

Derleme Makale/Review Article

4 boyutlu baskı teknolojisi ve uygulama alanlarının araştırılması

Berkay Ergene¹, Bekir Yalçın²

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 20160, Denizli, Türkiye

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 03204, Afyonkarahisar, Türkiye

Anahtar Kelimeler

4-B baskı
3-B baskı
Eklemeli imalat
Akıllı malzeme

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 10.02.2020

Kabul Tarihi: 07.09.2020

Öz: Hayal gücünü üç boyutlu olarak gerçek bir ürüne dönüştürmeye olanak sağlayan üç boyutlu baskı (3D Printing) teknolojisinin uzay-havacılık sektöründen sağlık sektörüne dek birçok farklı alanda yer almaya başladığı ve kullanımının da giderek arttığı bilinmektedir. Teknolojinin durdurulamaz gelişimi ile birlikte yeni malzemelerin ve imalat yöntemlerinin ortaya çıkması ya da var olanların geliştirilmesinin gerekliliği de kaçınılmaz bir gerçek haline gelmiştir. İçerisinde üç boyutlu (3B) baskı teknolojisini de barındıran dört boyutlu (4B) baskı teknolojisi de bu adımlardan yalnızca birisi olarak karşımıza çıkmakta olup, akıllı malzemeden üç boyutlu olarak basılmış ürünlerin, ısı, su, ışık vb. dış uyarıcılarla uyarılması ile bu ürünlerin zamanla şekil değiştirmesine olanak tanımaktadır. Yapılan bu çalışmada ise 4B baskı teknolojisi ve bileşenleri incelenerek, bu teknolojinin gelişim süreci ve potansiyel uygulama alanları hakkında ülkemiz araştırmacılarına ve mühendislerine bir takım faydalı bilgiler sunulmaya çalışılmıştır.

Atıf için/To Cite:

Ergene, B., Yalçın B. 4 Boyutlu baskı teknolojisi ve uygulama alanları. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 12(3), 108-117, 2020.

Investigation of 4D printing technology and application areas

Keywords

4-D printing
3-D printing
Additive manufacturing
Smart material

Article history:

Received: 10.02.2020

Accepted: 07.09.2020

Abstract: It is known that three-dimensional (3D) printing technology which enables to transform an imagination into 3D real product, has started to take place in many different areas from the space-aviation sector to the health sector and its usage is gradually increasing. With the unstoppable development of technology, the emergence of new materials and manufacturing methods or the necessity of developing existing ones has become an inevitable fact. Four-dimensional (4D) printing technology which also includes 3D printing technology as one of the steps of 4D printing and this 4D printing technology allows the 3D printed products from smart materials to change their shape over time when these 3D printed products are stimulated by external stimulus such as heat, water, light or etc. In this study, 4D printing technology and components have been examined and some useful information has been tried to be presented to our country's researchers and engineers about the development process and potential application areas of this technology.

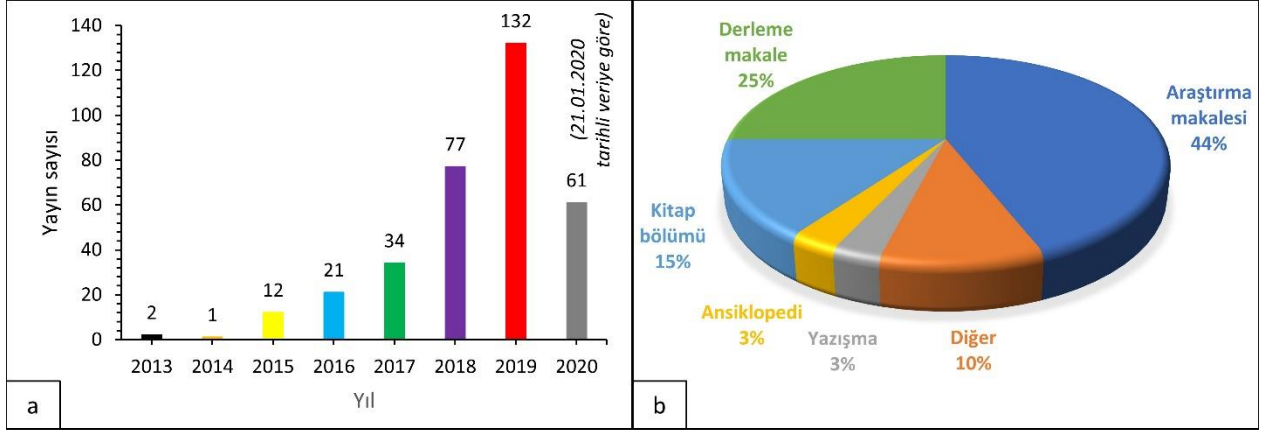
1. Giriş

Dört boyutlu baskı (4D printing) ifadesi ilk kez 2013 yılında bir TED konuşmasında, üç boyutlu imal edilen statik nesnelerin zamanla şekillerini değiştirmelerine olanak sağlayan bir teknoloji olarak tanımlanmış olup [1], 4B baskı ile ilgili ilk araştırma makalesi de aynı yıl içerisinde basılı sac halindeki aktif kompozitin şekil hafıza etkisini kullanarak karmaşık bir şekle dönüşmesi

üzerine yazılmıştır [2]. 4B baskı teriminin tanıtılması ve ilk makale çalışması sonrasında araştırmacılar 3B baskı teknolojisi ve akıllı malzemeleri kullanan 4B baskı teknolojisi üzerine odaklanmışlardır. İlk olarak 4B baskı ifadesi, zaman dördüncü boyut olmak üzere "3B baskı + zaman" olarak tanımlansa da [3],[4], zamanla bu tanım ısı [5], su [6], ışık [7], pH [8] vb dış uyarılara maruz kaldığında özelliklerinde ve şeklinde değişim meydana gelen 3B baskı ürünlerinin imalatı olarak

geliştirilmiştir. 4B baskı teknolojisinin gelecek on yıl içerisinde daha da önem kazanacağı tahmin edilmekte, ilk olarak tanımlandığı 2013 yılından itibaren günümüze dek tüm yıllarda yapılan yayın çalışmaları Sciencedirect bilimsel makale araştırma sayfasından “4D Printing” ifadesi ile taranarak toplam 340 adet akademik çalışma bulunmuş olup, Şekil 1’deki grafikler elde edilmiştir. Şekil 1a’dan da görülebileceği üzere bu

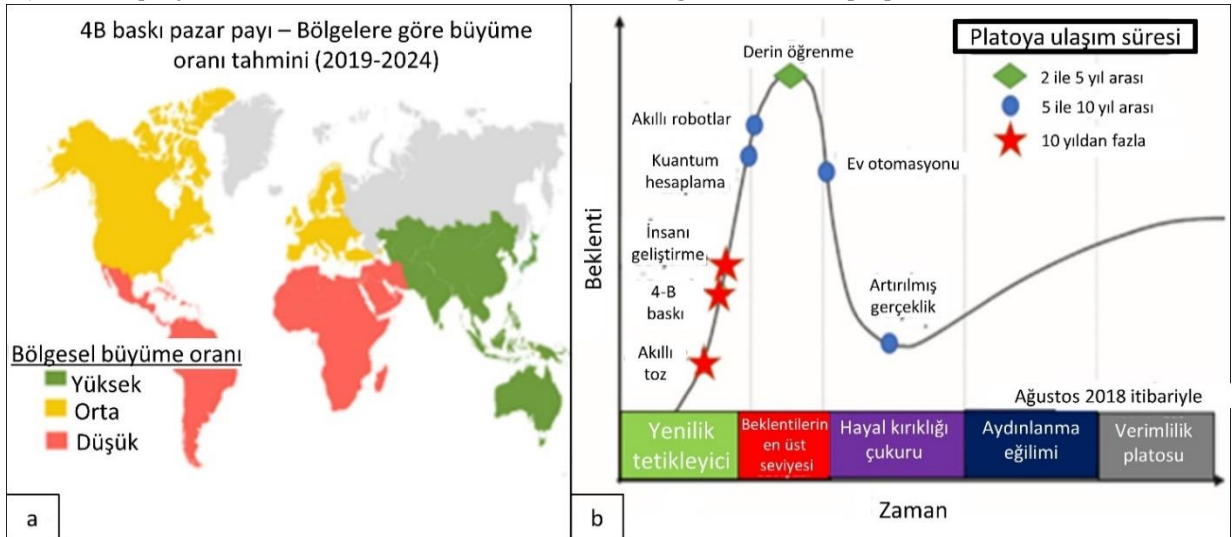
konu ile ilgili yapılan akademik çalışmaların sayısı 2019 yılında 132 adet iken, 22.01.2020 tarihi ile daha şimdiden 61 adete ulaşmıştır. Bu yayınların %44’ünü araştırma makalesi, %25’ini derleme makale, %15’ini kitap bölümü, %3’ünü ansiklopedi, %3’ünü yazışmalar ve %10’luk kısmını ise diğer yayın türleri oluşturmaktadır (Şekil 1b).



Şekil 1. 4B baskı ile ilgili yapılan akademik çalışmalar, a) Yıllara göre yayın sayısı, b) Yüzdesele olarak ne tür yayınların yapıldığı [9]

4B baskı teknolojisinin market payına baktığımızda da 2019 yılında yaklaşık 71 milyon \$ iken 2025 yılında ise yaklaşık 359 milyon \$'a ulaşması beklenmektedir [10]. 4B baskı teknolojisinde en önemli market liderlerinin ABD menşeli olan, 3B baskı ve eklemeli imalat üzerine de faaliyetlerini sürdüren Autodesk, Stratasys, 3D Systems Corporation, Hewlett Packard Enterprise ve ExOne şirketlerinin olduğu göze çarpmaktadır [10]. Şekil 2a'da 4B baskı pazar payının bölgelere göre büyüme oran beklentileri, Şekil 2b'de ise yenilikçi teknolojileri kapsayan Gartner'ın zaman-beklenti

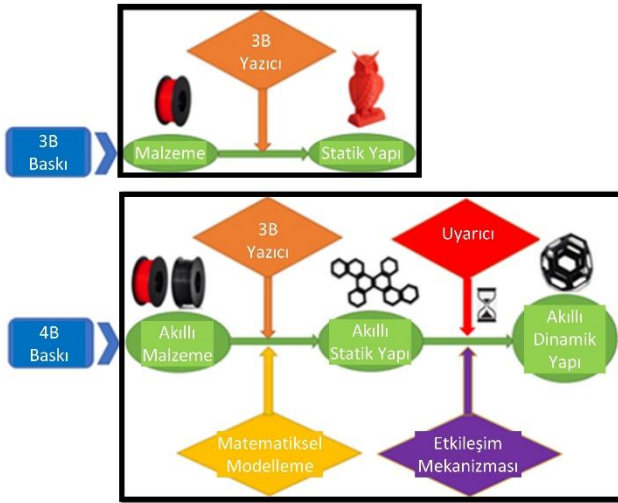
döngüsü verilmiştir. Yenilikçi teknolojilerin zamanla hangi aşamaya ulaşacağını tahmini üzerine oluşturulan bu döngüde akıllı robotlar, derin öğrenme, artırılmış gerçeklik ve 4B baskı teknolojileri gibi son zamanlarda popüler hale gelen teknolojilere yer verilmiştir. Gartner döngüsüne göre bir teknoloji, verimli bir ürünü belirli aşamaları geçtikten sonra sunabilecektir ki bu sürede derin öğrenme için 2 ile 5 yıl arası, artırılmış gerçeklik için 5 ile 10 yıl arası iken, 4B baskı teknolojisi için 10 yıldan fazla olarak öngörülmektedir [11].



Şekil 2.a) 4B baskı pazar payının bölgelere göre büyüme oranının tahmini, b) Gartner döngüsü [11]

2. 3B Baskı ile 4B Baskı Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve 4B Baskı Yönteminin Temel Bileşenleri

3B baskı ile 4B baskı arasındaki temel farklılıklar Şekil 3'te gösterilmiştir [12]. 3B baskı yönteminde 2 boyutlu katmanlar üst üste getirilerek 3B statik bir yapı elde edilirken, 4B baskı yönteminde akıllı malzemeler kullanıldığından dolayı ve dış uyarının etkisinden dolayı zamanla üretilen akıllı statik yapı, akıllı dinamik yapıya dönüşmektedir. Ayrıca, 4B baskı yönteminde akıllı malzemelerin programlanabilir olması da bu yöntemin 3B baskı yönteminden farklı olmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, 4B baskı ürünleri dinamik bir yapıya sahip olduklarından kullanım alanları ve potansiyel uygulamalar açısından statik 3B baskı ürünlerine oranla avantajlara sahiptir [13].



Şekil 3. 3B ve 4B baskı yöntemleri arasındaki temel farklılıklar [12]

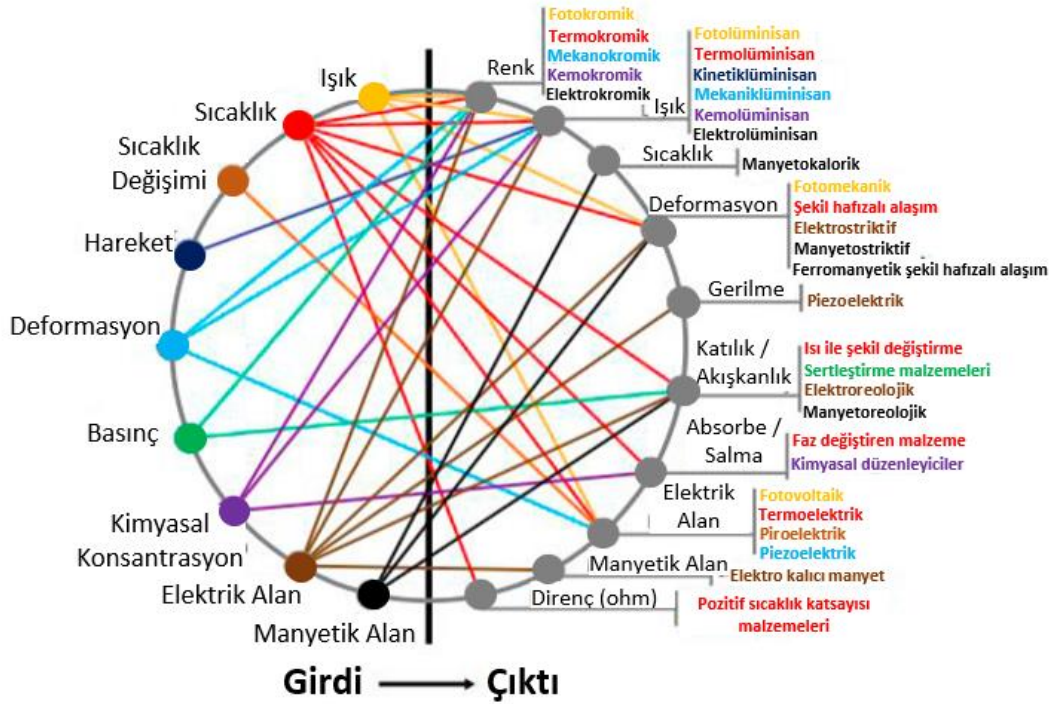
3B baskının aksine dinamik yapılar düzenlenebilir şekilleri, özellikleri ve işlevselliği ile 4B baskı teknolojisi kullanılarak üretilmektedir [4],[6],[14]. Bu tür bir dinamik ürünü basabilmek için, akıllı malzemelerin uygun bir kombinasyonu, yapıdaki çoklu malzemelerin dağılımını tasarlamak için matematiksel bir modelleme, 3B baskı sistemi, dış uyarıcı ve etkileşim mekanizması gereklidir. Şekil 4'te 4B baskı yönteminin temelleri gösterilmiştir [12].



Şekil 4. 4B baskının temelleri [12]

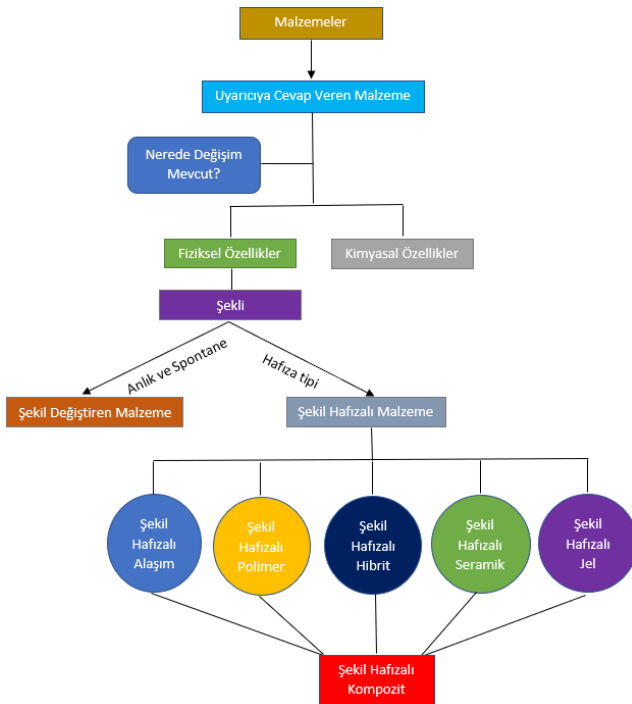
3B Baskı: 4B baskı çoğunlukla birden çok malzeme kombinasyonunun tek bir seferde basımına ihtiyaç duymaktadır. Termal genleşme katsayısı gibi malzeme özelliklerindeki farklılıklardan dolayı yapılarda şekil değişimi meydana gelmektedir. Bu nedenle, 3B baskı 4B baskının bir gereksinimi olarak görülmektedir. Şu an itibarıyla, 4B baskı yöntemi eriyik yazma modelleme [15], stereolitografi [16], lazer destekli biyobaskı [17] ve seçici lazer ergitme [18]. 3B yazıcının seçimi farklı akıllı malzeme türlerine göre dikkatlice yapılmalıdır.

Uyarıcı: 4B basılı yapının şekil / özellik / işlevsellik değişikliklerini tetiklemek için uyarma gereklidir. Araştırmacılar 4B baskıda genellikle su [3],[19], ısı [20], ısı ve ışık kombinasyonu [7] ve ısı ile su kombinasyonunu [21] kullanmışlardır. Spesifik uygulamanın gereksinimine göre, uyarıcı seçilmeli ve ayrıca 4B basılı yapıda kullanılan akıllı malzeme türleri de belirtilmelidir [12]. Addington ve Schodek çalışmalarında [22], akıllı malzemelerin genel olarak dolaysızlık, geçici olma, kendini çalıştırma, doğruluk ve seçicilik gibi 5 karakteristik özelliğe sahip olmasını tavsiye etmektedirler. Akıllı malzemelerin faydalarını ölçmek için, uyarılara ve kullanıcılara yanıt verebilirliklerine bağlı olarak doğru bir sınıflandırma yapılmalıdır. Uyarıcıyı ve yanıtı bağlayan geçiş olaylarının grafiği Şekil 5'te görülmektedir [23]. Açıklayıcı bir örnek vermek gerekirse, hareket girdisi yalnızca ışık çıktısı olarak sonuç verirken, elektrik alan girdisi ise renk, ışık, deformasyon, gerilme ve katılık/akışkanlık olmak üzere 5 farklı çıktı sunabilmektedir. Ayrıca, akıllı malzemelerin bir başka yönü de girdiler ve çıktılar ile etkileşimleridir ve iki yönlü ya da denge şeklinde gerçekleşebilir. Örnek olarak, iki yönlü olarak piezoelektrik akıllı malzemelerin geliştirilmesi verilebilir; deformasyon üreterek bir elektriksel uyarana tepki gösterirler ve elektrik üreterek deformasyona daha fazla tepki verirler [24],[25].



Şekil 5. Uyarıcı ve yanıt ilişkisinin detaylı olarak gösterilmesi [23]

Akıllı ya da uyarıcıya cevap veren malzemeler: Akıllı malzemeler ya da uyarıcıya cevap veren malzemeler 4B baskı işleminin en önemli bileşenlerinden birisi olup bu malzemeler Şekil 6'da görüldüğü üzere belirli alt başlıklara ayrılmıştır [26].

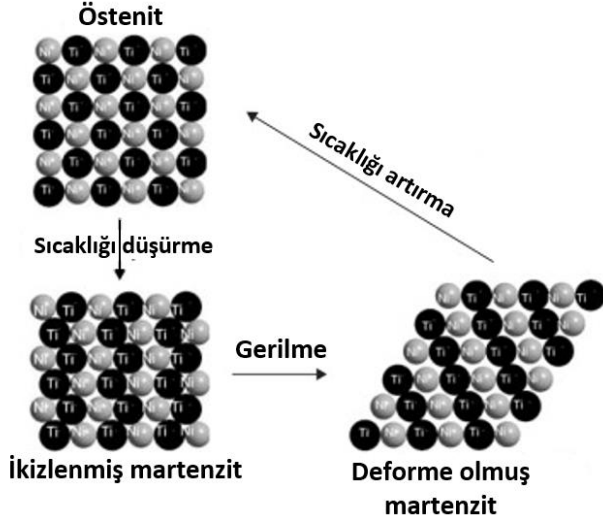


Şekil 6. Uyarıcıya cevap veren malzemelerin sınıflandırılması [26]

Ayrıca, bu malzemeler şekil değişimi gibi fiziksel özelliklerinin değişimine göre Şekil Değiştiren Malzemeler (ŞDM) ve Şekil Hafızalı Malzemeler (ŞHM) olarak iki sınıfa ayrılmaktadırlar. ŞDM'ler uygun bir uyarıcıyı kullanarak yapılarını aniden değiştirmektedirler. Açıklayıcı bir örnek olarak, piezoelektrik polimerler, bir elektrik alanının geri dönüşümlü olarak uygulanması üzerine şekillerini değiştirebilir [27] veya sıvı kristaller, moleküllerin belirli bir yön boyunca paralel düzenlenmesi sonucunda şekillerini değiştirebilir [28]. Ayrıca, ŞHM'ler uygun bir uyarıcı ile uyarıldığında ilk haline dönebilen ya da denge durumunda kalmayan malzeme grubu olarak bilinmektedir [29]. Ek olarak, ŞHM'ler şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), şekil hafızalı polimerler (ŞHP), şekil hafızalı seramikler (ŞHS), şekil hafızalı jeller (ŞHJ) ve şekil hafızalı hibritler (ŞHH) olmak üzere 5 grupta değerlendirilebilir [26].

ŞHA: Bu malzemeler martenzitik geçişe dayanan şekil hafızası etkisi sergilemektedir. Burada martenzitik fazı, sistemin daha yüksek bir sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklığa soğutulmasıyla elde edilmektedir. Yüksek sıcaklık fazı kübik simetriyi gösteren östenit olarak adlandırılırken, düşük sıcaklık fazı martenzittir. Martenzitik fazı %8'e kadar deforme olabilir ve deformasyon sadece östenit fazını elde etmek için malzeme ısıtılarak geri kazanılabilir ve yük ve sıcaklığın, nikel-titanyum alaşımlarındaki şekil hafızası etkisi üzerindeki etkisi Şekil 7'de gösterilmiştir [30]. En çok

kullanılan şekil hafızalı alaşımlar nikel-titanyum alaşımı, bakır-çinko-alüminyum ve bakır-alüminyum-nikel alaşımları olarak sınıflandırılabilir [31] ve iyi biyoyumluluklarından dolayı biyomedikal uygulamalar için son derece tercih edilirler [32],[33].



Şekil 7. ŞHA olan Ni-Ti alaşımında şekil hafızası etkisi [30]

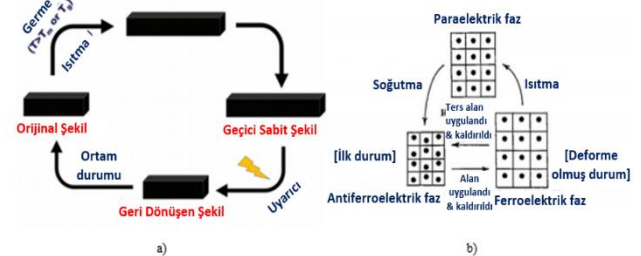
ŞHP: Şekil hafızası etkisi sergileyen polimerler ŞHP olarak adlandırılır ve mekanizmaları ŞHA'dan tamamen farklıdır. ŞHP'ler büyük ölçüde şekil hafıza etkisi için cam geçiş sıcaklığına (T_g) bağlıdır ve T_g sıcaklığının altında moleküller çok az göreceli hareket kabiliyetine sahip olup camı bir durumdadırlar. T_g genellikle amorf fazlara uygulanabilir ve T_g 'nin üzerinde ikincil olarak, polimer zincirleri arasındaki bağlar termal harekete kıyasla zayıf hale gelir ve polimer kauçuklaşır [34] ve ŞHP'lerin şekil hafıza davranışının şematik gösterimi Şekil 8a'da verilmiştir. Ayrıca ŞHP'ler genellikle biyomedikal ve tekstil endüstrilerinde kullanılmaktadırlar [35],[36].

Ek olarak, Tablo 1'de ŞHP ve ŞHA'lar özellikleri bakımından kıyaslanmış olup, ŞHP'ler ŞHA'lara göre farklı bir mekanizmaya sahip olmalarının yanı sıra daha hafif olma, daha basit yöntemlerle özelliklerinin değiştirilmesi, daha yüksek geri dönüşüm deplasman değeri göstermeleri, daha çok uyarıcı tarafından tetiklenebilmeleri ve maliyetlerinin düşük olmasından dolayı çok daha avantajlıdırlar ve bu özellikler ŞHP'leri 4B baskı için en iyi akıllı malzeme yapmaktadır [37-41].

Tablo 1. ŞHP ile ŞHA'ların kıyaslanması [42]

Özellik	ŞHP	ŞHA
Yoğunluk (g/cm^3)	0.9-1.2	6-8
Deformasyon derecesi	%800'e kadar	%8'den az
Deformasyon için gerekli gerilme (MPa)	1-3	50-200
Geri dönüşüm sırasında ortaya çıkan gerilme (MPa)	1-3	150-300
Geçiş sıcaklığı ($^{\circ}C$)	-10 ile 100 arası	-10 ile 100 arası
Geri dönüşüm hızı	1 saniye ile 1 dakika arası	1 saniyeden az
Uygulama koşulu	200 $^{\circ}C$ 'den düşük, düşük basınç	1000 $^{\circ}C$ 'den yüksek, yüksek basınç
Maliyet	1 kg için yaklaşık 100 TL	1 kg için yaklaşık 2500 TL

ŞHS: Alaşımlara benzer bir etki, belirli bir faz geçişine, yani bir "ferro elastik" faz geçişine sahip seramiklerde görülmektedir. Yapılan bir çalışmada ise, bir CeO_2 -stabilize tetragonal zirkonya (ZrO_2) polikristalinde şekil hafızası etkisini ve süper esnekliği incelemişlerdir. Tek eksenli basma durumunda, Ce katkılı zirkonyumda stresle indüklenen tetragonal-monoklinik geçiş nedeniyle numune plastik deforme olmaktadır [43]. Ayrıca, Şekil 8b'de, antiferroelektrik seramikler için şekil hafızası etkisi gösterilmiştir.



Şekil 8. a) ŞHP'lerde şekil hafıza etkisi b) ŞHS'lerde şekil hafıza etkisi [34]

ŞHJ: Son yıllarda araştırmacılar şekil hafızalı jelle (ŞHJ) odaklandılar ve akıllı bir malzeme olarak gelecekteki talebi karşılayabilecek en umut verici yeni malzemelerden biri olarak görmektedirler [44],[45]. ŞHJ'ler jelleşme işlemi sırasında orijinal şekillerini hatırlayabilmektedir ve bu duruma da şekil geri dönüşüm özelliği denmektedir. ŞHJ'ler faz durumunu değiştirdiği kritik sıcaklığın üzerine ısıtıldığında elastik ve yumuşak olmaktadır [46]. Deformasyondan sonra, jel kritik sıcaklığın üzerinde ısıtıldığında orijinal haline dönebilmektedir. Bu jeller biyoyumlu ve geri dönüştürülebilir olduğundan kırık bir kemiğe bandaj [47], optik lens yapımında [48] ya da akıllı bir buton yapımında [49] kullanılması uygundur.

ŞHH: Şekil hafızalı hibritler (ŞHH) mühendislik uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla geliştirilmişlerdir [38]. Bir ŞHH malzeme biri elastik bileşen ve diğeri ise geçiş bileşeni olmak üzere genellikle en az iki bileşen ihtiva etmektedir. Bu kombinasyonda, elastik bileşen daima aşırı elastiktir ve programlamadan sonraki elastik enerjiyi depolamaktadır, geçiş bileşeni ise geçiş sıcaklığının üzerine ısıtılana dek yumuşamaya devam eder ve sertleştirme için soğutulduktan sonra deforme olmuş şeklini büyük ölçüde korumaktadır. Geçiş bileşeni tekrar yumuşatılmak için ısıtılmasıyla, elastik bileşende depolanan elastik enerji boşa çıkar ve bu da hibritin şekil değişimi için itici bir kuvvet sağlamaktadır [50].

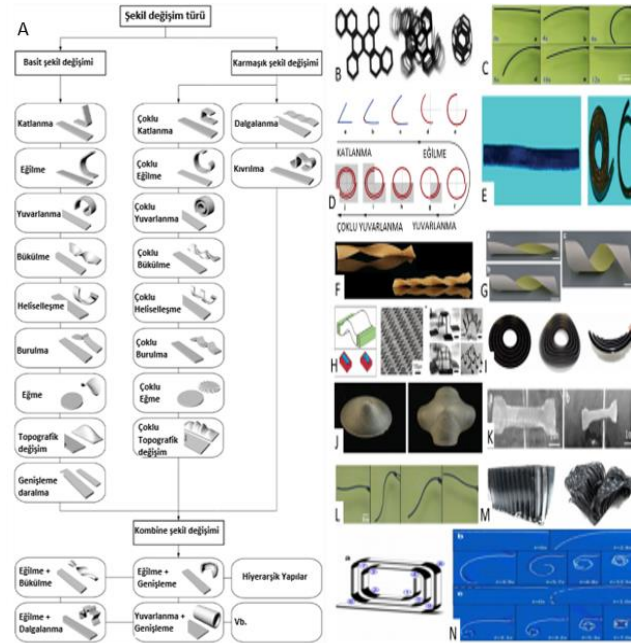
Etkileşim Mekanizması: Bazı durumlarda, akıllı malzemeye doğru sıralamada ya da uygun zaman süresince dış uyarıcılarının etkimesi sebebiyle 4B baskı ile imal edilmiş bir ürün arzu edilen şekilde olamayabilir. Örneğin, ana etkileşim mekanizmalarından biri kısıtlı termo-mekanik olabilir. Bu mekanizmada akıllı malzeme şekil hafızası etkisine sahiptir ve ısı uyarıcı olarak kullanılır. Ayrıca, bu mekanizma yüksek sıcaklıkta dış bir yük vasıtası ile deformasyon oluşumu, dış yük sabitken sıcaklığın düşürülmesi, düşük sıcaklıkta yüklemenin kaldırılması ve istenilen şeklin elde edilmesi olarak 4 adım içermektedir. Bu yapının tekrar ısıtılması ile ilk haline dönmesi de sağlanabilmektedir [29].

Matematiksel Modelleme: 4B baskıda matematik modelleme yapı içerisindeki malzeme dağılımını, uyarıcının türünü belirlemek ve doğru özellik ve nihai boyutlardaki ürünü elde etmek amacıyla gereklidir. Bu durum, uyarıcı ile malzeme özellikleri arasında bir bağlantı kurmayı da sağlamaktadır [29]. Ayrıca, Manen vd. de [51] belirli bir zaman içerisinde, basit şekillerinden şekil değişikliği ile karmaşık şekilleri elde etmek için basit şekillerin belirli bir deformasyon sırasını izleyecek şekilde programlanabileceğini vurgulamıştır.

2.1. 4B Baskı Yöntemi ile İmal Edilen Dinamik Parçaların Şekil Değişimleri

4B baskı yöntemiyle imal edilen dinamik parçaların şekil değişimleri; basit şekil değişimi, karmaşık şekil değişimi ve kombine şekil değişimi olmak üzere üç alt sınıfta değerlendirilebilmektedir (Şekil 9a) [52]. Basit şekil değişimi tek bir deformasyon basamağından oluşmakta ve bu tür şekil değişimleri katlanma (Şekil 9b), eğilme (Şekil 9c), yuvarlanma (Şekil 9e), bükülme (Şekil 9f), heliselleşme (Şekil 9g), burulma (Şekil 9h), eğme (Şekil 9i), topografik değişim (Şekil 9j), genişleme ve daralmadır (Şekil 9k).

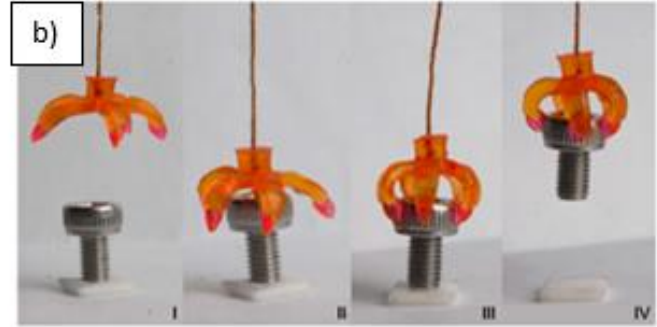
Karmaşık şekil değişimi, yukarıda ifade edilen basit bir şekil değişikliği ile elde edilen formun genişletilmesinden yani birden fazla basamağın bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Karmaşık şekil değişimleri ise, çoklu katlanma (Şekil 9n), çoklu eğilme, çoklu yuvarlanma, çoklu bükülme, çoklu heliselleşme, çoklu burulma, çoklu eğme, çoklu topografik değişim ya da dalgalanma (Şekil 9l) ve kıvrılma (Şekil 9m) olarak sayılabilir. Son alt sınıf olarak nitelendirilen kombine şekil değişimleri ise iki veya daha fazla bileşen davranışının bileşende eşzamanlı olarak veya dikkatle zamanlanmış bir sırada meydana gelecek şekilde programlanabildiği farklı şekil değiştirme davranışlarının bir araya getirilmesi ile meydana gelmektedir [52]. Şekil 9d de ise katlanma, eğilme ve yuvarlanma arasındaki farklılık gösterilmiştir.



Şekil 9. a) Şekil değişim türleri [52], b) katlanma davranışına dair örnek [53], c) eğilme davranışına dair örnek [54], d) katlanma, eğilme ve yuvarlanmanın farkına dair örnek [52], e) yuvarlanma davranışına dair örnek [2], f) bükülme davranışına dair örnek [55], g) heliselleşme davranışına dair örnek [20], h) burulma davranışına dair örnek [51], i) eğme davranışına dair örnek [53], j) topografik değişime dair örnek [56], k) genişleme ve daralmaya dair örnek [57], l) dalgalanmaya dair örnek [54], m) kıvrılmaya dair örnek [14], n) çoklu katlanmaya dair örnek [58].

Ge vd., [59] yaptıkları çalışmada, akıllı tutucu üretmek amacıyla 4B baskı tekniğini kullanmışlardır. Projeksiyon mikrostereolitografisine dayanan eklemeli imalat yöntemiyle foto-kürlenebilir metakrilat

kopolimer reçinesini kullanarak şekil hafızalı yapıyı elde etmişlerdir. Üretilmiş olan bu yapı Şekil 10'da gösterildiği üzere ısı ile aktif hale getirilip, ilaç salınım sistemlerinde mikro tutucu olarak kullanılabilir.



Şekil 10. a) Üretildiği halden geçici şekle, şekil değişim karakterizasyonu, b) Cıvayı kaldırmak için kademeli olarak etkinleştirilen akıllı tutucu [59]

Başka bir çalışmada ise, Leist vd., [60] naylon kumaş üzerine termal olarak duyarlı bir malzeme olan PLA'yı basarak, ısı etkisine maruz kaldığında şeklini değiştiren kumaş elde etmişlerdir (Şekil 11).



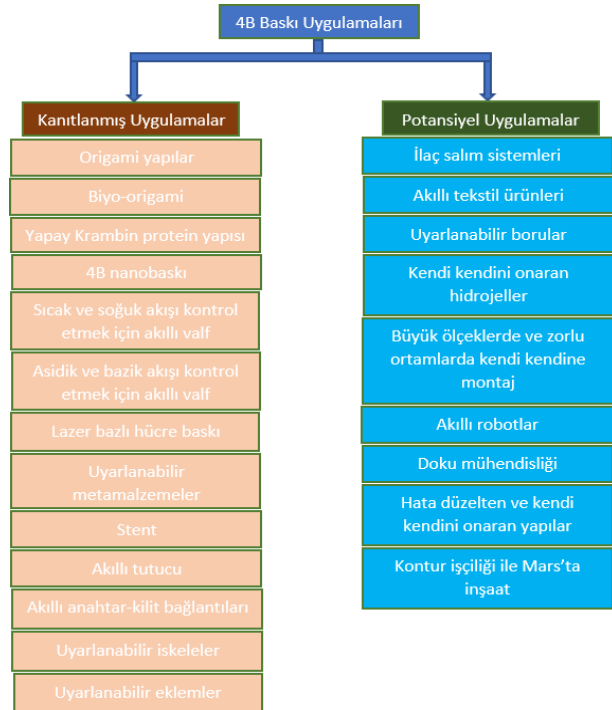
Şekil 11. Akıllı tekstil ürünlerinde 4B baskının kullanımı [60]

3. 4B Baskı Uygulamaları ve 4B Baskının Geleceği

4B baskı, ilk tanımından bu yana dek origami, mimari, metamateryal, akıllı ambalaj / cihazlar ve biyomedikal mühendisliğinde yüksek potansiyele sahip uygulamalara sahip olmuştur. Özellikle, vücut ısısının artıp azalmasıyla genişleyen ya da daralan akıllı stentlerin yapımında [61], organ yapımında [62],[63], implantlarda [64] ve akıllı medikal cihazların imalatı [65] gibi medikal uygulamalarda bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Şekil 12'de 4B baskı uygulamaları kanıtlanmış uygulamalar ve potansiyel uygulamalar olarak iki sınıfa ayrılmıştır [12].

4B baskının potansiyel uygulamalarına bakıldığında, Mars'ta kontur işçiliği ile inşaattan, akıllı robotlara dek birçok farklı alanda uygulamalar göze çarpmaktadır. Ayrıca, Zhang vd. [66] 4B baskı yöntemi ile biyoyumlu ve biyoayrışabilir polilaktik asit (PLA) ve PLA/Fe₃O₄ kompozit filamentleri üretmişler ve filamentlerin

manyetik alan ile uyarılması durumundaki şekil hafıza davranışlarını incelemiştir.



Şekil 12. 4B baskı uygulamaları [12]

Zhao vd. ise [67], SLA yöntemini kullanarak 4B baskı ile şekil hafızalı poliüretan imal etmiş ve bu malzemenin mükemmel şekil hafıza performansı, iyi mekanik özellikleri ve en önemlisi de yüksek baskı doğruluğu ve yeteneğine sahip olması ve tüm bunların kombinasyonlarının sunduğu avantajlarla birçok önemli alandaki uygulamalarda önemli bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamıştır. Gerçekleştirilen tüm bu çalışmalar, 4B baskı işleminin emekleme döneminden

öteye geçmesine ve gelecekte hangi alanlarda nasıl kullanılabilceği üzerine bilim insanlarına yol göstermekte ve çalışmaya sevk etmektedir. Henüz emekleme döneminde olmasına rağmen, daha şimdiden NASA tamamen entegre bir laboratuvar kurarak burada metalleri de içerisinde barındıran çoklu malzemelerin geri dönüştürülerek 3B ve 4B baskıda tekrar kullanılmasının araştırılmasını hedeflemektedir [68]. Ayrıca, ABD ordusu da 4B baskı işlemiyle kendinden montajını gerçekleştirebilen silah ve araçların yanı sıra, ortam koşullarına göre renk değiştiren kamuflajların üretiminin geliştirilmesi amacıyla 3 üniversiteye 855,000\$ hibe etmiştir [69].

4. Sonuçlar

Gelişen teknoloji ile birlikte eklemeli imalat yöntemlerini ve akıllı malzemeleri bir potada eriterek statik cisimlere dinamik olabilme özelliği kazandıran 4B baskı teknolojisi son derece önemli hale gelmiştir. Gelecekte de önemini artırarak devam etmesi beklenen bu teknoloji ile ilgili yapılan bu çalışma sonucunda 4B baskı yöntemleri, kullanılabilen malzemeler, uyarıcı çeşitleri ve uyarıcıların hangi mekanizmalar ile akıllı malzemeleri etkilediği detaylı olarak anlatılmıştır. Yenilikçi ürünlerin, verimli bir ürün haline gelme süresini tahmin eden Gartner döngüsüne göre de 4B baskı teknolojisinin 10 yıl sonra verimli bir teknoloji haline gelmesi beklenmektedir.

5. Kaynaklar

- [1] Tibbits, S. 2019. The emergence of “4D printing”, https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing (Erişim tarihi: 18.08.2019).
- [2] Ge Q, Qi HJ, Dunn ML. Active Materials by Four-Dimension Printing. *Appl. Phys. Lett.*, 103, 131901, 2013.
- [3] Raviv D, Zhao W, McKnelly C, Papadopoulou A, Kadambi A, Shi B, Hirsch S, Dikovsky D, Zyracki M, Olguin C. Active Printed Materials for Complex Self-Evolving Deformations. *Sci. Rep.* 4, 7422, 1-8, 2014.
- [4] Pei, E. 4D Printing: dawn of an emerging technology cycle. *Assem. Autom.* 34(4), 310-314, 2014.
- [5] Ding Z, Yuan C, Peng X, Wang T, Qi HJ, Dunn ML. Direct 4D printing via active composite materials. *Sci. Adv.* 3(4), 1-6, 2017.
- [6] Gladman AS, Matsumoto EA, Nuzzo RG, Mahadevan L, Lewis JA. Biomimetic 4D printing. *Nat. Mater.* 15(4), 413-418, 2016.
- [7] Kuksenok O, Balazs AC. Stimuli-responsive behavior of composites integrating thermo-responsive gels with photo-responsive fibers. *Mater. Horiz.* 3, 53-62, 2016.
- [8] Nadgorny M, Xiao Z, Chen C, Connal LA. ACS Appl. Mater. Interfaces. 8(42):28946-28954, 2016.
- [9] Sciencedirect. 2020. <https://www.sciencedirect.com/search/advanced?q=%224D%20printing%22> (Erişim tarihi: 22.01.2020).
- [10] Mordorintelligence, 2020. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/4d-printing-market> (Erişim tarihi: 10.01.2020).
- [11] Walker MJ. Hype Cycle for Emerging Technologies, Gartner, Stamford, CT, 2018.
- [12] Momeni F, Seyed MMHN, Liu X, Ni J. A review of 4D printing. *Materials and Design*, 122, 42-79, 2017.
- [13] Javaid M, Haleem M. 4D printing applications in medical field: A brief review. *Clinical Epidemiology and Global Health*, Article in Press., 2019.
- [14] Tibbits S, McKnelly C, Olguin C, Dikovsky D, Hirsch S. 4D Printing and universal transformation, *Materials Agency*. 539-548, 2014.
- [15] Wang G, Wang CN, Zhang YC, Liu TT, Lv JP, Shen X, Guo MR. Demonstrating printed paper actuator, in Ext. Abstr. 2018 CHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - CHI '18. 1-4, 2018.
- [16] Miao S, Cui H, Nowicki M, Xia L, Zhou X, Lee SJ, Zhu W, Sarkar K, Zhang Z, Zhang LG. Stereolithographic 4D bioprinting of multiresponsive architectures for neural engineering, *Adv. Biosyst.* 2(9), 1-19, 2018.
- [17] Koch L, Deiwick A, Chichkov B. *Laser-Based Cell Printing*. 3D Printing and Biofabrication, Cham: Springer International Publishing. 303-329, 2018.
- [18] Dadbakhsh, S., Speirs, M., Kruth, J.P., Schrooten, J., Luyten J, Humbeeck JV. Effect of SLM parameters on transformation temperatures of shape memory nickel titanium parts. *Adv. Eng. Mater.* 16 (9), 1140-1146, 2014.
- [19] Jamal M, Kadam SS, Xiao R, Jivan F, Onn TM, Fernandes TD, Nguyen Gracias DH. Bio-origami hydrogel scaffolds composed of photo crosslinked PEG bilayers. *Adv. Healthc. Mater.* 2, 1142-1150, 2013.
- [20] Zhang, Q, Zhang K, Hu G. Smart three-dimensional lightweight structure triggered from a thin composite sheet via 3D printing technique. *Sci. Rep.* 6, 1-8, 2016.
- [21] Bakarich SE, Gorkin R, Spinks GM. 4D printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels. *Macromol. Rapid Commun.* 36, 1211-1217, 2015.
- [22] Addington M, Schodek D. *Smart Materials and Technologies for the Architecture and Design Professions*. UK, London: Taylor & Francis Group, 2016.
- [23] Lee AY, An J, Chua CK. Two-Way 4D Printing: A Review on the Reversibility of 3D-Printed Shape Memory Materials. *Engineering*, 3(5):663-674, 2017.
- [24] David EH, Wang KW, Smith EC. Dual-stack Piezoelectric Device with Bidirectional Actuation

- and Improved Performance. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15(7), 565-574, 2004.
- [25] Wang, G. Research on the Dynamic Model of the Bi-directional Smart Active Structure with two Piezoelectric Stacks. *International Conference on Control and Automation*, Seoul, South Korea, 2984-2989, 2007.
- [26] Sun I, Hoang WM, Ding Z, Zhao Y, Wang CC, Purnawali H. Stimulus-responsive shape memory materials: a review. *Mater Design*, 33; 577-640, 2012.
- [27] Aschwanden M, Stemmer A. Polymeric, electrically tunable diffraction grating based on artificial muscles, *Opt Lett.*, 31; 2610-2612, 2006.
- [28] Naciri J, Jeon H, Keller P, Ratna B. Nematic elastomer fiber with mechanical properties of a muscle (Patent), 2004.
- [29] Carmen M, Henriquez G, Mauricio A, Vallejos S, Hernandez JR. Polymers for additive manufacturing and 4D-Printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. *Polymer Science* (In Press), 2019.
- [30] John DW. *Dielectric elastomers as high-performance electroactive polymers*, Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers, 2008.
- [31] Mouritz AP. Titanium alloys for aerospace structures and engines. *Introduction to Aerospace Materials*, 202-223, 2012.
- [32] Chandrasekaran M. *Forging of metals and alloys for biomedical applications*. Metals for Biomedical Devices, 2010.
- [33] Sumita M, Yoneyama T. *Bioengineering*. Comprehensive Structural Integrity, 2003.
- [34] Gopi M, Kumar PR, Sravanth P, Aravind S. 2019. Shape memory polymers. <http://www.dstuns.iitm.ac.in/teaching-and-presentations/teaching/undergraduate%20courses/vy305-molecular-architecture-and-evolution-of-functions/presentations/presentations-2007/seminar-1/P9.pdf> (Erişim tarihi: 11.12.2019),
- [35] Thakur S. *Shape Memory Polymers for Smart Textile Applications*, Chapter 12. Textiles for Advanced Applications, 323-337, 2017.
- [36] Sokolowski W, Metcalfe A, Hayashi S, Yahia LH, Raymond J. Medical applications of shape memory polymers. *Biomed. Mater.* 2, 23-27, 2007.
- [37] Erkeçoğlu S, Sezer AD, Bucak S. Smart delivery systems with shape memory and self-folding polymers. In: *Sezer AD (ed) Smart drug delivery system*.://doi.org/10.5772/62199, 2016.
- [38] Huang WM, Ding Z, Wang CC, Wei J, Zhao Y, Purnawali H. Shape memory materials, *Mater Today*, 13; 54-61, 2010.
- [39] Xie T, Rousseau IA. Facile tailoring of the thermal transition temperatures of epoxy shape memory polymers. *Polymer*, 50; 1852-1856, 2009.
- [40] Yang B, Huang WM, Li C, Li I. Effects of moisture on the thermomechanical properties of a polyurethane shape memory polymer. *Polymer*, 47, 1348-1356, 2006.
- [41] Lenh J, Lu H, Liu Y, Huang WM. Du S. Shape-memory polymers – a class of novel smart materials. *MRS Bull*, 34, 848-855, 2009.
- [42] Liu C, Qin H, Mather PT. Review of progress in shapememory polymers. *J Mater Chem* 16:1543-1558, 2007.
- [43] Uchino K. Antiferroelectric shape memory ceramics. *Actuators*, 5(11), 1-23, 2016.
- [44] Kabir MH, Watanabe Y, Gong J, Furukawa H. The Applications of Shape Memory Gel as a Smart Material. *Proc. of SPIE*, 1, 1-4, 2014.
- [45] Osada Y, Matsuda A. Shape memory in hydrogels. *Nature*, 376, 219, 1995.
- [46] Kabir MH, Gong J, Watanabe Y, Makino M, Furukawa H. *Mater. Lett*, 108, 239-242, 2013.
- [47] Amano Y, Hidema R, Gong J, Furukawa H. Creation of Shape-memory Gels with Inter-crosslinking Network Structure. *Chemistry Letters*, 41(10), 1029-1031, 2012.
- [48] Yokoo T, Hidema R, Furukawa. *Surf. Sci. Nanotech.*, 10, 243-247, 2012.
- [49] Harada S, Hidema R, Gong J, Furukawa H. Intelligent Button Developed Using Smart Soft and Wet Materials. *Chemistry Letters*, 41(10), 1047-1049, 2012.
- [50] Huang W, Zhao Y, Wang CC, Purnawali ZDH, Tang C, Zhang JL. Thermo/chemo-responsive shape memory effect in polymers: A sketch of working mechanisms, fundamentals and optimization. *J. Polym. Res.* 19, 1-34, 2012.
- [51] Manen T, Janbaz S, Zadpoor A. Programming the shapeshifting of fat soft matter. *Mater Today* 21(2):144-163, 2018.
- [52] Nam S, Pei E. A taxonomy of shape-changing behavior for 4D printed parts using shape-memory polymers, *Progress in Additive Manufacturing*, 4:167-184, 2019.
- [53] Tibbits S. 4D printing: multi-material shape change. *Archit Des* 84(1):116-121, 2014.
- [54] Wu J, Yuan C, Ding Z, Isakov M, Mao Y, Wang T, Dunn M, Qi H. Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape-memory polymers. *Sci. Rep* 6:24224, 2016.
- [55] Wang W, Yao L, Zhang T, Cheng C, Levine D, Ishii H. Transformative appetite: shape-changing food transforms from 2D to 3D by water interaction through cooking. In: ACM 978-1-4503-4655-9/417/05, 2017.
- [56] Hu G, Damanpack A, Bodaghi M, Liao W. Increasing dimension of structures by 4D printing shape-memory polymers via fused deposition modeling. *Smart Mater* 26, 1-11, 2017.

- [57] Bakarich S, Gorkin R, Panhuis M, Spinks G. 3D/4D printing hydrogel composites: a pathway to functional devices. *MRS Adv* 1(8):521–526, 2015.
- [58] Mark, C. (2014). “4D” printing: the next level of additive manufacturing. <http://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-processing/4d-printing-next-level-additive-manufacturing>. (Erişim tarihi: 25.01.2020).
- [59] Ge Q, AH, Sakhaei H. Lee CK, Dunn NX. Fang ML, Dunn. Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers, *Sci. Rep.* 6, 31110, 2016.
- [60] Leist SK, Gao D, Chiou R, Zhou J. Investigating the shape memory properties of 4D printed polylactic acid (PLA) and the concept of 4D printing onto nylon fabrics for the creation of smart textiles, *Virtual Phys. Prototyp.* 12, 290–300, 2017.
- [61] Zarek M, Mansour N, Shapira S, Cohn D. 4D printing of shape memory - based personalized endoluminal medical devices. *Macromol Rapid Commun.*, 38(2), 1-6, 2016.
- [62] Miao S, Castro N, Nowicki M, et al. 4D printing of polymeric materials for tissue and organ regeneration. *Mater Today.*, 20(10), 577–591, 2017.
- [63] Saunders S. 2017. 4D printing technique could Be used to develop 3D printed human organs for transplant patients. <https://3dprint.com/196141/4d-printing-humanorgans/>. (Erişim tarihi: 12.08.2019).
- [64] Akbari S, Sakhaeim AH, Kowsari K., et al. Enhanced multi-material 4D printing with active hinges. *Smart Mater Struct.*, 27(6), 1–23, 2018.
- [65] Castro NJ, Meinert C, Levett P, Hutmacher DW. Current developments in multifunctional smart materials for 3D/4D bioprinting. *Current Opinion in Biomedical Engineering.*, 2, 67–75, 2017.
- [66] Zhang F, Wang L, Zheng Z, Liu Y. Magnetic programming of 4D printed shape memory composite structures. *Composites Part A* 125, 1-7, 2019.
- [67] Zhao T, Yu R, Li X, Cheng B, Zhang Y, Yang X, Zhao X, Zhao Y, Huang W. 4D printing of shape memory polyurethane via stereolithography. *European Polymer Journal* 101, 120-126, 2018.
- [68] NASA, Refabricator 2019. https://www.nasa.gov/mission_pages/centers/marsall/images/refabricator.html (Erişim tarihi: 14.09.2019).
- [69] 4D Printing, 2019. 4D Printing May Bolster Arsenal of US Army, <https://www.livescience.com/40888-army-4d-printing-grant.html> (Erişim tarihi: 15.09.2019)