Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 14(2): 647-665 (2026)

Alışılmışın Dışında Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımlarının Yapısal ve İşlevsel Değişkenleri

Cansu KARDAŞ[1*], Hüseyin Rıza BÖRKLÜ[2]

[1] *İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

[2]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/12/2025
Düzeltme: 15/02/2026
Kabul: 17/03/2026

Anahtar Kelimeler

Katmanlı üretim
Hızlı prototipleme
Ürün geliştirme

Article Info

Research article
Received: 08/12/2025
Revision: 15/02/2026
Accepted: 17/03/2026

Keywords

Product development
Additive manufacturing
Rapid prototyping

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada alışılmışın dışında üç boyutlu yazıcıların tasarımları, baskı ölçeği, çözünürlük(µm), baskı mekanizması, malzeme türü, enerji tüketimi ve kullanım alanlarına göre karşılaştırmaktadır. Her biri, farklı yapısal malzeme birleşimiyle oluşan özgün bileşenlere ve üretim prensiplerine sahip olup, çeşitli 3B baskı teknolojileri temeline dayanarak teknik, teknolojik ve süreç farklılıkları, karşılaştırmalı bir biçimde değerlendirilerek Tablo'da olarak sunulmuştur. / This study compares unconventional 3D printer designs based on print scale, resolution (µm), printing mechanism, material type, energy consumption, and applications. Each features unique components and production principles resulting from different combinations of structural materials; based on various 3D printing technologies, their technical, technological, and process differences are evaluated comparatively and presented in Table.

Yazıcı Türü	Baskı Ölçeği	Çözünürlük (µm)	Baskı Mekanizması	Malzeme Türü	Enerji Tüketimi	Uygulama Alanı	Literatür Kaynağı
Beton	Çok büyük	>10000	Ekstrüzyon	Çimento	Orta	İnşaat	[38-49]
Selüloz	Küçük-Orta	~300	DIW / FDM	Selüloz asetat	Düşük	Medikal, Ambalaj	[49-57]
Biyo	Küçük	~200	Ekstrüzyon / Inkjet	Hidrojel + Hücre	Orta	Tıp, Organ, Doku iskelesi, ilaç testi, kişiselleştirilmiş implant	[58-61]
Cam	Orta	~400	SLA / SLS	Silika cam	Yüksek	Optik, Mimari	[67,68]
Seramik	Küçük-Orta	~100	SLA / Ekstrüzyon	Zirkonya / Al_2O_3	Orta	Enerji, Tıp	[65, 66]
Gıda	Küçük	~1000	Ekstrüzyon	Çikolata, Püre	Düşük	Gıda	[69-73]
Tekstil	Orta	~400	FDM	PLA / TPE	Orta	Moda, Giyilebilir	[74,78]
Nano	Çok küçük	~0.014	FEBID	Metal nanopartikül	Düşük	Elektronik	[63,64]

Tablo. *Farklı sektörlerdeki 3B yazıcıların kıyaslanması* **/ *Table.*** *A Comparison of 3D printers across different industries*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Üretim olanaklarının 3B baskı yoluyla genişlemesi, tasarımın yeni sınırları keşfetme ve karmaşık zorlukları çözme konusunda güçlendirmektedir. / The expansion of manufacturing capabilities through 3D printing empowers designers to explore new frontiers and solve complex challenges.*
- *Malzeme bilimi ve 3B baskı ile bütünleştikçe, teknolojinin geleneksel üretim süreçlerini yeniden şekillendirmede önemli bir rol oynamaktadır / As materials science and 3D printing converge, the technology plays a significant role in reshaping traditional manufacturing processes.*
- *3B baskının çok yönlülüğü, daha verimli, sürdürülebilir ve özelleştirilebilir tasarımlar ortaya koymaktadır. / The versatility of 3D printing enables the creation of more efficient, sustainable, and customizable designs.*

Amaç (Aim): *Çalışma sonucunda elde edilen bulguların ilk yazar tarafından yazılan doktora tezi ve gelecekte yapılacak olan çalışmlar için geliştirilecek yeni malzeme ve üretim teknolojilerine yön vermesi ve yenilikçi ürün tasarımlarına ilham kaynağı olması hedeflenmektedir. / The findings of this study are intended to guide the development of new materials and production technologies for future research, as well as to serve as a source of inspiration for innovative product designs, as outlined in the doctoral thesis written by the first author.*

Özgünlük (Originality): *Alışılmışın dışındaki katmanlı üretim sistemleri için özgün bir tasarım değişkenleri matrisi sunulmuştur. / A unique matrix of design variables is presented for unconventional layered manufacturing systems*

Bulgular (Results): *3B yazıcı tasarımlarındaki yapısal değişikliklerin, basım hassasiyeti ve malzeme çeşitliliği üzerindeki işlevsel performansları belirlenmiştir./ The functional performance of structural changes in 3D printer designs on printing accuracy and material diversity has been determined*

Sonuç (Conclusion): *Her bir spesifik uygulama alanı için malzemeye uygun özelleşmiş baskı mekanizmaları, çözünürlük limitleri ve enerji maliyetleri ortaya konmuştur. / For each specific application area, customized printing mechanisms, resolution limits, and energy costs have been identified.*

*Corresponding author, e-mail: kardascansu@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1837666

GU J Sci, Part C, 14(2): 647-665 (2026)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Alışılmışın Dışında Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımlarının Yapısal ve İşlevsel Değişkenleri

Cansu KARDAŞ[1*], Hüseyin Rıza BÖRKLÜ[2]

[1] *İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

[2]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/12/2025
Düzeltme: 15/02/2026
Kabul: 17/03/2026

Anahtar Kelimeler

Katmanlı üretim
Hızlı prototipleme
Ürün geliştirme

Öz

20. yüzyılın sonlarında geliştirilen üç boyutlu yazıcı teknolojileri, kısa süre içinde geniş bir kullanım alanı bularak prototip üretiminden nihai ürün imalatına kadar pek çok sektörde önemli bir yer edinmiştir. Başta mühendislik ve tasarım olmak üzere, tıptan mimarlığa kadar farklı disiplinlerde faaliyet gösteren meslek gruplarının rahatlıkla kullanabildiği bu cihazlar, üretim süreçlerini köklü biçimde dönüştürmektedir. En yaygın kullanılan hammaddeler olan PLA (polilaktik asit), ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) ve PETG (Polietilen Tereftalat Glikol) gibi malzemelerin dışında; farklı malzemelerle üretim yapılmasına olanak tanıyan sistemler de geliştirilmiştir. Bu çalışmada, üç boyutlu yazıcıların tasarımları, malzeme bazlı ve uygulama bazlı olacak şekilde farklı alanlara göre sınıflandırılarak, literatürdeki güncel veriler ışığında yapısal ve işlevsel değişkenleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Elde edilen bulguların, gelecekte geliştirilecek yeni malzeme ve üretim teknolojilerine yön vermesi ve yenilikçi ürün tasarımlarına ilham kaynağı olması hedeflenmektedir.

Structural and Functional Variables of Unconventional 3D Printer Designs

Article Info

Research article
Received: 08/12/2025
Revision: 15/02/2026
Accepted: 17/03/2026

Keywords

Additive manufacturing
Rapid prototyping
Product development

Abstract

Developed in the late 20th century, 3D printing technologies have rapidly found widespread application, securing a significant position in numerous sectors ranging from prototype production to final product manufacturing. These devices, easily utilized by professional groups across diverse disciplines—primarily engineering and design, but extending from medicine to architecture—are radically transforming production processes. In addition to the most commonly used raw materials such as PLA (Polylactic Acid), ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), and PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol), systems capable of producing with a variety of other materials have also been developed. In this study, 3D printer designs are classified into different categories based on material and application, and their structural and functional variables are examined in detail in light of current data in the literature. The findings obtained are intended to guide future material and production technologies and serve as a source of inspiration for innovative product designs.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yaklaşık 40 yıllık bir geçmişi olan 3 Boyutlu (3B) yazıcılar, günümüzde farklı uygulama alanlarında yaygınlaşmaya ve teknik kapasitelerini artırmaya devam etmektedir. Temelleri 1980'li yıllara dayanan ve genel olarak 'Eklemeli İmalat (Eİ)' başlığı altında toplanan bu teknolojiler, sürekli gelişen metodolojik çeşitliliği ile modern üretimin merkezine yerleşmiştir. Bu alandaki önemli ilk atılım 1981 yılında Japonya'daki Nagoya Belediyesi Endüstriyel Araştırma Enstitüsü araştırmacısı Dr. Hideo Kodama'nın stereolitografinin (SLA) erken bir formunu geliştirmesiyle gerçekleşmiştir [1]. Ticari hale dönüşemeyen bu sistemde Kodama, ışığa duyarlı reçine katmanlarını seçici olarak sertleştirmek için ultraviyole (UV) ışık kullanmış ve yeni gelişmeler için zemin hazırlamıştır [2]. 1984 yılında Amerikalı mühendis Charles Hull ise stereolitografiyi geliştirmeyi başararak patentini almıştır. Bu sayede hızlı prototipleme teknolojilerinin temelini oluşturmuş ve bu alanda

*Corresponding author, e-mail: kardascansu@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1837666

daha fazla yeniliğin önünü açmıştır. Bu sistem, sıvı reçineyi UV ışığı ile katılaştırarak karmaşık parçalar oluşturabilmiştir [3]. Ayrıca Hull, 1986 yılında 3B yazıcı üretmek için kurulan ilk şirketlerden biri olan 3D Systems'in de ortağı olmuştur [4].

SLA ile sağlanan bu ilk başarı sonrası araştırmacılar alternatif malzemelere dayalı üretim yöntemleri geliştirme konusunda çalışmışlardır. 1988 yılında Carl Deckard, toz halindeki malzemeleri katı nesnelere kaynaştırmak için güçlü lazer kullanımını içeren Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yönteminin patentini almıştır [5]. 1989 yılında ise Scott Crump daha düşük maliyetlerle baskı imkânı sağlayan Fused Deposition Modeling (FDM) teknolojisini geliştirmiştir [6]. Eritilmiş termoplastik filamenti katman katman ekstrüde ederek baskı yapan bu teknoloji, kullanım kolaylığı sebebiyle zamanla en yaygın kullanılan 3B yazıcı teknolojisi olmuştur [7]. Bu öncü gelişmeler ile bugün mevcut olan çeşitli 3B teknolojilerinin temelleri atılmıştır.

1990'larda 3B baskı teknolojileri havacılık, otomotiv ve sağlık gibi sektörlerin ilgisini çekmeye başlamıştır. Yazıcıları ticarileştiren 3D Systems ve Stratasys gibi şirketler, işlevsel prototipler üretebilen daha kapsamlı makineler ile ürün yelpazelerini genişletmeye başlamıştır [8-10]. Bu dönemde, Binder Jetting ve Direct Metal Laser Sintering (DMLS) teknolojileri ortaya çıkmış ve metal tabanlı baskı için katmanlı üretim malzemeleri geliştirilmiştir [9, 10]. Ancak bu dönemlerde yüksek maliyetler ve teknik sınırlamalar nedeniyle 3B yazıcılar, büyük ölçekli üretimden ziyade hızlı prototip oluşturma aracı olarak kalmıştır [11].

2000'lerin başında, özellikle 2009 yılında FDM teknolojisi için önemli patentlerin sona ermesiyle, 3B baskı alanında değişimler yaşanmıştır. Bu durum, kendisini kopyalayan 3B yazıcılar geliştirmeyi hedefleyen RepRap (Replicating Rapid Prototyper) gibi açık kaynaklı projelerin gelişmesini sağlamıştır. Bu proje, masaüstü 3B yazıcıların satın alınabilir ve erişilebilir olmasına önemli katkı sağlayarak büyüyen bir yapımcı, araştırmacı ve girişimci topluluğunu bir araya getirmiştir [12-13]. Aynı zamanlarda Multi Jet Fusion (MJF) ve Selective Laser Melting (SLM) teknolojilerindeki gelişmeler, özellikle kişiye özel protez ve implantların daha uygulanabilir hale geldiği biyomedikal mühendisliği gibi sektörlerde daha verimli ve yüksek mukavemetli endüstriyel uygulamalara olanak sağlamıştır [14-15].

Tüm bu keşfedilen teknolojiler ışığında farklı alanlarda, yenilikçi malzemelerle geliştirilerek alışılmışın dışında 3B yazıcıların keşfedilmesini sağlamıştır. Günümüzde ise 3B baskı teknolojileri, prototip oluşturmanın ötesine geçerek tam ölçekli üretim, sürdürülebilir üretim ve hatta biyo-baskıya kadar uzanan uygulamalarla milyarlarca dolarlık bir sektöre dönüşmüştür [16]. Tüm bu çalışmalar nesnelerin yalnızca fiziksel tek bir yapıya sahip olması dışında; nem, ışık veya manyetik alanlar gibi dış uyaranlara karşı zaman içinde değişime veya uyum sağlama yeteneğine sahip olduğu geleneksel 3B baskının uzantısı olarak 4B teknolojilerin de gelişmesini sağlamıştır [17-18].

Beşerî ve çevresel faktörlerin yol açtığı problemlere çözüm olarak geliştirilen sürdürülebilir inşaat için kil bazlı baskı veya organik malzemeleri işlevsel yapılara dönüştüren biyo-baskı gibi teknikler, geleneksel üretim teknolojilerine meydan okumaktadır. Bu alışılmadık teknolojiler yalnızca basılabilecek ürünlerin kapsamını genişletmekle kalmamış, aynı zamanda daha hızlı, sürdürülebilir ve özelleştirilmiş üretim yöntemleri geliştirmeye de öncülük etmektedir. Makale kapsamında alışılmadık 3B yazıcılar incelenerek bilinenlere göre farkları ortaya koyulmuştur.

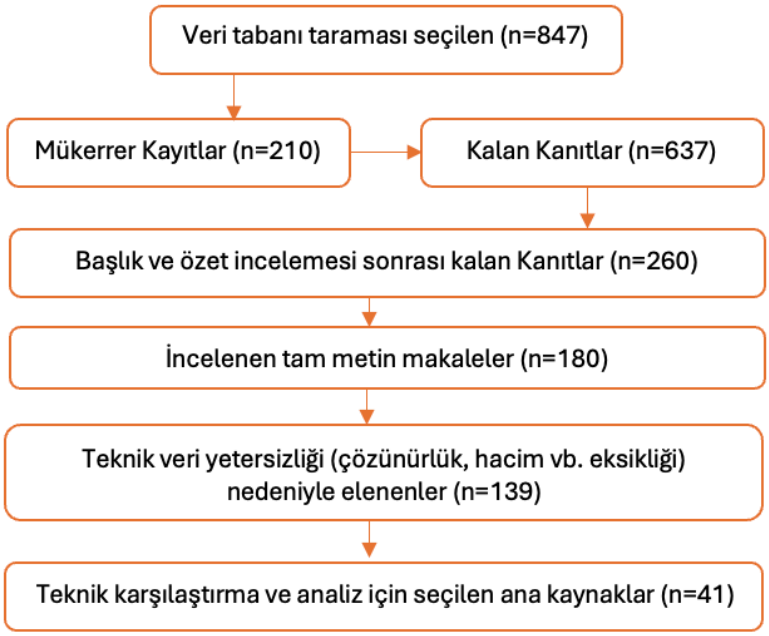
2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışma; eklemeli imalat (Eİ) literatüründe 'alışılmışın dışında' olarak tanımlanan; standart termoplastik materyallerin (PLA, ABS vb.) dışında çimento, canlı hücre, gıda veya nano-materyaller gibi spesifik hammaddelerle çalışan ve bu doğrultuda kendine özgü mekanik/yapısal tasarım gereksinimleri barındıran 3B yazıcı teknolojilerini analiz eden sistematik bir derleme makalesidir. Literatür taramasında Ocak 2025 itibarıyla Web of Science, Scopus ve Google Scholar veri tabanları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Tarama sürecinde "unconventional 3D printing", "additive manufacturing of non-plastic materials", "concrete 3D printing", "bio-printing" ve "nano 3D printing", "cellulose 3D printing" "ceramic additive manufacturing", “food 3D printing”, “textile 3D printing” ve “glass 3D printing” anahtar kelime kombinasyonları kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Bilimsel veri tabanlarında kullanılan notasyonlar, formüller ve kelime dizileri ve bunların sonucunda ortaya çıkan makale sayısı (Notations, formulas, and word sequences used in scientific databases, and the resulting number of articles)

Veri Tabanı	Arama Sorgusu	Makale Sayısı
Scopus	TITLE-ABS-KEY (("cellulose 3D printing" OR "additive manufacturing") AND ("concrete 3D printing " OR "cellulose 3D printing" OR "bio-printing" OR "nano 3D printing" OR "food 3D printing " OR "textile 3D printing " OR “glass 3D printing”))	412
Web of Science	(TS = (("3D printing" OR "additive manufacturing") AND ("concrete 3D printing" OR "cellulose" OR "bioprinting" OR "nanoprinting" OR "food" OR "textile"))) AND LANGUAGE: (English OR Turkish)	285
Google Scholar	"Unconventional 3D printer design" OR "material based additive manufacturing" OR "additive manufacturing of non-plastic materials” OR "concrete 3D printing"	~150 (Teknik açıdan uygun görülen ilk 150 makale)
TOPLAM		**847**

Literatür taraması yapılırken teknolojinin tarihsel gelişimi ve temel ilkelerini belirlemek amacıyla iki farklı zaman katmanı kullanılarak 1981 yılından itibaren öncü çalışmalar dikkate alınmış; ancak teknik karşılaştırmalar ve güncel uygulamalar için ağırlıklı olarak son 10-15 yıla (2010-2025) odaklanılmıştır. Web of Science, Scopus ve Google Scholar veri tabanları üzerinden gerçekleştirilen tarama sonucunda toplam 847 kayda ulaşılmıştır; bu kayıtların seçim ve eleme süreçleri Şekil 1’de sunulan PRISMA akış şemasında detaylandırılmıştır.



Şekil 1. PRISMA akış şeması (PRISMA flowchart)

Bu şemada derlenen makaleler içerisine deneysel sonuçları olan çalışmalar, endüstriyel prototipler, hakemli dergilerde yayınlanmış teknik incelemeler ve malzeme bazlı yenilik sunan tasarımlar dahil edilmiştir. Sadece hobi amaçlı (standart PLA/ABS vb.) masaüstü yazıcı uygulamaları, teknik detay barındırmayan popüler bilim yazıları ve ticari reklam içerikli dokümanlar çalışmaya dahil edilmemiştir. Eleme yapılırken malzeme bazlı ve uygulama bazlı olacak şekilde seçim yağılmıştır.

İncelenen makalelerin amacını belirleme ve sınıflandırma sürecinde aşağıdaki soruların yanıtları aranmıştır:

• Hangi tasarım problemi hedeflenmiştir?

• Kullanılan baskı mekanizması ve teknolojik altyapı nedir?

• Baskı sürecinde kullanılan hammadde/mürekkep türü ve malzeme özellikleri nelerdir?

• Teknolojinin çözünürlük ve baskı ölçeği limitleri nelerdir?

• Süreçteki kritik operasyonel değişkenler (enerji tüketimi, baskı hızı, viskozite vb.) nasıl optimize edilmiştir?

• Elde edilen ürünün uygulama alanı ve endüstriyel potansiyeli nedir?

3. YAYGIN KULLANILAN 3B YAZICILARIN TERCİH EDİLDİĞİ SEKTÖRLER (INDUSTRIAL APPLICATIONS OF COMMONLY USED 3D PRINTERS)

3B baskı veya katmanlı üretim, her biri farklı mekanizmalara, uygulamalara, avantajlara ve dezavantajlara sahip, nesneleri katman katman oluşturan bir dizi teknolojiyi kapsamaktadır [19-20]. En yaygın yöntemler arasında Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), Multi Jet Fusion (MJF), Binder Jetting, Direct Metal Laser Sintering (DMLS) / Selective Laser Melting (SLM), PolyJet Printing, Laminated Object Manufacturing (LOM) bulunmaktadır [20-23]. En yaygın kullanılan ve uygun fiyatlı yöntem olan FDM, nesneleri oluşturmak için termoplastik filamentleri ekstrüde eder ve daha düşük çözünürlük ve yapısal zayıflıkları [24] olmasına rağmen erişilebilirliği ve malzeme çeşitliliği nedeniyle prototipleme, eğitim ve hobi gibi çeşitli projelerde popülerliğini sürdürmektedir [25]. SLA ve DLP, sıvı reçineyi sertleştirmek için UV ışığı kullanarak FDM'e göre ayrıntılı ve pürüzsüz baskılar üretebilmektedir [26-27]. Bu sayede dişçilik, mücevher ve tıbbi uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak toksik reçineler ve işlem sonrası adımlar nedeniyle dikkatli kullanım gerektirmektedir [28]. Toz halindeki malzemeleri lazerler veya termal ajanlarla birleştiren SLS ve MJF, havacılık, otomotiv ve endüstriyel üretim için güçlü, dayanıklı ve desteksiz baskılar sunsa da yüksek maliyetler, karmaşık bakım ve malzeme israfı içermektedir [29-31].

Binder Jetting, sıvı bağlayıcıları biriktirerek toz bazlı baskıyı genişletir ve genellikle döküm kalıpları ve tam renkli modeller için kullanılan metal, kum ve seramik parçaların büyük ölçekli üretimine izin verir, ancak parçaların tam güçlenmesi için ek işlem gerektirir [32, 33]. DMLS ve SLM özellikle metal baskıyı hedefleyerek havacılık, tıbbi implantlar ve endüstriyel aletler için yüksek mukavemetli, hafif bileşenler yaratır [34]; ancak özel ekipman, yüksek enerji tüketimi ve kapsamlı işlem de gerektirir [35].

Son olarak, sıvı fotopolimerleri püskürten ve anında sertleştiren PolyJet Baskı, çok malzemeli ve çok renkli baskıyı destekleyerek ürün tasarımı, tıbbi modelleme ve prototiplemeye fayda sağlarken basılı parçaları kırılgan ve maliyetli olabilmektedir [35].

Laminated Object Manufacturing (LOM), tipik olarak kâğıt, plastik veya metal gibi ince malzeme katmanlarını art arda lamine ederek ve bunları bir ısı ve basınç işlemi uygulayıp birbirine bağlayarak nesneler oluşturan bir 3B baskı teknolojisidir [36]. LOM özellikle otomotiv, havacılık ve mimarlık endüstrileri gibi uygun maliyetli prototipleme gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [37].

Bu teknolojiler hızlı prototipleme, kitlesel özelleştirme ve malzeme israfını azaltma sağlarken, pahalı ekipman, sınırlı malzeme seçenekleri, işlem sonrası gereksinimler ve çevresel kaygılar gibi zorlukları da beraberinde getirmektedir. Teknoloji seçimi, hassasiyet, malzeme özellikleri, uygulama alanı ve maliyete bağlı olduğu için 3B yazıcılar gelişmeye devam eden çok yönlü ancak karmaşık bir alan haline gelmektedi

4. ALIŞILMIŞIN DIŞINDA 3B YAZICILAR VE DEĞİŞKENLERİ (UNCONVENTIONAL 3D PRINTERS AND THEIR VARIABLES)

It Bu bölümde yaygın kullanılmayan 3B yazıcıların tasarımlarında dikkat edilmesi gereken kriterler incelenecektir. İlk olarak, malzeme bazlı 3B yazıcılar ele alınarak bu teknolojilerin tasarım süreçlerindeki kullanımı ve avantajları tartışılacaktır. Son olarak, uygulama bazlı çalışan 3B yazıcı teknolojileri ve bunlara uygulamalara ait güncel bilgiler de sunulacaktır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş malzemelerden üretilen 3B yazıcılar ve çevre dostu üretim yöntemleri üzerinde durulacak, bu alandaki yenilikler ve gelişmeler incelenecektir.

4.1.Malzeme Bazlı 3B Yazıcılar (Material-Based 3D Printers)

4.1.1.Beton 3B Yazıcılar (Concrete 3D Printers)

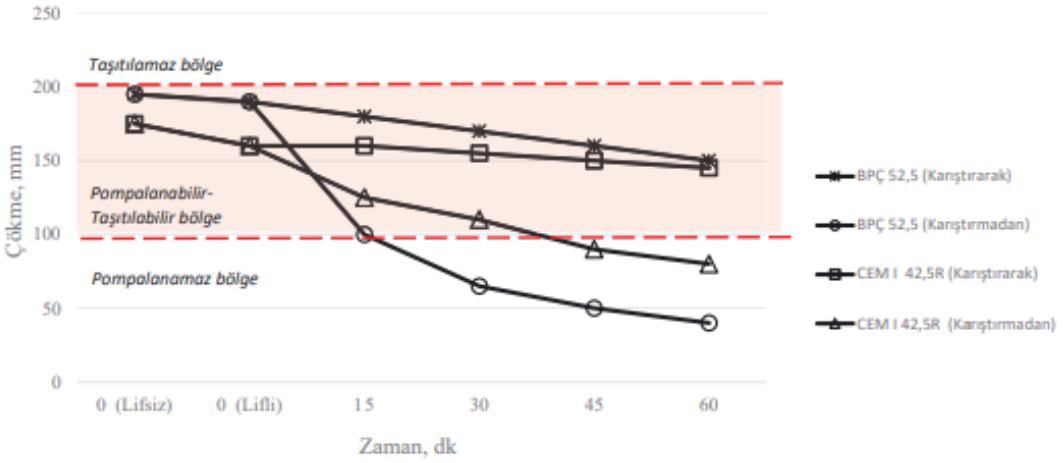
Beton 3B yazıcılar; çimento bazlı malzemeleri katman katman biriktirme yöntemi ile inşa edilmesini sağlayarak eklemeli üretim teknolojilerini kullanmaktadır. Yaygın olarak ekstrüzyon tabanlı sistemler tercih edilmektedir [38-39]. Kontrollü akışkanlığa sahip çimento bazlı malzemeleri biriktirmek için robotik kollar veya portal mekanizmalar kullanarak büyük ölçekli inşaatlar oluşturulabilmektedir [40]. Potansiyeline rağmen, malzeme viskozitesini optimize etmek, yapısal bütünlüğü sağlamak, otomasyonu iyileştirmek gibi çeşitli zorluklara sahiptir [41]. Araştırmalar ilerledikçe, hesaplamalı tasarım, robotik ve malzeme bilimindeki gelişmeler, bu sınırlamaların üstesinden gelebilecek ve inşaat sektöründe daha verimli, sürdürülebilir ve yapısal olarak sağlam uygulamalar yapılabilecektir [42-43]. Bu bölümde beton 3B yazıcıların tasarım sürecine etki eden önemli parametreler derlenmiştir.

Özalp, Yılmaz ve Yaşar (2018), yaptıkları araştırmada 3B yazıcı teknolojisinin inşaat sektöründeki potansiyeli ve beton üretiminde nasıl devrim yaratabileceği ele almıştır. Burada beton karışımları 3B yazıcılara uyumlu hale getirmek için daha az atık oluşturan sürdürülebilir malzemeler kullanmak gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, bu yeni beton türünün dayanım, işlenebilirlik ve yapısal bütünlüğüne ait yapılan araştırmalar ele alınmakta, potansiyel yeni uygulama ve endüstriyel kullanım alanları tartışılmaktadır [44]. Termoplastik malzemelerin akış davranışının, çimento bazlı malzemelerden önemli ölçüde farklılık göstermesi sebebiye akışkanlık öncelikli olarak dikkate alınması gereken faktörlerdendir. Çimentonun viskozite, kıvam koruma süresi ve katmanlar arası bağlanma gibi akış özellikleri, baskı sürecinin başarısını doğrudan etkilemektedir [41, 45]. Bu nedenle, bu çalışmada çimentonun akışkanlığına ait yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak ele alınmıştır.

Şekil 2'de su/çimento ve süper akışkanlaştırıcı/çimento oranları değiştirilerek 3B baskı betonunun taze halindeki davranışı ve işlenebilirliği değerlendirilmiştir. Başlangıçta, çimentoya %1 süper akışkanlaştırıcı eklenip su/çimento oranı 0,30 olan karışımda çökmeli beton elde edilememiştir. Su/çimento oranı 0,40'a çıkarıldığında 200 mm çökmeli beton elde edilse de, beton kendi ağırlığını taşıyamamıştır. Son olarak, su/çimento oranı 0,30 ve %2 süper akışkanlaştırıcı kullanılarak 190 mm çökmeli beton elde edilmiş ve bu beton rahatlıkla basılabilir hale gelmiştir [44].

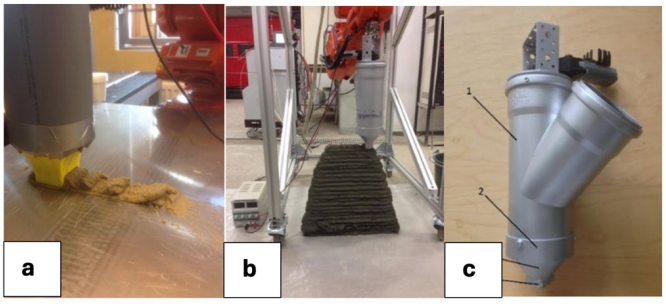
Şekil 2. Süper akışkanlaştırıcı (SA)-su/çimento oranlarının işlenebilirlik ve rijitliğe etkisi [44] (The effect of superplasticizer (SP)-water/cement ratios on workability and stiffness)

Şekil 3'teki grafiğe göre, beyaz çimento ve Portland çimentosu içeren karışımlarda karıştırma işlemi yapılmazsa beton, 15-30 dakika içinde işlenebilirliğini kaybetmekte ve pompada basılamaz hale gelmektedir. Bu durum, betonun pompada tıkanmasına yol açmaktadır. 3B yazıcı teknolojisi ile yazdırılan betonun çalışabilirlik süresi, düzenli karıştırma ile 60 dakikaya kadar artırılabilir. Ayrıca, priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkılar kullanarak çalışabilirlik süresi ayarlanabilir. Bu çalışmada, %0,3 katkı oranının çimentoya etkisi incelenmiştir [44]. Optimum olduğu değerlendirilen karışım belirlendikten sonra, bu malzeme kullanılarak 3B yazıcı aracılığıyla farklı şekil ve boyutlarda kent mobilyaları üretmek mümkün olabilmektedir



Şekil 3. Çimentolu karışımların zamanla çökme değerleri [44] (Settlement values of cement-based mixtures over time)

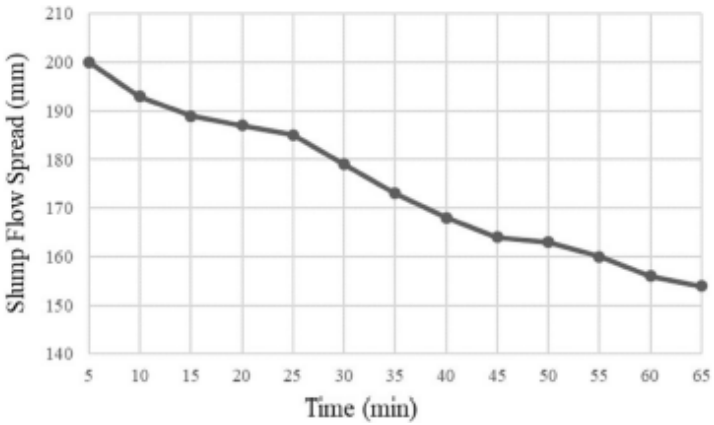
Anell, 2015 yılında bir beton 3B yazıcısı tasarlamak amacıyla ekstrüder mekanizması ve baskı malzemesi geliştirme çalışmaları yapmıştır. Tasarımın ihtiyaç listesine göre 3B beton yazıcı 30-40 mm genişlik ve 10-20 mm yükseklikte beton hatlar üretmesi amaçlanmıştır. Yazıcının kent mobilyaları üretme kapasitesine sahip olması hedeflenmiştir. Ürünün gerekli nitelikte olması için ekstrüdere ait çeşitli değerlendirme matrisleri kullanılarak, konsept tasarımının kare şeklinde bir ağız açıklığı, iki dikdörtgen yan mala ve dönen bir burgu mekanizmasıyla beton akışını sağlayabileceği sonucuna varılmıştır. Tasarımın istenilen şartları karşıladığını anlamak için bir prototip üretilmiş ve gerçek koşullarda test edilmiştir (Şekil 4). İlk test, geri dönüşebilir olması nedeniyle kum ve su karışımı ile gerçekleştirilmiş ve daha güçlü bir motora ihtiyaç olduğu, düz bir alt parça yerine konik bir alt parça kullanılması gerektiği ve ekstrüderin daha sağlam malzemelerle üretilmesi gerektiği gibi bulgular elde edilmiştir. Prensipte çalışan bir tasarım elde edildiğinde, harç, standart beton ve çeşitli baskı malzeme testleri sonucunda, ekstrüderin çalışabilmesi için yeterince viskoz olması gerektiği, böylece kendi kendini destekleyip birkaç katman inşa edebileceği anlaşılmıştır. Bu gereksinimleri karşılamak için hem ekstrüde edilebilir hem de katmanlar inşa edebilir nitelikte beton karışımı kullanılarak bir sandalye yazdırılmıştır. Sonuç olarak, yapılan testlerin bulguları, tasarlanan ekstrüderin çalışma mekanizmasının bu uygulama için uygun olduğunu ortaya koymuştur [46]



Şekil 4. a) Çimentonun extrude edilmesi, b) Katman biriktirme testi, c) Ekstrüder tasarımı [46]. (a) Cement extrusion, b) Layer deposition test, c) Extruder design)

Jo ve diğer araştırmacıların 2020 yılında yaptığı çalışmada ise beton ve harç karışımlarının viskozite, akışkanlık ve sertleşme özellikleri gibi önemli fiziksel özellikleri değerlendirilmiştir. Farklı çimento içeren karışımlar, malzemelerin yazıcıyla uyumunu test etmek amacıyla laboratuvar ortamında üretilerek bazı testlere tabi tutulmuştur. Bu testler arasında, malzeme akışkanlık testi, katmanlar arası yapışma testi ve sertleşme süreleri gibi analizler de yer almaktadır. Nozulun optimum yüksekliği, nozul ucu ile taban seviyesi arasındaki mesafeyi bulmak için test yapılmıştır. Nozul yüksekliği, dağıtılan malzeme miktarına göre çok az olduğunda, numunenin orta kısmı bastırılıp şişirilmiş, toplam genişlik arttırılırken nozul uçları yüzeyleri çizilmiştir. Yükseklik çok fazla olduğunda, numune geniş bir tabandan dar bir tepeye doğru daralan bir yamuk benzeri şekilde basılmıştır. Yükseklik optimum seviyede olduğunda ise numunenin yüzeyi dikdörtgen şeklinde pürüzsüz olmuştur [47].

Beton 3B yazıcılarda açık kalma süresi, çimentolu malzemelerle 3B baskının işlenebilirliğini belirleyen önemli faktörlerden biridir. Bu süre, çimentolu malzemenin durmadan veya tıkanmadan nozülden sürekli olarak dağıtılma süresini içerir. Araştırma kapsamında ise, malzemenin sürekli olarak ekstrüde edilebilir olduğu süre ölçülerek belirlenmiştir. Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, baskı malzemelerinin çökme hızı yayılımı, malzemeyi sürekli olarak dağıtmak için 190 - 200 mm arasında olmalıdır. Bu nedenle, çökme akış yayılımının 190 mm'den daha düşük hale geldiğini ölçmek için her 5 dakikada bir çökme akış testi yapılmıştır. Şekil 5'teki grafikte gösterildiği gibi, karışımın çökme hızı yayılımı kademeli bir düşüş sergilemiş ve 15 dakika sonra 190 mm'ye ulaşmıştır. Malzeme, 15 dakika olan açık zaman sınırına ulaştığında kuruyarak akışkanlığını kaybetmesi sebebiyle ekstrüde edememektedir. Bununla birlikte, açık süre süper akışkanlaştırıcı, geciktirici ve hızlandırıcı dozajı eklenerek kontrol edilebileceği ortaya konmuştur [48, 49].



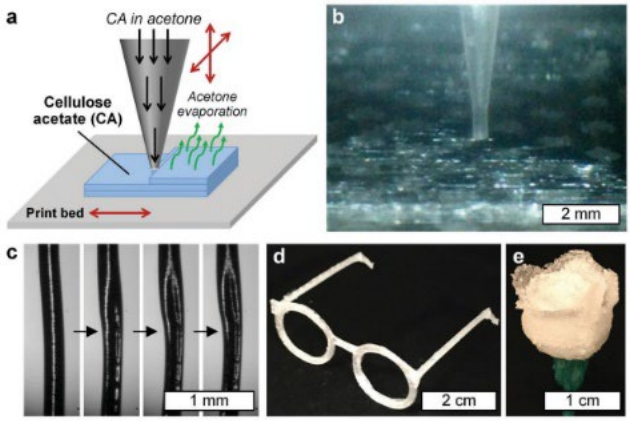
Şekil 5. Çimentolu malzemenin zamana bağlı çökme yayılım [47] (Time-dependent settlement distribution of cementitious material)

4.1.2. Selüloz 3B yazıcılar (Cellulose 3D printers)

Selüloz, dünyada en yaygın doğal polimer olup, sürdürülebilir ve çevre dostu malzeme alternatifleri arasında önemli bir yere sahiptir [50]. Selüloz alanındaki çalışmalarıyla öncü olan Sebastian Pattinson'un da vurguladığı gibi, selülozun en önemli avantajlarından biri, ağacın mekanik özelliklerini sunabilmesi yanında kimyasal olarak çok yönlü, biyolojik olarak yenilenebilir ve parçalanabilir olmasıdır. Bu özellikleri sayesinde selüloz ve türevleri ilaç sektöründe, medikal cihazlarda, gıda ürünlerinde, farklı malzemelerin üretiminde ve tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Selüloz esaslı 3B yazıcılar, doğada kolayca çözünebilen ve düşük çevresel etkiye sahip malzemeler ile üretim imkânı sunması sebebiyle kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Selüloz esaslı 3B baskı teknolojileri arasında doğrudan mürekkep yazma (Direct Ink Writing-DIW) [51], eritilerek yığma modelleme (Fused Deposition Modeling- FDM) [52] ve stereolitografi (SLA) [53] gibi yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler, selülozun farklı kimyasal ve fiziksel modifikasyonlarla baskı sürecine uygun hale getirilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle nanoselüloz katkılı mürekkeplerin ve fotopolimerize edilebilir selüloz türevlerinin geliştirilmesi, yüksek hassasiyetli ve biyobozunur malzemelerin üretimini mümkün kılmaktadır [54].

Selüloz esaslı 3B baskı sistemlerin geliştirilmesi, sürdürülebilir biyomalzeme üretimini teşvik ederek tıp, ambalaj, inşaat ve biyomalzeme mühendisliği gibi birçok alanda yeni üretim teknikleri ortaya çıkartmıştır [55].

Sebastian Pattinson "3B baskıdan sonra sodyum hidrojen uygulamak suretiyle hidrojen bağlarını restore ettiklerini ve elde edilen parçaların piyasada mevcut malzemelerin çoğundan daha sağlam olduğunu" ifade etmektedir. Araştırma ekibi üretim sürecinin kimyasal çok yönlülüğünü göstermek için selüloz asetat mürekkebine az miktarda anti mikrobik boya ekleyerek (Şekil 6a) anti mikrobik işlevsellikte bir çift cerrahi cımbız, gözlük ve gül gibi modelleri 3B yazıcıyla bastırmışlardır (Şekil 6d ve 6e). Aynı zamanda baskı esnasında selüloz davranışların gösterebilmek için Şekil 6b'de yakından optik görüntüsü verilmiştir. Şekil 6c'de ise baskının belirli süre aralıklarında aseton uçtuktan sonraki biçimleri gözlemlenmiştir [56].

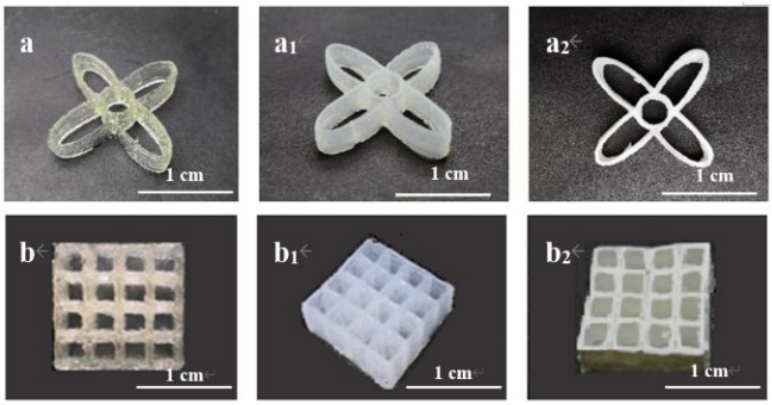


Şekil 6. a) Selüloz asetat (CA) katkılı üretim sürecinin şeması, b) Baskı sürecinin yakından optik görüntüsü,. c) Ekstrüde edilmiş selüloz asetat filamentinin, asetonun şekil değişikliği ile gösterildiği gibi buharlaştığı zaman ölçeğini gösteren optik görüntüleri (soldan itibaren 3, 23, 43 ve 63. saniyelerde). Örnek 3B baskılı CA nesneleri, d) Minyatür gözlük çerçeveleri ve e) Bir gül baskısı [56] (a) Schematic of the production process using cellulose acetate (CA), b) Close-up optical image of the printing process, c) Optical images showing the scale of the extruded cellulose acetate filament as it vaporizes due to the shape change of acetone (at 3, 23, 43, and 63 seconds from the start). Examples of 3D-printed CA objects, d) Miniature eyeglass frames, and e) A rose print)

Selülozun mekanik özellikleri uygun maliyetli kompozit malzemeler için önemlidir. Örneğin, rejenere selüloz liflerinin 778 MPa gerilme mukavemetine ve 41 MJ m3 tokluğa sahip olduğu ölçülmüş olup bu da Kevlar'ın tokluğuyla (33 MJ m3) karşılaştırılabilmektedir. Ayrıca, selüloz kimyasal olarak kolayca değiştirilebilir; suda çözünür metil selüloz ve karboksimetil selüloz gibi birçok türev, yapı malzemesi, farmasötik, kozmetik ve gıda çeşitleri gibi alanlarda kıvam arttırıcı, stabilizatör ve arttırıcı bağlayıcı olarak kullanılabilir. Selülozun 3B baskısı, iyonik sıvı içinde çözdürme sonrası veya sulu bir süspansiyon olarak da elde edilmiştir. Ancak burada selüloz yoğunluğu düşük olmakta ve biriktirme işleminin ardından selüloz çökeltme veya dondurup kurutma yoluyla sıvıdan arındırılması gerekmektedir. Bu da düşük yoğunluklu yapılara ve sınırlı boyutsal kararlılığa yol açabilir. Hammadde, Nordson Ultra 2.400 marka bir hava pompasına bağlı bir sıvı dağıtım aracı olan Nordson HP7x şırınga tutucuya yüklenmiştir. Şırınga, programlama kolaylığı ve açık mekanik erişimi nedeniyle seçilen bir masaüstü Printerbot Simple Metal marka 3B yazıcıya monte edilmiştir. Filament benzeri biriktirme sağlamak için bir nozülden ekstrüde edilmiştir. Karışıma aseton katıldığında oldukça yapışkan olduğu gözlenmekle birlikte aseton buharlaştıkça bağlanarak sertleşmesi sağlanmıştır [56].

Hu vd. tarafından yapılan çalışma ise doğal selüloz ve oda sıcaklığında ekstrüzyon tabanlı 3B baskı kullanarak hidrojel iskeletleri üretme amaçlı yeni bir yöntem içermektir (Şekil 7). Burada selüloz, yazdırılabilir bir jel oluşturmak için bir dimetil sülfoksit (DMSO) ve tetrabütilamonyum hidroksit (TBAH) çözeltisi içinde çözdürülür. Selüloz çözeltisi, havaya maruz kaldığında hızla jelleşerek 3B yapılar oluşturacak şekilde modifiye edilmiş bir FDM yazıcıdan ekstrüde edilmektedir. Bu basılı formlar daha sonra hidrojel üretmek için suya daldırılır. Gerçekleştirilen yapısal ve kimyasal analizler, robotik, doku mühendisliği ve çevre dostu malzeme tasarımında potansiyel uygulamaları olan

gözenekli, iyi tanımlanmış iskelelerin başarılı bir şekilde üretildiğini doğrulamaktadır. Tekniğin kolaylığı doğal polimerlerin kullanımı ve oda sıcaklığındaki işlemlerle uyumluluğu ile öne çıkmaktadır [57].

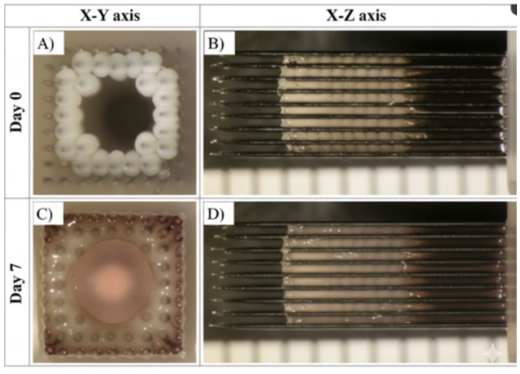


Şekil 7. 3B baskılı selüloz iskelelerin dijital resimleri: **a, b)** baskısız örnekler; a1, b1- hidrojel iskeleler; a2, b2 -dondurularak kurutulmuş örnekler [57].(Digital images of 3D-printed cellulose scaffolds: a, b) unprinted samples; a1, b1—hydrogel scaffolds; a2, b2—freeze-dried samples)

4.1.3. Biyo-yazıcılar (Bioprinters)

Biyo-baskı teknolojileri; canlı hücreleri ve destekleyici biyomalzemeleri içeren biyo-mürekkep katmanlarını hassas bir biçimde üst üste biriktirerek, karmaşık biyolojik doku ve organ yapılarını üç boyutlu olarak inşa etmektedir. Doku mühendisliği teknolojilerinin gelişimi için kullanılarak, organ naklinin büyük ölçüde ilerlemesini sağlamıştır. Çünkü artık insan hücreleri kullanılarak tıbbi uygulamalar için insan dokuları ve organları 3B teknolojiler ile laboratuvar ortamında üretilebilmektedir [58]. Bu teknolojiler, her biri çözünürlük, hücre canlılığı ve malzeme uyumluluğu açısından farklı avantajlar içeren ekstrüzyon ve inkjet tabanlı, lazer destekli baskı yöntemlerini kapsamaktadır [59]. En yaygın yaklaşım olan ekstrüzyon tabanlı biyo-baskı, hücre yüklü hidrojelleri bir nozülden sürekli olarak ekstrüde ederek karmaşık doku yapılarının üretilmesine olanak sağlamaktadır. Hassas damlacık birikimi ile karakterize edilen mürekkep püskürtme tabanlı biyo-baskı, minimum kesme gerilimi ile hücre modellerinin yüksek verimde üretimini kolaylaştırmaktadır. Biyo-baskıdaki gelişmeler rejeneratif tıp, ilaç testleri ve organ nakli için önemli bir umut vaat etse de damarlanma, mekanik stabilite ve hücre farklılaşması ile ilgili zorluklar kritik araştırma alanları olmaya devam etmektedir [60].

Arai vd. yaptıkları çalışmada kalp dokusu oluşturmaya yönelik yeni bir teknik tanıtmaktadır. Araştırmacılar ilk olarak üç tür insan hücresinden oluşan ve sferoid adı verilen küçük hücre toplarını büyütmüştür. Bunlar; atabilen kalp kası hücreleri, kan damarı hücreleri ve bağ dokusu hücrelerinden oluşmaktadır. Bu sferoidler Bio-3B yazıcı tarafından çok ince iğnelerden oluşan bir ızgara üzerine dikkatlice yerleştirilmiştir (Şekil 8). Birkaç gün içinde sferoidler doğal olarak kaynaşarak küçük, tüp şeklinde tıpkı kalp kası gibi kendi kendine atan bir kalp dokusu parçasını oluşturmuştur. Araştırmacılar ayrıca, vücuttaki kalp atışını kontrol eden sinyallere benzer şekilde elektrik sinyallerine nasıl tepki verdiğini de test etmiştir. Doku, atım hızını arttırarak tepki alınmış ve daha sonra normale dönerek gerçek kalp dokusu gibi çalıştığını göstermiştir. Bu araştırmalar gelecekte hasarlı kalpleri onarmak veya yeni kalp ilaçlarını daha güvenli ve etkili bir şekilde test etmek için yararlı olabileceğini göstermektedir [61].



Şekil 8. Izgaralar üzerine yerleşen sferoidler [61]. (Spheroids settled on the grids)

Ninomiya ve Taniuchi'nin çalışmaları ise fizyolojik açıdan 3B bir ortamda tümör istila mekanizmalarını incelemek için gelişmiş bir yaklaşım sunmaktadır. Burada araştırmacılar, hücresel sferoidleri hassas bir şekilde yerleştirmek ve desteklemek için mikroiğne dizisi kullanan Kenzan adlı yönteme

dayalı bir biyo-3B yazıcı kullanmışlardır. Yöntemlerinde, normal insan dermal fibroblast (NHDF) sferoidleri ve kötü huylu kanser hücresi sferoidleri (HeLa hücreleri gibi) ayrı ayrı kültürlenmiş ve dikey olarak hizalanmış bir mikro doku yapısı oluşturmak için Kenzan üzerinde dönüşümlü olarak istiflenmiştir. Bu konfigürasyon, normal ve kanserli dokular arasındaki arayüzün doğrudan gözlenebildiği basit bir tümörün çevresini yeniden oluşturma sağlamıştır. Bu çalışmada sferoid yerleştirmede yüksek doğruluk sağlamış ve baskı süreci boyunca hücre canlılığını korunmuştur [62].

4.1.4. Nano 3B yazıcılar (Nano 3D printers)

Nano 3B yazıcılar, üretim teknolojilerini makro dünyadan atomik ve moleküler seviyeye taşımaktadır. Standart 3B yazıcıların kullandığı termal veya mekanik yöntemlerin aksine; elektron ışını etkileşimleri ve elektro-hidrodinamik kuvvetleri kullanan bu sistemler, maddeyi nanometre hassasiyetinde işleme yeteneğine sahiptir. Bu bölümde geleneksel litografi sınırlarını aşarak 10 nm seviyelerine kadar inebilen, karmaşık ve fonksiyonel nano-yapıların üretimini mümkün kılan yeni nesil nano-baskı teknolojilerine ait farklı parametrelere yer verilmiştir.

Reisecker, Winkler ve H. Plank'ın makalesinde çeşitli alt tabakalar üzerinde yüksek çözünürlüklü (özellik boyutları ~10 nm'ye kadar) eklemeli bir Odaklanmış Elektron Işını İndüklü Biriktirme (FEBID) yöntemi kullanarak eğimli nano teller, sütunlar, karmaşık ağ gibi fonksiyonel 3B nanoyapıların nasıl üretildiğini incelemektedir. Bu makale; çalışma prensibi, malzemeler, ışın/alt tabaka/geometri parametreleri, uygulamalar (nano-optik, nano manyetizma, algılama, alan yayıcılar, tarama probu uçları vb.), zorluklar (saflık, çözünürlük, büyümenin kontrolü, ölçeklenebilirlik) ve gelecekteki yönelimler gibi konuları ele almaktadır [63].

Liu vd. çalışmalarında baskı sırasında elektrik ve akış alanlarını senkronize ederek 3B metalik nanoyapılar üretmek için yöntem sunmaktadır. Bu hibrit yaklaşım, nanoparçacık birikimini hassas bir şekilde kontrol etmeyi mümkün kılarak, 4 × 4 mm²'lik bir alanda 20 dakikadan kısa sürede 14 nm kadar dar metalik çizgiler oluşturulmasını sağlamaktadır. Genellikle iki boyutlu desenler ve belirli malzemelerle sınırlı olan geleneksel litografiden farklı olarak, bu teknik çok çeşitli metaller ve alaşımları destekleyerek olağanüstü malzeme esnekliği sunmaktadır. Basılan nanoyapılar, geometri, periyodiklik ve bileşime dayalı olarak ayarlanabilir optik ve elektriksel özellikler sergilemekte ve böylece nanoelektronik, plazmonik ve fotonik uygulamalar için uygun hale getirilmektedir. Teknik olarak, bu süreç malzeme özelliklerini baskı dinamiklerinden ayırarak ölçeklenebilirliği ve tekrarlanabilirliği artırır. Genel olarak, çalışma, nano ölçekte Eİ'nin potansiyelini genişleten hızlı, çok yönlü ve yüksek çözünürlüklü bir nanoprinting yaklaşımı sergilemektedir. Bu çalışmada farklı metaller ve alaşımlarının (Au,Ag,Pd,Pt,Au-Ag) farklı geometrik şekillere sahip baskıların homojen dağılımı ve başarılı bir şekilde üretilmiştir [64].

4.1.5. Seramik 3B yazıcılar (Ceramic 3D printers)

Seramik malzemelerin yüksek erime noktaları ve kırılgan yapıları, onları geleneksel Eİ süreçleri için en zorlu materyallerden biri haline getirmektedir. Ancak, litografi tabanlı sistemler (SLA/DLP) ve bağlayıcı püskürtme (binder jetting) tekniklerindeki gelişmeler, seramik 3B yazıcıları endüstriyel bir üretim sistemine dönüştürmüştür.

Chen vd. çalışmalarında seramik malzemelerin 3B yazdırılmasıyla ilgili teknolojiler; stereolitografi (SLA), bağlayıcı püskürtme (binder jetting) ve doğrudan mürekkep yazdırma (Direct Ink Writing, DIW) gibi yöntemleri karşılaştırarak, seramik üretiminde karşılaşılan temel zorluklara odaklanmaktadır. Özellikle, yüksek hassasiyetli geometrik şekiller elde etme sürecinde şekil doğruluğu ile sinterleme sonrası büzülme arasındaki denge önemli bir sorun olarak ele alınmıştır. Çalışma ayrıca sinterleme dinamikleri, bağlayıcı giderme (debinding) süreçleri ve hesaplamalı tasarım araçlarıyla entegrasyon gibi teknik detayları tartışmaktadır. Sonuç olarak makale, havacılık, enerji ve biyomedikal uygulamalar için yüksek hassasiyetli seramik bileşenlerin geliştirilmesine yönelik kapsamlı bir yol haritası sunmaktadır [65].

Spina ve Morfini'nin makalesinde ekstrüzyon temelli seramik 3B yazdırma süreçlerine odaklanmaktadır. Çalışma, reolojik davranış, nozül tasarımı ve bağlayıcı sistemleri analiz ederek bu faktörlerin ekstrüzyon doğruluğu ve sinterlenmemiş seramiklerin dayanımı üzerindeki etkilerini incelemektedir. Derleme, baskı çözünürlüğünü artıran ve kuruma sırasında çatlak oluşumunu azaltan çift malzeme birlikte ekstrüzyon (dual-material co-extrusion) ve yerinde kürleme (in-situ curing) gibi yeni yaklaşımları tanımlamaktadır. Toz yatağı (powder-bed) yöntemleriyle karşılaştırıldığında, malzeme ekstrüzyonu daha yüksek ölçeklenebilirlik ve daha düşük malzeme israfı sunmaktadır; ancak sinterleme sonrası

büzülme hâlâ önemli bir kısıtlayıcı faktördür. Ayrıca çalışmada; fonksiyonel dereceli seramikler ve hibrit kompozitler alanındaki gelişmelere dikkat çekerek bu malzemelerin yapısal ve termal performansları bir arada sunabildiğini vurgulanmaktadır. Genel olarak çalışma, malzeme ekstrüzyonunu geleceğin seramik bileşenleri için çok yönlü ve maliyet açısından verimli bir üretim yöntemi olarak ortaya koymaktadır [66].

4.1.6. Cam 3B yazıcılar (Glass 3D printers)

Camın şeffaflığı ve kimyasal kararlılığı endüstriyel ürün kullanımında yaygın olsa da erime sıcaklığı ve viskozite kontrolü gerektirmesi nedeniyle Eİ'yi en zor malzemelerdendir. Polimer bazlı standart süreçlerin aksine, 1000°C üzerindeki sıcaklıklarda erimiş camın hassas ekstrüzyonuna ya da sinterleme gerektiren özel kompozit toz/reçine yöntemlerine dayanmaktadır.

Xin vd. eritilmiş biriktirme modelleme, stereolitografi (SLA) ve seçici lazer sinterleme (SLS) dahil olmak üzere 3B cam baskı için en son teknoloji yöntemleri sistematik olarak incelemektedir. Makale, camın yüksek erime noktası ve kırılganlığının proses stabilitesi ve hassasiyeti için nasıl önemli zorluklar oluşturduğunu vurgulamaktadır. Biriktirme sırasında viskozite ve şeffaflığın daha iyi kontrol edilmesini sağlamak için termal ve fotonik enerji kaynaklarını entegre eden hibrit teknikleri tanımlanmaktadır. Geleneksel cam döküm ve kalıplama ile karşılaştırıldığında, eklemeli yaklaşımlar mikron ölçeğinde çözünürlükte özelleştirilmiş geometriler, iç kanallar ve optik bileşenler sağlamaktadır. Buna ek olarak, optik, mikroakışkanlar ve mimaride camın potansiyelini genişleten yeni yönler olarak kusur oluşumu, son işlem tavlama ve çoklu malzeme baskısı ele alınmaktadır [67].

Snooks vd. cam bazlı katmanlı imalattaki son gelişmeleri, proses mekanizmaları, malzeme reolojisi ve yapısal bütünlüğe odaklanarak derinlemesine değerlendirmektedir. Yazarlar, lazer hızı, nozül hızı ve nozül yüksekliği gibi parametrelerin çikolata biriktirme ve 3B şekillendirme açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir. Buna ek olarak, Choc Edge Ltd. tarafından üretilen ticari 3B çikolata yazıcısı Choc Creator 2.0 Plus kullanılarak, baskı kalitesi ve şekillendirme verimliliğini artıracak optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Özellikle, baskı kalınlığı, hızı ve çıkıntı açısının optimize edilerek baskı kalitesinin artırılacağı belirlenmiştir. Ayrıca, çikolata formülasyonunda kakao içeriğini gücü, ekstrüzyon basıncı ve soğutma hızı gibi proses parametrelerinin optik berraklık ve mekanik mukavemeti nasıl etkilediğini eleştirel bir bakış açısıyla analiz etmektedir. İncelenen çalışmalarda polimer veya metal katmanlı üretimden farklı olarak, cam baskıda çatlama ve deformasyonu önlemek için hassas bir termal yönetim gerekliliği görülmüştür. Ayrıca, şeffaflık ve biyouyumluluğun gerekli olduğu mikro-optik cihazlar ve biyomedikal iskeletler gibi işlevsel uygulamalar da ele almaktadır. Makale cam baskı teknolojilerini endüstriyel ölçeklenebilirliğe doğru optimize etmek için bir çerçeve oluşturmaktadır [68].

4.2. Uygulama Bazlı Yazıcılar (Application-Based Printers)

4.2.1. Gıda sektöründe kullanılan 3B yazıcılar (3D printers used in the food industry)

3B baskı teknolojisinin gıda endüstrisine entegrasyonu, gıda hazırlama, özelleştirme ve tüketme şeklinde yenilikler ortaya koymaktadır [69]. Çikolata, hamur ve hatta alternatif protein kaynakları gibi yenilebilir malzemeler kullanan 3B gıda yazıcıları hassas şekillendirme, karmaşık tasarımlar ve özel besin bileşimleri ile yiyecek baskılar alınmasını sağlamaktadır. Bu yenilik mutfak yaratıcılığı yanında gıda israfını azaltarak kişisel beslenme ve verimli seri üretim gibi kritik zorluklara da çözüm sağlamaktadır [70]. Araştırmalar ilerledikçe, 3B gıda baskısı, gıda üretimini daha sürdürülebilir, verimli ve bireysel beslenme ihtiyaçlarına uyarlanabilir olmasını sağlayabilecektir [71-72].

Hao vd., çikolatanın karmaşık bir kompozit malzeme olması sebebiyle formülasyonu ve viskozitesine bağlı davranışını, erime sıcaklığı ve katılaşma hızı gibi özelliklerinin katmanlı üretim sürecinde ekstrüzyon ve katılaşma dinamiklerine etkilerini incelemiştir. Araştırmada, laboratuvar ölçeğinde ChocALM marka çikolata hammaddeli katmanlı imalat prototip makinesi kullanılarak biriktirme deneyi yapılmıştır. Bulgular, ekstrüzyon

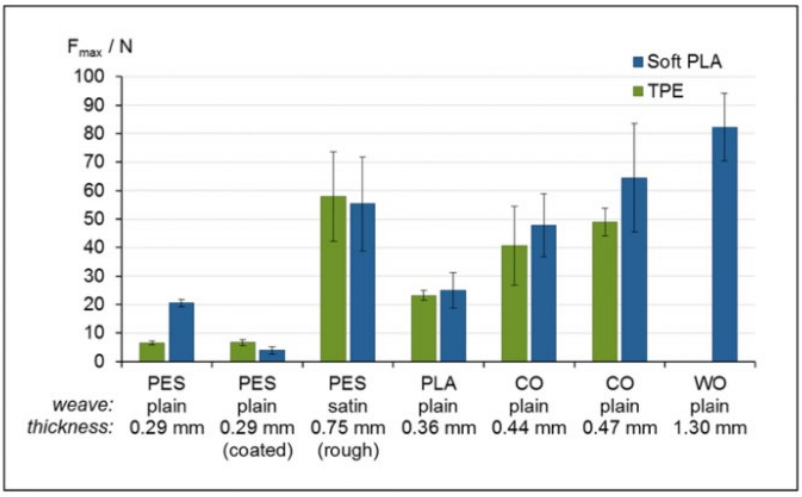
değiştirme yanında sağlık açısından faydalı bileşenlerin 3B baskılı çikolata içine entegre edilmesine ait fizibilite analizi de yapılmıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, 3B çikolata baskısının yalnızca kişisel tatlı üretimiyle sınırlı olmayıp aynı zamanda sağlıklı fonksiyonel gıda çözümleri geliştirmek için de önemli olduğunu ortaya çıkartmıştır. Böylece, 3B çikolata baskısı ticari değerini artırma ve bu alandaki iş geliştirme süreçlerini desteklemek için yeni fırsatlar sunmaktadır [72].

Tan vd., disfaji hastalarının gıda alımını arttırmak amacıyla 3B baskı teknolojisi ile püre diyetlerin görsel çekiciliğini artırmak için nasıl kullanılabileceği incelemiştir. Bu kapsamda, ekstrüzyon tabanlı 3B gıda baskısı ile kullanılan yenilebilir gıda mürekkepleri gibi malzemeler ele alınmıştır. Çalışmada, geleneksel gıda malzemelerini baskıya uygun formülasyonlara dönüştürmek için uygulanan çeşitli yöntemler tartışılmıştır. Genel olarak hidrokolloid gibi katkı maddelerine ait püre gıdaların reolojik özellikleri ve dokuları değiştirilerek baskıya uygun hale getirildiği belirtilmiştir. Bu tür katkı maddelerine ait; nişasta, pektin, jelatin, nanoselüloz, aljinat ve karragenan gibi bileşenler örnek olarak verilmiştir [73].

4.2.2. Tekstil sektöründe kullanılan 3B yazıcılar
(3D printers used in the textile industry)

3B baskı teknolojisinin tekstil sektörüne entegrasyonu kumaş tasarımı, malzeme kişiselleştirme ve sürdürülebilir üretim alanlarında yenilikçi olanaklar sunmaktadır. Bu uygulamalar arasında moda tasarımı için karmaşık geometriler oluşturma, dikişsiz ve özelleştirilmiş giysiler üretimi ve esneklik, nefes alabilirlik ve dış uyaranlara yanıt verme gibi özelliklere sahip fonksiyonel tekstil ürünleri geliştirme de vardır. Malzemeler ve baskı tekniklerindeki gelişmeler devam ettikçe, 3B baskının yeni tasarım yetenekleri sunarak ve üretim süreçlerinin verimliliğini artırarak tekstil endüstrisinin geleceğini şekillendirmede önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Geleneksel üretim yöntemleri ile kıyaslandığında, baskı malzemesi olarak tekstiller; sert ve daha az konfora sahip olduğundan uygulama esnasında kısıtlanmaktadır. Bu sorunu çözmek için, 3B baskı teknolojisi kullanarak yumuşaklık ve esneklik gibi tekstil özellikleri geliştirmek amacıyla esnek tekstillerin basılması için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır [74]. Doğal veya sentetik elyafları yazdırılabilir filamentlere yerleştirerek, hafif bir yapı elde edilirken basılı tekstillerin gücü, esnekliği ve dayanıklılığını arttırmaktadır. Karbon, cam, kenevir ve keten gibi doğal elyaflar veya elyaf takviyeli 3B baskı malzemeleri, gelişmiş mekanik özelliklere sahip aşınmaya dayanıklı ve özelleştirilebilir kumaşlar üretilebilmektedir [75-76].

Korger vd. tekstiller üzerinde yaptığı 3B baskı çalışmaları, baskı esnasında güçlü yapışma ve stabilitenin önemini vurgulamaktadır. Bunu araştırmak için farklı dokuma kumaş türleri üzerinde ayırma kuvveti ve aşınmaya direnç testleri yapılmıştır. Bulgular, yeterli yapışma elde etmenin mümkün olduğunu ve bunu etkileyen temel faktörün tekstilin yüzey özellikleri olduğunu göstermiştir. Dokuma deseninin, yüzey pürüzlülüğünün ve elyaf tüylülüğünün basılacak malzemenin mekanik birleşme faktörlerini etkilediğini ortaya koymuştur. Ek olarak, erimiş polimerin kumaşa yayılma ve bağlanma kabiliyetinin, tekstil yüzey enerjisine bağlı olduğu; bunun da baskıdan önce yıkama, terbiye veya plazma işlemi gibi işlemlerle ayarlanabileceğini ortaya koymuştur [77].



Şekil 9. FDM baskılarının (350 mm x 50 mm) farklı dokuma kumaşlar (polyester PES, polilaktik asit PLA, pamuk CO ve yün WO) üzerindeki maksimum yapışma kuvvetleri Fmax [77]. (Maximum adhesion

forces (Fmax) of FDM prints (350 mm × 50 mm) on different woven fabrics (polyester PES, polylactic acid PLA, cotton CO, and wool WO)

Şekil 9'da farklı dokuma kumaşlar üzerine basılan hem PLA ve TPE filamentleri için maksimum yapışma kuvvetleri gösterilmiştir. Bunlar temel olarak tekstil malzemesi, örgü ve kalınlık ile kategorize edilmiştir. Sonuç olarak yapışma kuvvetleri baskı malzemesinden çok tekstil alt tabakasına bağlı olduğu belirlenmiştir. Kaba polyester (PES), pamuk (CO) ve yün (WO) numunelerinde gösterildiği gibi tekstil yüzeyi pürüzlü veya tüylü ve daha kalın ise daha iyi bir yapışma elde edildiği görülmüştür [77].

Spahiu vd., giysi üretiminde erimiş biriktirme modellemesi (FDM) uygulama ile sertten esneğe göre değişen malzemeler kullanarak çeşitli geometrik yapılar tasarlayıp test ettikten sonra tamamen 3B baskılı bir elbise üretmişlerdir. Tüketici kabulünü değerlendirmek için 100 katılımcıyla çevrimiçi bir anket yapmışlar ve katılımcıların çoğunun katmanlı üretim teknolojisine aşina olduğu ve 3B baskılı giysiler giymeye açık olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada 3B baskının modadaki potansiyelini vurgulayıp özelleştirme ve inovasyon kapasitesine dikkat çekmişlerdir. Ayrıca, özellikle geleneksel tekstillere ait konfor ve esnekliği kopyalamanın olası zorlukları da ifade edilmiştir. Ayrıca, giyim sektöründe daha çok rağbet görmesi için malzeme ve baskı teknolojilerinde yeni gelişmelere gereği de belirtilmiştir. 3B baskı elbise (Şekil 10b), CLO 3D adlı moda tasarım yazılımı kullanılarak 36 beden ölçüsünde modellenmiştir. Elbisenin deseni, 33 adet 130 mm × 130 mm boyutlarındadır. Baskı işlemi, esnek filament kullanılarak, Orcabot XXL 3B yazıcıda yapılmış ve yaklaşık 75 saatte tamamlanmıştır. Baskı sonrası parçalar, Dikale 07A adlı 3B kalemle eritilen filament yardımıyla birleştirilmiştir (Şekil 10a). Elbisenin her iki yanına giyilmesini kolaylaştıracak kemerler eklenmiştir (Şekil 10c). Elbisenin yapısında, çekildiğinde genişleyen ve böylece konfor ve hareket kolaylığı sağlayan auxetik bir yapı kullanılmıştır [78].

Şekil 10. a) Bir manken üzerinde iğne ile dikilerek bir araya getirilen 3B baskılı parçalar, b) Elbisenin tamamı ve c) Her iki tarafında kemerler bulunan bitmiş elbise [78] (a) 3D-printed pieces sewn together on a mannequin, b) the entire dress, and c) the finished dress with belts on both sides)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında, literatürdeki güncel gelişmeler ışığında belirlenen sekiz temel alışılmışın dışında 3B yazıcı kategorisi (Beton, Selüloz, Biyo, Cam, Seramik, Gıda, Tekstil ve Nano) yapısal ve işlevsel değişkenleri açısından kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. İncelenen tüm kategoriler belirli bir sektöre yönelik işlevsel bir ürün üretme amacı ile geliştirilmiştir. Her biri, farklı yapısal malzeme birleşimiyle oluşan özgün bileşenlere ve üretim prensiplerine sahip olup, çeşitli 3B baskı teknolojileri temeline dayanmaktadır. Bu yazıcılar arasındaki teknik, teknolojik ve süreç farklılıkları, karşılaştırmalı bir biçimde değerlendirilerek Tablo 2'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu kapsamda; yazıcı türlerine göre yapılan çalışmaların hedefleri, kullanılan filament ya da hammadde türleri, nozül çapları, uygulanan baskı teknolojileri ve kullanım alanları sistematik bir biçimde listelenmiştir.

Tablo 2. Farklı sektörlerdeki 3B yazıcıların kıyaslanması (A comparison of 3D printers across different industries)

Yazıcı Türü	Baskı Ölçeği	Çözünürlük (µm)	Baskı Mekanizması	Malzeme Türü	Enerji Tüketimi	Uygulama Alanı	Literatür Kaynağı
Beton	Çok büyük	>10000	Ekstrüzyon	Çimento	Orta	İnşaat	[38-49]
Selüloz	Küçük-Orta	~300	DIW / FDM	Selüloz asetat	Düşük	Medikal, Ambalaj	[49-57]
Biyo	Küçük	~200	Ekstrüzyon / Inkjet	Hidrojel + Hücre	Orta	Tıp, Organ, Doku iskelesi, ilaç testi, kişiselleştirilmiş implant	[58-61]
Cam	Orta	~400	SLA / SLS	Silika cam	Yüksek	Optik, Mimari	[67,68]
Seramik	Küçük-Orta	~100	SLA / Ekstrüzyon	Zirkonya / Al_2O_3	Orta	Enerji, Tıp	[65, 66]
Gıda	Küçük	~1000	Ekstrüzyon	Çikolata, Püre	Düşük	Gıda	[69-73]
Tekstil	Orta	~400	FDM	PLA / TPE	Orta	Moda, Giyilebilir	[74,78]
Nano	Çok küçük	~0.014	FEBID	Metal nanopartikül	Düşük	Elektronik	[63,64]

Çalışmanın temel parametrelerinden biri olan çözünürlük, farklı teknolojilerdeki nozul çapı veya lazer spot genişliği gibi değişen donanım farklılıklarından bağımsız olarak, basılan nihai ürün üzerinde elde edilebilen ve tekrarlanabilen minimum özellik boyutu (teknolojisine göre elde edilebilen en küçük detay) olarak µm cinsinden tanımlanmıştır. Bu tanım, beton yazıcılardaki santimetre ölçekli katmanlar ile nano-baskı sistemlerindeki nanometre hassasiyetindeki çizgilerin aynı paydada karşılaştırılabilmesine olanak tanımaktadır. Baskı ölçeği nitelendirmeleri (küçük, orta, büyük); literatürdeki operasyonel hacim sınırları baz alınarak bağıntılı bir ölçeklendirme yöntemiyle yapılmıştır. Bu sınıflandırmada; mikron altı üretimler 'çok küçük', laboratuvar/mutfak ölçekli masaüstü sistemler 'küçük/orta' ve şantiye tipi portal sistemler 'çok büyük' olarak kategorize edilmiştir. Enerji tüketimi parametresi, toplam basılan hacim başına harcanan enerji yoğunluğunu kapsayacak şekilde; düşük, orta ve yüksek olarak kategorize edilmiştir.

Beton yazıcılar, çok büyük baskı ölçekleri ve orta seviyede enerji tüketimleriyle inşaat sektörü ve bazı endüstriyel ölçekli ürünlerde kullanılmaktadır. Ancak düşük çözünürlükleri sebebiyle detaylı yüzey işlemleri sınırlıdır. Selüloz yazıcılar, düşük enerji tüketimi [79] ve biyobozunur yapıları sayesinde en yüksek sürdürülebilirlik potansiyeline sahip olarak medikal ile ambalaj uygulamalarında öne çıkmaktadır. Biyo-yazıcılar, canlı hücreler içeren hidrojel tabanlı malzemeler kullanarak rejeneratif tıp ve doku mühendisliği alanlarında etkili olsa da günümüz koşullarında düşük mekanik dayanım nedeniyle endüstriyel ölçekte sınırlı kalmaktadır. Cam ve seramik yazıcılar, yüksek çözünürlükte ve karmaşık geometriler üretme avantajına sahip olmakla birlikte yüksek sıcaklık ve enerji gereksinimi nedeniyle sürdürülebilirlik açısından daha zayıf kalmaktadır. Gıda yazıcıları,

düşük enerji tüketimiyle kişiselleştirilmiş beslenme ve gıda tasarımı alanlarında yenilikçi çözümler sunarken, tekstil yazıcıları esnek malzeme kombinasyonlarıyla moda ve giyilebilir teknoloji uygulamalarında potansiyele sahiptir. Son olarak nano yazıcılar, 10–20 nm seviyesindeki olağanüstü çözünürlükleri sayesinde elektronik, sensör ve plasmonik sistemlerde günümüzde ileri düzey üretim olanakları sağlamaktadır. Ayrıca enerji tüketimi ve sürdürülebilirlik arasında da benzer biçimde ters yönlü bir korelasyon bulunmaktadır. Bu durum, gelecekteki 3B yazıcı tasarımlarında malzeme, mekanizma ve enerji parametrelerinin çok kriterli optimizasyon yaklaşımlarıyla değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma kapsamında bilinen ve sık tercih edilen 3B yazıcı teknolojileri dışında farklı alanlarda kullanılan baskı teknolojileri incelenmiştir. Ortaya çıkışı üretim sektörü olan 3B yazıcı teknolojilerinin gelişmesi ile birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu dallar için baskı teknolojisinin gerekliliği, adaptasyon süreci, gereken teknikler ve uygulama yöntemleri gruplar halinde incelenmiştir. Araştırmacılar eklemeli üretimin sınırlarını zorlamaya devam ettikçe, ortaya çıkan bu teknikler endüstrileri yeniden tanımlayabilir ve tasarım, üretim ve malzeme bilimi hakkında tamamen yeni düşünme yollarının sunabileceği görülmüştür. 3B baskının çok yönlülüğü, sınırlı olan olasılıkların kilidini açarak geleneksel uygulamaların ötesine geçmeye başlamıştır. Yaşam alanları basmaktan kişisel tıbbi implantlar üretmeye kadar, bu teknoloji sektörleri yeniden şekillendirdiği ve geleneksel üretim yöntemlerine meydan okuduğu çıkarımı yapılabilmektedir. Tasarlanabilecek ve üretilebilecek metaların sınırlarını zorlayarak, gastronomide yenilebilir sanatlar ortaya çıkarmak, insan dokularını biyolojik olarak basmak ve hatta benzersiz bir hassasiyetle müzik aletleri üretmek gibi beklenmedik şekillerde 3B baskıdan yararlanıldığı görülmüştür. 3B baskının bu alışılmadık kullanımları, yalnızca uygulanabilirliği değil, aynı zamanda yenilikçiliği, sürdürülebilirliği ve verimliliği teşvik etmedeki rolü de vurgulanmıştır. Üretim olanaklarının 3B baskı yoluyla genişlemesi, yeni sınırları keşfetme, karmaşık zorlukları çözme, tasarım ve üretimin sınırlarını yeniden tanımlama konusunda güçlendirmektedir. Malzeme bilimi ve yapay zekâ 3B baskı ile bütünleştikçe, teknolojinin geleneksel üretim süreçlerini yeniden şekillendirmede önemli bir rol oynaması ve onları daha verimli, sürdürülebilir ve özelleştirilebilir hale getirmesi beklenmektedir. Bu çalışmanın farklı sektörlerde tasarlanacak yeni 3B yazıcı teknolojileri için ışık tutması hedeflenmektedir.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

Bu makalenin çalışmalarında kullanılan materyal ve yöntemler etik kurul izni veya yasal-özel bir izin gerektirmemektedir.

The materials and methods used in this study do not require ethics committee approval and/or any special legal authorization.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Cansu KARDAŞ*:** Fikir/Kavram oluşturma, literatür taraması, veri toplama ve analizi, doktora tezi çalışmalarından makalenin yazımı.

Idea/concept development, literature review, data collection and analysis, and writing the article based on doctoral thesis work.

Hüseyin Rıza BÖRKLÜ: Akademik rehberlik, kavramsal çerçevenin denetlenmesi ve son kontrol.

Academic supervision, review of the conceptual framework, and final review.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Kodama H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. Review of Scientific Instruments, 52(1770-1773), (1981). 10.1063/1.1136492

[2] Ligon S. C., Liska R., Stampfl J., Gurr M. and Mülhaupt R. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. Chemical Reviews, 117(10212-10290), (2017). DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074

[3] Hull C., Feygin M., Baron Y., Sanders R., Sachs E., Lightman A. and Wohlers T. Rapid prototyping: current technology and future potential. Rapid Prototyping Journal, 1(11-19), (1995). DOI: 10.1108/13552549510732026

[4] Hull C. W. The birth of 3D printing. Research-Technology Management, 58(25-30), (2015). DOI: 10.5437/08956308X5806067

[5] Deckard C. R. (1988). Selective Laser Sintering, Yüksek Lisans Tezi, The University of Texas at Austin, Austin, 1-120.
[6] Groth C., Kravitz N. D., Jones P. E., Graham J. W. and Redmond W. R. Three-dimensional printing technology. J Clin Orthod, 48(475-485), (2014).
[7] Siemiński P. (2021). Introduction to fused deposition modeling. In Additive Manufacturing, Elsevier, (217-275). DOI: 10.1016/B978-0-12-818411-0.00008-2
[8] Hiemenz J. 3D printing with FDM: How it Works. Stratasys Inc, 1(1-5), (2011).
[9] Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M., Gibson I., Rosen D. and Khorasani M. Binder jetting. Additive Manufacturing Technologies, (237-252), (2021).
[10] Shellabear M. and Nyrhilä O. DMLS-Development history and state of the art. Laser Assisted Net Shape Engineering 4, Proceedings of the 4th LANE, (21-24), (2004).
[11] Sachs E., Cima M., Cornie J., Brancazio D., Bredt J., Curodeau A. and Michaels S. Three-dimensional printing: the physics and implications of additive manufacturing. CIRP Annals, 42(257-260), (1993). DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62438-X
[12] Jones R., Haufe P., Sells E., Iravani P., Olliver V., Palmer C. and Bowyer A. RepRap–the replicating rapid prototyper. Robotica, 29(177-191), (2011). DOI: 10.1017/S026357471000069X
[13] Sells E., Bailard S., Smith Z., Bowyer A. and Olliver V. (2010). RepRap: the replicating rapid prototyper: maximizing customizability by breeding the means of production. In Handbook of Research in Mass Customization and Personalization: (In 2 Volumes), 568-580. DOI: 10.1142/9789814280280_0028
[14] Rosso S., Meneghello R., Biasetto L., Grigolato L., Concheri G. and Savio G. In-depth comparison of polyamide 12 parts manufactured by Multi Jet Fusion and Selective Laser Sintering. Additive Manufacturing, 36(101713), (2020). DOI: 10.1016/j.addma.2020.101713
[15] Yap C. Y., Chua C. K., Dong Z. L., Liu Z. H., Zhang D. Q., Loh L. E. and Sing S. L. Review of selective laser melting: Materials and applications. Applied Physics Reviews, 2(4), (2015). DOI: 10.1063/1.4935926
[16] Weller C., Kleer R. and Piller F. T. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. International Journal of Production Economics, 164(43-56), (2015). DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.02.020
[17] Ge, Q., Sakhaei, A. H., Lee, H., Dunn, C. K., Fang, N. X., & Dunn, M. L. Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers. Scientific reports, 6(1), 31110, (2016).
[18] Rivera-Tarazona, L. K., Shukla, T., Singh, K. A., Gaharwar, A. K., Campbell, Z. T., & Ware, T. H. 4D printing of engineered living materials. Advanced Functional Materials, 32(4), 2106843, (2022). DOI: 10.1002/adfm.202106843
[19] Shahrubudin N., Lee T. C. and Ramlan R. J. P. M. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. Procedia Manufacturing, 35(1286-1296), (2019). DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.089
[20] Choi J. W. and Kim H. C. 3D printing technologies-a review. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 14(1-8), (2015).
[21] Mpofu, T.P.; Mawere, C.; Mukosera, M. The Impact and Application of 3D Printing Technology. Int. J. Sci. Res. (IJSR), 02014675, (2148–2152), (2014).
[22] Thakar, C. M., Parkhe, S. S., Jain, A., Phasinam, K., Murugesan, G., & Ventayen, R. J. M. 3d Printing: Basic principles and applications. Materials Today: Proceedings, 51(842-849), (2022). DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.272
[23] Jandyal, A., Chaturvedi, I., Wazir, I., Raina, A., & Haq, M. I. U. 3D printing–A review of processes, materials and applications in industry 4.0. Sustainable Operations and Computers, 3(33-42), (2022). DOI: 10.1016/j.susoc.2021.09.004
[24] Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baciu, F., & Marinescu, R. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. Polymer Testing, 69(157-166), (2018). DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020
[25] De Sampaio, C. P., Spinosa, R. D. O., Tsukahara, D. Y., da Silva, J. C., Borghi, S. L. S., Rostirolla, F., & Vicentin, J. 3D printing in graphic design education: Educational experiences using Fused Deposition Modeling (FDM) in a Brazilian university. In Proc. 6th Int. Conf. Adv. Res. Virtual Rapid Prototyp., Leiria, Portugal (pp. 25-30), (2013, September).
[26] Maines, E. M., Porwal, M. K., Ellison, C. J., & Reineke, T. M. Sustainable advances in SLA/DLP 3D printing materials and processes. Green Chemistry, 23(18), (6863-6897), (2021).
[27] Finnes, T. High definition 3d printing–comparing sla and fdm printing technologies. The Journal of Undergraduate Research, 13(1), 3, (2015).
[28] Lakkala, P., Munnangi, S. R., Bandari, S., & Repka, M. (Additive manufacturing technologies with emphasis on stereolithography 3D printing in pharmaceutical and medical applications: A review.

International journal of pharmaceutics: X, 5, 100159, (2023). DOI: 10.1016/j.ijpx.2023.100159
[29] Fina, F., Goyanes, A., Gaisford, S., & Basit, A. W. Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines. International journal of pharmaceutics, 529(1-2), 285-293, (2017). DOI: 10.1016/j.ijpharm.2017.06.082
[30] Cai, C., Tey, W. S., Chen, J., Zhu, W., Liu, X., Liu, T., ... & Zhou, K. Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion. Journal of Materials Processing Technology, 288, 116882, (2021). DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116882
[31] Tagliaferri, V., Trovalusci, F., Guarino, S., & Venettacci, S. Environmental and economic analysis of FDM, SLS and MJF additive manufacturing technologies. Materials, 12(24), 4161, (2019). DOI: 10.3390/ma12244161.
[32] Ziaee, M., & Crane, N. B. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. Additive Manufacturing, 28, 781-801, (2019). DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.031.
[33] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., ... & Khorasani, M. (2021). Binder jetting. Additive manufacturing technologies, (237-252).
[34] Anand, M., & Das, A. K. Issues in fabrication of 3D components through DMLS Technique: A review. Optics & Laser Technology, 139, 106914, (2021). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.106914
[35] Tee, Y. L., Peng, C., Pille, P., Leary, M., & Tran, P. PolyJet 3D printing of composite materials: experimental and modelling approach. Jom, 72, (1105-1117), (2020).
[36] Luong, D. X., Subramanian, A. K., Silva, G. A. L., Yoon, J., Cofer, S., Yang, K., ... & Tour, J. M. Laminated object manufacturing of 3D-printed laser-induced graphene foams. Advanced Materials, 30(28), (2018). DOI: 10.1002/adma.201707416
[37] Li, Y., Ren, X., Zhu, L., & Li, C. Biomass 3D printing: principles, materials, post-processing and applications. Polymers, 15(12), (2023). DOI: 10.3390/polym15122692
[38] Siddika, A., Mamun, M. A. A., Ferdous, W., Saha, A. K., & Alyousef, R. 3D-printed concrete: Applications, performance, and challenges. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 9(3), (127-164), (2020). DOI: 10.1080/21650373.2019.1705199
[39] Xiao, J., Ji, G., Zhang, Y., Ma, G., Mechtcherine, V., Pan, J., ... & Du, S. (Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. Cement and Concrete Composites, (122), (2021). DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104115
[40] Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., & Han, B. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, (125), (2019), DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105533
[41] Mohan, M. K., Rahul, A. V., De Schutter, G., & Van Tittelboom, K. Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. Cement and Concrete Composites, (115), (2021), DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103855
[42] Salet, T. A., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., & Laagland, H. L. Design of a 3D printed concrete bridge by testing. Virtual and Physical Prototyping, 13(3), 222-236.(2018). DOI: 10.1080/17452759.2018.1476064.
[43] De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G., & Agusti-Juan, I. (2018). Vision of 3D printing with concrete—Technical, economic and environmental potentials. Cement and Concrete Research, 112, (25-36), (2018). DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.06.001
[44] Özalp, F., Yılmaz, H. D., & Yaşar, Ş. 3D YAZICI TEKNOLOJİSİNE UYGUN SÜRDÜRÜLEBİLİR VE YENİLİKÇİ BETONLARIN GELİŞTİRİLMESİ. Hazır Beton, (62-70), (2018).
[45] Roussel, N., Geiker, M. R., Dufour, F., Thrane, L. N., & Szabo, P. Computational modeling of concrete flow: General overview. Cement and Concrete research, 37(9), (1298-1307), (2007). DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.06.007
[46] Anell, Lars Henrik. "Concrete 3d printer." Lund University, Sweden (2015).
[47] Jo, J. H., Jo, B. W., Cho, W., & Kim, J. H. Development of a 3D printer for concrete structures: laboratory testing of cementitious materials. International Journal of Concrete Structures and Materials, 14, (1-11), (2020). DOI: 10.1186/s40069-019-0388-2
[48] Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G., & Thorpe, T. Hardened properties of high-performance printing concrete. Cement and concrete research, 42(3), (558-566), (2012). DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003
[49] Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., El Zarwi, N., & Hamzeh, F. 3D Concrete printing: Machine and mix design. International Journal of Civil Engineering and Technology, 6(6), (14–22), (2015). DOI: 10.1016/B978-0-12-815481-6.00006-3
[50] Heinze, T. Cellulose: structure and properties. Cellulose chemistry and properties: fibers, nanocelluloses and advanced materials, (1-52), (2016).
[51] Li, V. C. F., Dunn, C. K., Zhang, Z., Deng, Y., & Qi, H. J. Direct ink write (DIW) 3D printed cellulose nanocrystal aerogel structures. Scientific

reports, 7(1), 8018, (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-07771-y
[52] Lee, C. S., Kim, S. G., Kim, H. J., & Ahn, S. H. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. Journal of materials processing technology, 187, (627-630), (2007). DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.095
[53] Feng, X., Yang, Z., Wang, S., & Wu, Z. (2022). The reinforcing effect of lignin-containing cellulose nanofibrils in the methacrylate composites produced by stereolithography. Polymer Engineering & Science, 62(9), (2968-2976), DOI: 10.1002/pen.26077
[54] Hickey, R. J., & Pelling, A. E. Cellulose biomaterials for tissue engineering. Frontiers in bioengineering and biotechnology, 7, 45, (2019). DOI: 10.3389/fbioe.2019.00045
[55] Chen, L., Zhang, Y., Chen, Z., Dong, Y., Jiang, Y., Hua, J., ... & Yap, P. S. Biomaterials technology and policies in the building sector: a review. Environmental Chemistry Letters, 22(2), (715-750), (2024).
[56] Pattinson, S. W., & Hart, A. J. Additive manufacturing of cellulosic materials with robust mechanics and antimicrobial functionality. Advanced Materials Technologies, 2(4), (2017). DOI: 10.1002/admt.201600084
[57] Hu, X., Yang, Z., Kang, S., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., ... & He, J. Cellulose hydrogel skeleton by extrusion 3D printing of solution. Nanotechnology Reviews, 9(1), (345-353), (2020).
[58] Langer, R., & Vacanti, J. Advances in tissue engineering. Journal of pediatric surgery, 51(1), (8-12), (2016). DOI: 10.1016/j.jpedsurg.2015.10.022
[59] Özmen, E., & Ertek, C. (Eklemeli İmalat Teknolojilerinde Kullanılan Biyomalzemeler ve Biyomedikal Uygulamaları. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 10(4), (733-747), (2022). DOI: 10.29109/gujsc.1150799
[60] Kim, J. S., Hong, S., & Hwang, C. Bio-ink Materials for 3D Bio-printing. Journal of International Society for Simulation Surgery, 3(2), (49-59), (2016). DOI: 10.18204/JISSiS.2016.3.2.049
[61] Arai, K., Murata, D., Verissimo, A. R., Mukae, Y., Itoh, M., Nakamura, A., ... & Nakayama, K. Fabrication of scaffold-free tubular cardiac constructs using a Bio-3D printer. PloS one, 13(12), (2018). DOI: 10.1371/journal.pone.0209162.
[62] Ninomiya, K., & Taniuchi, T. Assembly of a tumor microtissue by stacking normal and cancer spheroids on Kenzan using a bio-3D printer to monitor dynamic cancer cell invasion in the microtissue. Biochemical Engineering Journal, 212, (2024). DOI: 10.1016/j.bej.2024.109536
[63] Reisecker, V., Winkler, R., & Plank, H. A review on direct-write nanoprinting of functional 3D structures with focused electron beams. Advanced Functional Materials, 34(46), (2024). DOI: 10.1002/adfm.202407567
[64] Liu, B., Liu, S., Devaraj, V., Yin, Y., Zhang, Y., Ai, J., ... & Feng, J. Metal 3D nanoprinting with coupled fields. Nature Communications, 14(1), 4920. (2023).
[65] Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., ... & He, Y. 3D printing of ceramics: A review. Journal of the European Ceramic Society, 39(4), (661-687), (2019). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013
[66] Spina, R., & Morfini, L. Material extrusion additive manufacturing of ceramics: A review on filament-based process. Materials, 17(11), (2024). DOI:10.3390/ma17112779
[67] Xin, C., Li, Z., Hao, L., & Li, Y. A comprehensive review on additive manufacturing of glass: Recent progress and future outlook. Materials & Design, (227), (2023). DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111736
[68] Shaw, M., Vlahopoulos, D., Usma-Mansfield, C., Sarmiento, J., Snooks, R., Koutsonikolas, T., & Birbilis, N. The Additive Manufacturing of Glass: A Critical Review. 15(6), (2025). DOI: 10.3390/app15063414
[69] Neamah, H. A., & Tandio, J. Towards the development of foods 3D printer: Trends and technologies for foods printing. Heliyon. 0(13), (2024).
[70] Pérez, B., Nykvist, H., Brøgger, A. F., Larsen, M. B., & Falkeborg, M. F. Impact of macronutrients printability and 3D-printer parameters on 3D-food printing: A review. Food chemistry, 287, (249-257), (2019). DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.02.090
[71] Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. 3D printing: Printing precision and application in food sector. Trends in Food Science & Technology, 69, (83-94), (2017). DOI: 10.1016/j.tifs.2017.08.018
[72] Hao, L., Li, Y., Gong, P., & Xiong, W. Material, process and business development for 3D chocolate printing. In Fundamentals of 3D food printing and applications, Academic Press, (pp. 207-255), (2019). DOI: 10.1016/B978-0-12-814564-7.00008-0
[73] Tan, C., Toh, W. Y., Wong, G., & Li, L. Extrusion-based 3D food printing–Materials and machines. International Journal of Bioprinting, 4(2), 143, (2018). DOI: 10.18063/IJB.v4i2.143
[74] Manaia, J. P., Cerejo, F., & Duarte, J. Revolutionising textile manufacturing: a comprehensive review on 3D and 4D printing technologies. Fashion and Textiles, 10(1), 20, (2023).

[75] Chatterjee, K., & Ghosh, T. K. 3D printing of textiles: Potential roadmap to printing with fibers. Adv. Mater., 32, (2020). DOI: 10.1002/adma.201902086

[76] Xu, W., Zhu, Y., Ravichandran, D., Jambhulkar, S., Kakarla, M., Bawareth, M., Lanke, S., & Song, K. Review of fiber-based threedimensional printing for applications ranging from nanoscale nanoparticle alignment to macroscale patterning. ACS Appl. Nano Mater., 4, (7538–7562), (2021). DOI: 10.1021/acsanm.1c01408

[77] Korger, M., Bergschneider, J., Lutz, M., Mahltig, B., Finsterbusch, K., & Rabe, M. Possible applications of 3D printing technology on textile substrates. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 141, No. 1, p. 012011). IOP Publishing, (2016, July). DOI: 10.1088/1757-899X/141/1/012011

[78] Spahiu, T., Canaj, E., & Shehi, E. 3D printing for clothing production. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 15, (2020). DOI: 10.1177/1558925020948216

[79] Gao, T., Zhou, Z., Yu, J., Zhao, J., Wang, G., Cao, D., Ding, B., & Li, Y. 3D printing of tunable energy storage devices with both high areal and volumetric energy densities. Adv. Energy Mater., 9, (2019). DOI: 10.1002/aenm.201802578