



4D BASKI TEKNOLOJİLERİ VE TEKSTİLDE KULLANIM ALANLARI

Duygu ERDEM AKGÜN*

Selçuk Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Moda Tasarımı Bölümü, Konya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

4D Baskı,
4D Tekstiller,
Akıllı Tekstiller,
Şekil Hafızalı Malzemeler.

Öz

3D baskı teknolojisi, sanal ortamda üç boyutlu koordinatlarda tasarlanmış bir nesneye ait dijital verilerden statik yapılar yapmak için kullanılan bir teknolojidir. 4D baskı teknolojisi ise farklı dış uyaranlar ve bir iç uyarana cevap veren ve zaman veya boyut değişimi, fiziksel veya kimyasal değişim ya da şekil değişikliği ile sonuçlanan fiziksel bir nesne oluşturan katmanlı üretim süreci olarak tanımlanmıştır. 4D baskı uygulamaları organ ve doku mühendisliği, biyomedikal cihazlar, güvenlik, optik için hassas desenli yüzeylerin üretimi, akıllı vanalar, elektronik cihazlar, çok-yönlü özelliklere sahip yapılar ve yumuşak aktüatörler, elektromekanik valfler ve akıllı giysiler gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. 4D yapıların tanımına dayanarak, 4D tekstiller terimi zamanla şekil ve fonksiyon değiştiren tekstiller olarak tanımlanabilir. 4D tekstiller, konvansiyonel malzemeler kullanılarak üretilen yapılarla kıyaslandığında kullanılan tekstil malzemelerinin doğası gereği doğrudan ekstra özellikler kazanmış olacaklardır. Ek olarak, konvansiyonel tekstil üretim yöntemleri ile kıyaslandığında malzeme ve zaman tasarrufu sağlamakta ve çalışan konforunu artırmaktadırlar. Aynı zamanda, enerji depolama ve güç aktarımı amacıyla kullanılabilmesi de bir diğer avantajıdır. Bu çalışmada, 4D baskı teknolojileri, kullanılan malzemeler, üretim yöntemleri hakkında bilgi ve 4D baskı teknolojileri kullanılarak üretilen tekstil yapıları ile ilgili örnekler verilmiştir.

4D PRINTING TECHNOLOGIES AND APPLICATION AREAS IN TEXTILES

Keywords

4D Printing,
4D Textiles,
Smart Textiles,
Shape Memory Materials.

Abstract

3D printing technology is a technology used to make static structures from digital data of an object designed in three-dimensional coordinates in a virtual environment. 4D printing technology, on the other hand, is defined as the additive manufacturing process that creates a physical object that responds to different external stimuli and an internal stimulus and results in time or size change, physical or chemical change or shape change. 4D printing applications are used in various fields such as organ and tissue engineering, biomedical devices, safety, the production of sensitive surfaces for optics, smart valves, electronic devices, structures with multi-directional properties and soft actuators, electromechanical valves, and smart clothes. Based on the definition of 4D structures, the term 4D textiles can be defined as textiles that change shape and function over time. 4D textiles will gain extra features due to the nature of the textile materials used when compared to structures produced using conventional materials. In addition, they save material and time and increase employee comfort when compared to conventional textile production methods. It is also another advantage that they can be used for energy storage and power transfer purposes. In this study, 4D printing technologies, materials used, production methods are explained, and examples of textile structures produced using 4D printing technologies are given.

Alıntı / Cite

Erdem Akgün, D., (2022). 4D Baskı Teknolojileri ve Tekstilde Kullanım Alanları, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(3), 1117-1127.

* İlgili yazar / Corresponding author: duygu.erdem@selcuk.edu.tr, +90-332-223-17-86

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
D. Erdem Akgün, 0000-0002-8277-3589	Başvuru Tarihi / Submission Date	15.09.2021
	Revizyon Tarihi / Revision Date	20.01.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	28.02.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.09.2022

1. Giriş (Introduction)

Bilim ve teknoloji dünyasındaki gelişmeler baskı alanında da kendini göstermekte ve yeni uygulamaların kapısını açmaktadır. 2D baskı teknolojilerindeki gelişmeler devam ederken artık literatürde 3D ve 4D baskılardan da söz etmek mümkün hale gelmiştir. Bir katmanlı üretim metodu olarak 1980'lerde ilk kez ortaya çıkan 3D baskı teknolojileri hala araştırılmaya ve uygulanmaya devam etmektedir. 3D baskı teknolojisi sayesinde konvansiyonel yöntemlerle elde edilemeyen yapılar ve ürün prototipleri geliştirilebilmektedir. 3D baskı teknolojisi geçtiğimiz 30 yıl içerisinde hızla gelişen teknolojiler arasında yer almıştır. Ancak tüm potansiyeline rağmen bu teknolojilerin çok az kullanıldığı dikkat çekmektedir (Deshmukh vd., 2020; Leist vd., 2017; Konuk Ege vd., 2019).

3D baskı teknolojisi, 3 boyutlu koordinatlardaki dijital verilerden statik yapılar yapmak için kullanılmıştır. Ardından, akıllı malzemelerin de ortaya çıkmasıyla birlikte 3D baskı teknolojilerinde bu akıllı malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Böylece dış etkenlere duyarlı hale gelen ürünlerin üretimi gerçekleştirilebilmiş ve bu teknolojiye 4D baskı teknolojisi denilmiştir. 4D baskı teknolojisi temel olarak belli çevresel uyaranlara cevap veren ve zaman, boyut, fiziksel, kimyasal veya şekil değişikliği ile sonuçlanan fiziksel bir nesne oluşturan katmanlı üretim süreci olarak tanımlanmıştır. 4D baskı teknolojisi kullanılarak üretilen yapıların şekli ve işlevi bir veya daha fazla uyaran göre değiştirilebilir. Burada iç uyaran ve dış uyaranlar olmak üzere iki farklı uyarandan söz etmek mümkündür. Dış uyaranlar esas olarak su/nem, sıcaklık, ışık, elektrik alanı ve manyetik alan gibi uyaranları içerirken ana iç uyaran hücre çekiş kuvvetidir (Chu vd., 2020; Momeni vd., 2017; Shin vd., 2017; Nkomo, 2018; Zafar ve Zao, 2019; Zarek vd., 2016). Farklı uyaranların çalışma prensibi, avantajları ve dezavantajları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Farklı uyaranların çalışma prensibi, avantajları ve dezavantajları
(Working principle, advantages and disadvantages of different stimuli) (Chu vd., 2020)

Uyaran	Çalışma prensibi	Avantajlar	Dezavantajlar
Su/nem	Şişme/çekme	Temiz/uygun	Yavaş yanıt
Sıcaklık	İç gerilim eşitsizliği	Kontrollü ayarlanabilir	Yavaş yanıt, karmaşık
Işık	Foto-termal etki	Yüksek çözünürlüklü kontrol/uzaktan kumanda	Karmaşık
Elektrik alan	Elektro-termal etki	Hızlı	İşletim zorluğu
Manyetik alan	Manyetik etki	Uzaktan kumanda	İşletim zorluğu
Hücre çekiş kuvveti	Aktin bağlanması ve etkileşimi	Biyolojik uyumluluk	Hücre çekiş kuvveti küçük ve kontrol edilmesi zor, yüksek tasarım gereksinimi

2. 4D Baskı Teknolojileri (4D Printing Technologies)

4D baskı teknolojileri en basit haliyle 3D baskı yöntemine zamanın eklenmesi olarak tanımlanabilir. Buradaki dördüncü boyut zamandır. Zaman kavramı ile kastedilen bir parçanın üretiminin ne kadar sürdüğü değil, üretilen nesnenin oluşturulduktan sonra da zaman içinde gelişmeye devam etmesidir. 4D baskı teknolojileri kullanılarak üretilen malzemeler üretimden sonra zamana ve ısı, ışık, nem vb. dış uyaranlara bağlı olarak şekil değiştirebilme yeteneğine sahiptirler. Böylece, bu ürünlere ek fonksiyonel özellikler verilebilmektedir (Zhou vd., 2015; Monzon vd., 2017; Joshi vd., 2020).

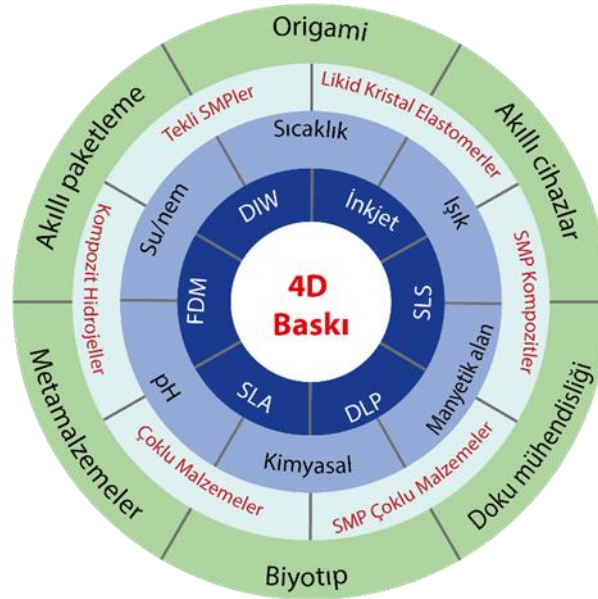
4D baskı uygulamaları organ ve doku mühendisliği, biyomedikal cihazlar, güvenlik, optik için hassas desenli yüzeylerin üretimi, akıllı vanalar, elektronik cihazlar, çok-yönlü özelliklere sahip yapılar ve yumuşak aktüatörler, elektromekanik valfler ve akıllı giysiler gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Shin vd., 2017; Zafar ve Zao, 2019). 4D baskı teknolojisi gelişmekte olan bir uygulama alanıdır ve avantaj sağladığı alanlar kadar dezavantajlı olduğu durumlar da bulunmaktadır. 4D baskı uygulamalarının teknolojinin bilinen durumunda sahip olduğu avantajlar ve dezavantajlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. 4D Baskı uygulamalarının avantajları ve dezavantajları (Advantages and disadvantages of 4D printing applications)

4D baskı uygulamalarının avantajları	4D baskı uygulamalarının dezavantajları
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tasarım özgürlüğü ▪ Kontrol edilebilir şekil ve fonksiyon özellikleri ▪ Üretim adımlarından tasarruf ▪ Malzeme tasarrufu ▪ Basitleştirilmiş lojistik (Shen vd., 2020; Schmelzeisen vd., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Düşük üretkenlik ▪ Kısıtlı baskı alanı ve yüksekliği ▪ Tasarım kısıtlamaları ▪ Uzun baskı süreleri (Shen vd., 2020; Schmelzeisen vd., 2018; Khoo vd., 2015)

4D yapıların tanımına dayanarak, 4D tekstiller terimi zamanla şekil ve fonksiyon değiştiren tekstiller olarak tanımlanabilir. Kendinden uyarlamalı ve çok işlevli tekstil yapıları, 4D baskı ile geliştirilebilecek potansiyel uygulamalardan bazılarıdır (Truby ve Lewis, 2016). Kendinden uyarlamalı akıllı tekstil yapısı, elastik liflerden yapılan tekstillerin aksine, çekme yükü olmadan yeni bir boyuta uyarlanabilir. Çok işlevli akıllı tekstiller, vücudun nemini veya sıcaklığını yönetebilir, yaraları izleyebilir, cilt bakımı özelliği sunabilir sert iklimlere karşı koruma sağlayabilir veya elbisenin rengini uyarlanabilir şekilde değiştirebilir (Hu vd., 2012). 4D tekstiller, konvansiyonel malzemeler kullanılarak üretilen yapılarla kıyaslandığında kullanılan tekstil malzemelerinin doğası gereği doğrudan ekstra özellikler kazanmış olacaklardır. Ek olarak, konvansiyonel tekstil üretim yöntemleri ile kıyaslandığında malzeme ve zaman tasarrufu sağlamakta ve çalışan konforunu artırmaktadırlar. Aynı zamanda, enerji depolama ve güç aktarımı amacıyla kullanılabilirlikleri de bir diğer avantajlarıdır (Schmelzeisen vd., 2018).

4D baskı teknolojilerinde kullanılan malzemeler, üretim yöntemleri, uyaran çeşitleri ve kullanım alanları özet halinde Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. (İçten dışa doğru) 1) Baskı teknolojisi; DIW: doğrudan mürekkep yazdırma, FDM: eriyik yığıma modelleme, SLA: stereolitografi, DLP: dijital ışık işleme, SLS: seçici lazer ergitme, inkjet: mürekkep püskürtmeli baskı, 2) uyaran tipi, 3) kullanılan malzemeler; SMP: şekil hafızalı polimerler, 4) uygulama alanları

((Inside out) 1) Printing technology; DIW: direct ink writing, FDM: fused deposition modeling, SLA: stereolithography, DLP: digital light processing, SLS: selective laser sintering, inkjet: inkjet printing, 2) stimuli type, 3) materials used; SMP: shape memory polymers, 4) application areas) (Kuang vd., 2019)

3. 4D Baskıda Kullanılan Malzemeler (Materials Used in 4D Printing)

Akıllı malzemeler 4D baskının temel bileşenidir. 4D baskı uygulamalarının en kolay yolu 3D baskı esnasında üretime tek bir akıllı malzemenin eklenmesidir. Şekil değiştirme fonksiyonu için en çok kullanılan akıllı malzemeler şekil hafızalı polimerler ve likit kristal elastomerlerdir (Singhli ve Sharma, 2020). Bir diğer yöntem ise 4D baskı sırasında hidrojenlerin, çoklu malzemelerin ve kompozitlerin kullanımınıdır (Pei vd., 2017; Hager vd., 2015; Li ve Keller, 2006).

3.1. Şekil Hafızalı Polimerler (Shape Memory Polymers)

Şekil hafızalı polimerler herhangi bir dış uyarana cevap vererek şekil hafıza etkisi vasıtasıyla şekil değiştirme yeteneğine sahip olan akıllı malzemelerdir (Chakraborty vd., 2017). Şekil hafıza etkisi, yarı-plastik ve ciddi şekilde

önceden deforme olmuş, doğru uyarana altında ilk şekli geri kazanma yeteneği olarak tanımlanır. Şekil hafıza etkisini tetikleyen tipik uyarılar; ısı, ışık, kimyasallar ve mekanik yükleme olarak bilinmektedir (Li vd., 2017). Şekil hafızalı polimerlerin şekil değiştirebilme özelliğinin etkinleştirilebilmesi için bir programlama bir de geri dönüş adımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Programlama adımında şekil hafızalı polimerler dönüşüm sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta deforme edilirler. Ardından soğutulup yükleri boşaltılarak geri dönüş adımı gerçekleştirilir. Şekil hafızalı polimerlerin programlanması tek veya çok adımlı olmak üzere iki farklı türde şekilleri deforme olduğu esnada gerçekleşir (Joshi vd., 2020; Pei vd., 2017; Hager vd., 2015; Chakraborty vd., 2017). Şekil hafızalı polimerler yapay kas, değiştirilebilir optikler, hologramlar, oyuncaklar, yeniden şekillendirilen malzemeler, otomotiv ve uzay sanayi, medikal uygulamalar ve akıllı tekstil uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Joshi vd., 2020; Pei vd., 2017; Hager vd., 2015; Li ve Keller, 2006). Şekil hafızalı diğer malzeme türlerinden olan metaller ya da alaşımlar gibi diğer malzemelerle kıyaslandığında polimerlerin uygulanabilirliği ve işlenebilirliği daha yüksektir (Chakraborty vd., 2017). Aynı zamanda şekil hafızalı polimerler bir tekstil malzemesinin/yüzeyinin yumuşak yapısı ile benzer özelliklerde hafif ve ayarlanabilir bir modüle sahiptirler (Thakur, 2017).

3.2. Likit Kristal Elastomerler (Liquid Crystal Elastomers)

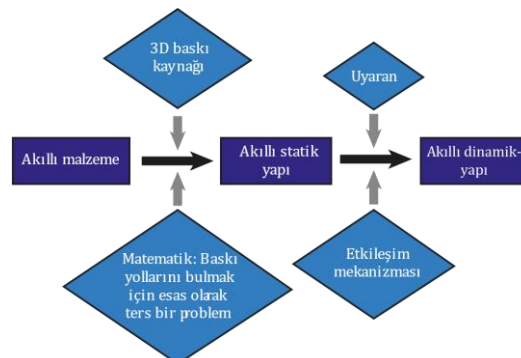
Likit kristal elastomerler, ısı veya ışık gibi harici bir uyarının tetikleyicisi altında tersine çevrilebilen, büyük ve hızlı şekil deformasyonu yapabilen bir tür akıllı malzemedir (Zhang vd., 2019). Tersinir şekil değişikliğine uğrayan birçok malzemenin aksine, harici yükler veya sulu ortamlar gerektirmemesi sayesinde bu malzemeler birçok uygulama için ideal adaylardır (Ambulo vd., 2017). Likit kristaller tipik olarak, uzun menzilli yönelim düzenine sahip nispeten sert, çubuk moleküllerden yapılmış sıvılardır. En basit sıralı faz, çubukların ortalama sıralama yönünün eşit olduğu nematik mezofazdır. Mezojen adı verilen sert çubuk benzeri birimleri içeren uzun polimer zincirleri de nematik olarak düzenlenebilir ve böylece nematik polimerler oluşturulabilir (Xie ve Zhang, 2005). Likit kristal polimerlerin ana zincir ve yan zincir olmak üzere iki farklı tipi bulunmaktadır. Yan zincir likit kristalli polimerler, makromoleküler reaksiyon veya mezojenik vinil monomerlerin polimerizasyonu yoluyla sentezlenebilir. İki işlevli monomerlerden sentezlenen ana zincirli likit kristal polimerler ise düşük kütle model bileşiklerinkine benzer sıvı kristalin davranış gösterirler. Likit kristal elastomerler ısı, ışık ve suyun etkisi altında hızlı ve geri dönüşümlü şekil deformasyonuna uğrarlar (Singhli ve Sharma, 2020). Likit kristal elastomerler genellikle elektrik-optik, entegre optik ve depolama cihazlarında kullanılmaktadır (Demir vd., 2018). Bu malzemeler, harekete geçirmeye yardımcı olmak için geçici bir şeklin yeniden programlanmasına veya harici bir ön gerilim kuvvetine gerek kalmadan tersine çevrilebilir şekilde harekete geçme yeteneğine sahip olmaları nedeniyle diğer aktif polimerlerden daha avantajlı durumdadırlar (Ula vd., 2018).

3.3. Hidrojeller (Hydrogels)

Hidrojeller, zincirleri arasında çapraz bağların varlığı nedeniyle çözülmeden büyük miktarda suyu emebilen üç boyutlu hidrofilik polimer ağlardır (Champeau vd., 2020). Bu malzemeler, uyarılara tepki ile hacimlerini büyük ölçüde değiştirme kabiliyetleri nedeniyle 4D baskıda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ancak, mekanik kuvvetleri sebebiyle dezavantajlı durumdadırlar ve daha sağlam ürünler elde edilmek istendiğinde genellikle ikinci bir polimerik ağ ile karıştırılarak kullanılırlar. Bu tip hidrojeller çoğunlukla tıbbi uygulamalarda kullanılırlar (Joshi vd., 2020).

4. 4D Baskıda Kullanılan Üretim Yöntemleri (Production Methods Used in 4D Printing)

4D baskı yöntemleri aslında 3D baskı yöntemleri ile hemen hemen aynıdır. 3D baskı yöntemleri ile akıllı malzemelerin kombinasyonu 4D baskı kavramını ortaya çıkarmıştır ve bu fikir ilk olarak Skylar Tibbits tarafından 2013 yılında TED Konferansı'nda tanıtılmıştır (Mohol ve Sharma, 2021). 4D baskı yapısı şematik olarak Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 4D baskı yapısı (4D printing structure) (Mohol ve Sharma, 2021)

4D baskı işlemi için cihazlar üzerinde bazı modifikasyonlara ihtiyaç duyulmaktadır. 4D baskı için kullanılan üretim yöntemleri aşağıda kısaca açıklanmıştır. Ayrıca, aşağıda bahsedilen 4D baskı üretim yöntemleri ile kullanılacak malzemelere örnekler de Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. 4D Baskı üretim yöntemleri ile kullanılacak malzemelere örnekler
(Examples of materials that can be used with 4D printing production methods)

4D baskı üretim yöntemleri	Kullanılacak malzemeler
Eriyik Yığıma Modelleme (Fused Deposition Modelling)	Şekil hafızalı polimerler, çoklu malzemeler ve kompozitler (Ahmed vd., 2021, Suriano vd., 2019)
Elektron Işını Ergitme (Electron Beam Melting)	Şekil hafızalı polimerler (Gardan, 2019)
Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting)	Çoklu malzemeler ve kompozitler (Ahmed vd., 2021)
Mürekkep Püskürtmeli Baskı (Inkjet Printing)	Çoklu malzemeler ve kompozitler, hidrojel, likit kristal elastomerler (Suriano vd., 2019; Ren vd., 2020)
Stereolitografi (Stereolithography)	Şekil hafızalı polimerler, hidrojel (Ahmed vd., 2021; Champeau vd., 2020)
Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing)	Şekil hafızalı polimerler, hidrojel (Ahmed vd., 2021)

4.1. Eriyik Yığıma Modelleme (Fused Deposition Modelling)

Eriyik yığıma modelleme (Fused Deposition Modeling) tekniği, eriyik haldeki bir baz malzemenin katmanlar halinde bir yapı oluşturmak üzere bir ağızlıktan püskürtülmesi temeline dayanır. Baz malzeme ağızlığın hemen üzerinde bulunan bir ısıtma ünitesi ile erime sıcaklığının bir miktar üzerinde ısıtılarak sürekli eriyik halde tutulur. Malzeme ağızlıktan çıktıktan sonra hemen katılaşmaya başlar ve böylece temas ettiği alanda katılaşarak tutunmuş olur. Bu teknik ile karmaşık mekanizmaların ve hareketli parçaların üretilmesi mümkündür. Geleneksel yöntemlere üretilmesi zor ya da imkansız yapılar bu teknikle rahatlıkla üretilebilir. Genellikle düşük miktarda üretimler için kullanılır. Ancak yüzey kalitesi çok iyi değildir ve ağızlık kesiti dairesel olduğu için keskin köşeli parçaların üretimi için pek uygun değildir (Cano-Vicent vd., 2021; Joshi vd., 2020; Aydın ve Karamolla, 2019).

4.2. Elektron Işını Ergitme (Electron Beam Melting)

Elektron ışını ergitme (Electron Beam Melting) tekniği, toz halinde bulunan metallerin odaklanmış bir elektron ışını ile taranması, eritilmesi ve birleştirilmesi prosesi olarak tanımlanabilir. Yüksek hızlı elektron ışını toz tabakası ile etkileşime girdiğinde, kinetik enerji termal enerjiye dönüşerek tozun erimesine neden olur. Eritme ortamı yaklaşık 700°C gibi yüksek sıcaklıklarda vakumlu bir ortamda bulunur. Yüksek yoğunluklu elektron ışını ile toza düşük ışın akımında bir ön ısıtma uygulanır. Böylece nem içeriği düşürülerek oksijen alım miktarı azaltılabilir. Ön ısıtma işlemi aynı zamanda işlem sırasında katmanlar arasındaki sıcaklık farkı değişimini de düşürmekte ve gerilme oluşumunu azaltmaktadır. Ön ısıtma aşamasından sonra elektron ışını tozu daha düşük bir tarama hızı, daha küçük nokta boyutu ve daha yüksek ışın akımında tarayarak eritir. Yapı tamamlandıktan sonra oluşturulan parça 700°C'den oda sıcaklığına kendi halinde soğutularak ürün elde edilir (Yalçın ve Ergene, 2017; Rafi vd., 2013; Bormann vd., 2012).

4.3. Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting)

Seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting) yönteminde, ilk olarak üretilecek olan parçanın CAD modeli tipik olarak 30-100 µm kalınlığında yatay dilimler halinde kesilir. Ardından, odaklanmış bir lazer ışını her bir dilimin kontur bilgisini, lokal olarak eriyen ve katılaşan metalik toz yatağına iletir. Bir dilimin taranmasından sonra yapı platformu dilim kalınlığı kadar alçaltılır ve tekrar toz kaplanır. Her bir dilimin lazer ile taranması ve yeniden kaplanması tüm dilimler bitene kadar devam eder. Böylelikle elde edilmek istenen yapı tamamlanmış olur (Bormann vd., 2012; Atalay vd., 2016).

4.4. Mürekkep Püskürtmeli Baskı (Inkjet Printing)

Mürekkep püskürtmeli baskı (Inkjet Printing), bir bilgisayar aracılığıyla yapısal verileri okuyan ve küçük mürekkep damlacıklarını biriktirerek fiziksel olarak yeniden yapılandırılan temassız bir tekniktir. Mürekkep damlacıklarının oluşturulmasında piezoelektrik, elektromanyetik ya da termal yöntemler kullanılabilir. Bu yöntem ile elde edilen yapılar çok fazla gerilime sahip değildirler ve çok hassas bir biçimde üretilebilirler. Mürekkep püskürtmeli baskının en önemli özelliklerinden birisi yüksek oranda biyoyumlu bir işlem olmasıdır. Bu teknik kullanılarak canlı hücreleri ve biyomalzemeler aynı anda bastırılarak farklı doku türlerine sahip 3 boyutlu yapılar ve 4 boyutlu origami benzeri yapılar elde edilebilir (Joshi vd., 2020; Börklü vd., 2016). Ayrıca, mürekkep püskürtmeli baskı oldukça hızlı ve ucuz bir tekniktir ve birçok farklı malzeme türü ile kullanılabilir (Chu vd., 2020).

4.5. Stereolitografi (Stereolithography)

Stereolitografi (Stereolithography) tekniği, genellikle Şekil hafızalı polimerlerin baskısında kullanılan yöntemlerden biridir. Çok yüksek hassasiyete sahiptir. Stereolitografi iŐleminde yapıyı oluşturmak iÇin kullanılan malzememin polimerizasyonu lazer iŐınları ile sağlanır ve bu lazer iŐınları bir reğine banyosu iÇerisinde istenen alana etki ettirilir. Lazer iŐınları aracılığıyla malzemeler tabakalar oluŐturacak Şekilde uygulanır ve uygulama işlemi yapılan her bir katman reğine banyosunun iŐine doğru alĐaltılır. Katmanların uŐerinde biriken fazla reğineler bir silecek yardımıyla temizlenir. Bu işlem parÇa tamamlanana kadar tekrarlanır. Ardından parÇa reğine banyosundan Őıkarılarak reğine süzülür ve bir Őözücüde yıkanarak artıklardan arınması sağlanır. Ardından, ultraviyole fırına konularak reğinelerin katılaŐması sağlanır (Joshi vd., 2020; Börklü vd., 2016).

4.6. Dijital IŞık İŞleme (Digital Light Processing)

Dijital iŐık iŐleme (DLP), vat polimerizasyon tekniğine dayanmaktadır. Bu teknikte, sıvı reğine teknesi iŐık kaynağı altında kūrlenir ya da polimerize edilir. ReĐine damlası, lazer kaynağı aracılığıyla verilen ultraviyole iŐık altında sertleŐtirilerek katı bir malzemeye dōnüŐtürülür ve her seferinde bir katman oluŐturmak suretiyle üŐ üŐte katmanların yığılmasıyla ürün elde edilir (Singholi ve Sharma, 2020).

5. 4D Baskı Teknolojileri Kullanılarak Üretilen Tekstil Yapılarına Örnekler (Examples of Textile Structures Produced Using 4D Printing Technologies)

Biyomedikalden savunma sanayine, uzay araçlarından elektronik bileŐenlere kadar pek çok alanda kullanılan 4D baskı teknolojisi tekstil alanında da yavaş yavaş da olsa kullanılmaya başlanmıştır. 4D baskı teknolojileri kullanılarak üretilen tekstil yapıları Şekil değiştiren nesnelere, basınca duyarlı komponentler, ses emici tekstiller, aktif ayakkabılar gibi farklı ürünlerde görülmektedir.



Şekil 3. Aktif ayakkabı (Active shoes) (Active shoes, 2020)

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nün 4D alanında birtakım ŐalıŐmaları bulunmaktadır. Bunlardan biri de aktif ayakkabı olarak isimlendirdikleri ŐalıŐmadır (Şekil 3). Bu ŐalıŐmada hassas bir 2 boyutlu desen yazdırılarak bir ayakkabı formu oluŐturulmuŐtur. Ayakkabı üretildikten ve makineden Őıkarıldıktan sonra Şekil değiştirebilme özelliğine sahip hale gelmektedir. Farklı özelliklere sahip ŐeŐitli kalınlıklarda malzemeler gerilmiş bir tekstil malzemesi uŐerine basılır ve ardından serbest bırakılır. Bu sayede ayakkabı önceden programlanmıŐ Őekillere dōnüŐebilmektedir (Active Shoes, 2020).



Şekil 4. 4D Baskılı telin kendiliğinden "MIT" harflerine katlanması (Self-folding of 4D printed wire into the letters "MIT") (Tibbits, 2014)



Şekil 5. Üç boyutlu bir küp halinde katlanabilen 4D baskılı Tel
(4D Printed wire that can be folded into a three-dimensional cube) (Tibbits, 2014)

Tibbits (2014) 4D baskı ile üretilmiş iki farklı tekstil yapısı geliştirmiştir. Bunlardan ilki yaklaşık 30 cm uzunluğunda hem katı hem de aktif materyaller içeren tek bir şerit halinde basılmıştır. Bu şerit suya batırıldığında şekil değiştirerek 'MIT' harflerine dönüşmektedir (Şekil 4). İkinci yapı ise yine hem katı hem de aktif materyaller kullanılarak basılmış iki boyutlu bir düzlemdir. Bu düzlem bir küpün açık haldeki altı yüzeyini temsil eder. Her bir bağlantı noktasında bulunan uzun şeritler nihai duruma ulaşıldığında katlanmayı engellemek üzere 90°'lik bir açı kısıtlayıcısı işlevi görmektedir. Bu yapı suya batırıldığında kapalı yüzeyli bir küpe dönüşmektedir (Şekil 5) (Tibbits, 2014).



Şekil 6. Uzun atlama sporcuları için yüksek performans giysisi
(High performance clothing for long jump athletes) (Skynfeel Apparel, 2020)

Pauline Van Dongen Stüdyosu'nda 4D tekstil yapıları kullanılarak uzun atlama sporcuları için bir giysi geliştirilmiştir (Şekil 6). Geliştirilen giysi fizyolojik stres ve zorlanma ile ilişkili olarak şekil ve biçim değiştirebilme özelliğine sahiptir. Giysinin yanlarında lazer kesim kullanılarak şekillendirilmiş ve yusufçuk kanatlarından esinlenilmiş kanatçıklar bulunmaktadır. Koşma esnasında kanatçıklar kapalı pozisyonda kalırken atlama sırasında kollar döndükçe ve bacaklar uzadıkça kanatçıklar açılmakta ve yükselme ve havada kalma süresini ve bu sayede de performansı artırıcı özellik göstermeye destek olmaktadır (Ledbury, 2018).



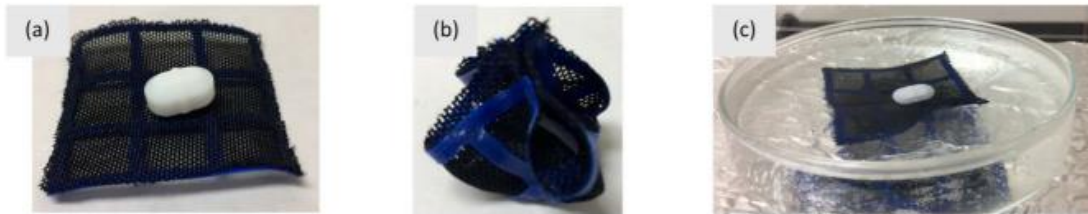
Şekil 7. Sonogrid (Sonogrid) (Peters and Drewes, 2019)

Almanya'nın Köln şehrindeki tasarımcılar tarafından 4D baskı teknolojisi kullanılarak akustik özellikli 4D tekstiller geliştirilmiştir (Şekil 7). "Sonogrid" adı verilen malzeme sistemi çok kalabalık kamusal alanlarda oluşan akustik yansımaları azaltmak için tasarlanmıştır. Kaba bir ağ yapısına sahip olan kumaş gerilmiş bir durumda iken baskı işlemi yapılmış ve baskıdan sonra üç boyutlu küçük piramit ızgaraları oluşturmak üzere büzülmüştür. Bu piramitlerin boyutu ve yerleşimi farklı ortamların ses azaltma ihtiyaçlarını karşılayabilmek üzere uyarlanabilir özelliktedir (Peters and Drewes, 2019).



Şekil 8. 4D Baskılı dış iskelet yapısı (4D Printed exoskeleton structure) (Peters and Drewes, 2019)

RWTH Aachen Üniversitesi'nde bir araştırma ekibi 4D tekstiller kullanarak geliştirdikleri bir dış iskelet üzerinde çalışmaktadırlar (Şekil 8). Dış iskelet, ön gerimli bir tekstil yüzeyinin bir polimer ile basılması suretiyle geliştirilmiş ve enerji depolama amacıyla kullanılmıştır. Depolanmış enerji, kullanıcı için çeşitli hareketlerin akışını uyarıya ve kolaylaştırmaya yardımcı olmaktadır (Peters and Drewes, 2019).



(a) PLA naylon kumaşın merkezine mıknatıs karıştırma çubuğu yerleştirilir.

(b) PLA naylon kumaş 70°C'ye ısıtıldığında mıknatıs çubuk üzerine kapanır ve sonra oda sıcaklığına soğutulur.

(c) PLA naylon kumaş 70°C sıcaklığa yeniden ulaştığında kumaş açılır ve mıknatıs karıştırma çubuğu ortaya çıkar.

Şekil 9. PLA Naylon kumaş ile üretilen akıllı tekstil ürünü
(Smart textile product made with PLA nylon fabric) (Leist vd., 2017)

Leist ve ark. (2017) naylon kumaş üzerine polilaktik asit (PLA) ile 4D baskı uygulayarak bir akıllı tekstil ürünü geliştirmişlerdir (Şekil 9). PLA termal şekil hafıza davranışına sahip bir malzemedir ve termomekanik olarak geçici

şekillerde eğitilebilme ve ısıtıldığında programlanan şekline dönme yeteneğine sahiptir. Naylon kumaş ile birleştirildiğinde de bu özelliklerinde herhangi bir kayıp yaşanmamıştır. Naylon ile kombine edilen akıllı malzemeler kapsülasyon ve çevre şartlarına cevap verecek nitelikte kontrollü salınım amacıyla kullanılabilirler (Leist vd., 2017).



Şekil 10. 4D Teknolojisi ile üretilmiş orta taban (Midsole manufactured with 4D technology) (Adidas Ultracraft 4D, 2021)

Adidas ve Carbon Digital Light Synthesis™ iş birliğinde elastomerik bir malzemenin 4D baskı teknolojisi ile kullanılmasıyla spor ayakkabılar için tek parçadan oluşan bir orta taban üretilmiştir (Şekil 10). Carbon ekibi orta tabanlar için temelde sıfır destek malzemesiyle baskı yapılmasını sağlayan bir baskı stratejisi geliştirmiştir. Böylece yalnızca hammadde maliyetlerinden tasarruf edilmekle kalınmamış, aynı zamanda geleneksel eklemeli imalatın manuel işlem sonrası adımları da önemli ölçüde azaltılmıştır (Adidas Ultracraft 4D, 2021).

6. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, 4D baskı teknolojileri, kullanılan malzemeler, üretim yöntemleri hakkında bilgiler ve 4D baskı teknolojileri kullanılarak üretilen 4D tekstil yapıları ile ilgili örnek çalışmalar verilmiştir.

4D baskı teknolojileri nispeten yeni bir araştırma alanıdır ve avantajlarının yanında birçok kısıtlamaya da sahiptir. Bu kısıtlamalar teknolojik kısıtlamalar, malzeme kısıtlamaları ve tasarım kısıtlamaları olarak sınıflandırılabilir. Ancak kullanım alanı genişledikçe tüm engellere uygun çözümler bulunulacağı düşünülmektedir. Dezavantajları olmasına rağmen, 3D baskıdan 4D baskıya geçiş beraberinde büyük uygulama potansiyellerini de getirmiştir. Bu teknolojiler sayesinde insan gücünün ekstrem çalışma koşullarında bulunmasına gerek kalmayacaktır.

4D baskı pazarının büyüklüğü 2020 senesinde 65.1 Milyon ABD doları değerinde iken ve 2027'de sona eren tahmin dönemi için %42,1'lik bir bileşik yıllık büyüme oranında büyümesi ve 489.2 Milyon ABD doları pazar değerine ulaşması beklenmektedir. 4D tekstillerin ise önümüzdeki yıllarda %35'lik bir yıllık bileşik büyüme oranıyla büyümesi öngörülmektedir (4D Printing Market Forecast to 2027, 2021).

Ayrıca, 4D baskı yeni bir araştırma alanı olduğu için henüz denenmeyen pek çok akıllı malzeme de bulunmaktadır. Yakın gelecekte bu denemelerin yapılmasıyla birlikte ürün çeşitliliğinin ve ürünlerin mukavemet, dayanıklılık ve yüzey kalitesi gibi özelliklerinin de artması beklenmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- 4D Printing Market Forecast to 2027, 2021. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2021/10/19/2316785/0/en/Global-4D-Printing-Market-is-Expected-to-Reach-US-489-2-Mn-by-2027-With-a-Growing-CAGR-of-42-1.html>. Erişim tarihi: 04.12.2021
- Active Shoes. <https://selfassemblylab.mit.edu/active-shoes>. Erişim tarihi: 04.03.2020.
- Adidas Ultracraft 4D. <https://www.carbon3d.com/adidas-ultracraft-4d/>. Erişim tarihi: 04.12.2021
- Ahmed, A., Arya, S., Gupta, V., Furukawa, H., Khosla, A., 2021. 4D printing: Fundamentals, Materials, Applications and Challenges. Polymer, 123926.
- Ambulo, C. P., Burroughs, J. J., Boothby, J. M., Kim, H., Shankar, M. R., Ware, T. H., 2017. Four-Dimensional Printing of Liquid Crystal Elastomers. ACS Applied Materials & Interfaces, 9(42), 37332-37339.
- Atalay, H. A., Değirmençtepe, R. B., Bozkurt, M., Can, O., Canat, H. L., Altunrende, F., 2016. 3D Teknolojinin Tıpta ve Üroloji'de Kullanım Alanları. Endoüroloji Bülteni, 9, 65-71.

- Aydın, K., Karamolla, M., 2019. Katmanlı İmalat ile Üretilen Metal Malzemelerin Kaynak Kabiliyeti. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(4), 1610-1620.
- Bormann, T., Schumacher, R., Müller, B., Mertmann, M., de Wild, M., 2012. Tailoring Selective Laser Melting Process Parameters for NiTi Implants. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(12), 2519-2524.
- Börklü, H. R., Yıldırım, A. K., Sezer, H. K. 2016. Hızlı Prototip Oluşturmada Karşılaşılan Problemler ve Çözüm Önerileri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4(4), 309-319.
- Cano-Vicent, A., Tambuwala, M. M., Hassan, S. S., Barh, D., Aljabali, A. A., Birkett, M., ... & Serrano-Aroca, Á., 2021. Fused Deposition Modelling: Current Status, Methodology, Applications and Future Prospects. *Additive Manufacturing*, 102378.
- Champeau, M., Heinze, D. A., Viana, T. N., de Souza, E. R., Chinellato, A. C., Titotto, S., 2020. 4D Printing of Hydrogels: A Review. *Advanced Functional Materials*, 30(31), 1910606.
- Chakraborty, J. N., Dhaka, P. K., Sethi, A. V., Arif, M., 2017. Technology and Application of Shape Memory Polymers in Textiles. *Research Journal of Textile and Apparel*. 21(2), 86-100.
- Chu, H., Yang, W., Sun, L., Cai, S., Yang, R., Liang, W., ... & Liu, L., 2020. 4D Printing: A Review on Recent Progresses. *Micromachines*, 11(9), 796.
- Demir, S., Sezer, H. K., Özdemir, V., 2018. Topolojik Nesnelerin FDM Yöntemiyle Üretimi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(2), 76-87.
- Deshmukh, K., Houkan, M. T., AlMaadeed, M. A., Sadasivuni, K. K., 2020. Introduction to 3D and 4D Printing Technology: State of the Art and Recent Trends. K. K. Sadasivuni, K. Deshmukh and M. A. AlMaadeed (Edt.), *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials*, içinde (s. 1-24). Elsevier.
- Gardan, J., 2019. Smart Materials in Additive Manufacturing: State of The Art and Trends. *Virtual and Physical Prototyping*, 14(1), 1-18.
- Hager, M. D., Bode, S., Weber, C., & Schubert, U. S., 2015. Shape Memory Polymers: Past, Present and Future Developments. *Progress in Polymer Science*, 49, 3-33.
- Hu, J., Meng, H., Li, G., Ibekwe, S. I., 2012. A Review of Stimuli-Responsive Polymers for Smart Textile Applications. *Smart Materials and Structures*, 21(5), 053001.
- Joshi, S., Rawat, K., Karunakaran, C., Rajamohan, V., Mathew, A. T., Koziol, K., ... & Balan, A. S. S., 2020. 4D Printing of Materials for the Future: Opportunities and Challenges. *Applied Materials Today*, 18, 100490.
- Khoo, Z. X., Teoh, J. E. M., Liu, Y., Chua, C. K., Yang, S., An, J., ... & Yeong, W. Y., 2015. 3D Printing of Smart Materials: A Review on Recent Progresses in 4D Printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(3), 103-122.
- Kuang, X., Roach, D. J., Wu, J., Hamel, C. M., Ding, Z., Wang, T., ... & Qi, H. J., 2019. Advances in 4D Printing: Materials and Applications. *Advanced Functional Materials*, 29(2), 1805290.
- Konuk Ege, G., Sürmen, H. H., Bektaş, B., Akkuş, N., 2019. 4D Baskı Teknolojisi ve Biyobaskı Alanındaki Uygulamaları. 4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, 516-524.
- Ledbury, J., 2018. Design and Product Development in High-Performance Apparel. J. Mcloughlin, T. Sabir (Edt), *High-Performance Apparel: Materials, Development, and Applications*, içinde (s. 175-189). Woodhead Publishing.
- Leist, S. K., Gao, D., Chiou, R., Zhou, J., 2017. Investigating the Shape Memory Properties of 4D Printed Polyactic Acid (PLA) and the Concept of 4D Printing onto Nylon Fabrics for the Creation of Smart Textiles. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(4), 290-300.
- Li, M. H., Keller, P., 2006. Artificial Muscles Based on Liquid Crystal Elastomers. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1847), 2763-2777.
- Li, X., Shang, J., Wang, Z., 2017. Intelligent Materials: a Review of Applications in 4D Printing. *Assembly Automation*, 37(2), 170-185.
- Mohol, S. S., Sharma, V., 2021. Functional Applications of 4D Printing: A review. *Rapid Prototyping Journal*, 27(8), 1501-1522.
- Momeni, F., Liu, X., Ni, J., 2017. A Review of 4D Printing. *Materials & Design*, 122, 42-79.
- Monzón, M. D., Paz, R., Pei, E., Ortega, F., Suárez, L. A., Ortega, Z., ... & Clow, N., 2017. 4D Printing: Processability and Measurement of Recovery Force in Shape Memory Polymers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5-8), 1827-1836.
- Nkomo, N., 2018. A Review of 4D Printing Technology and Future Trends. *Eleventh South African Conference on Computational and Applied Mechanics*, 202-211.
- Pei, E., Loh, G. H., Harrison, D., de Amorim Almeida, H., Verona, M. D. M., Paz, R., 2017. A Study of 4D Printing and Functionally Graded Additive Manufacturing. *Assembly Automation*, 37(2), 147-153.
- Peters, S., Drewes, D., 2019. *Materials in Progress: Innovations in Designers and Architects*. Birkhauser Verlag GmbH.
- Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., Stucker, B. E., 2013. Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(12), 3872-3883.
- Ren, L., Li, B., He, Y., Song, Z., Zhou, X., Liu, Q., Ren, L., 2020. Programming Shape-Morphing Behavior of Liquid Crystal Elastomers via Parameter-Encoded 4D Printing. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(13), 15562-15572.
- Schmelzeisen, D., Koch, H., Pastore, C., Gries, T. 2018. 4D Textiles: Hybrid Textile Structures that can Change Structural Form with Time by 3D Printing. Y. Kyosev, B. Mahltig, A. Schwarz-Pfeiffer (Edt), *Narrow and Smart Textiles*, içinde (s. 189-201). Springer, Cham.
- Shen, B., Erol, O., Fang, L., Kang, S. H., 2020. Programming the Time into 3D Printing: Current Advances and Future Directions in 4D Printing. *Multifunctional Materials*, 3(1), 012001.
- Shin, D. G., Kim, T. H., Kim, D. E., 2017. Review of 4D Printing Materials and Their Properties. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(3), 349-357.
- Singholi, A. K. S., Sharma, A., 2020. Recent Advancement and Research Possibilities in 4D Printing Technology. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 51(10), 1332-1340.
- Skyfeel Apparel, <http://www.paulinevandongen.nl/project/skyfeel-apparel/> Erişim tarihi: 15 Kasım 2020.

- Suriano, R., Bernasconi, R., Magagnin, L., Levi, M., 2019. 4D Printing of Smart Stimuli-Responsive Polymers. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(9), B3274.
- Thakur, S., 2017. Shape Memory Polymers for Smart Textile Applications. B. Kumar, S. Thakur (Edt.), *Textiles for Advanced Applications*, içinde [s. 323-336]. BoD- Books on Demand.
- Tibbits, S., 2014. 4D Printing: Multi-Material Shape Change. *Architectural Design*, 84(1), 116-121.
- Truby, R.L., Lewis, J.A., 2016. Printing Soft Matter in Three Dimensions, *Nature*, 540(7633), 371-378.
- Ula, S. W., Traugott, N. A., Volpe, R. H., Patel, R. R., Yu, K., Yakacki, C. M., 2018. Liquid Crystal Elastomers: An Introduction and Review of Emerging Technologies. *Liquid Crystals Reviews*, 6(1), 78-107.
- Xie, P., Zhang, R., 2005. Liquid Crystal Elastomers, Networks and Gels: Advanced Smart Materials. *Journal of Materials Chemistry*, 15(26), 2529-2550.
- Yalçın, B., Ergene, B., 2017. Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-d Eklemeli İmalat Yöntemi ve Metalurjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65-88.
- Zafar, M. Q., Zhao, H., 2019. 4D Printing: Future Insight in Additive Manufacturing. *Metals and Materials International*, 26(5), 564-585.
- Zarek, M., Layani, M., Eliazar, S., Mansour, N., Cooperstein, I., Shukrun, E., ... & Magdassi, S., 2016. 4D Printing Shape Memory Polymers for Dynamic Jewellery and Fashionwear. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(4), 263-270.
- Zhang, C., Lu, X., Fei, G., Wang, Z., Xia, H., Zhao, Y., 2019. 4D Printing of a Liquid Crystal Elastomer with a Controllable Orientation Gradient. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(47), 44774-44782.
- Zhou, Y., Huang, W. M., Kang, S. F., Wu, X. L., Lu, H. B., Fu, J., Cui, H., 2015. From 3D to 4D Printing: Approaches and Typical Applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(10), 4281-4288.