



Katmanlı Üretim Teknolojileri ile Üretilen Giyilebilirlerde Hibrit Yapıların Sürdürülebilir Tasarım ve Üretim Bakımından Değerlendirilmesi

Şükran ÖZKAN

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Enformatik Bölümü, Türkiye
sukranozkan@hotmail.com.tr
<https://orcid.org/0000-0002-3230-4290>

Bülent Onur TURAN

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Enformatik Bölümü, Türkiye
bulent.onur.turan@msgsu.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0003-0531-874X>

ÖZET

Katmanlı üretim, moda endüstrisi dâhil farklı sektör ve araştırma alanlarında sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Bu çalışma, katmanlı üretimi sürdürülebilir bir tasarım ve üretim aracı olarak araştırmaktadır. Katmanlı üretimin sürdürülebilirliği, ürün yaşam döngüsü üzerindeki etkilerinin ele alınmasını gerektirmektedir. Makale kapsamında, *Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirme* yönteminin kapsayıcı bakışıyla, 3B baskılı giyilebilir alanında kullanılan katmanlı üretimin sosyo-ekolojik sürdürülebilirlik prensipleri ile uyumluluğu sorgulanmıştır.

Bu bağlamda, sistematik bir literatür incelemesi ile araştırma sorularının tartışılmasına kavramsal bakış sağlanmıştır. Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, katmanlı üretimdeki ilerlemeyi ve malzeme inovasyonundaki gelişmeyi netleştirmiştir. Yeni malzemeler ve gelişmiş tasarım yöntemlerine olanak tanıyan *Katmanlı Üretim için Tasarım* kavramı; polimer ile üretilmiş giyilebilir projelerin tasarım analizinde, *biomimetik* yapı özelliklerine ilişkin veriler sunmuştur. Biomimetik tasarım yaklaşımı, giyilebilir moda ürünlerinde katmanlı üretimin hibrit yapılar oluşturmaya olanak tanımaktadır.

Sonuçlar, ana etkilerin nerede olduğunu görmeyi sağlayan bir renk matrisinde sunulmuştur. Elde edilen bulgular stratejik sürdürülebilirlik perspektifinin, sürdürülebilir kalkınma sürecinde fırsatların belirlenmesi ve risklerin önlenmesinde etkili olduğunu göstermektedir. Sürdürülebilir tasarım yöntem ve araçlarının, inovasyon aşamasında entegrasyonu, sürdürülebilir kalkınmayı desteklemektedir. Katmanlı üretimin ürün yaşam döngüleri boyunca sunduğu sürdürülebilir çözümler; tasarım özgürlüğü, özelleştirilmiş tasarım, yüksek karmaşıklık ve tasarım optimizasyonu yoluyla malzeme verimliliği, güçlü yapı, düşük hacim, enerji tasarrufu, atık yönetimi gibi ilgili konularda görülebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: 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

ABSTRACT

Additive manufacturing offers sustainable solutions in different sectors and research areas, including the fashion industry. This study explores additive manufacturing as a sustainable design and production tool. Sustainability of additive manufacturing requires addressing its impact on the life cycle. Within the scope of the article, the compatibility of additive



manufacturing used in the field of 3D printed wearable with socio-ecological sustainability principles was questioned, with the inclusive view of the Sustainable Life Cycle Assessment method.

In this context, a conceptual perspective was provided to the discussion of research questions with a systematic literature review. The Sustainable Life Cycle Assessment clarified progress in additive manufacturing and improve in material innovation. New materials and advanced design methods have paved the way for the concept of *Design for Additive Manufacturing*. In this context, the design analysis of the wearable projects produced with polymers evaluated in this context, presented data on the *biomimetic* structure properties in additive manufacturing design. The biomimetic design approach allows additive manufacturing to create hybrid material structures in wearable fashion products.

The results are presented in a color matrix that allows to see where the main effects are. The findings show that the strategic sustainability perspective is effective in identifying opportunities and preventing risks in the sustainable development process. The integration of sustainable design methods and tools at the innovation stage supports sustainable development. Sustainable solutions offered by additive manufacturing throughout product life cycles; freedom of design, customized design, high complexity and through design optimization can be seen in related topics such as material efficiency, strong structures, low volume, energy saving, waste management.

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

1. GİRİŞ

Günümüzde 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.

Dönüşen üretim kavramıyla birlikte tasarım anlayışında da katmanlı üretim tasarımına doğru bir gelişme görülmektedir. Katmanlı üretimin tasarlama ve üretme biçimine getirdiği dönüşüm, geleneksel şekillendirme tekniklerinin atlandığı, tasarımcılara üstün, fonksiyonel ve daha akıllı ürünler üretmek için verimli çalışma imkânı tanımaktadır. Sayısal tasarım ve sayısal üretim yöntemlerinin yakınsaması; *Endüstriyel, Mimari, Mühendislik, Moda ve diğ.* tasarım disiplinlerini birbirine yaklaştırıp, tasarım alanında *Vücut Mimarisi* tasarımının önünü açmıştır. Vücut mimarisi kavramı, moda ürünleri yanında, geniş bir alandaki insan vücuduna yönelik tasarım ürünlerini içeren, 3B baskı tasarımını ifade etmekte ve malzeme zekâsı alanına odaklanarak 4B baskıyı kapsamaktadır.

Sanal ortamda 3B modelleme yazılımı 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. Moda ürünlerinde kumaş top halinde gelerek, kesme-dikme süreciyle tasarıma dâhil olurken, çağdaş uygulamalar sunan katmanlı üretim ile daha az işleme ihtiyaç duyulduğu gibi ürünler çok daha az malzeme kullanılarak, couture moda göre daha hızlı ve sürdürülebilir bir şekilde üretilebilmektedir. Katmanlı üretimin, sürdürülebilirliğe katkısı olduğu açıktır ancak önündeki en büyük engelin malzeme ve enerji girdileri olmasıyla literatürde en çok ekolojik

etkileri tartışılmaktadır. Yaşam döngüsü perspektifinde sosyo-ekolojik etkilerin belirlenmesi, tasarım süreciyle başlayacak bilinçli seçimler (bileşen tasarımı, katman kalınlığı, çözünürlük, işlem süreci, malzeme özelliği vd.), katmanlı üretimin sürdürülebilir çözümler sunmasını sağlayabilir. Bu çalışmada; bir tasarım ve üretim aracı olarak katmanlı üretimin sürdürülebilirliğini desteklemek için *Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirme* yönteminin nasıl rehberlik edebileceğini incelemek ve ürün inovasyon aşamasında tasarım profesyonellerine karar desteği sağlamak amacıyla dört araştırma sorusu ele alınmaktadır:

- 3B baskı yöntemi, giyilebilir uygulamalara ne tür bir tasarım yeniliği getirmektedir?
- 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 tasarımı için 3B CAD araçlarının olanakları nelerdir?
- Katmanlı üretimin avantajları ve kısıtlamaları nelerdir?

1.1. Yöntem

Bu çalışmada, akademik literatürde *Sustainable Life Cycle Assessment* (SLCA) olarak geçen bir değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. SLCA kavramı, çalışma kapsamında Türkçe'ye *Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi* (SYDD) olarak çevrilmiş ve katmanlı üretimin sürdürülebilirlik değerlendirmesinde kullanılmıştır. SYDD, yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirlik etkisinin önemli noktalarını geriye dönük bakışla, nitel şekilde belirlemek için *sosyal ve ekolojik* sürdürülebilirlik prensipleri (SP) kullanılmaktadır.

1.1.1. Bir Yöntem Olarak Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (SYDD)

1990'ların başında İsveç'te sürdürülebilirliğe birleştirici ve operasyonel bir tanım ve yaklaşım geliştirmek amacıyla, uzmanlaşma süreci olarak başlayan yaklaşım, *Stratejik Sürdürülebilir Kalkınma Çerçevesine* (SSKÇ) dönüşmüştür. *The Natural Step* (TNS) platformu tarafından SSKÇ'de sunulan yöntemler, bilimsel ilkelere şeffaf yaklaşımıyla literatürde en sağlam modellerden biri olarak değerlendirilmektedir (Everard ve Blume, 2020). Bir çekirdek bilim insanı tarafından yürütülebilen, literatürden anahtar kavramların damıtıldığı ve bunların ilişkilerinin sürdürülebilir kalkınma perspektifinden anlamaya çalışılmasıdır (Broman ve Robert 2017).

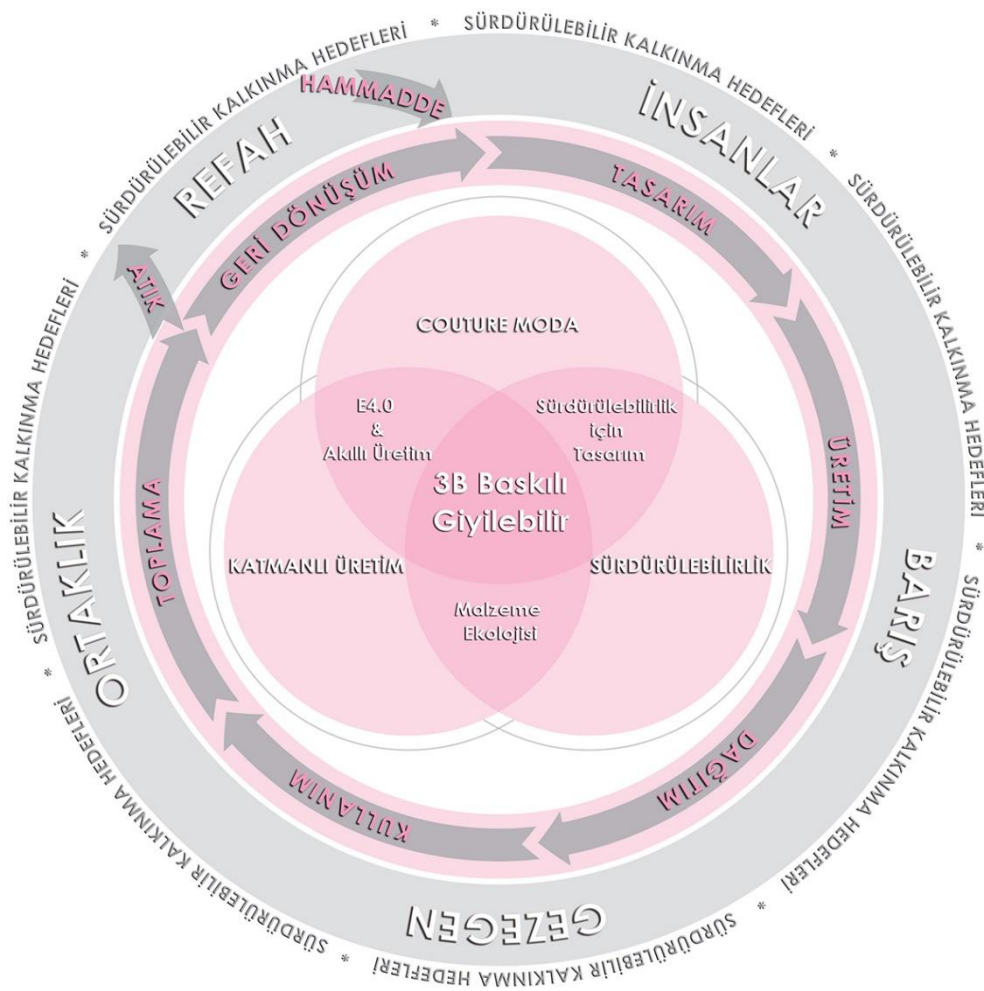
Ürünlerin geliştirilmesi, teknik sistemler perspektifinden sosyo-teknik sistemler perspektifine doğru evrilmiştir. Bir ürünün yaşam döngüsü sürdürülebilirlik etkisi ve işlevinin sosyo-teknik sistem içinde belirlendiği erken aşamalarda stratejik sürdürülebilirlik perspektifi uygulama (Villamil vd., 2021) gerekliliği doğmuştur. Endüstriyel ekoloji araştırmalarında kullanılan LCA, ürün yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri belirlemede kullanılır ancak sosyal yönleri atlaması bakımından stratejik perspektiften yoksundur (Villamil vd., 2021). Erken aşamalarda ayrıntılı nicel veri azlığı, sürdürülebilirlik performansını değerlendirme konusunda bazı zorluklar içermektedir. TNS platformu tarafından 2006 yılında LCA'ya stratejik bir perspektifin dâhil edilmesiyle (Villamil vd., 2021) geliştirilen *Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirme* yöntemi, literatürde *Stratejik Yaşam Döngüsü Yönetimi* olarak da bilinmektedir (Broman ve Robert 2017).

Araştırma sorularını ele almak için üç yönlü bir araştırmanın yürütüldüğü bu çalışma; *Sistemik literatür taraması, Vaka inceleme, SYDD, veri çeşitlemesiyle elde edilen kavramlar üzerine yapılandırılmıştır. Çalışma kapsamında değerlendirilen katmanlı üretim teknolojileri; "Stereolitografi (SLA), Sayısal Işık Projeksiyonu (CDLS), Kaynaşmış Biriktirme Modelleme (FDM), Seçici Lazer Sinterleme (SLS) ve PolyJet"* akademik ve uygulama literatüründen belirlenmiştir. Örneklem olarak araştırma sorularının cevaplarına katkısı olabilecek 3 web-makale, 43 akademik makale ve 43 giyilebilir uygulamaya dair proje tercih edilmiştir. Araştırma 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.

Sistemantik literatür taramasıyla elde edilen verilerden araştırma alanıyla ilgili kavramlar belirlenerek, araştırma sorularına ilişkin kodlama şemaları, tema ve alt temalar oluşturulmuştur. Bu bakımından, katmanlı üretim yöntemi ile üretilmiş giyilebilir moda alanı üç kavram etkileşiminde ele alınabilmektedir: *Couture moda*, *Katmanlı üretim*, *Sürdürülebilirlik*. Kavramların tematik kodlaması Şekil 1'de *Malzeme ekolojisi*, *Sürdürülebilirlik için tasarım*, *E4.0 ve Akıllı üretim* ana temalarını belirlemiştir:

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



Şekil 1. Katmanlı üretim teknolojileri ile üretilmiş giyilebilir moda alanı kavram döngüsü.

2. KÜRESEL ÜRETİM TRENDLERİNE GENEL BAKIŞ

Sanayi devrimleri etkileriyle yaşanan her değişim, yaşam kalitesinde iyileşmeyle birlikte toplum yapısına ciddi değişimleri beraberinde getirmiştir. Davis ve Philbeck'e (2019) göre sanayi devrimleri, toplumsal dönüşümle bağlantılı olan eşzamanlı teknolojik değişim zamanlarıdır.

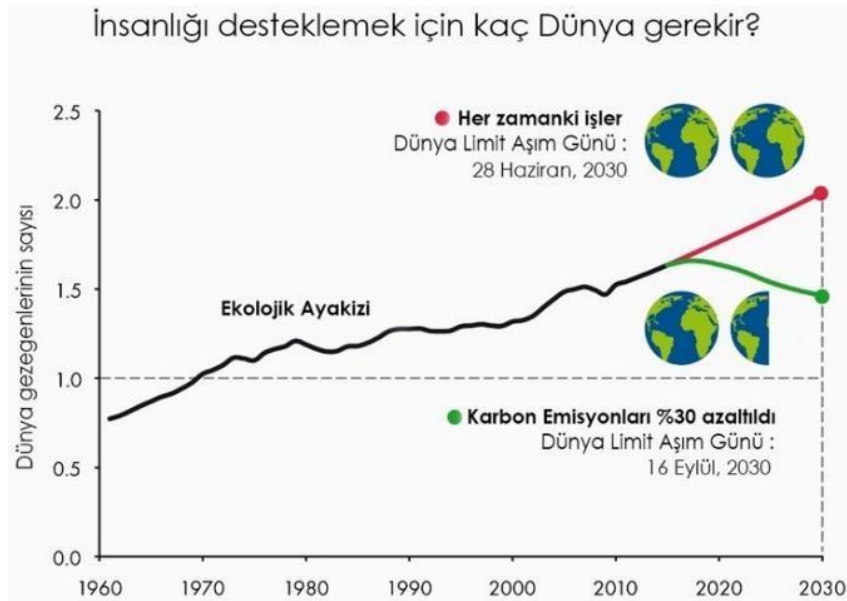
2.1. Endüstriyel Evrim

İmalat sanayine dayalı ilk sanayi devrimi, gelişmenin teknolojik yenilikle ilgili olduğu ilk Kondratiev uzun dalgasının bir parçasıdır. Yaşanmakta olan dördüncü sanayi devrimi (4.SD) ise beşinci Kondratiev uzun dalgasıyla ilgilidir; ürünlerden süreçlere, şirketlere, ilgili eğitim, araştırma, teknolojik geliştirme ve yenilik faaliyetlerine kadar tüm imalat sektörlerini ilgilendirmektedir (Jovane vd., 2008).

4.SD genellikle, 2011 ve 2015 yılları arasında Almanya'da ortaya çıkan *Endüstri 4.0* (E4.0) ile eşanlamli olarak kabul edilir ancak birbiriyle ilgisiz olmayan bu iki terim, farklı şeyler anlatmaktadır. 4.SD, 2.SD'nin elektrik ve telekomünikasyon sistemlerine dayanarak, 3.SD'nin sayısal teknolojilerinin bilgi alışverişi üzerine kurulmuştur. Yaşanmakta olan değişimler çoğunlukla tüketici üzerinde olumlu etki yaratmış ve önümüzdeki otuz yılda etkili olacak yirmi üç büyük değişikliğe; fiziksel (3D baskı, gelişmiş robotik ve yeni malzemeler...), sayısal (gelişmiş sensörler, IoT, uzaktan izleme, blok zincir...) ve biyolojik (genetik ve sentetik biyoloji...) alana odaklanan etki alanıyla hız, paradigmal değişim ve dönüşüm olarak üç bölüme ayrılmıştır (Davis ve Philbeck, 2019).

2.1.1. Endüstrileşmenin Küresel Etkileri

1800'lere kadar 1 milyarın oldukça altında kalan homo sapiens nüfusu (Caradonna, 2014), sanayi devrimiyle birlikte yükselme göstermiştir. 2021 itibarıyla 7,9 milyara yükselen dünya nüfusunun, BM verilerine göre 2100'e kadar 10,9 milyara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Url-1). İnsanlar, dünyanın sanayi devrimi öncesine göre yaklaşık 1,0°C ısınmasına sebep olmuştur. Sanayileşmenin ilk adımı olarak görülen tekstil ve moda endüstrisi, BM 2019 verilerine göre küresel seragazi emisyonunun %10'u (Saha vd., 2021) ile petrolden sonra en kirletici ikinci endüstridir (Rinaldi, 2019; Saha vd., 2021). Tekstil ve moda tüketiminde patlama, kaynak kullanımı ve atık oluşumunda artışa neden olurken (Rinaldi, 2019), her yıl yaklaşık 3 milyar \$ değerinde tekstil ve moda ürün atığı çöp sahasına gitmektedir (Saha vd., 2021). Seragazi emisyonlarının benzer şekilde devam etmesi küresel ısınmanın 2030-2052 yılları arasında 1,5°C sınırını geçeceğini göstermektedir (Url-2). En büyük endüstrilerden biri olan moda, maliyet ve verimlilik temelli değer zinciri nedeniyle geri dönüşü olmayan ekolojik ve sosyal zarar vermeye ise devam etmektedir (Saha vd., 2021).



Şekil 2. Ekolojik aşım 2030 göstergeleri.

Kaynak: Url-4.

11,3 milyar hektarı oluşturan dünya yüzeyinin yaklaşık dörtte biri, biyolojik olarak üretken alan kabul edilmektedir. Yapılan hesaplamalar, ekolojik ayak izinin biyolojik kapasiteyi çoğunlukla aştığını göstermektedir (bkz. Url-4). Doğal kaynaklar, gezegenin onları yenileme kapasitesi ile sınırlıdır (Wijk ve Wijk, 2015). 1985 sonrası küresel kaynak tüketimi ekolojik kapasiteden oldukça yüksek olmuş (bkz. Şekil 2), tahminler ise 2050 yılında yenilenebilir doğal kaynak ihtiyacının karşılanması için iki Dünya'nın biyolojik kapasitesinin gerekliliğini göstermektedir. 1 milyar ile 3 milyar varil arasında değişen petrol kaynaklarına ilişkin tahminler, en yüksek oranın 2008 ile 2020 yılları arasında olduğunu göstermektedir (Jovane vd., 2008).

Yenilenemez olarak tanımlanan fosil yakıt bazlı lif üretim miktarını azaltmak, *pik petrol* seviyeleri yaşandığı için çevresel ve ekonomik olarak zorunluluk oluşturmaktadır. Artan iklim değişikliği, yaşlanan nüfus, sağlık, yoksulluk, sosyal dışlanma, biyo çeşitlilik kaybı, atık hacmi, toprak kaybı, ulaşım sıklığı gibi temel sorunlara karşılık biyokütle (mahsuller, bitkiler ve ağaçlar) yenilenebilir bir kaynaktır. Kalıcı etkinin önlenmesi ise 2050'ye kadar net sıfır emisyonu ulaşma (Url-2) ve biyo bazlı bir ekonomiye geçmeyi gerektirmektedir (Wijk ve Wijk, 2015).

2.2. İnsan Endüstri Değer Zincirinin Evrimi

İmalat, işletmeler tarafından sağlanan ürün, süreç ve hizmetler aracılığıyla insan ihtiyaçlarından endüstri yanıtına uzanan *İnsan-Endüstri Değer Zincirini* kapsamaktadır. Endüstride 19. yüzyılda buhar, 20. yüzyılda otomasyon, 21. yüzyılda ise itici güç sürdürülebilirlik olmuştur (O'Brien, 1999).

2.2.1. Paradigma Değişimi

Paradigmalar, üretimi ve evrimini tanımlayan makro özellikler olarak düşünülebilir. Yıllar içinde piyasa rekabeti ve toplumun yönlendirdiği dört ana gereksinim *daha düşük fiyatlara duyulan ihtiyaç, özelleştirme ihtiyacı, yenilik ihtiyacı, çevre bilincine duyulan ihtiyaç*, farklı üretim paradigmasının ortak gereksinimlerini *verimlilik, özelleştirme, çeviklik* tetikleyerek üretimi etkilemiştir. Zamanla artan çevre bilincinin önemi iki ana etki; "ürünleri sık sık güncelleme gerekliliği ve yaşam döngüsü yönetiminin önemini vurgulama gerekliliği" doğurmuştur. İlki, çevik üretim tarafından ele alınırken, ikincisi sürdürülebilir üretim paradigmasında ele alınmakta (Jovane vd., 2003), yeni materyallerin yanı sıra ürün yaşam döngüsü aşamalarını gözetten bir tasarım yaklaşımı üzerine odaklanmaktadır.

3. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Yakın bir zamana kadar, tüm insan faaliyetleri sınırsız kaynaklar ve dünyanın sınırsız yenilenme kapasitesi paradigmasına dayanmaktaydı ancak bu varsayım geçerliliğini yitirmiş ve insanlık, ilgili tüm davranış modellerini değiştirmesi gerektiği gerçeğiyle yüzleşmiştir.

3.1. Sürdürülebilir Kalkınmanın Önemi

Sanayi dünyasını, kontrolsüz endüstriyel büyüme tehlikeleri konusunda ilk 1968'de Roma Kulübü; *nüfus artışı, gıda üretimi, sanayileşme, doğal kaynakların tükenmesi, kirlilik* faktörleri bakımından uyarılmış, "Büyümenin Sınırları" başlıklı çalışma ile sürdürülebilir kalkınmanın yolu açılmıştır. Roma Kulübünün ifade ettiği "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" (Jovane vd., 2008, O'Brien, 1999) kaygılar çevre, sanayileşme ve ekonomik büyüme odaklı olmuştur. *Sürdürülebilir Kalkınma* terimi ise Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonunun (WCED) 1987'de Brundtland Raporunda yaptığı tanımlamada ilk kez kullanılmıştır. Sürdürülebilir kalkınma ekolojik, sosyal, ekonomik ve teknolojik zorluklara karşı küresel stratejik bir vizyon olarak tanıtılmaktadır.

Teknolojiye yönelik iki ana vizyonun ilki, sayısal teknolojilerde yeni gelişmeler, ekonomi ve toplumun aşamalı sayısallaşması yolu ile daha iyi bir dünya vaadine odaklanırken, ikinci vizyon BM Sürdürülebilir Kalkınma 2030 gündemi hedeflerine odaklanmaktadır (Pollitzer, 2019). BM 2030 vizyonu için 5 ana sürdürülebilir kalkınma hedefleri kategorisi *İnsanlar, Gezegen, Refah, Barış ve Ortaklık* belirlenmiştir. BM sürdürülebilir kalkınma hedefleri uyumluluğu için 2019 G7 Zirvesi'nde 32 büyük markasının dahil olduğu moda endüstrisi ile *Moda Paketi* imzalanmıştır.

3.2. XXI. Yüzyılın Sürdürülebilir Üretim Trendleri

İmalat; makro (makro-ekonomi), meso (üretim ve tüketim paradigmaları) ve alan düzeyinde (ürünler/hizmetler, süreçler, iş modelleri) incelenebilir (Jovane vd., 2008). Yaşam döngüsü aşamaları (üretim öncesi, imalat, kullanım, kullanım sonrasına kadar) tedarik zinciri boyunca uzanmaktadır, bu nedenle üretimde sürdürülebilirlik için sürdürülebilir tedarik zinciri gerekmektedir.

3.2.1. Sürdürülebilir Üretim

Üretim paradigmaları evriminin en gelişmiş modeli olarak sürdürülebilir üretim, 2020 ve sonrası vizyonu için kabul edilmektedir. 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 ürünlerin oluşturulması" (Jayal vd., 2010) ifadesiyle tanımlamaktadır. ABD Ulusal Gelişmiş İmalat Konseyi; "Sürdürülebilir üretim, sürdürülebilir ürünlerin üretimini ve tüm ürünlerin sürdürülebilir üretimini içermektedir" (Jayal vd., 2010) ifadesiyle bu tanımlı genişletmiştir. İlki, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği, yeşil bina ve diğer yeşil ve sosyal eşitlikle ilgili ürünlerin üretimini içerirken ikincisi, toplam yaşam döngüsü konularını dikkate alarak tüm ürünlerin sürdürülebilir üretimini vurgulamaktadır. Sarkis'in, *çevreye duyarlı üretim* yaklaşımına *ürün, süreç, teknoloji* boyutlarını tanımlamasıyla *R Stratejileri* oluşturulmuştur. Sürdürülebilir tasarım ve üretimde 6R stratejisi, ekonomik, sosyal ve ekolojik etkileri azaltarak, malzeme, bileşen ve enerjide maksimum fayda sağlayarak kapalı döngü malzeme akışına yardımcı olmaktadır. 6R yaklaşımı, ürün geliştirmenin sürdürülebilirliğini desteklerken sürdürülebilir üretim, *Doğrusaldan Döngüsel Ekonomiye* geçiş sürecini teknolojik bir araç olarak desteklemektedir.

3.2.2. Döngüsel Üretim

Ellen MacArthur vakfının iş pratiğine entegre ettiği (Wijk ve Wijk, 2015) *Döngüsel Ekonomi* kavramı, sürdürülebilirlik ile aynı temel ilkeleri paylaşmaktadır. Döngüsel ekonomi, üretim, dağıtım ve tüketim süreçlerinde malzemeyi azaltarak, yeniden kullanarak, geri dönüştürerek ve geri kazanarak, *ömrün sonu* kavramını değiştirmekte ekonomik, sosyal ve ekolojik etkileri azaltarak sürdürülebilir kalkınmaya katkı sunmaktadır (Saha vd., 2021). Rinaldi'ye (2019) göre moda şirketlerinin 2030 stratejilerine; %100 şeffaflık ve izlenebilirlik için tüketicileri döngüsel değer zincirine dâhil etmek ve ürün ömrünü uzatabilmek amacıyla ürün özelleştirme, isteğe bağlı koleksiyon, çok kanallı yaklaşım, transmedya hikâye anlatımı gibi tüketici ihtiyaçlarına odaklanan yenilikçi seçenekler eklenmektedir.

3.2.3. Endüstri 4.0 ve Akıllı Üretim

Sayısal teknolojileri üretime uygulamaya odaklı (sayısallaştırma, organizasyonel dönüşüm, üretim sistemlerinde üretkenlik ilişkisi) E4.0 girişimi, 4.SD çerçevesinde önemli bir bileşendir (Davis ve Philbeck, 2019). E4.0 teknolojilerindeki ilerlemeler; sürdürülebilirlik ve tasarım konularıyla ilişkili entegre ve akıllı teknolojilerin geliştirilmesine odaklı, kaynak optimizasyonu amaçlayan on üç yıkıcı teknolojiye (Siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, bulut bilişim, katmanlı üretim, büyük veri, AI, blok zinciri, akıllı malzemeler, vd.) yol açmış, küresel anlamda yarattığı değişim ve dönüşüm ise daha çok inovasyona dayalı olmuştur. E4.0 teknolojilerinin tasarım süreçlerinde benimsenmesi, ülkelerin sürdürülebilir kalkınma seviyelerine olumlu katkılar sunmaktadır. Bu bakımdan giyilebilir teknoloji, 3B

baskı, blok zincir, IoT, AR, VR, nanomalzeme, robotik, AI ve makine öğrenimi gibi teknolojiler, sektörü inovasyon yoluyla Moda 4.0'a doğru yükseltme eğilimi göstermektedir.

4. KATMANLI ÜRETİM

Sayısal imalat, malzeme ve zamanda verimlilik sağlayan, simülasyon ve analiz araçlarının benimsenmesiyle tasarım ve üretim süreçlerini yeniden şekillendiren ileri bir üretim modelidir. İki ana alt tipe ayrılan sayısal üretimde; indirgeyici imalat metodolojilerinin aksine katmanlı üretim, 3B model verilerinden nesnelere oluşturmak için az miktarda malzemeyi katman katman birleştirme işlemine dayanmaktadır.

Katmanlı üretim ile ilgili standartlar; Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) ve Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM) tarafından geliştirilmiştir. *Katmanlı Üretim* tanımının yapıldığı ISO/ASTM, 52900 standardı ile yedi ana katmanlı üretim sürecini *Tekne fotopolimerizasyonu, Toz yatağı füzyonu, Malzeme ekstrüzyonu, Malzeme püskürtme vd.* belirlemiştir. Katmanlı üretim, her zaman ticari ve endüstriyel uygulamalarla ilişkilendirilmiş (Url-3), bilimsel veri düzenlemelerin üretimi ve yüksek karmaşıklığa sahip nesnelere hassas üretimi için son teknoloji olarak kabul edilmektedir.

4.1. Üç Boyutlu (3B) Baskı Teknolojisi ve Malzeme Özellikleri

3B baskı (3BB), katmanlı üretimin uygulama alanının kişiselleştirilmiş üretime genişlemesinin bir sonucudur. 3BB teknolojisinin; tıbbi ve dişçilik parçaları, elektronik ve ev aletleri yedek parçaları, askeri ve havacılık sanayisi, mimari modeller ve spor malzemeleri gibi kitlesel ürünlerde kullanımı yaygınlaşmıştır. 3BB teknolojileri moda endüstrisinde prototip, kumaş yapıları, kişiselleştirilmiş işlevsel ürün ve sanatsal parçalar için tasarımcı ve perakendeciler tarafından kullanılmaktadır.

Giyilebilir ürünlerde en yaygın 3BB malzemesi polimer/plastik, 20. yy'ın başından itibaren modern bir yaşam tarzı sunmaktadır. Dünyanın ilk plastiği olan "selüloit" ise biyo bazlı bir malzemedir ancak ucuz ve bol petrol çağında kullanımı hızla terk edilmiştir. Farklı plastikler farklı özellik ve uygulamalar (Wijk ve Wijk, 2015) sunarken, farklı 3BB uygulamaları ise farklı malzeme özellikleri gerektirmektedir.

Polimerler *termoplastik* ve *termoset* olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Termoplastikler, ısıtıldığında erir ancak iç bileşimlerini değiştirmediğinden birçok kez eritilip yeniden kullanılabilir. Termosetler ise fotopolimerizasyon işlemi (UV lazer) ile kürlenerek, sıvıdan katıya anında dönüşerek iç bileşimleri değiştiğinden sadece bir kez kullanılabilir. *Termoplastikler* son kullanım parçaları ve işlevsel uygulamalar için en uygun baskı malzemesi iken *Termosetler* pürüzsüz yüzey, ince özellik, yüksek detaylı, estetiğin ve görünümün önemli olduğu sanatsal parçaların üretiminde idealdir.

4.2. Dört Boyutlu (4B) Baskı Teknolojisi ve Malzemeleri

Khoo vd.'ne (2015) göre akıllı malzemeler; çevreden belirli uyaran etkisiyle şekil veya özellik değiştirme yeteneğine sahiptir. Akıllı malzemelerin 3B baskılı bileşenleri, zaman içinde önceden tanımlanmış şekilde gelişebildiği için 4B baskı (4BB) kavramına yol açmıştır. 4B Biyobaskı ise biyolojik malzemeleri (moleküller, hücreler, dokular ve biyomalzeme), bir veya daha fazla işlev için belirlenmiş bir organizasyonla modellemekte ve malzeme transfer süreciyle birleştirmektedir. Teknikler ilerledikçe lazer destekli biyobaskı, 4B biyobaskı, akıllı hidrojellerin 3BB'sı gibi yöntemler geliştirilmiştir (Khoo vd., 2015).

Akıllı malzemeler, birden fazla malzemenin bir arada olması veya tek bir malzeme ile basılmış olma durumuna göre sınıflandırılabilir. Tibbits'e (2017) göre aktif maddenin; algılama, etkinleştirme, birleştirme veya özelleştirilmiş hesaplamalı malzeme tasarlama özgürlüğü herhangi bir malzemeyi akıllı hale getirebilir. Kullanıcı talebi veya biyometrik veriye dayalı, kişisel duyarlı ürün geliştirmeyi mümkün kılan aktif madde; karbon fiber,



aşşap ve tekstil gibi malzemelere uygulanabilir. Oxman'a (2010) göre tasarımda yenilikçi malzeme kullanımı; biyomalzeme, aracılı - duyarlı malzeme ve kompozit malzeme gelişmelerinde görülebilmektedir. Malzemenin farklı uyaranlara maruz kalması; homojen malzemenin tek başına duyarlı olabilmesi, heterojen veya hibrit malzemenin uyaranlara çok duyarlı olacak şekilde tasarlanarak özellik değiştirebilmesiyle mümkün olabilmektedir.

5. TASARIM, MALZEME VE KATMANLI ÜRETİM DEĞERLENDİRMESİ

Hızla artan özelleştirme ve kişiselleştirme talepleri yeni üretim paradigmaları gerektirmektedir. Katmanlı üretim, sürdürülebilir ve döngüsel iş modellerini kavramsallaştırarak, tasarımını ve benimsenmesine yönelik değişimi hızlandırabilir. Ürün yaşam döngüsü sorunlarına ilişkin küresel farkındalık daha sürdürülebilir ürün tasarımları geliştirmeyi tetiklemektedir. Tasarım, ürün yaşam döngüsündeki tüm maliyetlerde belirleyici bir faktördür. Ürün ayak-izinin %80'i tasarımı sırasında belirlendiği için tedarik zincirinde ortaya çıkan maliyet ve faydaların çoğu ürün tasarımında alınan kararlarla yakından ilişkilidir.

Sayısal üretimin entegre olduğu bir tasarım alanı olarak *malzeme ekolojisi*, Oxman'ın (2010) ifadesiyle ürün, bina, sistem ve çevreleri arasında bilinçli ilişkilere atıfda bulunan, çevreye duyarlı hesaplamalı tasarım, ürün ve süreçlerin incelemesi olarak ele alınabilir. Bu bakımdan sayısal bir üretim modeli olarak katmanlı üretimin; tasarım (üretim öncesi), üretim, kullanım (onarım, yeniden üretim) ve kullanım sonrası (yeniden kullanma, geri dönüştürme, geri kazanma, azaltma) aşamalarını eş zamanlı dikkate alması, ürün yaşam döngüsünde bazı kısıtlamaları azaltabilir ve ürünlerin genel sürdürülebilir performansını en üst düzeye çıkarabilir.

Son yıllarda sürdürülebilir tasarımda yeni bir araştırma alanı olarak döngüsel tasarım yaklaşımının önemi artmıştır. Döngüsel bir ekonomide sürdürülebilir tasarım yaklaşımını ise; *beşikten beşiğe*, *biyomimikri*, *rejeneratif tasarım*, *endüstriyel simbiyoz*, *kapalı döngü vd.* kavramlar altında ele almak mümkündür.

5.1. Araştırma Sorularının Tartışılması

Katmanlı üretimin özelleştirilmiş, couture moda alanına odaklanan bu çalışmada süreç, örnekleri içeren akademik makale ve ürün görsellerinin incelenmesiyle başlanmıştır. Alanında ilk olma özelliği gösteren ve uygunluk kriteri (malzeme, tasarım, uygulama ve sergilenme) bakımından yeterli veri sağlayan, katmanlı üretim ile üretilmiş 43 giyilebilir moda projesi belirlenmiştir. Elde edilen eser/ürün verileri derlenerek *görseli*, *ismi*, *yılı*, *tasarım ekibi*, *teknolojik önem*, *malzeme*, *tasarım* ve *üretim yöntemi* bakımından özetlenmiştir.

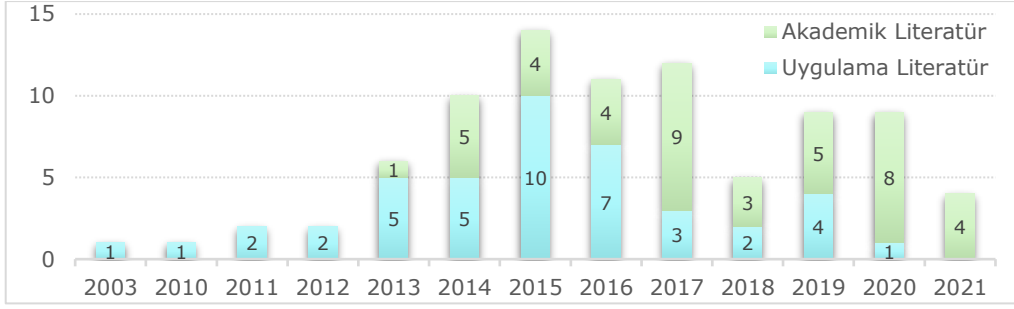
Couture moda, hızlı moda veya hazır giyim aksine, kişiselleştirilmiş, kullanıcı vücut ölçülerine uyarlanabilen, tasarım özgürlüğü ve estetiğin sunulduğu, yaratıcı tasarım kararları ve yoğun (el) işçiliği birleşimiyle podyum koleksiyonları odağında geliştirilmektedir. 3B baskı yöntemi, giyilebilir uygulamalara ne tür bir tasarım yeniliği getirmektedir? sorusuyla ilgili olarak; 43 giyilebilir 3B baskılı moda projesinin, sergilediği yapısal tasarım özelliği bakımından bir veya daha fazla kritere göre kodlandığı çözümler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Katmanlı Üretim ile üretilen 3B baskılı giyilebilirlerin tasarım analiz çizelgesi.

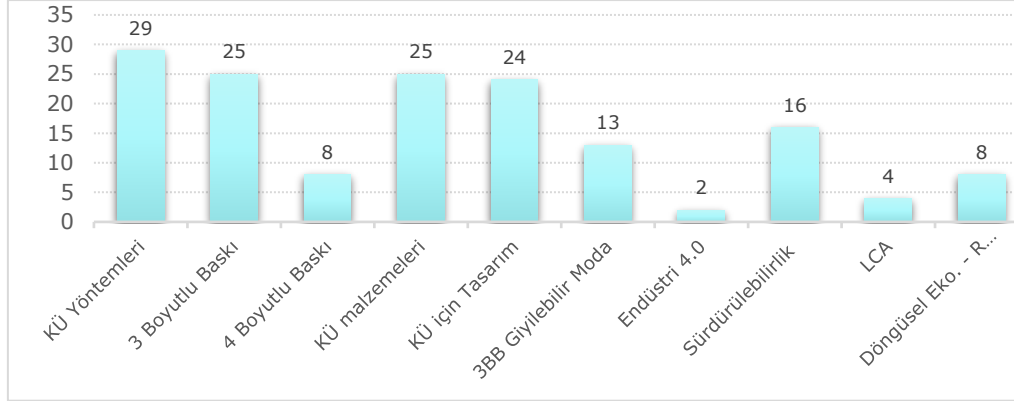
3B Baskılı Giyilebilirlerin Tasarım Analizi									
Uygulama Literatürü				Tasarım Özellikleri					
				Mikro Düzey		Makro Düzey		Alan Düzeyi	
No	Ref.	Yıl	Vaka	Tek M.	Çoklu M.	Serbest Biçim	Özelleştirme	Doğrudan	Gömülü
1	Url-30	2003	Foc Tekstil	x				x	
2	Url-28	2010	Crystalization	x		x	x		
3	Url-8	2011	Escapism Koll.	x		x	x	x	
4	Url-9	2011	N-12 Bikini	x			x	x	
5	Url-	2012	Strrvct Ayakkabı	x		x	x		
6	Url-24	2012	Hybrid Holism	x			x		
7	Url-	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-26	2013	Dita'nın Elbisesi	x			x	x	
11	Url-13	2013	Smoke Elbise		x	x	x		x
12	Url-6	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-38	2014	Zuhal Giyilebilir		x	x			x
16	Url-25	2014	DNA Ayakkabı		x		x	x	
17	Url-5	2015	Magnetic M. Elbise	x		x	x		
18	Url-27	2015	Hacking Inf. Elbise	x			x	x	
19	Url-	2015	Mutatio Ayakkabı	x		x	x		
20	Url-32	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-12	2015	Spider Elbise	x			x		x
24	Url-31	2015	Rotlace		x		x		
25	Url-23	2015	4B Aktif Ayakkabı	x			x	x	x
26	Url-44	2015	Bio-Logic	x			x		x
27	Url-7	2015	New Balance	x			x		
28	Url-17	2016	Kinematik Elbise2	x			x	x	
29	Url-22	2016	Pangolin Elbise		x	x	x	x	
30	Url-39	2016	Harmonograph Elbise		x	x	x	x	
31	Url-19	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-15	2017	Future Craft 4B	x			x		
36	Url-21	2017	Bomber Ceket	x			x		
37	Url-40	2017	Foliage Elbise	x			x		
38	Url-	2018	Ruth'un Kostumleri	x			x		
39	Url-41	2019	Setae Ceket		x		x	x	
40	Url-42	2019	Greta Oto Elbise		x		x	x	
41	Url-43	2019	Bedevisi Nakışlı Ceket		x		x	x	
42	Url-	2019	Gül Elbise	x			x		
43	Url-20	2020	Pangolin Elbise-SLS		x		x		x

Katmanlı üretim, çok malzemeli, çok işlevli, özelleştirilmiş parçalar üretebilmesi bakımından, sürdürülebilir bir üretim yöntemi midir? araştırma sorusuyla ilgili olarak; hakemli makaleleri değerlendirmek ve bulguları belirlemek için sistematik bir literatür taraması yapılmıştır.

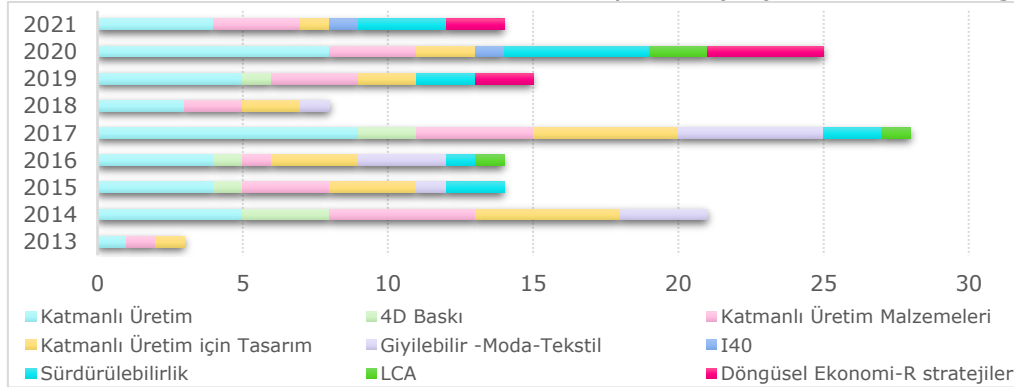
Tablo 2. Literatürde katmanlı üretime (KÜ) yönelik çalışmaların yıl dağılımı.



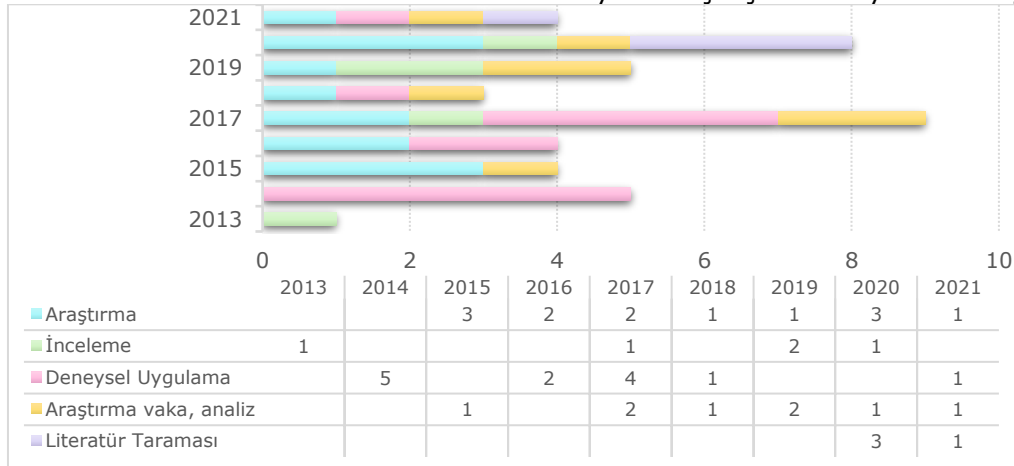
Tablo 3. Akademik literatürde katmanlı üretime yönelik çalışmaların tema dağılımı.



Tablo 4. Akademik literatürde katmanlı üretime yönelik çalışmaların tema değişimi.



Tablo 5. Akademik literatürde katmanlı üretime yönelik çalışmaların yöntem değişimi.





Sistemik literatür taraması için 3B baskı teknolojileri ile üretilmiş giyilebilir projelerin podyumda ilk sergilendiği 2010 yılı başlangıç kabul edilerek 2010-2021 yılları arasına sınırlandırılan sorgulama "scopus, google scholar, science direct" veritabanlarında, çalışmanın anahtar kelimeleri ile yapılmıştır. Hakemli makalelerin katmanlı üretim bağlamında sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi önermesi yapıyor olması aranmış; *yıl, başlık, anahtar kelime, özet ve sonuç* bakımından uygunluk gösteren 43 akademik makaleye gri literatürden 3 web makalenin dâhil edildiği bir liste belirlenmiştir. Tablo 2'de, 43 akademik makale ve 43 giyilebilir 3B baskılı projenin yıllara göre çalışma dağılımı sunulmuştur. Tam metni incelenerek birden fazla kategoride sınıflandırılan 43 yayının on tematik kategoride dağılımı ise Tablo 3'de görülebilir. Katmanlı üretimin sürdürülebilirliğine yönelik temalara 2015'de, döngüsel ekonomiyle ilgili temalara ise 2019'da odaklanıldığı Tablo 4'de izlenebilir. Araştırma türü bakımından Tablo 5'de değerlendirilen yayınlar; 13 araştırma makalesi, 5 inceleme makalesi, 13 uygulamaya dair teknik makale, 8 araştırma ve vaka analizi, 4 sistemik literatür taramasından oluşmaktadır.

Sanal ortamda 3B model tasarımı yapmak, erişilemeyen bir nesne yaratmak için temel giyim tasarımı becerilerinde örtük bilginin, sanal boyuta aktarılmasını gerektirmektedir. Tasarım sürecinde, nesnel ve görselleştirme becerilerinin kombinasyonu bakımından, katmanlı üretim tasarımı için 3B CAD araçlarının olanakları nelerdir? sorusuyla ilgili olarak; öncelikle sürdürülebilir tasarım yöntem ve araçlarının, ürün tasarımını geliştirmeye nasıl entegre edilebileceği sorgulanmıştır. Bu bağlamda literatürde, materyalizasyon teknolojisinin entegrasyonu ve hesaplamalı tasarım modellerinde yaratıcılığı arttıran yeni yöntemlere katkısı üzerinde durulmuştur. *Parametrik tasarım* araçları, karmaşık formları modellemek için benzersiz bir tasarım ortamı sunmaktadır. Karmaşık geometriler algoritmalar ile tasarlanabildiği gibi tek bir yapı içinde farklı malzeme ve değişen malzeme özellikleri sayısal modellere atanabilmektedir. Gelişmiş tasarım yöntemleri ile değişken özellikli *voksel baskı* sayısal malzeme temsilleri ve katmanlı üretim süreçlerinde malzeme bileşenlerinin temsilini mümkün kılmıştır. Yeni malzemeler ve gelişmiş tasarım yöntemleri *Katmanlı Üretim için Tasarım* yaklaşımında, tasarımcılara yeni sorumluluklar yüklemiş, gerekli beceri ve yetkinliklerin edinilmesi, yeterliliklerin kazanım gerekliliği doğmuştur. Katmanlı üretim sayısal iş akışı, tasarımdan üretime ve hizmete kadar ürün yaşam döngüsü boyunca müşteri katılımını mümkün kılmaktadır. Tüketici sınıfı 3BB teknolojilerinin yaygınlaşması ile kullanıcılar üreten-tüketici iş modelinin parçası haline gelmektedir. Gerekli tasarım beceri ve bilgisine sahip birçok tasarımcı, düşük hacimli ve düşük maliyetli ürünleri özelleştirebilmektedir. İnovasyonun etkileri tasarım, simülasyon ve imalatın birleştirildiği tüketiciye erişilebilir ve demokratik tasarım ortamı sunan (Nervous System'in web ortamında tasarım, Danit Peleg'in web ortamında özelleştirme) web-uygulama örneklerinde izlenebilmektedir.

Sürdürülebilir Yaşam Döngüsü Değerlendirme, ürün düzeyinde sosyal ve ekolojik sürdürülebilirliğe stratejik bakış sunan bir yöntem ve süreci olarak tanımlanabilir. Katmanlı üretimin avantajları ve kısıtlamaları nelerdir? sorusuna yönelik yürütülen SYDD analizine, yaşam döngüsü perspektifi ile sosyo-ekolojik sürdürülebilirlik prensipleri odağında geliştirilen sorular eşlik etmiştir. Bu kapsamda kullanılan SSKÇ'nin SP'lerinin üçü ekolojik, biri sosyal yönleri ele almaktadır:

- (SP1) ... yerkabuğundan çıkarılan maddelerin konsantrasyonları,
- (SP2) ... toplum tarafından üretilen maddelerin konsantrasyonları,
- (SP3) ... fiziksel yollarla bozulma,
- (SP4) sağlık, etki, yeterlilik, tarafsızlık ve anlam yaratmak. (Broman ve Robert, 2017)

Katmanlı üretim teknolojilerinin SYDD sürecine ilişkin bazı sorular aşağıda verilmiştir:

- İşlenmemiş malzeme yerine geri dönüştürülmüş/yenilenebilir malzeme kullanılıyor mu?
- Tasarım sırasında, üretimde malzeme ve enerji verimliliği planlanıyor mu?
- Tasarım, olumlu davranış değişikliğini veya ürün bağlılığını teşvik ediyor mu?
- Üretim sırasında israftan kaçınılıyor mu?
- Geri dönüşüm süreçleri oluşturulmuş mu?

Sürdürülebilirlik kavramı ekolojik, sosyal ve ekonomik boyutları bütün olarak değerlendirmeyi kapsamaktadır. Tasarım sürecinde sosyal ve ekolojik etkilerin dikkate alındığı yaratıcılık aşamasıyla başlayan bilinçli seçimler ise ürün sürdürülebilirliğinde olumlu iyileştirmeler yaratılabilmektedir. Ürün ve malzeme yaşam döngülerinin kavramsal olarak kullanılması, sürdürülebilirliğin ekolojik boyutuna atıfta bulunurken, yaratıcılık ve kendini ifade, istihdam ve emeğin dağılımı, sağlık ve güvenlik, etik ve yaşam kalitesine ilişkin yönler sosyal boyut altında ele alınmaktadır. 43 akademik ve 3 web-makaleye odaklanılarak yürütülen SYDD analizi Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Katmanlı üretim teknolojileri sürdürülebilir yaşam döngüsü değerlendirmesi.

SYDD	Sürdürülebilirlik Prensipleri Ekolojik ve Sosyal				
	SP1 (yer kabuğundan elde edilen malzemeler)	SP2 (toplum tarafından üretilen maddeler)	SP3 (doğanın fiziksel bozulması)	SP4 (insan ihtiyaçlarını karşılamanın önündeki engeller)	
Yaşam Döngüsü	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 etkisi bulunur.	Kullanılmış malzeme geri dönüşüm işlemi ve geri dönüştürülmüş ürünlerde bulunması sağlığı etkilemez. SLS kullanılmış toz, katkı maddesi ve yeni tozla işlenerek, FDM sürecine malzeme kaynağı sağlar.
	Tasarım	Karmaşık geometri, doğrudan montaj, tek bir yapıda 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 ile 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 yoğunudur ancak SLS'den verimlidir.	SLS yönteminde %95 oluşan toz atık sonraki baskıya %50 karıştırılarak kullanılabilir.	Katmanlı üretimde destek yapısı kullanımı atık yaratması nedeniyle fiziksel etki barındırır.	FDM masaüstü makineleri kullanımında baskı sırasında çıkan zararlı gazlardan korunmak için koruyucu ekipman kullanılmalıdır.
	İşlem Sonrası Dağıtım-Kullanım	SLS baskılı parçalar, baskı sonrası bitim işlemi 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 malzeme değerini korur ve doğrusaldan döngüsel aşamalı geçişi destekler.
	Toplama - Geri Dönüşüm- Atık	Geri dönüşümde karbon bazlı enerji tasarrufu, hem gömülü enerji hem de malzemenin kendisinde önemli olabilir. Reçine malzemelerin geri dönüşümü mümkün değildir.	Geri dönüşüm sürecinden kaynaklanan emisyonlar, fiziksel geri dönüşüm durumunda işlenmemiş malzeme üretiminden daha düşük olacaktır. FDM destek yapıları geri dönüştürülebilir.	Geri dönüşüm, çöpe atılma veya yakma sonrasında kalan atıklardan kaynaklanan fiziksel etkileri önler. Reçine malzemelerin yakılmasıyla atık kül ve emisyon açığa çıkabilir.	Piyasa güveni için, sürdürülebilirlik faydalarına ilişkin, malzeme geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanımına yönelik önlem alınmalıdır.

6. BULGULAR

Doğada nanodan, mikro ve makro ölçeğe kadar yapısal özellikler, bir nesnenin özellik ve işlevlerini tanımlarken biyolojik yapılardan alınabilecek ilham, tasarım uygulamalarında verimli yapı kullanımı ve tasarım problemlerine sürdürülebilir çözümler sunabilmektedir.

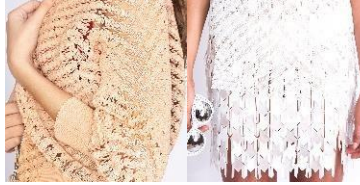
Karmaşık yapıları ve biyolojik malzeme özelliklerini taklit yeteneği ile biyomimikri, katmanlı üretimde birçok farklı biçimde bulunmaktadır (Plessis vd., 2019). Çalışma kapsamında yanıt aranan araştırma sorularına ilişkin tartışmalar; sistematik literatür taraması, vaka değerlendirmesi ve sürdürülebilir yaşam döngüsü değerlendirmesi ile önceki bölümde yürütülmüştür, bulgulara ise bu bölümde yer verilmektedir.

6.1. Vaka İncelemesine Dair Bulgular

3B baskı yöntemi, giyilebilir uygulamalara ne tür bir tasarım yeniliği getirmektedir? sorusuyla ilgili olarak uygulama literatüründen 43 adet 3B baskılı giyilebilir proje incelenmiştir. Vakalara yönelik yapılan inceleme, katmanlı üretimin biyomimetik tasarımı istenen özellik ve işlevsellikte fiziksel nesnelere (giyilebilir moda ürünleri) çevirebildiğini doğrulamıştır. Vakalarda görülen başlıca yapısal tasarım özellikleri; mikro, makro ve alan seviyelerde olmak üzere sunulmuştur.

6.1.1 Giyilebilir ürünlerde katmanlı üretimin mikro seviyede tasarım özellikleri

Çoğu katmanlı üretim süreci, tek bir malzeme ile parçalar üretmek üzere tasarlanmıştır. Parça kalitesinde makine kontrolü ve yüksek hassasiyetli teknoloji uygulamalarına yönelik etkiler Tablo 7'de sunulmuştur. Parça performansı ise birden fazla malzeme sistemi kullanılarak artırılabilir. Çok malzemeli baskı ile parçaların mekanik özelliklerini optimize etmek, nihai parçalara ek işlev sağlayarak iyileştirmek mümkündür (bkz. Tablo 8).



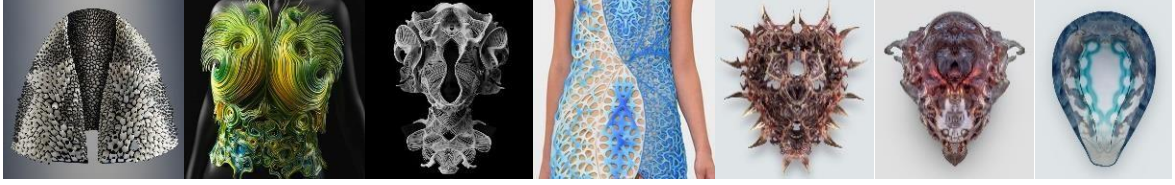
Şekil 3. Katmanlı üretim ile üretilmiş "Meso hücresel yapı kumaş" giyilebilir ürünler.
Kaynak: Url-21, Url-32.



Şekil 4. Futurecraft4D "kafesli orta taban", New Balance "hücresel orta taban" değişken yapılar.
Kaynak: Url-16, Url-18.

Tablo 7. Tek malzemeli tasarlanmış yapılara dair bulgular.

<i>Meso, kafesli, hücresel, meta malzeme, malzeme optimizasyonu...</i>
<ul style="list-style-type: none">• Katmanlı üretim, ultra hafif ve sert yapılar, yardımcı/meso yapılar ve yardımcı yapılar için birim hücre oluşturabilir.• Mikro seviyede, meso/yardımcı yapı, kafesli ve hücresel yapısal özellik gösterebilir.• Malzemeler, farklı işlevsellik konumlarında ve farklı form özellikleriyle tasarlanabilir.• Farklı işlevsellik konumlarına sahip tek bir yapı, farklı form ve mekanik özellik (meso, kafes, hücresel) gösterebilir.• Belirli mekanik, termal, optik ve biyolojik özelliklere sahip üç boyutlu kafesli yapılar oluşturulabilir.• Farklı işlevsellik konumlarına sahip tek bir yapıda, birden fazla hücresel parça birleşimi doğrudan montajsız tasarım çözümleriyle yerleştirilebilir.• Optimize edilmiş (meso, kafesli, hücresel yapı) tasarım ile kütle azalması, malzeme ve enerji verimliliği sağlanabilir.



Şekil 5. Katmanlı üretim ile üretilmiş çok malzemeli "değişken özellikli" giyilebilir ürünler.
Kaynak: Url-29, Url-38, Url-31, Url-19, Url-35, Url-36, Url-37.



Şekil 6. Katmanlı üretim ile üretilmiş "işlevsel derecelendirilmiş" ve "ölçekli hiyerarşik" yapılar.

Kaynak: Url-39, Url-22.



Şekil 7. Katmanlı üretim ile üretilmiş çok malzemeli "interaktif giysi ve kask" giyilebilir ürünler.

Kaynak: Url-33, Url-34.

Tablo 8. Çok malzemeli tasarlanmış yapılara dair bulgular.

<i>Doku, hiyerarşik yapı, malzeme optimizasyonu, işlevsellik, çoklu malzeme...</i>
<ul style="list-style-type: none">• 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 baskı, değişken malzeme özelliği gösteren hiyerarşik yapıli biomimetik tasarımlar üretebilir.• 3B baskı, elastomerik bileşenleri çok malzemeli baskıyla karmaşık işlev ve yeteneklerde üretebilir.• Çok malzemeli katmanlı üretim, montajı ortadan kaldırır, bileşen maliyetini azaltır, hafif tasarım ve minimum atık ile malzeme, işçilik ve enerjide verimlilik sağlar.

6.1.2. Giyilebilir ürünlerde katmanlı üretimin makro seviyede tasarım özellikleri

Katmanlı üretimin malzeme ve geometrideki tasarım özgürlüğü, makro ölçekli parçalara çeşitli estetik, işlevsellik, ekonomik ve ergonomik fayda sağlayabilir. Sanatçılar ve tasarımcılar katmanlı üretimi, 3B baskılı giyilebilir moda projelerinde işlevselliği artırmak, performansı iyileştirmek amacıyla karmaşık özelliklerin oluşturulması ve yeni formların yaratılmasında kullanılmaktadır (bkz. Tablo 9-10).



Şekil 8. Katmanlı üretim ile üretilmiş "Serbest biçimli geometrik" yapıli giyilebilir ürünler.
Kaynak: Url-28, Url-8, Url-24, Url-10, Url-11, Url-5.

Tablo 9. Serbest biçimli tasarlanmış geometrilere dair bulgular.

İşlevsellik, ergonomi, estetik, performans, verimlilik, nesne optimizasyonu...

- Katmanlı üretimin en büyük faydası tasarım özgürlüğü sunmasıdır.
- 3B 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 dağılımına ek işlevsellik ve enerji verimliliği sağlar.



Şekil 9. Katmanlı üretim ile üretilmiş çok malzemeli "Kişiselleştirilmiş" (sol), kafes yapılı "Seri Özelleştirilmiş" (orta) ve hücresel yapılı spora "Özelleştirilmiş" (sağ) ayakkabılar.

Kaynak: Url-25, Url-15, Url-7.



Şekil 10. Katmanlı üretim ile üretilmiş, çok malzemeli ve çok renkli "Doğrudan tekstil üzerine 3B baskılı" giyilebilir ürünler.

Kaynak: Url-40, Url-41, Url-42, Url-43.

Tablo 10. Özelleştirme ve kişiselleştirme tasarımlarına dair bulgular.

Özelleştirme, kişiselleştirme, renk, süsleme, estetik, ismarlama, kullanıcı-ürün ilişkisi...

- Özelleştirme ve kişiselleştirme özgürlüğü, katmanlı üretimin en yüksek faydaları arasında görülmektedir.
- 3B baskı bileşenlerin geometrisine voksel seviyesinde renk ve şeffaflık geçişleri tanımlayabilir.
- Çok malzemeli baskı ile farklı özelliklere sahip birden fazla malzeme (sertlik veya renk geçişlerinde) aynı anda bir yapı içinde oluşturabilir.
- Tek bir işlemde karmaşık, kompozit ve renkli parça üretirken, işlem sonrası boyama, dekorasyon vb. adımlar azaltılabilir.
- 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 yaklaşımıyla ürün maliyetine ilave yük eklenmeden, bireysel ihtiyaç ve tercihlerin kişiselleştirilmiş ürün ve hizmetlere dönüşmesi sağlanabilir.
- Bireysel tercih ve kişisel verilere dayalı kişiselleştirilmiş ve seri özelleştirilmiş tüketici ürünleri (ortez, protez, işitme cihazı, gözlük, ayakkabı, vb. aksesuar) üretebilir.

6.1.3. Giyilebilir ürünlerde katmanlı üretimin alan seviyesinde tasarım özellikleri

Katmanlı üretim, parçalara yeniden yapılandırma, gömülü bileşen ve doğrudan montaj gibi ek tasarım özgürlüğü sağlayabilir. Geleneksel yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan tek bir parçada çeşitli şekil ve işlevi doğrudan tasarıma baskı sırasında gömülebilir (bkz. Tablo 11-12).



Şekil 11. Katmanlı üretim ile üretilmiş “Zincir-posta”, “Yaylı geçme”, “Mafsal”, “Menteşe” yapılı giyilebilir ürünler.

Kaynak: Url-30, Url-9, Url-26, Url-14, Url-17, Url-27.

Tablo 11. Doğrudan montaj tasarımlarına dair bulgular.

Doğrudan montaj, zincir posta bağlantı, mafsal, menteşeli yapı, yaylı mekanizma...

- Yüksek karmaşıklıkta parça ve bileşenleri doğrudan montaj yeteneği, katmanlı üretimin faydalarından biridir.
- 3B baskıda zincir-posta bağlantı, sert bir malzemeyle üretilen giysiler için en belirgin örgü benzeri yapıyı oluşturur.
- 3B baskı, doğrudan baskı yatağında tek bir nesne; “yaylı mekanizma, dişli, mafsal, menteşe gibi” hareketli veya hareketli parça içeren tasarımlar 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.



Şekil 12. Katmanlı üretim ile üretilmiş “Gömülü nesne” hibrit yapılı interaktif giyilebilir ürünler.

Kaynak: Url-13, Url-6, Url-12, Url-20.



Şekil 13. 4B baskılı “Kendinden montaj ve Gömülü şekil değişimi” aktif ayakkabı (sol) ve Bio-baskılı “Gömülü şekil değişimi” aktif giyim (sağ) ürünleri.

Kaynak: Url-23, Url-44.

Tablo 12. Gömülü nesne ve akıllı yapıların tasarımına dair bulgular.

Gömülü nesne, e-bileşen, aktif madde, dinamik malzeme, akıllı giyim, hibrit yapı...

- Katmanlı üretim 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 ve duyarlı bileşenler ile hibrit materyaller oluşturulabilir.
- 4B baskı ile akıllı tekstil veya giyimde bileşen sayısını azaltan, montaj süresini kısaltan hibrit yapılar ile iyileştirilmiş yüzey kalitesi sağlanabilir.
- 4B baskı, hibrit yapılarda kütle azalması ve maliyet verimliliği sağlar.
- Serbest karmaşıklık, bileşenlerde gücü en üst düzeye çıkarır, ürünlerin performansını iyileştirir, malzeme akışlarını, tedarik zinciri adımlarını, enerji verimliliği ve ekolojik riski azaltır.

Bulgular değerlendirildiğinde, 3B baskılı giyilebilir projelerin tasarım detaylarında “biyoilham” ve “biomimetik” yapı özelliklerinin hakim olduğu görülmüştür. Katmanlı üretim, doğal sistemlerden aldığı tasarım kuralları veya yönergeleri ile gerçek biyomimetik yapıların

üretilmesine imkân tanımaktadır. Şekil 14’de kelime bulutu olarak sunulan kavramlarda görülebileceği gibi 3B baskılı giyilebilir uygulamaların ortak tasarım özelliklerini *katmanlı üretim için biyomimetik tasarım yaklaşımı* altında değerlendirmek mümkündür.



Şekil 14. Katmanlı üretim “3B Baskılı Giyilebilir” tasarım alanı kavramları.

6.2. Sistemik literatür taramasına dair bulgular

Katmanlı üretim çok malzemeli, çok işlevli, özelleştirilmiş parçalar üretebilmesi bakımından, sürdürülebilir bir üretim yöntemi midir? sorusuyla ilgili olarak 43 akademik makale ve 43 3B baskılı moda projesinin incelenmesiyle ulaşılan bulgular Tablo 13’de sunulmuştur.

Tablo 13. Sistemik literatür taramasına dair bulgular tablosu.

Sistemik bir literatür taraması...
<ul style="list-style-type: none">• Akademik ve uygulama literatürü analizi, 2010-2021 yılları arası her iki alanda ilgi artışı göstermektedir.• 2013’lerde başlayan akademik yayınlar 2015’de dört 2017’de dokuz kata yakın artışla devam etmektedir.• Katmanlı üretim, 2013’de hype döngüsünün tepe seviyesine ulaşmıştır.• 2013 hype döngüsünde “kurumsal 3B baskı, tüketici sınıfı 3B baskı, 3B biyo-baskı” üç sınıfa ayrılan alan genişleme göstermiştir.• Akademik literatürde 4B baskı 2014’de görülürken, 4B biyobaskı ilk 2016 hype döngüsünde görülmüştür.• Vakalara dair 2015 yılında pik seviyeleri görülürken 2020’lerle birlikte düşüş eğilimi izlenmektedir.• Son yıllarda sistemik literatür taraması çalışmalarının eklenmesi ile katmanlı üretimin bilimsel araştırma alanında genişleme devam etmektedir.• 3B baskılı giyilebilir alanı bilimsel yayınlarında en çok incelenen malzeme “polimer” olmuştur.• Polimerler, doğada bozunmadığı için olumsuz ekolojik etkileri yoğun araştırma odağındadır.• Son yıllarda akademik bağlamda, doğrusal al-yap-at modeli aksine döngüsel ekonomi, ürün, bileşen ve malzemelerin R stratejilerine odaklanma ve ekolojik değer korunması önem kazanmaktadır.• 3R’ye (azalt, yeniden kullan ve geri dönüştür) ilaveten onarım, yeniden tasarım ve yeniden üretimi göz önünde bulunduran R stratejilerinde, 6R’den-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, döngüsellığe sahip malzeme ve süreçlere doğru yaşanan tema değişimi, katmanlı üretimin gelecek kullanımına dair iyileştirici potansiyel etkiler barındırmaktadır.• 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 dönüşüm hizmeti sağlayabilmesi, döngüsel ekonomi çerçevesinde FDM teknolojilerine ilgi artışı yaratmaktadır.• Katmanlı üretimin yüksek nitelikli tasarım ihtiyacı bir dizi disiplinler arası beceri gerekliliği oluşturmaktadır.• İnovasyon aşamasından başlayarak, yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirlik etkilerinin ürün tasarımına entegrasyonu, tasarımcılarda farkındalık yanında ilgili konularda yeni beceri (e-ticaret, sayısal pazarlama, malzeme bilgisi, hesaplamalı tasarım vb.) gerekliliği oluşturmaktadır.• Akademik literatür, katmanlı üretimin çevresel sürdürülebilirliği ve yaşam döngüsü etkilerini iyileştirmek için biyomalzeme “PLA” araştırmalarına odaklanma göstermektedir.• Sürdürülebilir ve döngüsel üretim için biyomalzeme avantajları, hem biyomalzemelerin hem de ürünlerin yerel üretimi, sıfır sera gazı emisyonu, yenilikçi ve sürdürülebilir ürünler olarak değerlendirilebilir.

6.3. Katmanlı üretim tasarımında 3B CAD araçları entegrasyonuna dair bulgular

Tasarım sürecinde, nesnel ve görselleştirme becerilerinin kombinasyonu bakımından, katmanlı üretim tasarımı için 3B CAD araçlarının olanakları nelerdir? sorusuyla ilgili olarak katmanlı üretimi; tasarım, simülasyon, üretim ve hizmet akışının entegre edildiği sayısal tasarım ve üretim paradigması olarak değerlendirmek gerekir. Katmanlı üretime sürdürülebilir ve dögüsel tasarım yaklaşımı entegrasyonunda, tasarım süreci kadar tasarımcılara da rol düşmekte, 3B baskı alanına odaklanan hibrit malzeme tasarımcıları oluşmaktadır. Katmanlı üretimin tasarım teorileri, süreçleri, yöntemleri, araçları, teknikleri ve bu sistemlerde malzeme, geometri ve kalite arasındaki ilişkinin geliştirilmesiyle her düzeydeki tasarım disiplninde *Katmanlı üretim için tasarım* yaklaşımı, ilgili eğitime uyarlanabilecektir. Ürün izlenebilirliği, paydaşlar arası veri alışverişi ve yaşam döngüsü boyunca yönetimiyle katmanlı üretimin sistem sürdürülebilirliği sağlaması da mümkündür.

6.4. Sürdürülebilir yaşam döngüsü değerlendirme analizine dair bulgular

Katmanlı üretimin sürdürülebilirliği, teknolojilerinin süreç parametreleri ötesinde, yaşam döngüsü üzerindeki etkilerin ele alınmasını gerektirmektedir. SYDD analizi, katmanlı üretimin ürün yaşam döngüsü boyunca sosyal ve ekolojik uyumluluğunu, avantaj, kısıtlamalar ve gelecek zorlukların belirlenmesini sağlamıştır. Katmalı üretim "SLA, CDLS, SLS, FDM ve PolyJet" teknolojileri SYDD analiz bulguları Tablo 14'da özetlenmiştir.

Tablo 14. SYDD analiziyle ulaşılan bulguların özet tablosu.

SYDD analiziyle ulaşılan bulguların özeti...	
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 son.-Dağıtım-Kullanım:	Optimizasyonun işlem sonrası ihtiyacı azaltıp enerji verimliliği sağlaması.
SP1 Ömrün sonu:	Geri dönüşüm stratejileri sağlanmak.
SP2 Hammadde:	Doğada bozunamayan (fossil bazlı) hammaddelerden kaçınmak.
SP2 Tasarım:	Ürün kullanım amacı ve yeniden kullanım stratejisi oluşturmak.
SP2 Üretim:	Yaşam döngüsü boyunca yenilenebilir enerji kullanımını teşvik.
SP2 İşlem son.-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 emisyonu azaltmak.
SP3 Üretim:	Yaşam döngüsü boyunca yenilenebilir enerji kullanımını teşvik.
SP3 İşlem son.-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 modelli iş, küresel üretimin geliştirilmesi.
SP4 İşlem son.-Dağıtım-Kullanım:	Tersine lojistik seçeneklerinin geliştirilmesi.
SP4 Ömrün sonu:	Malzeme geri dönüşüm ve yeniden kullanım önlemleri.

Tablo 15. SYDD analizi sonuçları renk matrisi.

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

Çok Kötü	Oldukça Kötü	Kötü	İyi	Oldukça İyi	Çok İyi

SYDD sürecinin sonuçları, her bir hücrenin bir dizi soru neticesini yansıttığı, ana etkilerin nerede olduğunu görmeyi sağlayan renk matrisinde kodlanarak Tablo 15’de sunulmuştur. Tasarımcıların, katmanlı üretimin avantajlarından yararlanmak için yüksek nitelikli, katma değerli tasarım çözümleri yanında, döngüsel tasarım stratejilerini gözetilen tasarım düşüncesi geliştirmesi gerekmektedir. Katmanlı üretimin avantajları ve kısıtlamaları nelerdir? sorusuna yönelik yürütülen SYDD analizi bulguları Tablo 16’da özetlenmiştir.

Tablo 16. Katmanlı üretimin sürdürülebilirlik avantaj ve kısıtlamalar tablosu.

Avantajlar	Kısıtlamalar
<ul style="list-style-type: none"> Tasarım özgürlükleri, Özelleştirme ve kişiselleştirme, İhtiyaç üzerine değil, talep üzerine üretim, Malzeme tüketiminde verimlilik, Üretim için düşük başlangıç maliyeti, Yenilenebilir veya geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı, Tasarım optimizasyonu ile malzeme ve enerji verimliliği, Süreç optimizasyonu ile daha az atık oluşumu, Sayısal iş akışı, daha hızlı ürün geliştirme döngüleri, Dağıtılmış veya yerinde üretim ile lojistiği azaltan verimli tedarik zinciri, Kullanıcı katılımlı üretici-tüketici iş modelini teşvik, Simülasyona dayalı tüketici-ürün ilişkisi, Talep üzerine yedek parça oluşturma, envanter israfını azaltma, Yeniden tasarım ile ürünlere ikinci, üçüncü vb. ömür, Parçaların yükseltilmesi, eski parçaların değiştirilebilmesi, Yeni beceri ve yetkinliğe dayalı, sürekli beceri gelişimi, Tasarım koruması. Geri dönüşümün yerel veya yerinde yapılabilmesi, 	<ul style="list-style-type: none"> Fosil 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.

6.5. Strateji ve Eylem Önerileri

Bu bölümde, karar vericilerin tasarım aşamasında stratejik seçim yapma yeteneklerini artırmak amacıyla, önceki bölümde ulaşılan bulgulara dayanan eylem önerileri kontrol listesine ulaşılmıştır. Katmanlı üretimin, ürün inovasyon sürecinde sosyo-ekolojik sorunları nasıl ele alacağına yönelik Tablo 17’de sunulan eylem önerileri, tasarımcılara ve karar vericilere kaynakları ve inovasyonu hedeflemesi gereken noktalara dair kılavuz sağlar.

Tablo 17. Katmanlı üretim uygulamaları için strateji ve eylem önerileri tablosu.

Katmanlı Üretim Uygulamaları için Strateji ve Eylemler	
Hammade	<ul style="list-style-type: none"> Katmanlı üretimin sosyo-ekolojik etkili malzeme kullanım riski nedeniyle, malzeme inovasyonunun takip edilmesi.
Tasarım	<ul style="list-style-type: none"> Ürün ve malzemelerin, yaşam döngüsü etkilerinin dikkate alınarak tasarlanma gerekliliği. Tasarımcı ve mühendislerde katmanlı üretim uzmanlık yetkinliğinin artırılması.
Üretim	<ul style="list-style-type: none"> Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım durumunun takip edilmesi. Üretim aşamasında döngüler oluşturma (tozun %100 yeniden kullanımı).
İşlem Sonrası, Dağıtım	<ul style="list-style-type: none"> İşlem sonrası ve kullanımda (yüzey, yapı) sürdürülebilirlik performansı için tasarım optimizasyonu. Katmanlı üretimin geniş uygulama alanı ve daha kaliteli parçaların geliştirilmesi.
Kullanım	<ul style="list-style-type: none"> Değişen tedarik zinciri adımlarına uyum için teknolojiyle ilgili becerilerde sürekli gelişim. Çevrim içi hizmet ağları etkisiyle oluşan tüketici davranışı değişikliğine uyum.
Toplama, Geri dönüşüm, Atık	<ul style="list-style-type: none"> Sürdürülebilir hammadde elde etmek için tedarikçilerle sürekli iş birliği sağlanması. Uygun geri dönüşüm stratejilerinin belirlenmesi.

6.6. Gelecek Çalışma Önerileri

Katmanlı üretimin ekonomik veya sosyo-ekonomik sürdürülebilirlik etkilerine yönelik geliştirilebilecek gelecek çalışmalar; farklı araç ve yaklaşımların kullanıldığı endüstri sektörleriyle (medikal, ayakkabı, kuyumculuk vb.) işbirliği içerebilir, bu işbirliklerinde yenilenebilir ve/veya geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı ile ürünler geliştirilebilir. Katmanlı üretim yaklaşımı malzeme, enerji, atık, kalite, eğitim vb. açılardan ele alınarak tasarımdan üretim süreçlerine kadar incelenebilir.

7. SONUÇ

Bu çalışmada, sürdürülebilirliğin kavramsal tasarım süreciyle entegrasyonuna yönelik katmanlı üretim teknolojilerinin avantaj ve zorlukları ele alınmıştır. Katmanlı üretimin ürün ve malzeme yaşam döngülerinde sunduğu sürdürülebilir avantajlar yanı sıra, bu faydaların gerçekleştirilmesi için üstesinden gelinmesi gereken zorlukların belirlenmesi de sağlanmıştır. Katmanlı üretimin, sosyal ve ekolojik açıdan olumsuz etkileri olan malzeme kullanım riski bulunmaktadır. Yaşam döngüsü perspektifinde belirlenen sosyo-ekolojik etkilerin azaltılması, inovasyon aşamasıyla başlayacak bilinçli seçimlerin (bileşen tasarımı, katman kalınlığı, çözünürlük, işlem süreci, malzeme özelliği vs.) tasarım ve üretime uyarlanmasıyla sağlanabilir. 3B baskılı giyilebilir alanında kullanılan polimer malzemelerin olumsuz etkilerinin azaltılabilmesi için malzeme inovasyonunda yaşanan gelişmelerin takip edilmesi ve tedarik zincirinde sürekli işbirliği gerekmektedir.

Katmanlı üretim sanat, teknoloji ve tasarım alanlarını birbirine bağlayan yeni şekillendirme yapıları etkileşimli sistemler; duyarlı ve dinamik malzeme özellikleriyle gerçeğe yakın davranış sergileyebilmektedir. Giyilebilir ürünlerde 4B baskı, form, geometri ve malzeme özelliklerinde gerçek zamanlı değişikliklere, yapısal davranışları anlama ve kullanmaya odaklanmaktadır. Katmanlı üretim için tasarım yaklaşımının, giyilebilir parçaların geometri ve yapılarını, malzeme verimliliğini arttıracak şekilde uyarlama olanağı, hibrit malzeme yapılarına olanak tanımasıyla daha önce tasarım ve üretimi mümkün olmayan ürün ve malzemelerle deneysel yöntemler geliştirmeye fırsat vermektedir. Katmanlı üretimin biyoesinli ve biyomimetik tasarım yaklaşımı, polimer baskının doğrudan tekstil yüzey üzerine uygulanma yeteneği, geçmişin katı mekanik yapılarını yeni bir üretim paradigması ile yumuşak, esnek, organik temsiller üzerine geliştirmekte, etkileşimli dinamik tasarım, interaktif giyim, interaktif mimari alanında tasarımlara imkân vermektedir.

Katmanlı üretim sayısal tasarım, simülasyon, üretim ve hizmet akışının entegre edildiği sürdürülebilir tasarım ve üretim paradigması olarak; özelleştirilmiş ürünleri prototip oluşturmanın gereksiz kılındığı, geleneksel ürün geliştirme adımlarının atlandığı, tasarımdan üretime doğrudan geçişe imkan veren bir sürecinin önünü açmıştır. Günümüzde derinleşen enerji krizi ülkeleri resesyona doğru sürüklerken malzeme ve enerji konularında önemini artırmaktadır. Katmanlı üretim, yüksek karmaşıklıkta çok malzemeli, çok işlevli, monolitik parçaların özelleştirilmesinde optimizasyon ile hafif yapı sağlarken, kaynak verimliliğini (malzeme, enerji) en üst düzeye çıkarmaktadır. Geleneksel üretimle karşılaştırıldığında katmanlı üretimin en büyük avantajı özelleştirme ve kişiselleştirmede işçilik maliyetinin sıfır olmasında yatmaktadır. Dağıtılmış üretimle ekolojik etkileri azaltırken, pazarlardan tasarım dosyasına ulaşım imkanı, kişiselleştirilmiş ürünlerin yerel üretimi, kullanıcı katılımını ve üretici-tüketici iş modelini teşvik gibi sosyal etki bakımından katkısı yüksektir. 3B baskılı giyilebilir alanının çöpe atılma veya yakma süreciyle yarattığı atık etkileri, geri dönüşüm stratejileri ile önlenmektedir. Kullanılmış tozun filamentte çevrilmesi, tozun yeniden kullanımı ve işlem sonrası adımların azaltılması kaynak verimliliği yanında, atık ve emisyon seviyelerini de azaltacağından daha sürdürülebilir performans sağlanabilir. 3B baskılı giyilebilir alanı ve kullanılan katmanlı üretim teknolojilerinin; yeniden tasarım (re-design), parçaları iyileştirme ve onarma (recover), yeniden üretme ve yenileme (re-manufacturing), geri dönüştürülebilir malzemeleri kullanma (recycle) gibi "R



stratejileriyle" olan etkileşimi ürün yaşam döngüleri boyunca ortaya çıkan olumsuz sosyo-ekolojik etkileri iyileştirilmeyele sonuçlanmaktadır.

8. KAYNAKÇA

- Broman, G. I. & Robert, K. H. (2017). A framework for strategic sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, Vol.140, pp.17-31.
- Caradonna, J. L. (2014). *Sustainability: A History*. New York: Oxford University Press.
- Davis, N. & Philbeck, T. (2019). The Fourth Industrial Revolution: Shaping A New Era. *The Fourth Industrial Revolution. (FW 2018/2019) The Journal Of International Affairs*, Vol.72, No.1.
- Everard, M. & Blume, R. (2020). Additive Sustainability Footprint: Rationale and Pilot Evaluation of a Tool for Assessing the Sustainable Use of PVC Additives.
- 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.
- 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*.
- 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.
- 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.
- O'Brien, C. (1999). Sustainable production – a new paradigm for a new millennium. *Int. J. Production Economics*, 60-61, pp.1-7.
- Oxman, N. (2010). *Material-based Design Computation* (Ph.D. thesis). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge & Boston.
- Plessis, A., Broeckhoven, C., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I. & Hands, C. H. (2019). Beautiful and functional: A review of biomimetic design in additive manufacturing. *AM.*, Vol.27.
- 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.
- Rinaldi, R. R. (2019). *Fashion Industry 2030*. Reshaping the Future Through Sustainability and Responsible Innovation.
- 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.
- Tibbits S. (2017). *An Introduction to Active Matter*. Active Matter, MIT Press, pp.11-13.
- 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.
- 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.
- URL-1. <https://www.trthaber.com/foto-galeri/turkiye-nufusunun-dunya-siralamasindakiyeri-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: 04.01.2022.
- URL-5. Herpen, I. van (2015). Erişim tarihi: 01.01.2022. https://payload.cargocollective.com/1/8/284138/8677464/IVHdef2_905.jpg



- URL-6. Wipprecht, A. (2014). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://www.materialise.com/sites/default/files/close_up.png.
- URL-7. Rosenberg, L., Rosenkrantz, J. (2015). Erişim tarihi: 01.01.2022. https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/i.php?/000/997/409660,medium_large.1448472110.jpg.
- URL-8. Herpen, I. van (2011). Erişim tarihi: 01.01.2022.
<http://www.irisvanherpen.com/DOCS/IVH-Escapism.pdf>.
- URL-9. Fizel, J., Huang, M. (2011). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://static.dezeen.com/uploads/2011/06/dezeen_N12-3D-printed-bikini-byContinuum-Fashion-and-Shapeways-4.jpg.
- URL-10. Herpen, I. van (2013). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://static.wixstatic.com/media/4d9771_cfb7791fb7664cceed0cd3d663594869.jpg/v1/fill/w_468,h_906,al_c,q_85,usm_0.66_1.00_0.01,enc_auto/4d9771_cfb7791fb766_4cceed0cd3d663594869.jpg.
- URL-11. Herpen, I. van (2014). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://static.wixstatic.com/media/4d9771_9d2927b6d1fc4cac87882b4324894366.jpg/v1/fill/w_468,h_906,al_c,q_85,usm_0.66_1.00_0.01,enc_auto/4d9771_9d2927b6d1fc4cac87882b4324894366.jpg.
- URL-12. Wipprecht, A. (2015). Erişim tarihi: 26.02.2022. <https://parametric-architecture.com/wp-content/uploads/2020/06/3040233-slide-s-4the-spider-dress-fends-off-unwanted-advances-with-its-claws.jpg>.
- URL-13. Wipprecht, A. (2013). Erişim tarihi: 28.02.2022.
<https://payload.cargocollective.com/1/8/284138/6356335/webSD1.jpg>
- URL-14. Rosenberg, L., Rosenkrantz, J. (2014). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/i.php?/000/773/detail1,medium_large.1417365145.jpg.
- URL-15. Adidas, Futurecraft (2017). Erişim tarihi: 01.01.2022.
<https://sneakernews.com/wp-content/uploads/2019/11/adidas-AlphaEdge-4D-BlackWhite-1.jpg>.
- URL-16. Adidas, Futurecraft (2017). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://res.cloudinary.com/carbon3d/image/upload/q_auto,f_auto/v1622061162/Industries/consumer/midsole.jpg.
- URL-17. Rosenberg, L., Rosenkrantz, J. (2016). Erişim tarihi: 01.01.2022. <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/i.php?/001/032/IMGP9952,large.1456767226.jpg>.
- URL-18. Rosenberg, L., Rosenkrantz, J. (2015). Erişim tarihi: 01.01.2022. <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/i.php?/001/002/146938134,medium.crop.1448480404.jpg>.
- URL-19. ThreeAsfour (2016). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://images.squarespacecdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1522081082595-VOERPP2ST17V7TCRLZXI/Stratasys_20160913-5564.jpg?format=750w.
- URL-20. Wipprecht, A. (2020). Erişim tarihi: 26.02.2022.
https://www.3dprintingmedia.network/wpcontent/uploads/2020/08/PANGOLIN_DRESS_02.jpg.
- URL-21. Peleg, D. (2017). Erişim tarihi: 01.01.2022. <https://danitpeleg.com/wp-content/uploads/2017/07/danit-peleg-venus-21.jpg>.
- URL-22. ThreeAsfour (2016). Erişim tarihi: 01.01.2022.
file:///C:/Users/%C5%9F%C3%BCkran/Desktop/res/tumblr_pff9m9Ri0M1qlypoqo1_640.jpg.
- URL-23. Tibbits, S. (2015). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://images.squarespacecdn.com/content/v1/58977341414fb5309fc954e6/1501474571136-AS5BHYQPP63W0TR6XWK4/ACTIVE+SHOES+Upper_Shoe.jpg?format=1000w.



- URL-24. Herpen, I. van (2012). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://static.wixstatic.com/media/4d9771_bb8668b2c64943ef860c8f64ea8da682.jpg/v1/fill/w_468,h_906,al_c,q_85,usm_0.66_1.00_0.01,enc_auto/4d9771_bb8668b2c64943ef860c8f64ea8da682.jpg.
- URL-25. Pensar (2014). Erişim tarihi: 01.01.2022. <https://icomold.com/wp-content/uploads/2021/08/DNA-Print-2-1536x1024.jpg>.
- URL-26. Bitonti, F. (2013). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://static.dezeen.com/uploads/2013/03/dezeen_3D-printed-dress-by-MichaelSchmidt-and-Francis-Bitonti_6.jpg.
- URL-27. Herpen, I. van (2015). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://payload.cargocollective.com/1/8/284138/9600474/Look-30d_1000.jpg.
- URL-28. Herpen, I. van (2010). Erişim tarihi: 01.01.2022.
<https://collectionapi.metmuseum.org/api/collection/v1/iiif/701966/1621938/restricted>.
- URL-29. Herpen, I. van (2013). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://images.squarespacecdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1518464569392-NWZJ6K21IR1OCDJAIJ8U/Stratasys_3D-Printed_Cape_300dpi.jpg?format=1000w.
- URL-30. Evenhuis, J., Kytтанen, J. (2003). Erişim tarihi: 01.01.2022.
<https://i.pinimg.com/originals/ee/86/01/ee86013ab7486e87e7fba7658f131276.jpg>.
- URL-31. Oxman, N. (2016). Erişim tarihi:01.01.2022.
https://www.bjork.fr/IMG/jpg/neri_oxman_designs_rottlace_2.jpg.
- URL-32. Peleg, D. (2015). Erişim tarihi: 01.01.2022. <https://danitpeleg.com/wp-content/uploads/2018/01/28.jpg>.
- URL-33. Farahi, B. (2015). Erişim tarihi: 01.01.2022.
<https://youtu.be/mPjffZrAuos?t=64>.
- URL-34. Farahi, B. (2015). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://behnazfarahi.com/assets/img/og/og_synapse.jpg.
- URL-35. Oxman, N. (2016). Erişim tarihi: 01.01.2022.
<https://images.squarespacecdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1520257458633-W9GWB1AF8NX0T0P7AZ6Y/Neri+Oxman+series+01-028.jpg?format=1000w>.
- URL-36. Oxman, N. (2016). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://images.squarespacecdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1520277994850-8ZKCO7U5WAGIJWV4YUNZ/22_Mask_1_front_square_noText.jpg?format=1000w.
- URL-37. Oxman, N. (2016). Erişim tarihi: 01.01.2022.
<https://images.squarespacecdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/15179312978573KM96Z7YZH3UWLUATT3Q/125-127.jpg?format=750w>.
- URL-38. Oxman, N. (2014). Erişim tarihi: 01.01.2022. <https://dam-prod.media.mit.edu/thumb/2017/10/13/wanderers14.jpg.1400x1400.jpg>.
- URL-39. ThreeAsfour (2016). Erişim tarihi: 01.01.2022.
<https://www.wired.com/2017/05/the-shattering-truth-of-3d-printed-clothing/>.
- URL-40. Herpen, I. van (2018). Erişim tarihi: 01.01.2022.
https://www.irisvanherpen.com/_uploaded/uploads/iris_van_herpen_HC_SS18_look0005_1-50.jpg.
- URL-41. Koerner, J. (2019). Erişim tarihi: 01.04.2022.
https://static.wixstatic.com/media/4d9771_4d0820b7b6c24a5794074119c40d5cdf000.jpg



- g/v1/fill/w_1076,h_920,al_c,q_85,usm_0.33_1.00_0.00,enc_auto/4d9771_4d0820b7b6c24a5794074119c40d5cdcf000.jpg.
- URL-42. Three As four (2019). Erişim tarihi: 01.01.2022. <https://3dprint.com/wp-content/uploads/2019/09/Stratasys-3as4-dress-1.png>.
- URL-43. Samson, S. (2019). Erişim tarihi: 01.01.2022. <https://images.squarespacecdn.com/content/v1/5a6115486f4ca3ee5ede0cd1/1579001613695-M4UI01WP9HAG2HW19GEI/samson+shafran+jacket+2.jpg?format=750w>.
- URL-44. Yao, L. (2012). Erişim tarihi: 01.01.2022. https://cdn.road.cc/sites/default/files/styles/main_width/public/second-skin.jpg.