

ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR VE TEKSTİL MALZEMELERİNDEKİ UYGULAMALARI

Ayşe (ÇELİK) BEDELOĞLU

Dokuz Eylül Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü,
Tınaztepe Yerleşkesi, 35160, İzmir

Gönderilme Tarihi / Received: 14.08.2011

Kabul Tarihi / Accepted: 15.09.2011

ÖZET

Sahip olduğu orijinal şeklini, hafızasında koruyarak, içinde bulunduğu geçici şekilden, sıcaklık, pH, ışık gibi çevresel uyaranların etkisiyle orijinal şekline dönebilen şekil hafızalı malzemeler, pek çok ilginç uygulama alanına sahiptir. Bu malzemeler içerisinde en eski geçmişe sahip olan şekil hafızalı alaşımlar ise sahip oldukları mekanik özellikler sayesinde tekstiller de dahil olmak üzere, tıp, mühendislik, savunma gibi pek çok alanda kullanılabilen ticari ürünlerin de üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, öncelikle akıllı malzemelerin bir tipi olan şekil hafızalı alaşımların, yapıları, özellikleri ve genel kullanım yerleri hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra ise, şekil hafızalı alaşımların akıllı tekstil ürünleri üretmek için kullanılması konusundaki çalışmalar sunulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Alaşım, akıllı tekstil, mühendislik, şekil hafızalı malzeme.

SHAPE MEMORY ALLOYS AND APPLICATIONS ON TEXTILE MATERIALS

ABSTRACT

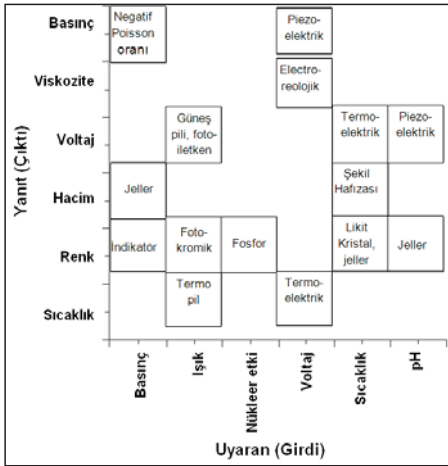
The shape memory materials, which can transform from its temporary shape into its original shape due to environmental stimuli such as temperature, pH, light, etc. by keeping its original shape in its memory, have many interesting application areas. Because of their mechanical features, shape memory alloys, which are the oldest and well-known among these materials, provide the possibility of manufacturing commercial products for application areas such as textiles, medicine, engineering, defence industries. In this review, shape memory alloys, a class of smart materials, will be discussed in terms of their structures, features and general applications. Then, studies about shape memory alloys which were investigated to develop smart textiles will be presented.

Keywords: Alloy, engineering, shape memory material, smart textile.

**Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ayse.celik@deu.edu.tr*

1. AKILLI MALZEMELER

Doğa, çeşitli fonksiyonlara sahip olup çevresel uyarılara (elektriksel, kimyasal, mekanik, manyetik, optik gibi) karşı dinamik olarak yanıt veren akıllı malzemelerin tasarlanması ve üretilmesi için bilim insanlarına, her zaman esin kaynağı olmaktadır. Akıllı malzemeler konusundaki araştırma ve geliştirme çalışmaları, hem akademik hem de endüstriyel kesimlerde gün geçtikçe artmakta, böylece, farklı alanlarda (havacılık ve uzay çalışmaları, taşımacılık, iletişim, sağlık, bina ve altyapı gibi) kullanılabilir pek çok yeni akıllı ürünün ortaya çıkmasını sağlamaktadır [1-2]. Şekil hafızalı malzemeler, renk değiştiren malzemeler, faz değiştiren malzemeler, piezo malzemeler, ışık yayan diyotlar ve fotovoltaj malzemeler, akıllı malzemelerin farklı formlarına örnektir. Ayrıca, uyarı karşısında belirli bir yanıt göstermek için geliştirilen veya fiziksel özelliklerini, geometrisini, mekanik özelliklerini ya da elektromanyetik özelliklerini değiştirebilen ve yararlı, en uygun yanıtı vermek için düzenleyebilen farklı formlarda çok akıllı malzemeler de bulunmaktadır. Farklı akıllı malzemelerin, farklı uyarılara verdikleri tepkiler (girdi/çıkış karakteristikleri) Şekil 1'de gösterilmektedir [3].



Şekil 1. Bazı malzemelerin, farklı uyarılara verdikleri tepkiler [3]

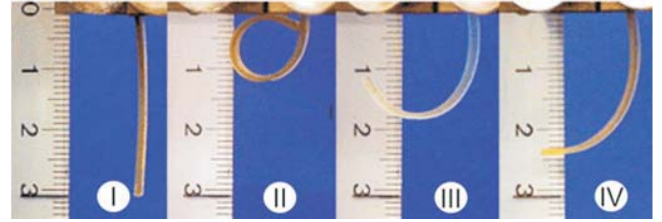
2. ŞEKİL HAFIZALI MALZEMELER

2.1. Şekil Hafıza Etkisi

Şekil hafızalı malzemeler, şeklini, geçici olarak deforme olmuş halinden, önceden programlanmış orijinal şekline, bir dış uyarının etkisiyle kontrollü bir biçimde değiştirilebilen malzemeler ailesindedir. Şekil geri dönüşü, çevre sıcaklığı, elektrik akımı, manyetik alan, pH, UV ışık, belirli bir kimyasal veya herhangi başka bir uyarı tarafından tetiklenebilir [4]. Işık etkisiyle şekil değiştiren şekil hafızalı bir polimer film Şekil 2'de gösterilmektedir.

Geri dönüş kuvvetinin kapsamına göre ve geri dönüş mekanizmasının karakteristiklerine göre, şekil hafızalı malzemeler, akıllı malzeme sistemlerindeki pek çok teknik parametreyi kontrol etmek veya ayarlamak için uygulanabilir. Akıllı sistemler, şekil hafızalı malzemelerin sağladığı şekil, pozisyon (yer), uzama, eğilmezlik, sönümleme, sürtünme, buhar geçirgenliği veya yüzey gerilimindeki değişikliklerden faydalanmaktadır [4]. Örneğin, sıcaklığa

hassas şekil hafızalı malzeme, dönüşüm sıcaklığı altında mekanik olarak deforme olursa, sıcaklık dönüşüm sıcaklığı üstüne arttırıldığında, orijinal şeklinin tümü geri dönme-se de, çoğunu geri kazanabilecektir. Bu dönüşüm, materyalin iç yapısını sıcaklıkla değiştirmesi nedeniyle oluşur [5]. Malzemeye, bir kez yeterli bir gerilim uygulandığında, malzeme, elastik deformasyona çok benzer görünen büyük bir deformasyona uğramaktadır. Bununla birlikte, uygulanan yük kaldırıldığında, malzeme orijinal şekline kalıcı deformasyon olmadan geri dönebilmektedir. Çevre sıcaklığı, şekil hafızalı malzemenin geçiş sıcaklığına ulaşmazsa, şekil hafıza etkisi gözlenmemektedir. Şekil programlama ve geri dönüş işlemi birçok kez tekrarlanabilmektedir [3]. Şeklindeki değişikliğe sıcaklıktaki değişim neden olduğu için buna termal olarak uyarılmış şekil hafıza etkisi denilmektedir.



Şekil 2. Işıklı uyarılan şekil hafızalı polimer filmin davranışı [6]

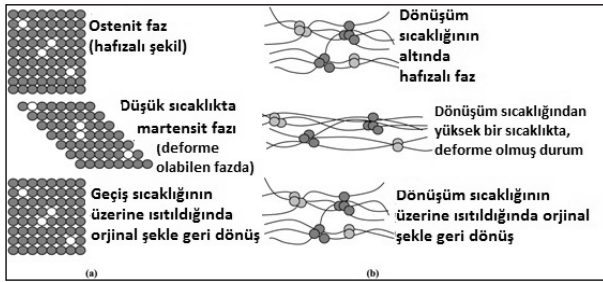
2.2. Şekil Hafızasına Sahip Malzemeler ve Özellikleri

Şekil hafıza etkisi, ilk defa altın-kadmiyum (Au-Cd) alaşım malzemelerde 1932 ve 1951'de ve pirinç (bakır-çinko) alaşım malzemesinde 1938'de gözlenmiştir. Bunlardan sonraki gözlem ise 1962'de, Buehler ve arkadaşlarının ABD donanma savaş gereçleri laboratuvarında (NOL) nikel-titanyum (NiTi) alaşımın şekil hafıza etkisi gösterdiğini keşfetmesidir [7]. Şekil hafızalı malzemeler, bileşenlerine göre inorganik veya organik olabilmektedir. İnorganik şekil hafızalı malzemeler, metal alaşımlar, seramikler ve camlar, organik şekil hafızalı malzemeler ise polimerler ve jelleri kapsamaktadır [4]. Bunların arasında, şekil hafızalı alaşımlar ve şekil hafızalı polimerler en çok kullanılanlardır, sahip oldukları özellikler nedeniyle bazen kombinasyon halinde de kullanılmaktadırlar [3].

Şekil hafızalı malzemeler arasında, şekil hafızalı alaşımlar en eski geçmişe ve en geniş ticari uygulama alanına sahip olanlardır. Biyomedikal alan özellikle pek çok başarılı uygulamaya sahiptir. Diğer kapsamlı araştırılan alanlar, şekil hafızalı alaşımlar için, uzay ve uçak endüstrisi, otomotiv endüstrisi, mikro elektromekanik sistemler ve telekomünikasyon alanıdır. Seramik malzemeler, polimerler ve jeller çok uzun bir geçmişe sahip değildir ve sürdürül-mekte olan araştırmalarla uygulama alanları gün geçtikçe genişlemektedir. İnorganik şekil hafızalı malzemelere kıyasla, organik şekil hafızalı malzemeler büyük geri dönüş deformasyonuna, kolayca ayarlanabilir sıcaklığa ve düşük maliyete sahiptir. Bu yüzden, şekil hafızalı polimerler ve jeller, malzeme maliyetinin önemli olduğu

yerlerdeki uygulamalar için iyi adaylar olabilmektedir. Fakat jellerle ilgili uygulamalar, zayıf mekanik özellikleri nedeniyle sınırlıdır [4, 8].

Şekil hafıza etkisi, malzemelerin martensit faz geçişi esasına dayanır (Şekil 3). Polimerlerin, örneğin ısıyla kısılabilen filmler ve tüplerin, şekil hafıza etkisi belirli bir hacimsel özellik değildir, polimerlerin yapı ve morfolojilerinden dolayı oluşmaktadır. Literatürde az sayıda şekil hafızalı polimerden bahsedilmektedir. En çok araştırma konusu olan segmentli poliüretanlardır ve farklı kullanım alanları mevcuttur. Şekil hafıza etkisini tetikleyen termal geçiş, bir cam geçişi veya erime noktası olabilir [9].



Şekil 3. Şekil hafıza etkisinin gösterimi; (a) alaşımlarda ve (b) polimerlerde [5]

3. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

Şekil hafızalı alaşımlar, fonksiyonellikleri nedeniyle son yıllarda çok ilgi çekmektedir [10-11]. Şekil hafızalı alaşımların keşfi, 1932 yılında, İsveçli fizikçinin Au-Cd alaışımının pseudoelastik davranışını keşfetmesi ile başlamıştır. Bu buluştan sonra, pek çok şekil hafızalı alaşım (Au-Cd, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Ni-Ti, Mn-Cu, Ni-Mn-Ge, demir esaslı alaşımlar gibi) çalışılmıştır ve bunlardan, Ni-Ti ve Cu-Zn-Al ticarileştirilmiştir. Bazı şekil hafızalı alaşımların özellikleri Tablo 1'de verilmektedir [4, 12].

Tablo 1. Bazı şekil hafızalı alaşımlar ve özellikleri [13]

Alaşım	Kimyasal bileşim	Dönüşüm sıcaklık aralığı (°C)	Yaklaşık dönüşüm histerizisi (°C)
Ag-Cd	44-49 %Cd	-190~50	15
Au-Cd	46.5-50%Cd	30~100	15
Cu-Al-Ni	14-14.5 %Al 3-4.5 %Ni	-140~100	35
Cu-Sn	yaklaşık 15 %Sn	-120~30	
Cu-Zn	38.5-41.5 %Zn	-180~10	10
Cu-Zn-X(X=Si,Sn,Al)	az %X	-180~200	10
In-Ti	18-23%Ti	60~100	4
Ni-Al	36-38%Al	-180~100	10
Ni-Ti	49-51%Ni -	50~110	30
Fe-Pt	yaklaşık 25 %Pt	yak. -130	4
Mn-Cu	5-35 %Cu	-250~180	25
Fe-Mn-Si	32 %Mn, 6 %Si	-200~150	100

En çok kullanılan malzeme ise **nitinol** (Nickel-Titanium, Naval Ordnance Laboratory'nin kısaltması) yani **nikel-titanyum** (NiTi) alaşımdır. Bu ilk defa, ABD donanma savaş gereçleri laboratuvarında (NOL) 1960 yılında araştırmacıların kazara, yanan bir sigaranın alaışımın şeklini değiştirdiğini fark etmeleri ile keşfedilmiştir [4,

12]. Nitinol (Nikel-titanyum alaşımı) eş atomlu (%50 Ni, %50 Ti) ya da eş atom sayısına yakın değerlerde (genelde %55 Ni) nikel-titanyum atomları içeren intermetalik bir bileşik olarak bilinmektedir. Nitinol, -200°C ile +100°C arasında, katı durum (solid-state) hal geçişine uğramaktadır. 50:50 atomik oran civarındaki küçük bileşimsel farklılıklar faz geçiş sıcaklığını yükseltmekte ve alaışımın termomekanik karakteristiklerinde çarpıcı dramatik değişimler yapmaktadır [3]. Az nikel zengini bileşime sahip alaşımlar süper elastisite denilen olaya yol açmakta ve bundan dolayı, bu tür malzemeler tıbbi uygulamalarda çok fazla kullanılmaktadır. Üçüncü bir bileşenin (Cu, Al, Fe, Cr, Co, Pt, Pd, Au, veya Hf gibi) nitinole eklenmesi ile işlem görme, faz kararlılığı ve mekanik kararlılığın iyileştirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır [4, 14]. Nispeten düşük dönüşüm sıcaklıklarında, iyi şekil hafızası özelliklerine sahip olan nikel titanyum alaşımlar, en fazla bilinen ve kullanılan şekil hafızalı alaşımlardır. Bar, çubuk, tel, tabaka, şerit gibi farklı formlarda olabilir. Daha ucuz olan bakır esaslı alaşımlar, daha düşük uzama değerlerine sahip ve daha geniş bir sıcaklık aralığında dönüşüm gerçekleştirmektedir. Demir esaslı alaşımlar ise, araştırmalar sonucunda, şekil geri dönüşü açısından diğerlerine göre daha az iyi bulunmuştur.

Şekil hafızalı alaşımlar, yayınımsız dönüşümler (bu nedenle "tersinir martensit dönüşümler" olarak adlandırılır) vasıtasıyla birinden diğerine tersinir dönüşümler meydana getiren iki (veya bazen daha fazla) kristalografik faza (evreye) sahip malzemelerdir [15]. Şekil hafızalı alaşımlar, iki eşsiz özellik göstermektedir: Birincisi, düşük sıcaklıkta deforme olabilen ve sonra, alaşımla ilgili, belirli bir sıcaklığın üstüne ısıtılarak önceki şekline geri dönebilen bir malzemenin yeteneği ile karakterize edilen şekil hafıza etkisidir. İkincisi ise süperelastisitedir, bu, belirli bir alaışımın sıcaklık karakteristiği aralığı içinde deforme olmuşken, malzemenin büyük geri dönüş uzamaları (%5 e kadar) göstermesi yeteneğidir. Arne Olander'in ilk defa 1938'de bu ilginç özellikleri keşfetmesine rağmen 1960lara kadar bu konuda, önemli bir ilerleme sağlanamamıştır [3, 11, 15-16]. Fiziksel hareketlilik sağlaması açısından, şekil hafızalı alaşımların etkisi umut verici görünürken, malzemeler büyük ölçekli ve seri uygulamalar için problemleri olabilmektedir. İlk keşfedilen alaşımlar ya çok pahalı ya da çok zehirliydi. Günümüzde ise, araştırmacılar, alaşımları, verim ve eşsiz dönüşüm karakteristikleri açısından test etmeye devam etmektedirler [12].

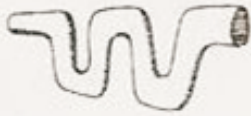
3.1. Şekil Hafızalı Alaşımların Çalışma Mekanizmaları ve Özellikleri

Şekil hafıza etkisi yaratmak için alaşım oluşturulur ve istenilen şekilde mekanik olarak tutulur. Isıtma ve hızlı soğutma işlemleriyle, farklı kristal yapıları arasındaki ilişki oturtulur. Şekil hafızalı alaşım, programlanmış şeklini, ortam sıcaklığında korur, fakat deforme olduğunda, uygun

uyaran uygulandığında her zaman orijinal şekline geri dönecektir. Jackson ve ark. [17] tarafından şekil hafıza etkisi Şekil 4'teki gibi özetlenmiştir.

Alaşımlarla ulaşılabilecek uzamalar (%8'e kadar), polimerlerle olanlardan çok daha azdır. Fakat, şekil hafızalı alaşımlar orijinal programlanmış şekline %100 geri döneme yeteneği gibi belirli avantajlara sahiptir. Orijinal şekle geri dönüş, alaşımı orta bir sıcaklığa ısıtma işlemi ile harekete geçirilebilir. Malzeme orijinal şekline ani biçimde geri dönerken önemli kuvvet sarf edilir ve mekanik iş yapılabilir [17].

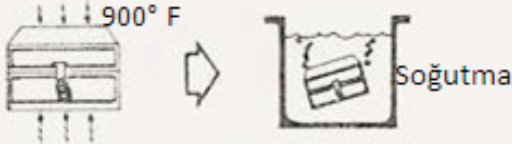
1) Şekil hafızalı alaşım tel, çubuk, tüp veya tabaka formunda alınır.



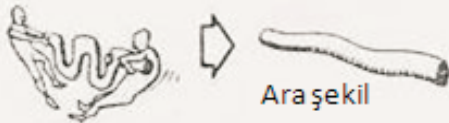
2) Hafızalı konfigürasyon sabitlenir.



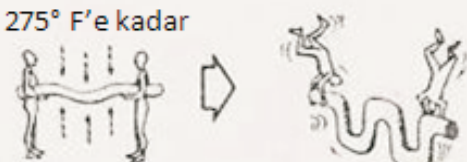
3) Hafıza ısıtarak kazandırılır, sonra soğutma işlemi yapılır.



4) Ara bir şekle germe işlemi yapılır.



5) Şekil hafızasını güçlendirmek için tekrar bir ısıtma yapılır.

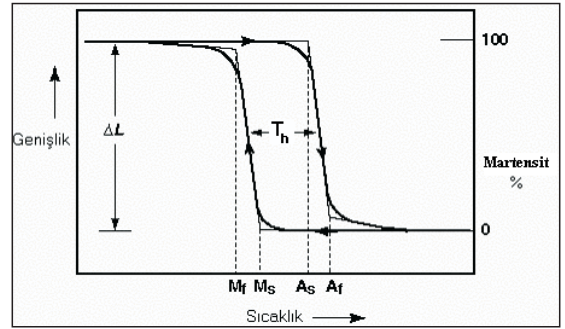


6) Çevre sıcaklığına gelmesi için soğutulur. Germe-ısıtma-soğutma çevrimi tekrarlanabilir.



Şekil 4. Nitinol şekil hafızalı alaşımı işlem adımları [17]

Düşük bir sıcaklık fazı ile yüksek bir sıcaklık fazı arasındaki bir geçiş sıcaklığını (tek bir nokta değil, dar bir sıcaklık bandı,) aştıkları zaman, orijinal imal edilen şekline geri döner. Bu, şekil hafızalı alaşımda meydana gelen martensit ve östenit arasında bir katı hal faz değişimi (moleküler olarak tekrar düzenlenmeden ileri gelen) ile mümkün olur [18]. Şekil hafıza etkisinin olmasını sağlayan martensitli dönüşüm şekil hafızalı alaşımlarda meydana gelen kristal kafes-bükülmesidir, yayınımsız ve tersinir yapısal değişimdir (uzama, çekme ve alaşımın düzlemler boyunca kesilmesini (düzlemsel kayma benzeri) sağlayan). İki fazlı dönüşüm, bir östenit (ana) fazdan ve bir martensit fazdan oluşur (Şekil 5). Martensitli faz, genellikle daha düşük bir sıcaklıkta meydana gelir fakat ana, östenit faz, yani alaşımın hatırladığı şekil, yüksek sıcaklık fazıdır (Şekil 5). Bu durumda, şekil hafızalı alaşımlar, iki şekle kadar hatırlamak için eğitilebilen aktüatörler haline gelir [4].



Şekil 5. Sabit yük altındaki bir numunede ısıtma ve soğutma durumunda tipik dönüşüm-sıcaklık eğrisi.[4]

Şekil 5'de,

T: Sıcaklık,

T_h : Dönüşüm histeresi,

M_s : Soğutma üzerine martensit başlangıç sıcaklığı (%100 östenit),

M_f : Soğutma üzerine martensit bitiş sıcaklığı (%0 östenit),

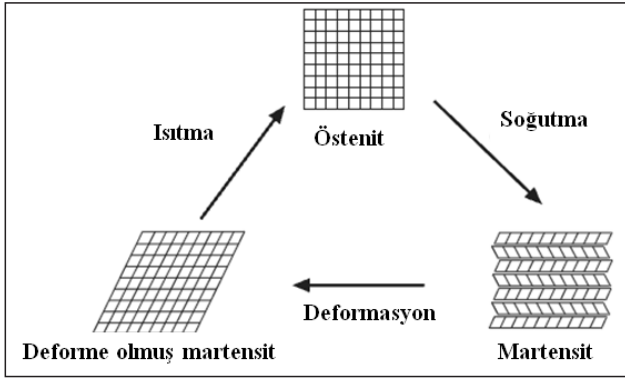
A_s : Isıtma üzerine ters dönüşüm başlangıç sıcaklığı (östenit başlangıcı, %100 martensit),

A_f : Isıtma üzerine ters dönüşüm bitiş sıcaklığı (östenit bitiş, %0 martensit). [13, 19]

Bu dört değişkenin ön değerleri, alaşımın kompozisyonundan önemli ölçüde etkilenir [18]. Yüksek sıcaklıkta, nitinol %100 östenit fazdır ve nitinol soğutulurken, martensit başlama sıcaklığına (M_s) ulaşır. Bu sıcaklığın altında, östenit faz miktarı yavaş yavaş düşer ve aynı zamanda, martensit faz miktarı artar. Nitinol daha da soğutulduğunda, nitinolün fazının %100 martensit olduğu, martensit bitiş sıcaklığının (M_f) altına geçer. Nitinol tekrar ısıtıldığında, sıcaklık-faz profili soğuma eğrisini izlemez fakat histeresiz (gecikme) davranışı gösterir. Soğutmada %50 martensit yapmak için gerekli sıcaklık ve ısıtmada %50 östenit yapmak için sıcaklıktan farklıdır ve farklılık histeresiz (T_h)

(gecikme) olarak tanımlanır. Histeresiz artarsa, şekil hafıza etkisi daha iyi olur ve nitinol, SMA'lar içerisinde en büyük histeresizi gösterir. Histeresiz değeri, M_s ve A_f arasındaki farklılığa çok yakın olarak oluşur ve gerçek uygulanabilir sıcaklığı bilmek için A_f 'nin kullanımı çok pratiktir [46]. Şekil hafıza etkisi sayesinde, A_s 'nin altındaki bir sıcaklıkta verilen görünür bir plastik uzama, kristalografik tersinir dönüşümden dolayı A_f 'nin üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılarak düzeltilmektedir [19]. Nitinolde, martensit fazı, östenitten daha yumuşaktır. Bu yüzden, martensit fazda, deformasyon kolayca yapılabilir ve alaşımın fazı ısıtmayla östenite döndüğü zaman bu deformasyon geri dönebilir (Şekil 6) [4-5].

Şekil hafıza etkisi **tek yönlü ve çift yönlü** olabilir. Malzemenin sadece ısıtma ile östenit faza geçiş yapmasına tek yönlü şekil hafıza etkisi, ısıtma ile östenit faza geçiş ve tekrar soğutma ile martensit faza geçiş yapması ve bu işlemin birçok kez tekrar edilebilmesi, yani, alaşımın hem yüksek sıcaklık şeklini hem de düşük sıcaklık şeklini, aynı anda, hafızasına almasına çift yönlü şekil hafıza etkisi denilir. Çift yönlü etki, malzemenin işlenmesi sırasındaki mekanik-ısı muameleleri ve bu muamelelerin kontrolü ile mümkün olmaktadır [4].



Şekil 6. Şekil hafızalı alaşımların iki fazının görünüşleri [3]

3.2. Şekil Hafızalı Alaşımların Uygulamaları

Şekil hafızalı malzemeler, önceleri, biyomedikal (süperelastik ve biyoyumlu) ve mühendislik (mukavemet ve korozyon direnci) (harekete geçiş malzemeleri (aktuatör) olarak) uygulamaları için kullanılmıştır [20]. Günümüzde ise tekstil ve uzay da olmak üzere çok farklı alanlarda hem günlük ürünlerin hem de endüstriyel malların pratik ve ileri düzey birçok uygulamasında kullanılmaktadır (Şekil 7-9) [3]. Cerrahi araçlar (stent, kısıkaç, elyaf), kılavuz telleri, ortodontik malzemeler, implante edilebilen cihazlar, ortopedik malzemeler [21-22] şekil hafızalı alaşımların biyomedikal uygulamalarına örneklerdir. Endüstriyel kullanımlarına örnekler ise, termal ve elektriksel aktuatörler, klimalardaki sensörler/aktuatörler, yangın koruma, devre sigortaları, gözlük çerçeveleri, telefon antenleri boru bağlantıları, sütyen alt telleri, sönüm ve titreşim kontrol

cihazlarıdır [3,23-26]. Bunların yanında, ev ve güvenlik cihazları, giysi ve tekstil uygulamaları, kara, uzay ve hava araçları ile robot sistemlerinde (yapay kas gibi) de kullanımları mevcuttur. Ayrıca, son yıllarda, makine-teçhizat, yapı malzemeleri, tıbbi cihazlar, endüstriyel ürünler için uygulamalarına, mikro-kısıkaç mikro-vana [27], mikro-endoskop [28], sinir kelepçeleri [29] protezler ve dokunsal göstergeler [30] örnek gösterilebilmektedir [4, 31-35].

CuZnAl-, FeNiAl-, NiTi gibi alaşımlar, tıpta kalp ve damarlara ilişkin stentler, kılavuz telleri ve ortodontik teller olarak kullanılmaktadır Nitinol, yüksek biyoyumluluk ve süperelastiklik özellikleri nedeniyle, cerrahi cihazların ve implantların üretimi için kullanılmaktadır. Cu-Zn-Al alaşımları, termal, elektriksel iletkenlik ve daha iyi sünme avantajlarının bir sonucu olarak genellikle tıbbi olmayan uygulamalarda kullanılır. Cu-Al-Ni, ve demir esaslı alaşımlar (örneğin Fe-Mn-Si, Fe-Cr-Ni-Si-Co, Fe-Ni-Mn, and Fe-Ni-C) şekil hafızası özellikleri açısından araştırılmış ve Fe-Mn-Si alaşımlar, özellikle, daha fazla sıkıştırma sağlamak için birlikte vidalandıktan sonra ısıtılabilen vidalanmış mafsallar gibi malzemelerde uygulamalar bulmaktadır [1,9].

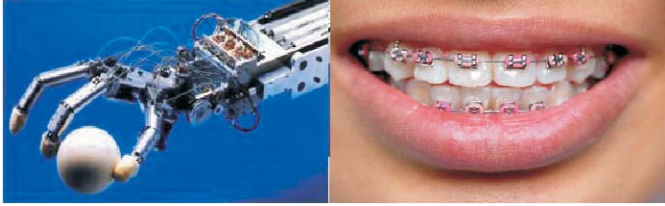


Şekil 7. Şekil hafıza fonksiyonlu sütyen, NiTi şekil hafızalı alaşım tel [36] ve şekil hafızalı lamba [37]

Şekil hafızalı alaşımlarla ilgili uygulamalarda, büyük ilerlemeler gerçekleşmesine rağmen [38], uygulamalarda hala bazı sıkıntılar oluşmaktadır. Tıp alanında kullanılan malzemeler, özellikle insanlarda kullanılan implantlar, uygulamaya bağlı olarak biyoyumlu, biyofonksiyonlu ve biyodayanıklı olmak zorundadır. İmplant olarak uzun süreli uygulamalarda kullanılan şekil hafızalı alaşımların dayanıklılığı ve güvenilirliği (hastaların vücutlarına etkileri gibi) ile ilgili literatürde ikna edici bir çalışma bulunmamaktadır. Alaşımlara, özel yüzey işlemleri veya kaplamalar uygulamak, herhangi potansiyel toksik kirlenmeden insan vücudunu korumak için uygun yöntemler olabilir. Şekil hafızalı alaşımların, daha yaygın kullanılabilmesi için daha düşük fiyatlı olması gerekmektedir. Şekil hafızalı alaşımların kullanılmasındaki problemlerden dolayı araştırmacılar, uygun özelliklerde (daha ekonomik, insanlar için güvenli, istenilen özelliklerde üretilebilen ve daha hafif) şekil hafızalı polimerlerin geliştirilmesi konusunda çalışmaktadırlar [3].



Şekil 8. Mobil telefon [39] ve protez bacak [40] uygulamalarında şekil hafızalı alaşımların kullanımına örnekler



Şekil 9. Robot el [41] ve Diş teli [42] uygulamalarında şekil hafızalı alaşımların kullanımına örnekler

Şekil hafızalı alaşımların mikroatüatör uygulamalarında ana tasarım hedefi, tersinir şekil değişimini başarmaktır. Şekil hafızalı alaşımlarda tersinir şekil değişimini tetikleyen mekanizmalar, dış kökenli (mekanik yapı ve iki tabakalı yapı ile) ve iç kökenli etki mekanizmaları olarak (iki yönlü şekil hafıza etkisi, tüm çevre etkisi, yerleşik tavlama, iyon fırlatma/bombardımanı (yerleşik amorflaştırma ve homojen olmayan yapılar üretmek için), özel işlemler (eriyikten çekim, çok tabakalı, biriktirme tekniği)) olarak açıklanmaktadır [31].

4. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN TEKSTİLLERDEKİ UYGULAMALARI

Şekil hafızalı malzemeler konusundaki (şekil hafızalı alaşım ve şekil hafızalı polimerler) son gelişmeler, araştırmacılara, çevresel değişimlere istenilen şekilde yanıt vermek için kendi kendini düzenleyen akıllı tekstillerin üretilmesi konusunda esin kaynağı olmaktadır. Şekil hafızalı malzemeler değişik formlarda tekstil malzemeleri ile birlikte kullanılmaktadır. Yüksek performanslı kumaş ve giysiler elde etmek için şekil hafızalı polimerler, tekstillere, lif, film ve köpük formlarında uygulanabilmektedir [43]. Şekil hafızalı polimer lif veya şekil hafızalı alaşım lif [44], lif formunda tekstillerde kullanılan şekil hafızalı malzemelerdir. Şekil hafızalı alaşım lif veya teller, belirli özellikleri alması için programlandıktan sonra, geleneksel tekstil lifleri ile birlikte kompozit ipliğe dönüştürülerek ve daha sonra, örülerek veya dokunarak ya da kumaş veya giysi içerisine entegre edilerek kullanılabilir. [44-46]. Şekil hafızalı alaşım tellerin tekstil yapısına yerleştirilmesi için kullanılan diğer bir metod da dikiştir [47]. Ayrıca, bu alaşımlar kompozit tekstil malzemesi yapımında da kullanılabilir.

Tekstil ürünlerinde hem iyi estetik görünüm hem de fonksiyonellik, şekil hafızalı alaşımlar kullanılarak sağlanabilir. Şekil hafızalı alaşımlar giysi üzerinde ilginç

ve canlı etkiler oluşturdukları için giyim endüstrisinde kullanılmaktadır. Ancak, şekil hafızalı alaşımın tekstil malzemesinde fazla miktarlarda kullanılması, tekstil yapısında, tutum ve dokunuşta istenmeyen bir etkiye neden olmaktadır. Alaşımın esnekliğinin tekstil için yeterli olmayışı, üretim ve tasarım işlemlerinde kısıtlamalara, iplik oluşumu, dokuma veya örme işlemleri boyunca problemlere neden olmaktadır [5]. Geleneksel tekstil liflerinin aksine, tel, sadece mekanik bir germe altında elastikiyet gösterir. Uzun süreli germe problemi ve ipliğin eğiliminden dolayı oluşan deformasyon, örme ya da karmaşık tekstil yapılarının oluşturulmasında sorunlar meydana getirmektedir. Şekil hafızalı alaşımların giysilerde kullanılması sadece yüzey özelliklerini değiştirmek için değil ayrıca giysi boyutlarını ve formunu değiştirmek ve kullanıcının gereksinimlerini karşılamak için de yapılmaktadır. Şekil hafızalı tekstil çalışmalarında, genellikle, dönüşüm, geri dönüş ve biyo-uyumluluk açısından üstünlüğü nedeniyle %50-%50 NiTi tel seçilmektedir. Bununla birlikte, NiTi'nin yapısı gereği, aksaklığa ve/veya şekil hafıza etkisinin azalmasına yol açan mekanik özelliklere sahiptir. Şekil hafızalı alaşımın kondüsyonlanması ve programlanması süresince göz önünde tutulması gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklarda titanyum oksitlenmeden sorumludur [11]. Bu yüzden, alaşım 400°C üzerine programlanırsa, soygaz atmosfer gerekebilir.

Şekil hafızalı malzemelerin, ilk teknik tekstil uygulamaları filtrasyonda ve damarlar için stentlerde gerçekleştirildi. NiTi örme kendi kendine genişleyen stentler ve yapılar en iyi bilinen örneklerdir. Şekil hafızalı alaşımlar içeren filamentler iplikler ve örülmüş multifilamentler, cerrahi cihazlarda kullanılmak için uygun şekilde adapte edilmektedir. Giysilik tekstillerde kullanımı nadirdir ve şekil hafızalı alaşımın herhangi bir şekilde dahil edilmesi ilk olarak malzemenin estetik görünümünü iyileştirmek için değil, fonksiyonellik geliştirmek amacıyla olmuştur. NiTi teller, eşsiz termomekanik özelliklere sahip örme ve dokuma akıllı tekstillerin (tıbbi tekstiller ve çeşitli şekil hafızalı koruyucu giysiler üretiminde kullanılabilir [48].

Nitinol tellerin tekstile entegre edildiği bir projeden örnek; bir gömlekte kullanılan şekil hafızalı alaşım sayesinde, vücut sıcaklığı arttığında, gömleğin kolları kendi üzerine sarılarak kısalır. Daha sonra saç kurutma makinasıyla ısıtılınca orijinal şekline geri döner (Şekil 10) [49]. Ayrıca, şekil hafızalı alaşım teller, şekillerini düzenlemek için, el çantaları ve bavullarda da kullanılmaktadır [4].

Berzowska ve ark. [45] çalışmalarında, NiTi tellerin dikilmesi ile kısılmanın olduğu çok hafif pamuktan parça içeren el yapımı ağır keçe ile oluşturulmuştur. Isıtılıncaya, Nitinol, kırışma etkisi yaratarak kumaşı, kendisiyle birlikte çeker. Malzemenin kalınlığı, ağırlığı, yarı saydamlığı ve yapısı gibi parametreleri, tekstilin davranışını (hareketini) etkilemektedir. Hazır nitinolün dönüşüm sıcaklığı, kumaşta

kullanılması için çok yüksektir. Nikel ve Titanyum kombinasyonunun elementsel oranlarını değiştirerek, alaşım farklı sıcaklıklarda şekil değiştirmek için ayarlanabilir [46]. Malzeme istenilen şekle kısaltılmalı ve ısıyla eğitilmelidir. Tipik olarak süperelastik malzeme için, ısı eğitimi 500 C'de yeterlidir. Rahat (martensit) halde, sargı (coil), düz tel haline gelir bu da kumaş haline, kolayca dokunmasına, dikiş yapılmasına ve keçeleştirilmesine izin verir. NiTi telde şekil 500C'de verildiği için, kumaşa entegre edildikten sonra şekil vermek mümkün değildir. Bu durum tasarım ve imalat olanaklarını kısıtlar. Şekil hafıza (östenit) durumuna ısıtılınca, Nitinol tel bükülmez hale gelir ve kendi ağırlığını birkaç defa kaldırmak için yeterli kuvvetle orijinal şekline geri döner. Farklı meototlardan sonra, iki metodun örme ve dokumaya göre daha üstün olduğu anlaşılmıştır. Bunlar nitinol teli, yünün içine keçeleştirme ve nitinolün keçeyle el ile dikilmesidir (Şekil 11) [45].



Şekil 10. Şekil hafızalı gömlek [37]



Şekil 11. Şekil hafızalı tel entegre edilmiş elbise tasarımı [45]

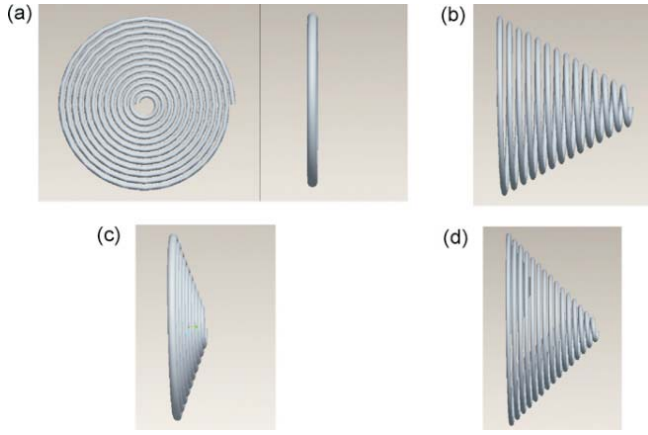
Bir patent uygulamasında, ütüleme ve vücut ısıyla ısıdıktan sonra göğsün şeklini alan sütyen geliştirmek için süper elastik şekil hafızalı alaşım kullanılmıştır. Aynı prensip, vücudun sıcaklığıyla göğsün şeklini tutma

yeteneğine sahip, hafızalı göğüs sütyeninde yer alan süper elastik bir malzeme tarafından da kullanılmıştır [18].

Liu ve ark. [50] tarafından şekil hafızalı teller, belirli bir oranda şekil hafıza etkisini kullanan pamuklu kumaş içine dokunmuştur ve sütyenlerin astarları sadece şekil hafızalı kumaştan veya sağlık fonksiyonu olan dolgu malzemeli kumaştan yapılmıştır. Böylece sütyenler şekil hafızalı etkiye sahip olarak sağlık için yardımcı bir fonksiyona sahip olmuştur. Kupta farklı oranda alaşım tele ve dolgulara sahip şekil hafızalı sütyenin geçirgenlik ve esnekliği araştırılmıştır. Pamukla dolgu yapılan astarlarla göre şekil hafızalı kumaşlar daha iyi şekil koruma, süngerli astarlarla karşılaştırıldığında ise şekil hafızalı sütyenin geçirgenliğinin daha iyi olduğu, elastik geri dönüş oranının ise yün ve pamuk veya pamuk ve kapok dolgulara yakın çıktığı görülmüştür. Alaşım telin oranının artması ile sütyenin şekil korunması da artmış ancak geçirgenlik düşmüştür.

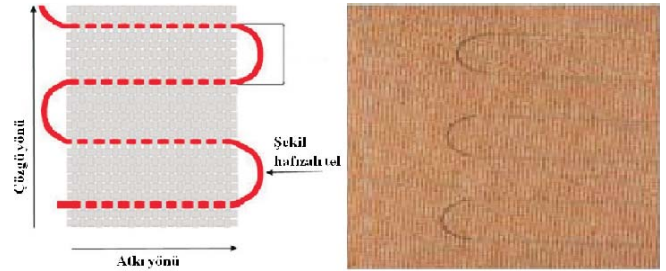
Çift yönlü şekil hafızalı alaşım yaylar, itfaiyeci giysilerine uygulanabilir. Kim ve ark. [51] şekil hafızalı alaşım yayları, iki yanmaz kumaş tabakası arasına yerleştirmiştir. Ortam sıcaklığında iken hafif ve ince olan giysi yüksek sıcaklıklarda, yeterli yalıtımı sağlamak için şekil hafıza etkisi sayesinde kalınlaşmaktadır. Şekil hafızalı alaşım yaylar, bimetal cihazlardan oluşan mevcut itfaiyeci ceketleri ile karşılaştırıldığında, daha iyi performans gösterebilmektedir. Koruma süresinde, %30 oranında artış olduğu rapor edilmiştir [4]. Özellikle itfaiye giysilerinde bir tabaka içerisinde bulunan şekil hafızalı malzemeler, belirli yüksek sıcaklıklarda, orijinal şekillerine dönerek, yalıtıcı bir tabakanın oluşmasına katkıda bulunur. Bu da insan vücudunu aşırı ısınmadan korumaktadır.

Yoo ve ark. [20] iki yönlü şekil hafıza etkisine sahip NiTi alaşım telden helis sargılarını, soğuk hava ceketini içerisine yerleştirmişlerdir. Dönüşüm sıcaklıkları $A_s = -8$, $A_f = 22$, $R_s = 5$, $M_s = -11$ and $M_f = -43$ şeklinde olan 1 mm çaplı NiTi alaşım tel kullanılmıştır. Soğuk hava ceketini, hisseden ve çevresel şartlara cevap veren akıllı yalıtım için yapılmıştır. Sargılar tavlanmıştır ve termomekanik olarak eğitilmiştir öyle ki, soğuk şartlar altında sargı adımı 10-15 mm ve ılık hava koşullarında sargı düzdür. Geliştirilen giysi, etkili hava yalıtımı, yalıtımın süresi ve çevre dostu olması gibi avantajlar sunmaktadır Ayrıca hiçbir güç destek sistemi olmadan kendi kendine operasyon yapar. Şekil hafızalı alaşım sargıların çift yönlü şekil hafıza etkisi, giysi sisteminin dinamik yalıtımı, kumaş seviye testleriyle, ılıktan soğuğa geçiş şartları altında araştırılmıştır ve bulgular subjektif giyim denemeleriyle doğrulanmıştır (Şekil 12-13)



Şekil 12. NiTi şekil hafızalı alaşım helis burgularının çift yönlü şekil hafıza etkisi eğitim prosedürü: (a) Spiral sargı konstrüksiyon jigi ile üretildi ve 450 C°'de 1 saat ısıtıldı sonra su ile soğutuldu (b) Spiral sargılar, martensit durumda (yer değiştirme: 25-30 mm) dış bir kuvvetle deforme edilir (c) A_f (ostenit durumdan) daha sıcak bir sıcaklığa ısıtıldıktan sonra, sargı şekli konik şekle değişir (d) R_s'den daha düşük bir sıcaklığa soğutulduktan sonra konik sargının yüksekliği c'ninkinden daha yüksek olur. [20].

tir. Yeterli geri dönüşü sağlayan ve estetik olma ve tekstil etkisi vermeyi sağlama açısından, uygun çapta şekil hafızalı alaşım telin ve tekstil ipliğinin seçilmesine, şekil hafızalı alaşım telin dokuma ve desen yerleşim düzenine özen gösterilmelidir. Ayrıca ilmekli iplikler ve kalın keten iplikler, şekil hafızalı alaşım telleri kamufle etmiştir. Ancak ince streç ilmek iplikler ve tek kat keten/pamuk iplikler sağlayamamıştır. Yapıdaki şekil hafızalı alaşım tellerin, kohezyonunu arttırmak için ve kırışıklık geri dönüş süresini azaltmak için otomatik tel yerleşimi sağlayan dokuma tezgahı kullanılabilir (Şekil 14).

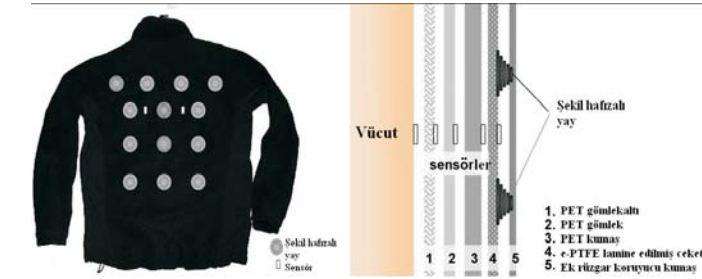


Şekil 14. Şekil hafızalı alaşım yerleştirilmiş hibrit kumaşın gösterimi [53]

Stylios ve ark. [54] şekil hafızalı alaşım nitinolü, tekstil substratlarına entegre etmişlerdir. Bu şekilde elde edilen ve dirençli ısıtma ve kontrol elektronikleri kullanan hareketli giysiler, zaman içinde hareket ve şekille değişmektedir (Şekil 15).



Şekil 15. Şekil hafızalı telin ve şekil hafızalı tel içeren kumaşın, zaman içerisinde sıcaklıkla şekil değişimi T=50°C: (a) 0 s; (b) 10 s; (c) 20 s [54]



Şekil 13. Ceket üzerinde TWSME sargıların ve sensörlerin yeri ve ceket enine kesiti [20].

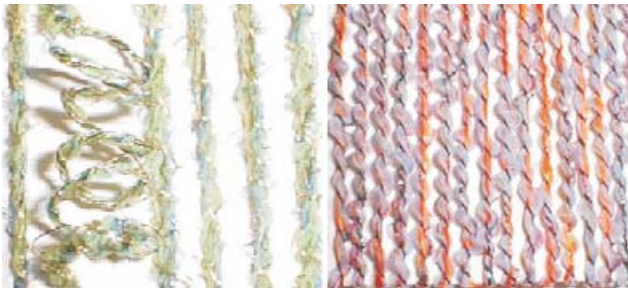
Endüstriyel tezgahlarda, paslanmaz çelik gibi metal tellerin dokunması, üzerine farklı çalışmalar mevcuttur. El dokuma tezgahı ve otomatik dokuma tezgahları kullanılarak, şekil hafızalı alaşım tellerin dokuma işlemiyle tekstil yapısı içerisine yerleştirilmesi konusunda da çalışılmıştır. Bousso ve ark. [52] tarafından şekil hafızalı alaşım bir kumaşın 100% NiTi ince telden (0,15 mm çaplı) dokunması ile ilgili bir çalışma yapılmıştır.

Vasile ve ark. [53] çalışmasında, tekstil ipliklerini (örneğin tek katlı pamuk veya keten pamuk iplikler, 2 katlı keten iplikler veya iki tip ilmekli fantezi iplikler) ve vücut sıcaklığında çalışan şekil hafızalı alaşım telleri (300 µm çaplı) kullanarak el dokuma tezgahı ve otomatik dokuma makinasında farklı tiplerde hibrit kumaş üretmişlerdir. Kalınlık, kırışıklık geri dönüşü, boyutsal kararlılık ve şekil hafızalı alaşım tellerin kumaştaki yerleşimi test edilmiştir. Teller atkı yönünde yerleştirilmiştir. Hibrit ve referans kumaşlar yıkamadan önce ve sonra ölçülmüştür. Yıkamadan sonra kalınlıkta bir artış görülmüştür. Kumaş tipine göre kırışmadan sonraki geri dönüş süresi değişmiştir. Şekil hafızalı alaşım tellerin kumaştan kaydığı fark edilmiş, bu iplik tipine, numaraya ve dokuma işlemine göre değişmiş-

Şekil hafızalı alaşımın estetik nitelikleri, onun mekanik özellikleri ile ilgilidir, dış görünüşü ile ilgili değildir, bu yüzden ipliklerin özü olarak kullanılır. Ayrıca, bitmiş tekstilin tutum ve dökümü de bununla ilgilidir. Şekil hafızalı alaşım ile birlikte kullanılan bilinen ipliklerin, şekil hafızalı alaşımın programlanması için gereken yüksek sıcaklıklara dayanması gerekmektedir. Şekil hafıza etkisi sağlanabilsin diye, şekil hafızalı alaşımı yüksek sıcaklıklarda örneğin 600 °C'yi aşan sıcaklığın üzerinde 4 saatlik bir periyotta programlamak gereklidir. Şekil hafızalı alaşım ile birlikte kullanılacak, geleneksel tekstil iplikleri, bu sıcaklıklara dayanıklı değildir. Bu işleme maruz kalmaları, yanmalarına, erimelerine ya da kavrulmalarına neden olur. Bu nedenler, şekil hafızalı alaşım ipliğinin özüne dahil edilmeden önce programlanır.

Chan Vili [55] şekil hafızalı alaşım ve polimerleri, dokuma kumaş yapısı içerisine eklenebilmesi için modifiye etmiştir. İplik eğirme işlemi aracılığıyla, hibrit karışımlar üretil-

miştir. İlk üretimler, çok fazla bükümlü ve boyutsal açıdan kararsızdır. Şekil hafızalı alaşımın konfigürasyonu, programlanmış şekline değiştiğinde, ipliğin merkezinden dışarı çıkmıştır. Büküm seviyeleri değiştirilerek ve farklı iplikler kullanılarak iplikler kararlı hale getirilmeye çalışılmıştır. Farklı kompozit iplik tipleri, farklı örme teknikleri için kullanılmıştır. Teli sarması ve telin iplik merkezinden çıkmasını engellemek açısından ince numaralarda, sentetik multifilament ve kesikli ipliklerden oluşan kompozit yapılar, tensel, poliester, viskoz ve poliamid içermektedir. 0,20 ve 0,30 mm çaplara sahip ve 50% nikel and 50% titanyumdan oluşan şekil hafızalı alaşım teller denemelerde kullanılmıştır. Büküm seviyesini belirlemek için telin ve kompozit ipliğin sarma durumu göz önünde tutulmuştur. Optik etkiler, yansıtıcı ışık özellikleri üretmesi için mat ve parlak, aydınlık ve karanlık ipliklerin bir arada kullanılması ile oluşturulmuştur. Dokuma kumaşlar, tezgahta, tekstil ve şekil hafızalı alaşım teller değiştirilerek üretilmiştir ve sıcaklık değişimini hissetme ve önceden verilen şekline geçiş yaparak yanıt verme yeteneğine sahiptir. Şekil hafızalı alaşımın şekil hafıza etkisini uyarması için en az 40 °C'lik sıcaklık gerekmektedir (Şekil 16)[55].



Şekil 16. Şekil hafızalı alaşımdan iplik üretimi [55]

Diğer bir araştırmada, tekstil kumaşlarında kullanılan NiTi şekil hafızalı alaşımlar için faz dönüşüm sıcaklığının düzenlenmesi için termomekanik özellikleri araştırılmıştır. Martensit (daha düşük sıcaklıklarda) şekil hafızalı alaşımın daha yumuşak ve kolay deforme olabilen fazıdır. Oysa östenit daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelen şekil hafızalı alaşımın daha güçlü fazıdır. Çalışmada, ticari 0,2 mm ve 0,3 mm çaplı şekil hafızalı alaşım teller kullanılmıştır (Şekil 17). Dönüşüm sıcaklıkları: $A_s=25,5$ °C, $A_f=46,5$ °C $M_s=10$ °C and $M_f=-14,5$ °C şeklindedir [18].



Şekil 17. Şekil hafızalı alaşımlar kullanılmış dokuma (a) ve örme (b) kumaş [5]

Zhang ve ark. [56] el dokuma tezgahında 100% nitinol parçalardan kompozitler için üretim yapmıştır, fakat atkının gerilim, eşit adım (pitch) gibi özelliklerini sabit tutmakta zorlanmışlardır. Bu nedenle araştırmacılar telleri hizada tutmak, uygun geometriyi ve atkı ve çözgüdeki baskıları ayarlamak için bir aparat geliştirmiştir.

Araştırmacılar, hibrit tekstil yapılarını poliamid, elastan ve farklı NiTi ince teller kullanarak üretmişlerdir. Üretim sırasında sırasında likra, atkı ve çözgü filamentleri olarak beslenmiş, PA/NiTi birleşik iplik ise içine yerleştirme tekniği ile kumaş üretilmiştir. Süperelastik NiTi tel 50 mikrometre çapa sahiptir, düz ve yılan benzeri formda tavlansmıştır. Yılan benzeri hafızalı forma sahip şekil hafızası kullanılmıştır. 140 mikrometre çapa sahip NiTi filamentle poliamid filament birleştirilmiştir. Likra ise değişen çaplarda kullanılmıştır. Yuvarlak örme makinası kullanılmıştır. NiTi filamentlerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi, üretilmiş kumaş üzerinden alınan örnekler ile test edilmiştir. Sıcaklığa bağlı yük altında uzaman geri dönüşü özellikleri ölçülmüştür. NiTi teller, belirli bir orta sertlik vererek eklemesnel onarımlarda yararlı olabilir ve malzemelerin eğilmezliğini arttırmaktadır. Ayrıca üretilen malzeme, önemli sönüm özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir [57].

Şekil hafızalı alaşımların tekstil kompozitlerinde de kullanımını yaygındır. Şekil hafızalı kompozitlerle ilgili çalışmalarda, şekil hafıza etkisi davranışının, kuvvetli bir biçimde malzemelerin termomekanik eğitimine ve kumaş tasarımında diğer esnek ve rijit malzemelerle şekil hafızalı malzemelerin katkısına bağlı olduğu gösterilmektedir [54].

Eillis ve ark. [58] karbon lifi/şekil hafızalı alaşım ve karbon lifi/spektra lifi kompozit malzemelerinin balistik çarpma özelliklerini araştırmışlardır. Malzemenin büyük deformasyonunun, yeterli mukavemette enerji emilimini arttırmak için yararlı olduğu bulunmuştur. Bu yüzden, balistik direnç özellikleri, ana çarpma (etki) tabakasının arkasında, yüksek uzama değerlerine sahip lif ekleyerek artırılabilir. Dokusuz yüzey kumaş yüksek uzamaya, daha az mukavemete sahiptir. Bununla birlikte, fazla uzama, kurşun koruma mekanizmasındaki, içe işlememe zararını azaltır. Filament ve sandviç takviyesinin daha iyi bir yastık etkisi üreteceği beklenmiştir. Tüm durumlarda, gömülmüş şekil hafızalı alaşım lifler, grafitten, uzama olmadan kurtulmuştur. Bunun, sert şekil hafızalı alaşım ile kırılğan epoksi reçine arasındaki uzama uyumsuzluğu ile yüksek uzama oranı etkilerinden kaynaklandığına inanılır. Bununla birlikte, polietilen ve polietilen/şekil hafızalı alaşım tabakaları eklenmesiyle enerji emiliminde önemli bir artış gözlenmiştir.

Sepiani ve ark. [59] şekil hafızalı alaşım-dokuma kompozitlerin iki eksenli yükleme altında gösterdiği mekanik davranışını araştırmıştır. Raghavan ve ark. [60] süperelastik şekil hafızalı alaşım liflerin potansiyelini, sönüm kapasitesini ve termosetini, polimer matriksin dayanımını sağlamak için değerlendirmişlerdir. Bu amaçla, tek lif sarıcı tasarlanmıştır ve 102 µm çapa sahip

birbirine paralel olarak hizalanmış şekil hafızalı alaşım lifleri içeren bir ön biçim imal edilmiştir. %20 lif hacmine sahip şekil hafızalı alaşım lif kompozitleri üretmek için, ön biçime, değişen miktarlarda ön gerilme yüklenmiştir ve vinil ester emdirilmiştir. Kompozitlerdeki SMA lifler nedeniyle, polimer matriksin sönüm kapasitesindeki iyileşme, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve dinamik mekanik analiz (DMA) kullanılarak test edilmiştir. Gerilme ve aletli darbe deneyi testi, kompozitlerin mekanik özellikleri ve dayanıklılığındaki iyileşmeleri değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Şekil hafızalı alaşım lifleriyle takviye sayesinde, polimer matriksin sönüm, gerilme ve çarpma özelliklerinde iyileşme gözlenmiştir.

Lif takviyeli kompozit malzemeler, matriks kırılması ve yapraklanması nedeniyle zarar görmeye duyarlıdır. Bor ve ark. [61] araştırmalarında, içine şekil hafızalı alaşım teller yerleştirilmiş kompozit bir malzemenin, yerel ısıtma uygulanması ile oluşan zararı iyileştirmesini desteklemek amacıyla kullanımını anlatmaktadır. Kompozit malzeme, yükseltilmiş sıcaklıkta iyileştirmeye izin veren termoplastik matriks içerir. Düzlem dışı yöne ortanyante olmuş şekil hafızalı alaşım tellerle dokuma işlemi, ısıtma ile meydana gelen yapraklanmayı kapatmak için kullanılır. Şekil hafızalı alaşım tel bölümünün etkisi, şekil hafızalı alaşım tellerin ön gerilim derecesi, amorf termoplastik matriksin cam geçiş sıcaklığı ve iyileştirme sıcaklığı konuları araştırılmıştır. Yapraklanma, sıcaklık iyileştirme sıcaklığına yükseltilirken kompakt (sıkı) hale gelir. Termoplastik matriksin termal (1s1) genişleme katsayısı, ısıtma ile kompozit malzemede şekil hafızalı alaşım tellerin olduğundan daha büyüktür. Şekil hafızalı alaşım tellerin ön gerilmesinin, iyileştirme sıcaklığında yapraklanma arayüzlerinde basma gerilmesi sağlamak için öncelikli olmadığı belirtilmektedir. Sonunda ise, yüksek mukavemetli tellerin, şekil hafızalı alaşım tellerin yerini alabileceği belirtilmiştir.

5. SONUÇ

Şekil hafızalı malzemelerdeki son gelişmeler, bilim insanlarına geleneksel tekstil malzemeleriyle, şekil hafızalı malzemelerin özelliklerini birleştirerek, yapı ve performansını kendi kendine düzenleyen akıllı tekstillerle geliştirmeleri için ilham vermektedir. , SMA'ların yüksek sıcaklıklarda eğitilebilmeleri, akıllı tekstil ürünleri geliştirmedeki en önemli kısıttır. Estetik nitelikler açısından şekil hafızalı alaşımın kararlılığının sağlanması, optimum tel çapının belirlenmesi, eğrilebilirlik, ve örme işlemine uygunluk gibi konuların üstesinden gelinmelidir. Önceki çalışmaların çoğunda, şekil hafızalı alaşımın tekstile performans ve fonksiyonellikten çok estetik katkısı üzerinde durulmuştur. Örneğin estetik olarak daha az kırışıklığa sahip keten/pamuk kumaşlar yaratmak için şekil hafızalı alaşımın kullanılması, kullanım ve görünüm açısından oluşacak dezavantajları giderebilir. Vücut sıcaklığına maruz kalınca, kendi (düz) formunu geri kazanan, vücut sıcaklığında çalışan şekil hafızalı alaşım bu amaçla kullanılabilir. Vücut sıcaklığına, saç kurutma makinasına

veya elektrik akımının yarattığı sıcaklığa maruz kalınca kırışıklığı giden hibrit yapıların uygulamalarına, giysiler ve yatak örtüleri potansiyel olabilir. Bunun yanında itfaiyeci giysileri gibi işlevsel amaçlar için şekil hafızalı alaşımın kullanılmaları konusunda farklı araştırmalar yürütülmektedir. Kumaşlara ve özellikle örme yapılara şekil hafızalı malzemelerin dahil edilmesi üstün performans ve konfor özelliklerine sahip yeni tekstil/giysi formlarının (spor giysileri ve bandajlar gibi) oluşmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Lendlein, A. ve Kelch, S., (2002). *Shape memory polymers*, *Angew. Chem. Int. Ed.* 41, 2034-2057.
2. Culshaw, B., (1996), *Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, Artech House Publisher.
3. Hu, J., (2007), *Shape memory polymers and textiles*, Woodhead Publishing Limited, CRC Press, ABD.
4. Gi Cho, C. (2010). *Shape memory material*, in: *Smart Clothing Technology and Applications*, Ed.: Gilsoo Cho, CRC Press, Taylor & Francis Group, USA.
5. Lam Po Tang, S. ve Stylios, G. K., (2006), *An overview of smart technologies for clothing design and engineering*, *International Journal of Clothing, Science and Technology*, 18(2), 108-128.
6. Jiang, H., Kelch, S. ve Lendlein, A., (2006), *Polymers Move in Response to Light*, *Adv. Mater.* 18, 1471-1475.
7. Srinivasan, A. V. ve McFarland, D. M., (2001), *Shape Memory Alloys*, *Smart Structures*, Cambridge University Press, 26-72.
8. Mattila, H. R., (2006), *Intelligent textiles and clothing*, Chapter 6-7. Boca Raton, FL: CRC Press.
9. Lendlein, A., (2001), *Tailor-made intelligent polymers for biomedical applications*, in *Smart fibres, fabrics and clothing*, Ed.: Xiaoming Tao, CRC, Woodhead Publishing, ABD.
10. Winchester, R. C.C. ve Stylios, G.K., 2003, *Designing knitted apparel by engineering the attributes of shape memory alloy*, *International Journal of Clothing Science and Technology*, 15, 5, 359-366.
11. Otsuka, K., ve Wayman, C.M. (Eds.), (1998), *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
12. Tsigaridi, D. ve Powell, M., *SMA Variables, Directing Kinesis*, ambient.media.mit.edu/transitive/ubicomp07papers/tsigaridi.pdf
13. Akdoğan, A. ve Nurveren, K., *Şekil Hafızalı Alaşım*, *Mühendis ve Makine*, 44(521), 35-44.
14. Fuentes, J. M. G., Guempel, P. ve Strittmatter, J., (2002), *Phase change behavior of nitinol shape memory alloys: Influence of heat and thermomechanical treatments*, *Advanced Engineering Materials*, 4(7), 437-51.
15. Delaey, L., (1991), *Phase transformations in Materials*, in: *Material Science and Technology*, Cahn, R.W., Haasen, P. ve Kramer, E.J. (Eds.), vol. 5, VCH, Weinheim.
16. Otsuka, K. ve Ren, X., (2005), *Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys*, *Prog. Mater. Sci.* 50, 511-678.
17. Jackson, C.M., Wagner, H.J. ve Wasilewski, R.J., (1972), *55-Nitinol- The alloy with a memory: Its physical metallurgy, properties, and applications*, NASA-SP 5110, ABD.
18. Stylios, G. K. ve Wan, T., (2007), *Shape memory training for smart fabrics*, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 29, 3/4, 321-336.

19. Otsuka, K. ve Ren, X., (1999), *Recent developments in the research of shape memory alloys*, *Intermetallics* 7, 511-528.
20. Yoo, S., Yeo, J., Hwang, S., Kim, Y.H., Hur, S.G. ve Kim, E., (2008), *Application of a NiTi alloy two-way shape memory helical coil for a versatile insulating jacket*, *Materials Science and Engineering A*, 481-482 662-667.
21. Greninger, A. B. ve Mooradian, V. G., (1938), *Strain transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper-tin alloys*, *Trans. AIME*, 128 337.
22. Buehler, W. J. ve Wang, F. E., (1967), *A summary of recent research on the Nitinol alloys and their potential application in ocean engineering*, *Ocean Eng.*, 1, 105.
23. Thierry, B., Tabrizian, M., Trepanier, C., Savadogo, O. ve Yahia, L. H., (2000), *Effects of sterilization processes on NiTi alloy: surface characterization*, *J. Biomed. Mater. Res.*, 51, 685.
24. Miao, W., Mi, X., Zhu, M., Guo, J. ve Kou, Y., (2002), *Effect of surface preparation on mechanical properties of a NiTi alloy*, *Mater. Sci. Forum*, 394-395, 173.
25. Es-Souni, M., Es-Souni, M. ve Fisher-Brandies, H., (2002), *On the properties of two binary NiTi shape memory alloys*, *Biomaterials*, 23, 2887.
26. Shabalovskaya, S. A., (2002), *Surface, corrosion and biocompatibility aspects of Nitinol as an implant material*, *Biomed. Mater. Eng.*, 12, 69.
27. Johnson, A.D. ve Martynov, V.V. (1997). *Proc. 2nd Int. Conf. Shape Memory Superelastic Technol.*, Pacific Grove, CA, 149-154.
28. Kaneko, S., Aramaki, S., Arai, K., Takahashi, Y., Adachi, H. ve Yanagisawa, K., (1996), *Multifreedom tube type in manipulator with SMA plate*, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 7, 331-335.
29. Takeuchi, S. ve Shimoyama, I., (2000), *A Three-Dimensional Shape Memory Alloy Microelectrode with Clipping Structure for Insect Neural Recording*, *J. MEMS*, 9, 24-31.
30. Fischer, H., Trapp, R., Schüle, L. ve Hoffmann, B., (1997), *Actuator Array for Use in Minimally Invasive Surgery*, *J. Phys. IV France 7*, C5-609-614.
31. Bellouard, Y., (2008), *Shape memory alloys for microsystems: A review from a material research perspective*, *Materials Science and Engineering A*, 481-482, 582-589.
32. Dotter, C. T., Buschmann, R. W. ve McKinney, M. K., (1983), *Transluminal expandable nitinol coil stent grafting: preliminary report*, *J. Rosch, Radiology*, 147, 259.
33. Cragg, A. ve Lund G. (1983), *Nonsurgical placement of arterial endoprosthesis: a new technique using nitinol wire*, *Radiology*, 147, 261.
34. Oesterle, S. N., Whitbourn, R. ve Fitzgerald, P. J., (1998), *The stent decade: 1987 to 1997*, *Am. Heart J.* 136, 578.
35. Schwarzenberg, H., Muller-Hulsbeck, S. and Gluer, C. C., Wesner, F., ve Heller, M., (1998), *Restenosis of peripheral stents and stent grafts as revealed by intravascular sonography: in vivo comparison with angiography*, *AJR Am J Roentgenol.*, 170(5):1181-5.
36. Ni-Ti Shape Memory Alloy Shaper Bra Wire: http://www.pcrkj.com/en/product_view_13_138.html
37. Shape memory alloy, <http://scienceoftheday.blogspot.com/2010/06/shape-memory-alloy-shape-memory-is.html>
38. Anson, T., (1999), *Shape Memory Alloys - Medical Applications*, *Materials World*, 7, 12, 745-747.
39. <http://gadgets.infoniac.com/rfr-iphone-next-concept.html>
40. Pittaccio S, Viscuso S, Beretta E, Turconi AC, Strazzer S., (2010), *Pilot studies suggesting new applications of NiTi in dynamic orthoses for the ankle joint*, *Prosthet Orthot Int.* 34(3), 305-18.
41. <http://www.fujie.mech.waseda.ac.jp/index.php?MGFujie>
42. <http://www.business-opportunities.biz/2009/08/10/originally-invented-for-space-travel/>
43. Tao, X., (2001), *Smart fibres, fabrics and clothing*, CRC, Woodhead Publishing, ABD.
44. Yan, L., Aggie, C., JinLian, H., ve Jing, L.V., (2007), *Shape memory behavior of SMPU knitted fabric*, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 8(5):830-834.
45. Berzowska J., ve Coelho, M., (2005), *Kukkia and Vilkas: Kinetic Electronic Garments*, *Proceedings of the 2005 Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05)*, IEEE.
46. <http://en.wikipedia.org/wiki/Nitinol>
47. www.marielleleenders.nl
48. Sedlak, P., Sittner, P., Landa, M., Frost, M., ve Heller, L., (2007), *Modeling superelastic NiTi wire structures*, *E-MRS Fall Meeting 2007, Symposium E*, Warsaw University of Technology, Poland, www.science24.com/paper/11479
49. <http://www.gzespace.com/Oricalco.html>
50. LIU, X.-X., WANG, L.-J., ZHANG, M.-N., (2009), *Development on health bra by shape memory alloy fabrics*, *Journal of Tianjin Polytechnic University*, DOI: CNKI:SUN:TJFZ.0.2009-06-017.0.2009-06-017.
51. Kim, E. A., Jee, K. K., Kim, Y. B., ve You, S. J., (2008), *Coil spring having two-way shape memory effect and the fabrication method thereof, and adiabatic product using the same*, *W/0/2008/088197*.
52. Boussu, F., Bailleul, G., Petitniot J.-L. and Vinchon, H., (2002), *Development of shape memory alloy fabrics for composite structures*, *AUTEX Res J*, No1, page 1-7.
53. Vasile S., Grabowska K. E., Ciesielska I. L., ve Githaiga, J., (2010), *Analysis of Hybrid Woven Fabrics with Shape Memory Alloys Wires Embedded*, *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe* 18, 1(78), 64-69.
54. Stylios G. K., ve Wan T.; *Shape memory training for smart fabrics*, on <http://tim.sagepub.com/cgi/content/abstract/29/3-4/321> visited on 12/02/09.
55. Chan Vili, Y.Y.F., (2007); *Investigating Smart Textiles Based on Shape Memory Materials*, *Textile Research Journal*, 77; 290.
56. Zhang, R.X., Ni, Q.Q., Masuda, A., Yamamura, T., Iwamoto, M., (2006), *Vibration characteristics of laminated composite plates with embedded Shape Memory Alloys*, *Composite Structures*, Elsevier Science Publishing Company, Inc., 74, 389-398
57. Villa, E., Arnaboldi, S., Tuissi, A., Giacomelli, M., ve Turco, E., (2009), *Mechanical Analysis of Hybrid Textile Composites with NiTi Wires*, *Journal of Materials Engineering and Performance (JMEPEG)* 18(5-6) 517-521.
58. Ellis, R. L., Lalonde, F., Jia, H., Rogers, CA, (1998), *Ballistic impact resistance of SMA and spectra hybrid graphite composites*, *J. Reinforced Plastics Composites* 17, 147-164
59. Sepiani HA. ve Ghazavi, A., (2009), *A thermo-micro-mechanical modeling for smart shape memory alloy woven composite under in-plane biaxial deformation*, *Int J Mech Mater*, 5:111-122.
60. Raghavan, J. Bartkiewicz, T., Boyko, S. Kupriyanov, M., Rajapakse, N., ve Yu, B., (2010), *Damping, tensile, and impact properties of superelastic shape memory alloy (SMA) fiber-reinforced polymer composites*, *Composites: Part B*, 41 214-222.
61. Bor, T.C., Warnet, L., Akkerman, R. ve de Boer, A., (2010), *Modeling of Stress Development During Thermal Damage Healing in Fiber-reinforced Composite Materials Containing Embedded Shape Memory Alloy Wires*, *Journal of Composite Materials*, 44: 2547.