemelere dayalı hafif yapılar, akıllı malzemeler ve fonksiyonel baskı, nanomalzemelerle katkılı imalat...
- Biyolojik Dönüşüm: Biyozeka - sürdürülebilir değer yaratma sistemlerinin geleceği, biyo-akıllı değer yaratma, biyosensörler, biyoaktüatörler, biyo akıllı malzemelerin katkılı imalatı, ekolojiye-dayalı imalat...
- Müşteri Odaklı Üretim: Akıllı tasarım, kişiselleştirilmiş üretim için akıllı tasarım, katkılı imalat tasarımı, kişiye özel üretim, insan merkezli üretim, kitle kişiselleştirme, veri ile artırılmış toplu özelleştirme...
- İnsan Merkezli Üretim: Beceri ve bilgi yönetimi, yüksek katma değerli üretim becerileri, insan merkezli veri ve bilgi modelleme araçları, artırılmış insanlar...
- Döngüsel Ekonomi: Malzeme ve enerji (kurtarma, geri dönüşüm, verimlilik), yeni sürdürülebilir malzemeler, süreçler ve biyo ürünler, yaşam döngüsü yönetim teknolojileri ve tasarım, yenileme ve yeniden üretim, ürün bakımı ve yeniden kullanım yaklaşımı...
- Robotik ve esnek otomasyon, çevik üretim ve yeni iş modelleri diğer alt başlıkları oluşturmaktadır.



Şekil 2.2 : AB, 2040 vizyonu ile dönüşüm dalgaları, (ManuFuture HLG., 2018).

AB'nin 2040 vizyonu ile önümüzdeki yıllarda etkili olacağı düşünülen dönüşümsel dalgalar, “*sayısal dönüşüm, döngüsel ekonomi ve bio tabanlı ekosistemler*” olarak Şekil 2.2’ de belirtilmektedir. (ManuFuture HLG., 2018). Biyomalzemeler ile katmanlı üretimin veya 3B baskı teknolojileri birleşimi, gerçekten sürdürülebilir ve döngüsel bir ekonomi gerçekleştirme fırsatı sunmaktadır. Bu iki paradigma değişimi birleştiğinde çok sayıda yeni ve yenilikçi ürünün (Wijk ve Wijk, 2015) ortaya çıkma potansiyeli bulunmaktadır.

Son iki yüzyılda, üretim ve teknolojik gelişimin evrimi, ürün ve hizmetler aracılığıyla değişen toplumsal ihtiyaçlara etkin çözümler sağlamıştır. Üretim süreçleri ve ürün üretim yöntemlerinin sürekli gelişimi ile insan ihtiyaçlarının karşılanması sağlanmış ancak gezegen üzerinde ekolojik etkiyle olumsuz sonuçlara neden olmuştur. Sürdürülebilir üretim bilgi alanı; ekonomik, ekolojik ve sosyal boyutlarıyla, döngüsel ekonomi anlayışına çözüm sağlamaktadır. Üçüncü bölümde Sürdürülebilirlik kavramı, sürdürülebilir üretim ve evrimi detaylarıyla ele alınmıştır.

3. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Yakın bir zamana kadar, tüm insan faaliyetleri sınırsız kaynaklar ve dünyanın sınırsız yenilenme kapasitesi paradigmasına dayanmaktaydı ancak bu varsayım geçerliliğini yitirdi ve insanlık, ilgili tüm davranış modellerini değiştirmesi gerektiği gerçeğiyle yüzleşti. Oxford İngilizce Sözlüğü, “sürdürülebilir” sıfatının 1965 yılında “*sürdürülebilir büyüme*” ifadesini kullanan bir ekonomi sözlüğü aracılığıyla yaygın kullanıma girdiğini belirtmektedir (Caradonna, 2014). Seliger'e göre sürdürülebilirlik, gelecek nesiller için doğal kaynakların ve ekosistemlerin kullanılabilirliğini geliştirirken insan yaşam standartlarını iyileştirmeye yöneliktir (Jovane ve diğ, 2008). Sürdürülebilirlik, ekoloji, toplum, ekonomi ve bunların etkileşimleri gibi üç alanla ilgili geniş bir kavramdır.

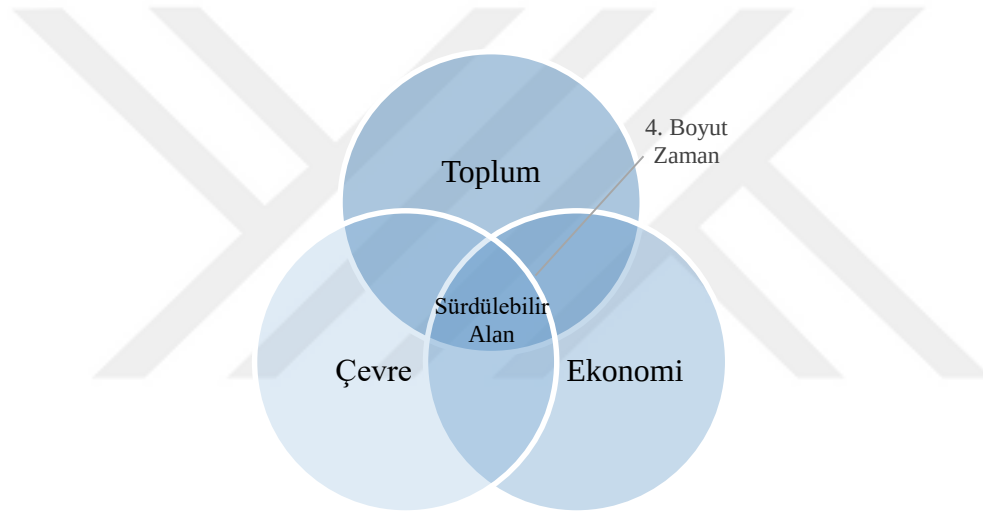
3.1 Sürdürülebilir Kalkınmanın Önemi

Mevcut endüstriyel sistemler, dünyanın doğal kaynaklarına olan talepleri nedeniyle uzun vadede sürdürülebilir değildir. Sanayi dünyası, kontrolsüz endüstriyel büyümenin tehlikeleri konusunda ilk olarak 1968'de kurulan Roma Kulübü tarafından; “nüfus artışı, gıda üretimi, sanayileşme, doğal kaynakların tükenmesi, kirlilik” faktörleri bakımından uyarılmış ve “Büyümenin sınırları” başlıklı çalışmanın desteklemesiyle sürdürülebilir kalkınmanın yolu açılmıştır (O’Brien, 1999; Jovane ve diğ, 2008).

“Gerçek gelişme çizgisi bu beş ana sektörde değişmeden devam ederse, insanlığın kaderinde gelişmenin doğal sınırlarına ulaşmak vardır. Önümüzdeki 100 yıl içinde en olası sonuç, nüfus düzeyinde ve endüstriyel sistemde ani bir düşüş olacaktır”. Roma Kulübü

BM tarafından desteklenen, Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu (WCED) ilk kez 1987'de, Brundtland Raporunda; “*insanlığın kalkınmayı sürdürülebilir kılması, gelecek nesillerin, kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden, bugünün ihtiyaçlarını karşılamasını sağlama yeteneğine sahip olması*” şeklinde formüle ettiği tanımında “*sürdürülebilir kalkınma*” terimini kullanmıştır. “*Büyüme, rekabet edebilirlik, istihdam, 21. yüzyıldaki zorluklar ve ileriye dönük yollar*” başlıklı

1994 tarihli Avrupa Komisyonu raporu, sürdürülebilir üretim politikasını teşvik etmiştir (O'Brien, 1999). Bartlett (1998) tarafından, “*kontROLSÜZ nüfus artışı, ekonomik büyüme ve fosil yakıtların gezegendeki uzun vadeli insan varlığına getirdiği risklere odaklanarak*” sürdürülebilirliğin en ayrıntılı tanımı ortaya konmuştur. Sürdürülebilir kalkınma, karşılaştığımız ekolojik, sosyal, ekonomik ve teknolojik zorluklarla başa çıkmak için gereken küresel bir stratejik vizyon olarak tanıtılmaktadır. Bunun ekolojik sınırları aşmadan gerçekleşmesi için kaynakların kullanım verimliliğinin yükseltilmesi gerekmektedir. Elkington'ın, işletmeleri göz önünde bulundurarak tanıttığı 'üçlü alt çizgi-kârlılık' kavramı, ekonomik hedeflere (karlar) ulaşırken ve iş yaparken, aynı zamanda ekolojik ve sosyal hedeflere (veya “alt çizgilere”) ulaşma ihtiyacına da atıfta bulunmaktadır (Jovane ve diğ, 2008).



Şekil 3.1 : Sürdürülebilir kalkınmanın üç boyutu (TBL), (Caradonna, 2014).

Sürdürülebilir kalkınma makro, orta, mikro düzeyde ele alınabilir. “*Makro düzeyde, gerekli temel olarak çevreye, sosyal boyutun hedeflenmesine olanak sağlayan bir araç olarak ekonomiye ihtiyaç duyacaktır. Orta düzeyde, ekonomik, sosyal ve çevresel koşulları karşılayan ürün ve hizmetler, süreçler ve iş modelleri ile ilgili uygun yanıt paradigmaları ile ilgilenir. Sürdürülebilir üretim yanıt vermelidir. Alan düzeyinde, ürünler ve hizmetler olmalıdır*” (Jovane ve diğ, 2008).

BM 2015 yılı genel kurulu, 2030 vizyonu için 5 ana sürdürülebilir kalkınma hedefleri kategorisi “*İnsanlar, Gezegen, Refah, Barış ve Ortaklık*” belirlemiştir. Sürdürülebilirliğin sürekliliğinin sağlanması ise, E4.0 temel teknolojilerinin, sürdürülebilir kalkınma hedefleri dikkate alınarak tasarım süreçlerinde benimsemesini gerektirmektedir.

Sosyal Hedefler: İnsanlar ve Barış kategorisinin benimsenmesi, çevresel ve sosyal koşulların insan güvenliğini, refahını ve sağlığını süresiz olarak desteklemeyi en üst düzeye çıkarmak için yaşam biçimlerimizi dönüştürmek anlamına gelmektedir. Toplumsal kalkınma için sayısal fabrikasyona dayalı üretim ve yapılan tasarımların sosyal sürdürülebilirlik değerlendirmesi aşamalarında (ürün ve süreç) faktörlerine odaklanılmalıdır.

Ekonomik Hedefler: Refah ve Ortaklık kategorisinin benimsenmesi, iş-yaşam dengesi gibi finansal unsurlar açısından tüketimin, toplumun ekonomik refahı üzerindeki etkisiyle ilgilidir. Sayısal tasarım projelerinin, yaşam döngüsü (LCA) yaklaşımı ve sayısal üretim bağlamında 6R konularına odaklanmaktadır. Sayısal fabrikasyona dayalı üretim yaklaşımında, döngüsel ekonomi ve yeniden dağıtılmış üretim kavramı (katmanlı üretim) entegrasyonu sürdürülebilir ürün geliştirme için uygun bir ortam sunmaktadır.

Ekolojik Hedefler: Gezegen kategorisinin benimsenmesi, tüketimden kaynaklanan çevresel değişimin, etkisiyle ilgilidir. Sayısal fabrikasyona dayalı projelerde bu kavramı anlamak için (malzeme ve süreç) faktörlerine odaklanılmalıdır. Sayısal fabrikasyonun çevresel sürdürülebilirliğini ele alan literatür, yenilenebilir malzeme kullanımını tavsiye etmektedir. Bu kavramlar döngüsel ekonomiyi işaret etmektedir.

Teknolojinin Rolü: İki ana vizyon; toplumların, ekonomilerin ve çevrenin önümüzdeki yıllarda nasıl olacağına dair güncel tartışmalar odağında, bireylerin ve toplumların dünyalarını nasıl daha iyi hale getirebilecekleriyle ilgilidir. İlk vizyon, sayısal teknolojilerdeki yeni gelişmelere, ekonomi ve toplumun aşamalı sayısallaşma yoluyla mümkün kılınan daha iyi bir dünya vaadine odaklanmaktadır. BİT'deki ilerlemeler, farklı sayısal teknolojileri birleştiren ve bunları fiziksel, sayısal ve biyolojik alanlara entegre edecek siber-fiziksel sistemlerdir. Daha öncekilere oranla daha büyük ölçekte, daha hızlı, derin ve sistemik toplumsal değişiklikler üretecektir (Pollitzer, 2019). İkinci vizyon ise, BM Sürdürülebilir Kalkınma 2030 gündemi'nin hedeflerine odaklanmakta, bütünleşik ve bölünmez, küresel ve evrensel olarak uygulanmaktadır. Toplumun ve ekonominin sayısallaşması, yalnızca teknolojik gelişmelere yatırım yapmayı değil, ülkelerin başarıya katkıda bulunan çeşitli alanlarda da (güvenilir bağlantı ve kalite standartları, internet ve veri güvenliği, finansal ve yasal çerçeveler, bilimsel ve yenilikçi sermaye gibi) yetenekler geliştirmesini gerektirir (Pollitzer, 2019). Teknoloji, gelişmiş kullanışlılık ve daha az olumsuz çevresel etkiye

sahip süreçlerin ve ürünlerin tasarımında, sistematik olarak faydalı amaçlara katkı potansiyeli sunmaktadır. Teknoloji, süreçlerin insan ihtiyaçlarını karşılamak için doğal kaynakları ürünlere dönüştürmesini sağlamaktadır. Ekolojik ayak izimizin Dünya'nın kapasitesini aşması gibi sorunlar, ekonomi, sosyal, ekoloji ve teknoloji bağlamında çözümler gerektirir. Üretim, bu çözümlere katkı sağlayabilir (Jovane ve diğ, 2008). Sürdürülebilir bir üretim için teknoloji, sürdürülebilirliğin üç temel boyutunun tümünün etkinleştiricisi olarak görülmeli ve eğitim de başka bir temel etkinleştirici bileşen olarak düşünülmelidir.

Teknolojik ilerlemeyle birlikte iş yapış şekilleri de sürekli yeniden şekillenmekte, firmalar yeni üretim yollarını benimsemekte, pazarlar genişlemekte ve toplumlar gelişmektedir. Teknoloji, işyerinde üç tür beceriye olan talebi bozmaktadır. Birincisi, hem gelişmiş hem de yükselen ekonomilerde rutin olmayan bilişsel ve sosyo-davranışsal becerilere olan talepte artma görülmektedir. İkincisi, rutin işe özgü becerilere olan talep azalmaktadır. Üçüncüsü, uyarlanabilirliğin göstergesi olan farklı beceri türleri kombinasyonlarının getirileri artmaktadır (Djankov ve Saliola, 2019). 2019'da gerçekleşen G7 Zirvesi'nde 32 büyük marka, moda endüstrisini BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ile uyumlu hale getirmeyi amaçlayarak "Moda Paketi"ni imzalamıştır. Bilime Dayalı Hedefler Girişimi'nde çizilen yol "iklim, biyoçeşitlilik ve okyanuslar" olmuştur. Moda endüstrinin %20'si artık 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu ve tüm tedarik zinciri boyunca tüm yüksek etkili üretim süreçlerinde yenilenebilir enerjinin uygulanmasını teşvik etmekte ve kendi operasyonlarında %100 yenilenebilir enerji kullanımını taahhüt etmektedir. Ayrıca, 2030 yılına kadar tek kullanımlık plastiklerin kullanımının ortadan kaldırılması taahhüt edilmektedir (Rinaldi, 2019).

3.2 XXI. Yüzyılın Sürdürülebilir Üretim Trendleri

İmalat, mal üretme sürecinden çok daha fazlasıdır, insan-endüstri değer zincirine bağlı tüm farklı hizmet türlerini içermektedir. İmalat üç düzeyde: makro (makro-ekonomi) ile meso (üretim ve tüketim paradigmaları) ve alan düzeyi (ürünler/hizmetler, süreçler, iş modelleri) olarak incelenebilir (Jovane ve diğ, 2008). Üretim, sürdürülebilir kalkınmanın temel bir etkinleştiricisi olarak ve ekonomi, toplum, ekoloji ve teknoloji ile sıkı sıkıya ilişkilidir. Tedarik zinciri yönetimi, tüm değer zincirini kapsar. Firmaların rekabet avantajını artırmak için tedarikçilerinin süreçlerini, teknolojisini ve

yeteneklerini nasıl kullandıklarına odaklanmaktadır (Tan ve diğ, 1998). Yaşam döngüsü aşamaları (üretim öncesi, imalat, kullanım, kullanım sonrasına kadar), tedarik zinciri boyunca uzanır ve bu nedenle imalatta genel sürdürülebilirlik için sürdürülebilir tedarik zincirleri bir zorunluluktur.

AB Manufuture 2019 raporuna göre üretim, 2030 vizyonu ile “Rekabetçi, Sürdürülebilir ve Dayanıklı” üretime doğru ilerlemektedir (ManuFuture HLG., 2018). Sürdürülebilir kalkınmanın ana sağlayıcısı olarak tanımlanan vizyon, yüksek katma değerli, bilgi temelli ürünler/hizmetler, süreçler ve iş modellerini makro düzeyden orta düzey ve alan düzeyine kadar kapsamaktadır. Zaman, maliyet ve kalite gibi geleneksel hedeflerin yanı sıra, enerji tüketimi ve azaltılmış malzeme gibi yüksek etkili hedefler, işlevsellikleri parçalara ve bileşenlere entegre etmektedir (Jovane ve diğ, 2008).

3.2.1 Sürdürülebilir Üretim

Toplumun daha iyi bir çevre ve dolayısıyla “temiz ürün” ihtiyaçlarını temel alan üretim anlamına gelmektedir. Nano, biyo malzeme teknolojisinin tek başına veya bir arada ortaya çıkan yeni teknolojileri, bu gereksinimlerin elde edilmesini sağlayacak ve artan üretimin süreç etkinleştiricisi, 2020 sonrası toplumsal hedefleri gerçekleştirecektir (Jovane ve diğ, 2003). Sürdürülebilir üretim, bir ürünün yaşam döngüsünün tüm aşamalarını hesaba katmak için bir ürünün tasarımında temel bir yeniden düşünmeyi ve üretim süreçlerinde temiz teknolojilere geçişi gerektirmektedir. Sürdürülebilir üretim kavramı, sürdürülebilir kalkınmanın kilit bileşenlerinden biridir, üretim paradigmasının evrim sürecinin en gelişmiş modeli olarak 2020 ve sonrası vizyonu için kabul edilmektedir. Günümüzde üretimin teknolojiye dayalı olmasıyla, teknolojinin sürdürülebilirlik üzerindeki önemi her geçen gün artmaktadır.

ABD Ticaret Bakanlığı, sürdürülebilir üretimi; *“Olumsuz çevresel etkileri en aza indiren, enerji ve doğal kaynakları koruyan, çalışanlar, topluluklar ve tüketiciler için güvenli ve ekonomik olarak sağlam süreçleri kullanan üretilmiş ürünlerin oluşturulması”* ifadesiyle tanımlamaktadır (Jayal ve diğ, 2010). Bu tanım ABD Ulusal Gelişmiş İmalat Konseyi (NACFAM) tarafından, *“sürdürülebilir üretim, sürdürülebilir ürünlerin üretimini ve tüm ürünlerin sürdürülebilir üretimini içermektedir”* yaklaşımıyla genişletilmiştir. Birincisi, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği, yeşil bina ve diğer ‘yeşil’ ve sosyal eşitlik ile ilgili ürünlerin üretimini

içerirken, ikincisi, üretilen ürünlerle ilgili toplam yaşam döngüsü konularını dikkate alarak tüm ürünlerin sürdürülebilir üretimini vurgulamaktadır (Jayal ve diğ, 2010).

Sürdürülebilir üretimde erken çalışmalar, Çevreye Duyarlı Üretim etiketi altında gerçekleştirilmiştir. Sarkis (1995), çevreye duyarlı üretim stratejilerine, (ürün, süreç ve teknoloji) üç boyutunu tanımlayarak, R stratejilerini oluşturmuştur (Despeisse ve diğ, 2012). Sürdürülebilir üretime yönelik böyle bir yaklaşım, yalın üretim (atık azaltma temelli) veya yeşil üretim (çevresel olarak zararsız) uygulamalarından, daha büyük değer artışları sağlayabilmektedir (Faulkner ve Badurdeen, 2014). Üretimde sürdürülebilirliğe ulaşmak, yalnızca ürünü ve imalatında yer alan üretim süreçlerini değil, aynı zamanda birden fazla ürün yaşam döngüsü boyunca üretim sistemleri dâhil olmak üzere tüm tedarik zincirini kapsayan bütünsel bir bakış açısı gerektirmektedir. Dolayısıyla, üretimin sürdürülebilirliği, ilgili tüm (ürün, süreç ve teknoloji) seviyelerindeki sorunları ekonomik, ekolojik ve sosyal boyutlarıyla dikkate almayı gerektirmektedir (Jayal ve diğ, 2010).

Ürün düzeyinde; sürdürülebilir üretimin “azaltma, yeniden kullanma, geri dönüştürme, kurtarma, yeniden tasarlama, yeniden üretme” temelini oluşturan 6R stratejilerine geçmeyi gerektirmektedir.

Süreç düzeyinde; enerji ve kaynak tüketimlerini, toksik atıkları, mesleki tehlikeleri vb. azaltmak ve proses kaynaklı yüzey bütünlüğünü manipüle ederek ürün ömrünü iyileştirmek için optimize edilmiş teknolojik iyileştirmeler ve proses planlamasını gerektirmektedir.

Teknoloji düzeyinde; tüm yaşam döngüsü aşamalarına (üretim öncesi, imalat, kullanım ve kullanım sonrası) odaklı, tedarik zincirinin tüm yönlerini dikkate almayı gerektirmektedir.

Üretim, bir ürünün tedarik zincirindeki temel operasyon olduğundan, fiziksel ürünler göz önüne alındığında, sistemi tasarlamak ve operasyonlarında sürdürülebilirliği teşvik etmek, 6R stratejileri ile sürdürülebilir bir üretim yaklaşımına odaklanma gerektirir. 6R stratejisi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır: (Metta ve Badurdeen, 2013)

1) Azaltma - (Reduce): ürün yaşam döngüsünün ilk üç aşamasında (ön imalat, imalat ve kullanım) gerçekleşmektedir. Kaynakların azaltılmış kullanımını; “*üretim öncesi kaynakların azaltılmış kullanımını, üretim sırasında enerji ve malzeme kullanımının azaltılmasını ve kullanım aşamasında atıkların azaltılmasını*” ifade etmektedir.

2) Yeniden Kullanım - (Reuse): ürünün ikinci ve sonraki yaşam döngüsü aşamalarında gerçekleşmektedir. Ham malzeme kullanım miktarını azaltmak için ürünün veya bileşenlerinin, ilk yaşam döngüsünden sonra, sonraki yaşam döngüleri için “ürünleri ve bileşenleri üretmek için yeni hammaddelerin kullanımını azaltmak” yeniden kullanılması anlamına gelmektedir.

3) Geri Dönüştürme – (Recycle): Atık olarak kabul edilecek malzemelerin (örneğin SLS tozu) yeni malzeme veya ürünlere dönüştürülme sürecini içermektedir.

4) Kurtarma – (Recover): Ürünlerin kullanım aşaması sonunda toplanması, sökülmesi, ayrıştırılması ve sonraki yaşam döngülerinde kullanılmak üzere temizlenmesi işlemini içermektedir.

5) Yeniden Tasarım – (Redesign): Ürünü daha sürdürülebilir hale getirmek için “Çevre için Tasarım” gibi tekniklerin uygulanması yoluyla gelecekteki kullanım sonrası süreçleri basitleştirmek için ürünleri yeniden tasarlama eylemini içermektedir.

6) Yeniden üretim – (Remanufacture): Kullanılmış ürünlerin, orijinal ürüne benzer veya daha iyi performansa sahip, işlevsellik kaybı olmaksızın yeni gibi bir duruma geri döndürülmesi için yani halihazırda kullanılmış ürünlerin restore edilmesi yaklaşımıdır.

Sürdürülebilir ürünlerin tasarım ve üretiminde, sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik, ekolojik ve toplumsal yönlerini aynı anda dikkate alan kapsamlı bir yaklaşım izlenmelidir. 6R stratejisi, ürünlerin genel ekonomik, ekolojik ve toplumsal etkilerini azaltırken malzemelerden, bileşenlerden ve tüketilen enerjiden maksimum fayda elde edilebileceği kapalı döngü malzeme akışının sağlanmasına yardımcı olur. Bu nedenle, tasarım ve üretimde 6R yaklaşımının uygulanması, ürün geliştirmenin sürdürülebilirliğini desteklemektedir (Badurdeen ve diğ, 2018). Böyle bütüncül bir yaklaşım genellikle, kapalı döngü malzeme akışı için toplam ürün yaşam döngüsü boyunca, 6R ilkeleri uygulamalarını benimsenmeyi gerektirmektedir (Shuaib ve diğ, 2014). Dolayısıyla sürdürülebilir üretim, Doğrusal Ekonomiden Döngüsel Ekonomiye geçiş için teknolojik bir araç olarak hizmet etmektedir (Abedini ve diğ, 2020).

3.2.2 Döngüsel Üretim

Döngüsel ekonomi kavramı, Ellen MacArthur Vakfı tarafından iş pratiğine dönüştürülmüştür (Wijk ve Wijk, 2015) ve sürdürülebilirlik ile aynı temel ilkeleri paylaşmaktadır (Fonseca ve Simoes, 2019). Döngüsel üretim, sıfır atık bağlamında

yükselen daha sürdürülebilir bir üretim paradigmasıdır. Döngüsel üretim modeli, kaynakların tükenmesini önlemeyi, enerji ve malzeme döngülerini kapatmayı amaçlar. Üreticilerin, malzemeleri ve malları çok daha uzun süre kullanmanın yollarını buldukları, birden fazla ürün yaşam döngüsü yarattığı, yeni sayısal teknolojiler ve yeni finansman modelleriyle beslenen canlandırıcı bir üretim modelidir (Şekil.3.2). Düşüncedeki bu değişim, değer zincirinin her bölümünü etkileyerek imalat şirketleri için yeni bir çerçeve oluşturmakta, daha sürdürülebilir iş yapma biçiminin gerçek değeri fark edildikçe, döngüsel ekonomi hızla genişleyen bir ana akım haline gelmektedir (Taisch ve diğ, 2021). Döngüsel ekonomi iş modeli, mikro (işletmeler ve tüketiciler), meso (ortak yaşamla bütünleşmiş ekonomik ajanlar) ve makro (şehirler, bölgeler ve hükümetler) düzeylerinde sürdürülebilir kalkınmayı kolaylaştırır (Saha ve diğ, 2021).



Şekil 3.2 : Döngüsel üretimin esasları, (Taisch ve diğ, 2021).

Sürdürülebilirlik süreci moda sektörünü de değiştirmeye zorlamaktadır. Moda sektörünün ekonomi, ekoloji ve toplum gibi sistemlerle karmaşık ilişki, sektörü kökünden dönüştürme, içinde çalışan herkesi ve modaya ve tekstile günlük olarak dokunan herkesi etkileme potansiyeline sahiptir. Bazen, en büyük değişiklik, büyük uluslararası deklarasyonlardan ziyade bir dizi küçük, bireysel eylemden kaynaklanır ve bu, herkesin ulaşabileceği bir değişimin gerçekleşmesini sağlayabilir. “Deneyimler bize, çoğu insanın en çok kontrol sahibi oldukları şeyleri değiştirerek uygulamalarını değiştirmeye başladığını öğretir. Moda tasarımcıları ve giyim markaları için bu, onların ürünleri ve tedarik zincirleri ve çoğu zaman da malzeme seçimleri olma eğilimindedir” (Fletcher ve Grose, 2012). Döngüsel ekonomi, üretim/dağıtım ve tüketim süreçlerinde malzemeleri azaltarak, dönüşümlü olarak yeniden kullanarak, geri dönüştürerek ve geri kazanarak, “ömrünün sonu” kavramını değiştirmektedir. Böylece çevresel kalite, ekonomik refah ve sosyal eşitlik yoluyla sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Saha ve diğ, 2021). 2030

yılına kadar moda şirketleri %100 şeffaflık ve izlenebilirlik elde etmek için tüketicileri döngüsel değer zincirlerine dahil ederek ve onlara ürünün ömrünü uzatmak için birçok seçenek sunacaklardır. Moda şirketleri, ürün özelleştirmesi, isteğe bağlı koleksiyonlar, çok kanallı yaklaşım, transmedya hikaye anlatımı ve bire bir iletişim yoluyla tüketicilerin ihtiyaçlarını çok daha fazla merkeze alabilecek (Rinaldi, 2019). Yeni teknolojiler yaratıcılığa yol açarak, tasarımcıların daha önce hayal edilmemiş şekilde yenilik yapmalarına izin vermektedir (Lee, 2005). İnovasyonun küçük başladığı ve sonunda rekabet ortamını yeniden yapılandıran bir mega trende yol açtığı bilinmektedir. Bu anlamda, küçük bir tasarım işletmesi de etkili bir değişim aracı olabilir, daha küçük yapılar çevik ve uyarlanabilir, zamanla ve toplu olarak ana akım kültürünü etkileyen tamamen yeni iş modelleri sunabilir (Fletcher ve Grose, 2012).

3.2.3 Endüstri 4.0 ve Akıllı Üretim

2011 ve 2015 yılları arasında Almanya'da ortaya çıkan ve sayısal teknolojilerin üretime uygulanmasına odaklı bir girişim olan Endüstri 4.0 (I4.0), sayısallaştırma, organizasyonel dönüşüm, üretim ve üretim sistemlerinde üretkenlik geliştirme arasındaki ilişkiye odaklanmakta ve 4.SD çerçevesi içinde önemli bir bileşendir (Davis ve Philbeck, 2019).

Endüstri 4.0; Hannover Messe Teknoloji fuarında Almanya tarafından “İleri Teknoloji Stratejisi” 2020’nin anahtar bileşeni olarak duyurularak, katılımcılara gelişmiş veya gelişmekte olan endüstriyel teknolojiler tanıtılmıştır. Endüstri 4.0 Platformu, E4.0’ı bilgi ve iletişim teknolojilerinin desteğiyle kullanılan endüstri için akıllı makineler ve süreçler olarak tanımlar. Alman Hükümeti ise, E4.0’ı, otomatik bilgi alışverişini sağlayan yüksek düzeyde otomasyona sahip, mevcut bilgi ve iletişim ağlarının yoğun kullanıldığı “Siber Fiziksel Sistemler” tarafından desteklenen yapı olarak tanımlar.

Endüstri dinamiklerinin sayısallaştırılması (imalattaki sayısallaşma ve akıllı otomasyon), yıllar içinde sürekli bir gelişimle, E4.0’ın ortaya çıkmasına yol açmıştır. E4.0 programı, fiziksel bir dönüşümden ziyade sayısal bir dönüşümdür ve donanımdan çok da yazılıma dayanan “akıllı” olmakla ilgilidir (Chou, 2019). E4.0’ın gerçekleşmesi için gerekli gelişmeler aşağıda belirtilmiştir:

- *Üretimin sayısallaşması (yönetim ve üretim planlama için enformasyon sistemleri),*
- *Otomasyon (üretim hatlarından ve kullanılan makinelerden veri toplama sistemleri),*
- *Tüm tedarik zincirindeki üretim birimlerinin birbirine bağlanması (otomatik veri alışverişi).*

E4.0'ın temel faydaları arasında; sistem verimliliği, çeviklik ve endüstriyel esneklik, daha iyi tüketici deneyimi, maliyet ve gelir yönetimi bulunur. E4.0, iyi kaynak yönetimi, optimize edilmiş sistemler, süreçler ve akıllı tedarik değer zincirleri açısından artan değer yaratma ve üretkenlik faydaları sunar. E4.0 ve ilgili teknolojilerinin ilerlemesi, sürdürülebilirlik potansiyeli ve tasarım konusuyla ilişkilendirilerek, entegre ve akıllı teknolojilerin geliştirilmesine odaklanır. E4.0 etkinleştirici teknolojilerinin gelişmesi birden fazla endüstriye, işletmeye, sıfır kusurlu ürün/hizmet sunarken, kaynakları optimize etmeyi amaçlayan hizmet sektörlerini kapsayan onüç yıkıcı teknolojiye (IoT, Bulut Teknolojisi, CPS, Katmanlı Üretim, Büyük Veri, Yapay Zeka, Blockchain, Akıllı Malzemeler, vd.) yol açmıştır.

Operasyon Teknolojileri ve Bilgi Teknolojileri entegrasyonu ile geliştirilen E4.0 teknolojileri sürdürülebilir endüstriyel değer yaratmayı teşvik etmektedir. E4.0 ve onun kolaylaştırıcı teknolojileri, yeni iş modelleri (ekonomik değerler), daha fazla bağlantı (sosyal değerler) ve daha iyi atık yönetimi (çevresel değerler) oluşturma açısından sürdürülebilir endüstriyel değer yaratımı artışı arkasındaki itici güçtür. Yeni teknoloji, yeni iş modelleri, yeni sürdürülebilir dünyanın temel taşları olarak özellikle imalat sektörünü ilgilendiren bir değişimle akıllı üretim, sürdürülebilir ve kapsayıcı büyümenin ifadesi kabul edilmektedir. Yalın üretim, 80'li ve 90'lı yıllarda atıkların ortadan kaldırılması yoluyla maliyet tasarrufuna odaklanırken, akıllı üretim, üretkenlik, kalite, teslimat ve esneklik gibi ana üretim faktörlerinin yönetimi ve iyileştirilmesi yoluyla sürdürülebilir büyüme hedeflemektedir (Kang ve diğ., 2016).

Moda sektöründeki en yenilikçi iş modelleri etik, estetik ve yeniliği bütünleştiren, omnichannel (çok kanallı) bir şekilde çalışan; transmedya hikaye anlatımı yaklaşımı, ürün özelleştirmesi sunma, şirketin değer zincirine tüketici katılım faaliyetlerinin planlanması, dijitalleşme, üretim planlama ve tahmin veya üretim dahil değer zinciri boyunca süreçleri optimize etmek için teknoloji kullanımına dayanmaktadır. Giyilebilir teknolojiler, blockchain, IoT, AR, VR, 3B baskı, nanomalzemeler, robotik, yapay zeka ve makine öğrenimi gibi gelişen teknolojiler (Rinaldi, 2019), sektörü Moda 4.0'a doğru sürüklemektedir. Günümüzde katmanlı üretim, moda endüstrisi de dahil farklı endüstri ve araştırma alanlarında birçok uygulama ile kullanılan bir teknolojidir. KÜ, geleneksel süreçlere kıyasla sürdürülebilir bir üretim yöntemi olarak kabul edilmektedir ayrıca döngüsel ekonomiye giden yeni bir yol sağlamaktadır (Cruz Sanchez, 2020). Dördüncü bölüm katmanlı üretime detaylı bir bakış sunmaktadır.

4. KATMANLI ÜRETİM

Sayısal imalat yöntemleri, malzeme ve zaman kaybını en aza indirmeye yardımcı olan simülasyon ve analiz araçlarının benimsenmesiyle tasarım ve üretim süreçlerini yeniden şekillendirmekte olan ileri bir üretim modelidir. Sayısal üretim; sistem altyapısında (bilgi, hesaplama, yazılım, algılama, ağ oluşturma) yeni malzemelerin kullanımına dayanan, bir grup etkinliği birleştirerek ürün üretimini tanımlamak için kullanıldığı (Vallett ve diğ, 2017), bir imalat makinesinin bir bilgisayar ve yazılım yani kod ile kontrol edildiği üretim süreci olarak da tanımlanabilir. İki ana alt tipe ayrılmakta olan sayısal üretim sürecinde: malzemeyi çıkartarak şekiller oluşturan indirgeyici imalat metodolojilerinin aksine katmanlı üretim, 3B model verilerinden nesneler oluşturmak için az miktarda malzemeyi katman katman birleştirme işlemine dayanmaktadır.

Hull tarafından 1986'da ilk patentin alınmasıyla, “hızlı prototipleme” olarak bilinen, katmanlı üretim teknolojisi, alanında tek olarak doğmuştur (Hull, 2015). 2000'li yıllarda teknoloji sadece prototipleme için değil, aynı zamanda ölçekli üretim çözümü olarak da kullanılmaya başlanmıştır. Katmanlı üretim ile ilgili standartların geliştirilmesi, Uluslararası Standizasyon Örgütü (ISO) ve Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM) tarafından organize edilmiş, "katmanlı üretim" tanımı yapılmış ve kabul gören standartları yayınlamıştır. “ISO/ASTM standardı 52900” ise katmanlı üretim terminolojisini standart hale getirilmek ve yöntemlerini sınıflandırmak için 2015 yılında oluşturulmuştur (Url-43).

3B baskı genellikle maker kültürü, hobiler ve amatörler, masaüstü yazıcılar gibi erişilebilir baskı teknolojileri ile ilişkilendirilir. Bu, büyük ölçüde, 2009'da 3B baskının patlamasına yol açan orijinal MakerBot ve Ultimaker gibi RepRap hareketinden doğan uygun fiyatlı masaüstü makineler aracılığıyla 3B baskının demokratikleşmesine atfedilebilir. Buna karşılık, katmanlı üretim neredeyse her zaman ticari ve endüstriyel uygulamalarla ilişkilendirilmiştir (Url-3). Katmanlı üretim, bilimsel veri düzenlemelerinin üretimi için özellikle karmaşık şekillere sahip nesnelerin hassas üretimi için son teknoloji olarak kabul edilmektedir.

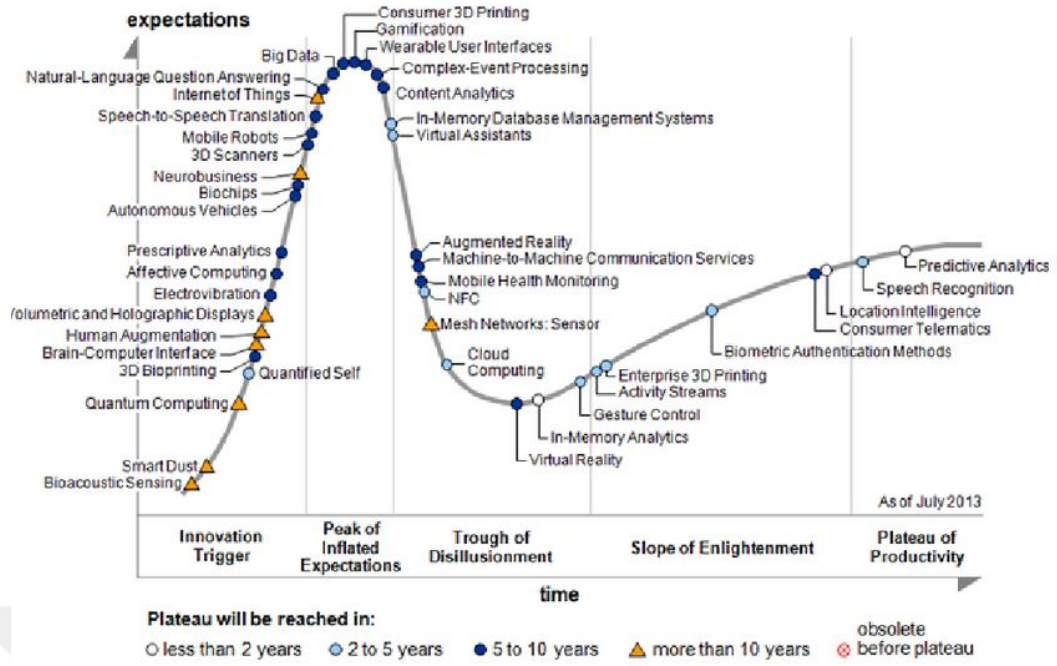
4.1 Üç Boyutlu (3B) Baskı Teknolojisinin Gelişimi

"3D print" terimi başlangıçta Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) tarafından bir ticari marka olarak adlandırılmış, resmi olarak "3DP" olarak kısaltılmıştır. Tez kapsamında ise (3BB) olarak Türkçe'ye çevirilerek kullanılmıştır. Üçüncü sanayi devrimi ve üretimin sayısallaşması ile ilişkilendirilen 3BB, üretim operasyonlarını kökten bozma potansiyeline sahiptir. 3BB, katmanlı üretimin uygulama alanının, endüstriyel amaçlardan kişiselleştirilmiş üretime başarılı bir şekilde genişlemesinin sonucudur. 3BB tek bir teknolojiyle sınırlı olmayıp, bir dizi farklı teknoloji süreciyle geniş bir platform teknolojisidir: (Schönberger ve Hoffstetter, 2016),

"3B baskı; veri toplama, geometrik verilerin ön işleme tabi tutulması, baskı makinesinin hazırlanması, baskı dizisinin kendisi ve işlem sonrası prosedürler gibi bütün bir işleme iş akışından" oluşmaktadır.

3BB bir ürün üretmek için güçlü sayısal tabanlı olasılıklar üretmeye olanak tanıyan, 3B modelleme yazılımı ile çalışılmayı gerektirmektedir. Kullanılan veri: tabaka, sıvı veya toz esaslı malzemelerden fiziksel parçalar oluşturmak için doğrudan CAD dosyasından aktarılmaktadır. Düşük sabit kurulum maliyetleriyle tipik olarak hızlıdır ve sürekli genişleyen bir malzeme listesiyle geleneksel teknolojilerden daha karmaşık geometriler, özellikle prototipleme ve hafif geometriler oluşturmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Url-3).

3BB teknolojilerin kullanımı gittikçe daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. Bu yöndeki artan ilginin kaynağı geliştirilen imalat yaklaşımdaki kullanılabilirlik, daha yüksek kalite ve fiyat avantajından kaynaklanmaktadır. 3BB, hızlandırılmış bir tasarım süreci, daha az üretim süresi ve envanter, depolama, paketlenme ve nakliye ile ilgili düşük maliyetler dahil olmak üzere geleneksel üretim süreçlerine kıyasla bir dizi avantaj sağlamaktadır (Vanderploeg ve diğ., 2017). 3BB teknolojisinin, çeşitli alanlar aracılığıyla yeni bir rol üstlenmesiyle prototiplemenin yanı sıra; tıbbi ve dişçilik parçaları, elektronik ve ev aletlerinin yedek parçaları, askeri ve havacılık sanayisi, mimari modeller ve spor malzemeleri gibi kitlesel ürünler için kullanımı da yaygınlaşmıştır. Ayrıca, tekstil ve moda endüstrisinde prototipler, kumaş yapıları, kişiselleştirilmiş fonksiyonel ürünler ve sanatsal parçalar için çok sayıda tasarımcı ve perakendeci tarafından kullanılmaktadır.



Şekil 4.1 : Gelişen teknolojilerin 2013 hype döngüsü, (Şahin ve Turan, 2018).

Teknolojik araştırma ve danışmanlık firması Gartner'ın gelişen teknolojilerin hype döngüsünde³ 3B baskı, ilk 2007 yılında görülmeye başlamıştır. Şekil 4.1'de görüleceği gibi, 2013 hype döngüsünde 3BB tepeye ulaştığında, “kurumsal 3B baskı, tüketiciye yönelik 3B baskı ve 3B biyo-baskı” olarak üç kategoride değerlendirilmeye başlamıştır. 4B baskının ilk kez görülmesi ise 2016 yılı hype döngüsünde olmuştur.

20. yüzyılın sonu, bilginin sayısallaşmasıyla ilgiliyken, 21. yüzyıl sanal dünyayı, fiziksel dünyayla daha da yaklaştırmakla ilgili olmaktadır. Bir nesnenin yazılım tasarımı ile fiziksel ürün arasında hiç bu kadar yakın bir bağlantı görülmemiştir. 3B baskı bize fiziksel dünya üzerinde daha fazla kontrol imkânıyla, yeni tasarım ve üretim araçları sağlarken bir şeyleri yapma ve tasarlama şeklimize değişim (Lipson ve Kurman 2013), getirdiği ortadadır şuan 4.SD'de etkinliğini artırarak sürdürmektedir.

Son birkaç on yılda, bilgi işlem gücünde, tasarım yazılımlarında, malzeme inovasyonunda ve internet'teki ilerlemeler ile 3B baskı teknolojisindeki kabiliyetlerde çeşitlenerek ilerleme göstermiştir. Çoğu üretim yöntemi gibi, 3BB süreci de belirli zorluklar içermekte, detaylara sürekli özen ve dikkat gerektirmektedir. ISO/ASTM

³ Gartner Hype döngüsü belirli teknolojilerin olgunluğunu, benimsenmesini ve sosyal uygulamasını temsil etmek için Amerikan araştırma, danışmanlık ve bilgi teknolojisi firması Gartner tarafından geliştirilen, markalaştırılmış bir grafik sunumdur. Hype döngüsü, gelişmekte olan bir teknolojinin yaşam döngüsünün beş temel aşamasını “teknoloji tetiği, aşırı beklentiler zirvesi, beklenmeyen çöküş, aydınlanma eğilimi, verimlilik platosu” detaylandırmaktadır (Url-71).

standartı 52900'de, yedi ana 3BB süreci: “Tekne fotopolimerizasyonu, Toz yatağı füzyonu, Malzeme ekstrüzyonu, Malzeme püskürtme vd.” tanımlanmıştır. Her süreç türü içinde benzersiz teknolojiler bulunmaktadır ve her teknoloji için benzer yazıcıları satan birçok farklı marka bulunmaktadır.

4.1.1 Üç Boyutlu (3B) Baskı Teknoloji Türleri

3B baskı teknolojisinde parçanın mukavemeti ve bitim kalitesi sürece bağlıdır, her bir üretim sürecinin hammadde türü ve enerji sistemine göre farklılık gösterdiği kategorilerde; polimerler, metaller ve seramikler için farklı baskı sistemleri bulunmaktadır. Tez kapsamında belirlenmiş olan: giyim, ayakkabı, aksesuar, mücevher, giyilebilir teknoloji ve medikal uygulamalarda kullanılan 3B baskı teknolojilerinin çalışma prensipleri detaylı olarak ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

4.1.1.1 Stereolitografi (SLA)

Tekne fotopolimerizasyonu kategorisine giren SLA baskı yöntemi, 1980'lerde başlayarak C.W. Hull gözetiminde, ilk ticari 3B baskı teknolojisi olarak geliştirilmiştir (Schönberger ve Hoffstetter, 2016). Bir stereolitografi cihazı (SLA) dört ana bileşen: fotopolimer reçine ile doldurulmuş bir tank, tankın içine inen bir yapı platformu, ultra viole (UV) lazer, platform ve lazeri kontrol eden bir bilgisayardan oluşmaktadır (Vanderploeg ve diğ., 2017). Bir bilgisayar kontrollü merceğin yönlendirdiği bir UV lazer ışını, dokunduğu UV'ye duyarlı sıvı epoksi reçinesinin yüzey tabakasını sertleştirilmesiyle işlem gerçekleşir. İşlem, ultra yüksek (mikro) çözünürlüklü (Thompson, 2014), çok küçük ve çok sayıda parçayı tek bir yapıda (mamut baskı makinası gibi) üretme kabiliyetine sahiptir. SLA, reçinenin yüzeyi boyunca ince bir hat çizmek için tek noktalı bir lazer kullanır ve sertleştirilecek enine kesit tabakasının şeklini doldurur. SLA yaygın kullanılan bir yöntemdir ve en iyi yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluğu üretir ancak zaman alıcı olabilir. Parçaları, boyama, parlatma veya metal kaplama ile çok yüksek bir standartla tamamlamak mümkündür.

4.1.1.2 Sayısal Işık Projeksiyonu (DLP/CDLS)

Tekne fotopolimerizasyonu teknolojilerinden olan Sayısal ışık projeksiyonu (DLP) yönteminde, fotopolimerler morötesi ışınlar (örn; LED kaynağı) uygulanarak sertleştirilmektedir. DLP teknolojisi, daha önce tanımlanan geometride tabaka olarak fotopolimerleri iyileştiren bir UV kaynağı ve mikro mercekler ile çalışmaktadır. Her

seferinde bütün bir tabaka iyileştirildiğinden, DLP teknolojisi de yüksek yazdırma hızına sahiptir (Schönberger ve Hoffstetter, 2016). DLP, SLA'ya benzer, ancak her katmanın tek bir görüntüsünü aynı anda flaş etmek için bir sayısal ışık projektör ekranı kullanır. Carbon DLS (CDLS) ise DLP'ye çok benzer, ancak yapı plakasının sürekli yukarı hareketine dayanır. Tüm tekne fotopolimerizasyon işlemleri, ince detaylar ve pürüzsüz yüzey bitimleriyle, mücevher ve tıbbi uygulamalar için idealdir (Url-3).

4.1.1.3 Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

Toz yatağı füzyonu kategorisine giren SLS yöntemi, 1980'lerin ortalarında Teksas Üniversitesi bünyesinde Joe Baeman tarafından geliştirilmiş bir teknolojidir (Şahin ve Turan, 2018). SLS teknolojisi, yüksek enerji darbeli (CO) lazer ışınları uygulayarak yerel olarak eritilerek bağlanan termoplastik (TPU) toz polimerler kullanmaktadır. Her kür aşamasından önce, dikey olarak hareket ettirilebilen bir kap içine ince bir toz tabakası doldurulur. Toz halindeki malzeme, erime noktasının hemen altına kadar ısıtılır ve çok ince bir tabaka halinde yapı platformunun üzerine yayılır. Bir lazer veya elektron ışını daha sonra tozun yüzeyi boyunca yönlendirilir ve baskının tek bir enine kesitini oluşturmak için tozu istenen konumlarda eriterek parçacıkları katılmış tabakaya kadar indükleyerek bir araya getirir. Her katmandan sonra yapı platformu alçalır ve işlem tekrarlanır. SLS prosedüründe, katmanlar birbiri üzerine inşa edildiğinden, kaynaşmamış parçacıklar bir destek yapısı görevi görmekte bu da destek yapısı ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Baskı sonrasında destekleyici toz çıkarılır ve geri dönüştürülebilir (Schönberger ve Hoffstetter, 2016).

4.1.1.4 Kaynaştırılmış Biriktirme Modellemesi (FDM)

Malzeme ekstrüzyon kategorisine giren FDM yöntemi, 1988'de Stratasys'in kurucusu Scott Crump tarafından icat edilmiştir. Bir nozul tarafından ısıtılan malzeme katman katman bir yapı platformuna sıkıştırılır, nozul üç eksen boyunca hareket edebilir. Baskının tek bir kesitinin şeklini x ve y eksenleri boyunca izler, tam baskıyı oluşturmak için kesitleri z eksenini boyunca birbiri üzerine biriktirir. Termoplastik soğurken aşağıdaki katman ile güçlü bir bağ oluşturur. Katman tamamlandıktan sonra, yapı platformu belirli bir mesafeye iner ve bir sonraki katman üste uygulanır. Destek yapısı sağlamak için genellikle farklı bir termoplastik ikinci bir nozzle ile kullanılmaktadır. Karmaşık kısımlar için suda çözünür (ılık su ve deterjanla yıkayarak) bio-polimer polilaktik asit (PLA) destek maddesi tercih edilebilir (Thompson, 2014).

FDM uygulama sürecinin basitliği nedeniyle en yaygın kullanılan üç boyutlu baskı yaklaşımıdır, bir makineyi çalıştırmak için yazılımlara gerek görmeden, ayrıntılı talimatlara da olanak tanımaktadır (Schönberger ve Hoffstetter, 2016).

4.1.1.5 PolyJet Modelleme

Malzeme püskürtme kategorisine giren PolyJet teknolojisi, Stratasys tarafından patentlenmiştir. Fotopolimer baskı malzemesini istenilen şekle spreyleyerek sıkıştıran bir baskı kafası kullanılmasıyla tam anlamıyla gerçek bir mürekkep püskürtmeli (inkjet) sayısal baskı olarak düşünülebilir. Renkli fotopolimer ardışık katlar halinde uygulanır ve UV ışık altında kürlenir. Süreç hızlı ve çok yönlüdür, malzeme katıdan esnek ve şeffaf ile opak arasında kullanılabilir. Bu işlem, birden fazla renk (Thompson, 2014) ve malzemeyi aynı bölüme birleştirmeye olanak tanıyan birkaç paralel jetden oluşabilmektedir (Schönberger ve Hoffstetter, 2016). Bu prosesle 3B model, tam kontrollü bir yazıcı kafasıyla, tek geçişte sekiz malzeme veya renkte uygulanabilmektedir. Fotopolimer baskı, karmaşık geometri ve çıkıntılı şekilleri oluştururken, gereken destek malzemesinde yazdırabilir (Thompson, 2014). 3B yazıcılar, karmaşık bir tasarımı fiziksel bir nesneye dönüştürmekte, hammaddeleri bir zamanlar imkânsız olan en iyi şekilde bir araya getirebilir ve tüm üretim modlarından daha doğru ve çok yönlüdür (Lipson ve Kurman, 2013).

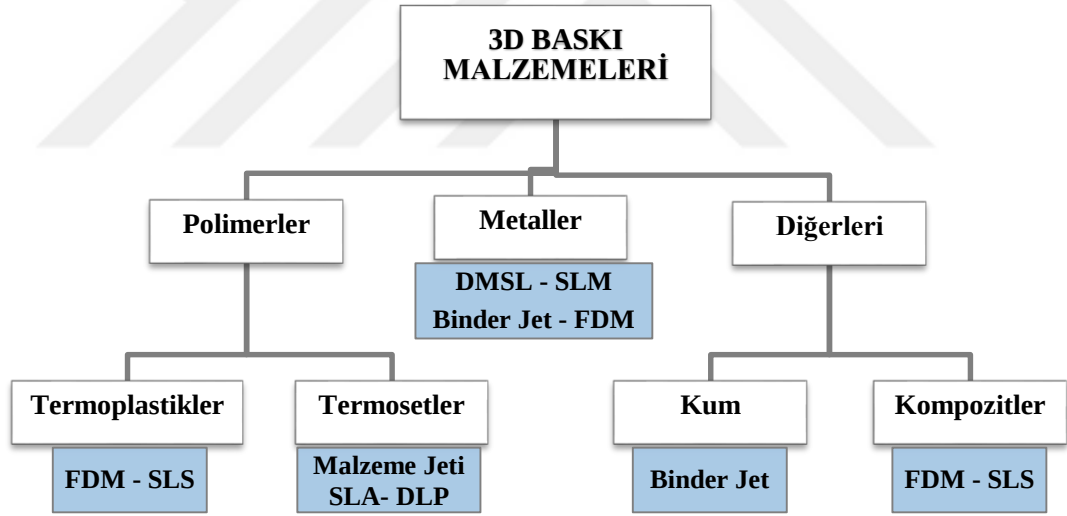
Çizelge 4.1 : 3B baskı süreçleri ve teknolojilerin karşılaştırılmalı çizelgesi.

Baskı Süreci ve Teknolojileri	Malzeme	Ön İşlem	Son İşlem	Çözünürlük	Mukavemet	Yüzey
Tekne fotopolimerizasyon SLA- DLP- CDLP	Reçine bazlı, Akrilik, Epoksi, Polipropilen	Destek var	Gerekli	Yüksek	Zayıf	Yüksek
Toz yatak füzyonu SLS- EBM- MJF- SLM- DMLS	Poliamid, Polistren, Karbon fiber, Alüminyum Katkılı-Poliamid, Polikarbonat, Kobalt, Çelik Seramik ve diğ.	Destek Yok	Gerekli	Yüksek-Orta	Güçlü	Orta
Malzeme ekstrüzyonu FDM	Ortak Termoplasti, ABS, PLA	Destek var	Gerekli	Orta	Güçlü	Orta-Düşük
Malzeme püskürtme MJ-PolyJet-NPJ-DOD	Reçine bazlı malzemeler	Destek var	Gerekli	Yüksek	Zayıf	Yüksek

4.1.2 Üç Boyutlu (3D) Baskı Malzemeleri

Katmanlı üretim teknolojileri, neredeyse tüm malzeme ve karmaşık şekilleri kullanarak sayısal tasarımlarından parçalar oluşturabilmektedir. Baskı malzemeleri genellikle filament, toz veya reçine formunda bulunmaktadır. Malzemeler arasında metaller, polimerler, kompozitler, cam, balmumu, kum, reçine, seramikler, çimento, gıda, kil, meta-malzemeler ve biyo-malzemeler bulunmaktadır (Wijk ve Wijk, 2015; Colorado ve diğ, 2020). 3B baskı malzemelerinin sayısı her geçen gün hızla arttığı için genel bir bakış sunmayı zorlaştırmaktadır. 3B baskı süreçleri belirli malzemelerle uyumluluk gösterir, malzemeleri kategorize ederken baskı sürecini dikkate alan bir genelleme daha uygun olmaktadır. Ayrıca, 3B baskı makineleri kilitlidir, daha ucuz olabilecek yabancı malzemelerin kullanımını engellemek için yalnızca birkaç parametre uyarlanabilir. 3B baskı malzemeleri, giyim konforuna yönelik tekstil rahatlığını ve esnekliğini artırmak için ise hala geliştirmeye ihtiyaç duymaktadır.

Tablo 4.1 : Üç boyutlu baskı malzemeleri tablosu.



20. yüzyılın başından itibaren plastikler dünyayı değiştirmiş ve modern bir yaşam tarzını mümkün kılmıştır. Plastikler, kimyasal yapı taşlarından yapılmış sentetik malzemelerdir. Kimyasal reaksiyonlar sırasında uzun monomer zincirleri polimerleri oluşturabilir. Günümüzde çoğu polimer fosil bazlıdır. Alternatif olarak, mısır, şeker kamışı ve hatta muz kabukları gibi organik malzemelerden elde edilebilir biyo-bazlı plastikler de bulunmaktadır. Aslında dünyanın ilk plastiği olan “selüloit”, biyo-bazlı bir plastik olup, kıt hammaddelere (fildişi, boynuz, lapis, kehribar, inci, mercan vb.) alternatif oluşturmıştır. Ancak, ucuz ve bol petrol çağında biyo-bazlı plastik kullanımı hızla terk edilmiştir. Farklı plastikler farklı özelliklere, dolayısıyla farklı

uygulamalara sahiptir (Wijk ve Wijk, 2015). Farklı 3B baskı uygulamaları da farklı malzeme özellikleri gerektirmektedir.

4.1.2.1 Polimerler

En yaygın 3B baskı malzemesi polimerler (plastikler)'i iki ana kategoriye “termoplastikler ve termoset polimerlerler” ayırmak mümkündür.

Termoplastikler:

Termoplastikler; ısıtıldığında erir ve iç bileşimlerini değiştirmezler, bu nedenle birçok kez eritilip yeniden kullanılabilirler. Son kullanım parçaları ve işlevsel uygulamalar için en uygun baskı malzemesi termoplastiklerdir. İyi mekanik özelliklere ve yüksek darbe, aşınma ve kimyasal dirence sahiptirler. Fiziksel özelliklerini geliştirmek için çeşitli (karbon, cam, ahşap vb.) katkı maddeleri ile doldurulabilirler. SLS sürecinde “Noylon (PA), Termoplastik (TPU)” toz, FDM sürecinde ise “Polilaktik Asit (PLA), Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS), Naylon (PA), TPU” filament en çok tercih edilen termoplastik sınıfı malzelerdir (Lipson ve Kurman, 2013).

3B baskı süreci, elastomerler olarak bilinen başka bir plastik kategorisi olan yumuşak plastiklerle de çalışlabilmektedir. Bu kauçuk benzeri malzemeler çeşitli elastik özelliklere sahiptir. Yumuşak, kauçuksu nesneler, sert plastik üretmek için kullanılan işleme benzer şekilde, bir termoplastik elastomerin eritilmesiyle basılabilir (Lipson ve Kurman, 2013).

Termosetler (reçineler):

Termosetler; fotopolimerizasyon işlemi UV lazerle kürlenerek sertleştirilirler. Sıvıdan katıya anında dönüşerek iç bileşimleri değiştiğinden, termoset (reçineler) yeniden kullanılabilir bir sıvı forma erilemez ve sadece bir kez kullanılabilir. Termosetler, pürüzsüz yüzey ve ince özellikler ve yüksek detaylara sahip parçaları üretebildiği için estetiğin ve görünümün önemli olduğu durumlarda uygundur. Yüksek sertlik sunmalarının yanında daha kırılğan olmaları nedeniyle fonksiyonel uygulamalardan ziyade sanatsal parçaların üretiminde idealdirler. 200 derece üzeri sıcaklığa dayanabilen bazı reçinelerde ise darbe dayanımı standart reçinelere göre daha zayıftır. PolyJet sürecinde “Standart, dayanıklı veya transparan reçine çeşitleri, sayısal ABS”, SLA ve DLP süreçlerinde ise “Standart, sert, dayanıklı ve biyo uyumlu reçine çeşitleri” tercih edilebilmektedir.

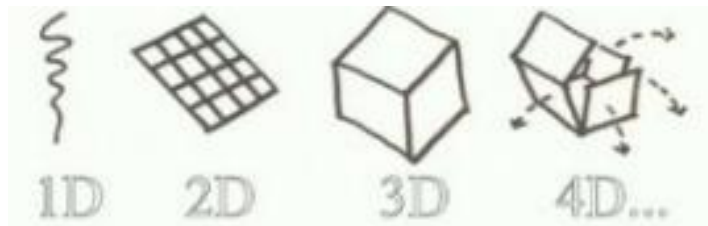
4.2 Dört Boyutlu (4B) Baskı Teknolojisi

Yeni malzemeler, tasarım düşüncesinde tasarım tektoniği kavramlarını değiştiren materyalizasyon süreçlerini içermektedir. Yeni hesaplama ve sayısal üretim süreçleri ortaya çıktıkça, yeni malzeme kabiliyetleri de ortaya çıkmaktadır.

“*Programlanabilir Madde*” 2007’de ABD Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansının (DARPA’nın) başlattığı program ile; malzeme bilimi, sentetik biyoloji ve diğer pek çok alanlarda yaşanan gelişmeyle, malzemeler sadece hesaplamak için programlanmayıp, fiziksel olarak dönüştürülebilir. Malzemenin programlanabilirliği, dönüştürmeyi ve montajı birleştirmekle ilgili olmaktadır. Sanal dünyanın sayısal bilgisini maddi dünyanın fiziksel nesnelere dönüştürmede özellikler sunmaktadır. 3B baskı, mikro robotlar, akıllı malzemeler, nanoteknoloji ve mikro-elektromekanik sistemler gibi bir dizi teknolojik kabiliyeti kapsamaktadır (Tibbits, 2017).

“Eğer geçmiş yüzyılda bir yazılım ve donanım devrimi yaşadıysa, şimdi gerçek bir materyal devrimi yaşıyoruz. Artık sayısal bilgileri fiziksel performansa ve işlevselliğe dönüştürmek için yazılım ve donanım platformu ile daha önce olduğu gibi, malzemeleri tek başına algılayabilir, hesaplayabilir ve harekete geçirebiliriz. Dün bilgisayarları ve makineleri programladık, bugün maddenin kendisini programlıyoruz” (Tibbits, 2017).

Khoo ve diğ. (2015), akıllı malzemeleri, çevreden belirli uyarıların etkisi altında yararlı bir şekilde farklı fiziksel alanlar arasında şekillerini veya özelliklerini değiştirme yeteneğine sahip malzemeler olarak tanımlamıştır. Akıllı malzemelerin kabiliyeti nedeniyle, bu tür malzemelerden oluşan 3B baskılı bileşenler, zaman içinde önceden tanımlanmış bir şekilde gelişebilmektedir. Dolayısıyla bu, “4B baskı” adı verilen yeni bir terime yol açmaktadır. 4B baskı, ürün tasarımı ve üretim sürecinde statik yapılardan entegre işlevlere sahip dinamik yapılara kadar büyük bir değişikliği mümkün kılmaktadır (Gardan, 2019). 4B baskı, bir malzeme sistemi veya nesnenin baskıdan sonra biçim veya işlevini değiştirebilme yeteneğini açıklayan yeni bir alandır.



Şekil 4.2 : Dört Boyutlu baskı şekil değişimi, (Tibbits, 2017).

4B baskı, harici cihazlara ve elektromekanik sistemlere güvenmeksizin doğrudan bir malzemeye gömülü çalıştırma, algılama ve programlanabilirlik sunmakta, akıllı malzemelerin doğrusal aktüatörler, katlama mekanizmaları, kıvrırma/ bükme yüzeyleri ve malzeme sensörleri ile programlanmasını sağlayabilmektedir. (Tibbits ve diğ, 2014). Pei ve diğ. (2015)'ye göre 4B baskı, uygun katmanlı üretim teknolojisini kullanarak fiziksel bir nesne oluşturma, ardışık uyaranlara duyarlı kompozit veya değişen özelliklere sahip çoklu malzeme katmanları oluşturma sürecidir. 4B baskı, 3B baskılı yapılar/bileşenler için akıllı malzemeleri baskı malzemesinin başlangıç formuna entegre eden bir katmanlı üretim süreci olarak tanımlanmaktadır (Khoo ve diğ, 2015). Çoklu malzemelerin ve farklı karmaşık yapıların kullanılması, statik veya dinamik işlevlerin eklenmesine izin vermekte ve böylece mekanik, termal veya elektriksel uygulamalar mümkün olmaktadır (Gardan, 2019). 4B baskı teknolojinin temelinde üç temel yetenek vardır: baskı makinesi, malzeme ve geometrik program (Tibbits, 2014). 4B baskı sürecinin gelişimi, PolyJet teknolojisi kullanılarak çok malzemeli baskıdaki son gelişmelerle ve Seçici Lazer Eritme (SLM) teknolojisiyle metalik bileşenlerin üretilmesiyle mümkün olmuştur (Khoo ve diğ, 2015). 4B baskı için tercih edilen Stratasys'in Connex çok malzemeli yazıcısı, hem aktif hem de statik malzemeleri hassas bir şekilde biriktirmek için kullanılmaktadır (Tibbits ve diğ, 2014).

4.2.1 Dört Boyutlu (4B) Baskının Akıllı Malzemeleri

İşlevsel ve yüksek performanslı bir ortamda kullanılabilen yapısal malzemeler, çok işlevli ve duyarlı malzemeler, katmanlı üretimin bakış açısını zenginleştirmiştir. Gardan (2019)'ın önerdiği sınıflandırma, katmanlı üretim ilkesi aracılığıyla gelişmiş yapılandırılmış malzemeler ve duyarlı malzemeler olarak yapılmıştır (Şekil. 4.3). Khoo ve diğ, (2015) ise, akıllı malzemeleri birden fazla malzemenin bir arada veya tek bir malzeme ile basılmış olmalarına göre sınıflandırmaktadır.

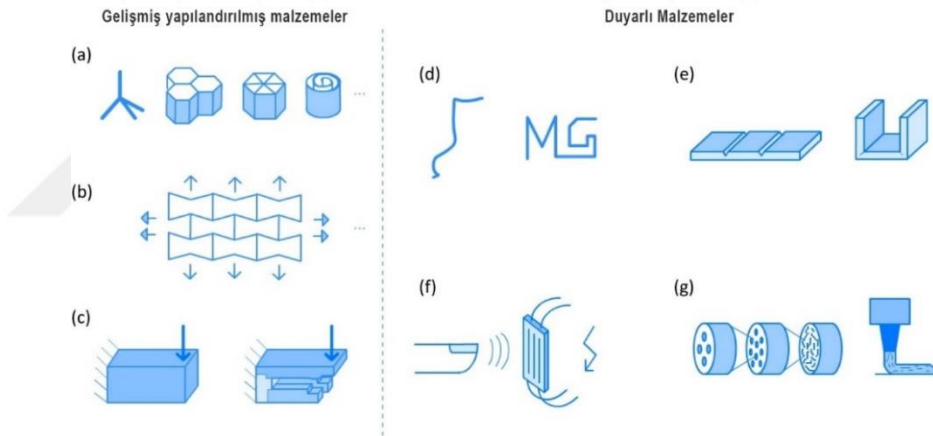
Tek malzeme ile 4B baskı:

Başlangıç formu olarak tek bir akıllı malzemeden veya akıllı malzeme ve geleneksel malzemelerin karışımından oluşan basılı bileşenler için, malzemelerin akıllılığı; malzemelerin veya karışımların kendi kendine uyarlanabilirliğini, kendini algılamasını, şekil hafızasını, karar vermesini ve çoklu işlevselliklerini tanımlamaktadır. Basılı bileşenlerin dış uyaranlara tepki olarak özelliklerini nasıl değiştirdiğini belirleyen bu özellikler, çeşitli ileri uygulamaları da mümkün

kılmaktadır. Gelişmiş akıllı nanokompozitler, şekil hafızalı alaşım (SMA)'lar ve şekil hafızalı polimer (SMP)'lerin 3B baskısı dahil, başlangıç formu olarak tek bir akıllı malzeme veya bir malzeme karışımından oluşan 4B baskının son gelişmeleridir (Khoo ve diğ, 2015).

Birden fazla malzeme içeren 4B baskı:

Bir bileşen tasarlarken göz önünde bulundurulması gereken önemli faktör, 3B baskı teknolojisinin kullanılabilirliğidir. 4B baskıdaki çoğu araştırma, akıllı malzemeler ve geleneksel malzemelerden oluşan çok malzemeli bileşenleri üretmek için PolyJet çok malzemeli yazıcı kullanmaktadır. Birden fazla malzemenin 4B baskısında, geleneksel malzemeler dış uyaranlara tepki vermediğinden, etkinleştirme bileşenlerin tasarımı ile belirlenmektedir. Yumuşak robotik, kendi kendine gelişen yapılar, sahteciliğe karşı sistem, aktif origami ve kontrollü sıralı katlama için basılı aktüatörler birden fazla malzeme içeren 4B baskının son gelişmeleridir (Khoo ve diğ, 2015).



Şekil 4.3 : Akıllı malzemelerin sınıflandırması, (Garden, 2019).

(a) Özel kafesler, (b) Metamalzemeler ve yardımcı hücresel, (c) Çok malzemeli topolojik optimizasyon, (d) Şekil Belleği Malzemesi (SMM), (e) Kendiliğinden montajda 3B, (f) lektroaktif Şekil Hafızalı Polimer (SMP), (g) Fibrilli biyomimetik malzemeler.

Akıllı malzemeler ve aktif madde, her ikisi de harici girdiye dayalı olarak dönüştürülme özelliğine rağmen, aktif madde; algılama, etkinleştirme, birleştirme veya hesaplama için işlevsellik ile özelleştirilmiş malzemeler tasarlama ve oluşturma özgürlüğü sunmaktadır. Aktif madde herhangi bir materyali akıllı bir materyal haline getirebilir (Tibbits, 2017). 4B baskıda kullanılan sert malzeme katlanma için yapı ve açı sınırlayıcıları verir. Parça, bir başlangıç pozisyonuyla basılır, daha sonra su ile karşılaşan aktif malzeme şişerek, sert malzemeyi bükmeye zorlamaktadır. Sert

malzeme komşu elemanlara çarptığında, katlanmayı durdurmaya zorlar ve böylece nihai durum konfigürasyonuna ulaşılmış olur. Katı ve aktif malzemelerin yerleştirilmesi ve hacmi, gömülü bir geometrik programı, bir şekilden diğerine tamamen bağımsız olarak dönüşecek aktivasyon enerjisini kapsamaktadır (Tibbits, 2014). Aktif Madde, 4B baskı uygulamasıyla, kişisel duyarlı ürünlerin geliştirilmesini mümkün kılar ürünler, kullanıcı talepleri veya vücut ısısı, terleme ve biyometrik veri gibi kullanıcı fiziksel koşullarına tepki verebilir. Karbon fiber, ahşap ve tekstiller gibi çeşitli geleneksel malzemelere uygulanabilmektedir (Khoo ve diğ, 2015).

4.2.1.1 Dört Boyutlu (4B) Biyo Baskı:

Biyobaskı, “biyolojik olarak ilgili malzemelerin (moleküller, hücreler, dokular ve biyolojik olarak parçalanabilen biyomalzemeler), bir veya daha fazla biyolojik işlevi gerçekleştirmesi için önceden belirlenmiş bir organizasyonla modellenmesi ve birleştirilmesi için malzeme transfer süreçlerinin kullanılması” olarak tanımlanabilir. Biyobaskının en büyük faydası dokular, organlar, besinler ve hücreler gibi canlı biyolojik 3B yapıları üretme kabiliyetinde yatmaktadır. 3B biyobaskı teknikleri ilerledikçe, lazer destekli biyobaskı veya 4B biyobaskı, akıllı hidrojellerin 3B baskısı gibi yeni teknikler geliştirilmiştir (Khoo ve diğ, 2015).



Şekil 4.4 : BioLogic ikinci cilt (aktif giyim uygulaması), b) BioLogic kumaş yapısının programlanması, MIT Media Lab., 2012, (Url-68, Url-5).

Biyo-malzeme araştırmalarını tekstil tasarımı ile birleştiren yeni bir performans dokusu BioLogic, “biyo yeni arayüz” olarak tanımlanmaktadır. Biyo yaşayan aktüatörler ve duyarlı biyo-cildin sentezlenmesi yoluyla ikinci bir cilt gibi davranmaktadır. Eski bir bakterinin ortaya çıkarılan yeni bir davranışından türetilerek, hücrelerin atmosferik neme göre genişlemesi ve büzülmesi esasına dayanır. Bir biyo-laboratuarda, bir mikron-çözünürlüklü 4B biyo-baskı sistemi ile toplanan canlı

hücreler, duyarlı bir moda dönüştürülür. Sentetik biyo-cilt vücut ısısına ve terlemeye tepki gösterip, ısı bölgelerinin etrafındaki kapakçıkların açılmasına ve terlemenin vücudu organik bir şekilde buharlaştırıp soğutmasını sağlar (Yao, 2014). Biyoloji ve teknoloji kesişiminden ilham alan arayüz tasarımı, bilgilendirilmiş ve artırılmış yeni malzemelere odaklanmaktadır. Malzeme hesaplama tabanlı etkileşimli tasarım yöntemi, belli bir deformasyon için aktüatörlere ve enerji kaynaklarını hesaba katar. Enerji kaynağı sadece fiziksel uyaranlar olmayıp, kimyasal ve biyolojik uyaranlar olabilir, enerji, bir yapının tüm kısımlarına veya hedeflenen şekilde, belli parçalara yönlendirilebilir. Her aktüatör bağımsız kontrol edilebilirliğiyle, enerji kaynakları daha önce HCI'ye uyarlanmış ve bir kontrol döngüsü yoluyla sayısal bilgiye bağlanabilmiştir (Yao, 2014).

4.2.2 Malzeme Tasarım Konsepti

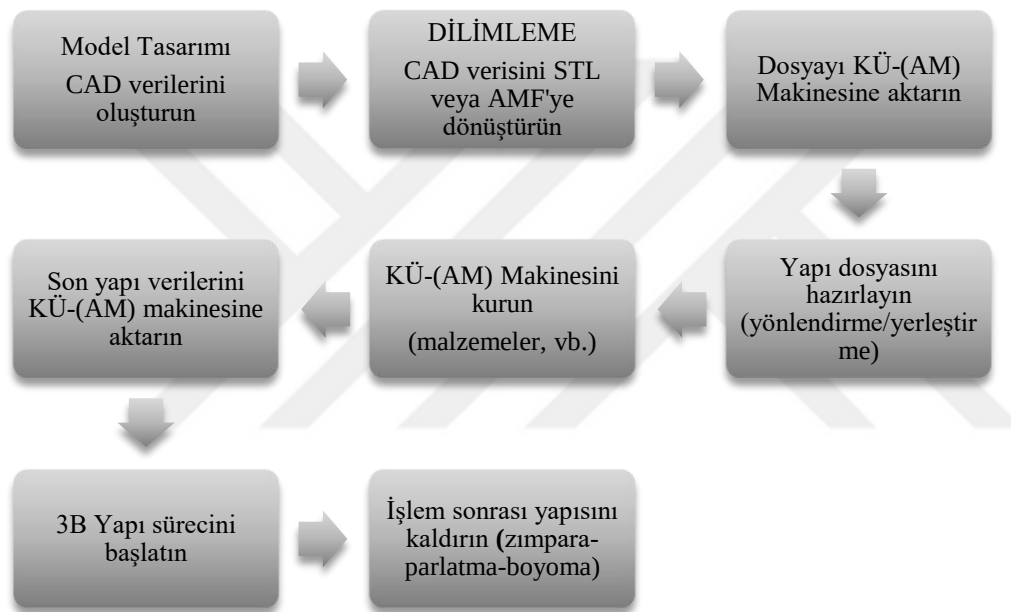
Tasarım oluşturma kaynağı olarak yenilikçi malzeme kullanımı ve malzeme yeniliğinin teknolojik potansiyeline artan ilginin örnekleri, biyomalzemelerdeki, aracılı ve duyarlı malzemelerdeki ve kompozit malzemelerdeki gelişmelerde görülmektedir (Oxman, 2010). Malzeme ve tasarımın birleşimi, 4B baskının kavramsallaştırmasının temel bileşenidir. Khare ve diğ. (2017) göre, malzemeye kavramsal bakış açısından; *“4B baskı'nın doğası gereği malzemenin içsel özellikleriyle ilişkili olduğu ve malzemenin uyaranlara yanıt veren hareket zaman ölçeğinin, malzeme özelliklerinin değiştirilmiş özellikleri aracılığıyla programlanabilirliği”* fikri daha fazla tartışılmaktadır. Malzemelerin farklı uyaranlara maruz kalması, en basit anlamda (a) homojen materyallerin uyaranlara tek başına duyarlı olabileceği ve (b) heterojen veya hibrit materyallerin uyaranlara çok duyarlı özellikler gösterecek şekilde tasarlanabileceği, özelliklerini değiştirebileceğidir. Malzemelerin işlevsel davranışına dayanan bu kavramsal fikir, malzeme-uyarıcı yapı-fonksiyon korelasyonlarından kaynaklanan ayarlanabilir karmaşıklıklara sahip görev odaklı uygulamaları seçmek için fayda sağlayabilir. Materyalizasyon ve üretim süreçlerinin entegrasyonu, tasarımda tektonik süreçlerin geleneksel düzenini yapı-malzemedan, malzeme-yapı biçimine dönüştürmektedir. Bu tersine çevirme, kavramsal tasarım modelinde de değişim getirerek parametrik tasarımda malzeme imalatının entegrasyonuna olanak tanımıştır (Oxman, 2017a). Kavramsal tasarımın ilk aşamalarında, tasarım ve materyalizasyonu bütünleştirerek bilgilendiren tektonik ilişkiler, malzeme ve

materyalizasyon tekniklerinin seçimi, konseptten üretime kadar bütünsel bilgi akışı süreci ile desteklenmektedir.

4.3 Üç Boyutlu (3B) Baskı Sürecinin Uygulama Aşamaları

Katmanlı üretim ve 3B baskı ürün geliştirme sürecinde; tasarımdan, üretime ve hizmete kadar sayısallaştırılmış bir akış söz konusudur. 3B modellemeden baskı simülasyonlarına ve dilimleme programlarına kadar tasarım ve baskı sürecinin her aşamasına yardımcı olacak birçok farklı program bulunmaktadır (Url-3).

Tablo 4.2 : Üç boyutlu (3B) baskı üretim sürecinde temel adımlar tablosu.



Katmanlı üretim süreci, baskı makinesi için talimatları oluşturan sayısal bir veri akışına ve ardından ham maddeleri fiziksel parçalara dönüştüren fiziksel bir iş akışına sahiptir (Tablo 4.2). Süreç bir fikrin üç boyutlu sayısal modelinin oluşturulmasıyla başlar. Bu aşamada, 3B modelleme, mertroloji veya görüntü yeniden yapılandırma yoluyla sayısal 3B model oluşturulur. Katmanlı üretimde her baskı süreci ailesinin farklı çalışma prensipleri, üretim özellikleri ve malzeme türü bulunmaktadır. Tasarım sürecinden başlayarak sürece özgü özellikler, tasarım kararlarının alınmasında önemlidir. Fiziksel iş akışının planlanmasında, baskı makinesinin sürece özgü parametreleri ve malzeme özellikleri kadar sayısal 3B modelin tasarım kurallarına uygunluğu da bu bakımdan öneme sahiptir. Katmanlı üretimin, bir üretim aracı olduğu kadar geçirdiği evrimle “katmanlı üretim için tasarım yaklaşımına” dönüştüğü bir tasarım paradigması haline geldiği görülmektedir. Bu bölüm; “Bilgisayar destekli

tasarım, üç boyutlu tarama, üç boyutlu modelleme ve sayısal tasarım araçları, parametrik tasarım ve algoritma, 3BB dosya standartları, 3BB için temel tasarım kuralları, katmanlı üretim teknoloji seçimi ve çevrimiçi hizmet platformları” konu başlıkları altında, sürecin kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır.

4.3.1 Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD)

Tasarım, bilimsel temelli bir düşünce biçimi olarak ilk yapay bilimlerde problem çözme paradigması olarak ortaya çıkmıştır. Sonraki yıllardaki tasarım araştırmaları tasarım çalışmalarındaki tasarım, biliş ve hesaplama arasındaki ilişkileri geliştirmiştir (Oxman, 2017a). Geleneksel CAD sistemlerinden hesaplamalı tasarıma, sayısal teorilere geçiş, çağdaş modellere ve tasarım düşüncesi yöntemlerine katkıda bulunmaktadır. Sayısal medya ve hesaplamalı tasarım sistemleri, tasarımcı tarafından yazılmış metin tabanlı hesaplama süreçlerinde simülasyon, değerlendirme ve imalat süreçlerine sahiptir. Bu hedeflerin ve bilimsel temellerin yeniden yapılandırılması, tasarım düşüncesinin geleneksel bilişsel modellerine yeni ilkeler, yöntemler ve süreçler eklemektedir. 3B fabrikasyon ve robotiğin de dahil olduğu, materyalizasyon teknolojisinin entegrasyonu, hem tasarım hem de hesaplamalı tasarım düşüncesinin modellerinde, tamamlayıcı bileşenler olarak yer alarak gelişmiş bir tasarım ortamı sunmakta, tasarım düşüncesi yöntemlerine katkıda bulunmaktadır (Oxman, 2017a).

4.3.2 Üç Boyutlu Tarama

Sanal modellerin fiziksel sunum biçimini oluşturmasının bir yolu “Hızlı Prototipleme”dir. Fiziksel nesnelerden sanal bir modelin üretilmesi olan ters bir süreç ise, 3B tarama ile gerçekleştirilebilir. Fiziksel ve sanal gerçeklik arasındaki bu geçişler, medya kırılmalarına yol açabilir. Olası bir sonuç, süreçte veri kalitesi kaybıyla sonuçlanır (Cunha ve Maropoulos, 2007). Optik taramalar, fiziksel nesneleri sayısal biçimde yakalamanın daha popüler yoludur. Tarama verileri, fiziksel dünyanın şeklini ve boyutlarını bir dizi üç boyutlu koordinatta yakalar. Tarama verileri, katı modelleme yazılımının ilkel şekilleri ile yüzey modelleme yazılımındaki sayısal nesneleri saran hayali balık ağı arasında bir yerde bulunur (Lipson ve Kurman, 2013). Lazer tarama, bir nesnenin yüzeyini tarar ve daha sonra bir 3B yüzey oluşturmak için kullanılan bir nokta bulutu olarak temsil edilen verileri yakalar. Bu, hassas bir şekilde ölçülmesi ve 3B modellenmesi çok zor olan parçaların sayısallaştırılmasını ve doğru bir şekilde yeniden üretilmesini sağlar. Bilgisayarlı tomografi (BT) veya manyetik rezonans

görüntüleme (MRI) taraması, taranan nesnenin dahili özelliklerini de oldukça iyi gösterebilmektedir. Özellikle voksel seviyesinde tasarım detayları için idealdir.

4.3.3 Üç Boyutlu Modelleme ve Sayısal Tasarım Araçları

"Model" terimi, bir ürünün soyut bir temsili olarak anlaşılır. Bir ürünün soyut temsili hem sayısal hem de fiziksel olabilir. Sanal model oluşturma, tek tek parçaların geometrik modelleri ile eksiksiz bir prototip montajı oluşturmayı ifade eder. Sanal prototipleme sistemleri, parça montajlarının görselleştirilmesine ve üretim kısıtlamaları dâhilinde önerilen montajların fizibilite kontrolüne izin verir. Doğru bir sanal prototipin montajı sayesinde tasarım kusurları tespit edilerek, tasarım değişiklikleri yapılabilir (Cunha ve Maropoulos, 2007). Hesaplama tekniklerinin ve hesaplama kapasitesinin gelişimiyle, modelleme ve optimizasyon tekniklerinin, üretim iyileştirmelerini desteklemek için güvenilir bir araç olduğu kanıtlanmıştır. Malzeme, enerji ve atık akışlarını bütünleştiren modelleme ve simülasyon teknikleri süreçler arasındaki etkileşimleri anlamaya yardımcı olmaktadır (Despeisse ve diğ, 2012).

3B modellemenin iki ana yöntemi "katı modelleme" ve "yüzey modelleme" ve her yaklaşım için farklı CAD yazılım paketleri geliştirilmiştir. Katı modelleme, genellikle önceden tanımlanmış ve rafine yüzey detaylarının daha sonra eklendiği 3B şekilleri tanımlayarak ve birleştirerek sanal nesnelerin oluşturulmasını ifade etmektedir. Yüzey modelleme ise, tasarımcının 2B yüzeylerle başlaması ve 3B şekiller oluşturmak için onları 'serbest formda' şekillendirmesi dışında benzer özellikler göstermektedir. Her iki yaklaşım da tam olarak aynı çıktıyı üretebilir, ancak katı modelleme basit ve organik olmayan şekiller için daha hızlıyken, yüzey modelleme organik şekiller için daha fazla avantaj barındırmaktadır (Url-3).

Solid Works, 3DSMax, Fusion 360, Autodesk Maya ve Rhinoceros, 3B modelleme için profesyoneller arasında popüler ve yaygın olarak kullanılan yazılımlardır. Geleneksel olarak ürün tasarımı ve mimaride kullanılırlar, ancak moda tasarımında ve özellikle takı, ayakkabı, topuk veya donanım prototipleme bakımından gelişmiş tasarım ortamı sunmaktadırlar (Özkan, 2019). Rhinoceros ve Autodesk Maya gibi yazılımlarda nesneler genellikle vektörler kullanılarak temsil edilmektedir. Bu yazılımlar, iki boyutlu eğrilere, noktalara ve çizgilere ek olarak, tasarımcıların kafesleri, düzgün olmayan rasyonel temelli eğrileri (NURBS) ve alt bölüm yüzeyleri gibi farklı nesneler oluşturmalarına olanak tanımaktadır (Reas ve diğ, 2010).

Rhinoceros modelleme, NURBS tabanlı olması bakımından yüksek hassasiyete sahiptir ve 3B prototipleme alanında daha çok tercih edilmektedir. Grasshopper kodlama eklentisi Rhino'ya parametrik kontrol olanağıyla üretken modelleme oluşturma fırsatı sunmaktadır (Özkan, 2019).

Tüm fiziksel ve sanal modeller, yöntemler ve araçlar, bir bütün olarak yinelemeli ürün geliştirme sürecinde bir medya kesintisinden kaçınmaz. Bu noktada süreç, parametrik model ve parametrik prototip ile desteklenebilir. Parametrik prototip, bir arayüz ile birbirine bağlanan sanal bir model kümesi olarak tanımlanabilir. Bu nedenle parametrik model, ön şekillendirme amacıyla ürün geliştirme sürecinin konsept aşamalarında kullanılan fiziksel bir modeldir. Parametrik modelin dış şekli, parametrik model bağlamında mekanik, elektrik ve kontrol bileşenleri ile önceden ayarlanmış bir aralıkta değiştirilebilir (Cunha ve Maropoulos, 2007). Parametrik sistemlerde görsel içeriğe ek olarak, performans analizlerinin entegrasyonu ve üretken süreçlerle, performatif simülasyon da dahil olmak üzere ek spesifik tasarım süreçleri mevcuttur. Parametrik sistemler, hem kod hem de üretken formun görselleştirilmesi ve tasarımın performatif süreçlerini içeren çeşitli bilgilendirme süreçleri sağlayabilmektedir (Oxman, 2017a). Parametrik yazılımlar, bir kullanıcının, üretim başlamadan önce kullanıcı odaklı görselleştirme yoluyla boyutsal ve yapısal tasarım parametrelerini gözlemlemesine, analiz etmesine ve değiştirmesine olanak tanımaktadır (Vallett ve diğ., 2017). Geometrik 3B modellerden başlayan süreç, üretim sistemlerinin simülasyonuna kadar ilerler ve son olarak sayısal prototip (Cunha ve Maropoulos, 2007) veya parametrik yaklaşımdaki gelişmeler ve 3B baskı gibi sayısal imalat süreçleriyle (Vallett ve diğ., 2017), sayısal bir ürüne ulaşılır.

4.3.4 Parametrik Tasarım ve Algoritma

Tasarım düşüncesi, tasarımcının tasarım sürecinde kullandığı yaratıcı stratejiler süreci olarak tanımlanmaktadır. Parametrik tasarım, tasarım nesnelerinin geometrisini oluşturan birleştirici geometrinin parametrik yapılarının oluşum süreci olarak tanımlanabilir (Oxman, 2017a). Parametrik tasarım düşüncesinin temel kavramları ve ilkeleri; genel parametrik şema, bilgi tabanlı tasarım parametrik şeması, sayısal tasarımın bilgi akışı ve süreç modellerinin genel şeması olarak tanımlanmıştır.

Parametrik şemanın yaratıcı rolü, üç bilgi kesişiminde formüle edilmekte: bunlar tipolojik ve topolojik tasarımın bilişsel modelleri, sayısal tasarım süreç modelleri;

malzeme imalat tasarımının tektonik düzenidir. Yapı ve malzeme gibi tektonik içerik, yeni bir tasarım düşüncesinin “Malzeme-Tasarımının” bir parçası haline gelmektedir. Parametrik şema, şekil ilişkileri, yapısal organizasyon, ölçek ve biçimsel örüntüler gibi varyasyonları keşfetmek için form-üretimi stratejilerini destekler (Oxman, 2017a). Parametrik tasarım gelişmiş bir tasarım hesaplama desteği ortamı olarak, geometrik kavramların çözümünde ilişkisel ilişkilerin keşif ve yeniden düzenleme sürecine dayanmaktadır. İlişkisel ilişkiler ve topolojik geometri gibi kavramlar parametrik algoritmik şemada uygulanmaktadır (Oxman, 2017b).

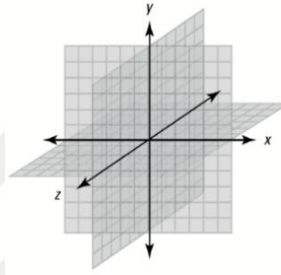
Algoritmik Düşünme, sayısal formları oluşturan hesaplama prosedürlerini başlatan, açık talimatların kaynak koduyla yazılmış bir dizi kural olarak tanımlanabilir. Tasarımcı, tasarım nesnesini tasarlamak için parametrik şemanın kodunu tasarlamaktadır. Tasarımcı artık tek nesneler hakkında seçimler yapmayıp, tüm olası tasarım popülasyonunu kapsayan bir matris yaratmaktadır. Algoritmik kod bu nedenle görsel temsilin yapısıyla yakından ilgilidir. Bilgi tabanlı bilişsel şemaların yerleşik parametrik değişkenliği, tasarımın tüm disiplinlerinde tasarım üretimi ve inovasyon için güçlü yeni bir ortam sağlamaktadır (Oxman, 2017b).

Parametrik algoritmik şemada tasarımcı, görsel kodlama sembollerini kullanan parametrik modelleme sistemi “Rhino ve Grasshopper” gibi ortamlar ile etkileşmektedir. Tasarımın görüntüsü daha sonra sistemin Rhino 3B modelleme bileşeni tarafından üretilir. Grasshopper sisteminin parametrik özelliği, önemli miktarda kodu yeniden yazma ihtiyacından ziyade, sadece parametrelerin değiştirilmesiyle tasarımın üretilmesini ve değiştirilmesini mümkün kılmaktadır. Mevcut yazılım paketleri ve parametrik eklentiler, sayısal tasarımda etkileşimli arayüzleri sağlamak için tasarlanmaktadır. Kangaroo Physics (strüktür analizi, formun optimizasyonu, yapısal bileşenler ve etkileşimli simülasyonlar) ve Rabbit (hücrel otomatları ve L-sistemleri modellemek için) ve benzeri eklentiler, Rhino ve Grasshopper’da doğrudan 3B parametrik sistemleri modellemeyi sağlayan bileşenlere sahiptir. Model oluşumu, biyolojik ve fiziksel süreçleri simüle ederek, özyineleme ve belirme gibi doğal fenomenleri keşfetmeyi sağlamaktadır. 21. yüzyılın çağdaş tasarım ortamı, karmaşık biçimlere yönelme zorunluluğuyla, hesaplamalı parametrik tasarım, sayısal üretim, ve 3B baskıdaki gelişmeler, bugünün stillerini etkilemekte ve geliştirilmesine odaklanmıştır. Sayısal tasarım, giderek daha çok yönlü ve karmaşık tasarım bilgisinin entegrasyonunu sağlamaktadır. Hesaplama ve materyalleştirme,

tasarımın sanal sürecini ve fiziksel gerçekleşmeyi her zamankinden daha çok birbirine yaklaştırmaya olanak tanımaktadır.

4.3.5 Üç Boyutlu (3D) Baskı Dosya Standartları

Bir 3B sanal modelin tasarımını, bir nesneyi oluşturacak katman dizisine çevirmek için tüm 3B yazıcılar, üretilecek nesnenin her parçası için x, y ve z koordinatlarına ihtiyaç duyar. Bazı 3B yazıcılar, yapı plakası adı verilen düz bir yüzey üzerinde çalışırken, diğerleri ardışık granül malzeme katmanlarının üzerinde nesneler oluşturur (Hausman ve Horne, 2014).



Şekil 4.5 : X, y ve z eksenini gösterimini kullanan kartezyen koordinatları, (Hausman ve Horne, 2014).

Dilimleme araçları:

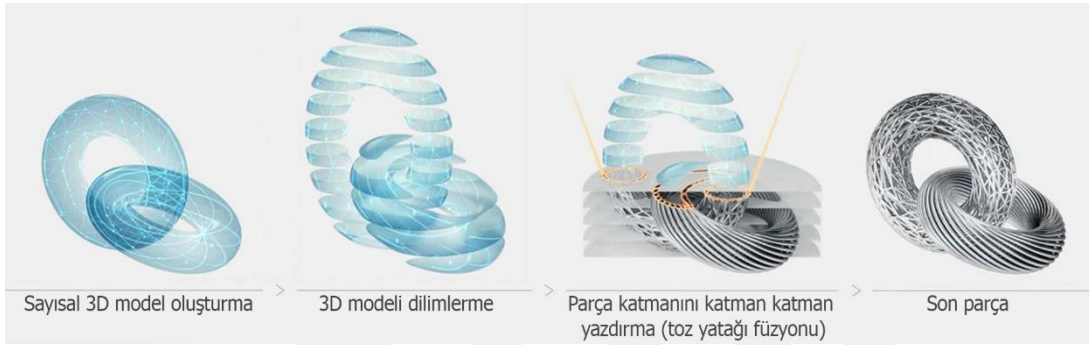
Tasarım dosyasından yazdırılabilir nesneye dönüştürme, CAD ve 3B baskı arasında kritik öneme sahiptir. Standartlar ve dosya biçimleri, birlikte çalışabilirliğin kritik bir temeli olan teknolojinin ortak dilidir. Standart mozaik dili (STL) ve eklemeli üretim formatı (AMF) 3B baskıda kullanılan standartlardır (Lipson ve Kurman, 2013).

STL standardı:

3B baskı endüstrisinin, Standart Mozaik/Üçgen Dili (STL) adı verilen kendi endüstri standardı dosya formatı vardır (Lipson ve Kurman 2013). 1980'lerde başlayan STL dosya formatı, tasarım dosyalarının gelişmekte olan 3B yazıcılara transferini basitleştirmek için tasarlanmıştır. Katı bir modelin yüzeylerini temsil etmek için bir dizi üçgen kullanır. Tüm modern CAD yazılımları, yerel dosya formatlarının STL'ye aktarmasına olanak tanır. 3B model daha sonra "dilimleme" adı verilen bir işlemle makine diline (G koduna) dönüştürülür ve baskıya hazır hale gelir. 3B bir modelin, 3B baskı için doğru şekilde dışa aktarmasında izlenmesi gereken temel adımlar bulunmaktadır (Url-41). STL dosya formatı, katı bir modelin yüzey geometrisini yeniden oluşturmak için bir dizi bağlantılı üçgen kullanır. Çözünürlüğü artırıldığında, 3B modelin yüzeylerine daha iyi yaklaşan, ancak aynı zamanda STL dosyasının

boyutunu artıran daha fazla üçgen kullanılacaktır. Düşük bir çözünürlükte dışa aktarılarak yazdırılan bir modelin yüzeyi ise görünür üçgenlere sahip olacaktır.

CAD yazılımlarının STL çözünürlüğünü belirlemenin farklı yolları vardır, ancak çoğu yazılım iki ana parametre (kiriş yüksekliği ve açısı) kullanır. Kiriş yüksekliği, yazılımın orijinal 3B modelin yüzeyi ile STL dosyasının yüzeyi arasında izin verdiği maksimum mesafedir. Önerilen değer, 3B baskı katmanı kalınlığının 1/20'sidir ve asla 0,001 mm'nin (1 mikron) altında değildir. Açısal tolerans, bitişik üçgenlerin normalleri arasındaki açıyı sınırlamakta, varsayılan ayar ise genellikle 15 derecedir.



Şekil 4.6 : Sayısal model ile 3B baskılı fiziksel nesne arasındaki işlemler, (Url-6).

Her CAD yazılımının STL dosyalarını dışa aktarmak için kendi yolları bulunmaktadır, STL dosya formatının bazı tasarım ayrıntılarını kaldırması bakımından, ilk zamanlarda kullanımı ideal olmuştur. Günümüzün tasarım yazılımları, milyarlarca konum koordinatını veya karmaşık ağ kafeslerini içeren tasarım dosyalarını rutin olarak işlemektedir (Lipson ve Kurman, 2013). Tasarım yazılımlarındaki ve 3B yazıcılardaki gelişmeler yanında bu iki teknolojiyi birbirine bağlayan STL dosya formatı zamanla gelişmelere ayak uyduramamış, 3B baskı için sınırlayıcı hale gelmiştir.

Eklemleri üretim formatı (AMF) standardı:

STL dosyasını değiştirmenin ve yükseltmenin olası bir yolu olarak, yeni bir XML tabanlı standart olan “Eklemleri Üretim Formatı” (AMF), Mayıs 2010'da standartlar kuruluşu tarafından resmi olarak onaylanmıştır (Lipson ve Kurman, 2013).

AMF, STL formatının yüzey örgü yapısını korur ancak tasarım yazılımı ve 3B yazıcılardaki gelişmeleri yansıtmak için ek yeteneklere sahiptir. AMF dosya formatı, farklı renkleri, farklı malzeme türlerini, kafeslerin oluşturulmasını ve diğer ayrıntılı iç yapıları işleyebilmektedir. Eğri üçgenleri, eğri yüzeyleri STL tarafından kullanılan düzlemsel üçgenlerden daha doğru ve daha kompakt bir şekilde tanımlamak için kullanabilmektedir (Lipson ve Kurman, 2013).

4.3.6 3B Baskı için Temel Tasarım Kuralları

3B baskı için tasarım yaparken, sayısal tasarımın fiziksel bir nesneye dönüşeceği ve sayısal bir ortamda 3B olarak çizilebilen her modelin 3B yazdırılamayacağı unutulmamalıdır. Her 3B baskı işleminin farklı yetenek ve kendi sınırlamaları bulunur ancak 3B model tasarlarken baskı yapılacak teknolojiye bağımsız olarak göz önünde bulundurulması gereken en önemli tasarım hususları “çıkıntılar, duvar kalınlığı, çarpıtma/bükülme, ayrıntı düzeyi” konularıdır. Kullanılan süreç ve malzemeler baskı hızı ve maliyeti üzerinde etkili olduğundan, 3B model için daha küçük detayların kritik olup olmadığının belirlenmesi önemli bir tasarım kararıdır.

Bir 3B modelin 3B yazdırma için uygun olup olmadığını belirlemede dikkate alınması gereken boyut ve geometri kısıtlamaları, “geometri kısıtlaması, fiziksel boyut, minimum duvar kalınlığı, su geçirmezlik, kavisli yüzey” konularıdır. Büyük parçaların basılması endüstriyel yazıcılar gerektirmekte buda maliyeti artırmaktadır. Alternatif olarak model parçalara bölünerek ayrı ayrı basılabilir, baskı sonrası monte edilebilir. 3B baskı için tasarlanan her 3B model tamamen manifold (su geçirmez – kenarların 2 poligona bağlanması ve modelde delik bulunmama) olmalıdır. Manifold olmayan modeller, dilimleme yazılımı tarafından yanlış yorumlanarak, tutarsız katmanlara, deliklere veya başka hatalara neden olarak nesneyi yazdırılamaz hale getirebilir.

Bir modelin yazdırılabilir olup olmadığını kontrol etmenin en basit yolu, Netfabb veya Meshmixer gibi bir analiz yazılımı kullanmaktır. Bu programlar, 3B yazdırma aşamasında sorunlara neden olacak model özelliklerini algılar ve (modelin genel geometrisini etkilemeden) onarım seçenekleri sunar. Solidworks ve Fusion360 gibi çoğu CAD modelleme yazılımı, bir 3B modelin yüzeylerini görüntülemek için NURBS kullanır. Model 3B yazdırma için STL dosya formatına aktarılırken, yüzeylerini temsil etmek için yeterli sayıda çokgen kullanılması önemlidir. Bu, parçanın pürüzsüz bir görünüme sahip olmasını sağlayacaktır. Temel mekanik bileşenlerden karmaşık mimari parçalara kadar tüm CAD tasarımlarının 3B yazdırması için geçerli olan bu hususlar, baskı boyutunu belirlemenin yanı sıra baskı kalitesini de etkilemektedir (Url-41).

3B yazdırılan bir parçanın nihai kalitesinde parça yönlendirmesi önemli bir rol oynamaktadır. Parça oryantasyonu 3B yazdırılan bir parçanın parça doğruluğunu, üretim süresini, mukavemetini ve yüzey kaplamasını doğrudan etkilemektedir.

Çizelge 4.2 : 3B baskı teknolojilerinin standart yapı boyutları çizelgesi, (3d.hubs'dan derlenmiştir).

3B Baskı Teknolojilerinde Standart Yapı Boyutu	
FDM	Masaüstü yazıcılar için 200 x 200 x 200 mm Endüstriyel yazıcılar için 900 x 600 x 900 mm'ye kadar
SLA/DLP	Masaüstü için 145 x 145 x 175 mm Endüstriyel yazıcılar için 1500 x 750 x 500 mm'ye kadar
SLS	300 x 300 x 300 mm (750 x 550 x 550 mm'ye kadar)
Malzeme Jeti	380 x 250 x 200 mm (1000 x 800 x 500 mm'ye kadar)

Parça oryantasyonunda “parça doğruluğu, yapım zamanı, parça gücü, destek yapıları, yüzey kalitesi” önemlidir. 3B yazdırma işlemleri için parça oryantasyonu bir parçanın kalitesi üzerinde önemli etkiye sahiptir.

3B baskılı bir parçanın maliyeti, esas olarak üretim sürecinde kullanılan malzeme miktarı ve toplam üretim süresi ile belirlenmektedir. 3B baskının maliyetini belirleyen ana faktörler (malzeme maliyeti, parça hacmi, işlem sonrası) adımlarıdır. Modelin boyutu çok önemli değilse (örneğin görsel bir prototip için), modeli küçültmek maliyeti büyük ölçüde azaltacaktır. Tasarım için tamamen sağlam bir nesne gerekli değilse, o nesnenin içini boşaltmak, baskı maliyetlerini önemli ölçüde azaltacaktır. Destek yapıları ise daha fazla malzeme tüketimi ve destek yapılarını çıkarmak ve yüzeyi pürüzsüzleştirmek için ek son işlem gerektirmektedir.

Tüm 3B baskı süreçleri, parçaları katman katman oluşturur. Katman yüksekliği 3B baskılı parçaların kalitesini, görünümünü ve gücünü etkilemektedir. 3B baskının katmanlı niteliğinden dolayı, her katmanın kalınlığı bir baskının çözünürlüğünü belirlemektedir. Daha düşük katman yüksekliği, tipik olarak daha pürüzsüz yüzeylere sahip parçalar ile sonuçlanır. Dezavantajı, katman yüksekliği ne kadar düşük olursa, bir baskının tamamlanma süresinin o kadar uzun olmasıdır. Genellikle 100 µm ve 200 µm'de basılan parçalar arasındaki görsel fark çok küçüktür. Ancak, 100 µm'deki parçanın yazdırılması (3B yazıcının iki kat fazla kesit izlemesini gerektirecek) iki kat uzun sürecek, bunun maliyet üzerinde de etkisi olacaktır. 3B yazdırma işlemleri için "standart" katman yüksekliği aşağıdaki tabloda özetlemektedir: (Url-41).

Çizelge 4.3 : 3B baskı teknolojilerinin temel tasarım yönergeleri çizelgesi, (3d.hubs’den derlenmiştir).

3B Baskı Teknolojilerinin Başlıca Tasarım Yönergeleri			
	Minimum Duvar Kalınlığı	Duvar Kalınlığı ve Önemi	Standart Katman Kalınlığı
FDM	0,8 mm	Çok önemli	50 - 400 µm (en yaygın: 200 µm)
SLA/DLP	0,5 mm	Çok önemli	25 - 100 µm (en yaygın: 50 µm)
SLS	0,7 mm	Önemli	80 - 120 µm (en yaygın: 100 µm)
Malzeme Jeti	1,0 mm	Önemli	16 - 30 µm (en yaygın: 16 µm)

Bir katman yüksekliği seçminde göz önünde bulundurulacak kriterler “parça geometrisi, parça kullanım durumu, uygulama ve işlem sonrası” ihtiyacıdır. Katman yüksekliğinin etkisi eğriler ve açılar üzerinde daha belirgindir ve 3B baskının katman katman yapısı nedeniyle düz dikey duvarlarda daha az belirgindir. Katman yüksekliği, parçanın dikey çözünürlüğünü etkileyerek düzgünlüğünü etkiler. Kriter görsel görünüm ise, daha düşük bir katman yüksekliği seçmek idealdir, çünkü bu daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmesini sağlar. Kriter işlevsellik ise, bir parçayı 3B yazdırırken, daha yüksek bir katman yüksekliği kullanılması zaman ve maliyet tasarrufu ve iyileştirilmiş mekanik performans ile sonuçlanır. Bir katman yüksekliği kararında, parçaların sonradan işlenip işlenmeyeceğini düşünülmelidir.

Tüm 3B baskı teknolojilerinin beklenen boyutsal doğruluğu karşılamada yöntem bakımından, güçlü ve zayıf yönleri olsa da, 3B baskı ile üretilen parçalardan beklenen boyutsal doğruluğu belirleyici faktörler 3B model tasarımı ve malzeme özelliklerinde yatmaktadır. 3B baskısı yapılan bir parçanın doğruluğu büyük ölçüde tasarıma bağlıdır. Soğutma ve sertleştirmedeki değişiklikler de bükülmeye veya büzülme yol açabilen iç gerilimlere neden olabilir. 3B baskı, düz yüzeyler veya uzun ince desteklenmeyen özellikler için uygun olmayıp, parça boyutları büyüdükçe doğruluk da azalmaktadır. 3B baskısı yapılan bir parçanın doğruluğu tasarıma olduğu kadar malzemeye de bağlıdır. Örneğin, standart bir SLA reçinesi, esnek reçineden boyutsal olarak daha doğru parçalar üretmektedir dolayısıyla yüksek doğruluğun kritik olduğu parçalar için standart baskı malzemelerinin kullanılması önemlidir. 3B basılmış bir parçanın doğruluğunu ölçmek için “boyutsal doğruluk, bükülme veya büzülme, destek gereksinimleri gibi parametreler kullanılmaktadır.

4.3.7 Katmanlı Üretim Teknolojisinin Seçimi

Katmanlı üretimin, birden fazla süreci kapsayan bir şemsiye kavram olarak her 3B baskı işleminde farklı avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır. Tasarım özelliklerini doğru sergileyebilecek uygun süreci seçmek, genellikle birden fazla uygun süreç olabileceği ve her birinin belirli uygulamalar için (maliyet, yüzey farklılığı gibi) diğerlerinden daha avantajlı olabileceği düşünülerek belirlenmesi gerekmektedir. Ürün için doğru teknolojinin seçilmesi söz konusu olduğunda işlevsellik, gerekli malzeme, son parçanın fiziksel ve/veya görsel özellikleri ve süreç yetenekleri (doğruluk, yapı boyutu vb.) dahil olmak üzere birçok belirleyici faktör bulunmaktadır. Doğru süreç seçiminde belirleyici üç temel kriter ise, gerekli malzeme özelliklerinin belirlenmesi, ürünün tasarım gereksiniminde işlevsellik veya görselliğin tanımlanması ve baskı sürecinin yetenekleridir.

Bu bakımdan baskı süreci seçiminde dikkate alınması gereken üç temel husus bulunmaktadır:

- Gerekli malzeme özellikleri: mukavemet, sertlik, darbe mukavemeti vb.
- İşlevsellik ve görsel tasarım gereksinimleri: pürüzsüz yüzey, dayanıklılık, ısı direnci vb.
- Katmanlı üretim sürecinin yetenekleri: doğruluk, yapı boyutu, yüzey kalitesi vb.

Ürüne uygun malzeme özelliğine karar verildiğinde, aynı malzemelerden parçalar üretebilen belirli baskı teknolojileri bulunduğu için uygun 3B baskı teknoloji belirlenebilir. Ancak bu durumlarda, seçim sürecinde maliyete faktörü etkin olmaktadır. Ürünün tasarımında işlevsellik veya görsel görünüm gibi kriterlerin erken geliştirme aşamasında belirlenmesi de baskı süreci seçiminde önemlidir. Uygun baskı sürecinin belirlenmesi, ürünün tasarlanma aşamasından başlayacak bir takım tasarım özelliklerinin uygulanmasını gerektirebilir. Tasarım bakımından yüksek karmaşıklığa sahip modeller SLS yöntemiyle daha başarılı üretilmektedir. Parça mukavemeti fiziksel ve mekanik özelliklere bağlı olduğundan malzeme seçimi burada etkili olabilmektedir. Yüksek mukavemet ve sertlik gerektiğinde karbon fiberlerle güçlendirilmiş FDM baskı uygun tercih olabilmektedir. Malzeme bakımından termoplastik polimer malzeme daha iyi mekanik ve fiziksel özelliklere ve daha yüksek boyutsal doğruluğa sahip olduğu için işlevsel uygulamalar için tercih edilebilir. Esneklik gerektiğinde, TPU termoplastik SLS ve FDM sürecinde yüksek kopma

uzaması sağlaması bakımından veya SLA, DLP ve PolyJet’de kauçuk benzeri özellik sergilemesi bakımından, düşük sertlik gereken uygulamalarda tercih edilebilmektedir. İşlevsellik söz konusu olduğunda seçim SLS yöntemine veya daha hızlı ve ekonomik olan FDM sürecine tercihleri yönlendirebilir. Termosetler ise daha kırılğan parçalar üretmektedir ancak görsel görünüm için en uygun seçenek olması bakımından tercihi PolyJet veya SLA sürecine yönlendirebilir.

Tamamen şeffaf görünümlü parçalar için PolyJet tercih edilebilecekken, SLA ve DLP süreçleride yarı şeffaf olarak parçalar üretebileceği için tercih edilebilir. Tercihe göre baskı sonrası işlenerek %100 optik netlik yine SLA ve DLP süreçlerinde de mümkündür. Üründe ahşap benzeri veya metal benzeri bir yüzey dokusu istendiğinde, ahşap dolgu veya metal dolgu FDM filamentlerinin kullanılması çözüm sunabilir. Renkli veya tam renkli parçaların üretiminde tek seçenek PolyJet teknolojisi olmaktadır. PolyJet daha iyi fiziksel özelliklere ve çoklu malzeme özelliklerine sahip malzemeler sunduğundan avantajlıdır. Ayrıca baskı sonrası parçaları astarlayıp boyamak veya çift ekstrüzyon özellikli bir FDM yazıcı kullanmak renkli parçalar oluşturmak için tercih edilebilir. Ürünün model tasarımı tamamlanmış olduğu durumlarda, her bir 3B baskı teknolojisinin yeteneklerini değerlendirmek süreç seçiminde etkili olabilmektedir. Öncelikle her baskı işleminin ayrıntı düzeyi ve 3B baskı yazıcısının kalitesiyle ilişkili olduğundan, bu durumda boyutsal doğruluk belirleyici olabilmektedir. Yüksek doğruluk sunan süreçler, ince tasarım detayı sunan parçalar oluşturabilmekte, endüstriyel makinelerde masaüstü yazıcılara göre daha yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sağlamaktadır. Yapı boyutu yine uygun yazıcı seçiminde etkindir, yapı boyutunu aşan parçaların bölünerek baskı sonrası monte edilmesi mümkün olabilmektedir. Destek yapısına olan ihtiyaç da serbest biçimli parçaların üretimini kolaylaştırarak tasarım özgürlüğü sunması bakımından, uygun yazıcı seçiminde belirleyici faktörler arasındadır. Ayrıca katman yüksekliği, ürün niteliğinde, yüzeyin düzgünlüğünde belirleyici olduğu için dolayısıyla uygun 3B baskı teknolojisi seçiminde belirleyici bir faktördür.

4.3.8 Çevrimiçi Hizmet Platformları

3B tasarım içerikleri, içerikleri somut ürünlere dönüştüren baskı hizmetleri, 3B baskı teknolojisi eğitimi, 3B yazıcı satış ve kiralama gibi diğer ilgili hizmetleri sunan çevrimiçi platformlar bulunmaktadır. Bu platformlar, 3B tasarımcıların tasarım

içerikleri oluşturmasını kolaylaştırmanın yanı sıra 3B yazıcıya sahip olmayan veya 3B tasarım içeriklerini oluşturmak, işlemek ve değiştirmek için yeterli bilgiye sahip olmayan tüketicilere hem tasarım hem de baskı hizmetleri sunmaktadır. Dolayısıyla 3B baskı yenilik ekosisteminin büyümesine katkıda bulunmaktadır (Kwak ve diğ., 2018).

Ayrıca, 3B tasarım içeriklerini modellemek ve değiştirmek için ücretsiz ve düşük maliyetli 3B tasarım yazılım platformlarında bulunmaktadır. Bunlar, bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelleme yazılımı, 3B simülasyon ve derleme, bir tasarım görüntüleyici ve bir platform olarak paketlenmiş tasarım değişikliği ve optimizasyon araçlarını içermektedir. Bu platformlar, kullanıcılar arasında öğrenmeyi, geri bildirimi, ve ekosistemdeki içerik paylaşımını kolaylaştırmakta, teknolojiyi kullanmanın önündeki bilgi ve finansal engelleri azaltarak inovasyon ekosisteminin büyümesini hızlandırmaktadır. Shapeways, Thingiverse, Yeggi, Yobi3D, STL Finder, 3DShook, Trnpy, CubeForme küresel olarak çevrimiçi hizmet platformlarından bazılarıdır. Bu platformların hizmet çeşitleri; tasarım hizmeti, baskı hizmeti, hem tasarım hem de baskı hizmeti, tasarım ve baskı aracı hizmetleri, tasarım arama motoru hizmetleri ve abonelik hizmeti odaklı olmaktadır.

Çevrimiçi yazılım platformları modelleme, simülasyon, tasarım görüntüleyici ve çevrimiçi hizmet platformları için işleme gibi çeşitli araçlar sağlar ve böylece tasarım tedariki, ortak tasarım ve eğitim ve tasarım özelleştirme dahil olmak üzere çeşitli hizmetlerin gerçekleştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Autodesk 123D, TinkerCAD, Creo Elements aylık abonelik temelinde tasarım hizmeti sunmakta olan Autodesk'in platformlarıdır. Ancak en yaygın bilinenler arasında, Blender, FreeCAD, Meshmixer ve OpenSCAD 3B ücretsiz tasarım yazılım hizmet veren platformlardır (Kwak ve diğ., 2018).

Beşinci bölümde, ürün tasarımında katmanlı üretim süreçlerinin sağladığı (malzeme ve yapı bakımından) tasarım yetenekleri tartışılmaktadır. Altıncı bölümde dört araştırma sorusu; vaka analizi, sistematik literatür taraması ve sürdürülebilir yaşam döngüsü değerlendirmesi (3B baskı teknolojilerinin ekolojik ve sosyal etkilerini belirleyen) altında tartışılmıştır. Bu teknolojilerin yaşam döngüsü boyunca tasarım, üretim, dağıtım ve ömür sonu faydalarına yönelik yapılan çalışmayla konu raporlanmaktadır.

5. TASARIM, MALZEME ve KATMANLI ÜRETİM DEĞERLENDİRMESİ

Hızla artan özelleştirilmiş ve kişiselleştirilmiş talepler, bu değişime uygun yeni üretim paradigmaları gerektirmektedir. Endüstri 4.0 bağlamında her yerde bulunan bağlantı, dijitalleştirme ve paylaşım, gelişen kişiselleştirilmiş talepleri bireysel ihtiyaçlar ve tercihlerle karşılamak için yeni nesil üretim paradigmasıyla kişiselleştirilmiş üretim için bir fırsat sunmaktadır (Guo ve diğ, 2020). Katmanlı üretim, Endüstri 4.0'ün en umut verici ve potansiyel olarak yıkıcı teknolojilerinden biridir, geleneksel üretim paradigmasını dönüştürebilir, sürdürülebilir ve döngüsel iş modellerinin kavramsallaştırılmasını, tasarımını ve benimsenmesine yönelik değişimi hızlandırabilir.

5.1 Sürdürülebilirlik için Tasarım

Estetiğin yanı sıra tasarım, fayda değerine önemli ölçüde katkıda bulunabilir ve genellikle farklı seçenekler arasında seçim yaparken belirleyici bir faktördür. Ürün tasarımı, bir aktörün veya aktör ağlarının (şirketler, kurumlar, kar amacı gütmeyen kuruluşlar vb.) tasarladığı ve geliştirdiği ve ayrıca bir dizi belirli stratejik sonuç elde ettiği entegre ürünler, hizmetler ve iletişim stratejileri olup, aşağıdaki gereksinimlere dayanmaktadır: (Jovane ve diğ, 2009).

- yaşam döngüsü süreçlerine ve bağlamsal koşullara yanıt,
- katma değer yaklaşımıyla rekabet edebilirlik ve sürdürülebilirlik hedeflerine uyum,
 - mimari ve bileşenleri, yapısal ve işlevsel malzemeleri ve işlemeye olanak sağlayan teknolojilerin edinilmesi,
 - araştırmadan çıktıkça yeni teknolojilerin artan katılımı,
- Bütünsel kullanıcı merkezli tasarım, yenilikçi malzemeler (akıllı malzemeler, akıllı ve uyarlanabilir yapılar), nanoteknoloji, BİT ve mekatronik gibi teknolojilerdeki gelişmeler, yeni ürünler geliştirmek ve hızlı üretim yapmak veya mevcut ürün konseptlerine işlevsellik eklemek için neredeyse sınırsız olanaklar sağlamaktadır.

Ürün özellikleri, tasarıma özel değişkenler ve parametrelerle ilgilidir (Badurdeen ve diğ, 2018). Modelleme ve optimizasyon teknikleri, üretim iyileştirmelerini

desteklemek için güvenilir bir araçtır. Malzeme, enerji ve atık akışlarını bütünleştiren modelleme ve simülasyon teknikleri süreçler arasındaki etkileşimleri anlamaya yardımcı olabilmekte, kaynak kullanım verimliliğini artırabilmektedir (Despeisse ve diğ, 2012). Uygun sürdürülebilirlik değerlendirme araçları optimal ürün tasarımı için parametrik tasarım ortamları ile entegre edildiğinde, çeşitli tasarım parametreleri, aynı anda iki tasarım alternatifi arasında basitçe karşılaştırmak yerine optimize edilmiş bir tasarım elde etmek için değiştirilebilir (Jayal ve diğ, 2010).

Ürün yaşam döngüsü sorunlarına ilişkin küresel farkındalık, şirketleri daha sürdürülebilir ürün tasarımları geliştirmeye itmektedir (Aydin ve Badurdeen, 2019). Ürün tasarımı, hem ileri hem de geri akışta gelecekteki tüm maliyetleri belirlemektedir. Bir ürünün ayak-izinin yaklaşık %80'inin tasarımı sırasında belirlendiği göz önüne alındığında, tedarik zincirinde ortaya çıkan maliyetlerin (ve faydaların) çoğu aynı zamanda ürün tasarımı sırasında verilen kararlara bağlıdır. Yeni ürün tasarımı aşamasında, bir dizi sürdürülebilir ürün tasarımı ve bunların tedarik zincirleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi, geliştirilecek en iyi sürdürülebilir tasarımın belirlenmesini ve istenen ekonomik, ekolojik ve toplumsal faydaların elde edilmesini sağlayacaktır (Metta ve Badurdeen, 2013).

Kapalı döngü malzeme akışını kolaylaştırmak ve toplam ürün yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirliği geliştirmek R stratejilerinin (azaltma, yeniden kullanım, geri dönüşüm, kurtarma/onarım, yeniden tasarım, yeniden üretim), ürün, süreç ve sistem seviyelerinde, tüm yaşam döngüsü aşamalarına entegrasyonu ile sağlanabilir. Sürdürülebilir bir ürün tasarımı geliştirmek, üretim öncesi, imalat, kullanım ve kullanımdan sonrasına kadar dört yaşam döngüsünün tümünü kapsayan, toplam yaşam döngüsü yaklaşımının dikkate alınmasını gerektirmektedir (Aydin ve Badurdeen, 2019). Katmanlı üretim, tasarım (üretim öncesi), üretim, kullanım (onarım, yeniden üretim) ve kullanım sonrası (yeniden kullanma, geri dönüştürme, geri kazanma, azaltma), aşamalarını eş zamanlı olarak dikkate almasıyla bir ürünün yaşam döngüsü boyunca bu kısıtlamalardan bazılarını en aza indirme ve ürünlerin genel sürdürülebilir performansını en üst düzeye çıkarma imkanı sağlayabilir (Taddese ve diğ, 2020).

Kapalı döngü akışı gerektiren döngüsel ürün tasarımı ise, yaşam döngüsü perspektifini de içine alan daha üst bir bakış sunmaktadır. 1990'lardan bu yana, çeşitli rollerdeki (akademik, kurumsal, hükümet ve stk.) uygulayıcılar, farklı sürdürülebilir tasarım uygulama araçları geliştirmiş ve önermiştir.

Son araştırmalarla 600'ün üzerinde eko-tasarım aracı veya yöntemi tanımlanmıştır. Eko-tasarım, sürdürülebilir tasarım, döngüsel tasarım ve X için tasarım gibi yaygın olarak kullanılan bu yaklaşımlar, çok adımlı yöntemler, yazılım araçları, basit etkinlikler, hedef kontrol listeleri dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamaları içermektedir (Faludi ve diğ, 2020). Sürdürülebilir tasarım alanında, döngüsel tasarım yaklaşımı yeni bir araştırma alanı olarak odak haline gelmektedir. Ürün ömrünün uzatılması ve ürünlerin ve malzemelerin tamamen geri kazanılması, kurtarma stratejileri döngüsel tasarımın temel unsurlarını oluşturmaktadır (Sauerwein ve diğ, 2019). Döngüsel ekonomi modelinde sürdürülebilir tasarım kavramlarına yönelik kısa açıklamalar aşağıda sunulmuştur:

Beşikten Beşiğ:

Yenileme, yeniden üretim ve geri dönüşüm yoluyla atıkları ortadan kaldıran bir ekonomi sağılar. Her döngü geçişinin belirli bir malzeme için yeni bir bileşik haline geldiğı döngüsel tasarım ve yeniden kullanım mantığıdır. İleri dönüşüm ise, aksi takdirde atık olarak kabul edilecek olandan değıer yaratmayı sağılamaktır (Ford ve Despeisse, 2016).

Biomimikri:

“Doğadan ilham alan yenilik” veya “doğadan bilinçli öykünme”, tasarım problemlerini çözmede veya tasarım uygulamalarında doğadan öğrenilen bilgileri kullanmak için, biyolojik sistemlerin incelenmesi kavramıdır (Plessis ve diğ, 2019). Benyus (2009)'a göre, doğanın modellerini inceleyen ve daha sonra insan problemlerini çözmek için bu tasarımları ve süreçleri taklit eden veya onlardan ilham alan bir bilimdir. Biomimikri, yeniliklerimizin "doğruluğunu" yargılamak için ekolojik bir standart kullanmaktadır. Örneğın, biyolojik olarak parçalanabilen giysiler üretmek için örümcek ipeğı, ahşaptan suni deri, daha hızlı büyümeyi sağılamak ve su ihtiyacını azaltmak için pamuk mahsullerini alternatififiyle değııştirmek gibi doğanın en iyi tasarımlarını ve süreçlerini inceleyerek, taklit ederek daha yüksek bir sürdürülebilirliğe yönelik insan zorluklarını çözmek biyomimikri alanına girmektedir (Rinaldi, 2019).

Endüstriyel Simbiyoz:

şirketlerin bir arada endüstriyel işbirliği içinde olduğı, birinin atığının diğeri için hammadde olduğı bir aracılık yapısıdır.

Kapalı Döngü:

Tüm atıkları azaltarak, atık suları arıtarak ve yeniden kullanıma geri dönüştürerek veya ürünlerin dayanıklılığını artırarak hammadde kullanımı ve atık oluşumunu azaltmaya odaklanan ters lojistik ve ileri lojistiği birleştiren bir süreç lojistik sistemidir.

5.2 Malzeme Ekolojisi

İnsanlık tarih boyunca, av araçlarının icadından, çiftçiliğe ve günümüz ihtiyaçlarına kadar hayatta kalmak için yaratmak zorunda kalmıştır. Kullanılan fabrikasyon yöntemleri de döneminin araçlarından eşit derecede etkilenmiştir. Her çağ, malzeme ve yöntemleriyle bir önceki çağı geçersiz kılmıştır. Gün ışığına olan tepki, yerçekimi çekim kuvvetleri, rüzgar yönü, ve diğer doğal kuvvetler ve faktörler, bir sistemin biçimini, genel büyüme yönünü ve geometrisini etkilemektedir, dolayısıyla bu tür “doğal üretim” stratejileri tanımları gereği sürdürülebilirdir.

Malzeme Ekolojisi:

Malzeme ekolojisi; ürünler, binalar, sistemler ve çevreleri arasındaki bilinçli ilişkileri ifade eden tasarım alanıdır (Oxman, 2010). Çevreye duyarlı hesaplamalı form oluşturma ve sayısal üretimi entegre eden ürün ve süreçlerin incelenmesi ve tasarımı olarak tanımlanmakta, çevreye duyarlı sayısal tasarım ve üretimi vurgulamaktadır (Oxman, 2014). Fabrikasyon/sayısal üretim, herhangi bir tasarımın önceden bildirilmesiyle sınırlandırılmıştır. Hızlı prototipleme/katmanlı üretim süreçleri tasarımcının herhangi bir modellenmiş formu doğrudan fiziksel olarak üretilmiş bir forma çevirmesine izin verdiğinden, tasarımcıya neredeyse sınırsız olanaklar sağlamaktadır. *“Değişken özellikli üretim yaklaşımıyla birleştirilen değişken özellikli modelleme”, tasarım üretiminde “heterojen maddesellik” yoluyla malzeme özelliklerinin varyasyonunu kolaylaştırmakta ve form oluşturma sürecinin ayrılmaz bir parçası haline gelmektedir* (Oxman, 2010). Katmanlı üretim, birçok geleneksel üretim sürecine kıyasla sürdürülebilir üretim sorunlarını ele alan üretim süreçleri arasında gösterilmektedir.

Araştırmacılar yarının “haute-tech couture” modasının temellerini tasarlamaktadır. Yeni nesil tekstil ve moda ürünlerinden yararlanan ilk pazarlar ise; askeri, medikal, spor ve refah sektörleri olmaktadır. Bu akımın moda pazarına sızmasıyla (Lee, 2005), yeni nesil tasarımcı profili, modayı değiştiren yeni beceri ve araçların edinilmesiyle, etkileri tasarımcılar, üreticiler, küresel marka ve tüketiciler üzerinde olabilecektir.

5.3 Katmanlı Üretim Teknolojileri ile Üretilmiş Giyilebilir Uygulamalar

Katmanlı üretimin uygulama literatüründe yeralan giyilebilir moda projelerinin, arkasındaki tasarım düşüncesi, malzeme inovasyonu, üretim teknolojisindeki gelişim ve uygulama yetenekleri tezin literatür bölümlerinde, alan yazında ortaya konmuştur. Tez kapsamında ele alınan vakaların değerlendirmesinde, katmanlı üretim yöntemleriyle üretilmiş olan giyim, ayakkabı, aksesuar gibi vücut mimarisi anlayışındaki ürünlere odaklanılmıştır. Yapılan literatür incelemesi; bireysel ihtiyaçlara cevap veren akıllı tekstillerden malzeme püskürtme, biyolojik büyütme ya da programlama ile üretilebilen giyilebilirliklere doğru bir gelişme sürecinin yaşandığını göstermiştir. Bu bölümünde akademik ve uygulama literatüründen belirlenen, (polimer malzemeli) giyilebilir moda projeleri, öncelikle üretildikleri katmanlı üretim teknolojileri altında kategorize edilmiştir. Moda, ayakkabı ve kuyumculuk tasarımları, düşük hacimli sanatsal parçalar, tek kullanımlık, özelleştirilmiş ve diğer öğelerin literatür incelemesi, 3B baskılı giyilebilir alanında aşağıda belirtilen süreç ve teknolojilerin yaygın kullanım yeri bulunduğunu göstermiştir:

- Tekne fotopolimerizasyon süreci: Stereolitografi ve Sayısal Işık Projeksiyonu teknolojileri,
- Malzeme ekstrüzyon süreci: Kaynaşmış Biriktirme Modelleme teknolojisi,
- Toz yatağı füzyon süreci: Seçici Lazer Sinterleme teknolojisi,
- Malzeme püskürtme süreci: PolyJet baskı teknolojisi.

5.3.1 Seçici Lazer Sinterleme Teknolojisi Uygulamaları

3B baskı olanaklarının tekstil yapılarında araştırılmasına yönelik ilk çalışmalar 2000 yılında, Jiri Evenhuis ve Janne Kyttanen'in girişimleri olan FoC "Freedom of Creation" bünyesinde gerçekleşmiştir. 2003 yılında patenti alınana "FoC tekstiller", günümüzde MoMa'nın kalıcı koleksiyonunda sergilenmektedir.

Katmanlı üretimin moda alanında kullanımına yönelik ilk örnekler, 2010 yılında Iris van Herpen'in haute couture koleksiyonlarındaki sıradışı parçaların podyumlarda sergilenmesiyle popülerlik kazanmıştır. Moda Haftası'nda sergilenen ilk 3B baskılı giysisi koleksiyonunun heykelimsi parçası "Crystallizasyon" üst ve ikincisi "Escapism" üst ve etek, Daniel Wildrig işbirliğinde tasarlanmış, MGX' de poliyamid malzemeye üretilmiştir.



Şekil 5.1 : Crystallizasyon koll. “CR0152” üst 2010, Escapism koll. “ESC0111” üst ve “ESC0112” etek 2011, katmanlı üretim uyg., Iris van Herpen, (Url-7, Url-8).

Iris van Herpen, farklı disiplinleri öncü yöntemlerle birleştirmektedir. Geleneksel zanaatkarlık ile inovatif teknoloji entegrasyonu Herpen’in özgün yaratıcı sürecini desteklemektedir. Herpen’in devam eden çalışmaları modayı bilim, sanat, mimari, mühendislik, biyoloji alanlarında şekillendirmeye ve sürdürülebilirliğe odaklanmıştır. Continuum Fashion’dan J. Fizel ve M. Haung’ın tasarladığı dünyanın ilk 3B baskılı bikini, PA-2200 naylon tozu ile Shapeways işbirliğinde üretilmiştir. Bikinideki dairelerin yüzey eğrilğine göre düzenlenen yapısal tasarımı, algoritmayla sağlanmıştır. Çevrimiçi satın alınabilen “N12 bikini”, 3B baskılı bir giyim ürününün ticarileşmesine öncülük eden ilk tasarım olmuştur.



Şekil 5.2 : N-12 bikini, Continuum moda, katmanlı üretim uygulaması, 2011, Jenna Fizel, Mary Huang, (Url-9).

Herpen'in, Voltage Koleksiyonu için Julia Koerner ile tasarladığı elbisede karmaşık, esnek, yumuşak bir yapı için TPU malzemesi deneysel olarak ilk kez bu uygulamada kullanılmıştır. Elbisenin karmaşık dantel benzeri dokusu, moda ve yüksek teknolojinin birleşiminin olanaklarını göstermiştir. Esnekliğin yanında, akıcılık ve parlaklık kazandırmak için silikonla kaplanan “Bio Piracy” koleksiyonunda ise TPU 92A-1 malzemesinin esnekliğinde katedilen ilerlemenin kanıtı olmuştur.



Şekil 5.3 : Voltage Koll. “VT071” elbise, 2013 (solda), Bio Piracy Koll. elbise, 2014 (sağda), katmanlı üretim uygulaması, Iris van Herpen, (Url-10, Url-11).

“Smoke elbise”, kullanıcının psikolojik durumunu yansıtmak için, mikrodenetleyici ve yapay zeka kullanan Hi-Tech tasarım araştırması, A. Wipprecht ve Niccolo Casas işbirliğinde tasarlanmıştır. Materialise işbirliğinde üretilmiş 3B baskılı Smoke elbise, kullanıcının kişisel alanına girildiğini algılayarak, oluşturduğu duman perdesiyle kişiyi kamufle eden, kullanıcı ve çevre arasında 3B baskılı bir ara yüzdür. “Synapse elbise”, Intel’in Edison mikro denetleyicisi tarafından desteklenen, biyosensörlere dayalı, interaktif akıllı bir elbisedir. Tasarımı Maya ve Zbrush 3B CAD ile modellenmiştir. Synapse elbise, Hi-Tech sensörleriyle, yüksek güçlü LED serisini uyarmak için topladığı gerçek zamanlı biyo-sinyal verileri, ledleri kullanıcı tepkisine dayalı değiştirir. Her iki giyilebilir, TPU 92A-1 malzemesiyle üretilmiştir. Giyilebilir robotik elbise “Spider 2.0”nin, karmaşık yapı ve geometrik tasarımı Materialise Magics ile optimize edilmiş, PA-12 malzemesiyle üretilmiştir. 3B baskı tasarımına gömülü sensörler, kullanıcının alanını izleyerek, stres seviyelerini kontrol eden, mekanik örümcek bacaklar, kullanıcı kişisel alanını savunmak için “biyo-sinyaller” ve “öğrenilmiş tehdit algılama” kullanarak dış-uyaranlara sezgisel yanıtlar vermektedir.



Şekil 5.4 : Smoke elbise, 2013 (sol), Synapse elbise, 2014 (sağ), Anouk Wipprecht ve Niccolo Casas, (Url-12, Url-81).



Şekil 5.5 : Spider elbise, 2015, katmanlı üretim uygulaması, Anouk Wipprecht, Philip H. Wilck, Tiia Vahula, (Url-13).

Jesse Rosenkrantz ve Jessica Rosenberg'in 2014'de tasarladığı "Kinematik elbise", polyamid tozuyla, Shapeways işbirliğinde üretilmiştir. Kinematik elbisenin mozaik şeklinde döşenmiş yapı bileşeni sert ve sağlam olmakla birlikte, akıcı bir kumaş gibi davranır. Parametrik vücut modelleme web uygulaması "Nervous System" ile kullanıcı etkileşime girerek, modeli tasarlayabilir. Kullanıcının biometrik verileri, 3B tarama veya geleneksel ölçümlerle uygulamaya aktarılır, tüm tasarım süreci bedeninin simülasyonunda 3B olarak gerçekleşmektedir. Nervous System tek statik tasarım yapmak yerine sayısız sonuç veren dinamik sistemlerin kodlanmasıyla, özelleştirilmiş üretken tasarımın, 3B baskı ile üretilmesine imkan vermektedir. Tasarımların küçük bir ayak izinde yazdırılabilmesi için simülasyon aracı Kinematics Fold akıllı katlama stratejisi ile kinematik bir modeli %85'in üzerinde sıkıştırılabilmektedir (Url-85).



Şekil 5.6 : Kinematik elbise, kumaş yapısı ve menteşeli bileşen detayı (sağda), Jesse L. Rosenberg, Jessica Rosenkrantz, 2014, MoMa, (Url-14,Url-15,Url-16).

Nervous Sistem tarafından tasarlanmış “Kinematic yapraklı elbise” ise, poliyamid malzemeyle Shapeways işbirliğinde üretilmiştir. Yaprakların, tüylerin ve pulların yapısından esinlenerek tasarlanan Kinematik yapraklı elbisenin gözenekli yapısı, yön, uzunluk ve şekil bakımından her biri özelleştirilebilir yapraklarla kapatılmıştır. Birbirine kenetli plastik bileşenler serttir ancak sürekli bir tekstil gibi davranabilir (Rosenkrantz ve Rosenberg, 2017). Hareketli menteşeli bileşenlerden oluşan 3B baskılı Kinematik yapılar, kendini algılama, harekete geçirme ve şekil değiştirme gibi ‘akıllı’ davranış göstermedikleri için tam bir 4B baskı olarak sınıflandırılmamaktadır.



Şekil 5.7 : Kinematic Yapraklı elbise, Jesse L. Rosenberg, Jessica Rosenkrantz, 2016, Boston Güzel Sanatlar Müzesi, (Url-17, Url-18).



Şekil 5.8 : Black Panther filmi 3BB kostüm koll. detayı, Julia Koerner, 2018.
Pangolin Elbise, Anouk Wipprecht, 2020, (Url-19, Url-20).

Julia Koerner, geleneksel Afrika kültürü, teknoloji ve inovasyondaki ilerlemeleri konu alan Hollywood yapımı Black Panther filminin kostüm koleksiyonunu, Materialize işbirliğinde üretmiştir. PA-12 poliamid malzemesi, yüksek doğruluk, esneklik ve yapısal güç sağlaması, cilt teması için uygun oluşuyla projede tercih edilmiştir. Koerner'in, geliştirdiği 3B baskılı Zulu Şapka ve Cepkenin ayrıntılı telkari yapıları tasarımlarının el yapımı görünmemesi parametrik algoritmik modelleme ile sağlanmıştır. Koerner'e göre, kostüm dünyasında 3B baskı tasarımlarının kullanımı, form ve geometrilerde herhangi bir sınırlama olmadığı için büyük bir fırsat sunmakta ve modanın geleceği için dönüm noktası olmaktadır (Url-40 ve Url-39).

Wipprecht'in, giyilebilecek kadar hafif, tüm mekaniği yerinde tutacak kadar sağlam tasarladığı, (3mm) 'dış iskelet' benzeri yapısıyla "Pangolin Elbise", Shapeways işbirliğinde üretilmiştir. Beyin sinyallerine dayalı veriler, gerçek zamanlı olarak görselleştirilerek, beyin-bilgisayar arayüzü olarak robotik Pangolin Elbisesinin etkileşimli kontrolünü sağlamaktadır.

Pangolin elbise, Johannes Kepler Üniversitesi-Entegre Devreler Enstitüsü ve Avusturyalı Neuro Technology şirketi G.Tec medikal mühendislik işbirliğinde geliştirilmiştir. Pangolin elbisenin tasarım yaklaşımı, COVID-19 nedeniyle insanların sosyal mesafeyi iyi anlamalarına yardımcı olma amacıyla, moda ve teknoloji etkileşiminde nöroteknoloji kullanımına dayanmaktadır.

5.3.2 Kaynamış Biriktirme Modelleme Teknolojisi Uygulamaları

Danit Peleg, 2015 yılında 3B baskı yöntemiyle, eksiksiz bir giyim koleksiyonu oluşturan ilk modacıdır. Shenkar Mühendislik işbirliğinde FDM 3B baskı teknolojisine dayalı Witbox basit ev tipi masaüstü yazıcıların kullanıldığı koleksiyon parçaları, çeşitli renk aralığına sahip, esnek aynı zamanda güçlü bir filament olan FilaFlex malzeme kullanılarak basılmıştır. Koleksiyonda bulunan “Liberty ceketin” tasarımında Delacroix’in “Liberty Leading the People” adlı tablosunun kompozisyonunda bulunan geometrik üçgenli kurgu, ceketin kumaş yapısı için ilham kaynağı olmuştur. Koleksiyonun diğer parçalarını hazırlarken Bastian’ın meso yapısından geliştirdiği 3B baskılı kumaşları Blender CAD ortamında hazırlamıştır. Peleg’in, 2017’de geliştirdiği koleksiyonundaki 3B baskılı “Imagine” Bomber ceketin, meso yapılı kumaşının üretiminde de FilaFlex filament malzeme kullanılmıştır.



Şekil 5.9 : Imagine Bomber Ceket, “The Birth of Venus” Koll. 2017 (orta), “Mezo Hücresel Yapılar” (sağ), Mezuniyet Koll. Elbise 2015 (sol), Danit Peleg, (Url-21, Url-22, Url-51,Url-79).

Autodesk işbirliğiyle geliştirilen “Minimal Ayakkabı”nın, aktif malzemesi belirli bir dış uyaran karşısında, ürüne bir durumdan diğerine doğrudan şekil dönüştürme özelliği eklemektedir. Skylar Tibbits işbirliğinde geliştirilen, geleceğin ayakkabı konsepti minimal aktif ayakkabı, gerilen streç bir kumaş üzerine programlanabilir bir desenin, FDM 3B baskı yöntemiyle basılmasıyla yaratılmıştır (Url-44).



Şekil 5.10 : Minimal ayakkabı, 4B baskı uygulaması, Skylar Tibbits, 2015, (Url-23).

5.3.3 Stereolitografi Teknolojisi Uygulamaları



Şekil 5.11 : Hybrid Holism koll., Iris Van Herpen, 2012, (Url-24).

Herpen'in "Hybrid Holism" koleksiyonunda Julia Korener işbirliğinde tasarlanan elbise, Materialise'nin Mamut SLA 3B baskı teknolojisiyle üretilmiştir. Elbisenin malzemesi neredeyse yarı saydamdır ve ışık durumuna bağlı olarak farklı bal rengi tonlarında görünür. Elbisenin tasarımı, vücutta ikinci bir deri gibi büyüyen, son derece karmaşık, parametrik olarak modellenmiş geometrik yapıların ve esrarengiz etkiler yaratan organik sayısal yaprak oluşumları kombinasyonunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.12 : "Magnetic Motion" koll. 2015 (sol), "Hacking Infinity" koll. 2015 (sağ), katmanlı üretim uygulamaları, Iris Van Herpen, Niccolo Casas, (Url-26, Url-27).

Herpen'in, mimar Niccola Casas ile tasarladığı "Magnetic Motion", heykelimsi, buzdan, kırılğan kristal oluşumlarla kaplı, şeffaf elbise, Accura Cleave malzemesiyle 3B Systems işbirliğinde üretilmiştir. Bu malzeme, yüksek düzeyde ayrıntı, hassas incelik ve yarı saydam kalite oluşturma yeteneği nedeniyle seçilmiş. "Hacking Infinity elbise" ise daha önceki heykelsi parçalardan tamamen ayrılmakta, birbirine bağlantılı şeffaf ve esnek parçaların oluşturduğu elbisenin bağlantılı bileşen yapısı, hem vücudun etkileşimi, hem de estetik duyarlılık tarafından yönlendirilerek hareket edebilmektedir. Hacking Infinity elbise Accura ClearVue malzemesi ile 3B Systems işbirliğinde üretilmiştir. Malzeme gelişiminin, 3B baskılı moda uygulamasının yapısına getirdiği değişimi, bu elbisenin hareket ve karmaşıklığında izlenmek mümkündür.

5.3.4 Sayısal Işık Projeksiyonu Teknolojisi Uygulamaları – DLP/CDLS



Şekil 5.13 : Futurecraft 4B baskılı ayakkabı, Adidas, 2017, (Url-70).

"Futurecraft 4D ayakkabı", Adidas'ın Carbon işbirliğinde ürüne özel geliştirdiği "EPU 41" elastomerik 3B baskı malzemesi ve CDLS baskı sürecinin ilk uygulamasıdır. Programlanabilir sıvı reçine platformundan yararlanan CDLS süreci, ürünün şeklini ayarlamak için ışık, mekanik özelliklerini ayarlamak için ısı kullanan, sıfır destek malzemeli orta tabanlarda çeşitli kafes yapılarını hızla tasarlamayı ve üretmeyi mümkün kılan tescilli bir baskı stratejisiyle seri üretimi mümkün kılmıştır. Liedtke (2022)'e göre, geleneksel ürün geliştirme (dört adımla: tasarım, prototip oluşturma, kalıplama ve üretim) döngüsü, genellikle tasarımı tamamlamadan önce üç ila beş tasarım döngüsü karşılamasıyla, ürün ekibinin inovasyonunu kısıtlamaktadır. Carbon-Adidas işbirliği bu döngüyü kırmakta, tasarımdan üretime doğrudan geçişi mümkün kılarak, on kattan fazla yinelemeye imkan verip, her yinelemenin nihai ürünle aynı süreç ve malzeme ile üretilebilmesi, prototip oluşturmaya da gereksiz kılmaktadır.

5.3.5 PolyJet Modelleme Teknolojisi Uygulamalar

Herpen'in Voltage koleksiyonu için Neri Oxman işbirliğinde tasarladığı “Anthoza”, 2013 Paris Moda Haftasında podyumda segilenen, ilk çok malzemeli 3B baskılı giyilebilir pelerin ve etekden oluşmaktadır. Anthoza, Stratasys'in çeşitli malzeme ve malzeme özelliklerinin tek bir yapıda basılmasına izin veren Objet500 Connex3 çok malzemeli, PolyJet 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretilmiştir.



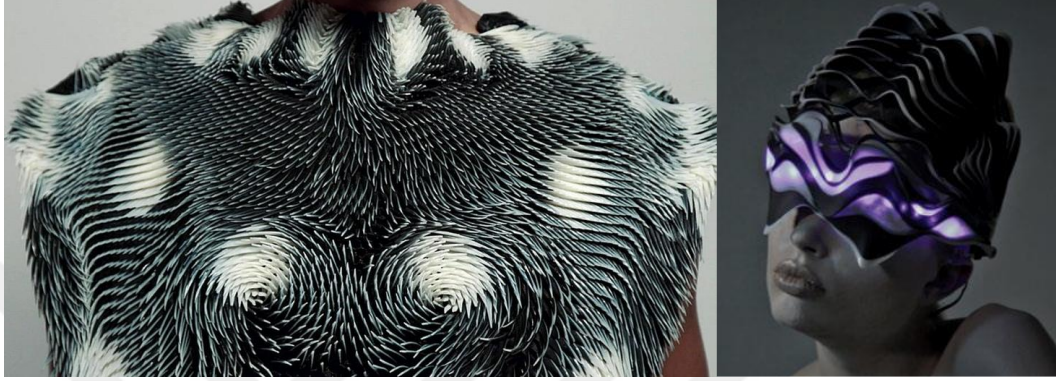
Şekil 5.14 : Voltage koleksiyonu, “Anthoza VT091” katmanlı üretim pelerine, etek (sol) ve yapı detayı, (sağ), 2013, Iris van Harpen, (Url-29, Url-31, Url-53).

“DNA ayakkabı” konsepti, anatomik ve biyomekanik verilere dayalı, kişilerin ayak şeklini ve hareket biçimlerini, kişisel tarzlarını yansıtan tasarım detaylarıyla birleştirerek kişiselleştirmenin sınırlarının zorlandığı 3B baskılı bir üretim sürecini ortaya koymaktadır. Ayakkabı, VeroClear, VeroYellow, Tango ve TangoBlack+, sert ve esnek malzeme kombinasyonlu yapısıyla, Fantom işbirliğinde üretilmiştir.



Şekil 5.15 : DNA ayakkabı, katmanlı üretim uygulaması, Pensar, 2014, (Url-32).

“Caress of The Gaze”, Behnaz Farahi tarafından geliştirilmiş çevresiyle etkileşimli, kişilerin bakışlarını algılayarak gerçekçi davranışlarla cevap verebilen 3B baskılı interaktif giyilebilir üsttür. Sürüngen derisi ve balık pullarının farklı davranış modellerine dayalı, ana şekil değişimini sağlayan SMA’lar sessiz ve organik olarak hareket edebilirken, kamera insanların bakışlarını algılayarak yaşam benzeri hareket geliştirmek için ortam sağlamıştır (Farahi, 2016).



Şekil 5.16 : Cares of the Gaze prototip üst (sol), Synapse, Prototip Kask (sağ), Behnaz Farahi, 2015, (Url-33, Url-34).

“Synapse kask”, kullanıcının beyin aktivitesine bağlı olarak şekil değiştiren ve hareket eden etkileşimli, çok malzemeli 3B baskılı bir kasktır. Farahi, kaskın tasarımında büzülme ve genişleme sağlayan esnek yapı amacıyla balık ve sürüngen derilerindeki pul sisteminden esinlenmiştir. EEG çip ve modifiye Mindflex kulaklık aracılığıyla beynin davranışını izleyerek kontrol edilebilen kask, dikkat seviyesine ilişkin nöral komutlar, iki küçük servo ile çalışan kaskın vizörünü açabilmekte, kapatabilmekte ve değiştirebilmektedir. Caress of The Gaze gibi Synapse Kask’da esnek Shore60 ve sert VeroWhite malzeme kombinasyonu ile, Autodesk Pier9’da üretilmiştir (Farahi, 2017).



Şekil 5.17 : Vespers Serisi1, Maske3 (orta), Vespers Serisi2, Maske1 (sol), Vespers Serisi3, Maske2 (sağ), “Yeni Antik” maske koleksiyonu, Neri Oxman, Christoph Bader, Dominik Kolb, 2016, (Url-35, Url-36, Url-37).

“Vespers”, canlı biyolojik malzemelerle tasarım fikrini araştıran, çok malzemeli 3B baskı teknolojisiyle üretilmiş onbeş adet maskeden oluşur. Koleksiyon, üç farklı seride geçmiş, bugünü ve geleceği tasvir eder. Kabile yapımı yerli nitelikler ile biyoteknolojik ilerleme arasındaki ikilemi dengeleyen Vespers I, kültürel eserlerdeki simetrik ve renkli süslemeli yapıları, algoritmik üretken tasarım yaklaşımı ve yedi malzeme kombinasyonu ile yorumlar. Tarihi kökenlere bakarak yaşamla ölüm arasındaki anı keşfeden Vespers II, antik maskelerin bölgeler ve çağlar arasında yaygın kullanılan renklerini, beş malzeme kombinasyonu ile yorumlar. Dönüşüm kavramına dikkat çeken Vespers III, programlanabilir şablonlamayla malzeme modelleme ile programlanabilir yaşam arasındaki boşluğu doldurma girişimidir. Vespers I’in desen ve renkleri, bir yaşam sistemi E-coli bakteri pigmenti aracılığıyla renksiz olarak tasarlanmış olan Vespers III’e kademeli olarak aşılanmıştır (Url-30).



Şekil 5.18 : Biomimikri Koleksiyonu, Harmonograf elbise, (Url-82) (sol) ve Pangolin elbise, (Url-83) (sağ), ThreeAsfour, 2016.

Harmonograf elbisesi, Fibonacci dizisinin geometrisini takip eden bir harmonografin etkisi optik olarak tasvir edilerek, vücut etrafında üç spiral halinde daireler çizmektedir. Pangolin elbisede ise, birbirine geçen çeşitli dokumalar karıştırılarak, doğal hayvan dokularını biyolojik olarak taklit ederek bir cilt yaratılmıştır. ThreeAsfour imzalı bu projelerde, Objet500 Connex3 teknolojisinin kesinliği, sertlik ve renk geçişi gibi (ilk kez kullanılmakta olan esnek Agilus30) malzeme özelliklerini değiştirme yeteneği, tasarımcılara gözeneklilik ve esnekliğin nüanslı dönüşümlerini yaratmak için geometrik kontrol sağlanmıştır (Url-84).



Şekil 5.19 : Ludi Naturae Koleksiyonu, Yapraklı elbise ve yapı detayı, Iris van Herpen, 2018, (Url-55, Url-56).

Herpen'in, “Ludi Naturae” koleksiyonundan, “Yapraklı elbise” yenilikçi malzeme teknikleri uygulanarak, Delft Teknoloji Üniversitesi işbirliğinde geliştirilmiştir (Url-47). Elbisenin 3B yaprak şeklindeki bileşen tasarımı, Grasshopper'da algoritmik olarak tasarlanmış, geometrik modelin voksel seviyesinde renk ve şeffaflık geçişleri, çok malzemeli PolyJet yöntemiyle sağlanmıştır. Geleneksel moda tasarım becerisi, hesaplamalı tasarımla birleşerek hem geometri hem de malzeme dağılımı, bir komut dosyasıyla tül kumaş parçalarına 3B baskıyla doğrudan uygulanmıştır.

ThreeASFOUR'un 3B baskılı “Greta Oto” elbisesi, doğrudan kumaşın yüzeyine PolyJet 3B baskı teknolojisiyle basılmıştır. Greta Oto elbisenin yüzey deseni, ışığı kırarak yanardöner bir etki yaratan, küçük küresel fotopolimer hücrelerden oluşmaktadır. Koerner'in “Setae Ceket” tasarımında ise Madagaskar Günbatımı kelebeği'nin kanatlarının 2B makro taramalarına dayalı pixeller bir algoritmaya sayısallaştırılmıştır. 3B modellere çevrilmiş desen, esnek kumaş üzerinde doğrudan çok malzemeli PolyJet 3B baskı ile uygulanmıştır (Url-38).



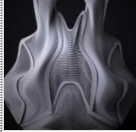
Şekil 5.20 : Greta-Oto elbise, ThreeASFOUR ve Setae Ceket, Julia Koerner, Stratasys'in Chro-Morpho koleksiyonu uygulamaları, 2019, (Url-57, Url-58).

Akademik ve uygulama literatüründen belirlenen giyilebilir moda projeleri, bölüm 5.3’de üretildikleri katmanlı üretim teknolojileri altında kategorize edilmiştir. Uygulama literatüründen, alanında ilk olma özelliği gösteren ve uygunluk kriteri (malzeme, tasarım, uygulama ve sergilenme) bakımından yeterli veri sağlayan 43 proje belirlenip, Tablo 5.1’de analiz edilmiştir. Projelerin belirlenmesinde, ürün/eserin sergi veya moda haftası vb. etkinlikde yer alma durumu göz önünde bulundurulmuştur.

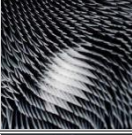
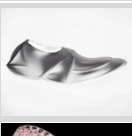
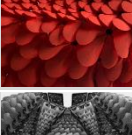
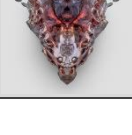
Tablo 5.1 : Katmanlı üretim teknolojileri giyilebilir uygulamalar tablosu.

Katmanlı Üretim Teknolojileri ile Üretilen Giyilebilirler						
Tasarım Görseli	Eser Adı	Tasarım Ekibi	Teknolojik Önem	Malzeme	Tasarım	Yöntem
	21.yy (2003) FOC Tekstil Drape Elbise	J. Evenhuis, J. Kytanen MoMa New York	Giyilebilir Elbise & Freedom of Creationun 3BB ilk kumaş tasarımları.	Naylon tozu Mikron çözünürlük & simülasyon tasarımı	Zincir-posta bağlantılı geometri, örme kumaş benzeri 8 farklı kumaş tasarımları	3B Tek Mlz. SLS ve SL EOS
	21.yy (2010) Üst Crystalization	D. Widrig, Iris van Herpen Moda Haftası	Giyilebilir Üst Podyumda sergilenen, ilk 3BB giysi	TPU-92A-1 (Polyamid tozu)	Karmaşık grift tasarım, tek parça basılmış heykelimsi yapı	3B Tek Mlz. SLS Materialize MGX
	21.yy (2011) Üst & Etek Escapism Koll.	D. Widrig, Iris van Herpen Moda Haftası	Giyilebilir Üst ve Etek Konsept Beş duyu & Altıncı his	TPU-92A-1 (Polyamid tozu)	Sayısal eğlence ile gerçeklikten sürekli kaçma bağımlılığı. Konsept Beş duyu & Altıncı his	3B Tek Mlz. SLS Materialize MGX
	21.yy (2011) N-12 Bikini	J. Fizel, M. Huang, Continuum Moda	Giyilebilir Bikini Ticarileştirilerek satışa sunulan ilk 3BB bikini	PA-2200 (Naylon tozu) Sert yapılı	3B tarama & Kişiselleştirme Birbirine yaylarla bağlanmış, farklı boyutlarda disklerden oluşan geçmeli yapı,	3B Tek Mlz. SLS EOS P 760, Shapeways
	21.yy (2012) Strvct Ayakkabı	J. Fizel, M. Huang, Continuum Moda	Giyilebilir Ayakkabı Ticarileştirilerek satışa sunulan ilk 3BB ayakkabı	PA-2200 (Naylon tozu) Sert yapılı	3B tarama & Kişiselleştirme 3B baskılı bir çift ayakkabının baskısı 16 ila 20 saat	3B Tek Mlz. SLS EOS P 760, Shapeways
	21.yy (2012) Hybrid Holism Koll.	Julia Koerner, Iris van Herpen Moda Haftası	Giyilebilir Elbise Stereolitografi teknolojisiyle üretilmiş ilk giysi	Reçine yarı saydam ve ışık durumuna bağlı olarak bal rengi tonlarında	Parametrik tasarım Bio-ilhamlı karmaşık yaprak oluşumları, ikinci bir cilt görünümünde	3B Tek Mlz. SLA Mamut Materialise
	21.yy (2012) BioLogic Seckond Skin	Lining Yao, MIT Media Lab.	Biyo malzeme araştırması, tekstil tasarımıyla birleşir performans dokusu	Canlı hücrelerin, atmosferik neme göre genişleme ve büzülme davranışı	Arayüz tasarımı Yeni malzemelere odaklı, malzeme hesaplama tabanlı etkileşim tasarım “biyo yeni arayüz”	4B Tek Mlz. Bio Baskı Aktüatörler
	21.yy (2013) Modular Ayakkabı	Hoon Chung Layer by Layer Sergisi	Giyilebilir Ayakkabı İlk 3BB giyilebilir ayakkabı koleksiyonu	Kauçuk & Naylon tozu Üst esnek, topuk, taban, gövde sert	Üst ve alt parçaları birden fazla malzeme tasarlanarak, 3B basılmış ayakkabı.	3B Çok Mlz. SLS EOS
	21.yy (2013) Anthoza Voltage Koll.	I. van Herpen, N. Oxman, W. C. Carter Moda Haftası	Giyilebilir Pelerin & Etek İlk çok malzemeli, giyim	Sert ve Esnek Malzeme Tek bir yapı içinde çeşitli özellikte malzeme	Hareket ve malzeme davranışının geometri ve morfolojiyle eşleştiği algoritmik tasarım. Stratasys & Materialise	3B Çok Mlz. PolyJet Objet500 Connex

Tablo 5.1 (devam) : Katmanlı üretim teknolojileri giyilebilir uygulamalar tablosu.

Katmanlı Üretim Teknolojileriyle Üretilen Giyilebilirler						
Tasarım Görseli	Eser Adı	Tasarım Ekibi	Teknolojik Önem	Malzeme	Tasarım	Yöntem
	21.yy (2013) Voltage Koll.	Julia Koerner, Iris van Herpen Moda Haftası	Giyilebilir Elbise Yıldırımları anlama, kontrol etme ve yeniden tasarlama	TPU 92-1 esnek malzeme ile basıldıktan sonra renklendirilmiş.	Parametrik tasarım Karmaşık geometri, hareket eden çok sayıda ince üst üste dokuma çizgi katmanı	3B Tek Mlz. SLS Materialise
	21.yy (2013) Dita von Teese Elbisesi	F. Bitonti & Michael Schmidt Studyoları	Giyilebilir Elbise Mafsallı eklemli yapı vücuda oturan hareket ve esneme	Naylon tozu, Siyah lake boyama Swarovski kristal süs	Fibonacci'nin altın oranı spiral tasarıma ilham. Von Teese'in vücuduna 3B tarama & Kişiselleştirme	3B Tek Mlz. SLS Shapeways
	21.yy (2013) Smoke Elbise Volkswagen Koll.	N. Casas & A. Wipprecht Frankfurt IAA	Hi-Tech tasarım araştırması Kullanıcı deneyimi tasarımı	TPU-92A-1 (Polyamid tozu)	Kullanıcı deneyimi tasarımı Mikrodenetleyici teknolojisi ve yapay zeka ile tepki verir	3B Tek Mlz. SLS Materialise
	21.yy (2014) Synapse Elbise	N. Casas & A. Wipprecht	Akıllı Giyilebilir Biyosinyallere dayalı kullanıcı deneyimi tasarımı	TPU-92A-1 (Polyamid tozu) Semsör, Led, Kamera	Gömülü bileşenler ile Biyosinyaller dayalı elbise görünümünü değiştiren 3BB tasarım	3B Tek Mlz. SLS Materialise
	21.yy (2014) Bio Piracy Koll.	Julia Koerner, Iris van Herpen Moda Haftası	Giyilebilir Elbise 3BB malzeme ve baskı teknolojisindeki ilerleme	TPU-92A-1 (Polyamid tozu) Akıcılık ve parlaklık için silikonla kaplı	Yüksek Karmaşıklık Materialise Magics yazılımı ile tasarım detaylarına dahil edilmiş	3B Tek Mlz. SLS Materialise
	21.yy (2014) Kinematic Elbise	L. Rosenberg, J.Rosenkrantz MoMa	Giyilebilir Elbise Menteşeli, üçgen modüllü yapı, mekanik hareket Bileşeni sert ve akıcı	PA-2200 (Naylon tozu) Sert yapılı	Doğrudan Montaj Menteşeli yapıyla sürekli tekstil davranışı. Simülasyon ve 3BB entegrasyonu özelleştirilme	3B Tek Mlz. SLS Nervous System
	21.yy (2014) Zuhal Wanderers Koll.	N. Oxman, C. Bader, D. Kolb MIT Media Lab.	Gezegenler arası yolculuklar için yaşamı sürdürülmesi biotasarım araş. 6. Element Sergisi	VeroCyan, VeroClear, VeroMagenta, VeroYellow	Üretken büyüme algoritması giyilebilir girdap alanı. Hidrokarbonları insan tüketimi için dönüştüren biyotasarım	3B Çok Mlz. PolyJet Objet500 Connex3
	21. yy (2014) DNA Ayakkabı	Pensar & FANTOM	Giyilebilir Ayakkabı Biyomekanik veri ile tasarım	VeroClear, VeroYellow, Tango ve TangoBlack+	Kişiselleştirme Anatomik ve biyomekanik veri ile kullanıcı davranışı, 3BB entegrasyonu.	3B Çok Mlz. PolyJet Objet500 Connex3
	21.yy (2015) Magnetic Motion Elbise	N. Casas, Iris van Herpen	Giyilebilir Elbise Yüksek ayrıntı, hassas incelik, yarı saydam malzemenin deneyisel kullanımı.	Accura Cleave (Saydam Sert yapılı) Cila ve apresi işlemi	Şerbest Şekillendirme Heykelsimsi buzdan, kırılgan kristal oluşumlarla kaplı, şeffaf elbise tasarımı.	3B Tek Mlz. SLA ProX 950 3D Systems
	21.yy (2015) Hacking Infinity Elbise	N. Casas, Iris van Herpen	Giyilebilir Elbise Elbisenin bağlantılı bileşenleri şeffaf ve esnek.	Accura ClearVue (Şeffaf Esnek Yapılı)	Doğrudan Montaj, bağlantılı yapıyla dört panel olarak tasarlanmış. Esnek, vücut etkileşimine estetik duyarlılık gösterir.	3B Tek Mlz. SLA 3D Systems
	21.yy (2015) Mutatio Ayakkabı Koll.	Francis Bitonti Studio New York	United Nude Markası Ticari Ayakkabı Koleksiyonu	Noylon Tozu Baskı sonrası montaj ve altın kaplama.	Algoritmik tasarım ile farklılaştırılmış 3BB topuk tasarımları.	3B Tek Mlz. SLS 3D Systems
	21.yy (2015) Giyim Ürünü Mezuniyet Koleksiyonu	Danit Peleg, Shenkar	Giyilebilir Ticari olarak satılabilen ilk giysi Koleksiyonu	FilaFlex (Termoplastik) esneklik ve renk çeşitliliğine sahip filament.	Meso Yapılı Kumaş Tasarımları Döküm ve katlanma, esneklik ve dantelsi yapılı 3BB giysi tasarımı.	3B Tek Mlz FDM Witbox yazıcı

Tablo 5.1 (devam) : Katmanlı üretim teknolojileri giyilebilir uygulamalar tablosu.

Katmanlı Üretim Teknolojileriyle Üretilen Giyilebilirler						
Tasarım Görseli	Eser Adı	Tasarım Ekibi	Teknolojik Önem	Malzeme	Tasarım	Yöntem
	21.yy (2015) Caress of The Gaze Üst	B. Farahi, Autodesc Pier9	Giyilebilir SMA aktüatörleri ve kamera ile bir dizi bio-ilhamlı dinamik davranış sağlanması.	Esnek Shore60 siyah, Sert VeroWhite beyaz, SMA, Kamera.	Gömülü Bileşen ile çevresiyle etkileşimli, dinamik algılama ve davranış gösterebilen 3BB tasarımı.	4B Çok Mlz. Polyjet Object 500 Connex3
	21.yy (2015) Synapse Kask	B. Farahi, Autodesc Pier9	Giyilebilir Kask Beyin aktivitesine bağlı, dinamik algılama ve davranış sağlanması.	Esnek Shore60, Sert VeroWhite. Servo, NeuroSky EEG çipi ve Mindflex kulaklık.	Gömülü Bileşen ile çevresiyle etkileşimli, dinamik algılama ve davranış gösterebilen 3BB tasarımı.	4B Çok Mlz. Polyjet Object 500 Connex3
	21.yy (2015) Spider Elbise	N. Casas & A. Wipprecht	Giyilebilir Robotik Elbise Biyosinyallere dayalı kullanıcı deneyimi tasarımı	TPU-92A-1 (Polyamid tozu) Intel Edison Çip, Sensör.	Gömülü bileşenler ile biyosinyaller ve öğrenilmiş tehdit algılamaya dayalı savunma tasarımı. Kişiselleştirme.	3B Tek Mlz. SLS Materialise
	21.yy (2015) Rottlace Maske	N. Oxman	Giyilebilir Maske Karmaşık lifli doku, yumuşak ve esnek, yüz hareketiyle uyum.	Vero Clear saydam, Vero White-Plus opak reçine ile optik saydamlık ve renk	Veri Görselleştirme Parametrik geometri ve volumetrik modelleme ile hibrit malzeme tasarımı.	3B Çok Mlz. Voksel Polyjet Object 500 Connex
	21.yy (2015) 4B Aktif Ayakkabı	C. Guberan, C. Clopath, S Tibbits, MIT	Aktif Ayakkabı 4B baskılı ilk Ayakkabı	Aktif Madde Şekil dönüşüm özelliği ile teksstil yapı programlama Dura Form TPU Elastomer toz	Gömülü Şekil Değişimi Streç bir kumaş üzerine, programlanabilir bir desen 4BB ile kendinden montaj.	4B Tek Mlz. FDM Autodesk
	21.yy (2015) New Balance J. Ayakkabı	L. Rosenberg J. Rosenkrantz	Orta Taban Performans Koşu Ayakkabısı	PA-2200 (Naylon tozu) Sert yapılı	Hücresel yapı yastıklama sağlar ve bio-ilhamla tasarlanmış ve yüksek işlevli orta taban oluşturur.	3B Tek Mlz. SLS Nervous System
	21.yy (2016) Kinematic Yapraklı Elbise	L. Rosenberg, J. Rosenkrantz Boston Güzel San.	Giyilebilir Elbise Menteşeli, bioilham modüllü yapı, mekanik hareket. Bileşeni sert ve akıcı	PA-2200 (Naylon tozu) Sert yapılı	Doğrudan Montaj Menteşeli yapıyla sürekli tekstil davranışı. Simülasyon ve 3BB entegrasyonu özelleştirilme	3B Tek Mlz. SLS Nervous System
	21.yy (2016) Pangolin Elbise, Biomimikri Koll.	ThreeAsfour, Travis Fitch, Moda Haftası	Giyilebilir Elbise Malzeme özellikleri gözeneklilik, hareket, esneklik dönüşümü sağlar.	VeroBlack ve Agilus30 malzemesinin deneysel kullanım. Sertlik-renk geçişi.	Parametrik geometri Doğal hayvan dokularını biyolojik olarak taklit eden birbirine geçen çeşitli dokuma karışımı yapı.	3B Çok Mlz. Polyjet Object 500 Connex3
	21.yy (2016) Harmonograph Elbise Biomimikri Koll.	ThreeAsfour, Travis Fitch, Moda Haftası	Giyilebilir Elbise Harmonograph Fibonacci dizisinin geometrisi spiral tasarıma ilham olur.	VeroBlack ve Agilus30 malzemesinin deneysel kullanım. Sertlik-renk geçişi.	Parametrik geometri, bioilhamla algoritmaları, sertlik ve renk geçiş özelliklerini tasarımla birleştirir.	3B Çok Mlz. Polyjet Object 500 Connex3
	21.yy (2016) Salınlı Elbise, Quantum Vibration K.	ThreeAsfour, Travis Fitch, Moda Haftası	Giyilebilir Elbise Enerji ve titreşimden ilham alan tasarım renk geçişleriyle	Agilus30, VeroCyan, VeroWhite Değişen malzeme özellikleri.	Parametrik geometri, Karmaşık, iç içe geçmiş enerji çemberleri, vücut etrafında şekil, renk, esneklik dönüşümü.	3B Çok Mlz. Tam Renkli Polyjet J750
	21.yy (2016) Vespers Seri1 Maske3	N. Oxman MIT MMG. Yeni Antik Koll.	Giyilebilir Maske Antik eserdeki simetri ve renkli süsleme yapılarına, algoritmik yorum.	Fotopolimerler, bizmut, gümüş, altın. Heterojen malzemeli nesne üretimi.	Parametrik özyinelemeli gramerle yönlendirilen, geometrik tabanlı, veriye dayalı malzeme modelleme.	3B Çok Mlz. Tam Renkli Polyjet (7 malzeme) J750
	21.yy (2016) Vespers Seri2 Maske1	N. Oxman MIT MMG. Yeni Antik Koll.	Giyilebilir Maske Antik eserden çağlar-bölgeler arası renklerden ilhamla, etkileşimli içyapılar.	Fotopolimerler Dıştan içe dönüşüm, heterojen 5 malzeme dağılımı.	Algoritmalar ile yüzey renklendirme, geometriler, şeffaf pürüzsüz hacimlerde iç kanallara dönüşür.	3B Çok Mlz. 5 Renkli Polyjet Object 500 Connex3

Tablo 5.1 (devam) : Katmanlı üretim teknolojileri giyilebilir uygulamalar tablosu.

Katmanlı Üretim Teknolojileriyle Üretilen Giyilebilirler						
Tasarım Görseli	Eser Adı	Tasarım Ekibi	Teknolojik Önem	Malzeme	Tasarım	Yöntem
	21.yy (2016) Vespers Seri3 Maske2	N. Oxman MIT MMG. Yeni Antik Koll.	Giyilebilir Maske Dönüşüm Kavramına dikkat çeker.	Renksiz reçine ile basılmış, E-coli bakteri pigmentiyle aşılarmıştır.	Programlanabilir malzeme sistemi ile yaşam arasında. Antik eserdeki simetri ve renkler algoritmik yaklaşımla yorumlanır.	3B Çok Mlz. Renkli Polyjet Object 500 Connex3
	21.yy (2017) Futurecraft 4D Adidas	C. Arnese, J. Munns, J. Perrault	Orta Taban Biomekanik verilerle özel tasarlanmış performans ürünü.	EPU 41 Elastomer (reçine-poliüretan) Enerji dönüşümü ve kafesli yapılara özel geliştirilmiş.	Doğrudan montaj Monolitik bileşende değişen mekanik özellik ve estetiğe sahip kafes yapısı.	4B Tek Mlz. Carbon DLS
	21.yy (2017) Imagine Bomber Ceket	Danit Peleg, Shenkar The Birth of Venus Koll.	Giyim Koleksiyonu Web tabanlı Özelleştirme ve Çevrimiçi satış	FilaFlex (Termoplastik) esneklik ve renk çeşitliliği	Meso yapısı Kişilerin vücut verilerine ve kişisel tarzına göre özelleştirilebilen Ceket.	3B Tek Mlz. FDM Witbox yazıcı
	21.yy (2018) Yapraklı Elbise Ludi Nature	Iris van Herpen, Delf Teknoloji Üniversitesi	Giyilebilir Elbise Geleneksel tasarım becerisi, hesaplamalı tasarımla birlesir.	Voksel seviyesinde renk ve şeffaflık geçişleriyle.	3B "yaprak" bileşenlerin algoritmik tasarımı. 3BB ile Geometri ve malzeme dağılımı tül kumaşa uygulanmış.	3B Çok Mlz. Polyjet Voksel Baskı
	21.yy (2018) Black Panther Film Kstm.	Julia Koerner Marvel Stüdyoları, Hollywood	Giyilebilir Şapka, Pelerin En iyi kostüm tasarımı ödülü (2019)	PA 12 (Polyamid tozu) Yüksek doğruluk, esneklik ve güçlü bir yapıyı sağlar.	Algoritmik parametrik modelleme Kostüm parçalarının el yapımı görünmeme için kullanılmış.	3B Tek Mlz. SLS Materialise
	21.yy (2019) Setae Ceket	Julia Koerner Chro Morpho Koleksiyonu	Giyilebilir Ceket 2D makro tarama verileri, 3D modele çevrilmiş.	Fotopolimer Vero malzeme ailesi. 3B renk geçişleri malzemeye atanır.	Özelleştirme, renk, estetik Kelebek kanatlarının fotoğrafı algoritmaya sayısallaştırılarak 3B modele çevrilmiş.	3B Çok Mlz. Tam Renkli Polyjet J850
	21yy (2019) Greta-Oto Elbise	ThreeASFOU R Travis Fitch Chro Morpho Koleksiyonu	Giyilebilir Elbise Polyester kumaşa hücre desen 3BB ile uygulanmış.	Fotopolimer Vero malzeme ailesi polyester kumaş.	Doğrudan renkli baskı Kelebek kanatlarının morfolojisinden ilhamla, 3BB ile gölge ve derinlik yaratılmıştır.	3B Çok Mlz. Tam Renkli Polyjet J850
	21.yy (2019) 3D Nakışlı Ceket	Samson Shafran Sayısal Bedevi Koll.	Giyilebilir Ceket 3B tasarımcının sanatsal rolünün altını çizmektedir.	Fotopolimer Vero malzeme ailesi Tekstil malzemesi (buzağı derisi).	Doğrudan renkli baskı Nakış motiflerinden ilhamla, binlerce küçük renkli modüler ünite kumaşa uygulanmıştır.	3B Çok Mlz. Tam Renkli Polyjet J850
	21.yy (2019) Gül Elbise	Zac Posen MET Galası Couture Koleksiyonu	Giyilebilir Elbise Sert yapılı toplam 21 yaprak	Accura Xtreme White 200, DuPont'un Kromaluzyon boya ve parlak vernik.	Bio-ilham, "Kamp: Moda Üzerine Notlar" teması, hareket halindeki doğal nesneleri dondurma fikrinden ilham almıştır.	3B Tek Mlz. Yapraklar SLA İç yapı EBM GE Additive
	21.yy (2020) Pangolin Pullu BCI+Elbise	Anouk Wipprecht	Giyilebilir Elbise, EEG aktüatörlü, robotik elbiseye bağlı, etkileşim.	TPU-92A-1 (Polyamid tozu), EEG Çipi	Pangolin Elbise, beyin sinyallerine dayalı verilere, gerçek zamanlı davranış göstermektedir.	3B Tek Mlz. SLS Shapeways
Kronolojik						

Yapılan değerlendirme, malzeme inovasyonu ile birlikte, hem “katmanlı üretim tasarımının” hem de katmanlı üretim teknolojilerinin etkileşim halinde gelişimini göstermiştir. Tablo 5.1’deki analiz her bir projenin; ürün, yıl, tasarım ekibi, teknolojik önem, malzeme, tasarım yöntemi ve üretim yaklaşımına dair detaylar sunmaktadır.

5.4 Analiz Yöntemi

Sürdürülebilirlik sorunlarıyla başa çıkmak için birçok özel yöntem ve araç geliştirilmiş ancak, birleştirici bir teori olmadan bunların birbirleriyle nasıl ilişkili olduğu ve stratejik olarak nasıl kullanılabileceği belirsiz kalmıştır. Stratejik Sürdürülebilir Kalkınma Çerçevesi (SSKÇ), bu ihtiyacı karşılamak için geliştirilmiştir. Temel olarak sürdürülebilirliğin ilkeli bir tanımından geriye dönük olarak değerlendirmeyi içermektedir. Özellikle sürdürülebilir ürün inovasyonunu desteklemek için ayrıntılı yöntem ve araçların kullanımına ve iyileştirilmesine rehberlik etmektedir (Ny, 2009).

1990'ların başında İsveç'te sürdürülebilirliğe birleştirici ve operasyonel bir tanım ve yaklaşım geliştirme amacıyla bir uzmanlaşma süreciyle başlayan yaklaşım, Stratejik Sürdürülebilir Kalkınma Çerçevesine (SSKÇ) dönüşmüştür. SSKÇ'nin gelişiminde: literatür çalışmaları, mantıksal akıl yürütme, hipotez oluşturma ve test etme, modelleme, eylem araştırması, vaka çalışmaları, röportajlar, anketler vb. yöntemler kullanılmıştır. SSKÇ'deki yöntemler, The Natural Step yaklaşımı tarafından sunulmuş modellerdir. Broman ve Robert tarafından, bu yöntemleri bir araya getiren genel bir çerçeve önerilmiştir; sürdürülebilirlik sorunu teorik olarak incelemekte, uygulayıcılar arasında kullanılmakta ve test edilmekte, sonuçlar detaylandırılmakta, teorik olarak tekrar incelenmekte ve sürekli bir yinelenmeli süreç içermektedir. Bir çekirdek bilim insanı tarafından yürütülebilen, literatürden anahtar kavramların damıtıldığı ve bunların ilişkilerini stratejik bir sürdürülebilir kalkınma perspektifinden anlamaya çalışıldığı anlamına gelmektedir (Broman ve Robert 2017). SSKÇ'nin ayrıntılı yöntemler ve araçlarla birleştirilmesinin, daha koordineli ve etkili bir destek sağladığı görülerek bu yaklaşımın sürdürülebilir ürün inovasyonu karar süreçlerine, yazılımlarına ve kılavuzlarına entegre edilmesi önerilmiştir. Bu yaklaşım ile çeşitli materyallerin ve uygulamaların sürdürülebilir potansiyelini değerlendirmek mümkün hale gelmiştir (Ny, 2009).

Sürdürülebilir kalkınma için çeşitli yöntemler, araçlar ve diğer destek biçimleri (örneğin; ekolojik ayak izi, yaşam döngüsü değerlendirilmesi, temiz üretim, sürdürülebilir teknoloji geliştirme, endüstriyel ekoloji, eko-tasarım) güçlü ve zayıf yönleri ve kombinasyon olasılıkları ve mevcut sürdürülemez durum ile stratejik bir şekilde gelecekteki sürdürülebilir bir durum arasındaki boşluğu kapatmak için yetenekleri açısından analiz edilmiştir. Sürdürülebilir kalkınma için birçok çerçeve,

kavram ve yöntem, araç vb. olduğu, her birinin kendine özgü bakış açısı, güçlü ve zayıf yönleri olduğu ancak hiçbirinin birleştirici ve yapılandırıcı bir çerçevenin yerini almadığı görülmüştür.

5.4.1 Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (SYDD)

Bir ürün, hizmet, teknoloji ve/veya özelleştirilmiş seçenekler kümesi gibi portföyün sürdürülebilirlik performansının değerlendirilmesinde, LCA, eko-tasarım araçları ve kontrol listeleri gibi çeşitli araç ve yöntemler kullanılmaktadır (Villamil ve diğ, 2021). Ürünlerin geliştirilmesi, teknik sistemler perspektifinden daha karmaşık bir yaklaşım olan sosyo-teknik sistemler perspektifine doğru evrilmiştir (Villamil ve diğ., 2021). Bir ürünün yaşam döngüsü sürdürülebilirliğinin etkisinin ve işlevinin sosyo-teknik sistem içinde belirlendiği erken aşamalarda stratejik bir sürdürülebilirlik perspektifi uygulamak (Hallstedt, 2017; Villamil ve diğ, 2021) gerekliliği doğmuştur.

Endüstriyel ekoloji araştırmalarında sıklıkla kullanılan “LCA” (Ny, 2009), ürün yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri belirlemek için kullanılmakta ancak sosyal yönleri atlaması bakımından stratejik bir perspektiften yoksundur (Villamil ve diğ, 2021). Erken aşamalarda nicel verilerin azlığı nedeniyle sürdürülebilirlik performansının nasıl değerlendirileceği konusu bazı zorluklar içermektedir. Geriye dönük değerlendirme yaklaşımını kullanarak stratejik bir perspektifi dâhil etmek için, alternatif bir LCA aracı olan “Stratejik Yaşam Döngüsü Yönetimi”, yeni bir yöntem ve araç olarak Ny ve diğ. (2009) tarafından önerilmiştir. Bu değerlendirme yöntemi, akademik literatürde “Sürdürülebilirlik Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi” (SYDD) olarak da bilinmektedir (Broman ve Robert 2017). ISO Standard 14040 olarak yayınlanan LCA yöntemi, The Natural Step yaklaşımı tarafından, (SLCA/SYDD) yaklaşımına dönüştürülmüştür (Everard ve Blume, 2020). SYDD, yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirlik etkisinin önemli noktalarını geriye dönük bir bakış açısıyla, nitel bir şekilde belirlemek için (sosyal ve ekolojik) sürdürülebilirlik ilkeleri kullanarak, LCA'ya stratejik bir bakış açısı eklemektedir (Villamil ve diğ, 2021).

The Natural Step (Doğal Adım):

1989'de kurulan “The Natural Step” platformu, daha iyi gelecek yaratmak için kuruluşların, karar vericilerin, sürdürülebilir kalkınmayı iş modelleri ve stratejilerine entegre ederek daha başarılı olmaları için sürdürülebilirliği sağlamaya yönelik bilimsel, sistemik ve stratejik bir yaklaşımdır (Url-76). The Natural Step tarafından

Stratejik Sürdürülebilir Kalkınma Çerçevesinde (SSKÇ) sunulan yöntemler, bilimsel ilkelere şeffaf yaklaşımıyla literatürde en sağlam modellerden biri olarak değerlendirilmektedir (Everard ve Blume, 2020). SSKÇ’de yer alan Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirme (SYDD) aracı, 2006’da The Natural Step platformu tarafından geliştirilmiştir (Sederel ve diğ, 2008).

5.4.2 Niteliksel Analiz

Nitel araştırma kavramı, altında yer alabilecek birçok kavramın değişik disiplinlerle ilişkili olması nedeniyle bir şemsiye kavram olarak kullanılmaktadır. İçerik analizi bu kavramlardan biridir. Tez kapsamında, nitel araştırmada en yaygın kullanılan veri toplama yöntemlerinden gözlem ve yazılı doküman incelemesi, nitel içerik analiziyle kullanılacaktır. Doğrusal bir süreç içinde olmayıp, etkileşimli döngüsel bir süreç içinde gerçekleşen nitel araştırmada döngüsel adımlar: “Araştırma probleminin belirlenmesi, kavramsal çerçevenin oluşturulması, araştırma sorularının oluşturulması, örneklem belirlenmesi, araştırmacının rolünün belirlenmesi, veri toplama araçlarının geliştirilmesi, veri toplama, veri analizi, sonuçların sınıflandırılması ve sonuçlardan oluşmaktadır (Yıldırım ve Şimşek, 2016).

Nitel veri analizinde analizlerin önemli bir kısmı veri toplama süreci ile birlikte başlamakta ve raporlaştırmaya kadar bu çözümleme süreci devam etmektedir. Berelson’a göre, içerik çözümlemesi, iletişim sürecinde iletilen mesajların açık/belirgin nesnel, sistematik ve nicel bakımlardan betimlemek için kullanılan bir araştırma tekniğidir (Olgun, 2008). Niteliksel içerik analizi elde edilen verilerden araştırma sorusuna ilişkin, kodlama şemaları, tema ve alt temalar oluşturmaya yönelik sistematik bir yöntem olduğu için bu araştırmada seçilmiştir. Yıldırım ve Şimşek’e göre (2016), veri kodlaması, analizi ve yorumlaması sistematik bir yaklaşım gerektirmekte olan nitel araştırma verileri dört aşamada analiz edilmektedir:

- (ayrıntılı kodlama) verilerin kodlanması,
- (tematik kodlama) temaların bulunması,
- kodların ve temaların düzenlenmesi,
- bulguların tanımlanması ve yorumlanması.

Bu tez kapsamında araştırma yaklaşımı; sistematik literatür taraması, vaka incelemesi ve belirlenen katmanlı üretim yöntemlerinin değerlendirmesi olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır.

Sistematik literatür taraması:

Tez kapsamında amaca odaklı sistematik bir literatür taraması yapılmıştır:

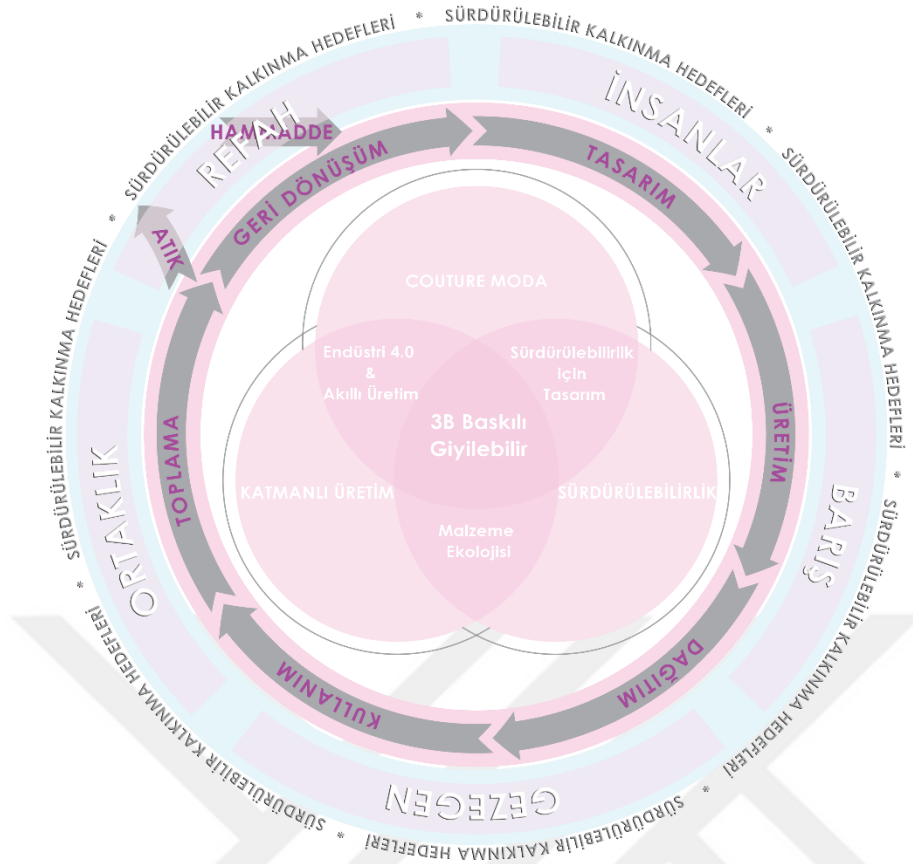
- Katmanlı üretim teknolojileriyle üretilen giyilebilirlerin, sürdürülebilirlik yönlerinin tespiti,
- Katmanlı üretim teknolojilerinin, sürdürülebilirlik fırsatları ve zorluklarının tespiti,
- Araştırma sorularının tartışılmasında kavramsal bakış sunmak amaçlanmıştır.

İlk adımda çalışmanın anahtar kelimeleri belirlenmiştir; “katmanlı üretim”, “3B baskı”, “giyilebilir”, “moda”, “E4.0”, sürdürülebilirlik”, “sürdürülebilir tasarım”, “döngüsel tasarım”. İkinci adımda, akademik makale taraması için scopus, google scholar, science direct veritabanları seçilmiştir. Katmanlı üretimler teknolojisiyle üretilmiş giyilebilir uygulamaların, podyumda ilk sergilendiği 2010 yılı sorgulama için başlangıç olarak belirlenerek, veritabanı sorgulaması 2010’dan 2021 yılları arasına sınırlandırılmıştır. Ayrıca, araştırma sorularıyla ilgili tema ve alt temaları yansıtmada katkısı olabileceği düşünülen birkaç makale ve rapor kartopu yöntemiyle listeye dâhil edilmiştir. Makaleler, başlık, yıl, anahtar kelime, özet ve sonuçları bakımından okunarak uygunluk değerlendirmesinin ardından “43 akademik makale ile 3 web makaleden” oluşan bir listeye ulaşılmıştır. Makaleler, analizinin kolaylaştırılması için, yıl, başlık, yazar, anahtar kelimeler, katmanlı üretim teknolojisi, varsa uygulama örneği ve sürdürülebilirlik yönü dikkate alınarak listelenmiştir.

Örneklem seçiminde araştırma sorusu ve alt soruların cevaplarına katkısı olabilecek makale ve giyilebilir uygulama örnekleri seçilmiştir. Sistematik literatür taramasıyla elde edilen verilerin arasında yer alan anlamlı bölümlerden, kavramlara (kodlara) ulaşılmıştır.

Tezin araştırma alanı ve araştırma soruları bakımından, katmanlı üretim yöntemiyle üretilmiş giyilebilir moda alanı üç kavram kesişiminde ele alınabilir: couture moda, katmanlı üretim, sürdürülebilirlik. Kavramların incelenmesi sonucunda, birbirleriyle ilişkileri ve ortak yönleri tematik kodlama ile; Malzeme ekolojisi, Sürdürülebilirlik için tasarım, E4.0 ve Akıllı üretim olarak üst düzey ana temalar (kategorileri) belirlenmiştir:

- Sürdürülebilirlik - couture moda kesişimi; sosyal (sürdürülebilirlik için tasarım),
- Katmanlı üretim – sürdürülebilirlik kesişimi; ekoloji (malzeme ekolojisi),
- Couture moda – katmanlı üretim kesişimi; ekonomi (E4.0 ve Akıllı üretim)



Şekil 5.21 : Katmanlı üretim ve 3B baskı teknolojileri ile üretilmiş giyilebilir moda uygulamaları alanı kavram döngüsü, 2022.

Özelleştirilmiş (Couture) moda, sürdürülebilirlik ve katmanlı üretim kavramlarının etkileşimi. Bu alan, stratejik sürdürülebilirlik perspektifi, R stratejileri, döngüsel ekonominin yaşam döngüsü aşamaları ve BM (2030) sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle etkileşim halinde gelişme göstermektedir.

Üretim Yönteminin değerlendirilmesi:

Literatürden belirlenen katmanlı üretim teknolojilerinin sürdürülebilirlik etkileri SYDD yöntemiyle belirlenmiştir. Sürdürülebilir tasarım, malzeme ekolojisi ve akıllı üretim ana temaları; “hammadde, tasarım/yeniden tasarım, üretim/yeniden üretim, dağıtım, kullanım, onarım, toplama, geri dönüşüm ve atık” yaşam döngüsü aşamalarıyla döngüsel ekonomi şemsiye modeli altında etkileşim göstermektedir. Analiz için, “The Natural Step” platformunun Stratejik Yaşam Döngüsü Değerlendirme yaklaşımı şeması⁴ araştırmada uyarlanarak kullanılmıştır. Döngüsel tasarım “Eko-Tasarım” (döngüsel yenilik stratejisi) değerlendirme aracının⁵ soruları ve Natural Step’in (yedi adet) analiz sorusu yapılarının, sosyo-ekolojik

⁴ Natural Step platformu, Stratejik yaşam döngüsü değerlendirme (SLCA) yaklaşımı, (Url-73).

⁵ Eko-tasarım değerlendirme (döngüsel yenilik stratejisi için yöntem) aracı, (Url-72).

sürdürülebilirlik ilkelerine uyarlanmasıyla hazırlanan “rehberli analiz soruları” ile SYDD kodlama şeması tema ve alt temalarını şekillenmiştir (Çizelge 5.5). Stratejik sürdürülebilirlik ilkeleri perspektifiyle geliştirilen bu sorular sürece rehberlik etmiştir.

Sistemik literatür taramasıyla elde edilen veriler, SYDD analiz şemasında Çizelge 6.6’da yorumlara yer verilmeden sunulmuştur. Sonraki aşamada katmanlı üretim teknolojilerinin “avantaj ve kısıtlamaları”, bir önceki aşamada tanımlanan ve sunulan bulgularla bağlantılı olarak her yaşam döngüsü aşamasına yönelik oluşturulmuş ve tabloda (Çizelge 6.7 ila 6.12) altında detaylandırılmıştır. İlk elden toplanan veriler, vaka analiz verileri ve alıntılarla desteklenerek bulgular arasındaki ilişkiler, yorum, görüş ve çıkarımlar yapılarak değerlendirilmiştir. Çizelge 7.1’de ise SYDD sonuçları renk matrisinde özetlenmiştir.

Vakaların değerlendirilmesi:

Couture moda, hızlı moda veya hazır giyimin aksine, kişiselleştirilmiş giyim ürünleri alanını temsil etmektedir. Kullanıcının vücut ölçülerine özel olarak uyarlanabilir ve yüksek (el) işçiliğinin de hâkim olabileceği, tasarım özgürlüğü ve estetik sunmaktadır. Yaratıcı tasarım kararlarıyla, yoğun işçiliğin birleşimiyle, moda podyum koleksiyonları odağında geliştirilmektedir. Araştırma kapsamında, katmanlı üretimin özelleştirilmiş, couture moda alanındaki uygulama örnekleri incelenmektedir. İncelenen vakalardan bazılarının tasarım ve üretim detayları makalelerle yayınlanmıştır. Bazı uygulama örneklerine dair üretim süreçleri ve tasarım detayları tam olarak yayınlanmamıştır. Vakalara dair inceleme süreci; tasarımcıların, tasarım topluluklarının veya uygulamayı gerçekleştiren ekiplerin, uygulama merkezlerinin web sayfalarındaki açıklamaların gözden geçirilmesiyle başlamıştır. Daha sonra ilgili uygulama örneklerini içeren akademik makalelerden ve ürün görsellerinin incelenmesiyle elde edilen veriler kronolojik olarak derlenmiştir. Tablo 5.1’de eserler/ürünler görseli, isim ve yılı, tasarım ekibi, teknolojik önemi, malzeme, tasarım, yöntem bakımından özetlenmiştir. Sürdürülebilir tasarım özellikleri bakımından ise, projeler Çizelge 6.1’de çözümlenmiştir. Tasarım çözümlemesi, üç kategori (mikro malzeme düzeyi, meso bileşen-parça düzeyi, makro ürün düzeyi) altında sınıflandırılmıştır. Her bir tema, içinde farklı yapısal tasarım özelliği sunması bakımından alt-kodlara ayrılmıştır. Giyilebilir moda uygulamaları için bu çalışmada; “Katmanlı Üretim (biyomimetik) Tasarımı” alanı üç tasarım teması ve alt kodlar altında kategorize edilmiştir.

5.4.3 Önceki Çalışmalar

Ny (2009)'nin çalışmasında; “Maxwell tarafından, bir çalışmanın bilimsel yönteminin, bir araştırmacının araştırma sorularına cevap verebilecek sonuçları aramak için gerçekten yaptığı her şey olduğu söylenerek” bilimsel yöntemin tanım ve ayrımı basitleştirilmiştir. Kesin yöntem seçimi veya yöntem kombinasyonu her çalışmanın özel gereksinimlerine göre uyarlansa da, teori oluşturma, hipotez testi, karşılaştırma, sınıflandırma, vaka çalışmaları yürütme vb. dâhil olmak üzere bazı genel yöntemler bulunmaktadır (Ny, 2009). Faludi ve Agogino (2018)'nin çalışması tasarım profesyonellerinin, sürdürülebilirlik ve inovasyon odağında en değer verdiği tasarım uygulamalarını belirlemek için yürütülmüş; LCA, Biomimikri, Beşikten Beşiğe ve tasarım kılavuzlarının öne çıktığı görülürken, sürdürülebilir tasarım uygulamalarını, “insan merkezli tasarım” veya diğer geleneksel tasarım yaklaşımlarıyla birleştirilmesinin önemi vurgulanmıştır. Katmanlı üretimi değerlendirmek için ise, “LCA” ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarındaki çevresel etkilerin analizini değerlendirmede kullanılan en yaygın araç olmuştur. Katmanlı üretimin sosyo-ekolojik sürdürülebilirlik etkilerini belirlemede ise, SYDD yöntemi stratejik bir yaklaşım olarak tercih edilmiştir.

Li (2015) çalışmasında, 3B baskı moda üretim yöntemi ile geleneksel giyim üretim yöntemini (su ve enerji tüketimi için senaryolar üzerinden), Meta-LCI (meta-yaşam döngüsü envanteri) ile karşılaştırarak, gelecekteki giysilerin tasarımı, üretimi, kullanımı ve elden çıkarılmasını iyileştirmek için çevresel sürdürülebilirlik parametrelerini araştırmıştır. Hazır giyimin su ve enerji tüketimi en yoğun ürünlerinden biri olan pamuklu bir tişört ile 3B baskılı polyester selüloz tişörtün enerji kullanımının neredeyse eşit yoğunlukta olduğu görülmüştür. Pamuklu bir tişörtün (hammadde üretimi nedeniyle) su yoğunluğu ise 3B baskılı tişörtün su gereksinimlerinden çok daha fazla bulunmuştur. SLS yöntemi, baskı başına en fazla enerji tüketen 3B baskı yöntemi, FGF yöntemi, baskı başına en az enerji tüketen 3B baskı yöntemi olarak bulunmuştur (Li, 2015). Ancak FGF yönteminin uygun standartları sağlamadığı için firmanın birkaç yıl önce faaliyetini sonlandırdığı belirtilmelidir. Faludi ve diğ. (2015)'nin çalışması, prototipleme için katmanlı üretim ve CNC işlemenin LCA karşılaştırmasını sunmaktadır. ABS'den yapılmış iki parçanın üretimi üç farklı teknoloji (CNC ve iki katmanlı üretim) kullanarak karşılaştırılmıştır. Katmanlı üretim süreçlerinde, elektrik tüketiminin çevresel etkilerde her zaman ana

itici güç olduğu, prototipleme faaliyetlerinin çevresel etkilerinin, her iki teknoloji için daha yüksek kullanım oranlarında azaldığı görülmüştür. FDM yönteminin iş başına (hem yüksek hem de düşük kullanım için) en düşük çevresel etkiye sahip olduğunu belirlenmiştir. Baumer ve diğ. (2017)'nin çalışmasında, katmanlı üretimin çevresel etkisi, LCA araştırmasında meydana gelen etki boyutları bakımından belirlenmiş, katmanlı üretimin sürdürülebilirlikle ilgili en önemli yanının fonksiyonel ve verimli ürünler yaratma fırsatında olduğu görülmüştür. Kellens ve diğ. (2017)'nin çalışmalarında, katmanlı üretim süreçlerinin bir kısmının çevresel performans açısından belgelendiği, çoğu yaşam döngüsü envanter (LCI) çalışmasının ise enerji tüketimine odaklandığı görülmüştür. Çevresel açıdan katmanlı üretim tabanlı yeniden tasarımların, ürün kullanım aşamasında önemli işlevsel avantajlar (örneğin, hafif parça tasarımları ve parça yeniden üretimi) sunabileceği belirtilmiştir. LCI verilerine dayanarak, katmanlı üretimin çevresel etkisini ve üretilen ürünlerin çevresel ayak izini tahmin etmek için (parametrik) katmanlı üretim süreç modelleri geliştirilmiştir. Bu modellere dayalı olarak potansiyel iyileştirme önlemleri: uygun süreç ve baskı makinası seçimi, optimize edilmiş baskı tasarımı ve optimize edilmiş süreç parametreleri olarak kategorilenerek potansiyel çevresel iyileştirme önlemlerine bakış sağlanmıştır.

Ford ve Despeisse (2016)'nin çalışması ise, katmanlı üretimin sürdürülebilirlik etkilerine ilişkin içgörüler sağlamak olmuştur. Ürün ve süreç yeniden tasarımı, malzeme girdi işlemede iyileştirmeler, siparişe göre bileşen ve ürün imalatı ve döngünün kapatılması yoluyla ürün ve malzeme yaşam döngüleri boyunca faydaların var olduğu ancak faydaların yaşam döngüsünün her aşaması için önemli zorlukları olduğu bulunmuştur.

SYDD, Rohm ve Haas gibi özel kimyasallar şirketlerinden Nike gibi tüketici odaklı şirketlere kadar bir dizi kuruluşla, Natural Step'in çalışmaları aracılığıyla kullanılmış, test edilmiş ve geliştirilmiştir (Url-75). Villamil ve diğ. (2018)'nin çalışmasında ise, katmanlı üretimin sürdürülebilirlik değerlendirmesi için, Stratejik Sürdürülebilir Kalkınma Çerçevesinde yer alan, sosyo-ekolojik sürdürülebilirlik ilkelerinin, yaşam döngüsü aşamalarıyla ilişkili kullanılması önerilmiştir. Dolayısıyla, bir teknolojiyi sürdürülebilirlik perspektifinden erken geliştirme aşamasında stratejik olarak değerlendirmek için bir araç olarak "SYDD" bu modelde uygulanarak, seçilmiş bazı (metal) katmanlı üretim teknolojilerine yönelik sürdürülebilirlik zorlukları, fırsatları

ve iyileştirmeler tanımlanmıştır. İncelenen katmanlı üretim teknolojilerinin her biri için belirli konuların vurgulanması ve ortak konuların özetlenmesi için kullanılan şablon örneği Çizelge 5.1’de görülmektedir. Şablonların tamamlayıcısı olarak her bir katmanlı üretim teknolojisi için ayrıntılı bilgi toplamak üzere sürdürülebilirlik ilkelerine ilişkin belirli sorular kullanılmıştır. Literatür verileriyle desteklenen sorularla, seçilen katmanlı üretim teknolojilerinin en önemli sürdürülebilirlik fırsatları ve zorluklarını belirlemek için SYDD’nın uyarlanmış bir versiyonu (SLCA 2.0) yürütülmüştür.

Çizelge 5.1 : Rehberli soru örnekleri (SLCA 2.0) şablonu, (Villamil ve diğ, 2018).

		Ekolojik boyut	Sosyal boyut	Ekonomik boyut
Yaşam döngüsü	Rehberli sorular	Rehberli sorular	Rehberli sorular	Rehberli sorular
Hammadde çıkarma	Mevcut sürecin hangi sürdürülebilirlik zorlukları ve/veya güçlü yönleri var?	Metal alaşımları, kimyasallar, gübre kullanımı ve/veya temiz su kullanımına bağlı olarak kullanılan herhangi bir malzeme veya faaliyet var mı?	Yaşam döngüsü evrelerinin herhangi birinde kullanılan çakışan mineraller/metaller ve/veya tehlikeli kimyasallar var mı?	Değer zincirinde yeterince gelişmiş işbirlikleri var mı?
Üretim				
İşlem sonrası				
Kullanım bakımı				
Yükseltme, kullanım ömrü				

Machado ve diğ. (2019)’nin çalışmasında, katmanlı üretim için sürdürülebilirlik etkileri dört aşamalı yaklaşım ile değerlendirmiştir. Sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle bağlantılı 8 fayda boyutu, üçlü alt çizgi ve bunların arasındaki ilişkiler ile katmanlı üretim ilişkisini gösteren bir şekil geliştirilmiştir. Değerlendirilen vakalara, katmanlı üretim uygulama başarısını destekleyici olması bakımından önem verilmiştir. Vakalar ve ilgili katmanlı üretim yöntemlerinin, LCA boyunca sürdürülebilirlik etkilerine dair sonuçlar “katmanlı üretimin sürdürülebilir bir üretim süreci” olarak kabul edilebileceğini göstermiştir. Tasarım profesyonelleri tarafından, katmanlı üretimin sürdürülebilirlik etkilerini dikkate almak için geliştirilen kontrol listesi ve ikili cevaplar sunan sorular, vaka analiz sürecinde kullanılmıştır. Kravchenko ve diğ. (2020)’nin çalışmalarında, katmanlı üretimin erken tasarımında dikkate alınması gereken “döngüsel ekonomi stratejilerinin” temel sürdürülebilirlik yönlerine ilişkin vaka bazında analiz yapılması önerilmiş, “sürdürülebilirlik göstergeleri veri tabanı” kullanımının, sistematik bir yol sağlayabileceği çıkarımı yapılmıştır.

Faludi ve diğ. (2020)'ne göre, sürdürülebilir tasarım ürün, sistem ve faaliyetlerin yaşam döngüsü etkilerinden kaynaklanan ekolojik ve sosyal refahı optimize etmek için işlevselleştirilir. Hapuwatte ve Jawahir (2021)'in çalışması kapalı-döngü sürdürülebilir ürün tasarım yöntemi yaratmak için döngüsel tasarım öğeleri ile üçlü alt çizgi, yaşam döngüsü perspektifi, 6R ve sürekli kaynak akışının dâhil olduğu toplam yaşam döngüsü yaklaşımına dayalı sürdürülebilirlik unsurları bütünleştirilmiştir. Eko-tasarım, yaşam döngüsü tasarımı, beşikten beşiğe, yaşam döngüsü perspektifi ve sürdürülebilir üretim literatürü, “ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarını” bir bütün olarak incelemeyi vurgulamaktadır (Hapuwatte ve Jawahir, 2021).

SYDD, belirli bilinen sorunlara odaklanmak yerine, The Natural Step Çerçevesine dayalı olarak tam sürdürülebilirliğe yönelik stratejik yolları ele almaktadır. SYDD, ürün düzeyinde sosyal ve ekolojik sürdürülebilirliğin kapsamına ilişkin stratejik bir bakış sunan değerlendirme aracı ve beraberindeki bir süreç olarak tanımlanabilir (Everard ve Blume, 2020).

Natural Step platformunun, döngüsel ekonomide “Stratejik Yaşam Döngüsü Değerlendirme” yaklaşımı için önerdiği modelde, değerlendirmeye yönelik iki şema “tema ve soru yapılarının şeması (5. adım) (Çizelge 5.2) ile strateji ve eylem örnekleri şeması (7. adım), (Çizelge 5.3)” şablon olarak aşağıda verilmiştir (Url-73).

Çizelge 5.2 : SLCA (Adım 5) ürün sürdürülebilirliği değerlendirme soru yapıları.

Yaşam döngüsü aşamaları:	İşlenmemiş içerikler	Üretme	Paketleme ve dağıtım	Kullanım	Ömrün sonu
Sürdürülebilirlik İlkesi 1: Ürün yaşam döngüsü, yerkabuğundan maddelerin oluşmasına katkıda bulunur mu? (örneğin metaller, mineraller, fosil yakıtlar, vb.)					
Sürdürülebilirlik İlkesi 2: Ürün yaşam döngüsü, toplum tarafından üretilen maddelerin birikmesine katkıda bulunur mu? (örneğin kalıcı kimyasallar, doğanın kaldıramayacağı hacimlerde üretilen doğal bileşikler vb.)					
Sürdürülebilirlik İlkesi 3: Ürün yaşam döngüsü, doğanın fiziksel bozulmasına katkıda bulunur mu? (örneğin aşırı avlanma, arazi tahribatı, erozyon vb.)					
Sürdürülebilirlik İlkesi 4: Ürün yaşam döngüsü, insanların ihtiyaçlarını karşılama kapasitelerini zayıflatan koşullara katkıda bulunuyor mu? (ör. güvenli olmayan çalışma ortamları, sağlık sorunları, finansal istikrar, özgürlük vb.)					

Çizelge 5.3 : Belirlenen zorluklara yönelik çözümler (Adım 7) için beyin fırtınası yapılırken ortaya çıkabilecek strateji ve eylem örneklerine yönelik çizelge.

Sürdürülebilirlik İlkesi ile bağlantılı tespit edilen zorlukların üstesinden nasıl gelebiliriz...?	İşlenmemiş içerikler	Üretme	Paketleme ve dağıtım	Kullanım	Ömrün sonu
1 (yer kabuğundan elde edilen malzemeler)	...ham hammadde olarak geri dönüştürülmüş veya geri kazanılmış malzemeleri kullanmak, yerden petrol çıkarma ihtiyacını azaltmak	...ürün üretimiyle bağlantılı genel karbon emisyonlarında azalma.	...sürdürülebilir kaynaklı biyolojik bazlı ambalaj alternatiflerine geçiyoruz.	...uygulamada daha az fosil yakıt kaynaklı enerji kullanılmasını sağlayan bir ürün, örneğin daha kısa saç kurutma makinesi süresi	...ürünlerin kolayca sökülmesi, bileşenlerin yeniden kullanılmasını ve geri dönüştürülmesini sağlayan bir ürün tasarımı.
2 (toplum tarafından üretilen maddeler)	...organik içerik tedariki.	...üretim süreçlerinde yeşil kimya kavramlarının kullanımı.	...doğada çözünebilir ambalaj	...bakım ve temizlik kimyasallarına olan ihtiyacı ortadan kaldıran bir çözüm geliştirmek.	...ömrünün sonunda ürünün biyolojik olarak parçalanabilir olmasını sağlamak için malzeme seçimi
3 (doğanın fiziksel bozulması)	...biyoçeşitliliği korumak veya aşırı çıkarmaktan kaçınan kaynak sağlama girişimleri.	...üretim süreçlerinde ihtiyaç duyulan su miktarında azalma.	...genel ambalajda bir azalma ve dolayısıyla toplam kaynak tüketiminde bir azalma.	...sarf malzemeleri ihtiyacını ortadan kaldıran bir ICT çözümüne geçiş (kağıt biçiminde)	...hiçbir ürün veya ambalajın çöp sahasına gitmemesini sağlamak.
4 (insan ihtiyaçlarını karşılamanın önündeki engeller)	...adil ve topluluk ticareti girişimleri ve geleneksel geçim kaynakları için destek.	...çalışanlar için sağlık ve güvenlik risklerinin azaltılmasını sağlayan bir gelişme.	...çok daha sessiz ve dolayısıyla yerel mahalleler için daha az etkili olan güvenli paketleme ve dağıtım.	...kullanımı daha güvenli olan veya sağlık sorunlarını gideren belirli bir ürün uygulaması (alerjenik olmayan vb.)	...iş yaratan ve çalışma süresini uzatan yerleşik bir bakım hizmeti ürününün ömrü.

Everard ve Blume (2020)'un çalışmalarında kullandıkları, SYDD süreci “Hammaddeler” aşamasının örnek analiz soruları (ilk hücreye yönelik yedi adet soru) aşağıdaki gibidir:

Tablo 5.2 : SYDD için Everard ve Blume (2020)'un önerdiği soruların tablosu.

Etki Soruları	İlerleme Soruları
- S1. Hammaddeler doğada birikme riski olan metal, mineral ve hidrokarbonlardan arındırılmış mı? - S2.Hammaddeler, yerkabuğundan doğada birikebilecek maddelerin salınımını önleyecek şekilde mi temin ediliyor? (yani bakır çıkarma, doğal kaynakların ve/veya geri dönüştürülmüş veya yeniden kullanılmış malzemelerin temini vb. sırasında)? - S3.Tüm hammaddeler yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak çıkarılıyor, işleniyor ve taşınıyor mu?	- S4.Doğada birikme riski taşıyan metal, mineral ve hidrokarbonların kullanımını aşamalı olarak sonlandırmak için (ürün geliştirme, Ar-Ge, biyoalternatiflere geçiş vb. yoluyla) hedefler ve alınan önlemler var mı? - S5.Tedarik zincirinde kaynak verimliliğini artırmak ve sıfır atık/metal/mineral/hidrokarbon emisyonu elde etmek için alınan hedefler ve eylemler var mı? (örneğin, iyileştirilmiş süreçler, daha düşük kaynak kullanımı etkileri olan malzemelere geçiş vb.). - S6.Hammaddeler, metallerin, minerallerin ve hidrokarbonların doğada birikme riskini ele alan sorumlu bir politikaya uygun olarak mı tedarik ediliyor?

Natural Step'in on adımlı SYDD süreci, bir ürün veya süreçle ilgili temel sorunları, rakamlar yerine renk kodlu bir matrisle değerlendiren niteliksel bir analizdir. Sürdürülebilirlik zorluklarını belirledikten sonra süreç, zorlukların nasıl üstesinden gelineceği konusunda yaratıcı düşünmeye yardımcı olmaktadır (Url-75). Matristeki her bir kare, her bir yaşam döngüsü aşaması ve sürdürülebilirlik ilkesiyle ilgili etkileri değerlendiren bir dizi (yedi adet) sorudur. Örnek bir SYDD'nin olası çıktıları, Çizelge 5.4'de sunulmuştur (Sederel ve diğ, 2008).

Çizelge 5.4 : SYDD analizi için olası sonuçların renk matrisi, (Sederel ve diğ, 2008).

Yaşam Döngüsü Aşamaları	Sürdürülebilirlik İlkeleri			
	SP 1	SP 2	SP 3	SP 4
Hammadde				
Üretme				
İşlem sonrası				
Kullanım				
Ömrün sonu				

Çok Kötü	Oldukça Kötü	Kötü	Oldukça İyi	İyi	Çok İyi

Literatürde SYDD'nin, tasarımcıların ve karar vericilerin potansiyel sürdürülebilirlik sorunlarını, iş fırsatlarını veya daha fazla araştırma gerektirebilecek bilgi boşluklarını belirlemelerine olanak tanıdığı görülmüştür (Ny ve diğ, 2009). SYDD'nin ana işlevi, değerlendirme tarafından oluşturulan tavsiyeler yoluyla karar desteği sağlamaktır. Bu karar verme aracıyla, ürün geliştirme sürecinin inovasyon aşamasında, potansiyel sürdürülebilirlik sorunlarının neler olduğu belirlenebilir ve inovasyon süreci boyunca etkin bir şekilde üstesinden gelinebilir. Amaç, tasarımcılar ve karar vericiler için kaynakların, inovasyonun ve çabanın nereye hedeflenmesi gerektiğine dair kılavuz sağlayarak, sürdürülebilir gelişme potansiyeline odaklanmayı sağlamaktır (Sederel ve diğ, 2008).

Ürünlerin nasıl tasarlandığı, geliştirildiği, üretildiği, kullanıldığı, bakımının yapıldığı, kullanılan malzeme ve nasıl geri dönüştürüldüğüne ilişkin değer akışlarının anlaşılmasıyla yenilikçi çözümler ortaya çıkabilir. Mal baskın mantıktan hizmet baskın mantığa bu geçiş, hem ürünlerin sunulma biçiminde hem de tasarlanma ve geliştirilme biçimlerinde köklü bir değişikliği içermektedir (Hallstedt ve diğ, 2013).

Bu tez kapsamında, Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirme (SYDD) yöntemi kullanılmıştır. SYDD, herhangi bir ürünün sürdürülebilirlik yönlerinin hızlı, titiz ve etkili bir niteliksel değerlendirmesini sağlar. SYDD süreci, her bir yaşam döngüsü aşaması için dört sürdürülebilirlik ilkesine bağlılığı araştıran katılımcı bir süreçtir.



Şekil 5.22 : AB'nin Döngüsel ekonomi modelinde yaşam döngüsü aşamaları

Stratejik Sürdürülebilir Kalkınma Çerçevesi (SSKÇ)'nin sürdürülebilirlik ilkelerinin; üçü ekolojik, beşi sosyal yönleri ele almaktadır (Broman ve Robert, 2017; Sederel ve diğ., 2008; Url-77) ve detayları (Tablo 5.3)'de verilmiştir.

Tez kapsamında SYDD analizi, Çizelge 5.5'de, geliştirilen sorular eşliğinde yürütülmüştür. Bilgilerin özetlenmesi için [yaşam döngüsü perspektifi ile sürdürülebilirlik (sosyo-ekolojik) ilkeleri odağında] geliştirilen SYDD analiz şablonu, sürdürülebilirlik unsurlarını bütünleştirmede aracı olmuştur.

Çizelge 5.5 : Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirme (SYDD) yönteminde rehberlik edecek analiz soruları çizelgesi.

SLCA	Sürdürülebilirlik Prensipleri ‘Ekolojik ve Sosyal’			
	1 (yer kabuğundan elde edilen malzemeler)	2 (toplum tarafından üretilen maddeler)	3 (doğanın fiziksel bozulması)	4 (insan ihtiyaçlarını karşılamanın önündeki engeller)
Yaşam Döngüsü	Rehberli Sorular			
Ham Malzeme	Yerel kaynaklı malzemelerin kullanımı? İşlenmemiş malzemeler yerine geri dönüştürülmüş veya yenilenebilir malzemeler kullanılıyor mu? Ürün geri dönüştürülebilir malzemelerden mi yapılmış? Birkaç farklı malzemedен mi oluşuyor (örneğin sadece bir tür plastik)?	Toksik veya tehlikeli maddelerden kaçınılıyor mu? Ürünün bakımı kolay mı? Ürünün yeniden kullanım için tasarımı potansiyeli?	Ürün hafif yapılı mı? Büyük çevresel yüke sahip malzemelerden kaçınılıyor mu? (alüminyum, beton, değerli metaller, ...iklim değişikliği ile ilişkili)	Değer zincirinde yeterince gelişmiş işbirlikleri var mı?
Tasarım	Tasarım sırasında üretimde enerji verimliliği? Ürünün ana işlevleri iyi tanımlanmış ve sağlanmış mı? Bileşenler çıkarılabilir şekilde tasarlanarak, monte ediliyor mu (mono malzeme demontajı)?	Ürünün bakımı kolay mı? Ürünün yeniden kullanım için tasarımı potansiyeli?	Ürün, amaçlanan kullanıma dayanacak kadar sağlam tasarlandı mı (malzeme seçimi, yapı, aşınma, yıpranma,...) mi?	Tasarım, olumlu davranış değişikliğini veya ürün bağlılığını teşvik ediyor mu?
Üretim	Mevcut sürecin hangi sürdürülebilirlik zorlukları ve/veya güçlü yönleri var? Üretim sırasında israftan kaçınılıyor mu? Üretim, enerji açısından verimli bir şekilde optimize edilmiş mi?	Üretim atığı yaratıldı mı?	Yardımcı maddeler ve operasyonel malzeme kullanımı optimize edildi mi, hatta kaçınıldı mı (su, hava, yağ,...)?	...çalışanlar için sağlık ve güvenlik risklerinin azaltılmasını sağlayan bir önlemler var mı? Atık ve yan ürünler (ayrıca atık su veya kayıp ısı) yakındaki diğer şirketler için bir kaynak olarak kullanılıyor mu (endüstriyel simbiyoz)?
İşlem Sonrası Dağıtım	Lojistik organize iklim nötr mü?	Lojistik genelinde (malzeme çıkarma arasında, tedarik zinciri içinde ve dağıtım boyunca) uzun mesafelerden kaçınılıyor mu?	Ambalaj malzemesi çevre dostu mu, azaltılıyor mu, hatta kaçınılıyor mu?	Yaşamın sonu için bir tersine lojistik uygulanıyor mu?
Kullanım	Ürün enerji tüketimini azaltmaya mı çalışıyor? Onarım, yenileme ve yeniden kullanım için parçaları veya modüllere tahrip edilemez ve geri döndürülebilir bir şekilde erişmek mümkün müdür?	Kullanım aşamasında minimum atık üretiliyor mu?	Ürün daha çevre dostu (ör. 3. taraf) sarf malzemelerine izin veriyor mu?	...kullanımı daha güvenli olan veya sağlık sorunlarını gideren belirli bir ürün uygulaması (alerjenik olmayan vb.) Hızlı aşınma ve yıpranma önlenebilir mi veya aşınmış parçalar değiştirilebilir mi?
Toplama Geri Dönüşüm Atık	Ürünün imha yöntemi (yeniden kullanım, geri dönüşüm için) belirlenmiş mi? Geri dönüşüm süreçleri oluşturulmuş mu?	Toksik maddeler ayrı olarak bertaraf edilebilir mi?	Ürün farklı bir amaç için tekrar kullanılabilir mi?	Güvenli bir imha mümkün mü?

Natural Step çerçevesi sürdürülebilirlik prensipleri (SP'ler), aşağıda sunulmuştur: (Everard ve Blume, 2020).

Tablo 5.3 : Natural Step (SSKÇ)'nin sürdürülebilirlik prensipleri (SP) tablosu.

Sürdürülebilir bir toplumda doğa, sistematik olarak artan... • [Açıklama: Halihazırda bilinen ve yönetilen etkilerin ötesinde bilinmeyen etkiler, sistematik birikim veya bozulmadan kaynaklanabilir] ○ SP 1. ...yerkabuğundan çıkarılan maddelerin konsantrasyonları, • [Açıklama: İnsan faaliyetleri, litosferde jeolojik zaman içinde tutulan maddeleri ekosistemlere salabilir] Kıt metaller, mineraller ve fosil karbonlar, doğal yeniden asimilasyonu aşan bir oranda doğaya salınmamalı ve kıt maden malzemelerinin kontrollü döngülerinde aşamalı olarak sonlandırılmamalı veya yeniden ele geçirilmemelidir ve Hammadde kaynakları (enerji dahil) yenilenebilir olmalı veya kaynaklar fosil karbon veya diğer emisyonlardan kaçınarak tamamen geri dönüştürülmelidir. ○ SP 2. ...toplum tarafından üretilen maddelerin konsantrasyonları, • [Açıklama: Toplum tarafından üretilen ve doğaya yeni olan veya ekosistemlere yabancı biçimlere dönüştürülen maddeler, doğal bozulma ve yeniden asimilasyon oranlarının ötesine geçmemelidir] Eklemeli üretim için kullanılan hammaddeler, kontrollü döngü sistemlerinde yönetilmedikçe veya geri dönüştürülebilir eşyalara dahil edilmedikçe tamamen bozunabilir olmalıdır, Geçiş yapabilen ek bileşenler, kontrollü döngü sistemlerinde yönetilmedikçe tamamen bozunabilir olmalıdır, Ürün yaşam döngüleri boyunca, katkı sistemlerinin üretiminden/kullanımından kaynaklanan emisyonlar veya deşarjlar, bir kaynak koruma önlemi olarak en aza indirilmelidir, ancak kaçınılmaz olduğunda, tamamen bozunabilir maddeler içermelidir ve Kontrollü döngü sistemleri ve geri dönüşüm süreçleri, kirlilikten kaçınılmalı ve en yüksek kaynak potansiyelini korumak için optimize edilmelidir. ○ SP 3. ...fiziksel yollarla bozulma, • [Açıklama: Ekosistemlerin canlı veya cansız unsurları ve süreçleri (su, toprak ve ekosistem bozulması dahil diğer kaynak kullanımı) yenilenebilir sınırların ötesinde kullanıldığında fiziksel bozulma meydana gelir.] Katkı maddelerinin üretimi için kullanılan hammaddelerin temini, iyi yönetilen ekosistemlerden gelmeli ve kullanım ömrü sona ermiş olan kullanılmış malzemeler, ekosistemleri fiziksel olarak bozmamalıdır. ○ SP 4. Ve bu sürdürülebilir toplumda... • [Açıklama: Sağlık ve güvenlik, temel haklar, beceriler ve bilgi dahil olmak üzere insanların ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerini baltalayan eylemler veya politikalar; eşitlik (kaynak verimliliği/tükenmesi)] Ürünler, katkı maddeleri de dahil olmak üzere, insan veya çevre sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açmamalıdır, Katkı maddeleri sorumlu ve etik uygulamalar çerçevesinde üretilmeli ve yönetilmelidir, Katkı maddeleri, çeşitli insan ihtiyaçlarını destekleyen işlevsellik sağlamak için güvenilir, teknik performans sağlar ve Katkı maddeleri, mekanik ve hammadde geri dönüşümü yoluyla kaynakların verimli yönetimi kapasitesini aşağıdaki yollarla kısıtlamamalıdır: - geri dönüşümün nitelik ve niceliğinde azalma veya - ürünlerin çoklu kullanım ömrü sonu ve post-endüstriyel ürünlerden geri dönüşüm akışlarında karışmasını önleme (uyumluluk).
--

6. ARAŞTIRMA SORULARININ TARTIŞILMASI

Katmanlı üretim, yapıların doğada nasıl büyüdüğüne benzer şekilde doğanın formlarından ve büyüme modellerinden ilham alarak (Koerner, 2017), biyolojik süreçleri taklit ederek ürünleri katman katman oluşturan (Ford ve Despeisse, 2016) bir yaklaşım sergilemektedir.

"Katmanlı üretim için tasarım" kavramı, literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kavram; tasarım ve üretim arasındaki ilişkiyi, bunun tasarımcı, tasarım süreci ve tasarım uygulaması üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Katmanlı üretim için tasarım, kuralları ve araçları (pratik tasarım bilgisi, araçlar, kurallar, süreçler ve metodolojiler) her sürece özel farklılık gösterebildiği gibi KÜ süreçlerinin benzersiz özellikleri de, tasarım süreci ve tasarım uygulamalarında farklı yaklaşımlara izin vermektedir (Thompson ve diğ, 2016). Doğada, nanodan mikro ve makro ölçeğe kadar yapısal özellikler, bir nesnenin özelliklerini ve işlevlerini tanımlamaktadır (Koerner, 2017). Biyolojik yapılardan ilham, tasarım uygulamalarında verimli yapıları kullanmamıza ve tasarım problemlerine sürdürülebilir yeni çözümler sunmaya yardımcı olabilir (Plessis ve diğ, 2019). Çağdaş tasarım yaklaşımları, işlevselliği korurken nesnelerin yapısal özelliklerini değiştirebilir.

Katmanlı üretimin, biyomimetik tasarımı istenen özellik ve işlevsellikte fiziksel nesnelere çevirebilme yeteneğiyle (Plessis ve diğ, 2019), tasarım özgürlükleri, en büyük faydalarından biri görülmektedir (Thompson ve diğ, 2016). Karmaşık yapıları ve dolayısıyla biyolojik malzemelerin özelliklerini taklit etme yeteneğiyle biyomimikri, tasarım özgürlüğü ve karmaşık üretim yetenekleri ile KÜ'de kullanıldığında özellikle gerçekçi beklentilere sahiptir. Katmanlı üretim teknolojisindeki ilerleme ve karmaşık tasarımların 3B baskı yöntemleriyle üretilebilirliğinin anlaşılmasıyla (2016'dan bu yana), biyomimetik yaklaşımlar yılda 150'den fazla makalede araştırma konusu olmaya başlamıştır (Plessis ve diğ, 2019). "Biyomimikri" kavramı çeşitli bağlamlarda kullanılmaktadır ve KÜ'de birçok farklı biyomimikri biçimi bulunmaktadır (Plessis ve diğ, 2019).

Plesis ve diğ. (2019)'nin çalışmalarında tanımladıkları “Katmanlı Üretim için Biyomimetik Tasarım” yaklaşımları iki ana kategoride değerlendirilmiştir:

- Sorun odaklı tasarım "biyolojiden tasarıma yaklaşım ve
- Çözüm odaklı tasarım "tasarımdan biyolojiye yaklaşım".

Belirtilen her bir kategori aynı üç alt temaya odaklanmaktadır:

- Simülasyon odaklı tasarım
- Hücresel ve kafes tasarımı
- Özelleştirilmiş ve serbest biçimli tasarım.

Bölüm 6.1’de, tez kapsamında ele alınan giyilebilir moda projelerinin, KÜ teknolojilerinin sağladığı tasarım fırsatı ve özgürlükleri bakımından tasarım değerlendirilmesi yapılmıştır. Kategorizasyon için, Thompson ve diğ. (2016)’nin “Katmanlı Üretim için Tasarım” yaklaşımlarında önerdiği sınıflandırmadan faydalanılarak, mikro, makro ve ürün düzeyinde olmak üzere üç ana kategori ve her birinin kendi içinde iki alt kategoride değerlendirildiği aşağıda belirtildiği gibi bir sınıflandırma yapılmıştır. Alt temalarda “Katmanlı Üretim için Biomimetik Tasarım” ilkelerine dair yapı özellikleri belirleyici olmuştur.

- Mikro seviyede malzeme tasarım ilkeleri;
 - Tek malzemeli parçalar: meso yapı, hücresel yapı, malzeme optimizasyonu,
 - Çoklu malzeme özellikleri: gelişmiş işlevsellik, özel yüzeyler, dokular,
- Makro seviyede parça/bileşen tasarım ilkeleri;
 - Serbest biçimli geometri: işlevsellik, performans, nesne optimizasyonu,
 - Özelleştirme, kişiselleştirme: renk, süsleme, estetik,
- Alan Düzeyinde ürün tasarım İlkeleri;
 - Doğrudan montaj üretimi: zincir posta bağlantı, mafsallı, menteşeli yapı,
 - Gömülü: şekil değişimi, nesneler, elektronik bileşenler.

6.1 Araştırma Sorusu 1: 3B baskı yöntemi, giyilebilir uygulamalara ne tür bir tasarım yeniliği getirmektedir?

Uygulama örneklerinin, tasarım bakımından sürdürülebilirlik fayda ve kısıtlamalarının belirlenmesi için kodlama şablonunda üç kategori ve alt temalar belirleyici olmuştur.

Çizelge 6.1 : KÜ ile üretilen giyilebilir uygulamaların tasarım analiz çizelgesi.

Katmanlı Üretim Teknolojileriyle Üretilmiş Giyilebilirlerin Tasarım Analizi									
Uygulama Literatürü				Tasarım Özellikleri					
No	Ref.	Yıl	Vaka	Mikro Düzey		Makro Düzey		Alan Düzeyi	
				Tek Malz.	Çoklu Malz.	Serbest Biçim	Özelleştirme	Doğrudan Montaj	Gömülü Nesne
1	Url-59	2003	Foc Tekstil	x				x	
2	Url-60	2010	Crystalization	x		x	x		
3	Url-8	2011	Escapism Koll.	x		x	x	x	
4	Url-9	2011	N-12 Bikini	x			x	x	
5	Url-45	2012	Strrvct Ayakkabı	x		x	x		
6	Url-24	2012	Hybrid Holism	x			x		
7	Url-46	2013	Modular Ayk.		x		x	x	
8	Url-29	2013	Anthoza		x		x		
9	Url-10	2013	Voltage-VT071 Elbise	x		x	x		
10	Url-61	2013	Dita'nın Elbisesi	x			x	x	
11	Url-12	2013	Smoke Elbise		x	x	x		x
12	Url-81	2014	Synapse Elbise		x	x	x		x
13	Url-11	2014	Bio Piracy	x		x	x		
14	Url-14	2014	Kinematik Elbise	x			x	x	
15	Url-48	2014	Zuhal Giyilebilir		x	x			x
16	Url-62	2014	DNA Ayakkabı		x		x	x	
17	Url-26	2015	Magnetic M. Elbise	x		x	x		
18	Url-27	2015	Hacking Inf. Elbise	x			x	x	
19	Url-50	2015	Mutatio Ayakkabı	x		x	x		
20	Url-51	2015	D. Peleg M. Koll.	x			x		
21	Url-33	2015	Caress of The Gaze		x		x		x
22	Url-34	2015	Synapse Kask		x		x		x
23	Url-13	2015	Spider Elbise	x			x		x
24	Url-54	2015	Rotlace		x		x		
25	Url-23	2015	4B Aktif Ayakkabı	x			x	x	x
26	Url-69	2015	Bio-Logic	x			x		x
27	Url-67	2015	New Balance	x			x		
28	Url-17	2016	Kinematik Elbise2	x			x	x	
29	Url-65	2016	Pangolin Elbise-PolyJet		x	x	x	x	
30	Url-42	2016	Harmonograph Elbise		x	x	x	x	
31	Url-66	2016	Salınım Elbise		x		x	x	
32	Url-35	2016	Vespers Seri-1		x		x		x
33	Url-36	2016	Vespers Seri-2		x		x		x
34	Url-37	2016	Vespers Seri-3		x		x		x
35	Url-70	2017	Future Craft 4B	x			x		
36	Url-21	2017	Bomber Ceket	x			x		
37	Url-55	2017	Foliage Elbise	x			x		
38	Url-19	2018	Ruth'un Kostumleri	x			x		
39	Url-58	2019	Setae Ceket		x		x	x	
40	Url-57	2019	Greta Oto Elbise		x		x	x	
41	Url-63	2019	Bedevis Nakışlı Ceket		x		x	x	
42	Url-64	2019	Gül Elbise	x			x		
43	Url-20	2020	Pangolin Elbise-SLS		x		x		x

Çizelge 6.1’de, 43 projenin tasarım çözümlemesi için kodlama süreci benimsenmiştir. Her bir proje sergilediği tasarım özelliği bakımından bir veya daha fazla kritere göre kodlanarak çözümleme süreci tamamlanmıştır. Tasarım spesifikasyonları dikkate alınarak belirlenen kodlama kriterleri, projelerin sürdürülebilirlik yönlerinin anlaşılmasında (çizelge 6.1’de) belirleyici olmuştur. Projeler, tasarım çözümlemesinin ardından, tasarım kategorileri (bölüm 6.1.1., 6.1.2. ve 6.1.3.’de) altında sürdürülebilir tasarım özellikleri bakımından değerlendirmiştir.

6.1.1. Mikro Seviyede Malzeme Tasarım Özellikleri

Katmanlı üretim, tasarımcıların yeni özellikler, formlar ve işlevsellik oluşturmak için malzemeleri; mikro ve meso yapıları “özel yüzeyler, dokular ve gözeneklilik ile” değiştirmesine ve birleştirmesine olanak tanımaktadır (Thompson ve diğ, 2016). Çoğu katmanlı üretim süreci, tek bir malzemedan parçalar üretmek üzere tasarlanmıştır. Parça kalitesinde, makine kontrolü ve yüksek hassasiyetli teknolojilerin uygulanması etkili olurken, parça performansı birden fazla malzeme sistemi kullanılarak artırılabilir. Çok malzemeli parça veya bileşen üretiminde, parçaların mekanik özellikleri optimize edilerek veya nihai parçalara ek işlevler sağlayarak iyileştirebilir.

Tek malzemeli parçalar (meso, kafes ve hücresel yapı, malzeme optimizasyonu):

Katmanlı üretim, ultra hafif ve sert yapılar, yardımcı/meso yapılar ve yardımcı yapılar için birim hücreler oluşturmak için kullanılabilir (Thompson ve diğ, 2016). Katmanlı üretim ile üretilmiş giyilebilir bazı moda projeleri (Url-21, Url-51 ve Url-78), 3B baskılı giyilebilir alanında “meso yapısal hücresel malzeme” kullanımını doğrulamaktadır. D. Peleg’in, Bastian’ın “Meso Hücresel” yapısından (URL-22) ilham alarak geliştirdiği, 3B baskılı “meso yapısal hücresel kumaş” projeleri (Şekil 6.1) bu bakımdan iyi bir kullanım örneği oluşturur.



Şekil 6.1 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, “Meso hücresel kumaş” yapılarıyla giyilebilir moda ürünleri, (Url-21, Url-51, Url-78).

Meso yapılar, çalışmalarını sağlamak için iki ana özelliğe sinklastik bükülme ve yardımcı davranışa sahiptirler. Sinklastik malzemeler, yapının kıvrım veya kırışık olmadan bir küre etrafında eğrilmesine izin veren iki yön boyunca bileşik eğrilği üstlenme konusunda iyi bir yeteneğe sahiptir. Meso hücresel yapılar 3B baskı için en ideal yapı olma özelliği göstermektedir. Meso hücresel yapıları kumaşların 3BB ile üretilmesinde, sıfır atık oluşurken, ekstra malzemeye ihtiyaç da duyulmaz.

Katmanlı üretim, belirli mekanik, termal, optik ve biyolojik özelliklere sahip üç boyutlu kafesler ve hücresel yapılar oluşturabilmektedir. Ürün geliştirmenin geleceği olarak kabul edilen “Kafesler”, yüksek kaliteli malzemelerle bir araya getirildiğinde, tasarımcıların ürünleri için gereken özellikleri her milimetrede belirlemelerine olanak tanıyarak, yeni performans ve özelleştirme olanakları sunmaktadır. Tek bir orta taban içinde değişken performans bölgeleri oluşturmak için birden fazla hücresel parçanın birleştirilmesi (Url-70), montaj yaklaşımını da ortadan kaldırmaktadır. Katmanlı üretim ile üretilmiş “Futurecraft 4D orta taban”, monolitik parça veya bileşende değişen mekanik özellikleri hareket, yastıklama, denge, konfor ihtiyaçlarını sağlamasıyla doğrudan montaj, seri üretim ve özelleştirilmiş kafesli yapılara gösterilebilecek (Şekil 6.2) en iyi örneklerden biridir.



Şekil 6.2 : “Kafesli orta taban” Futurecraft 4D kafesli orta taban içinde değişen yapı, Url-70 (sol) “Hücresel orta taban” New Balance hücresel orta taban, Url-67 (sağ).

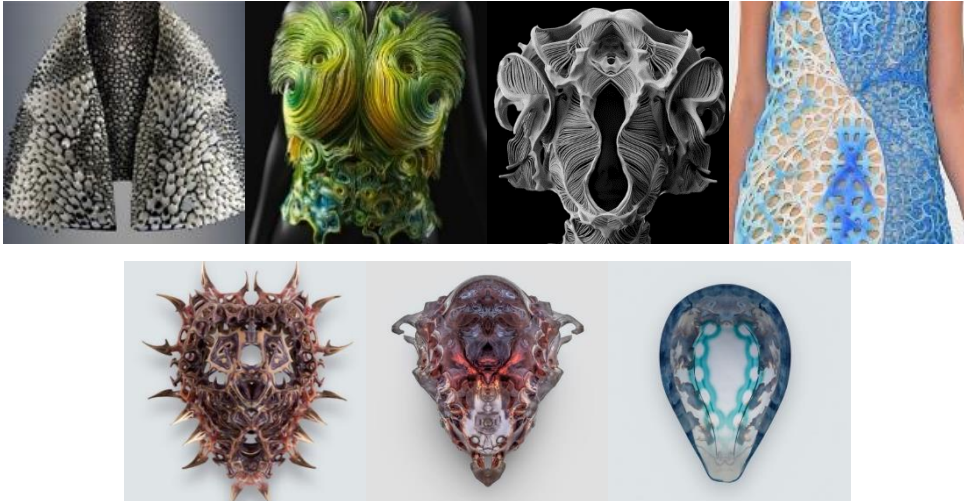
Kafesler, uyarlanabilir özelliklerin yanı sıra düşük ağırlık avantajlarına, yüksek sertliğe, kırılma tokluğuna, çatlak büyümesini durdurma gibi özelliklere sahiptirler. Biyomimetik kafes yapıları (Url-70) özel olarak rastgele bir payanda kalınlığı ve uzunluk dağılımına sahip yapılar oluşturarak stokastik tasarım stratejilerine atıfta bulunabilir. Url-67’den de görüleceği gibi hücresel malzemeler ve yapılar, bir birim hücrenin şekli ve hacim oranı seçilerek ve birim hücreye dayalı oluşturulmaktadır. Doğada çok sayıda şekil, boyut ve paketlenme düzeninde bulunan “Hücresel yapılar veya Biyo-ilhamlı kafes yapılar”, biyomimetik olarak değerlendirilmektedir. Kafesler veya hücresel yapılar topoloji optimizasyonu ile tasarımlara dâhil edilirken,

homojenleştirme ve periyodiklik konuları dikkate alınmalıdır. Periyodiklik, yapının mekanik özelliklerinin kolay tahmin edilmesini sağlayarak tasarım sürecini kolaylaştırmaktadır (Plessis ve diğ, 2019). Hücresel veya kafes yapıların katmanlı üretim ile üretilmesinin en büyük faydası, kütle azalmasını sağlarken performans hedeflerini karşılama yeteneklerinde yatmaktadır. Katmanlı üretim, giyilebilir uygulama alanında metamateryal üretimi için de kullanılabilir. Genellikle doğada bulunmayan malzeme özelliklerine sahip sıralı kompozit olarak değerlendirilen metamateryaller ile özellikleri yalnızca yapıları tarafından (Url-70) belirlenen mekanik metamateryaller katmanlı üretim ile üretilir.

Çoklu malzeme özellikleri (gelişmiş işlevsellik, özel yüzey ve doku, heterojenlik):

Katmanlı üretimde, çok malzemeli baskı teknolojilerinin en yüksek faydası tasarım özgürlüğünde yatmaktadır. Çok malzemeli baskı ile tasarımda belirli malzeme özelliklerini tanımlamak mümkün olmuştur. Çok malzemeli baskı sürecinde tasarım özgürlüğü, geleneksel üretim süreçleriyle üretilmesi mümkün olmayan tek bir parçada çeşitli şekil ve işlevsellik yaratma olanağı sağlamasıdır.

İşlevsel olarak derecelendirilmiş nesneler oluşturmak için modelin farklı bölümlerinde malzeme yüzdesi bileşimi değiştirebilir. Katmanlı üretim ile üretilmiş giyilebilir (giysi, aksesuar vd.) bazı moda projeleri (Url-29, Url-35, Url-36, Url-37, Url-48, Url-54, Url-66), 3B baskılı giyilebilir alanında çok malzemeli değişken özellikli malzeme kullanımını doğrulamaktadır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, çok malzemeli “değişken özellikli” giyilebilir moda, aksesuar ve sanatsal ürünler, (Url-29, Url-35, Url-36, Url-37, Url-48, Url-54, Url-66).

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, yapı ve yüzeyler gibi hiyerarşik yapılarda (Url-42, Url-65) doğrudan katmanlı üretim ile üretilebilir (Şekil 6.4). Gradyanlar ve çok ölçekli hiyerarşik yapılar, biyomimetik uygulamalar için de önemli olan yapılar arasındadır.



Şekil 6.4 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, “işlevsel derecelendirilmiş” yapılı, Url-42 (sol), “Ölçekli hiyerarşik” yapılı, Url-65 (sağ), giyilebilir moda ürünleri.

Çok malzemeli baskı, tasarımcıların karmaşık işlevlere ve yüksek yeteneklere sahip parçalar oluşturmaya olanak tanır. Yeni işlevsel parçalar ve üstün değer sistemleri oluşturmak için elektronik bileşenler baskı sırasında tasarıma yerleştirebilir. Çok malzemeli baskı ile üretilmiş, giyilebilir prototip Url-33 ve Url-34’de yenilikçi malzemelerin tasarımı ve entegrasyonu yoluyla yeni işlevsel ürünlerin oluşturulabildiği doğrulanmaktadır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, “interaktif giysi”,Url-33 (sol), “interaktif kask”,Url-34 (sağ).

Katmanlı üretim, çeşitli bileşenlerden oluşan bir üründe, bağlantı elemanlarını ve montaj işçiliğini ortadan kaldırarak malzeme ve bileşen maliyetini azaltabilir. Çok malzemeli katmanlı üretim, malzeme kullanımını azaltır, hafif tasarımlar elde edilebilir, minimum atık üretir, bazı işlem adımlarının azalmasıyla daha az enerji kullanır, dolayısıyla yüksek verimlilik elde edilir.

6.1.2. Makro Seviyede Parça Tasarımı Özellikleri

Katmanlı üretimin, malzeme ve geometrideki tasarım özgürlükleri makro ölçekli parçalara çeşitli estetik, işlevsellik ve ergonomik faydalar sağlayabilir. Katmanlı

Üretim, sanatçılar ve tasarımcılar tarafından, işlevselliği artırmak ve performansı iyileştirmek için karmaşık özelliklerin oluşturulmasında, 3B baskılı giyilebilir (giysi, aksesuar vd.) moda projelerinde yeni formlar yaratmak için kullanılmaktadır.

Serbest biçimli geometri (işlevsellik, performans, nesne optimizasyonu):

Katmanlı üretimin gelişmiş üretim yeteneği, tasarımcılara yüksek karmaşıklıkta parçalar tasarlama özgürlüğü sağlar. Katmanlı üretimin tasarım özgürlüğü, doğal yapıları andıran biyomimetik organik şekillere ve serbest biçimli tasarımlara izin vermektedir (Plessis ve diğ, 2019).



Şekil 6.6 : Katmanlı retim ile üretilmiş, “Serbest biçimli geometrik” yapılı giyilebilir moda rünleri (Url-60, Url-8, Url-24, Url-11, Url-10, Url-27).

Katmanlı retim, makro yapı geometrisinde optimize edilmiş nesneler üretebilir (Şekil 6.6). Makro yapı topolojisi optimizasyonu, yapının tek bir homojen malzemenin oluşturduğunu ve bu malzemenin tasarım alanının her bölümünde ya mevcut olduğunu ya da bulunmadığını varsayar. Topoloji optimizasyonu, işlevsellik (sertlik vb.) elde etmek için malzemenin belirli bir alanda nereye yerleştirilmesi gerektiğini tanımlamaktadır. Makro yapı topolojisi optimizasyonu, minimum malzeme kullanımıyla ağırlığı veya stres dağılımını optimize ederken, ürünün kullanılabilir ömrü boyunca enerji tasarrufu sağlar (Thompson ve diğ, 2016). Tüm serbest biçimli tasarımlar, kafes tasarımları veya topoloji optimizasyonu tasarımları biyolojik girdi içermese de biyomimetik olarak değerlendirilir (Plessis ve diğ, 2019).

Özelleştirme, kişiselleştirme (renk, süsleme, estetik):

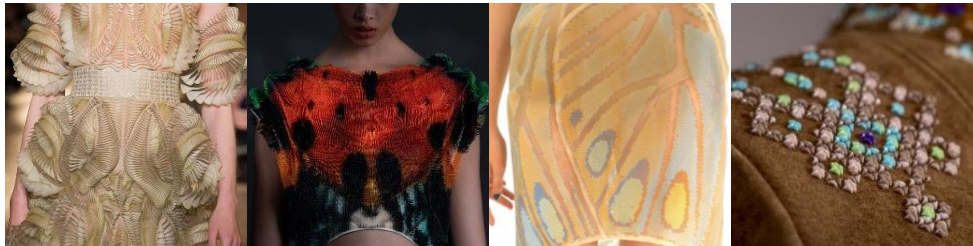
Katmanlı üretimin, üretim bakımından en yüksek faydası zelleştirme ve kişiselleştirme özgürlüğünde görülmektedir. Tibbits ve diğ. (2014)’ne göre zamanda,

malzemede veya verimsizlikte önemli artışlar olmaksızın özelleştirilmiş bileşenleri toplu üretme yeteneği, katmanlı üretimin devrim niteliğindeki avantajlarından biridir. Özelleştirme ve kişiselleştirme, daha güçlü bir kullanıcı-ürün ilişkisi oluşturmak için tasarım stratejileri olarak görülmektedir. Katmanlı üretim, bireysel ihtiyaç ve tercihlerin ürünün maliyetine önemli bir yük eklenmeden, uygun maliyetle, kişiselleştirilmiş ürün ve hizmetlere dönüştürülmesini sağlayan müşteri merkezli bir üretim paradigmasıdır. Katmanlı üretimin, bireysel tercihlerine göre kişiselleştirilebilen ve kitlesel özelleştirilmiş ürünleri üretebildiği Şekil 6.7’deki 3B ve 4B baskılı ayakkabı örnekleriyle doğrulanabilmektedir.



Şekil 6.7 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, çok malzemeli “Kişiselleştirilmiş” ayakkabı, Url-62 (sol), kafes yapılı “Seri Özelleştirilmiş” ayakkabı, Url-70 (orta), hücresel yapılı spor alanına “Özelleştirilmiş” ayakkabı, (Url-80) (sağ).

DNA ayakkabı, toplu kişiselleştirmesinin önünü açarak, malzeme, renk ve doku bakımından özelleştirilerek, kişinin biyomekanik verilerine uygun geliştirilebilen 3BB ayakkabı (Url-62) konseptidir. New Balance Sports Lab. araştırmacıları, koşucu basınç verilerini, Nervous System 4D baskı uygulaması ile geometrik olarak farklı kuvvetlere uyan hücresel yapılı bir ayakkabı (Url-80) tasarlamıştır. Sürdürülebilir üretim yaklaşımıyla ürüne özel geliştirilen CDLS teknolojisi, tasarım ve üretimde, sporcu verileri ile farklı “sporlar için özelleştirilmiş” ürün tasarımlarının önünü açmıştır. Adidas Futurecraft 4D (Url-70), kafesli biyomimetik tasarımıyla, katmanlı üretimin seri üretim ve seri özelleştirmeye en iyi örneğidir.



Şekil 6.8 : Katmanlı üretim ile üretilmiş, çok malzemeli ve çok renkli “Doğrudan tekstil üzerine 3B baskı” giyilebilir moda ürünleri (Url-55, Url-63, Url-57, Url-58).

Baskı teknolojilerinde ve malzeme alanındaki gelişmeler, katmanlı üretim ile doğrudan kumaş üzerine 3B baskının önünü açmıştır (Şekil 6.8). Doğrudan tekstil yüzeyine 3B polimer baskısı, giyilebilir uygulamalarda düğmeler, nakış gibi süslemeler, aplike gibi çeşitli dekoratif özelliklerin uygulanmasına katkıda bulunmaktadır. Bileşenlerin geometrisine, voksel seviyesinde renk ve şeffaflık geçişleri tanımlanabilmektedir. Son gelişmeler ise, tekstil ve 3B baskı malzeme kombinasyonlarını ve renk ve ışık kırılma efektlerini içeren (Url-57) giyilebilir moda projesinde olmuştur.

Çok malzemeli baskı teknolojisi aynı anda farklı özelliklere (renk, sertlik, şeffaflık vb.) sahip birden fazla malzemeyi yazdırabilir, bu aynı zamanda tek bir işlemde karmaşık, kompozit parçaların oluşturulmasına olanak tanır. Katmanlı üretimde renkli baskı, ham maddelere renk eklenerek, modelin farklı kısımları için farklı renk kullanılarak veya pigmentlerin baskı sürecinde aktivasyonu ile tek bir hammaddede renk değişikliği ile yapılabilir. 3B baskılı parçaları renkli olarak üretmek, işlem sonrası boyama ve dekorasyon adımlarını azaltabilir.

Katmanlı üretim, küçük seri ürünleri, erişilebilir ve uygun fiyatlı hale getirebilir. Medikal ortez, protez ve işitme cihazları ve gözlük, koşu ayakkabıları gibi özel tüketici ürünlerinde, kişinin verilerine göre çeşitli kişiselleştirilmiş ve ısmarlama ürünler üretmek mümkün olmuştur. Fotoğraflardan veya 3B taramalardan oluşturulan 3B büstler ve maskeler de örnek gösterilebilir.

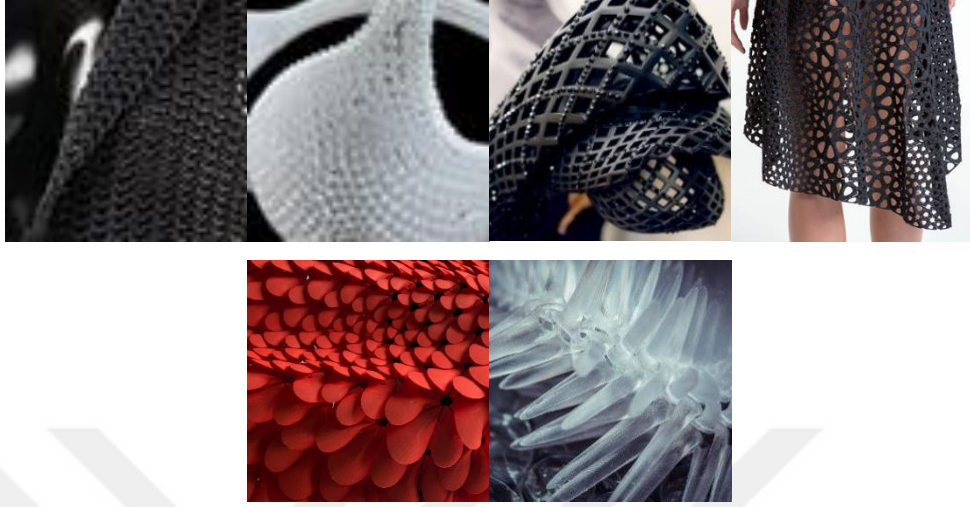
6.1.3. Alan Düzeyinde Ürün Tasarım Özellikleri

Katmanlı üretim parça yeniden yapılandırma, gömülü parçalar ve doğrudan montaj üretimi gibi ek tasarım özgürlükleri ve fırsatları sağlayabilir. Katmanlı üretim, zincir posta gibi süreksiz bağlı yapılar, mafsallar ve menteşeler gibi hareketli veya oynar parça mekanizmalarını doğrudan üretebilmektedir. Elektrikli bileşenler, iletken teller, servolar, piller ve sensörler, devreler veya mekatronik cihazlar, 3B baskı sırasında tasarıma yerinde gömülebilir.

Doğrudan montaj üretimi: zincir posta bağlantı, mafsal, menteşeli yapı:

Katmanlı üretimin, giyilebilir moda alanındaki ilk uygulamaları geleneksel giysi konforu yakalayamamıştır. Esneklik giyim ürünleri için önemli bir kriter olduğundan, bu zorluğun üstesinden gelmek için çeşitli yaklaşımlarda örgü benzeri geometri ve zincir-posta benzeri yapılar geliştirilmiştir. Zincir-posta bağlantılı yapılar sert bir

malzemeyeyle üretilecek giysiler için en belirgin yapı seçimi olmuştur. Zincir-posta bağlantılı FoC tekstil kumaşları (Url-59), örgü tekstil yapılarını taklit eden ilk 3B baskılı tekstil yapılarıdır.



Şekil 6.9 : Katmanlı üretimin “Zincir-posta”, “Yaylı geçme”, “Mafsal”, “Menteşe” yapıları giyilebilir moda projeleri, (Url-59, Url-9, Url-61, Url-14, Url-17, Url-27).

Katmanlı üretimin “Zincir-posta bağlantılı yapıları (Url-59), tekstillerin örgü yapısını taklit eden basit bir geometrinin belli bir hiyerarşiyle kullanılması sonucu geliştirilmiştir. Yeterli döküm, drape ve örtü özelliklerinin elde edildiği dikişsiz elbise üretimini mümkün kılmıştır. Katmanlı üretim, bir montajın parçalarını tek bir yazdırılabilir nesnede doğrudan baskı yatağında birleştirebilir. Katmanlı üretim, yaylı mekanizmaları (Url9), dişliler, mafsallar (Url-61), menteşeler (Url-14 ve Url-17) gibi hareketli veya hareketli parçalar içeren (Url-27) tasarımları doğrudan baskı yatağında üretebilir. Katmanlı üretim, daha az parça ve daha az farklı malzeme içeren daha basit montajların yanı sıra şekil ve geometride daha fazla özgürlük sayesinde daha karmaşık ve optimize edilmiş bileşenlerin tasarlanmasını sağlar. Serbest biçimli ve hafif yapılar genellikle biyomimikri kavramlarından yararlanarak doğadan ilham alır, montaj adımını ortadan kaldırarak, envanter maliyetlerini azaltan bu üretim şekli, işlevselliği artırarak, performansı iyileştirebilir.

Gömülü nesneler, elektronik bileşenler (hibrit yapılar):

Katmanlı üretimdeki gelişmelerle herhangi bir geleneksel üretim süreciyle üretilmesi mümkün olmayan, tek bir parçada çeşitli şekil ve işlevleri yaratma olanağıyla, elektrikli bileşenler, iletken teller, motorlar, piller ve sensörler ve mekatronik cihazları doğrudan tasarıma yerinde gömülebilir (Şekil 6.10).



Şekil 6.10 : Katmanlı üretim ile üretilmiş: “Gömülü nesne” hibrit yapılı interaktif moda projeleri, (Url-12, Url-81, Url-13, Url-20).

Akıllı giyim, katmanlı üretimde yeni bir alandır ve tekstil sensörleri veya bileşenlerin entegrasyonu gibi diğer tematik konuları ele alır. 4B baskı, harici cihazlara ve elektromekanik sistemlere ihtiyaç duymadan doğrudan bir malzemeye gömülü çalıştırma, algılama ve programlanabilirlik sunmaktadır (Url-23). 4B baskı, ürün veya sistemdeki bileşen sayısını en aza indirir, motorların, sensörlerin ve elektroniklerin montaj süresini kısaltır, maliyeti azaltır, elektronik ve robotikte arıza ihtimalini azaltır.



Şekil 6.11 : 4B baskılı “Kendinden montaj ve Gömülü şekil değişimi” Aktif ayakkabı, (Url-23) (sol), Bio-baskılı “Gömülü şekil değişimi” Aktif giyim, (Url-69) (sağ).

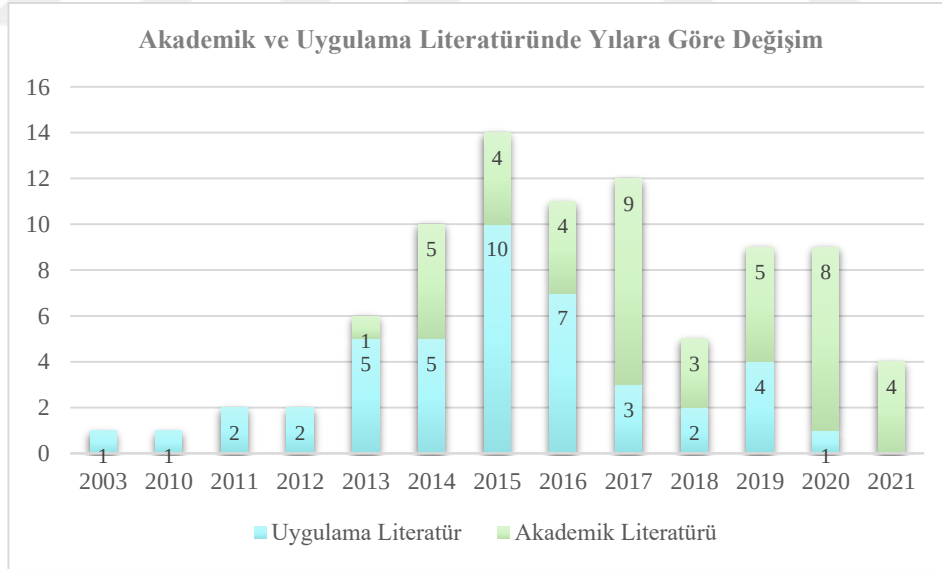
Katmanlı üretim, dinamik malzeme hesaplaması ile bir veya birden fazla uyarana (enerji kaynağı), anizotropik (yöne bağlı) bir şekilde yanıt veren bileşenler ile hibrid materyal (Url-69) oluşturulabilir. Yao (2014)’ya göre, malzeme hesaplaması, fiziksel dünyamızı programlamak ve tasarlamak için “şekil değişimi” çıktısının ötesinde çok güçlü bir kavramdır.

Katmanlı üretim, hibrit üretim süreçleri, iyileştirilmiş yüzey kalitesi, kısalan üretim süresi gibi bir dizi avantaj sunar (Khosravani ve Rinicke, 2020). Katmanlı üretim, serbest karmaşıklık, toplu özelleştirme ve bileşenlerde gücü en üst düzeye çıkarırken ağırlığı/hacimi en aza indirir (Tibbitts ve diğ., 2014). Malzeme ve enerji verimliliği, sağlanabilir (Fonseca ve Simoes, 2019). Ürünlerin performansının iyileştirilmesi, malzeme akışlarının ölçeğini azaltabilir ve tüm tedarik zinciri üzerindeki çevresel etkide bir azalmaya yol açabilir (Ford ve Despeisse, 2016).

6.2 Araştırma Sorusu 2: Katmanlı üretim, çok malzemeli, çok işlevli, özelleştirilmiş parçalar üretebilmesi bakımından, sürdürülebilir bir üretim yöntemi midir?

Araştırma konusuyla ilgili hakemli çalışmaların bulgularını belirlemek ve değerlendirmek için sistematik bir literatür taraması yapılmıştır. Akademik literatürde, katmanlı üretimin (belirli teknolojilerde) önemli sürdürülebilirlik yölerini belirlemek için öncelikle makalelerin katmanlı üretim bağlamında, sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi önermesi yapıyor olması aranmıştır. Belirtildiği gibi, uygunluk kriterleri bakımından yeterli veriye sahip olmayan proje ve yayınlar kapsam dışı bırakılmıştır. Dolayısıyla bu, başka yayınların veya projelerin de bulunabileceği anlamına gelmektedir. Araştırma sorusu 2'nin değerlendirmesi; akademik literatürden belirlenen 43 makale (2010-2021 yılları arası) ve uygulama literatürden belirlenen 43 giyilebilir moda projesine odaklı yapılmıştır. Çizelge 6.2, akademik ve uygulama literatüründeki (2010-2021) yıllara göre çalışma dağılımını sunmaktadır.

Çizelge 6.2 : Akademik ve uygulama literatürü yıllara göre çalışma dağılımı çizelgesi.

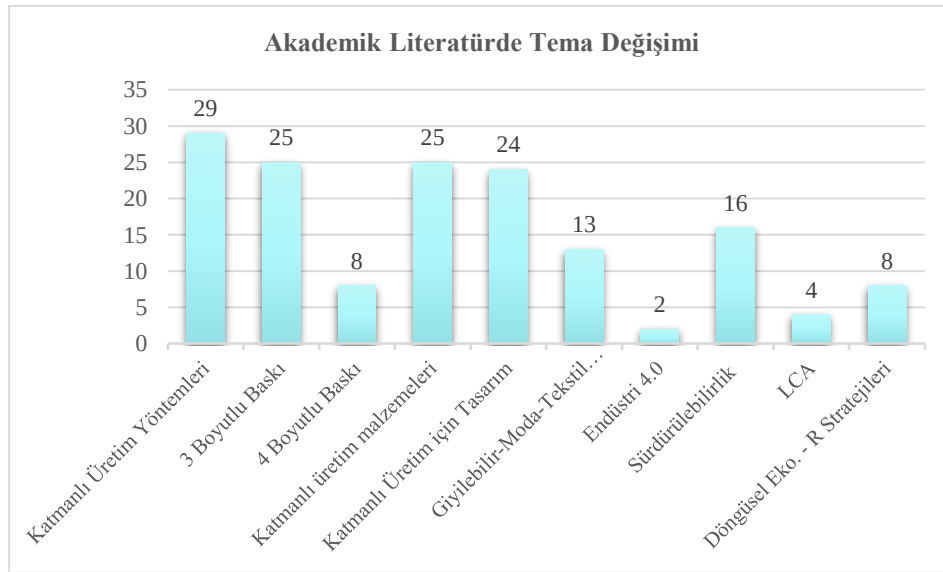


Belirlenen 43 yayın ve 43 vaka çalışmasının kapsamlı analiziyle, katmanlı üretim teknolojileri, uygulama alanları ve malzemelerde yaşanan gelişmeler belirlenmiştir. Küçük farka rağmen her iki alanda da ilgi artışı dikkat çekmektedir. Alana yönelik bilimsel yayınların ilk 2013 yılında gözlemlendiği, takip eden yıllarda artış göstererek araştırmaların devam ettiği görülmüştür. Özellikle, yayınlarda 2017'de sıçrama

yaşandığı görülebilmektedir. Uygulama literatürünün ise 2013 yılında üç kata yakın artışla hızlandığı, 2015 yılında en yüksek sayıya ulaştığı 2020’lerde ise yükseliş seyrine benzer şekilde çalışmalarında azalma yaşandığı verilerden izlenebilmektedir.

Çizelge 6.3’de yayınların konu kategorileri “katmanlı üretim yöntemleri, malzeme ve sürdürülebilir tasarım üç ana tema altında; Katmanlı üretim yöntemleri, 3B baskı, 4B baskı, katmanlı üretim malzemeleri, katmanlı üretim için tasarım, deneysel uygulamalar, E4.0, sürdürülebilirlik, LCA, döngüsel ekonomi ve R stratejileri” olarak sınıflandırılmıştır.

Çizelge 6.3 : Akademik literatürde temaların dağılım çizelgesi.



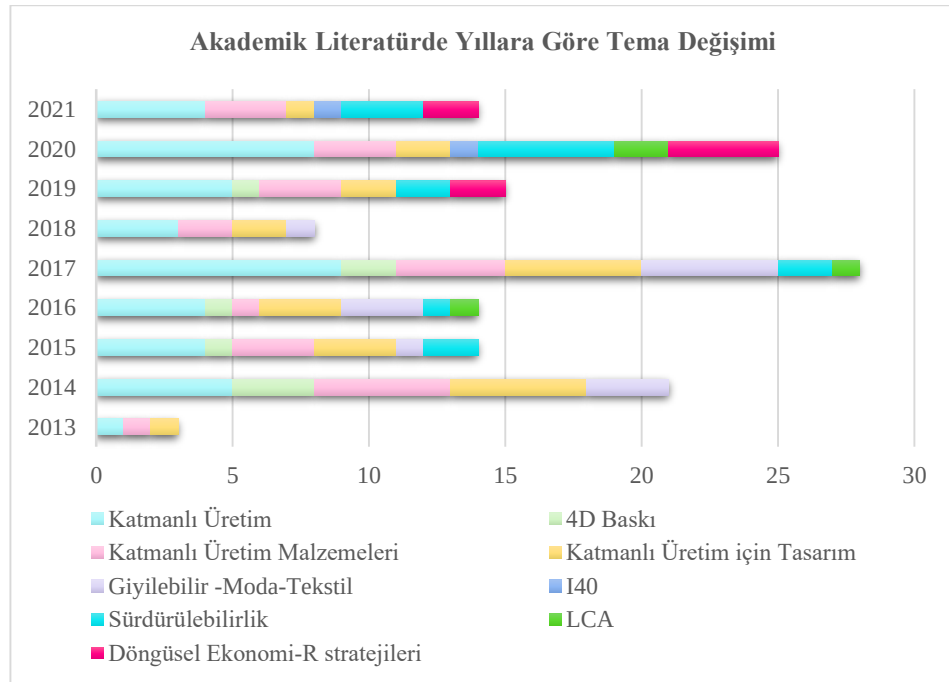
Sınıflandırma makalelerin anahtar kelimelerine göre ve özetleri incelenerek yapılmıştır. Sonraki aşamada, her yayının tam metni incelenmiş, birden fazla kategoride sınıflandırılabilmesi sağlanmıştır. Scopus, science direct ve google scholar veri tabanlarından belirlenen 43 yayının çizelge 6.3’de, on tematik kategoride sınıflandırılması görülmektedir. Makalelerin; (N=29, %67,4) “katmanlı üretim yöntemleri”, (N=25, %58,1) “3B baskı yöntemleri, (N=8, %18,6) 4B baskı yöntemleri, (N=25, %58,1) “katmanlı üretim malzemeleri”, (N=24, %55,8) “katmanlı üretim için tasarım” temasında, yaklaşık üçte biri (N=13, %30,23) “giyilebilir uygulamalara dair tasarım spesifikasyonları”, (N=16, %37,2) “sürdürülebilirlik” teması, (N=4, %9,3) “LCA”, (N=8, %18,6) “döngüsel ekonomi ve R stratejileri” temalarında araştırılmıştır. En az değinilen alan (N=2, %4,6) ile “E4.0” alanı olmuştur.

Araştırma konularında temalar:

- Katmanlı üretim yöntemleri; (belirli katmanlı üretim yöntemlerine odaklanan),
- Katmanlı üretim malzemeleri; (belirli malzemelere, malzeme özelliklerine ve 3B baskıdaki gelişmelere odaklanan),
- Endüstri 4.0; (katmanlı üretim bağlamında geleneksel süreçlerin sayısallaşması, doğrudan sayısal üretim, IoT, Blockchain, sayısal ikiz konularını inceleyen),
- Giyilebilir moda uygulamaları (vaka incelemelerini, deneysel uygulama konularını ve teknik açıklamalara odaklanan),
- Sürdürülebilirlik; (katmanlı üretimin sürdürülebilirliğine, enerji, malzeme ve atık konularına odaklanan),
- LCA; (katmanlı üretimin çevresel etkilerine yönelik nicel analizlere odaklanan),
- Katmanlı üretim için tasarım; (topoloji ve nesne optimizasyonu, parça, bileşen yapılarına odaklanan),
- Döngüsel ekonomi ve R stratejileri; (malzeme akışı ve yeniden tasarım, yeniden üretim, onarım, geri dönüşüm gibi konulara odaklanan).

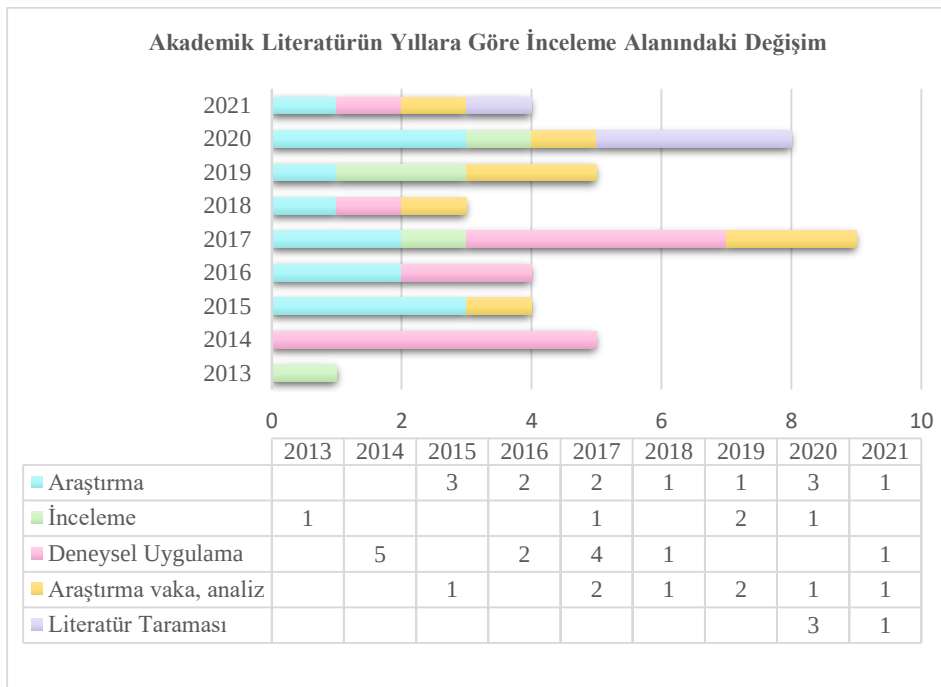
Çizelge 6.4’de, katmanlı üretimin sürdürülebilirlik ile ilgili temaları 2015’de başladığı, döngüsel ekonomi ile ilgili temaları ise 2019’da başlayıp artış göstererek ilerlediği izlenebilmektedir.

Çizelge 6.4 : Akademik literatürde çalışmaların tema değişimi çizelgesi.



Araştırma türü bakımından ise; 2014’den itibaren araştırmacıların uygulama projelerine dair teknik transkriptlere odaklandığı görülmektedir (Çizelge 6.5). Araştırma ve vaka analizine dayalı yayınların ise 2015’de başlayıp artış göstererek ilerlediği görülmektedir. 2020 ve 2021 yıllarında ise akademik bağlamdaki yayınlara sistematik literatür araştırmalarının da katılarak araştırma alanının genişlediği görülebilmektedir. Çizelge 6.5’te de görülebileceği gibi bu araştırmada değerlendirilen yayınların; 13 araştırma makalesi, 5 inceleme makalesi, 13 uygulamaya dair teknik makale, 8 araştırma ve vaka analizi, 4 sistematik literatür taramasıdır.

Çizelge 6.5 : Akademik literatürde çalışmalarda yöntem değişimi çizelgesi



Literatür taramasından elde edilen veriler son yıllarda araştırmacıların katmanlı üretimin sürdürülebilirliğine daha fazla önem verdiğini göstermektedir. Malzeme yeniden kullanımı ve geri dönüşümü gibi ekolojik etkilerin yanında, sağlık açısından sosyal etkileri de artarak incelenmekte olduğu dolayısıyla bu gelişmeler katmanlı üretimin sınırlamalarında da hızla iyileşme sağlanacağını göstermektedir. Katmanlı üretimin giyilebilir moda uygulamalarında yüksek kullanımı nedeniyle, yayınlarda polimerler en çok incelenen malzemeler arasında olmuştur (Colorado ve diğ., 2020). Ayrıca çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle de polimerler yoğun araştırmanın odağıdır.

Akademik bağlamın son yıllarda doğrusal al-yap-at modelinin aksine, döngüsel ekonomi ve ürünlerin, bileşenlerin ve malzemelerin R stratejilerine odaklanılarak ekonomik ve ekolojik değerin korunmasına daha fazla önem verildiği görülmektedir. Daha iyi geri dönüştürülebilirlik, yeniden kullanım veya döngüsellğe sahip malzemeler ve süreçlere doğru tema değişimi yaşandığı, dolayısıyla araştırmalardaki tema değişiminin katmanlı üretimin gelecekte kullanımına dair potansiyel etkileri olacağını düşündürmektedir.

Son zamanlarda, 3R'lerin (azalt, yeniden kullan ve geri dönüştür) yanında, aynı zamanda onarım, yeniden tasarım veya yeniden üretim amacını da göz önünde bulunduran, 10R'ye kadar kavramın ortaya çıktığı görülmektedir (Romani ve diğ, 2021). Akademik bağlamda giderek daha fazla sayıda vakada, döngüsel malzeme ve teknoloji araştırılmaktadır.

Bu yaklaşımların uygulanmasında ve geliştirilmesinde tasarım süreci ve tasarımcılar önemli bir rol oynamaktadır. Bu geçişi desteklemek tasarım açısından bir metodoloji oluşturmak için yeni bir dizi disiplinler arası beceri gerekliliği doğmuştur. Tasarım sürecinin ilk aşamalarında, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirlik etkilerinin entegrasyonu, tasarımcıların farkındalığı yanında ilgili beceri gerekliliği de söz konusu olmaktadır.

Gelişen süreçte bu yönlerle odaklanan yeni hibrit tasarım uygulayıcıları, yani “malzeme tasarımcıları” ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde, sayısal teknolojiler potansiyel olarak bu çerçeveye katkıda bulunmaktadır. Katmanlı üretim, diğer endüstriyel döngülerden gelen atıkları dahil ederek veya yeniden kullanarak, endüstriyel simbiyozu teşvik ederek malzeme akışlarının optimizasyonuna izin vermektedir (Romani ve diğ, 2021). Özellikle FDM teknolojisi bu çerçevede giderek daha fazla kullanılmaktadır.

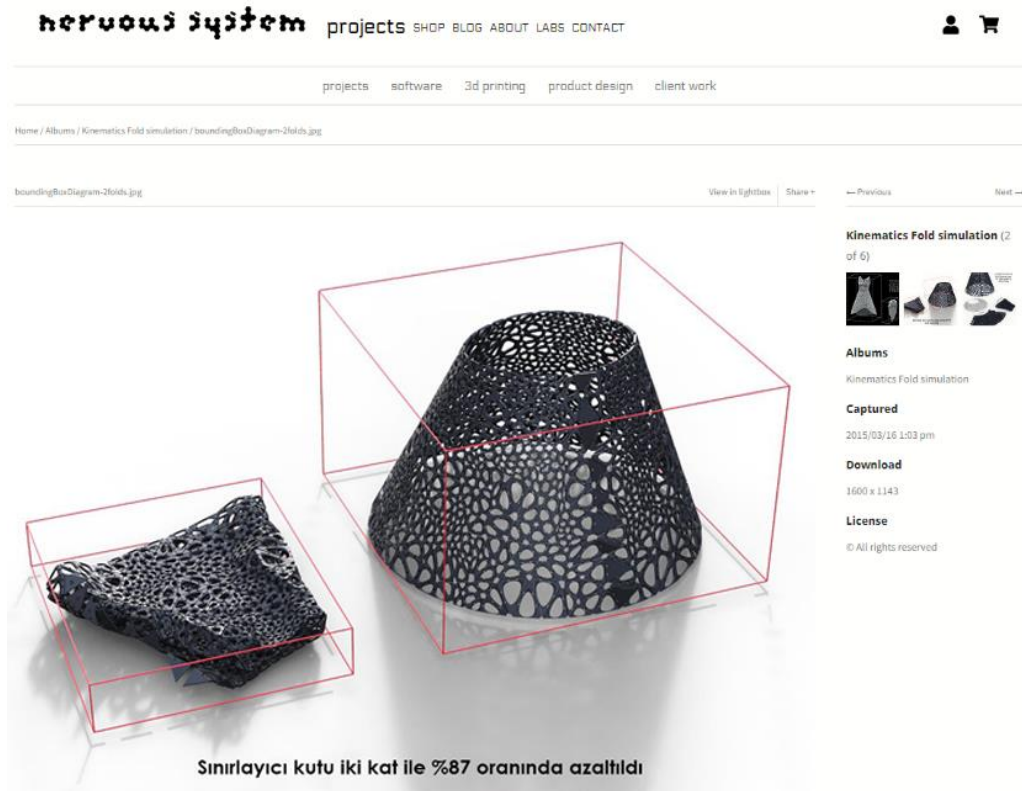
6.3 Araştırma Sorusu 3: Tasarım sürecinde, nesnel ve görselleştirme becerilerinin kombinasyonu bakımından, katmanlı üretim ve 3B baskı tasarımı için 3B CAD araçlarının olanakları nelerdir?

Katmanlı üretim, karmaşık ve özelleştirilmiş ürünler oluşturmak için sayısal tasarım, simülasyon ve sayısal üretimin entegre edildiği yeni bir tasarım ve üretim paradigmasıdır. Sayısal üretim yöntemlerinde, simülasyon ve analiz araçlarının benimsenmesi tasarım ve üretim süreçlerinde maksimum fayda oluşturur, malzeme ve zaman kaybını ise en aza indirmeye yardımcı olur.

Sanal ortamda 3B model tasarımı yapmak, geleneksel yaklaşımda erişilemeyen bir nesne yaratmak için temel giyim tasarımı becerilerinde örtük bilginin, sanal boyuta uygun şekilde aktarılmasını gerektirir. Çağdaş modellerin ve tasarım yöntemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunan hesaplamalı tasarım sistemleri; simülasyon, değerlendirme ve imalat süreçlerinin entegrasyonu ile, doğal sistemlerin karmaşıklığına yaklaşan ayrıntılı yapıların tasarlanmasını destekler. Katmanlı üretimle üretilmiş olan giyilebilir uygulama örnekleri incelendiğinde “biyo-ilham” ve “biomimikri” ile ilgili tasarım detayları dikkat çekmektedir. Katmanlı üretimin karmaşıklık yeteneği, doğal sistemlerden aldığı “tasarım kuralları” veya “yönergeler” ile gerçek biyomimetik yapıların üretilmesine imkan tanımaktadır. Uygulama literatürü; katmanlı üretimin biyomimetik tasarımı istenen özellik ve işlevsellikte fiziksel nesnelere (giyilebilir moda ürünleri) çevirebildiğini doğrulamıştır.

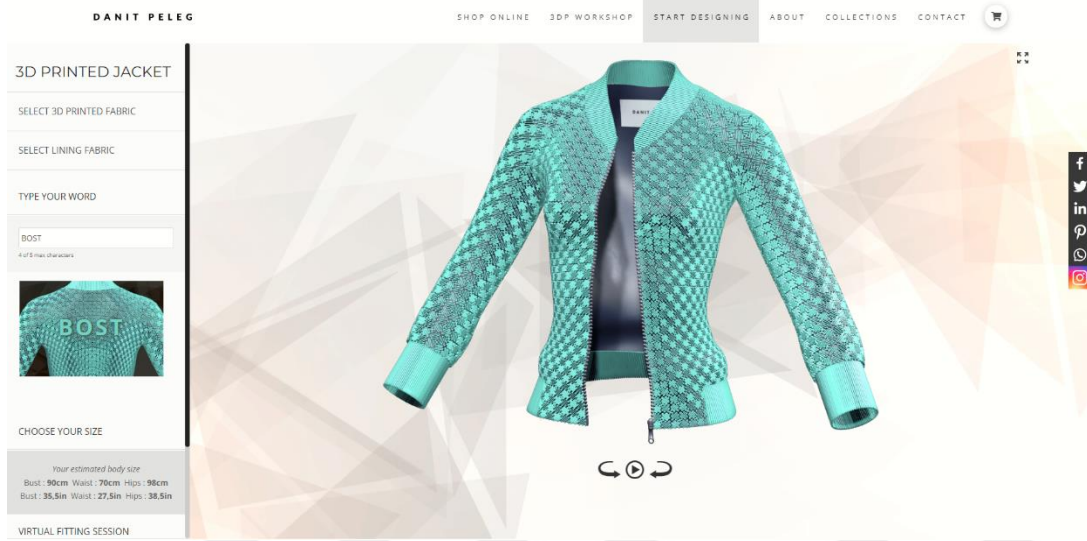
Materyalizasyon teknolojisinin entegrasyonu, hesaplamalı tasarım modellerinde yaratıcılığı arttıran yeni yöntemlere katkıda bulunmaktadır. Bu anlamda “Parametrik tasarım” araçları, karmaşık formları modellemek için benzersiz ve ayırt edici bir tasarım ortamı sunmaktadır. Karmaşık geometrileri algoritmalarla oluşturma, tek bir yapı içinde farklı malzeme ve değişen malzeme özelliklerinin sayısal modele atanarak tasarım oluşturma olanakları bulunmaktadır. Değişken özellikli “voksel baskı” uygulamaları, çok malzemeli baskıda en köklü ve en başarılı araç olan PolyJet teknolojisinin yetenekleriyle mümkün olmaktadır. PolyJet teknolojisinin, mikro veya nano ölçekli çözünürlüğüyle, özel yüzeyler, dokular ve gözenekler oluşturulabilir. Voksel tasarım yeteneklerinin geliştirilmesi, sayısal malzeme temsillerinin, katmanlı üretim süreçleri bağlamında malzeme bileşenlerinin temsilini mümkün kılmıştır. Böylece tasarımcı, form oluşturma sürecinde, voksellere entegre edilmiş malzeme

özelliklerini ve davranışını hesaplayabilmektedir. Sürdürülebilirlik bağlamında, çok malzemeli katmanlı üretim süreci (büyüme yaklaşımıyla), tek bir entegre üretim ortamında, farklı malzemeler veya malzeme özelliklerine sahip, işlevsel olarak karmaşık (heterojen) yapıları üretebilmektedir. Çoklu malzeme stratejileri; mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, ek işlevsellik ve tasarım özgürlüğü sağlanması, parçada izlenebilirlik ve güvenlik gibi diğer amaçları da kapsamaktadır. Katmanlı üretimin tasarım özgürlüğü; sürdürülebilirlik açısından gelişmiş yapılandırılmış malzemeleri ve duyarlı malzemeleri tasarlayabilme, ürün tasarım sürecinde ise statik yapılardan entegre işlevsel, dinamik yapılara kadar (Tablo 5.1 ve 6.1) geniş bir perspektifte ele alınabilir. Yeni malzemelerin geliştirilmesi, gelişmiş tasarım yöntemleri, “Katmanlı Üretim için Tasarım” kavramının da önünü açmaktadır. Katmanlı üretim için tasarım yaklaşımında, sürece özel araçların, kuralların ve metodolojilerinin geliştirilmesi, teknik zorluklarından biri olarak belirtilmektedir. Katmanlı üretimin tasarım özgürlüklerinden yararlanabilmek, tasarımcıların ve mühendislerin endüstride ihtiyaç duyulan gerekli becerileri ve yetkinlikleri edinmelerini ve ihtiyaç duyulan yeterliliklerin kazanımını gerektirmektedir. Gerekli tasarım beceri ve bilgisine sahip birçok tasarımcı, düşük hacimli ve düşük maliyetli ürünleri özelleştirebilir.



Şekil 6.12 : Kinematik Fold web simülasyon uygulaması, model hacminin akıllı katlama mekanizması ile %87 azaltılması mümkün, (Url-85).

Katmanlı üretim sayısal iş akışı, tasarımdan üretime ve hizmete kadar tüm ürün yaşam döngüsünde müşteri katılımını mümkün kılmaktadır. Tasarım aşamasında müşteri ihtiyaç ve tercihlerinin belirlenmesi ve konsept tasarıma dönüştürülmesi mümkündür. Bu bakımdan, “Nervous System’in web tasarım uygulaması (Url-85) ve Danit Peleg’in web özelleştirme uygulaması (Url-86)” tasarım, simülasyon ve imalatı birleştirerek, erişilebilir ve demokratik yeni bir tasarım aracı sunmasıyla alanındaki iyi örneklerdendir.



Şekil 6.13 : Danit Peleg 3B web tasarım uygulaması. Ürün renk, beden, iç astar rengi ve sırt bölümüne logo tercihiyle özelleştirilebilir. Ceket, 1.500\$ ücretiyle web sipariş edilir, (Url-86).

Masaüstü tüketici sınıfı 3B baskı teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaşmasıyla teknoloji, kullanıcıları üreten-tüketici iş modelinin bir parçası haline getirmektedir. Tasarımcı 3B sayısal bir modelin üretimini, “3B Hub” gibi daha profesyonel bir baskı hizmeti sağlayıcı aracılığıyla da gerçekleştirebilir. Kişiselleştirilmiş ürünün, kaynak (ör. bilgi, model, malzeme ve ekipman) paylaşımı yoluyla müşteri ve üretici arasında gerçek zamanlı etkileşim ile hızlı yanıt ve sıfır teslim süresi ile ürün maliyetinde tasarruf sağlanabilir. Sayısal veri tabanı ise, envanter israfını ortadan kaldırarak riskleri azaltabilir. Katmalı üretimin tasarımından üretime, her aşamada bulunan bağlantı, sayısallaşma ve paylaşım olanağı, israfı ve maliyeti azaltma potansiyeliyle sosyal ve çevresel bakımdan olumlu etkilere sahiptir.

6.4 Araştırma Sorusu 4: Katmanlı üretimin avantajları ve kısıtlamaları nelerdir?

Akademik ve uygulama literatüründen belirlenmiş olan katmanlı üretim ve/veya 3BB teknolojileri; Stereolitografi (SLA), Sayısal Işık Projeksiyonu (CDLS), Kaynaşmış Biriktirme Modelleme (FDM), Seçici Lazer Sinterleme (SLS) ve PolyJet’dir.

Tezin bu bölümünde “araştırma sorusu 4 kapsamında”, belirlenen katmanlı üretim teknolojilerinin, sosyo-ekolojik etki bakımından “Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirme” (SYDD)’si sunulmuştur. SYDD, ürün düzeyinde sosyal ve ekolojik sürdürülebilirliğin kapsamına ilişkin stratejik bir genel bakış sunan değerlendirme aracı ve beraberindeki bir süreç olarak tanımlanabilir. Süreç, yaşam döngüsü boyunca endişe duyulan alanları göstermeyi ve bilgi boşluklarını belirlemeyi amaçlar (Url-75). Bu çalışmada, SYDD sürecine sistematik literatür taramasıyla belirlenen 43 akademik makale ve malzeme, tasarım kriterleri ve katmanlı üretim yöntemlerini içeren 3 web makalesi dahil edilmiştir. SYDD sürecine, sosyo-ekolojik SP’ler (Tablo. 6.1), perspektifiyle geliştirilen (Çizelge 5.5)’deki rehberli sorular eşlik etmiştir. Çizelge 6.6’da, analiz sorularına cevaplar aranarak, katmanlı üretim teknolojilerinin genel bir değerlendirmesi yapılmıştır. Her bir yaşam döngüsü aşaması altında kapsamlı bir analiz (Çizelge 6.7 ila 6.12) sunulmuştur. Analiz süreci; her bir katmanlı üretim teknolojisinin “ham-malzeme, tasarım, üretim, işlem sonrası, dağıtım, kullanım, toplama, geri dönüşüm ve atık” yaşam döngüsü aşamalarıyla ilişkisi, yeri geldiğinde uygulama örneklerinden referans alınarak desteklenmiştir.

SYDD analizi ile katmanlı üretim teknolojilerinin sosyo-ekolojik etki bakımından avantaj ve kısıtlamaları belirlenmiştir. Yaşam döngüsü aşamalarının, sosyo-ekolojik sürdürülebilirlik prensiplerine uyumluluğu, (Çizelge 5.5)’de geliştirilen analiz sorularının yöneltmesi ile değerlendirilmiştir. Sistematik literatür taraması verileri ve vaka analiz verileride, SYDD yaşam döngüsü aşamalarına yöneltilen soruların yanıtlanmasında kullanılmıştır.

6.4.1 SYDD Değerlendirmesi

Çizelge 6.6 : Sürdürülebilir yaşam döngüsü değerlendirme (SYDD) çizelgesi.

SLCA	Sürdürülebilirlik Prensipleri Ekolojik ve Sosyal			
	1 (yer kabuğundan elde edilen malzemeler)	2 (toplum tarafından üretilen maddeler)	3 (doğanın fiziksel bozulması)	4 (insan ihtiyaçlarını karşılamamanın önündeki engeller)
Yaşam Döngüsü	Rehberli Sorular			
Ham Malzeme	Malzemelerin yeniden kullanılması, ham kaynakların tedarik edilmesinden kaynaklanan etkileri önler. Polimer malzemeler fosil kaynaklı olduğundan çevresel yüke neden olmaktadır.	Malzeme yeniden kullanımıyla, ham kaynakların tedarik edilmesinden kaynaklanan üretim emisyonlarından kaçınılır. Toz baskı malzemesini yeniden kullanımı mümkündür.	Yeniden kullanım ve geri dönüşüm, ham kaynakların tedarik edilmesinden kaynaklanan fiziksel etkileri önler. Polimer malzeme bozunmadığı için çevresel etki oranı bulunur.	Kullanılmış maddelerin, geri dönüşüm işlemi sırasında ve geri dönüştürülmüş ürünlerde bulunması sağlığı etkilemez. SLS kullanılmış toz, katkı maddesi ve yeni tozla işlenerek, başka bir sürece malzeme kaynağı sağlayabilir.
Tasarım	Karmaşık geometriler, doğrudan montaj, tek bir yapı içinde değişen malzeme ve malzeme özelliklerini dağıtmak, malzeme ve enerji verimliliği sağlar.	CDLS ile üretilen ürünlerde bakım kolaydır. Yıkabilir ve anında kuruyabilir.	Modellerin optimizasyonu malzeme kullanım oranından tasarruf sağlar.	Tasarımda topoloji optimizasyonu hem malzeme, hem de zaman ve enerji tasarrufu yapmak mümkündür.
Üretim	CDLS diğer baskı yöntemlerinden 100 kat hızlı olması bakımından en verimli 3BB teknolojisidir. SLA, enerji yoğun bir süreçtir ancak SLS'den daha verimlidir.	SLS yönteminde %95 oluşan toz atık sonraki baskıya %50 karıştırılarak kullanılabilir.	Katmanlı üretimde destek yapısı kullanımı atık yaratması nedeniyle fiziksel etki barındırır.	FDM baskı masaüstü makinelerin kullanımında baskı sırasında çıkan zararlı gazlardan korunmak için koruyucu ekipman kullanılmalıdır.
İşlem Sonrası Dağıtım Kullanım	SLS parçalar baskı sonrası bir miktar işlem gerektirebilir.	Geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı, depolama ve yakma ile ilgili olarak katkı maddesi salınımını önler.	Dağıtılmış üretim ile nakliye ve nakliyeden doğan fosil yakıt oluşumu azaltılabilir.	Yeniden kullanım ve geri dönüşüm, gelecekteki insan ihtiyaçlarını karşılamak için malzemenin değerini korur ve doğrusaldan döngüsel ekonomi modeline aşamalı geçişi destekler.
Toplama Geri Dönüşüm Atık	Geri dönüşümde karbon bazlı enerji tasarrufu, hem gömülü enerji hem de malzemenin kendisinde önemli olabilir. Reçine malzemeler geri dönüşümü mümkün değildir.	Geri dönüşüm süreçlerinden kaynaklanan emisyonlar, fiziksel geri dönüşüm durumunda işlenmemiş malzeme üretiminden daha düşük olacaktır. FDM destek yapıları geri dönüştürülerek tekrar kullanılabilir.	Geri dönüşüm, çöpe atılma veya yakma sonrasında kalan atıklardan kaynaklanan fiziksel etkileri önler. Reçine malzemeler yakıldığında kül olarak yok olur, dolayısıyla atık oluşturmaz.	Piyasa güvenliğini güvence altına almak için, sürdürülebilirlik faydalarına ilişkin, malzeme geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanımına yönelik önlemler alınmalıdır. Atık malzemelerin yakılarak yok edilmesi sırasında emisyon üretilebilir.

Çizelge 6.7 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (Ham-malzeme) çizelgesi.

SLCA	Ekolojik ve Sosyal Sürdürülebilirlik Prensipleri	
	1 (yer kabuğundan elde edilen malzemeler), 2 (toplum tarafından üretilen maddeler), 3 (doğanın fiziksel bozulması), 4 (insan ihtiyaçlarını karşılamada önündeki engeller)	
Yaşam Döngüsü Ham Malzeme	Avantajlar	Kısıtlamalar
	SLA'da sayısız farklı tür reçine seçeneği mevcuttur. SLA'nın tıbbi uygulamalar için biyoyumlu reçineleri bulunur. SLS, çoğu poliamid bazlı (termoplastik) farklı malzemeler kullanılabilir. SLS, mühendislik poliamidleri ile son kullanıma uygundur. SLS sürecinde ihtiyaca göre sert, yumuşak malzeme imkanı vardır. CDLS malzemeleri, ISO 10993-5 ve -10'a göre biyoyum gereklerini sağlamıştır. CDLS'nin, mühendislik sınıfı, yüksek mekanik özellikte reçine yelpazesi bulunur. CDLS malzemelerinin kullanımında, yastıklama, titreşim yalıtımı, darbe emilimi, enerji dönüşü, giyilebilir teknoloji imkanı bulunur. FDM'nin, yaygın kullanımlarında binlerce farklı filament seçeneği vardır. FDM'de plastik, ahşap, karbon karışımli malzeme seçenekleri vardır. Tasarım kısıtlaması fiyat ise, FDM filamentleri SLA veya SLS'den daha ucuz olduğundan en iyi 3B baskı seçeneğidir. Katmanlı üretim çok malzeme baskı, yüksek karmaşıklık ve işlevsellik ekleyerek parçalarının performansını artırabilir. PolyJet baskı, tam renkli, çok malzemeli, çok dokulu baskılar üretebilir. PolyJet çok malzemeli baskı, özelleştirilebilir sertlik, pürüzsüz yüzey özelliği, doğru görsel ve dokusal prototip sağlar. 4B baskı, aktif madde ile malzemenin kendisine doğrudan geometrik program tasarımı yerleştirerek son bileşende durum değiştirme yeteneği sağlar. Akıllı malzemeler, dış uyaranların etkisi altında şekillerini veya özelliklerini değiştirebilir. ABS'nin, güçlü ve esnek yapısı ek hareket özelliği ile eklem oluşturmak için idealdir. PLA, biyolojik olarak parçalanabilir ve ABS'ye kıyasla yüksek boyutsal doğruluk sunar. PLA bazlı TPU'lar oda sıcaklığında mükemmel bir sönümleme performansı gösterir.	Polimerler petrolden üretilmektedir. Petrol esaslı polimerler doğal koşullarda kolayca bozunamaz, çevre kirliliği yaratarak, insan sağlığını tehdit eder. SLA, çoğu tescilli olan fotopolimer reçineleri kullanır. PolyJet, malzemeleri pahalıdır ve sağlam destekle basılması, parça başına malzeme israfı oluşturur. Akıllı malzemeler ve 3B baskı teknolojileri arasındaki etkileşim, 4B baskı ilerlemesini zorlar.

Çizelge 6.7'de katmanlı üretim süreçlerinde hammadde kullanım özellikleri verilmiştir. Giyilebilir moda uygulamalarında kullanılmakta olan fosil kaynaklı polimer malzemeler, doğal koşullarda kolayca bozunamayarak çevre kirliliği ve atık oluşumuna neden olur. Faludi ve diğ. (2015)'ne göre katmanlı üretim için kullanılan polimer malzemeler, geleneksel üretimde kullanılan malzemelerden daha çevreci değildir. Bu nedenle katmanlı üretim için (rejeneratif) yenilenebilir ve bozunabilir polimerik malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir (Shou ve diğ, 2021). Biyo-bazlı plastikler, dünya çapında üretilen yaklaşık 290 milyon ton plastiğin %1'inden daha azını temsil etmektedir ve son yıllarda yeniden önem kazanmaya başlamıştır. Biyo-bazlı plastikler biyolojik olarak parçalanabilir veya biyolojik olarak parçalanamaz

olabilir ancak her zaman yenilenebilir kaynaklara dayalıdır (Wijk ve Wijk, 2015). Biyo-polimer polilaktik asit (PLA)'ya yenilenebilirliği, mükemmel bozunabilirliği ve biyouyumluluğu nedeniyle artan bir ilgi vardır (Faludi ve diğ, 2015; Fonseca ve Simoes, 2019; Shanmugam ve diğ, 2020; Shou ve diğ, 2021). PLA, hızlı soğutmada bile kolay küçülmediği için avantajlıdır. Yeterli tokluk göstermediğinden, PLA kompozitlerin tokluğunu iyileştirmek için fiziksel harmanlama kullanılmaktadır. Ancak PLA, biyolojik olarak parçalanamayan fosil bazlı bir plastikte karıştırıldığında bazı işlevleri kaybolabilir (Wijk ve Wijk, 2015).

İki baskın termoplastik, ABS fosil bazlı plastik ve PLA biyo bazlı bir plastiktir. 3B baskı için geliştirilen ilk filament ABS'nin, renk seçeneği, hafif yapı, düşük fiyat avantajına rağmen zararlı koku, hızlı soğutma ile bükülme veya çatlak oluşumu gibi dezavantajları bulunur (Kwon ve diğ, 2017). Araştırmalar, ABS ve naylon ile karşılaştırıldığında PLA'nın daha iyi genel sonuçlara sahip olduğunu göstermiştir. Dokuma pamuklu ve dokuma poliwool kumaşların, doğrudan 3B baskısında üç tip (ABS, PLA, naylon) polimer ile iyi uyumluluk yakalanırken, PLA'nın baskı kalitesi, ABS veya naylona kıyasla daha iyi sonuç göstermiştir (Pei ve diğ, 2015).

PLA, piyasadaki biyo-bazlı polyesterlerin en önemlisidir. PLA için yeni katkı maddelerinin kullanılabilirliği, PLA'nın özelliklerini iyileştirebilir ve yeni uygulamaların önünü açabilir. Ancak, katkı maddeleri ürünlerdeki berraklık, biyolojik olarak parçalanabilirlik/kompost kabiliyeti ve yenilenebilir kaynakların yüzdesi üzerinde bir etkiye sahip olduğundan dikkatli bir seçim gerektirir (Wijk ve Wijk, 2015). PLA tabanlı TPU'lar, mükemmel mekanik özellik, sönümlenme performansı ve biyouyumluluk sergilemektedir. Çoklu geri dönüşüm altında, PLA bazlı TPU'ların genel performansı hala iyi bir şekilde korunur, birçok kez kullanıma izin vererek kaynak geri dönüşümü ve malzeme yeniden kullanımı gerçekleştirebilir. PLA bazlı TPU'ların tekrarlayan işleme performansı ile yeşil malzeme olarak yakın zamanda yaygın kullanım potansiyeli bulunur. Avrupa Birliği, yeni plastik stratejisinde 2030 yılına kadar plastiğin %100'ünün yeniden kullanılabilir veya geri dönüştürülebilir olması gerektiğini açıklamıştır. Bu anlamda Adidas ve Nike gibi tüketici ürünleri üreticileri, uzun süredir biyolojik olarak parçalanabilen ve yenilenebilir malzeme araştırmaları yürütmektedir (Shou ve diğ, 2021). 3B baskı, döngüsel ekonomi kavramına iyi uyumluluk gösterir ve biyo-malzeme ile tamamen sürdürülebilir ve döngüsel bir üretim süreci (Wijk ve Wijk, 2015), potansiyeline sahiptir.

Çizelge 6.8 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (Tasarım) çizelgesi.

SLCA	Ekolojik ve Sosyal Sürdürülebilirlik Prensipleri	
	1 (yer kabuğundan elde edilen malzemeler), 2 (toplum tarafından üretilen maddeler), 3 (doğanın fiziksel bozulması), 4 (insan ihtiyaçlarını karşılamanın önündeki engeller)	
Yaşam Döngüsü Tasarım	Avantajlar	Kısıtlamalar
	SLA, yapı hacmi ve karmaşıklığında eksik ancak çözünürlükte yüksek, ince ayrıntı, olağanüstü yüzey özelliği, düzgün konturlar yazdırabilir. SLS, çok yönlü ve sınırsız karmaşıklıkta parça tasarımı ve fonksiyonel doğrudan montaj yeteneği sunar. SLS, tasarımda optimizasyonu ile ağırlığı azaltıp ve malzeme tasarrufu yapılabilir. SLS, çok az tasarım kısıtlamasıyla toplu üretim için uygundur. CDLS, yüksek çözünürlük ve elastomerik, yumuşaklığı, son kullanım parçaları için iyi yüzey kalitesi sunar. CDLS'nin hızlı yinleme, monolitik parçada değişen mekanik özellik, kalıplanamayan geometri ve estetik kafes yapılarını algoritmaya dayalı tasarlanır. Carbon'un aynı parça veya bileşen içinde çeşitli (monolitik), kafes yapıları oluşturma yeteneği, işlevsel bölgelerin herbirinde değişen mekanik özellik, özelleştirilmiş tasarım imkanı bulunur. CDLS, farklı sporlara yönelik ayakkabı performansını artırmak için orta taban boyunca değişken özelliklere sahip monolitik ayakkabılar yaratabilir. PolyJet, herhangi bir 3B baskı teknolojisinin sunduğu en iyi çözünürlüğe sahiptir. PolyJet, parçada degradeler gerekiyorsa modeli OBJ veya VRML dosya biçimi kullanılmalıdır. PolyJet'in çoklu malzeme yeteneği, doğru görsel ve dokunsal tasarım sağlar. 4B baskı, malzemeleri performans odaklı işlevsellik yerleştirerek programlayabilir. Katmanlı üretimin, tasarım özgürlükleri, ürün ve bileşenlerin yeniden tasarlanmasına olanak tanır. Katmanlı üretimin, biyomimetik tasarımdaki eğilimlerden ilki topoloji optimizasyonu sunmasıdır. Katmanlı üretim, zamanda, malzemede veya verimsizlikte önemli artışlar olmaksızın özelleştirilmiş bileşenleri toplu olarak üretebilir. Katmanlı üretim, biyomimetik tasarımı istenen özellik ve işlevselliğe sahip fiziksel nesnelere çevirebilir. Katmanlı üretimde, hesaplamalı algoritmalar ve parametrik tasarım süreçleri, ürün tasarımında yeni bir tasarım ortamı sunar. Katmanlı üretimin tasarlama özgürlüğü, tasarımcılara geleneksel üretim süreçleriyle üretilmesi imkansız olan çeşitli şekil ve işlevler yaratma olanağı tanır. Katmanlı üretim, tasarım optimizasyonu yoluyla işlevsellik açısından iyileştirmeler, karmaşık geometriler aracılığıyla kaynak verimliliği sunar. Katmanlı üretim, serbest karmaşıklık, toplu özelleştirme ve güçlü bileşenler çıkarırken ağırlığı/hacimi en aza indirerek sürdürülebilirliği destekler.	FDM baskılar estetik açıdan hoş veya güçlü değildir, ancak oldukça uygun maliyetlidir. FDM, biçim ve uyumun işlevden daha önemli olduğu düşük maliyetli prototipleme için uygundur. PolyJet, parçanın belirli alanlarına farklı bir malzeme veya renk atamak için modelin ayrı STL dosyalarına aktarılması gerekir. PolyJet, baskı hatası olasılığını ve gerekli destek miktarını azaltmak için parça oryantasyonu çok fazla tasarımı zamanı harcanır. Çok malzemeli bileşen tasarlarken göz önünde bulundurulması gereken şey 3B baskı teknolojisinin kullanılabilirliğidir. Katmanlı üretimin en önemli zorluğu, baskı hızı/zamanı, yapı hacmi, malzeme kalitesi ve yeni yazılım yetenekleridir. Destek stratejileri her zaman sürece özeldir. Minimum özellik boyutu, katmanlı üretimde sınırlamadır. Tasarım sınırlamasında karşılaşılan zorluklardan biri akıllı yapıların tasarımıdır.

Katmanlı üretimin, geleneksel yöntemler kullanılarak üretilmesi zor olan karmaşık tasarımlar oluşturma yeteneği, çok malzemeli katmanlı üretimde yaşanan gelişmeler, heterojen özelliklere sahip malzemelerin üretimini mümkün kılmaktadır. Çizelge 6.8’de görüleceği gibi; tasarımlara israfı azaltmak için optimizasyon imkanı tanınması, üretimde esneklik, tüketicilere kişiselleştirilecek ürünler ve tasarımcılara yeni derecelendirilmiş kompozisyon özellikleri sunmasıyla, katmanlı üretimin en büyük faydası tasarım özgürlüğünde yatmaktadır.

Literatürde, katmanlı üretim için biyo-tabanlı veya atık-bazlı malzemelerle ilgili tasarım araştırmalarının yeni yapıldığı, tasarım pratiğinde ise son on yıldır bu konuların birlikte ele alındığı belirtilmektedir (Romani ve diğ., 2021).

Katmanlı üretim, tasarımdan üretime ve hizmete kadar tüm ürün yaşam döngüsüne müşteri katılımı olanağı sağlamaktadır. Müşteriler, tasarlanan kullanıcı arayüzleri aracılığıyla tasarım sistemine erişebilir. Tasarım aşamasında müşteri tercihlerinin belirlenerek ve konsept tasarıma dönüştürülebilir. Guo ve diğ. (2020)’e göre, ürün tasarımı, üretim ve hizmet aşamalarında (dijital ikiz verileriyle entegre blok zinciri tabanlı) kişiselleştirilmiş ürün yaşam döngüsü yönetim sistemleri, müşteri ve üretimi birbirine bağlayabilir.

Hammadde girdilerinin çıktılarına dönüştürülmesinde, farklı katmanlı üretimin süreçlerinin bulunması (Çizelge 6.9), katmanlı üretimin üretimle ilgili çevresel boyutlarına ilişkin genelleştirilebilir ifadeleri sınırlamaktadır (Baumers ve diğ., 2017).

Hammadde kullanımıyla sağladığı verimlilik ise katmanlı üretimin en yüksek faydaları arasında görülmektedir. Katmanlı üretim, eksiltici tekniklere göre atık oluşturmadağından, daha verimli bir üretim süreci olarak kabul edilse de üretilen birim başına enerji yoğun bir üretim yöntemidir. Katmanlı üretimin, işlem süresi, hızı, katman kalınlığı, kapasite kullanım derecesi, geometri konfigürasyonu ve yüzey optimizasyonu ile son işlem etkisini ve enerji tüketimini azaltmaya ilişkin süreç parametreleri seçimi, çevresel performansında belirleyicidir. Katmanlı üretimin, merkezi olmayan dağıtılmış üretim modeli tedarik zincirinde adımları azaltarak nakliye ve lojistikte verimlilik ve ekolojik fayda sağlamaktadır (Fonseca ve Simoes, 2019; Cruz Sanchez, 2020).

Çizelge 6.9 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (Üretim) çizelgesi.

SLCA	Ekolojik ve Sosyal Sürdürülebilirlik Prensipleri	
	1 (yer kabuğundan elde edilen malzemeler), 2 (toplum tarafından üretilen maddeler), 3 (doğanın fiziksel bozulması), 4 (insan ihtiyaçlarını karşılamanın önündeki engeller)	
Yaşam Döngüsü Üretim	Avantajlar	Kısıtlamalar
	SLA, en hızlı baskı teknolojilerden biridir. SLA, çok sıkı toleranslara sahiptir ve tutarlı tekrarlanabilirlik sağlar. SLS parçaları destek gerektirmez, bu da daha fazla tasarım özgürlüğü sağlar. SLS, yüksek çözünürlük seviyesi, mükemmel gerilme mukavemeti vardır. SLS, karmaşık geometri, eksiksiz tasarım özgürlüğü sunmasıyla endüstriyel uygulamalar için uygundur. SLS, sinterlenmemiş toz, destek ihtiyacını ortadan kaldırarak son derece karmaşık tasarım baskısına izin verir. SLS, aynı anda birden fazla ürün baskısıyla toplu üretime uygundur. CDLS, SLS'nin aksine tamamen yoğun parçalar üretir. CDLS, süreçteki her aşamanın parçanın mekanik bütünlüğüne katkı sunduğu, izotropik mekanik özellik ve yüzey kalitesine sahip polimerik parça üretir. CDLS, diğer eklemeli üretim süreçlerinden 100 kata kadar daha hızlı, benzersiz bir yapım hız sağlamaktadır. CDLS, performans, koruma ve yüksek değerli atletik ekipmanlardan, zorlu mühendislik sınıfı bileşenlerine kadar geniş uygulama alanı bulunur. FDM'nin, hızı ve düşük maliyeti, prototip oluşturma için en iyi seçimdir. FDM, parçaları daha az malzeme ile kısmen içi boş yazdırabilirken, diğer tüm 3B baskı işlemleri tamamen katı parçalar üretir. PolyJet, aynı baskı yatağında çoklu baskı yapabilir. PolyJet, programlanabilir ve uyarlanabilir malzemeler için çok malzemeli baskıda endüstri lideridir. PolyJet çok malzemeli baskı, hem aktif hem de statik malzemeleri hassas bir şekilde basabilir. PolyJet, yüksek çözünürlüğü, düşük katman yüksekliği nedeniyle optimal özelliklerini elde etmek için ek kürleme gerektirmez. PolyJet'in, parlak baskı seçeneğinin maliyeti daha az malzeme kullandığı için daha düşüktür. PolyJet, destekler yapısıyla, çok karmaşık parçalar üretebilirler. PolyJet'in düzgün ve pürüzsüz bir yüzey, yüksek boyutsal doğruluk gerekli olduğunda mat parçalar üretebilir. PolyJet çok malzemeli baskı, farklı özelliklere sahip birden fazla malzemeyi, tek bir işlemde karmaşık, kompozit parçaları oluşturabilir. 4B baskı akıllı malzemelerin programlanmasına izin verir. 4B baskı, doğrudan malzemeye gömülü çalıştırma, algılama ve programlanabilirlik sunar. 4B baskı, bir ürün veya sistemdeki bileşenlerin sayısını, montaj süresini ve bileşen maliyetini azaltır.	Destek malzemesi, 3B baskıya ekstra zaman ve maliyet ekler. SLA pahalı bir teknolojidir ancak SLS'den ucuzdur. SLA, masaüstü 3B yazıcı olarak popülerleşmiştir ancak değişen maliyetleriyle pahalıdır. FDM bileşenleri, (anizotropik doğası nedeniyle) katman oryantasyonu nedeniyle bir yönde doğal olarak daha zayıftır. SLS, enerji yoğun bir süreçtir. SLS baskı makineleri büyük, maliyetli, profesyonel ve ticari sınıftır. SLS bileşenlerinin baskıda maruz kaldığı yüksek ısı, büzülme ve bükülmeye neden olabilir. FDM, tek parçalarda baskı süreleri hızlıdır ancak ölçek ekonomisi olmadığı için yüksek hacimli parçalarda yavaştır. FDM'nin, endüstriyel makineleri bile ekonomiktir. PolyJet, ortam ısısına, nem veya güneş ışığına maruz kaldığında bükülebileceğinden ve boyutsal değişim gösterebileceğinden üretilen parçalar dikkat gerektirir. PolyJet'in, proses parametreleri makine üreticisi tarafından belirlenmiştir. PolyJet, damla oluşumunda karmaşık fiziği nedeniyle, katman yüksekliği bile özel malzemeyle bağlantılıdır. PolyJet teknolojisi pahalıdır ancak yüksek boyutsal doğruluk ve pürüzsüz yüzey, etkileyici görsellik için tek geçerli çözümdür.

Çizelge 6.10 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (İşlem sonrası-Dağıtım) çizelgesi.

Ekolojik ve Sosyal Sürdürülebilirlik Prensipleri		
SLCA	1 (yer kabuğundan elde edilen malzemeler), 2 (toplum tarafından üretilen maddeler), 3 (doğanın fiziksel bozulması), 4 (insan ihtiyaçlarını karşılamamanın önündeki engeller)	
	Avantajlar	Kısıtlamalar
Yaşam Döngüsü İşlem Sonrası-Dağıtım	SLA, iyi görsel sonuçlar veya şeffaflık söz konusu olduğunda optik netliği elde etmek için ek son işlem gerektirir. SLA, parçalar baskı sonrası kürlenirse, tamamen izotropik (su ve hava geçirmez) olabilir. SLS, malzemesi iyi kimyasal direnç sunar. CDLS, izotropik özellikleri, dual-cure malzeme teknolojiyle süreçteki her aşama, basılı her parçanın mekanik bütünlüğüne katkıda bulunur. Katmanlı üretim, gerekli adımların sayısını azaltarak, dağıtılmış ve merkezi olmayan üretime izin verir. KÜ, dağıtılmış üretim yoluyla geliştirilmiş verimlilik ve yerel yetkilendirme sunar. Kü, depolama, paketleme ve nakliye ihtiyacını azaltarak geleneksel tedarik zinciri üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir. 3BB ürün ve bileşenlerin yeniden tasarımı, lojistik çevresel etkileri üzerinde olumlu etkileri barındırır.	SLA'da kürlleme işlemi geri döndürülemez, ısıtılan parçalar erimez, yanar. SLS baskılı parçalar işlem sonrası yüzey düzeltme için zımpara ve tozdan arındırma gerektirir. SLS, ürünler sinterlenmemiş tozdan, basınçlı hava ve püskürtme ortamı ile temizlenir. SLS mekanik ve görünümü iyileştirmek için bileşenler düşük oranda son işlem gerektirebilir, boyanarak renklendirilebilir. SLS, parçalar kumlanabilir, boyanabilir, renklendirilebilir, sarılabılır, kaplanabilir, cilalanabilir, kimyasal olarak yumuşatılabilir. FDM, filamentin yuvarlak olması, keskin köşelerin basılamayacağı ve baskı sonrası işlenmedikçe duvarların asla düz olmadığı anlamına gelir. FDM, parçanın farklı alanlarındaki farklı soğuma oranı, iç gerilim, baskının deforme olmasına, bükülmeye veya büzülme neden olur. PolyJet, yazdırma oda sıcaklığında gerçekleştiği için bükülme meydana gelebilir, ancak bu, FDM veya SLS kadar yaygın değildir. PolyJet, destekler her zaman gereklidir, basınçlı su kullanılarak veya ultrasonik banyoya daldırılarak yazdırıldıktan sonra çıkarılabilen ikincil çözünebilir bir malzemeyle yazdırılır. PolyJet, destek daha fazla malzeme ve ek işlem sonrası süresi gerektiğinden mat ayarının maliyeti biraz daha yüksektir.

Katmanlı üretim, çalışanların potansiyel olarak zorlu ve tehlikeli çalışma ortamlarına maruz kalmalarını önleyerek, geleneksel üretim süreçlerine kıyasla sağlık açısından faydaları bulunur.

Katmanlı üretim, Çizelge 6.11'de görüleceği gibi, özelleştirme ve kişiselleştirme ile güçlü bir kullanıcı-ürün ilişkisi oluşturmaktadır. Katmanlı üretimin bir diğer sosyal etkisi; üretimin demokratikleşmesiyle tüketim modellerine getirdiği değişim, kullanıcıları pasif tüketiciler olmak yerine, küresel üretim topluluğu içinde “üreten-tüketicilere” dönüştürdüğü iş modelinde görülmektedir.

Çizelge 6.11 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (Kullanım) çizelgesi.

SLCA	Ekolojik ve Sosyal Sürdürülebilirlik Prensipleri	
	1 (yer kabuğundan elde edilen malzemeler), 2 (toplum tarafından üretilen maddeler), 3 (doğanın fiziksel bozulması), 4 (insan ihtiyaçlarını karşılamamanın önündeki engeller)	
Yaşam Döngüsü Kullanım	Avantajlar	Kısıtlamalar
	SLA, yüksek çözünürlük ve sıkı toleransı ile mücevher, dişçilik ve tıbbi uygulama için idealdir.	SLS, parçalar ağırdır, geleneksel giyim konforu göstermez ancak hareketli menteşeler ile kumaş dökümü sağlanabilir.
	SLS, ek işlem gerekmiyorsa baskı sonrasında doğrudan kullanılabilir.	FDM, doğal olarak anizotropik özelliklere sahip parçalar oluşturur, yani X,Y yönünde Z yönünden çok daha güçlüdür.
	SLS, TPU 92A-1 yenilikçi malzeme tasarımıyla futurecraft’da kullanıcı ihtiyacına performansı artıran yapı özelliği sunmuştur.	PolyJet, mat ayarında basılan parçalar nispeten daha düşük bir yüzey sertliğine sahiptir.
	SLS Future Craft, karmaşık kafesli yapısı, esneklik ve sertliğin aynı yapıda dağılımı, stres noktalarına gereken yerde yastıklama sunar.	PolyJet malzemeleri, ışığa duyarlıdır ve mekanik özellikleri zamanla bozulur.
	SLS tutarlı yüzey oluştururken, yüzey dokusu hafif grenli, mat bir görünüm verir.	PolyJet parçalar, homojen mekanik ve termal özelliklere sahiptir ancak işlevsel olmayan prototipler için uygundur.
	CDLS, izotropi, mükemmel yüzey kalitesi ve doğruluğun yanı sıra yüksek elastikiyet, yırtılma direnci ve enerji geri dönüşü ihtiyacını birleştirir.	
	CDLS, ağırlığı azaltan küçülmüş topuk, kauçuk dış taban, çekiş sağlayan minimalist özel tasarım sunar.	
	CDLS, kafes yapılarını kullanan uygulamaların temizlenmesi kolaydır, su tutmaz ve yıkama sonrası anında kullanılabilir.	
	CDLS, son müşteri deneyimini hesaba katan (atlet verileri), 3B baskı çözümleri sunar.	
	CDLS, kabarık elastomerik kafesler, enerji geri dönüşünün hassas şekilde ayarlanmasıyla konforu en üst düzeye çıkarır.	
	FDM’nin kullanımı basit ve hızlı ancak endüstriyel sonuçtan uzaktır.	
	PolyJet, destek parçalar çıkarıldıktan sonra az veya hiç destek belirtisi olmayan çok pürüzsüz yüzeylere sahip olabilir.	
	KÜ bileşenleri, kullanım aşamasında maliyet tasarrufu, hafif bileşenler ile enerji tasarrufu sağlar.	

Katmanlı üretim süreçlerinde, hammaddeler genellikle değişiklik yapılmadan kullanılmaktadır. Blume ve Everard, (2018)’ın çalışmalarında, polimerler için alternatif ömür sonu stratejileri; (1) depolama (2) enerji geri kazanımlı yakma ve (3) kontrollü döngü yönetimi (geri dönüşüm ve yeniden kullanım) belirlenmiştir. Yeni ürünleri üretmek için geri dönüştürülmüş malzeme, belli bir oranda işlenmemiş malzeme ile birlikte kullanılarak, hammadde tedarikinden kaynaklanan üretim emisyonları önlenir. Geri dönüşüm süreçlerinde oluşan emisyon etkisi işlenmemiş malzeme üretiminden daha düşüktür. Ayrıca, geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı ile depolama ve yakmayla ilgili emisyon salınması da önlenir (Shanmugam ve diğ, 2020).

Çizelge 6.12 : Katmanlı üretimin sağladığı avantaj ve kısıtlamalar (Toplama, Geri d., Atık) çizelgesi.

SLCA	Ekolojik ve Sosyal Sürdürülebilirlik Prensipleri	
	1 (yer kabuğundan elde edilen malzemeler), 2 (toplum tarafından üretilen maddeler), 3 (doğanın fiziksel bozulması), 4 (insan ihtiyaçlarını karşılamının önündeki engeller)	
Yaşam Döngüsü Toplama-Geri Dönüşüm-Atık	Avantajlar	Kısıtlamalar
	SLS'de, %50 yeni, %50 eski her yapı için ideal toz kullanım oranıdır.	SLA, reçineleri yanma sonrası kül olarak yok olur.
	SLS atık tozu, takviyeler ile FDM hobi kullanımı için filamente çevrilir.	
	FDM, malzemenin yeniden kullanımı ve geri dönüşümü mümkündür.	SLS'nın her baskı tablasında %5 hacim dolayısıyla, %95 kullanılmış toz kalır.
	Biyo-polimer PLA, çok çeşitli malzeme özellikleri sağlayabilir ve böylece farklı plastiklerin yerini alabilir.	
	PLA tabanlı TPU'lar, çevre kirliliğini ve atığı azaltabilen birçok kez geri dönüştürülebilir ve yeniden işlenebilir.	SLS'de işlem sonrası toz molekül yapısı değişir, uygun şekilde geri dönüştürülmelidir.
	PLA tabanlı TPU'ların yeniden işlenmesi ve geri dönüştürülmesi, bozunmayan veya ısıyla sertleşen malzemelerin neden olduğu beyaz kirliliği ve kaynak israfını çözer.	
	Çoklu geri dönüşüm altında, PLA tabanlı TPU'ların genel performansı hala iyi bir şekilde korunmaktadır.	PolyJet çok malzemeli heterojen bileşenlerin malzeme ayrıştırma ve geri dönüşümü zordur.
	Katmanlı üretim, tedarik zinciri aşamalarının sayısını azaltabilir.	
	Katmanlı üretim, atığa gömülü olarak geri kazanılan değeri artırmaktadır.	PolyJet, reçineleri, yanma sonrası kül olarak yok olur.
	Katmanlı üretim, atıkların ve atık olarak kabul edilen malzemelerin, lüks ürünler üretmek için geri dönüştürülebileceğini göstermiştir.	

Çizelge 6.12'de görüleceği gibi, katmanlı üretim süreçlerinde işlenmiş malzeme (toz atık, destek malzemesi), her zaman atılmayıp, enerji ayak izini azaltma ve fayda değerini en üst düzeye çıkarma amacıyla yeni üretim süreçlerinde kullanılmaktadır. Ancak malzeme özellikleri, kullanılan geri dönüştürülmüş hammadde oranından ve geri dönüşüm sürecinden etkilenmektedir. Farklı malzeme tozları, önceki geri dönüşüm sayısı, saf tozla tazelenme oranı, kullanılan katmanlı üretim süreci, malzeme özellikleri ve yeniden kullanım gibi çok sayıda faktöre bağlı olarak geri dönüşüm süreci malzeme performansında etkili olmaktadır. Geri dönüştürülmüş PA12 tozun özellikleri ve performansı, ham PA12 toz ile benzerdir ve FDM yönteminde başarıyla kullanılmaktadır. PA12 tozun yeniden kullanımı, SLS atığı sorununu çözmekle kalmayıp aynı zamanda düşük maliyeti nedeniyle FDM yöntemine malzeme oluşturarak iki kat avantaj sağlamaktadır.

Dolayısıyla geri dönüşüm stratejileri 3B baskı endüstrisine yarattığı faydayla (Ponis ve diğ, 2021), atığa gömülü olarak geri kazanılan değeri (Ford ve Despeisse, 2016; Cruz Sanchez ve diğ, 2020) artırmaktadır. Polimerlerin, çoklu geri dönüşüm döngülerinde yeniden kullanımı, topluma sağladığı kaynak verimliliğinin, nesiller arası faydaları bulunur (Blume ve Everard, 2018).

6.5 Döngüsel Ekonomide Katmanlı Üretimin Sürdürülebilirliği

Sürdürülebilirlik kavramı, ekolojik, sosyal ve ekonomik boyutları bir bütün olarak değerlendirmeyi kapsamaktadır. Ancak tasarım aşamasında sosyal ve ekolojik etkilerin dikkate alınarak, yaratıcılık aşamasından başlayan bilinçli seçimler ürün sürdürülebilirliğinde olumlu iyileştirmeler yaratılabilir. Ürün ve malzeme yaşam döngülerinin kavramsal bir çerçeve olarak kullanılması, sürdürülebilirliğin ekolojik boyutlarına atıfta bulunur. Sürdürülebilirliğin sosyal boyutları ise, yaratıcılık ve kendini ifade, istihdam ve emeğin dağılımı, sağlık ve güvenlik, etik ve yaşam kalitesine ilişkin yönleri ele almaktadır. Bu çalışmada, SYDD'nin daha kapsayıcı bakışıyla her yaşam döngüsü aşamasına yönelik, sosyo-ekolojik SP'lerin uyumluluğunu sorgulanmıştır.

Katmanlı üretimin sürdürülebilirliğe katkısına artan ilgiyle, alandaki çalışma sayısı da artış göstermiştir. Akademik çalışmaların çoğu, farklı katmanlı üretim türlerinin enerji performansını değerlendiren veya katmanlı üretimi geleneksel üretim teknikleriyle (enerji tüketimine odaklı) karşılaştıran araştırmalar olmuştur (Baumers ve diğ. 2011; Chen ve diğ. 2015; Franco ve Romoli, 2012; Sreenivasan ve diğ. 2010). Araştırmalarda, katmanlı üretim baskı makinesi enerji kullanımına güçlü bir odaklanma vardır ve çoğu sonuç, KÜ'in genellikle geleneksel üretim yöntemlerinden enerji yoğun olduğunu göstermektedir (Sauerwein ve diğ. 2019). Bazı araştırmalar ise; 3B baskılı nesnelerin sürdürülebilirlik fırsat ve kısıtlamalarını tanımlamaya yönelik yapılmıştır.

Katmanlı üretim; verimli malzeme kullanımı (Chen ve diğ. 2015), sayısal doğası, daha az atık (Wijk ve Wijk, 2015) veya atığı önlemesi (Chen ve diğ. 2015; Ghobadian, ve diğ. 2020), daha az enerjiyle üretim (Wijk ve Wijk, 2015), enerji tüketimini azaltan optimize edilmiş geometriler ve hafif bileşenler oluşturma yeteneği (Chen ve diğ. 2015; Ford ve Despeisse, 2016), küresel lojistiğe gerek kalmadan basit, verimli tedarik zinciri (Wijk ve Wijk, 2015), emisyonu azaltan , talep üzerine yedek parça yeteneği ile envanter israfının azaltılması (Chen ve diğ. 2015; Ford ve Despeisse, 2016) gibi sürdürülebilirlik üzerine bir takım fırsatlar sunmaktadır.

Katmanlı üretimle üretilen parçaların yaşam döngüsü etkisi kullanılan 3BB teknolojisinin süreç parametrelerine (Faludi ve diğ. 2015) ve her bir 3BB teknolojisi özelinde malzeme işleme yeteneğinde olduğundan, çevresel etki bakımından

genelleme yapmayı zorlaştırır (Ford ve Despeisse, 2016). Ancak ürün inovasyon aşamasında bir takım bilinçli seçimle etkileri azaltarak, avantaja çevirmek mümkündür. Katmanlı üretimin sürdürülebilirliği, teknolojinin kendisinin süreç parametrelerinin ötesinde, tüm yaşam döngüsü üzerindeki etkilerinin ele alınmasını gerektirmektedir. Bu bakımdan SYDD analizi, katmanlı üretimin ürün yaşam döngüsü boyunca, sosyal ve ekolojik uyumluluğunu, yaratacağı avantaj ve kısıtlamalar ve gelecek zorlukları belirlemek için başlangıç noktası sağlamaktadır. SYDD analizinden tespit edilen, avantaj ve kısıtlamalar, Tablo 6.1’de özetlenerek sunulmuştur:

Tablo 6.1 : Katmanlı üretimin sürdürülebilirlik avantaj ve kısıtlamaları özeti tablosu.

Avantajlar	Kısıtlamalar
• Tasarım özgürlükleri, • Özelleştirme ve kişiselleştirme, • Malzeme tüketiminde verimlilik, • Üretim için düşük başlangıç maliyeti, • Yenilenebilir veya geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı, • Tasarım optimizasyonu ile malzeme, enerji verimliliği, • Süreç optimizasyonu ile, atık oluşumunu azaltma veya ortadan kaldırmak, • Sayısal iş akışı, daha hızlı ürün geliştirme döngüleri, • Sayısal iş akışı, tedarik zinciri adımlarını azaltma, • Sayısal veri paylaşımı, lojistik etkisini azaltma, • Dağıtılmış veya yerinde üretim ile küresel lojistiği azaltma, verimli ve düşük maliyetli tedarik zinciri, • Daha az atık, daha az enerjiyle üretim, • Kullanıcı katılımını, tüketici-üretici modeli destekleme, • Talep üzerine yedek parça oluşturma yeteneği, envanter israfını azaltma, • Yeni beceri ve yetkinliğe dayalı, sürekli beceri gelişimi, • Tasarım koruması.	• Fosile dayalı (bozunamayan) polimer malzeme etkileri, • Enerji yoğun üretim süreci, • 3BB süreçlerinde destek yapısı nedeniyle atık oluşumu, • Atık malzemenin çevresel yükü, • Yüksek nitelikli tasarım ihtiyacı, yeni beceri ve yetkinlik gerekliliği.

Katmanlı üretim sürecinin kendisi önemli ölçüde malzeme tasarrufu sağlayabildiği için döngüsel ekonomi kavramına da uyum göstermektedir (Wijk ve Wijk, 2015). KÜ’in, döngüsel ekonomi sisteminine sağladığı katkılar: ürün ömrünün uzatılması, ürün-süreç yeniden tasarım, yeniden üretim (Chen ve diğ, 2015; Faludi ve diğ. 2015; Ford ve Despeisse, 2016), özellikle ürün ve malların bakımı, yeniden kullanımı, ve geri dönüşüm hususlarıdır (Wijk ve Wijk, 2015). Katmanlı üretimin sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi stratejilerini benimseyerek kaynak ve enerji tüketiminde verimlilikle ve döngünün kapatılması yoluyla ürün ve malzeme yaşam döngüleri boyunca faydaları olduğu (Chen ve diğ, 2015; Faludi ve diğ. 2015; Wijk ve Wijk, 2015; Ford ve Despeisse, 2016) görülmüştür.

Katmanlı üretimin, döngüsel ekonomide katkısı bulunmasına rağmen yinede “malzeme, enerji ve atık” konuları önemlidir. Fosil yakıta dayalı üretilmekte olan, polimerler ve diğer baskı malzemelerinin, üretimi sırasında kullanılan elektrik ihtiyacı da çoğunlukla fosil yakıtlı enerji santralleri tarafından üretilmektedir (Wijk ve Wijk, 2015). Ayrıca, tüm 3B baskı teknolojileri atıksız üretim yapmamaktadır.

Tablo 6.2 : Katmanlı üretimin benimsediği döngüsel ekonomi stratejileri tablosu, (Wijk ve Wijk, 2015’den faydalanılmıştır).

Katmanlı Üretimin Benimsediği Döngüsel Ekonomi Stratejileri	
Üretim	• 3B baskı için tasarlanmış ürünlerde daha az malzeme kullanımı, • İhtiyaç üzerine değil, talep üzerine üretim, • Dağıtılmış üretim, daha az nakliye ve lojistik gerektirmesi, • Kişinin verilerine dayalı, kişi tercih veya tarzına uygun kişiselleştirilmiş ürünler,
Onarım	• Talep üzerine kırık parçaları yazdırmak, • Kırık parçaları yerinde yazdırmak, soruna anında çözüm, • Eski, eksik veya kırık parçalarını yazdırılarak, ürünlerin kullanım ömrünü uzatma,
Yeniden Kullanım, Yeniden Tasarım, Yeniden Üretim	• Parçaların yükseltilmesi, eski parçaların değiştirilmesi, • Yeniden tasarım veya yeniden şekillendirme ile ürünlere ikinci, üçüncü vb. ömür, • Giysiler beden, şekil, tercih gibi kişisel değişikliklere göre ayarlanabilir, • Simülasyona dayalı, tüketici-ürün ilişkisi, • Ürüne sonradan özel elemanlar eklenebilir.
Geri Dönüşüm	• Geri dönüştürülmüş malzemelerin kaynak olarak kullanılması, • Geri dönüşüm yerel olarak veya hatta yerinde yapılabilir, kullanılabilir, • Daha az atık, daha az enerji, daha az nakliye ve lojistik.

Tez kapsamında tartışılan dört araştırma sorusunun genel bir değerlendirmesi, döngüsel ekonomi yaşam döngüsü aşamaları (bölüm 6.5.1, bölüm 6.5.2, bölüm 6.5.3, bölüm 6.5.4, bölüm 6.5.5 ve bölüm 6.5.6) altında özetlenmiştir.

6.5.1 Ham Madde

Tüm malzemeler ekolojik ve sosyal sistemleri bir şekilde etkilemektedir (Fletcher ve Grose, 2012). Katmanlı üretimin, doğada bozunamayan ekolojik ve sosyal etkileri olan malzemeleri (polimerleri) kullanma riski bulunmaktadır. Katmanlı üretimin sürdürülebilirliği önünde en büyük engel fosil bazlı malzeme kullanımı, enerji ve atık konularıdır. Hammadde yenilenebilirliği ise sürdürülebilirliği tek başına garanti etmemektedir. Fletcher ve Grose (2012)’a göre düşük enerjili yol geri dönüşümdür ve

tahminler polimer geri dönüşüm biçimlerinin, ham-elyaf üretiminden yaklaşık % 80 daha az enerji yoğun olduğunu göstermektedir.

Giyilebilir uygulamalarda kullanılan polimerlerin petrolden üretiliyor olması, ekolojik bakımdan 3B baskılı giyilebilirlerin en büyük kısıtlamasını oluşturmaktadır. Akademik literatür, son çalışmalarda katmanlı üretimin çevresel sürdürülebilirliği ve yaşam döngüsü etkilerini iyileştirmek için biyomalzeme “Biyopolimer/PLA” araştırmalarına odaklanma göstermiştir. PLA lifleri, yalnızca endüstriyel kompostlama tesisi tarafından sağlanan optimum koşullar altında yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir (Fletcher ve Grose, 2012). 3B baskının biyomalzeme kullanımı, sürdürülebilir ve döngüsel bir ekonomi gerçekleştirme fırsatı sunmaktadır. Biyo-bazlı 'akıllı' malzemelerdeki gelişmeler de devam etmektedir. Örneğin, sıcaklık arttığında veya azaldığında renk veya şekil değiştirebilen polimerler bulunmaktadır (Wijk ve Wijk, 2015).

Tablo 6.3 : Sürdürülebilir ve döngüsel üretim için biyo-malzeme avantajları tablosu, (Wijk ve Wijk, 2015’den faydalanılmıştır).

Sürdürülebilir ve Döngüsel Üretim için Biyo-Malzeme Avantajları	
Biyo-Malzeme	• Fosil yakıtlar yerine biyolojik kökenli malzeme, • CO2 (kısa döngü) emisyonu yok, • Hammadde her yerde büyüyebilir, • Her plastik üretilir, • 3B baskı için özel ve benzersiz malzeme özellikleri,
Biyo-Malzeme ile 3B Baskı	• Hem biyomateryallerin hem de ürünlerin yerel üretimi, • Sıfır sera gazı emisyonu, • Benzersiz, yenilikçi, yeni ve sürdürülebilir ürünler, • Sürdürülebilir ve döngüsel bir ekonominin gerçekleştirilmesi.

3B baskı için yeni ve harmanlanmış biyo-malzemelere yönelik de çok sayıda araştırma ve geliştirme bulunmaktadır (Wijk ve Wijk, 2015). DuPont’un bozunabilir polimeri Apexa®, sıkı kontrol altında (yüksek sıcaklık, nem ve pH), 45 günde ayrışmaktadır (Fletcher ve Grose, 2012). SLS yöntemi, her baskı yatağında %95 kullanılmış toz bırakır. Kullanılmış toz, %50 oranında yeni tozla karıştırılarak yeniden kullanılabilir. Atık toz ise, katkı maddeleriyle beslenerek filamente dönüştürülebilir, geri kazanılan malzeme, FDM yöntemine hammadde girdisi sağlar. SLS yönteminde, tozun yeniden kullanımı en üst düzeye çıkarılır, destek yapısı optimize edilir ve yüzey işleme en aza indirilirse, malzeme kullanımı ve atık miktarı da azaltılabilir. Ekolojik açıdan genel

amaç en az kaynağı kullanan ve en az etkiye neden olan işleme yollarını belirlemektir (Fletcher ve Grose, 2012).

6.5.2 Tasarım

Katmanlı üretimin tasarım özgürlükleri en yüksek faydaları arasında görülmektedir. Tasarlama özgürlüğü, tasarımcılara geleneksel üretim süreçleriyle üretilmesi imkansız olan çeşitli karmaşıklıkta şekil ve işlevleri yaratma olanağı tanımaktadır. Uygulama literatürünün analizi; katmanlı üretimin, biyomimetik tasarımı istenen özellik ve işlevselliğe sahip fiziksel nesnelere çevirebildiğini doğrulamıştır. Katmanlı üretim için biyomimetik tasarımda eğilimler, topoloji optimizasyonu sunmasıdır. Parametrik tasarım süreçleri ve algoritmalar, optimizasyon yoluyla 3B baskılı giyilebilir tasarımına işlevsellik açısından iyileştirmeler, karmaşık geometriler aracılığıyla kaynak verimliliği eklemiştir.

Özelleştirme ve kişiselleştirme, katmanlı üretimin en yüksek faydalarından biridir. Katmanlı üretim zamanda, malzemede veya verimsizlikte artış yaratmadan, özelleştirilmiş bileşenleri toplu olarak üreterek ürün değerini artırabilir. Sporlar için özelleştirilmiş ürünler, çeşitli kişi, sporcu veya medikal kullanıma yönelik biomekanik verilerle kişiselleştirilmiş tüketici ürünleri (ortez, protez, ayakkabı ve diğ, spor ekipmanları), katmanlı üretimin toplu kişiselleştirme, seri üretim ve seri özelleştirme uygulamalarına örnek gösterilebilir. Meso ve hücrel yapıların parametreleriyle tasarım ile direnç artırımı ve optimize edilmiş tasarım ile bileşenlerde verimli malzeme kullanımı mümkün olmuştur. Katmanlı üretim; yüksek karmaşıklıkta tasarımla özelleştirmeye yönelik güçlü bileşenler üretirken, optimize edilmiş topolojiyle ağırlığı/hacimi en aza indirir. Optimizasyonla elde edilen hafif bileşenler, enerji tüketimi ve lojistikte daha az yakıt tüketimi, dolayısıyla emisyon değerinde iyileşmeyle sürdürülebilirliği destekler.

Daha sürdürülebilir performans, yüksek karmaşıklık ve parçaların özelleştirilmesi ekolojik olduğu kadar sosyal etki bakımından da önemlidir. Sayısal hesaplamalı tasarım ortamları, biometrik verilerin 3B olarak görselleştirilmesi için etkili bir araçtır. Katmanlı üretim sayısal iş akışı, tasarımdan üretim ve hizmete kadar tüm ürün yaşam döngüsünde; hem müşteri katılımıyla tasarıma dönüşen ihtiyaç ve tercihlerin belirlenmesini hemde konsept tasarımın inovasyon sürecini destekler.

Karmaşık geometri ve çoklu malzeme kullanımı, ürün, malzeme ve süreçlere birçok yeni işlevsellik ve gömülü özellikler ekleyerek, birden fazla ürün üretme ihtiyacını da azaltmaktadır. Çok malzemeli baskı stratejisiyle, 3B baskı ile üretilen ürünlerin tasarım koruması da sağlanabilir. Vaezi ve diğ. (2013)'ne göre, yüksek güvenlik gerektiren veya ticari amaçlı korunmaya ihtiyaç duyulan ürünlerin, tersine mühendislik ile üretilmesinin önüne "tasarım koruması" ile geçilebilir, koruma için her parçada benzersiz bir "parmak izi" oluşturmak mümkündür.

6.5.3 Üretim

Katmanlı üretimin sürdürülebilirlik önündeki en büyük kısıtlaması, üretim sırasında enerji yoğun olmasıdır. Yapılan araştırmalar, katmanlı üretimin genellikle geleneksel üretim yöntemlerinden enerji yoğun olduğunu göstermektedir (Sauerwein ve diğ, 2019). Ancak geleneksel üretim süreçlerinin de enerji tüketmekte olduğu unutulmamalıdır. Katmanlı üretimin süreç parametreleri (sistemin tam zamanlı kullanım durumu ve boşta olduğu durum) iyi optimize edilirse, çevresel performansın belirleyicisi olan enerji tüketimini azaltmak mümkündür. Sun ve Zhao (2017)'nin çalışmasında, ABD Enerji Bakanlığınca, katmanlı üretim yönteminin geleneksel eksiltici üretim yaklaşımına kıyasla enerji tüketimini %50 azaltabileceği bildirilmektedir. Yapılan çevresel ve ekonomik etki modeliyle 2025 yılına kadar endüstriyel üretimin enerji ve CO2 emisyonlarında, katmanlı üretimin %5'lik bir azaltma yaratabileceği tahmin edilmiştir.

Her baskı sürecinin malzeme özellikleriyle ilişkili farklı yetenekleri bulunur, dolayısıyla tasarıma uygun baskı sürecinin seçimi sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir. Örneğin; ekstrüzyon vb. işlemde polimere karıştırılabilen, genellikle UV ışığına (iç veya dış mekan) duyarlı, renkten renge anında değişebilen reçineler bulunmaktadır (Genova ve Moriwaki, 2016). Yapılan SYDD analizi; uygun baskı yöntemi seçiminin ürün kalitesini belirlemede etkili olduğu kadar çevresel etkileri optimize etmenin de ilk adımı olduğunu göstermiştir. Birden fazla malzemeyi işleme yeteneği bazı katmanlı üretim (PolyJet gibi) teknolojilerinin en temel avantajı olarak gösterilmektedir. Çok malzemeli baskı sistemleri, ürüne estetik özellik eklemenin yanı sıra hem aktif hem de statik malzemeleri hassas bir şekilde tasarlanıp basılabileceğini giyilebilir uygulamalarda doğrulamıştır. Vaka incelemesinde; çok malzemeli baskı sistemleri aynı anda farklı özelliklere (renk, sertlik, şeffaflık vb.) sahip birden fazla

malzemenin, tek bir işlemde karmaşık, kompozit parçaların oluşturulmasına olanak tanıdığı görülmüştür. Katmanlı üretimin, bu doğrudan montaj yeteneği, işlem ve üründe parça sayısını, tedarik zinciri adımlarını ve çevresel etkileri azaltır.

Katmanlı üretimin bir diğer faydası üretim sırasında özelleştirme maliyeti ve karmaşık şekillerin maliyetinin (işçilik maliyetinin) sıfır olmasıdır. Geleneksel üretimin en büyük kısıtlamalarından olan işçilik maliyeti, sosyal etki bakımından da ele alınabilir. Yüksek nitelikli tasarım ihtiyacı, tasarımcılarda yeni beceri ve yetkinlik gerekliliği, sürekli gelişimi desteklemesi bakımından olumlu katkı sağlar.

6.5.4 İşlem Sonrası – Dağıtım

İşlem sonrası, “yüzey pürüzsüzleştirme, zımpara, parlatma, tozdan arındırma, boyama vb.” işlemler enerji tüketimini artırmaktadır. Katmanlı üretimde çoğu yüzey özelliği mekanik yollarla cilalanamaz, karmaşık yüzeye sahip moda ürünlerinde yüksek yüzey kalitesi üretmek için hem zaman alıcı hem de pahalı olan manuel cilalama yapılmaktadır. Yap ve Yeong (2014)’un çalışmaları; cilalamadan sonra, estetik ve dayanıklılığı artırmak için giyilebilir polimer moda parçalarının yüzeyine krom veya elektrokaplama uygulanabildiğini göstermiştir.

Katmanlı üretim, geleneksel üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında tedarik zincirinin çeşitli aşamalarında fırsat sağlamaktadır (Baumers ve diğ., 2017). Araştırmalar, nakliyenin bir ürünün yaşam döngüsündeki karbonun yüzde 1’ini oluşturduğunu göstermekte (Fletcher ve Grose, 2012) olsada, katmanlı üretimin, merkezi olmayan veya dağıtılmış üretim modeli, tedarik zincirinde gerekli adımları azaltarak nakliye ve lojistik açısından verimlilik ve ekolojik fayda sağlamaktadır.

6.5.5 Kullanım

Tedarik zincirleri adımlarının kısalması, işgücünde daha fazla teknoloji ile ilgili beceri ihtiyacı doğurmaktadır. Çevrimiçi hizmet platformları, ücretsiz 3B model verilerinden, 3B baskı öğretime veya 3B yazıcı oluşturmaya kadar “kendin yap” ve “maker” kültürü, çeşitli sektörlerden bireyleri, üretici-tüketici grubunu desteklemektedir. Üretici-tüketici temelli girişim modeli, dijital pazarlama ve e-ticaret konularında disiplinler arası bakış, katmanlı üretimin sürdürülebilirliğine ilişkin yaratıcılık ve kendini ifade, istihdam ve emeğin dağılımı, etik ve yaşam kalitesinde artış gibi sosyal etki bakımından katkı sunmaktadır.

Çevrim içi hizmet ağları tüketici davranışını değiştirmektedir. Katmanlı üretim değişen tüketici ihtiyacına yönelik tasarımların, yerinde, düşük hacimli, kişiye özel ve verimli bir şekilde üretilmesini destekleyerek, tedarik zinciri karmaşıklığını ve envanter maliyetini azaltmaya katkı sağlamaktadır. Sürdürülebilirlik açısından daha düşük yakıt tüketimi ve emisyon ile sonuçlanan süreç ekolojik etkileri azaltmaktadır.

6.5.6 Toplama - Geri Dönüşüm - Atık

Katmanlı üretim, atık oluşumunu ortadan kaldıran üretim yaklaşımıyla sürdürülebilir üretimde devrim yaratmaktadır. Literatürde, katmanlı üretim süreçlerinden atık tozun geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması süreci kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Kumar ve Kumar, 2021; Ponis ve diğ, 2021). Atık sorunlarına artan ilgi, doğal ve endüstriyel döngüleri kapatma fırsatları, polilaktik asitten (PLA) yapılan, biyolojik olarak parçalanabilen biyopolimer/PLA'nın geliştirilmesini sağlamıştır. Katmanlı üretim süreçlerinde kullanılan malzemeler (FDM süreci hariç) geri dönüştürülmüş kaynaklardan değildir. Biyopolimer PLA malzemesinin geri dönüştürülerek FDM sürecinde, kalite kaybı oluşturmada terar tekrar kullanılması mümkündür. Reçineler ile doğrudan tekstil üzerine nakış detayları, aplikeler, boncuklar, takılar ve topuklar gibi ayakkabı bileşenleri de dahil olmak üzere 3B herhangi bir ürün oluşturulabilir. SLA ve PolyJet yöntemlerinin reçine malzemeleri geri dönüşüme uygun değildir ayrıca reçinenin yakılarak yok edilmesinde atık oluşumunu engellemek mümkün olsa da emisyon bakımından ekolojik etki barındırır.

Geleneksel giysiler; çeşitli iplik, düğme, fermuar, etiket vb.'ni içermektedir. Çoğunlukla yeterli ayrıştırma yapılamadığı için ömrünü tamamlayan geleneksel giyim-moda ürünü çöp sahalarına gönderilmektedir. Fletcher ve Grose, (2012)'a göre biyolojik bozunma, sadece önceden tasarlandığında ve planlandığında mümkündür. Dolayısıyla inovasyon aşamasından başlayarak malzeme ve süreç planları yapılması gerekmektedir.

Katmanlı üretimde, ömrünü tamamlamış ürünleri yeniden üretim potansiyeli, parça optimizasyonu ve yeniden tasarıma izin veren geometrilerin oluşturulabilmesi katmanlı üretimin faydaları arasında görülmektedir. Prototip oluşturma faaliyetinde kullanılan mikro denetleyiciler, entegre devreler, sensörler ve motorların toplama, onarım ve geri dönüşüm kapsamında hem aynı tasarımda hem de gelecekteki projelerde yeniden kullanılması mümkündür.

7. SONUÇLAR

Katmanlı üretim teknolojileri, daha sürdürülebilir bir üretimin parçası olma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, SYDD karar destek aracı kullanılarak seçilen bazı 3B baskı teknolojileri için çeşitli avantaj, zorluk ve sorunlar belirlenmiştir. Belirlenen bu konuların, yaşam döngüsü boyunca tartışılarak, alt temalar “döngüsel ekonomi yaşam döngüsü aşamaları” altında değerlendirilmesiyle araştırmaya katkı sunulmuştur. İnovasyon aşamalarında bu bulguların tasarım sürecinde uygulanabilirliği tartışılmıştır. Karar vericilerin stratejik seçimler yapma yeteneklerini artırma amacıyla bulgulara dayanarak karar vericiler için eylem önerileri oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında yanıt aranan dört araştırma sorusuna yönelik tartışmalar; sistematik literatür taraması, vaka değerlendirmesi ve sürdürülebilir yaşam döngüsü değerlendirmesi (SYDD) ile birlikte yürütülmüştür. Araştırma soruları kapsamında ulaşılan bulgular bu bölümde özetlenmektedir.

7.1 Bulgular

7.1.1 Vaka İncelemesine Dair Bulgular:

Vakalar, yapısal tasarım özellikleri bakımından kodlama şablonunda çözümlenip analiz edilmiş, sergilediği tasarım özelliği dikkate alınarak üç ana tema ve alt kategoriler altında (bölüm 6.1’de) değerlendirilmiştir. Katmanlı üretim ile üretilmiş vakalar incelendiğinde biyo-ilhamlı ve biyomimetik yapı özelliğine sahip tasarım detaylarının hakim olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, 3B baskılı giyilebilir uygulamaların ortak tasarım özellikleri “katmanlı üretim için biyomimetik tasarım” yaklaşımı altında değerlendirmek doğru olacaktır. Vakalarda görülen başlıca yapısal özellikler aşağıda ifade edilebilmiştir.

Vakalara dair bulgulara; Araştırma Sorusu 1: 3B baskı yöntemi, giyilebilir uygulamalara ne tür bir tasarım yeniliği getirmektedir? kapsamında, 43 3B baskılı moda projesinin incelenmesiyle ulaşılmıştır. Bulgular aşağıda sunulmaktadır:

7.1.1.1 Giyilebilir ürünlerde katmanlı üretimin mikro seviyede özellikleri

Katmanlı üretim, tasarımcılara yeni özellikler, formlar ve işlevsellik oluşturmaları için malzemeleri ve yapıları değiştirme ve birleştirme olanağı tanımaktadır. Çok malzemeli baskı ile parçaların mekanik özellikleri optimize edilerek, nihai parçalara ek işlevler sağlamak mümkündür.

Tablo 7.1 : Tek malzemeli tasarlanmış yapılara dair bulgular.

<i>Meso yapı, kafesli yapı hücreli yapı, meta malzeme, malzeme optimizasyonu...</i>
• Mikro seviyede, meso/yardımcı yapı, kafesli ve hücreli yapısal özellik gösterebilir. • Malzemeler, farklı işlevsellik konumlarında ve farklı form özellikleriyle tasarlanabilir. • Farklı işlevsellik konumlarına sahip tek bir yapıda, farklı form ve mekanik özellikler (meso, kafes, hücreli) oluşturulabilir. • Belirli mekanik, termal, optik ve biyolojik özelliklere sahip üç boyutlu kafesli yapılar oluşturabilir. • Farklı işlevsellik konumlarına sahip tek bir yapıda, birden fazla hücreli parça birleşimi doğrudan montajsız tasarım çözümleriyle yerleştirilebilir. • Optimize edilmiş (meso, kafesli, hücreli yapı) tasarımlar ile kütle azalması, malzeme ve enerji verimliliği sağlanabilir.

Tablo 7.2 : Çok malzemeli tasarlanmış yapılara dair bulgular.

<i>Doku, hiyerarşik yapı, malzeme optimizasyonu, işlevsellik, çoklu malzeme...</i>
• 3B çok malzemeli yapıların, mekanik özellikleri optimize edilerek, ek işlevler sağlanabilir. • Çok malzemeli baskının, en yüksek faydası tasarım özgürlüğünde yatmaktadır. • Çok malzemeli baskının tasarım özgürlüğü, tek bir parçada çeşitli şekil ve işlevsellik yaratabilir. • 3B baskılı giyilebilir ürünlerde, işlevsel olarak derecelendirilmiş, biomimetik yapılar üretilebilir. • 3B baskılı giyilebilir ürünlerde, hiyerarşik yapıli biomimetik tasarımlar üretilebilir. • 3B baskılı giyilebilir ürünler, değişken özellikli malzeme özelliği gösterebilir. • 3B baskılı giyilebilir ürünlerde elastomerik bileşenler, çok malzemeli baskıyla karmaşık işlev ve yeteneklerde üretilebilir. • Çok malzemeli katmanlı üretim, montajı ortadan kaldırır, bileşen maliyetini azaltır, hafif tasarım, minimum atık, malzeme, işçilik ve enerjide verimlilik sağlar.

7.1.1.2 Giyilebilir ürünlerde katmanlı üretimin makro seviyede özellikleri

Katmanlı üretimin, malzeme ve geometrideki tasarım özgürlükleri makro ölçekli parçalara çeşitli estetik, işlevsellik, ekonomik ve ergonomik faydalar sağlayabilir.

Tablo 7.3 : Serbest biçimli tasarlanmış geometrilere dair bulgular.

<i>İşlevsellik, ergonomi, estetik, performans, verimlilik, nesne optimizasyonu...</i>
• En büyük faydası tasarım özgürlüğü sunmasıdır. • Baskı yeteneği, yüksek karmaşıklıkta parçalar tasarlama özgürlüğü sağlar. • Tasarım özgürlüğü, biyomimetik organik şekillere ve serbest biçimli estetik tasarımlara izin verir. • Topoloji optimizasyonu, malzemede konum, kütle ve stres dağılımıyla ek işlevsellik ve enerji verimliliği sağlar.

Tablo 7.4 : Özelleştirme ve kişiselleştirme tasarımlarına dair bulgular.

<i>Özelleştirme, kişiselleştirme, renk, süsleme, ısmarlama, kullanıcı-ürün ilişkisi...</i>
• Özelleştirme ve kişiselleştirme özgürlüğü en yüksek faydaları arasında görülmektedir. • Bileşenlerin geometrisine, voksel seviyesinde renk ve şeffaflık geçişleri tanımlayabilir. • Çok malzemeli baskı ile farklı özelliklere sahip birden fazla malzemeyi (sertlik veya renk geçişlerinde) aynı anda bir yapı içinde oluşturabilir. • Tek bir işlemde karmaşık, kompozit parçaları ve renkli parçaları üreterek, işlem sonrası boyama, dekorasyon vb. adımlarını azaltabilir. • Çok malzemeli baskı ve tekstil kombinasyonu, renk ve ışık efektleri içeren yapılar oluşturabilir. • 3B baskı yeteneği ve malzeme inovasyonu doğrudan kumaş üzerine polimer baskının önünü açmıştır. • Doğrudan tekstil yüzeyine 3B polimer baskı ile giyilebilir uygulamalarda düğme, nakış, aplike gibi çeşitli süsleme detayı ve dekoratif özellik uygulanabilir. • Zamanda, malzemede veya verimsizlikte önemli artışlar olmaksızın özelleştirilmiş bileşenleri toplu olarak üretebilir. • Kişiselleştirmede, kullanıcı-ürün ilişkisi, katmanlı üretimin tasarım stratejisi olarak görülmektedir. • Müşteri merkezli üretim yaklaşımı, ürün maliyetine bir yük eklenmeden, bireysel ihtiyaç ve tercihlerin kişiselleştirilmiş ürün ve hizmetlere dönüşmesini sağlar. • Bireysel tercih ve kişisel verilere dayalı kişiselleştirilmiş ve seri özelleştirilmiş tüketici ürünleri (ortez, protez, işitme cihazı, gözlük, ayakkabı, vb. aksesuar) üretebilir.

7.1.1.3 Giyilebilir ürünlerde katmanlı üretimin ürün seviyesinde özellikleri:

Katmanlı üretim, parçalara yeniden yapılandırma, ürüne gömülü parçalar ve doğrudan montaj üretimi gibi ek tasarım özgürlükleri ve fırsatları sağlayabilir. Katmanlı üretim, geleneksel üretim süreciyle üretilmesi mümkün olmayan tek bir parçada çeşitli şekil ve işlevi üretebilir, bileşenleri doğrudan tasarıma baskı sırasında gömebilir.

Tablo 7.5 : Doğrudan montaj tasarımlarına dair bulgular.

<i>Doğrudan montaj, zincir posta bağlantı, mafsallı, menteşeli yapı, yaylı mekanizma...</i>
• Karmaşıklıkta yüksek parça ve bileşenleri doğrudan montaj yeteneği, katmanlı üretimin yüksek faydaları arasında görülmektedir. • Zincir-posta bağlantı, sert bir malzemeyle üretilecek giysiler için en belirgin örgü benzeri yapı oluşturur. • Doğrudan baskı yatağında tek bir nesnede; “yaylı mekanizma, dişli, mafsallı, menteşe gibi” hareketli veya hareketli parça içeren tasarımları üretebilir. • Az parça ve az malzeme ile basit montajları üretebilir. • Geometride tasarım özgürlüğü yüksek, karmaşık ve optimize edilmiş bileşenleri, montajsız üretebilir. • Doğrudan montaj ile işlevselliği yükselttiği gibi envanter riskini ve maliyetleri düşürebilir.

Tablo 7.6 : Gömülü nesne, akıllı yapıların tasarımına dair bulgular.

<i>Gömülü nesne, e-bileşen, Aktif madde, dinamik malzeme, akıllı giyim, hibrit yapı...</i>
• Geleneksel üretim süreçleriyle üretilmesi mümkün olmayan; tek bir parçada çeşitli şekil, işlev “e-bileşen, mekatronik cihaz vb.” içeren tasarımları doğrudan baskı sırasında ürüne gömebilir. • Dinamik malzeme hesaplaması ile duyarlı bileşenler ile hibrid materyaller oluşturulabilir. • 4B baskı ile akıllı tekstil veya giyimde bileşen sayısını azaltan, montaj süresini kısaltan hibrit yapılar, iyileştirilmiş yüzey kalitesi sağlanabilir. • 4B baskı, hibrit yapılarda kütle azalması ve maliyet verimliliği sağlar. • Serbest karmaşıklık, bileşenlerde gücü en üst düzeye çıkarır, ürünlerin performansının iyileştirir, malzeme akışlarını, tedarik zinciri adımlarını, enerji verimliliği ve ekolojik riski azaltır.



Şekil 7.1 : Katmanlı üretim tasarımı, “3B Baskılı Giyilebilir” alanı tasarım kavramları.

7.1.2 Sistematik literatür taramasına dair bulgular

Sistematik literatür taramasına dair bulgulara; Araştırma sorusu 2: Katmanlı üretim, çok malzemeli, çok işlevli, özelleştirilmiş parçalar üretebilmesi bakımından, sürdürülebilir bir üretim yöntemi midir? kapsamında 43 akademik makalenin incelenmesiyle ulaşılmıştır. Katmanlı üretim, 3BB couture moda ve sürdürülebilirlik ile ilgili hakemli çalışmaların bulguları Tablo 7.7’de özetlenmiştir.

Tablo 7.7 : Sistematik literatür taramasına dair bulgular tablosu.

<i>Sistematik bir literatür taraması...</i>
• Akademik literatür ile uygulama literatürü analizi, 2010-2021 arası her iki alanda ilgi artışı göstermektedir. • Akademik yayınların 2013’de başlayan izleri, 2015’de dört kat, 2017’de dokuz kat artışla, akademik alanda ilginin devamını göstermektedir. • Akademik yayınların izlerinin görüldüğü 2013 yılı, katmanlı üretimin hype döngüsünde pik yaptığı zamana denk gelmektedir. • Katmanlı üretim 2013 hype döngüsünde “kurumsal 3B baskı, tüketici sınıfı 3B baskı ve 3B biyo-baskı” olarak üç sınıfa ayrılması alanın genişlediğini göstermiştir (Şekil 4.1). • Akademik yayınlarda 4B baskı izleri 2014’de, 4B biyo-baskı 2016 hype döngüde görülmeye başlamıştır. • Vakalara dair 2015 yılında pik yaşandığı, sonraki yıllarda 2020’li yıllara doğru düşüş kaydedilmiştir. • Son yıllarda “sistematik literatür taraması” çalışmalarının da eklenmesiyle, katmanlı üretimin bilimsel araştırma alanında genişleme devam etmektedir. • Akademik alanda KÜ’in, sürdürülebilirlik ile ilgili temaları 2015’de, döngüsel ekonomi ile ilgili temaları ise 2019’da görülmeye başlamış, 2020’lerde araştırma sayılarında yaşanan artış, katmanlı üretimin sürdürülebilirliğine önemi göstermektedir. • 3B baskılı giyilebilir uygulamalarda yüksek oranda kullanımı nedeniyle bilimsel yayınlarda en çok incelenen malzeme “polimerler” olmuştur. • Polimerler, doğada bozunmadığı için olumsuz ekolojik etkileri nedeniyle yoğun araştırma odağındadır. • Akademik bağlamın son yıllarda doğrusal al-yap-at modelinin aksine, döngüsel ekonomiye, ürünlerin, bileşenlerin ve malzemelerin R stratejilerine odaklanıldığı, ekolojik değerin korunmasına daha fazla önem verildiği görülmektedir. • Son yıllarda, 3R’lere (azalt, yeniden kullan ve geri dönüştür) ilaveten, onarım, yeniden tasarım ve yeniden üretim amacını da göz önünde bulunduran, 6’Rye odaklanma görülmektedir. • R stratejilerinde, 10R’ye kadar yeni kavramın ortaya çıktığı görülmektedir. • Akademik bağlamda giderek daha fazla sayıda vakada, döngüsel malzeme ve teknoloji araştırılmaktadır. • Daha iyi geri dönüştürülebilirlik, yeniden kullanım veya döngüsellığe sahip malzeme ve süreçlere doğru yaşanan tema değişimi, katmanlı üretimin gelecek kullanımına dair iyileştirici potansiyel etkiler barındırır. • Katmanlı üretim, diğer endüstriyel döngülerden gelen atıkların dahil edildiği veya yeniden kullanıldığı, endüstriyel simbiyozu teşvik eden malzeme akışlarının optimizasyonuna izin vermektedir. • FDM teknolojisinin geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı, kendisinin atık plastiklerle bir geri dönüşüme hizmeti sağlayabilir olması, döngüsel ekonomi çerçevesinde giderek ilgi artışı yaratmaktadır.

Tablo 7.7 (Devam) : Sistemantik literatür taramasına dair bulgular tablosu.

<i>Sistemantik bir literatür taraması...</i>
• Sürdürülebilirlik ve döngüsel tasarım yaklaşımının uygulanmasında ve geliştirilmesinde tasarım süreci kadar, tasarımcılara da önemli rol düşmektedir. • KÜ'nün yüksek nitelikli tasarım ihtiyacı bir dizi disiplinler arası beceri gerekliliği oluşturmaktadır. • İnovasyon aşamasından başlayarak, ürün tasarımına yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirlik etkilerinin entegrasyonu, tasarımcılara farkındalık yanında ilgili konularda yeni beceri (e-ticaret, sayısal pazarlama, malzeme bilgisi, hesaplamalı tasarım vb.) gerekliliği oluşturmaktadır. • Sayısal teknolojilerin katkısıyla, 3B baskı alanına odaklanan yeni hibrit tasarım uygulayıcıları, “malzeme tasarımcıları” ortaya çıkmaktadır.

7.1.3 3B CAD ve 3BB entegrasyonuna dair bulgular

3B CAD ve 3BB entegrasyonuna dair bulgulara; Araştırma Sorusu 3: Tasarım sürecinde, nesnel ve görselleştirme becerilerinin kombinasyonu bakımından, katmanlı üretim ve 3B baskı tasarımı için 3B CAD araçlarının olanakları nelerdir? kapsamında ulaşılmıştır. Bulgular aşağıda sunulmaktadır:

Katmanlı üretim, karmaşık ve özelleştirilmiş ürün üretiminde, sayısal tasarım, simülasyon, sayısal üretimin ve hizmet akışının entegre edildiği yeni bir tasarım ve üretim paradigmasıdır. Katmanlı üretimin tüm avantajlarından yararlanmak için tasarımcıların, yüksek nitelikli, katma değerli tasarım çözümleri oluşturmaya odaklanırken farklı tasarım düşünceleri geliştirmeyi öğrenmesi gerekmektedir. Tasarım teorileri, süreçleri, yöntemleri, araçları, teknikleri ve bu sistemlerdeki malzeme, geometri ile kalite arasındaki ilişkinin geliştirilmesi gerekmektedir. Tasarım sürecinde bilinçli seçimlerle, analiz ve optimizasyon araçlarının tasarım uygulamalarına aktarılması gerekmektedir. Böylece, her düzeydeki tasarım disiplininde “Katmanlı üretim için tasarım” yaklaşımı, ilgili eğitime uyarlanabilir.

Bu çalışmada, sürdürülebilir tasarım yöntemlerinin ve araçlarının, ürün tasarımını geliştirmeye nasıl entegre edilebileceğine dair bir takım sorular eşliğinde tartışmalar gerçekleştirilmiştir. Sürdürülebilirliğin ürün yaşam döngüleri boyunca sağladığı iyileştirmelerin, ürünlere ve tasarım süreçlerine entegre edilmesinde fırsatlar belirlenmiştir. Tamamen sayısal, veri odaklı tasarım, üretim ve hizmet akışı, ürün izlenebilirliği ve paydaşlar arasında veri alışverişi, birçok kaynaktan gelen verilerin ürünün yaşam döngüsü boyunca yönetilmesiyle sistem sürdürülebilirliği sağlamak da mümkündür.

7.1.4 SYDD analizine dair bulguları

SYDD analizine dair bulgulara; Araştırma Sorusu 4: Katmanlı üretimin avantajları ve kısıtlamaları nelerdir? kapsamında, “SLA, CDLS, SLS, FDM ve PolyJet” teknolojilerinin incelenmesiyle ulaşılmıştır. Bulguları SP’ler eşliğinde özetleyen bir liste aşağıda sunulmuştur.

Tablo 7.8 : SYDD analiziyle ulaşılan bulguların özet tablosu.

<i>SYDD analiziyle ulaşılan bulguların özeti...</i>
SP1 Hammadde: Yenilenebilir veya geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı.
SP1 Tasarım: Optimizasyon ile malzeme ve enerji verimliliğini artırmak, yeniden tasarım, yeniden üretimin, geri dönüşümün önünü açmak.
SP1 Üretim: Süreç optimizasyonu ile malzeme ve enerji verimliliği sağlamak.
SP1 İşlem sonrası-Dağıtım-Kullanım: Optimizasyon ile işlem sonrası ihtiyacı ve lojistikte adımları azaltarak, enerji verimliliği sağlamak.
SP1 Ömrün sonu: Geri dönüşüm stratejileri sağlanmak.
SP2 Hammadde: Doğada bozunamayan (fosil bazlı) hammaddelerden kaçınmak.
SP2 Tasarım: Ürün kullanım amacı ve yeniden kullanım stratejisi oluşturmak.
SP2 Üretim: Yaşam döngüsü boyunca yenilenebilir enerji kullanımını teşvik.
SP2 İşlem sonrası-Dağıtım-Kullanım: Tedarik zincirinde işbirliği.
SP2 Ömrün sonu: Atığa gömülü olarak geri kazanılan değeri artırmak.
SP3 Hammadde: Biyomalzeme kullanımının artırılması.
SP3 Tasarım: Ürün ömrünü uzatma, optimizasyonla atık ve emisyon azaltmak.
SP3 Üretim: Yaşam döngüsü boyunca yenilenebilir enerji kullanımını teşvik.
SP3 İşlem sonrası-Dağıtım-Kullanım: Lojistik seçenekleriyle atık ve emisyonu azaltmak.
SP3 Ömrün sonu: Dağıtılmış üretim, tedarik zinciri etkilerinin azaltılması.
SP4 Hammadde: Satın alma yönergesi, işbirliği ve tedarikçi seçiminde sürdürülebilirlik.
SP4 Tasarım: Nitelikli tasarımcı ihtiyacı, yeni beceri ve yetkinlik gereği, sürekli gelişim.
SP4 Üretim: Kullanıcı katılımı, üretici-tüketici modeli, küresel üretimin geliştirilmesi.
SP4 İşlem sonrası-Dağıtım-Kullanım: Tersine lojistik seçeneklerinin geliştirilmesi.
SP4 Ömrün sonu: Malzeme geri dönüşüm ve yeniden kullanım önlemleri.

SYDD sürecinde, seçilen katmanlı üretim teknolojilerinin her bir yaşam döngüsü aşamasında sosyal ve ekolojik SP’lerle uyumluluğu araştırılmıştır. Sonuç, her bir hücrenin bir dizi soru neticesini yansıttığı, ana etkilerin nerede olduğunu hemen görmeyi sağlayan renk matrisinde kodlanarak Çizelge 7.1’de sunulmuştur.

Çizelge 7.1 :Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirme-SYDD Sonuçları Renk Matrisi.

Yaşam Döngüsü Aşamaları	Sürdürülebilirlik Prensipleri			
	SP 1	SP 2	SP 3	SP 4
Hammadde				
Tasarım				
Üretim				
İşlem sonrası				
Kullanım				
Ömrün sonu				

Çok Kötü	Oldukça Kötü	Kötü	İyi	Oldukça İyi	Çok İyi
----------	--------------	------	-----	-------------	---------

7.2 Strateji ve Eylem Önerileri

Tablo 7.9’da görüleceği gibi bu bölümde bir takım önerilerin sunulduğu, kontrol listesine ulaşılmıştır. Stratejik sürdürülebilirlik perspektifiyle güçlü ve zayıf yönleri belirlenen seçilen katmanlı üretim teknolojilerinin, ürün inovasyon sürecinde sosyal ve ekolojik sorunları nasıl ele alınacağına yönelik öneriler sunulmaktadır.

Tablo 7.9 : Katmanlı üretim uygulamaları için inovasyon aşamasında strateji ve eylemler çizelgesi.

Katmanlı Üretim Uygulamaları için Strateji ve Eylemler	
Hammade	Katmanlı üretimin sosyal ve ekolojik etkileri olan malzemeleri kullanma riski nedeniyle, değer zincirindeki tedarikçilerle sürekli işbirliği ile malzeme inovasyonu takip edilmelidir. Tedarik zinciri içinde sürekli işbirliği.
Tasarım	Katmanlı üretim ürünlerinin ve malzemelerinin yaşam döngülerinin etkileri dikkate alınarak tasarlanma gerekliliği. Tasarımcı ve mühendislerde katmanlı üretim uzmanlık yetkinliğinin artırılması.
Üretim	Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım durumu takip edilmesi. Üretim aşamasında döngüler oluşturma (tozun %100 yeniden kullanımı).
İşlem Sonrası, Dağıtım	İşlem sonrası ve kullanım aşamasında (yüzey, yapı) sürdürülebilirlik performansı ile ilgili ürün tasarımının optimize edilmesi. Katmanlı üretimin geniş uygulama alanı ve daha kaliteli parçaların geliştirilmesi.
Kullanım	Değişen tedarik zincirleri adımlarına uyum açısından teknolojiyle ilgili beceri kazanımıyla sürekli gelişim. Çevrim içi hizmet ağları etkisiyle oluşan tüketici davranışı değişikliğine uyum.
Toplama, Geri dönüşüm, Atık	Sürdürülebilir hammaddeler elde etmek ve malzeme kritikliğinden kaçınmak için tedarikçilerle iş birliği. Uygun geri dönüşüm stratejisi belirlenmesi.

Katmanlı üretimin, inovasyon aşamasından, tasarım sürecine nasıl dâhil edilebileceği, uygulanması gereken kriterler, karar desteği vermesi bakımından kontrol listesi dikkat edilmesi gereken noktaları sunmaktadır. Burada temel amaç, eylem önerileri ile tasarımcıların ve karar vericilerin, kaynakların, inovasyonun ve çabanın hedeflenmesi gereken noktalara dair bir kılavuz sağlayarak ürünün sürdürülebilir gelişme potansiyeline odaklanma sağlamaktır.

7.3 Gelecek Çalışma Önerileri

Bu çalışmada, SYDD karar destek aracı kullanılarak seçilen bazı 3B baskı teknolojileri için çeşitli avantaj, zorluk belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, stratejik sürdürülebilirlik perspektifiyle sosyal ve ekolojik sürdürülebilirlik ilkelerinin, ürün geliştirme odağıyla inovasyon sürecine entegrasyonu değerlendirilmiştir. Ayrıca couture moda alanında katmanlı üretim teknolojileriyle üretilmiş projeler, yapısal tasarım özellikleri bakımından değerlendirilerek katmanlı üretimin ve malzeme inovasyonunun bu alana sağladığı tasarım olanakları belirlenmiştir. Tüm bu bulgulara dayanarak karar vericiler için eylem önerileri oluşturulmuş, inovasyon aşamalarında bu bulguların tasarım sürecinde uygulanabilirliği tartışılmıştır.

Ayrıca çalışma kapsamında, SYDD aracının, inovasyon aşamalarında teknolojilerin stratejik sürdürülebilirlik değerlendirmesinde uygulanabilirliği ve kullanışlılığı test edilerek doğrulanmıştır. Süreç geneldir, ancak kriterler katmanlı üretim alanı sürdürülebilirlik taleplerine ve eğilimlerine dayandığı için alana özeldir. Katmanlı üretim teknolojilerinin sürdürülebilirlik performansını iyileştirmek için araştırılabilir birçok alan bulunmaktadır. Örneğin, katmanlı üretim alanında ekonomik veya sosyo-ekonomik sürdürülebilirlik ilkelerinin etkilerine yönelik çalışmalar geliştirilebilir.

Örneğin, farklı araçlar veya yaklaşımlar kullanarak, katmanlı üretim alanında diğer endüstri sektörleriyle (medikal, ayakkabı, kuyumculuk vb.) işbirliği yapılabilir. KÜ teknolojileriyle ilgili sosyal sürdürülebilirlik yönlerini daha iyi anlamak için yenilenebilir ve geri dönüştürülmüş malzemelerle ürünler geliştirilerek, üretilen bileşenlerin kalitesi kapsamlı bir şekilde araştırılabilir. Katmanlı üretim ile ilgili daha verimli malzeme kullanımı ve düşük etkili enerji tüketimi, atık önleme, üretim süresi, kalite, sağlık, eğitim vb. açısından katmanlı üretim, tasarımdan üretim süreçlerine kadar incelenebilir.

7.4 Sonuç

Bu çalışmada, sürdürülebilirliğin kavramsal tasarım süreciyle entegrasyonuna yönelik avantaj ve zorlukları ele alınmıştır. Çıktılar; ürün inovasyon sürecine odaklanarak stratejik bir sürdürülebilirlik perspektifinin, sürece nasıl dâhil edilebileceği ve uygulanabilirliğine ilişkin sorular eşliğinde, sürdürülebilir ürün geliştirme alanına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, katmanlı üretimin ürün ve malzeme yaşam döngüleri boyunca getirdiği sürdürülebilirlik avantajlarının yanı sıra söz konusu faydaların gerçekleştirilmesi için üstesinden gelinmesi gereken zorlukların belirlenmesi de sağlanmıştır. Katmanlı üretim teknolojileri daha sürdürülebilir üretim ve tüketim için fırsatlar yarattığı için daha sürdürülebilir çözümler sunduğu açıktır.

Katmanlı üretim giyilebilir ürünlerde, dinamik materyal davranışlarının geliştirilmesine, 4B baskıyla form, geometri ve maddeyi bilgilendiren malzeme özelliklerinde gerçek zamanlı değişikliklere, yapısal davranışları anlama ve kullanmaya odaklanmaktadır. Bu tasarım yaklaşımı, giyilebilir parçaların geometri ve yapılarını, malzeme verimliliğini daha da arttıracak şekilde uyarlanmasını olanaklı kılmaktadır. Hibrit malzeme yapılarına olanak tanıyan bu yeni tasarım yaklaşımı daha önce tasarımı ve üretimi mümkün olmayan ürünlerin geliştirilmesine, yeni malzemeler ile ilgili deneysel yöntemler oluşturulmasına fırsat vermektedir.

Katmanlı üretim yeteneklerinin, moda, sanat, teknoloji ve tasarım dünyalarını birbirine bağlayan yeni şekillendirme yapıları, etkileşimli sistemler, duyarlı ve dinamik malzeme özellikleri, neredeyse gerçeğe yakın davranışlar sergileyebildiği görülmektedir. Hibrit malzeme yapıları, tasarımın form ve geometrisini etkileyerek, ürünlerde malzemeyi programlama olanağıyla, tasarım, üretim ve montaj süreçlerini bütünleştirmektedir. Katmanlı üretim, özelleştirilmiş ürünleri, prototip oluşturma gereksiz kılındığı, geleneksel ürün geliştirme adımlarının atlandığı, tasarımdan üretime doğrudan geçişe imkan veren tasarlama ve üretme sürecinin önünü açmıştır.

Katmanlı üretim süreçleri ve vakalar incelendiğinde, ürün yaşam döngüleri boyunca ekolojik etkileri düşürme potansiyeliyle; yeniden tasarım (redesign), parçaları iyileştirme ve onarma (recover), yeniden üretme ve yenileme yeteneği (re-manufacturing), geri dönüştürülebilir malzemeleri kullanma (recycle) gibi “R stratejileriyle” etkileşimi görülmüştür.

Katmanlı üretim, verimli kaynak kullanımı (hafif bileşen) yoluyla olumsuz ekolojik etkileri azaltabilmekte daha iyi sürdürülebilir performans gösterebilmektedir. Kaynak tüketimini (malzeme, enerji) azaltan uygulamaları desteklemesiyle, çok malzemeli, çok işlevli, monolitik, yüksek karmaşıklıkta parçaların özelleştirilmesiyle tasarım ve üretimin ekolojik ve sosyal etkilerini azaltabilmektedir. Katmanlı üretim süreç optimizasyonu ile enerji tüketimini azaltmak mümkündür. Ayrıca, geleneksel üretim süreçlerinin de enerji tüketmekte olduğu unutulmamalıdır. Katmanlı üretimin en büyük avantajı, özelleştirilme ve kişiselleştirmede işçilik maliyetinin sıfır olmasıdır. Buda geleneksel üretim süreçlerine oranla tasarruf sağlamaktır.

Katmanlı üretim, dağıtılmış üretimi benimsemesiyle daha az atık, gelişmiş süreç verimliliği ve ulaşımda enerji tasarrufu ve emisyonları azaltma gibi birçok ekolojik fayda sunmaktadır. Tedarik zincirini bozma yeteneği ve çevrimiçi pazarlardan tasarım dosyalarına ulaşım veya kişiselleştirilmiş ürünlerin yerel olarak üretilmesi, kullanıcı katılımını teşvik, üretici-tüketici modelinin önünü açması diğer avantajları arasında gösterilebilir.

Yeni bir üretim paradigması olarak katmanlı üretimin tasarım ve üretim alanına getirdiği üretim dönüşümü, hem tasarım aşamasında hem de malzeme kullanımında sürdürülebilir çözümleri desteklemektedir. Katmanlı üretimin, biyo-esinli ve biyomimetik tasarım yaklaşımı, doğrudan tekstil üzerine polimer baskı yeteneği, geçmişin katı mekanik yapılarından, yeni bir üretim paradigması ile yumuşak, esnek, organik temsiller üzerine yaşanan gelişmelere ilerleme göstermiş ayrıca etkileşimli dinamik tasarım, interaktif giyim, interaktif mimari alanındaki yeni tasarım yaklaşımlarına da imkân sunmuştur.



KAYNAKLAR

- Abedini, A., Li, W., Badurdeen, F. & Jawahir, I. S.** (2020). A metric-based framework for sustainable production scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, pp.74-185.
- Aydin, R. & Badurdeen, F.** (2019). Sustainable product line design considering a multi-lifecycle approach. *Resources, Conservation & Recycling*, 149, pp.727-737.
- Badurdeen, F., Aydin, R. & Brown, A.** (2018). A multiple lifecycle-based approach to sustainable product configuration design. *Journal of Cleaner Production*, 200, pp.756-769.
- Bartlett, A. A.** (1998). Reflections on sustainability, population growth, and the environment. *Renewable Resources Journal*, Vol.15, No.4, pp.6. Retrieved from https://www.albartlett.org/articles/art_reflections_part_1.html#meaning
- Baumers, M., Duflou, J. R., Flanagan, W. & Gutowski, T. G.** (2017). Charting the environmental dimensions of additive manufacturing and 3D printing. *Journal of Industrial Ecology*, V.21, No. S1.
- Benyus, J. M.** (2009). *Biomimicry, Innovation Inspired by Nature*. Harper Collins e-books.
- Blume, R. & Everard, M.** (2018). Legacy additives in rigid PVC and progress towards sustainability. *A closer look at recycling and the circular economy in Europe*, February 2018. Retrieved from www.thenaturalstep.org/chemicals.
- Broman, G. I. & Robert, K. H.** (2017). A framework for strategic sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, V.140, pp.17-31.
- Caradonna, J. L.** (2014). *Sustainability: A History*. New York: Oxford University Press.
- Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrímsson, G. J. & Thiede, S.** (2015). Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. *Journal of Cleaner Production*, V. 107, pp.615-625.
- Chou, S. Y.** (2019). The fourth industrial revolution: Digital fusion with internet of things. *The Fourth Industrial Revolution. (Fall 2018/Winter 2019) The Journal Of International Affairs*, Vol. 72, No.1., pp.107-120.
- Colorado, H. A., Velasquez, E. I. G. & Monteiro, S. N.** (2020). Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*, 9:4, pp.8221-8234.

- Cruz Sanches, F. A., Boudaoud, H., Camargo, M. & Pearce, J.** (2020). Plastic recycling in additive manufacturing: a systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, V. 264. 121602.
- Cunha, P. F. & Maropoulos, P. G.** (2007). Digital Enterprise Technology: Perspectives and Future Challenges. *Springer Science+Business Media, LLC*.
- Davis, N. & Philbeck, T.** (2019). The Fourth Industrial Revolution: Shaping A New Era. *The Fourth Industrial Revolution. (Fall 2018/Winter 2019) The Journal Of International Affairs*, Vol. 72, No.1., pp.17-22
- Despeisse, M., Mbaye, F., Ball, P. D. & Levers, A.** (2012). The emergence of sustainable manufacturing practices. *Production Planning & Control*, 23:5, pp.354-376.
- Djankov, S. & Saliola, F.** (2019). The changing nature of work. *The Fourth Industrial Revolution. (Fall 2018/Winter 2019) The Journal Of International Affairs*, Vol. 72, No.1., pp.57-74.
- Doubrovski, Z., Aberle, N., Schuddeboom, P., Stokhuijzen, D., Herpen, I. van & Verlinden, J.** (2018). Fabricating the Foliage Dress: Computational Design in Couture. *SCF'18, June*, pp.17-19, Cambridge, MA, USA.
- Everard, M. & Blume, R.** (2020). Additive Sustainability Footprint: Rationale and Pilot Evaluation of a Tool for Assessing the Sustainable Use of PVC Additives
- Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S. & Iribarne, M.** (2015). Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal*, V.21, No.1, pp.14-33.
- Faludi, J. & Agogino, A. M.** (2018). What Design Practices Do Professionals Use For Sustainability and Innovation? International Design Conference-Design 2018. Sociotechnical Issues In Design, pp.2633-2644.
- Faludi, J., Hoffenson, S., Kwok, S. Y., Saidani, M., Hallstedt, S. I., Telenko, C. & Martinez, V.** (2020). Aresearch roadmap for sustainable design methods and tool. *Sustainability*, V. 12, 8174.
- Farahi, B.** (2016). Caress of the Gaze: A Gaze Actuated 3D Printed Body Architecture. ACADIA 2016 Posthuman Frontiers: Data, Designers and Cognitive Machines. *Proceedings of the 36th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, pp.352-361.
- Farahi, B.** (2017). Material behaviours in 3D printed fashion items. 3D-Printed Body Architecture. *Architectural Design*, November/December 2017, Profile No pp.250, 84
- Faulkner, W. & Badurdeen, F.** (2014). Sustainable value stream mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. *Journal of Cleaner Production*, 85, pp.8-18.
- Fletcher, K. & Grose, L.** (2012). *Fashion & Sustainability, Design for Change*. London: Laurence King Publishing Ltd.
- Fonseca, D. A. & Simoes, F. J. P.** (2019). Direct Digital Manufacturing in the Context of a Circular Economy. *Applied Mechhatics and Materials*, V. 890, pp.21-33.

- Ford, S. & Despeisse, M.** (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, V. 137, pp.1573-1587.
- Ghobadian, A., Talavera, I., Bhattacharya, A., Kumar, V., Garza-Reyes, J. A. & O' Regan, N.** (2020). Examining legitimatisation of additive manufacturing in the interplay between innovation, lean manufacturing and sustainability. *International Journal of Production Economics* Vol.219, pp.457-468.
- Gardan, J.** (2019). Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends. *Virtual and Physical Prototyping*, 14:1, pp.1-18.
- Genova, A. & Moriwaki, K.** (2016). *The Integration of Technology into Fashion. A Guide to Materials and Applications*.
- Guo, D., Ling, S., Li, H., Ao, D., Zhang, T., Rong, Y. & Huang, G. Q.** (2020). A framework for personalized production based on digital twin, blockchain and additive manufacturing in the context of Industry 4.0, *16th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*.
- Hallstedt, S. I., Thompson, A. W., Isaksson, O., Larsson, T. C. & Ny., H.** (2013). A decision support approach for modeling sustainability consequences in an aerospace value chain. *Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences / Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2013, Portland, Oregon, USA*.
- Hallstedt, S. I.** (2017). Sustainability criteria and sustainability compliance index for decision support in product development. *Journal of Cleaner Production*, V.140, pp.251-266.
- Hausman, K. K. & Horne, R.** (2014). *3D Printing For Dummies*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Hapuwatte, B. M. & Jawahir, I. S.** (2021). Closed-loop sustainable product design for circular economy. *Wiley, Journal of Industrial Ecology, Methods, tools, data, and software*, Vol. 25, pp.1430-1446.
- Hull, C. W.** (2015). The birth of 3D printing. *Research-Technology Management*, 58:6, pp.25-30.
- Jasanoff, S. & Kim, S. H.** (2015). *Dreamscapes of Modernity: Sociotechnical Imaginaries and the Fabrication of Power*. The University of Chicago Press Chicago and London.
- Jayal, A. D., Badurdeen, F., Dillon, Js. O. W. & Jawahir, I. S.** (2010). Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2, pp.144-152.
- Jensen, M. C.** (1993). The modern industrial revolution, exit, and the failure of internal control systems. *The Journal of Finance*, Vol. XVIII, No. 3, pp.831-880. Blackwell Publishing Ltd.
- Jovane, F., Koren, Y. & Boer, C. R.** (2003). Present and future of flexible automation: Towards new paradigms. *ITIA-CNR, Institute of Industrial Technologies and Automation – National Research Council of ITALY*.

- Jovane, F., Yoshikawa, H., Alting, L., Boer, C. R., Westkamper, E., “...” & Paci, A. M.** (2008). The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing. *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 57, pp.641-659.
- Jovane, F., Westkamper, D. & Williams, D.** (2009). “Leadership of European manufacturing industry” and “Towards competitive sustainable manufacturing”. *The ManuFuture Road: Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing*.
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., “...” & Noh, S. D.** (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 3, No. 1, pp.111-128.
- Kellens, K., Baumers, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R. & Duflou, R.** (2017). Environmental Dimensions of Additive Manufacturing. *Journal of Industrial Ecology, Research and V.* 21, No. S.1,
- Khare, V., Sonkaria, S., Lee, G. Y., Ahn, S. H. & Chu, W. S.** (2017). From 3D to 4D printing - design, material and fabrication for multi-functional multi-materials. *International Journal Of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 4, No. 3, pp.291-299.
- Khoo, Z. X., Teoh, J. E. M., Liu, Y., Chua, C. K., Yang, J. A., Leong, K. F. & Yeong, W. Y.** (2015). 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 10:3, pp.103-122.
- Khosravani, M. R. & Reinicke, T.** (2020). On the environmental impacts of 3D printing technology. *Applied Materials Today*, V. 20
- Koerner, J.** (2017). Digitally Crafted Couture. 3D-Printed Body Architecture. *Architectural Design*, November/December 2017, Profile No 250.
- Kravchenko, M., Pigosso, D. C. A. & McAloone, T. C.** (2020). Circular economy enabled by additive manufacturing: potential opportunities and key sustainability aspects. *NordDesign, Kgs. Lyngby, Denmark*.
- Kumar, P. & Kumar, R.** (2021). Chemical sustainability issues in manufacturing of 3d printed parts: A state of art review. *Materials Today: Proceedings*, 37, pp.3251-3255
- Kwak K., Kim., W. & Park, K.** (2018). Complementary multiplatforms in the growing innovation ecosystem: Evidence from 3D printing technology. *Technological Forecasting & Social Change*, 136, pp.192-207.
- Kwon, Y. M., Lee, Y-A. & Kim, S. J.** (2017). Case study on 3D printing education in fashion design coursework. *Fashion and Textiles*, Vol. 4, No.26.
- O’Brien, C.** (1999). Sustainable production – a new paradigm for a new millennium. *Int. J. Production Economics*, 60-61, pp.1-7.
- Leach, N.** (2017). What is 3D-Printed Body Architecture?, 3D-Printed Body Architecture. *Architectural Design*, November/December 2017, Profile No 250, p.6
- Lee, S.** (2005). Fashioning the future, Tomorrow's wardrobe. By Thames & Hudson Ltd, London.

- Liedtke, E.** (2022). The Perfect Fit: Carbon and adidas Collaborate to Upend Athletic Footwear. Retrieved from <https://www.carbon3d.com/resources/adidas/>
- Li, J.** (2015). *A Comparative Meta-Life Cycle Inventory Analysis: Energy and Water Consumption of 3D Printing Methods vs. Conventional Manufacturing in Clothing Production*. Digital access to scholarship at Harvard Library. Retrieved from <http://nrs.harvard.edu/urn-3:HUL.InstRepos:24078377>.
- Lipson, H. & Kurman, M.** (2013). *Fabricated: The New World of 3D Printing*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Machado, C. G., Despeisse, M., Winroth, M. & Silva, E. H. D. R.** (2019). Additive manufacturing from the sustainability perspective: proposal for a self-assessment toll. *52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP 81*, pp.482-487.
- ManuFUTURE High-Level Group** (2018, December). *ManuFuture - vision 2030: Competitive, sustainable and resilient European manufacturing*. ManuFuture Implementation Support Group.
- ManuFUTURE High-Level Group** (2019, December). *ManuFuture - Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA) 2030: For A Competitive, Sustainable And Resilient European Manufacturing*. ManuFuture Implementation Support Group.
- Metta, H. & Badurdeen, F.** (2013). Integrating sustainable product and supply chain design: Modeling issues and challenges. *IEEE Transactions On Engineering Management, Vol. 60, No. 2*.
- Ny, H.** (2009). Strategic life-cycle modeling and simulation for sustainable product innovation. *Progress in Industrial Ecology-An International Journal, V.6, No.3*
- Olgun, C.** (2008). Nitel araştırmalarda içerik analizi tekniği. *Sosyoloji Notları Dergisi, Sayı 4 ve 5*, pp.66.
- Oxman, N.** (2010). *Material-based Design Computation* (Ph.D. thesis). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge & Boston.
- Oxman, N.** (2014). *Material Ecology*, MIT.
- Oxman, N.** (2017b). Dermi-Domus: A Grown Wardrobe for Bodies and Buildings, 3D-Printed Body Architecture. *Architectural Design, November/December 2017, Profil No. 250*, pp.16.
- Oxman, R.** (2017a). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies, 52*, pp.4-39. Elsevier Ltd.
- Özkan, Ş.** (2019). Sayısal teknolojilerin tekstil tasarım ve üretim süreçlerine etkisi. *Tasarım Enformatiği, Nisan 2019, cilt 01-sayı 01*, pp.31-50
- Pei, E., Shen, J. & Watling, J.** (2015). Direct 3D printing of polymers onto textiles: experimental studies and applications. *Rapid Prototyping Journal, Vol.21, Issue:5*, pp.556-571.
- Plessis, A., Broeckhoven, C., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I. & Hands, C. H.** (2019). Beautiful and functional: A review of biomimetic design in additive manufacturing. *Additive Manufacturing, V.27*, pp.408-427.

- Pollitzer, E.** (2019). Creating a better future. *The Fourth Industrial Revolution. (Fall 2018/Winter 2019) The Journal Of International Affairs*, Vol. 72, No.1., pp.75-90.
- Ponis, S., Aretoulaki, E., Maroutas, T. N., Plakas, G. & Dimogiorgi, K.** (2021). A Systematic Literature Review on Additive Mnuufacturing in the Context of Circular Economy. *Sustainability*, V.13, pp.6007.
- Reas, C., McWilliams, C. & Lust, (2010).** *Form + Code, In Design, Art, and Architecture*. Princeton Architectural Press.
- Rinaldi, R. R.** (2019). Fashion Industry 2030. Reshaping the Future Through Sustainability and Responsible Innovation.
- Romani, A., Rognoli, V. & Levi, M.** (2021). Design, materials, and extrusion-based Additive Manufacturing in circular economy contecxts: From Waste to New Products. *Sustainability*, pp.13.
- Rosenkrantz, J. & Rosenberg, J. L.** (2017). Dress/Code: Democratising design through computation and digital fabrication. 3D-Printed Body Architecture. *Architectural Design*, November/December 2017, Profile No 250, pp.84
- Roy, A.** (2020). Book Review: The Fourth Industrial Revolution. *Journal Of International Consumer Marketing*, Vol. 32, No. 3, pp.268-270.
- Saha, K., Kumar, P. & Papagiannaki, E.** (2021). Implementing circular economy in the textile and clothing industry. Aston University, *Business Strategy and the Environment*, V. 30, pp.1497-1530. Birmingham.
- Sauerwein, M., Doubrovski, E., Balkenende, R. & Bakker, C.** (2019). Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, V. 226, pp.1138-1149.
- Schönberger, M. & Hoffstetter, M.** (2016). *Emerging Trends in Medical Plastic Engineering and Manufacturing*, Part 4 Generative Manufacturing Technologies-The Future. Elsevier Inc.
- Schwab, K.** (2016). The Fourth Industrial Revolution. *Hardcover, January 3, 2017*.
- Schwab, K. & Davis, N.** (2018). Shaping The Fourth Industrial Revolution. *Paperback, January 11*.
- Schwab, K.** (2019). Foreword. *The Fourth Industrial Revolution. (Fall 2018/Winter 2019) The Journal Of International Affairs*, Vol. 72, No.1., pp.13-16.
- Shanmugam, V., Das, O., Neisiany, R. E., Babu, K., Singh, S., “...” & Ramakrishna, S.** (2020). Polymer recycling in additive manufacturing: an opportunity for the circular economy. *Materials Circular Economy*, Vol.2, No.11.
- Shou, T., Hu, S., Wu, Y., Tang, X., Fu, G., Zhao, X. & Zang, L.** (2021). Biobased and Recyclable Polyurethane for Room-Temperature Damping and Three-Dimensional Printing. *Acs Omega* 2021, V.6, pp.30003-30011.
- Shuaib, M., Seevers, D., Zhang, X., Badurdeen, F., Rouch, K. E. & Jawahir I. S.** (2014). Product sustainability index (ProdSI): A metrics-based framework to evaluate the total life cycle sustainability of manufactured products. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 18, No. 4, pp.491-507.

- Sun, L. & Zhao, L.** (2017). Envisioning the era of 3D printing: a conceptual model for the fashion industry. *Fashion and Textiles*, Vol.4, No.25.
- Şahin, K. ve Turan, B. O.** (2018). Üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin karşılaştırmalı analizi. *SSAD: Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, July, Vol. 2, Issue 2, pp.97-116.
- Taddese, G., Durieux, S. & Duc, E.** (2020). Sustainability performance indicators for additive manufacturing: a literature review based on product life cycle studies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, pp.3109-3134.
- Taisch, M., Casidsid, M. L., Acerbi, F., May, G., Padelli, V., Spaltini, M. & Wuest, T.** (2021). The 2021 World Manufacturing Report: Digitally Enabled Circular Manufacturing. *2021 World Manufacturing Foundation*. Retrieved from www.worldmanufacturing.org.
- Tan, K. C., Kannan, V. R. & Handfield, R. B.** (1998). Supply Chain Management: A survey of current practice in the US.
- Thompson, R.** (2014). *Manufacturing Processes for Textile and Fashion Design Professionals*. London: Thames & Hudson Ltd.
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., “...” & Graf, P.** (2016). Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals, Manufacturing Technology* V.65, pp.737-760.
- Tibbits S.** (2014). 4D Printing Multi-Material Shape Change. Architectural Design
- Tibbits S., McKnelly C., Olguin C., Dikovsky, D. & Hirsch S.** (2014). 4D Printing and Universal Transformation. *Acadia Design Agency*.
- Tibbits S.** (2017). *An Introduction to Active Matter*. Active Matter, MIT Press, pp.11-13.
- Vaezi, M., Chianrabutra, S., Mellor, B. & Yang, S.** (2013). Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, V.8, No.1, pp.19-50
- Vallett, R., Knittel, C., Christe, D., Castaneda, N. & Kara, C. K.** (2017). Digital fabrication of textiles: an analysis of electrical networks in 3D knitted functional fabrics. *Proceedings of Spile Conference*.
- Vanderploeg, A., Lee, S. E. & Mamp, M.** (2017). The application of 3D printing technology in the fashion industry. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 10:2, pp.170-179.
- Villamil, C., Nylander, J., Hallstedt, S. I. & Watz, M.** (2018). Additive manufacturing from a strategic sustainability perspective. *International design conference, Design, 2018*.
- Villamil, C., Schulte, J. & Hallstedt, S.** (2021). Sustainability risk and portfolio management-A strategic scenario method for sustainable product development. *Wiley, Business Strategy and the Environment*, Vol. 31, pp.1042-1057.

- Yao, L.** (2014). Material Computation Based Interaction Design, Design Methodology-2, MIT Media Lab Cambridge: Doctoral Symposium. Retrieved from <http://files.cargocollective.com/79121/p29-yao.pdf>.
- Yap, Y. L. & Yeong, W. Y.** (2014). Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review. *Virtual and Physical Prototyping*, Vol.9, No.3, pp.195-201.
- Yıldırım, A. ve Şimşek, H.** (2016). Sosyal Bilimlerde Nitel Araştırma Yöntemleri. Seçkin yayıncılık, onuncu baskı, 2016.
- Wijk, A. van & Wijk, I. van** (2015). 3D Printing With Biomaterials, Towards a Sustainable and Circular Economy. Published by IOS Press under the imprint Delft University Press. www.thegreenvillage.org.
- Url-1** <<https://www.trthaber.com/foto-galeri/turkiye-nufusunun-dunya-siralamasindaki-yeri-ne/35339/sayfa-3.html>>, erişim tarihi 04.01.2022.
- Url-2** <<https://www.birbucukderece.com/15derece rapor/>>, erişim tarihi 04.01.2022.
- Url-3** <<https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>>, erişim tarihi 04.01.2022.
- Url-4** <<http://www.sfu.ca/~tnn3/vancouverecologicalfootprint/img/overshoot-1.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-5** <<https://rtl1n1kraz3heqyqi5ac19ce-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2016/01/M9A8084-e1462464407778-1200x877.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-6** <https://eos-c963.kxcdn.com/07_logos_icons_graphics/graphics/image-thumb__593__image-media-full-width/eos_functionalprinciple_lasersintering_general_en.webp>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-7** <<https://smokenmirrorsblog.files.wordpress.com/2011/04/iris2.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-8** <<http://www.irisvanherpen.com/DOCS/IVH-Escapism.pdf>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-9** <https://static.dezeen.com/uploads/2011/06/dezeen_N12-3D-printed-bikini-by-Continuum-Fashion-and-Shapeways-6.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-10** <https://www.irisvanherpen.com/_uploaded/voltage-show/IvH-Voltage-611-33.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-11** <<https://archinect.imgix.net/uploads/1b/1bbe8e88f0509d904150cc0a6236b146.jpg?auto=compress%2Cformat&w=728>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-12** <https://pazone-1c0d5.kxcdn.com/wp-content/uploads/2020/06/SD_DSC5597_smallweb-768x512.jpg>, erişim tarihi 26.02.2022.
- Url-13** <<https://materalse.com/blog/en/a-3d-printed-dress-that-uses-robotic-arms-to-defend-itself-anouk-wpprechts-spider-dress/>>, erişim tarihi 28.02.2022.
- Url-14** <<https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/i.php?/000/774/jump-composite,medium.crop.1417361094.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-15** <<https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/i.php?/000/821/untitled329,medium.crop.1417727711.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.

- Url-16** <<https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/i.php?/000/782/kinematicsDress-frontDetail-4,medium.crop.1417361294.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-17** <<https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/i.php?/001/037/Petals-Dress-388,medium.crop.1456767413.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-18** <<https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/i.php?/001/031/IMGP9939-Edit,medium.crop.1456767206.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-19** <<https://www.3dprntngmeda.network/pangoln-scales-bcdress-project-adds-neurotechnology-to-a-3d-prnted-dress/>>, erişim tarihi 24.02.2022.
- Url-20** <<https://www.3dprntngmeda.network/pangoln-scales-bcdress-project-adds-neurotechnology-to-a-3d-prnted-dress/>>, erişim tarihi 26. 02. 2022.
- Url-21** <<https://danitpeleg.com/wp-content/uploads/2017/07/danit-peleg-venus-21.jpg>>, erişim 26. 02. 2022.
- Url-22** <<https://3dprint.com/wp-content/uploads/2014/04/mesostructure3-1024x682.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-23**<https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/58977341414fb5309fc954e6/1501474571136-AS5BHYQPP63W0TR6XWK4/ACTIVE+SHOES+Upper_Shoe.jpg?format=1000w>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-24** <<https://www.juliakoerner.com/hybrid-holism>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-25** <https://payload.cargocollective.com/1/8/284138/9600474/021-IVH-AW15-WEB-_DSC827321-LRG_920.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-26**<https://payload.cargocollective.com/1/8/284138/8677464/IVHdef1_905.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-27** <https://payload.cargocollective.com/1/8/284138/9600474/Look-30_1000.JPG>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-28.** Sustainable plastic could be the future of additive manufacturing. European Ceo, <<https://www.europeanceo.com/business-and-management/plastka-skaza-makes-sustanable-plastc-the-future-of-addtve-manufacturng/>>, erişim tarihi 09.03.2022
- Url-29** <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1518464569392-NWZJ6K21IR1OCDJAIJ8U/Stratasys_3D-Printed_Cape_300dpi.jpg?format=1000w>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-30** <<https://www.moma.org/calendar/exhibitions/5090>>, erişim tarihi 28.01.2022.
- Url-31** <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1518465013246-KNN7NBK5WZJE2FOP37YR/Stratasys-3D-Printed-texture-with-Objet-Connex-Multi-material-3DPrinted-Technology5_300dpi.jpg?format=1500w>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-32** <<https://www.designboom.com/readers/dna-3d-printed-shoe-concept-by-pen-sar/>>, erişim tarihi 26.02.2022.
- Url-33** <<https://behnazfarahi.com/caress-of-the-gaze/1.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-34** <https://behnazfarahi.com/assets/img/og/og_synapse.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.

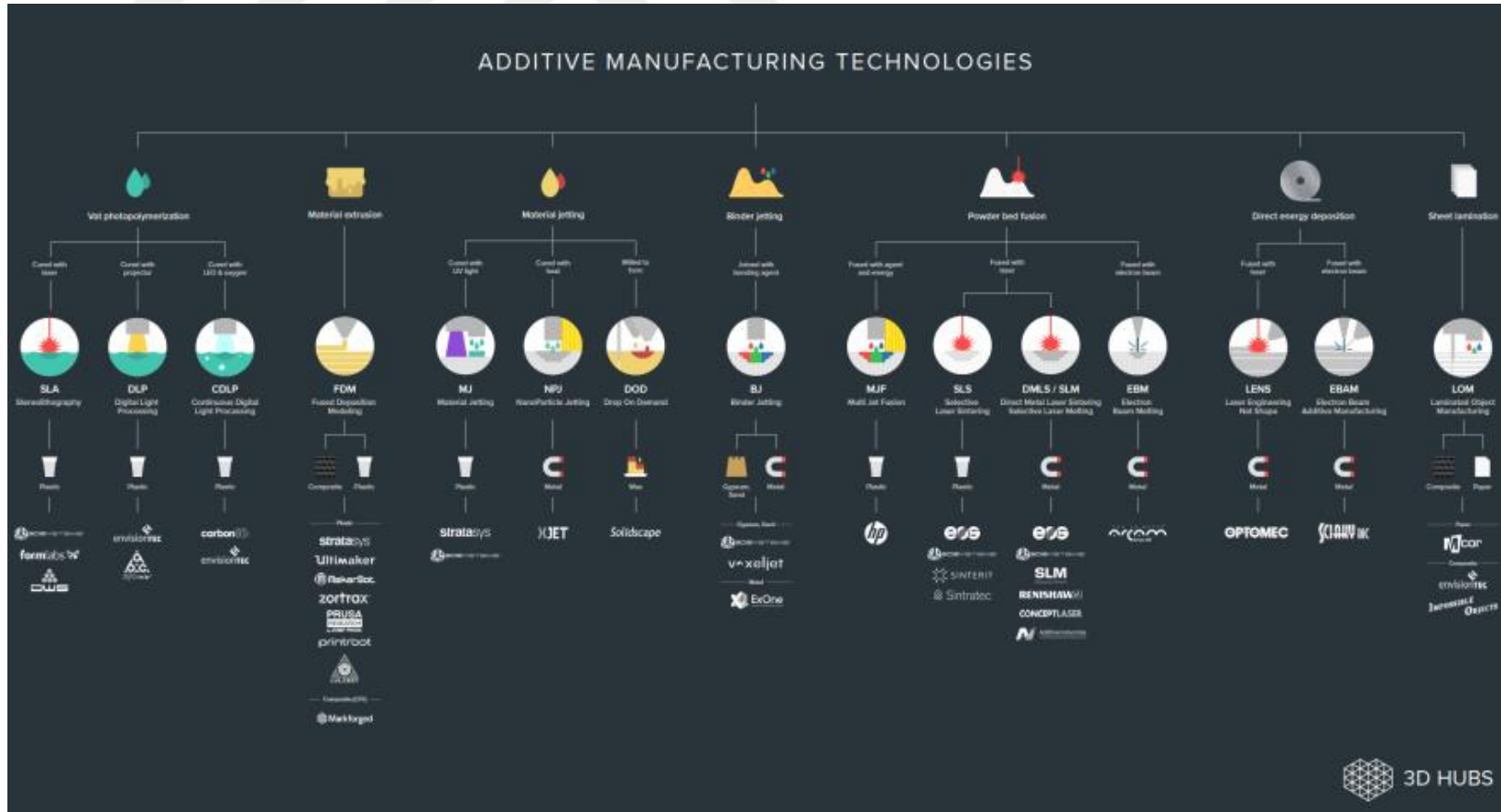
- Url-35** <<https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1517931297857-3KM96Z7YZH3UWLUAATT3Q/125-127.jpg?format=750w>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-36** <<https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1520257458633-W9GWB1AF8NX0T0P7AZ6Y/Neri+Oxman+series+01-028.jpg?format=1000w>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-37** <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1520277994850-8ZKCO7U5WAGIJWV4YUNZ/22_Mask_1_front_square_noText.jpg?format=1000w>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-38** <<https://3dprintedart.stratasy.com/julia-koerner>>, erişim tarihi 01.01.2022
- Url-39** <<https://archnect.com/features/article/150132998/a-conversaton-wth-jula-ko-er-ner-architecture-s-queen-of-3d-fabrcaton>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-40** <<https://www.dezeen.com/2020/10/15/jula-koerner-desgn-for-lfe-dassault-sys-temes-vdeo/>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-41** <<https://www.hubs.com/knowledge-base/key-design-considerations-3d-printing/>>, erişim tarihi, 01.01.2022.
- Url-42** <<https://www.wired.com/2017/05/the-shattering-truth-of-3d-printed-clothing/>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-43** <<https://www.hubs.com/knowledge-base/types-of-3d-printing/>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-44** <<https://3dprint.com/103530/mit-self-assembling-shoe/>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-45** <http://www.continuumfashion.com/shoes/shoes_on_feet.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-46** <http://www.formakers.eu/timthumb.php?w=600&h=420&src=./media/1.670.1359632186.hoon-chung_recity_magazine_05.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-47** <<https://www.vogue.com/article/behind-the-scenes-iris-van-herpen-spring-2018-couture>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-48** <<https://dam-prod.media.mit.edu/thumb/2017/10/13/wanderers14.jpg>. 1400x1400.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-49** <<https://www.carbon3d.com/materials/epu-41/>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-50** <https://static.dezeen.com/uploads/2015/09/United-Nude-Francis-Bitonti-Mutatio-Collection-3D-printed-gold-plated-shoe_dezeen_468_0.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-51** <<https://danitpeleg.com/wp-content/uploads/2018/01/28.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-52** <<https://www.carbon3d.com/carbon-dls-technology/>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-53** <https://neri.media.mit.edu/assets/images/made/assets/projects/nerioxman_anthozoa_01_620_413_c1.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-54** <https://www.bjork.fr/IMG/jpg/neri_oxman_designs_rottlace_2.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.

- Url-55** <https://www.irisvanherpen.com/_uploaded/uploads/iris_van_herpen_HC_SS18_look0005_1-50.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-56** <https://www.irisvanherpen.com/_uploaded/202105/Screenshot-2020-11-03-at-101427_1-XL-LRG.png>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-57** <<https://3dprint.com/wp-content/uploads/2019/09/Stratasys-3as4-dress-1.png>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-58** <https://static.wixstatic.com/media/4d9771_4d0820b7b6c24a5794074119c40d5cdcf000.jpg/v1/fill/w_1076,h_920,al_c,q_85,usm_0.33_1.00_0.00,enc_auto/4d9771_4d0820b7b6c24a5794074119c40d5cdcf000.jpg>, erişim tarihi 01.04.2022.
- Url-59** <<https://i.pinimg.com/originals/ee/86/01/ee86013ab7486e87e7fba7658f131276.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-60** <https://www.irisvanherpen.com/_uploaded/202105/120202-Iris-van-Herpen-61626-33.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-61** <https://static.dezeen.com/uploads/2013/03/dezeen_3D-printed-dress-by-Michael-Schmidt-and-Francis-Bitonti_6.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-62** <<https://pensar.com/wp-content/uploads/2014/09/DNA-Underside-Quarter-Edit.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-63** <<https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1579001613695-M4UI01WP9HAG2HW19GEI/samson+shafran+jacket+2.jpg?format=750w>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-64** <<https://www.protolabs.co.uk/media/1017211/zac-posen-3d-printed-rose-gown-900x400.jpg?anchor=center&mode=crop&width=570&height=308&rnd=132016148931630000>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-65** <<https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1522080815168-N4D5LLE0BBY54H4PEUTS/Pangolin.jpg?format=1000w>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-66** <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1522081082595-VOERPP2ST17V7TCRLZXI/Stratasys_20160913-5564.jpg?format=750w>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-67** <<https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/i.php?/001/002/146938134,medium.crop.1448480404.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-68** <https://payload.cargocollective.com/1/15/480293/11129352/close_shot_1000.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-69** <https://res.cloudinary.com/carbon3d/image/upload/q_auto,f_auto/v1622061162/Industries/consumer/midsole.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-70** <<https://sneakernews.com/wp-content/uploads/2019/11/adidas-AlphaEdge-4D-Black-White-1.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.

- Url-71** <<https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/hype-dongusu-gartner-hype-cycle.html#:~:text=Gartner%20Hype%20d%C3%B6ng%C3%BCs%C3%BC%2C%20belirli%20teknolojilerin,ve%20markala%C5%9Ft%C4%B1r%C4%B1lan%20bir%20grafik%20sunumudur>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-72** <https://circulardesign.tools/wp-content/uploads/2021/04/EDC_EcodesignAssessment-Product-1.pdf>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-73** <<https://thenaturalstep.org/wp-content/uploads/2018/01/SLCA-matrix-structure.pdf>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-74** <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/euoparl/circular_economy/circular_economy_pl.svg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-75** <<https://thenaturalstep.org/slca/>>, erişim tarihi 05.05.202.
- Url-76** <<https://thenaturalstep.org/about-us/tns-international/>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-77** <<https://thenaturalstep.org/approach/>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-78** <<https://danitpeleg.com/wp-content/uploads/2017/06/Photo-credit-Daria-Ratiner-129.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-79** <<https://danitpeleg.com/wp-content/uploads/2017/05/3d-printed-textile.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-80** <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/i.php?/000/997/409660,medium_large.1448472110.jpg>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-81** <<https://pazone-1c0d5.kxcdn.com/wp-content/uploads/2020/06/synapse-dress-printed-downloaded-from-niccolocasas-600x399.jpg>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-82** <<https://www.dezeen.com/2016/02/17/3d-printed-dresses-threeasfour-new-york-fashion-week-2016/>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-83** <<https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1522080815168-N4D5LLE0BBY54H4PEUTS/Pangolin.jpg?format=750w>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-84** <<https://3dprintedart.stratasys.com/threeasfourharmonographandpangolin>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-85** <<https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/albums/kinematics-fold/content/boundingboxdiagram-2folds/>>, erişim tarihi 01.01.2022.
- Url-86** <<https://danitpeleg.com/product/create-your-own-3d-printed-jacket/#>>, erişim tarihi 01.01.2022.

EKLER

EK A: Tablolar



Şekil EK A.1 : Katmanlı Üretim Teknolojileri Tablosu, (Url-3).