



BİYOMEDİKAL UYGULAMALARDA 4B BASKI İŞLEMİ: ŞEKİL HAFIZALI MALZEMELERİN KATMANLI İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ

Hakan Burçin ERDOĞUŞ^{a*}

a, İzmir Kavram Meslek Yüksekokulu / Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, İzmir/ Türkiye

* Sorumlu Yazar: hakan.erdogus@kavram.edu.tr

ÖZET

Katmanlı üretim veya bir diğer ifadeyle 3B baskı, hızlı prototipleme teknolojisinin gelişmesiyle son yirmi yılda her sektör için yaygın kullanım alanına sahip olmuştur. Bu teknoloji, özellikle uzay ve havacılık olmak üzere malzeme ve tasarım konularının etkin olarak kullanıldığı ve geliştirildiği sektörlerde ciddi katkı sağlamıştır. Katmanlı üretim teknolojisi sağlık alanına; kişiye özel implant yapımı, cerrahi müdahale öncesi anatomik model çalışmaları ve doku mühendisliği gibi konularda önemli ölçüde fayda getirmiştir. Teknolojik gelişmeler çerçevesinde, 3B baskıya uygun olarak tercih edilen ve şekil hafızası içeren bir malzemenin; biçim, özellik veya işlevinin zamanla değişebilecek duruma gelmesiyle 4B baskı teknolojisi elde edilmiştir. Zamana bağlı olan, 3B baskı makinesinden bağımsız, son şeklin tahmin edilebilmesi ve kendiliğinden montajlanabilir ürünlerin tasarlanabilir olması 4B baskının en önemli özelliğidir. 3B baskının sunmuş olduğu karmaşık tasarımları üretebilme yeteneği ve şekil değiştiren veya şekil hafızalı malzemelerin doku veya organla uyum sağlaması ve istenilen şekli alması, hayati bazı problemlerin çözümü açısından biyomedikal alanda gelecek yüzyılın en önemli gelişmelerinden biri olması beklenmektedir. Bu çalışmada, 4B baskı teknolojisinin kullanım alanlarını anlamak için öncelikle temel özellikler incelenmiştir. Bununla birlikte, şekil hafızalı malzemeler konusuna değinilerek, kullanım yerleri açıklanmıştır ve biyomedikal alanda bu konuyla ilgili güncel uygulamalar belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şekil hafızalı malzemeler, Şekil hafızası etkisi, 4B baskı, Katmanlı üretim Biyomedikal uygulamalar.

4D PRINTING FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS: ADDITIVE MANUFACTURING OF SHAPE MEMORY MATERIALS

ABSTRACT

Additive manufacturing or other words 3D printing has been widely used for every sector over the last two decades with development of rapid prototyping technology. In particular, it has contributed significantly to the sectors where material and design issues, especially space and aviation, are used and developed effectively. Additive manufacturing technology to the health field; It has benefited considerably in terms of personal implantation, anatomic model studies and tissue engineering before surgery. Within the framework of technological developments, a material which is preferred in accordance with 3D printing and includes shape memory; 4B printing technology has been obtained with the change of form, feature or function. The most important feature of the 4D printing processes includes the time-dependence, independence of 3D printing machine, the final shape produced and the design of self-assembly products. The ability to produce complex designs presented by 3D printing and the adaptation of shape-shifting or shape-memory materials to the tissue or organ over time and taking the desired shape will be one of the most important developments in the biomedical field in the next century. In this study, the basis of 4B printing technology is investigated and firstly the properties of

this technology are examined for understanding of using areas. However, the usage areas of the shape memory materials are explained and these materials have been introduced which is used current applications in the biomedical field.

Keywords: Shape memory materials, Shape memory effect, 4D Printing, Additive manufacturing, Biomedical applications.

1. GİRİŞ

Geleneksel eksiltmeli ve biçimlendirmeli üretim yöntemlerinden farklı olarak, sunmuş olduğu tasarım özgürlüğü açısından 3B baskının, sağlık alanında önümüzdeki yüzyılda çığır açan yenilikler getirmesi beklenmektedir. Klasik 3B baskı yöntemiyle üretilen parçalarda malzeme özelliği gereği sonradan şekil değişimi olmamaktadır. Ayrıca, diğer bütün üretim yöntemlerinde olduğu gibi, malzeme özellikleri katmanlı üretimin de en önemli sınırlayıcısı olmaktadır. Mamul olarak elde edilecek olan parçanın malzemesine göre 3B baskı teknolojisi seçilebildiği gibi, önceden belirlenen ve çeşitli parametrelerin (katman kalınlığı, konsept veya model prototip, son ürün, destek ihtiyacı vs) gözönüne alınmasıyla da 3B baskı teknolojisi tercih edilebilmektedir. Dolayısıyla, katmanlı üretim konusunda gelecek yüzyılda atılması gereken en önemli adımlar, malzeme teknolojisinde kaydedilen gelişmeler kapsamında hız kazanacaktır.

Bir malzemenin ön programlama ile yeniden şekillenebilmesi ve zaman boyutunun devreye girmesiyle aktif davranarak bir işlevi yerine getirmesi “akıllı malzeme” özelliğine sahip olması anlamına gelmektedir. Bu bağlamda, akıllı malzemelerin zamana bağlı aktif şekil değiştirme özelliğinde olması ve buna karşın statik durumdaki diğer pasif malzemeyle biraraya getirilmesi ve en uygun son şeklin tespit edildiği matematiksel model oluşturularak, bir uyarma ve etkileşim mekanizması vasıtasıyla 3B üretim yapılması “4B baskı” olarak tanımlanmaktadır.

4B baskı, 3B baskıyla yapılan parçanın; şekil, fonksiyon ve özelliklerine zaman unsuru katılmasıyla meydana gelen yeni bir teknolojidir. Akıllı malzemeler, 3B baskı yapılmasıyla kendiliğinden montajlanabilen ve onarılabilen, farklı özelliğe ve kimliğe sahip dinamik yapıların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu özellik sayesinde, farklı disiplinler biraraya gelerek ortak bir görevi yerine getirirken, zaman boyutunun da kullanılan modele dahil edildiği faydalı ürünlerin ortaya çıkması sağlanmaktadır.

Şekil hafızası etkisiyle birçok kez kullanılan bu malzemeler, savunma ve uzay endüstrisi projeleri için sürekli gelişim göstermektedir. Şekil hafızalı alaşım olarak tanımlanan NiTi alaşımları, martenzitik-östenitik faz dönüşüm sıcaklık aralığında istenilen geçici şeklin oluşmasına imkan tanımaktadır. Bu sayede, savunma ve uzay endüstrisi için ürün inovasyonuna ciddi katkı sağladığı görülmektedir [1-6].

Şekil hafızalı veya akıllı malzemeler, biyomedikal alanda yeni olmasına rağmen hayati önem taşıyan uygulamalarda yeri son yıllarda giderek artmıştır. Örneğin, 4B baskı teknolojisi kullanılarak üretilen ve vücuda yerleştirilen bir implantın organ veya doku hücreleri ile etkileşime girerek gelişmesine ve büyümesine imkan veren bu malzemeler, sağlık sektörü için kritik önemde olan konularla ilgili nitelikli çalışmalar yapılmasına yol açmıştır. Bu çalışmada, akıllı malzemelerin özellikleri ve kullanım yerleri incelenmiştir. Şekil hafızalı malzeme uygulamaları konusunda yapılan araştırmalarla birlikte 4B baskı prosesi kapsamında gerçekleşen işlemler ve bu teknolojinin yapısal özellikleri ele alınmıştır. Ayrıca, 4B baskının biyomedikal alandaki örnekleri ve malzemeye özgü şekil hafızası etkisi değerlendirilmiştir.

2. AKILLI MALZEMELER VE KULLANIM ALANLARI

Bir malzemenin dış etkiye maruz bırakılmasıyla değişimi veya çevre şartlarına göre değişim yeteneği o malzemeye özgü olan “akıl” özelliği olarak adlandırılmaktadır. Malzemenin kendisine ait olan bu yeteneğine, tasarlayıcı tarafından akıl kazandırma işlemi yapılarak hayat verilmiş olur. Akıllı olma özelliği sayesinde bu tür malzemeler, zamana bağlı dışarıdan gelen fiziksel, kimyasal ve mekanik etkilere karşı fonksiyonel ve yapısal değişiklik ile cevap vermektedir.

Literatürde yer verilen çalışmalara göre, akıllı malzemeleri veya diğer bir ifadeyle uyarıcıya cevap veren malzemeleri beş kategoride sınıflandırmak mümkündür. Bunlar; şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), şakil

hafızalı polimerler (ŞHP), şekil hafızalı hibritler (ŞHH), şekil hafızalı seramikler (ŞHS) ve şekil hafızalı jellerdir (ŞHJ).

Akıllı malzemelere birçok farklı sektörde yer verilmektedir. Mimarlık alanında ortam şartlarıyla mücadele eden yapıların aksine, tasarlanan ve üretilen yapıların çevresel koşullara uyumlu olması amacıyla akıllı malzemeler kullanılmaktadır. Örneğin; dışarıdan gelen ışığı ayarlayabilen cephe paneli tasarımında ışık algılayıcısının hassasiyeti nedeniyle yaşanan bazı problemler tespit edilmiştir. Bunun üzerine yapılan çalışmada, kromik cam adı verilen bir akıllı malzeme sayesinde cephede güneş kontrolü sağlanmıştır [7].

Tekstil sektöründe örnek teşkil edecek bir çalışma olarak; nitinol adı verilen şekil hafızalı alaşımla (ŞHA) üretilen bir gömleğin kolları, vücut sıcaklığı arttığında kısılmakta ve daha sonra soğuk bir ortama girildiğinde tekrar eski haline gelerek gömleğin kolları uzamaktadır. Ayrıca, sıcaklıkla birlikte nem, pH ve ışığa duyarlılık gibi çevresel şartlara uyumlu birçok özelliğe sahip olan polimer esaslı akıllı malzeme ürünleri yapmak mümkün olmaktadır [8,9].

Şekil hafızalı alaşımların (ŞHA), martenzitik ve östenit faz arasındaki şekil değişimi temeline dayanan ve defalarca kez meydana gelen bu şekil değişimine karşın, kontrol edilebilir faz dönüşümü özelliği sayesinde deformasyonun meydana gelmemesi birçok endüstriyel uygulamaya olumlu etki yapmıştır. Bu konuda yapılan bir çalışmada, Shinkasen hızlı trenlerinde yağ seviye ayarını otomatik olarak sağlayan valfin yüksek sıcaklığa ulaştığında şekil hafızalı alaşımdan yapılan yayın genleşmesi sonrası yağ akışının kontrolü sağlanmıştır [10].

Bunlarla beraber akıllı malzemeler, süperelastiklik ve şekil hafızası özelliği nedeniyle ortodontik diş tedavileri için şekil bozukluğu olan dişlere kuvvet uygulanması suretiyle en uygun konuma getirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır [11].

Robotik alanında yapılan bir çalışmada, NiTi şekil hafızalı alaşımı plakalarla termo-mekanik uyarıcı mekanizması etkisiyle yapay parmak modeline esneme hareketi kazandırılmıştır. Yapay parmak, farklı ısınma ve soğuma değerlerinde büküm açısı ve uzama özelliği göstermiştir. Bu özellik sayesinde, derin su altı kurtarma operasyonlarında kullanılabilecektir [12].

3. 4B BASKI PROSESİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

3B baskı teknolojisine şekil hafızalı veya şekil değiştiren malzeme özelliğinin kazandırmış olduğu “zaman” faktörünün yeni bir boyut olarak eklenmesiyle “4B baskı” ortaya çıkarılmıştır. 4B baskı prosesi kendi içerisinde beş temel özellik barındırmaktadır. Bunlar;

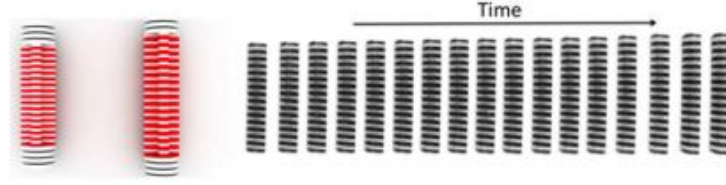
1. 3B baskı yapılabilir olması
2. Uyarıcı veya tetikleyicinin var olması
3. Akıllı veya uyarıcıya cevap veren malzeme kullanımına imkan sağlaması
4. Etkileşim mekanizmasının rol alması
5. Matematiksel modelinin tasarlanabilir olması ve oluşacak şeklin ön görülebilir olması

olarak verilmektedir [13].

Dördüncü boyut olarak zamanla değişim gösteren malzeme özelliği istenildiği gibi kontrol edildiğinde bu durum malzemeye ait “şekil-hareket davranışı” adıyla nitelendirilmektedir. Bu bağlamda şekil hareket durumu katlama, bükme, kıvrırma, lineer ve lineer olmayan genişleme vs gibi değişimleri içermesinin yanında etki ve uyaran tiplerine göre; çift, üçlü veya çoklu şekil hafızası etkisi adıyla bu davranışlar tanımlanmaktadır.

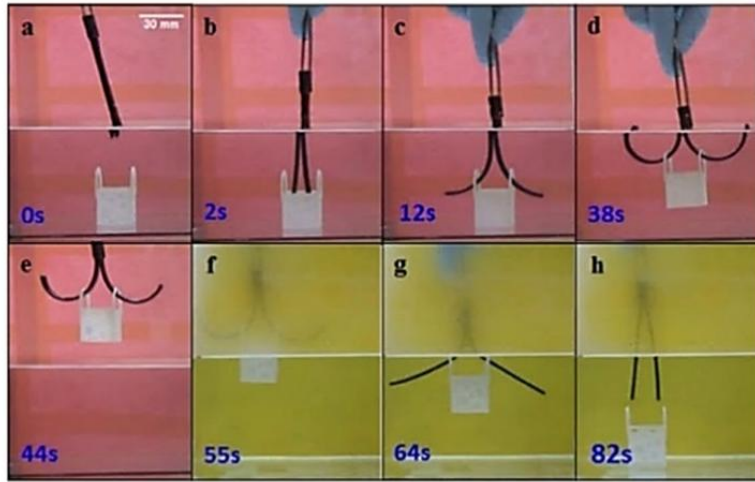
Malzeme, şekil hareket davranışı sayesinde meydana getirilen yapıların kendiliğinden montajlanabilir olması, çok fonksiyonluluk özelliği ve kendini onarabilmesi gibi klasik 3B baskı parçalarında olmayan boyutsal içerikli işlemlere sahiptir. Yekpare olarak 3B basılan bir yapının zamana bağlı şekil değiştirmesi farklı yaklaşımlarla gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin; şekil-1’de görüldüğu gibi bir boyutlu üretilen sabit disklerin arasına yerleştirilen hidrojjeller, su tetikleyicisi yardımıyla bir süre sonra uzamaktadır. Alt

boyutta üretilen bu disklerin arasındaki hidrojenlerin genleŖmesiyle ikinci boyutta hareket baŖlar ve Ŗekil deđiŖikliđi meydana gelir.



Ŗekil 1. Bir boyutta üretilen parçanın yine bir boyutta Ŗekil deđiŖtirmesi, lineer uzaması [14].

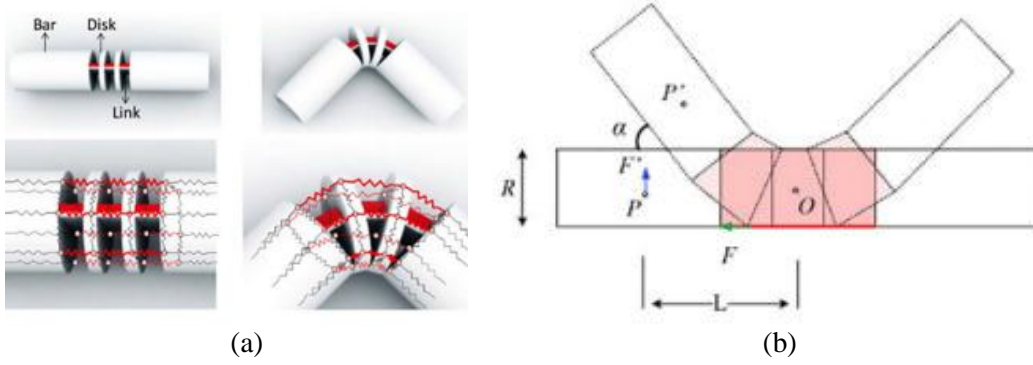
Çoklu Ŗekil hafızası etkisine örnek olarak verilebilecek bir diğer uygulamada 4B baskı teknolojisi kullanılarak tasarlanan bir kanca Ŗekil-2’te görülmektedir. Burada, beyaz renkte görülen sepetin 30°C’lik kaptan alınarak 70°C’lik bir baŖka kaba yerleŖtirilmesi hedeflenmektedir. Ŗekil deđiŖimi önceden tasarlanan, matematik modeli oluŖturulan ve kompozit malzemeden 3B baskıyla üretilen bu kanca, 30°C sıcaklıkta bükülüp 70°C’de düz konuma gelmektedir. Kanca 30°C’lik kapta bükülüp sepete tutunmuŖ ve 70°C’lik kapta dzleŖtiđinde sepeti bırakmıŖtır [14].



Ŗekil 2. (a)-(e) arası 30°C’lik kapta kancanın sreye bağlı oluŖması ve sepeti tutması, (f)-(h) arası 70°C’lik kaba alınması ve sepetin bırakılması [14].

Yapılan bazı alıŖmalarda Ŗekil deđiŖimi ile birlikte, oluŖturulan yapının içerisindeki malzeme dağılımı da ayarlanarak 3B nesneye farklı Ŗekil hareket davranıŖları kazandırılmıŖtır. 3B baskı teknolojisi sayesinde, farklı niteliklere sahip olan malzemelerin farklı oranda dağılımlarla üretilmesi yeni bir kavram olarak karŖımıza çıkmıŖtır. Dijital malzeme adıyla tanımlanan bu yeni kavram, 4B baskı yöntemiyle farklı özellikteki birçok malzeme, tek bir hacimsel yapıya dnŖtrlebilir. Örneğin; bir hacim içerisine uygun lde ve düzende malzeme dağılımı yapıldığında negatif poisson oranı yakalanabilmektedir [15,16].

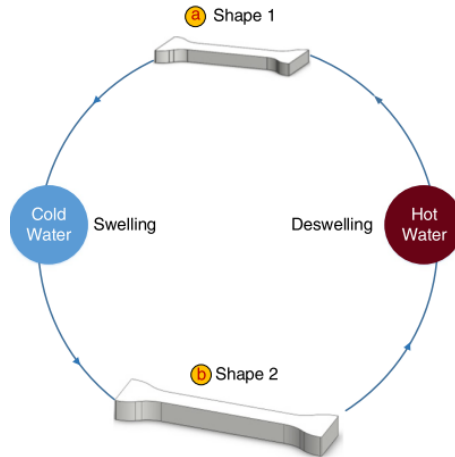
Ŗekil hafızalı malzemenin ilk kullanımında, deneme yanılma yoluyla parçanın alacağı son Ŗekil belirlenirken, 4B baskı yapılacak parçanın Ŗekil deđiŖimi matematiksel model oluŖturulmasıyla önceden tahmin edilebilmektedir. Ayrıca retilmesi dŖnlen bir yapının, mümkün olan en az maliyetle ve sürede elde edilmesi matematiksel model ile sağlanabilir. 4B baskıda matematiksel modele etki eden parametrelerden bazıları; 3B baskı makinesi anizotropi, nozul çapı, filament ls, malzeme özellikleri olarak; Young modülü, büküm oranı, camsı dnŖm sıcaklığı, uyarıcı özellikleri olarak; ısı ve ıŖık miktarı, arzu edilen son Ŗekil özelliği ise istenilen uzunluk ve hacim verilebilir.



Şekil 3. (a) Sabit diskler arasındaki hidrojenlerin genişlemesiyle oluşan büküm, (b) Bükülen parçanın matematiksel modeli [14].

Bir boyutta tasarlanan ve su uyarıcısı kullanılarak aktive edilen hidrojenler aracılığıyla bükülen bir yapının matematiksel modeli şekil-3'te görülmektedir.

Malzemenin üretildiği boyuttan bir üst boyuta, yani istenen boyuta taşınmasına etki eden bir diğer faktör uyarıcı tipinin seçilmesidir. 4B baskı kapsamında hidromekanik ve termomekanik olmak üzere iki temel etkileşim veya uyarıcı mekanizması vardır. 4B baskı yapısının herhangi bir uyarıcı etkisi sonrası davranışını belirleyen dış kuvvet veya dış yükleme varsa, kısıtlama veya zorlama olarak mekanizmaya etki etmiş demektir. Kuvvetin etki ettiği uyarıcı mekanizmaları “zorlamalı” olarak tanımlanırken, serbest hareket eden ve şekil değişimini sağlayan mekanizma; sıvı, ısı veya PH ile çalışıyorsa “zorlamasız” ifadesiyle literatürde yer almaktadır. Zorlama faktörünün önemli derecede etkisi nedeniyle uyarıcının yöntemi değişebilmektedir. Literatürde bu konuyla ilgili; hidromekanik, termomekanik, PH-mekanik gibi özelliklere sahip uyarıcı faktörler kullanılarak çalışmalar yapıldığı görülmektedir.



Şekil 4. (a) Deneysel parçanın kalıcı şekli, (b) Parçanın soğuk su uyarıcısı ile genişlemesi [16].

Şekil-4'te görüldüğü gibi zorlamasız hidro-termo-mekanik mekanizma iki adımda gerçekleşmektedir. Soğuk suyla temas etmesiyle birlikte genişleyen 4B baskı parçası, sıcak suya daldırıldığında ilk haline geri dönmektedir. Parçanın genişleme ve sönme davranışı bir zorlama olmaksızın gerçekleşmiştir. Bu mekanizmada yapının genişlemesi ve sönmesine sebep olan uyarıcılar su ve sıcaklıktır.

Benzer bir başka çalışmada, iki farklı sıcaklık ve bir dış yükleme birlikteliği sonucu ortaya çıkan mekanizma akıllı malzemenin camsı geçiş sıcaklığının üzerinde ($T_H < T_C$) ve altında olmasıyla ($T_L < T_C$) ortaya çıkan geçici şekil değişimi ilkesine dayanarak özelliği incelenmiştir. Bu mekanizmada öncelikle T_H sıcaklığına ısıtılan 3B baskı parçasına çekme gerilmesi uygulanmıştır. Ardından ikinci adım olarak dış yükleme altında gerilme değişmeyecek şekilde parça T_L sıcaklığına soğutulmuştur. Dış yüklemenin

kaldırılmasıyla geçici şekil elde edilmiştir. Daha sonra parçayı orijinal haline getirebilmek için tekrar T_H sıcaklığına ısıtılmıştır [16].

4. BİYOMEDİKAL ALANDA 4B BASKI UYGULAMALARI

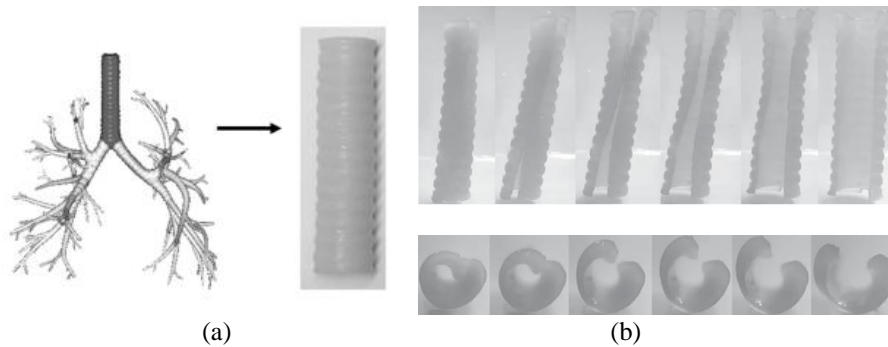
3B baskı teknolojisi biyomedikal uygulamalarda; operasyon öncesi anatomik model, implant ve yapı iskelesi tasarımı, kırık ve tendon yenilenmesi, kemik yenilenmesi, antimikrobiyal implant destekleri ve biyobozunur yapılar tanı ve tedavi için literatürde sıklıkla değinilen konular olarak yer almaktadır [17]. Şimdiye kadar 3B baskı proseslerine uygun olan malzeme seçimiyle gerçekleştirilen bu uygulamalar, şekil hafızalı malzemelerin 3B baskı yapılabilir olması sayesinde yeniden ele alınmaya başlanmıştır. Şekil hafızalı malzemelerin sağlık alanına girmesiyle, geleneksel 3B baskı yöntemi kullanılarak mikroteknoloji içeren yapılar oluşturulabilmektedir. Bazı biyomedikal uygulamalarda, örneğin; damara bükümlü olarak yerleştirilen bir bağlantı parçasının kimyasal bir hal değişimiyle ikiye ayrılan kısımları birleştirerek iyileşme sağlamaktadır [18].

Son yirmi yılda doğuştan gelen veya sonradan olan koroner damar daralması rahatsızlıkları stentler sayesinde iyileştirilmektedir. Sıklıkla tercih edilen bir şekil hafızalı alaşım olan NiTi ile üretilen bir stent, düz biçimde damar içerisine yerleşimi sonrasında vücut ısısı ile birlikte ilk haline geri dönerek damar çeperini açmaktadır ve dolayısıyla damar tıkanıklığı giderilmektedir. Şekil hafızalı polimer malzeme kullanımının medikal uygulamalarda farkedilir derecede büyümesi, şekil hafızalı alaşımlara kıyasla önemli avantaja sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Başka bir uygulamada şekil hafızalı polimer malzemeden yapılan bir stent cerrahi operasyona uygun olacak şekilde normal ölçülerinden daha küçük çapta geçici şekliyle 3B baskı yapılmıştır. Stentin damar içerisine yerleşimi sonrası, ısı etkisiyle kalıcı şekline geri dönmesi durumu önceden programlanmıştır. Şekil-5’de kalıcı ve geçici şekil değişimi görülmektedir [11,19].



Şekil 5. Soldan sağa stentin kalıcı ve geçici şekilleri [19].

Benzer bir araştırmada, çeşitli nedenlerle hava akışının bozulduğu veya hasar gören broşlar için hastaya özgül tasarlanan şekil hafızalı stent uygulaması şekil-6’de görülmektedir. Stentin broş duvarına tutunması ve kaymaması için dalgalı bir modelde tasarlanmıştır. Bu stentin geçici şekli SLA yöntemiyle C-şeklinde ve dar formda üretilmiştir. Vücut sıcaklığı uyarıcı etkisiyle 14 saniye sonra stentin kalıcı formuna dönmesinin ardından broş genişler, bu sayede hava akışı olması gerektiği gibi sağlanmış olur [20].



Şekil 6. (a) Broş için üretilen ve dıştan saran stent, (b) Stentin 14 saniye içerisinde kalıcı şeklini alması [20].

4B baskının biyobaskı (bioprinting) adı verilen canlı doku hücreleri ile birlikte çalışması medikal alanda bir diğer yeni gelişme olarak karşımıza çıkmaktadır. Özel 3B baskı makinelerinde canlı hücre enjekte edilerek gerçekleştirilen ve zaman faktörünün 3B biyobaskıya dahil edilmesiyle keşfedilen bu yeni tanım “4B biyobaskı” adıyla açıklanmaktadır. 4B biyobaskı, biyomedikal alanda doku yenilenmesi ve kendinden katlanabilir polimerle birlikte enjekte edilen kan hücrelerinin bir dokuyla birleştirilmesi ve bu sayede dokunun onarımı gibi konular için geniş kullanım yeri oluşturması beklenmektedir [21].

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Şekil hafızalı malzemeler, 3B baskı prosesini yenileyerek 4B baskı teknolojisini ortaya çıkarmış ve böylece kullanım alanı daha da genişletmiştir. 4B baskı işleminin temel adımı, 3B baskı yapılarak üretilen bir parçanın alt boyut olarak tanımlanmasıdır. Bu parçanın, şekil hafızası etkisiyle istenilen üst boyuta taşınması zaman faktörüyle birlikte oluşmaktadır. 4B baskının sağlamış olduğu bu imkan sayesinde, bir boyutta üretilen bir parça gerekli uyarıcı şartlar sağlandığında belirli bir zaman sonra üçüncü boyuta getirilebilir. Akıllı veya şekil hafızalı malzeme ile 3B baskı yapılarak bir uyarıcı aracılığıyla istenilen son şekil matematiksel modellenerek ön görülebilir hale getirilmesi 4B baskıyı yeni bir teknoloji olarak üretim sektörünün gündemine getirmiştir.

Gelecek yıllarda şekil hafızasına sahip ürünlerin, özellikle lojistik imkanların sınırlı olduğu yerlerde, örneğin; alt boyutu küçük ölçekte üretilmi olan bazı parçaların hedef bölgeye taşınması ve orada çeşitli uyarıcılar kullanarak üst boyuta getirilmesi, ikmal esnasında daha az yer kaplaması bakımından savunma sanayisi için ciddi fayda sağlaması beklenmektedir. Ayrıca, 4B baskı teknolojisinin malzeme geliştirilmesine bağlı olması sayesinde, ŞHK zırhlı askeri kamuflaj ürünlerin yapılmasını mümkün kılmaktadır. Lojistik anlamında bir diğer önemli yer olan uzay ve havacılık endüstrisi için de 4B baskıyla yapılan bir parçanın veya mekanizmanın; minimum boyutlarda, yüksek mukavemetli, ısıya dayanıklı ve bir süre sonra tercih edilen uyarıcıyla istenilen son şekli alması mümkün olacaktır.

3B baskı teknolojisinde malzeme özelliklerinin gelişmesi ve yeni malzemelerin keşfedilmesi, sağlık alanında çözümü mümkün olmayan bazı problemlerin yeniden ele alınmasına ve üzerinde tekrar çalışılmasına zemin hazırlamıştır. Bazı ileri araştırma laboratuvarlarında polimer esaslı iki malzemenin farklı oranlarda bir araya getirilmesiyle zamana bağlı şekil değiştiren özellikte “akıl” fonksiyonu elde edilmektedir. Ülkemizde de birçok sektörde farklı amaçlarla kullanılan 3B baskının bir adım sonrası olan 4B baskı teknolojisi, karmaşık geometriye sahip parçaları; düşük maliyetle ve kısa sürede üretilmesi beklenmektedir. Bununla birlikte, zaman unsuruyla beraber geometrik boyutun değişmesi temeline dayanan bu çalışmaların, ilerleyen yıllarda daha da artması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Wu, J. J. Huang, L. M. Zhao, Q. Xie, T. 4D Printing: History and recent progress. *Chinese J. Polym. Sci.* 2018; 36(5): 563–575.
2. Tibbits, S. 4D Printing: Multi-material shape change. *Architectural Design* 84.1.2014: 116-121.
3. Y. Zhou et al. From 3D to 4D Printing: Approaches and typical applications. *Journal of Mechanical Science and Technology* 29.2015; 10: 4281~4288.
4. Khoo, Z. X., Teoh, J. E. M., Liu, Y., Chua, C. K., Yang, S., An, J., ... & Yeong, W. Y. 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*. 2015;10(3):103-122.
5. Roy, D., Cambre, J. N., & Sumerlin, B. S. Future perspectives and recent advances in stimuli-responsive materials. *Progress in Polymer Science*, 2010;35(1-2): 278-301.
6. Dilibal S. The effect of long-term heat treatment on the thermomechanical behavior of NiTi shape memory alloys in defense and aerospace applications. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 2006; 15(2), 1-23.
7. Orhon, A. V. Akıllı malzemelerin mimarlıkta kullanımı. *Ege Mimarlık*. 2012;82: 18-21.
8. Bedeloğlu, A. Ç. Şekil hafızalı alaşımlar ve tekstil malzemelerindeki uygulamaları. 2011;18: 83.
9. Hu, J., Meng, H., Li, G., & Ibekwe, S. I. A review of stimuli-responsive polymers for smart textile applications. *Smart Materials and Structures*. 2012;21(5): 053001.
10. Toptaş, E., & Akkuş, N. Şekil hafızalı alaşımlar ve endüstriyel uygulamaları. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*. 2007;4: 15-22.
11. Yakıncı, Z. D. Şekil hafızalı alaşımların sağlık alanındaki uygulamaları. *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi*. 3(2); 1-6.

12. Engeberg Erik D., Dilibal S., Vatani Morteza, C. Jae-Won, L. J. Anthropomorphic finger antagonistically actuated by SMA plates. *Bioinspiration Biomimetics*, 10(5).
13. Erdoğuş H., Şekil hafızalı malzemelerin katmanlı üretim yöntemiyle üretilmesi. *ASELSAN 3. Malzeme Teknolojileri Çalıştayı*. 2018:35.
14. Momeni, F., Liu, X., & Ni, J. A review of 4D printing. *Materials & design*. 2017;122: 42-79.
15. Hiller, J., & Lipson, H. Tunable digital material properties for 3D voxel printers. *Rapid Prototyping Journal*. 2010;16(4): 241-247.
16. Bakarich, S. E., Gorkin III, R., Panhuis, M. I. H., & Spinks, G. M. 4D printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels. *Macromolecular rapid communications*. 2015;36(12): 1211-1217.
17. González-Henríquez, C. M., Sarabia-Vallejos, M. A., & Rodríguez-Hernandez, J. Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: materials, methodologies, and biomedical applications. *Progress in Polymer Science*. 2019.
18. G. Ciofani & A. Menciassi (Eds.). Introduction to active materials for biomedical applications. *Piezoelectric Nanomaterials for Biomedical Appl.*, NANOMED, pp. 1–27.
19. 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*. 2016;6: 31110.
20. Zarek, M., Mansour, N., Shapira, S., & Cohn, D. 4D printing of shape memory-based personalized endoluminal medical devices. *Macromolecular rapid communications*. 2017;38(2): 1600628.
21. Gao, B., Yang, Q., Zhao, X., Jin, G., Ma, Y., & Xu, F. 4D bioprinting for biomedical applications. *Trends in biotechnology*. 2016; 34(9): 746-756.