

# ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

*Ayşegül AKDOĞAN \* Kemal NURVEREN \*\**

\* Prof.Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi ABD.

\*\* Arş.Gör., Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi ABD.

*Şekil hafızalı alaşım terimi, uygun ısı ve mekaniksel prosedürlere maruz kaldığında önceden tanımlı şekil veya boyutuna geri dönebilme yeteneği gösteren metalik malzeme grupları için kullanılır. Şekil hafızalı alaşım kararlı iki faza sahiptir. Bu fazlar ostenit olarak isimlendirilen yüksek sıcaklık fazı ve martenzit olarak isimlendirilen düşük sıcaklık fazıdır. Şekil hafızalı alaşım; birkaç yüzde değerinde tersinebilir gerilme, yüksek toparlanma gerilmesi üretimi ve yüksek güç/ağırlık oranı gibi çekici potansiyel özellikler sunar. Bu makalede, şekil hafızalı alaşımlara ve sahip oldukları fonksiyonlara genel olarak değinilmiştir.*

**Anahtar sözcükler :** Şekil hafızalı alaşım, şekil hafıza etkisi, termoelastik martenzitik dönüşüm, Süperelastisite, Endüstriyel Uygulamalar.

*The term shape memory alloy(SMA) is applied to that group of metallic materials that demonstrate the ability to return to some previously defined shape or size when subjected to the appropriate thermal and mechanical procedures. The SMAs have two stable phases - the high temperature phase, called austenite and the low temperature phase, called martensite. Shape memory alloys offer attractive potentials such as reversible strains of several percent, generation of high recovery stresses and high power/weight ratios. This text gives an overview of the SMAs and their functions.*

**Keywords:** Shape memory alloy, shape memory effect, thermoelastic martensitic transformation, superelasticity, Industrial applications.

## GİRİŞ

Malzeme biliminde uygun bir ısı prosedür ile gerçek şekline veya boyutuna geri dönebilme yeteneğine sahip metalik malzemeler, şekil hafızalı alaşım olarak isimlendirilir. Şekil hafızalı alaşım ısı değişimlere duyarlı fonksiyonel malzemelerdir. Temel karakteristikleri, kritik dönüşüm sıcaklığının üzerinde ve altında iki farklı şekil veya kristal yapısına sahip olmalarıdır. Nispeten düşük sıcaklıklarda deforme edilebilen bu malzemeler, daha yüksek sıcaklıklarda deformasyon öncesi şekillerine dönebilmektedirler. Bu malzemeler sadece ısıtma halinde "tek yönlü şekil hafızaya sahip malzemeler" olarak tanımlanırken, yeniden soğutma halinde ise "iki yönlü şekil hafızalı malzemeler" olarak tanımlanmaktadır[1].

Şekil hafızalı alaşımların çoğu termoelastik martenzitik yapı sergileyen malzemelerdir. Martenzitik yapı şekil hafızalı alaşım, dönüşüm sıcaklığının altında ikizlenme ve kayma mekanizmaları ile deforme edilebilir. Ana faza dönüşüm için ısıtma uygulandığı zaman ikizlenmiş olan yapı eski haline döner, dolayısıyla deformasyon yok edilebilmektedir

Uygulamada şekil hafıza etkisi gösteren çok sayıda alaşımların olduğu bilinmekle birlikte bunlar arasında en çok ilgi görenler nikel-titanyum alaşımları ve bakır esaslı alaşımlardır (Tablo 1)

*Tablo 1. Şekil Hafızalı Alaşımlara Ait Bazı Özellikler*

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	-140~100	35
	3-4.5 %Ni		
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

Bu alaşım sistemlerinden NiTi ve bakır esaslı birkaç alaşım üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır.Öte yandan bu alaşımlara olan ilginin yüksek olmasının nedeni olarak, şekil değişimi esnasında önemli büyüklükte kuvvet üretebilmeye sahip olmaları söylenebilir.

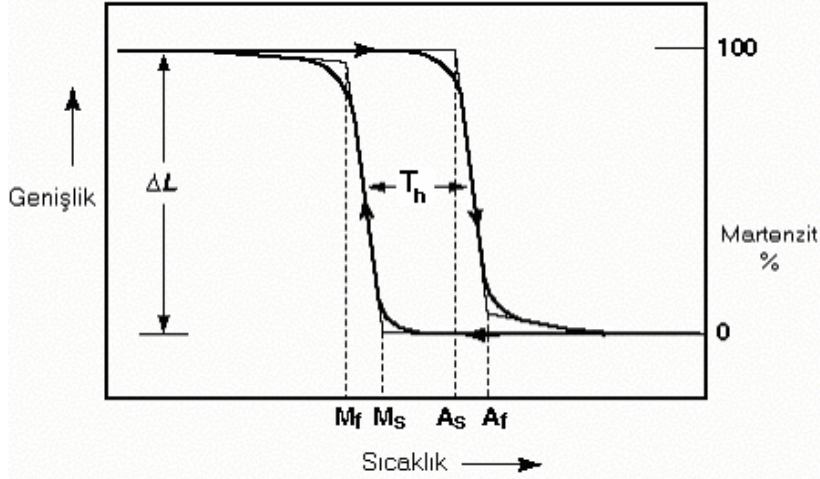
Şekil hafızalı dönüşüm ilk kez AuCd alaşımlarında 1932 yılında Chang ve Read tarafından anlaşılmış, 1938'de de söz konusu yapısal dönüşüm piring malzemedeki olduğu görülmüştür. 1951 yılında ise AuCd alaşım bir çubukta şekil hafızası tespit edilmesinden sonra 1962'de Buehler ve arkadaşları tarafından eş-atomlu nikel titanyum alaşımlarda şekil hafıza etkisi belirlenmiştir.Bunun sonunda bu alaşımların hem ticari kullanımına, hem de metalurjik araştırmalarına hız verilmiştir.

Günümüzde ise şekil hafızalı alaşımlar, eş zamanlı algılayıcılar ve eyleyiciler olarak kullanıldığından büyük ilgi çekmektedir.Bunun sonucu olarak, çok kullanılan şekil hafızalı alaşımların detaylı bir şekilde açıklanması bu makalede amaç olmuştur.

## **ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN GENEL KARAKTERİSTİKLERİ**

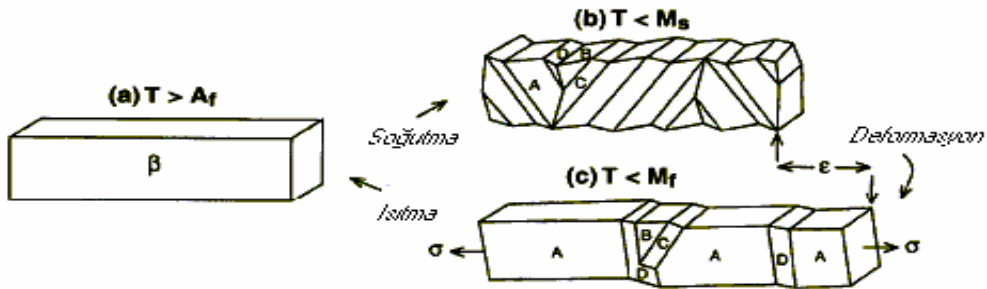
Şekil hafızalı alaşımlarda, yüksek sıcaklıktaki ostenitik fazın uzun süren dönüşümü sonucunda termoelastik martenzitin meydana gelmesi işlemi martenzitik dönüşüm olarak isimlendirilir.Atomların yer değiştirme miktarı çok büyük olmamasına rağmen, hepsinin birden hacimsel yönde aynı doğrultuda taşınmasından dolayı, dönüşüm sonucunda makroskopik bir şekil değişimi gerçekleşir. Sonuç olarak normal metal ve alaşımlardan farklı niteliklere sahip olan şekil hafıza etkisi ve süperelastisite gibi eşsiz ve üstün özellikler açığa çıkar[3].

Her alaşımın katılaşma sıcaklığı farklı olduğundan martenzitik donsm, belirli bir sıcaklık aralığında tamamlanmaktadır (Şekil 1). Donsmn başlangış ve bitişi gerçekte geniş bir sıcaklık aralığını kapsamasına rağmen çoğu zaman dar bir sıcaklık aralığında meydana gelmektedir. Donsm sürecinde ısıtma ve soğutma sıcaklıkları arasında oluşan fark histerizis olarak isimlendirilir ve alaşım sistemine bağlı olarak değişir.



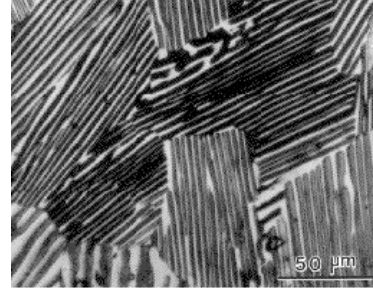
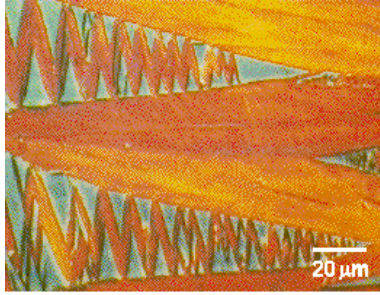
**Şekil 1.** Sabit Yük Altındaki Bir Numunedeki Isıtma ve Soğutma Durumunda Tipik Donsm-Sıcaklık Eğrisi.  $T$ : sıcaklık;  $T_h$ : donsm histerizisi;  $M_s$ : martenzit başlangıcı;  $M_f$ : martenzit bitişi;  $A_s$ : ostenit başlangıcı;  $A_f$ : ostenit bitişi.

Bilindiği gibi termoelastik martenzit, düşük sıcaklık ya da gerilme değişimleri ile harekete geçebilen düşük enerjisine ve parlak arayüzeyine gore karakterize edilir. Bunun sonucu olarak termoelastik martenzit, donsm esnasında simetri kaybı yüzünden sınırlandırılmış olarak tersinebilir. Atermal martenzitin balıksırtına benzer Őekildeki yapısı esasen kendiliğinden Őekillenen nitelerin etkileşimli kaymış halidir (Şekil 2b). niteler arasındaki Şekil değişimi, ünitelerin birbirini pasifleştirmesine neden olduğundan küçük değerde makroskopik bir gerinim açığa çıkar. Gerilme kaynaklı martenzit oluşumu durumunda veya gerilme ile kendiliğinden yerleşen bir yapı durumunda bu üniteler biçimini değiştirebilir ve uygulanan gerilme doğrultusunda meydana gelen en büyük Şekil değişimi kararlı hale gelene dek değişim devam eder. Sonuç olarak Şekil 2c'de gorleceği üzere birim ünite mevcut konfigürasyonda egemen olur. Bu süreç sonunda yaratılan makroskopik gerinim, tersine donsm sayesinde kristal yapının ostenite geri donşmesi sonucu geri kazanılabilir [2].



**Şekil 2.** T:Sıcaklık; (a) Beta fazlı kristal; (b) Soğutma ve martenzite dönüşüm sonrası kendiliğinden yerleşen A,B,C ve D ikizlenmiş üniteler; (c) A ünitesi uygulanan gerilme sonunda konfigürasyonda egemen olur ve ısıtma durumunda malzeme beta fazlı yapısına dolayısıyla orijinal şekline yeniden döner.

Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3'de ise bakır esaslı ve nikel esaslı alaşımlara ait optik mikroskop altında çekilmiş yapı fotoğrafları verilmiştir.



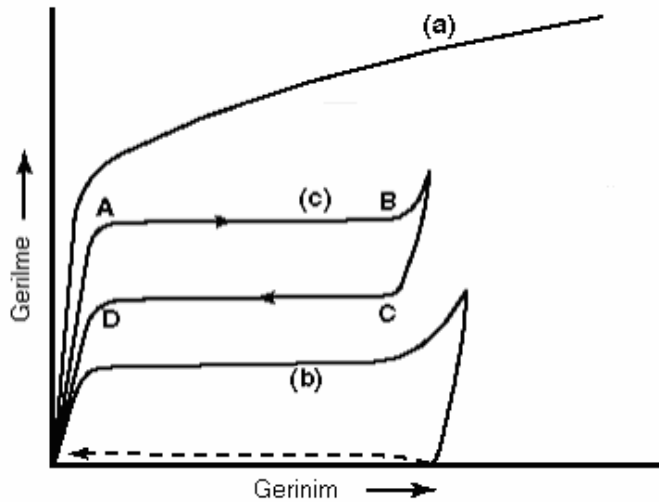
(a)  
(b)

**Şekil 3.** Çeşitli Şekil Hafızalı Alaşımlarda Görülen Yapı Görüntüleri.

(a) Bakır esaslı şekil hafızalı bir alaşımda martenzitik yapı. (b) Ti-Al bir alaşımda TiAl ve Ti<sub>3</sub>Al fazlara ait yapraklı (lameler) yapı[<sup>4</sup>].

## ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN ISIL KARAKTERİZASYONU

Şekil hafızalı alaşımların mekanik özellikleri, belirli bir sıcaklık aralığında gerçekleşen yapısal dönüşümlerine bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Bu durum, nikel-titanyum alaşımına ait gerilme-gerinim eğrisinde kolayca görülebilir (Şekil 4).



- (a) Ostenit  
(b) Martenzit  
(c) Sankielastik

(süperelastik)

davranışlar

**Şekil 4.** Farklı Sıcaklıklarda Dönüşüme İlişkin Tipik Gerilme-Gerinim Eğrileri[<sup>3</sup>].

Bu şekil alaşıma ait dönüşüm sıcaklık aralığında, dönüşüm sıcaklığının altında ve üzerinde NiTi alaşımlı numuneye çekme testi uygulanması sonucunda oluşturulmuştur. Bilindiği gibi martenzit, oldukça düşük bir gerilme değerinde dahi birkaç yüzde gerinim üretecek şekilde kolaylıkla deforme edilebilmektedir. Oysa yüksek sıcaklık fazı olan ostenit daha fazla akma dayanımına sahip olduğundan kolaylıkla deforme edilemez özellik gösterir. Şekilde martenzit eğrisi üzerindeki kesikli çizgi gerilmenin ortadan kalkmasından sonra ısıtma durumunu işaret etmektedir. Numunenin malzeme yapısı ostenite dönüştüğünde şekil değişiminin olmadan önceki şeklini hatırlaması ile orijinal boyutlarına korunur. Ostenit fazda iken ısıtma veya gerinme olması geri kazanılabilir bir şekil tutumu sağlamaz. Çünkü yapıda faz değişimi meydana gelmemektedir.

Şekil 4a'da malzeme ostenit sıcaklığının üzerinde, Şekil 4b'de ostenit sıcaklığında incelenmiştir. Şekil 4c'de ise martenzit sıcaklığında incelenmiştir. Bu sıcaklıkta, martenzit gerilme kaynaklı olabilmekte ve hemen şekil değiştirmeye başlayarak, AB hattı boyunca sabit bir gerilme altında artan bir gerinim sergilemektedir. Yüksüz durumda azalan gerilmeye rağmen malzeme CD hattı boyunca görüleceği üzere daha düşük bir gerilme seviyesinde ostenite dönüşerek şeklini alır. Şekil kazanımı ısı uygulanmasından değil gerilme azalmasından dolayıdır. Bu etki malzemenin aşırı elastik olmasının bir sonucudur ve süperelastisite olarak bilinir. Süperelastiklik lineer olmayıp, söz konusu sıcaklık aralığında hem gerilme hem de gerinime bağlı olduğundan alaşımın Young modülünün belirlenmesi çok zordur.

Çoğu durumlarda hafıza etkisi tek yönlüdür. Yani soğutma durumunda şekil hafızalı alaşım, yapısal olarak martenzit fazlı yapıya dönüşmesine rağmen herhangi bir şekil değişimi sergilemez. Martenzit yapıdaki gerinim miktarı birkaç yüzde değerinde olup malzeme ısıtılınca kadar bünyede tutulur ve ısı uygulanınca şekil kazanımı gerçekleşir. Yeniden soğutma durumunda şekil değişimi kendiliğinden olamayacağından eğer şekil kazanımı isteniliyorsa o zaman malzeme, harici olarak gerinmeye maruz bırakılır.

Şekil hafızalı alaşımların bazılarında iki yönlü şekil hafızayı görmek mümkündür. Bu tip alaşımlarda hem ısıtma hem soğutma durumunda şekil değişimi söz konusudur. Burada şekil değişiminin büyüklüğü daima tek yönlü hafızalı alaşımlardan elde edilene nispeten oldukça azdır. Alaşım çok küçük gerilme kullanarak düşük sıcaklıktaki şekline dönmeye çalışır. Isıtma durumunda şekil değişimi için tek yönlü alaşımlara göre çok yüksek gerilmeler harcanabilir.

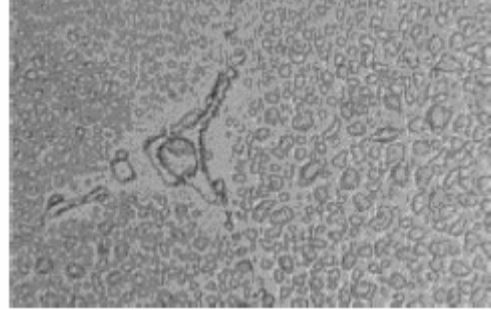
Öte yandan yapılan ısı işlemlerin ve uygulanan mekaniksel metotların çoğu iki yönlü şekil hafıza etkisine sahip alaşımlar üretmeye yöneliktir. Amaç tam ve net bir şekil değişimi elde etmeyi sağlayacak olan mikroyapısal gerilmeler üretmektir. Bunun içinde soğuk halde malzeme şekillendirilerek yapıda düzgün sıralı, yoğun martenzit tabakaları oluşturulmalıdır.

Şekil 5'de nikel esaslı şekil hafızalı bir alaşımda ısı işlem uygulanmadan önce ve sonra elektron tarama mikroskopunda 1000X büyütme ile çekilmiş yapılar görülmektedir. Alaşımın kimyasal bileşimi, Ni 65.5%, Cr 9.2%, Co 9.1%, Al 5.1%, Ti 4.5%, Mo 2.5%, Fe 0.06%, ve C<0.02% şeklindedir. Bu bileşim, gaz türbinlerinin rotor kanatlarında en çok kullanılan alaşımı oluşturur[5].

Şekil 5'ten görüleceği gibi, ısıtılma işleminden önce iğnemsî bir yapıya sahip olan alaşım sisteminde, ısıtılma işleminden sonra küresel tanecikler teşekkül etmiştir. Bu yeni yapı muhtemelen işlem koşulları ile birlikte düşük soğutma hızının bir sonucudur.



a)



b)

**Şekil 5.** *Nikel Esaslı Bir Alaşımın Isıtılma İşlemi Öncesi (a) ve Sonrası (b) Yapı Görünümü.*

## ENDÜSTRİYEL AMAÇLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

Endüstride en fazla görünen şekil hafızalı NiTi alaşımları ve bakır esaslı alaşımlar önemli ticari değere sahip alaşım sistemleridir. Bu sistemlerin sahip oldukları özellikleri birbirinden oldukça farklıdır. Bakır esaslı alaşımlarda % 4-5 olan şekil hafıza gerinim değeri, NiTi alaşımlarda yaklaşık %8'dir. Daha fazla ısıtılma karalılığına sahip olan NiTi alaşımları, gerilmeli korozyona karşı hassas olan bakır esaslı alaşımlarla karşılaştırıldığında mükemmel bir korozyon direncine ve çok daha yüksek sünekliliğe sahiptir. Diğer taraftan bakır esaslı alaşımlar daha ucuzdur, eritmeleri ve açık havada ekstrüde edilmeleri daha kolaydır, daha geniş potansiyel dönüşüm sıcaklık aralığına sahiptirler. Sonuçta her iki alaşım sisteminde de kullanılacağı ortama göre gözönünde bulundurulması gereken avantaj ve dezavantajları olduğu söylenebilir. Aşağıda bu iki şekil hafızalı alaşım detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

### Nikel-Titanyum Şekil Hafızalı Alaşımlar

NiTi alaşımları ikili alaşım sistemidir ve eşatomlu intermetalik bir bileşiktir. İntermetalik bir bileşik sıra dışıdır. Çünkü bu tür bir bileşik, kabul edilir sınırlar içerisinde fazladan nikel veya titanyum çözebilir ve alışılagelmiş alaşımlarla mukayese edilebilir derecede sünekliliğe sahiptir. Bu aşırı çözebilme yeteneği sayesinde alaşım sisteminin hem dönüşüm özelliklerini hem de mekanik özelliklerini istenilen tarzda değiştirmek için diğer elementler katılabilir. Yaklaşık %1 oranında nikel ilavesi bile alaşım sisteminin özelliklerini etkiler. Bünyedeki fazla nikel, dönüşüm sıcaklığını önemli ölçüde düşürür ve ostenitik durumda akma dayanımını artırır. Sıkça kullanılan diğer alaşımlandırma elementlerinden demir ve krom daha düşük dönüşüm sıcaklığı için ile bakır ise histerizisi azaltmak ve martenzitik durumda daha düşük deformasyon gerilmesi için daha sık kullanılır. Oksijen ve karbon gibi safsızlıkların, dönüşüm sıcaklığını değiştirdiği ve mekanik özellikleri zayıflattığı için bünyede bulunması istenmez.

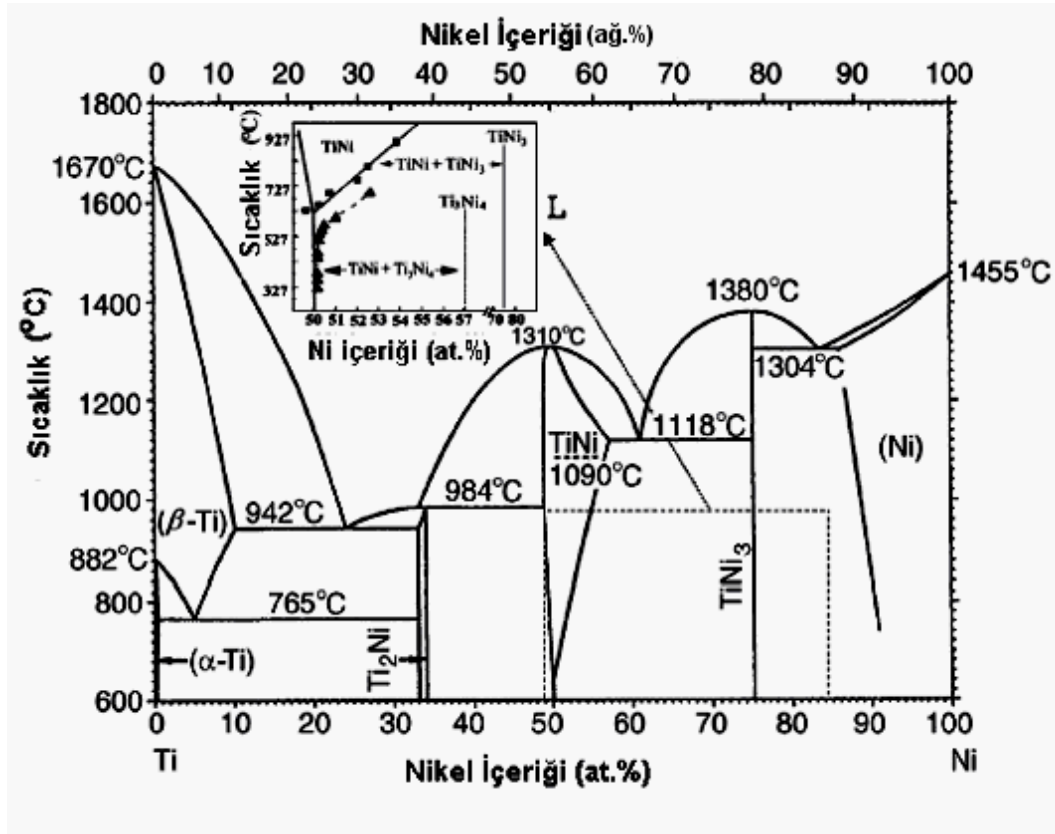
NiTi alaşımın anafazı, CsCl ( $a_0=0.301-0.302$  nm) yapısına benzer, kübik hacim merkezli B2-tipi

kristal yapıya sahiptir. Martenzit fazdaki kristal yapısının ne olduğu görüşünde araştırmacıların çoğunun modelleri farklıdır. Fakat hem X ışınları, hem de seçili alan kırınım teknikleri kullanılarak yapılan incelemelerin hepsi aynı sonucu vermektedir. Martenzit fazın birim hücresi, kafes sabitlerinin birbirinden farklı olmasına rağmen monoklinikdir. Yakın zamanda, Otsuka ve arkadaşları tarafından Ti-49.75Ni alaşımının kafes parametreleri  $a=0.2889$  nm,  $b=0.412$  nm,  $c=0.4622$  ve  $\beta=96.80^\circ$  olan monoklinik kristal yapısına sahip olduğu tespit edilmiş ve standart olarak kabul görmüştür.

NiTi ikili alaşım sisteminin temel fiziksel özellikleri ve tavlınmış alaşımın mekanik özelliklerinin bazıları Tablo 2'de gösterilmiştir. Eşatomlu alaşımın ostenit bitiş sıcaklığı olan  $A_f$  değeri  $100^\circ\text{C}$  civarındadır. Şekil 6'da ise Ni-Ti alaşımlarda faz diyagramı ile B2 ve  $\text{Ti}_3\text{Ni}_4$  fazlar arası faz denge diyagramı da gösterilmiştir[3].

**Tablo 2. İkili Ni-Ti Şekil Hafızalı Alaşımların Özellikleri**

Özellik	Değer
Erime sıcaklığı ( $^\circ\text{C}$ )	1300
Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	6.45
Elektrik direnci (micro-ohm*cm)	Yaklaşık
Ostenit	100
Martenzit	70
Isıl iletkenlik ( $\text{W}/\text{cm}^*\text{C}$ )	
Ostenit	18
Martenzit	8.5
Korozyon direnci	300 serisi paslanmaz çeliklere veya titanyum alaşımlarına yakın
Young modülü (GPa)	Yaklaşık
Ostenit	83
Martenzit	28~41
Akma dayanımı (MPa)	
Ostenit	195~690
Martenzit	70~140
Maksimum çekme dayanımı (MPa)	895
Dönüşüm sıcaklığı ( $^\circ\text{C}$ )	-200~110
Dönüşüm sırasındaki gizli ısı ( $\text{kJ}/\text{kg}*\text{atom}$ )	167
Şekil hafıza gerinimi (%)	Maksimum 8.5%



Şekil 6. Ni-Ti Alaşımın Faz Denge Diyagramı.

Seçilen malzemenin sertliğini düşürerek martenzitin deforme edilebilmesini kolaylaştırmak amacıyla uygun ısıl işlemler yapılır ve böylece daha dayanıklı ve kararlı ostenitik bir yapı ile hem ısıtma hem de soğutma durumunda yinelenen özelliklere sahip malzeme tipi yaratılabilir. Bu tip alaşımlarda başlıca sorun malzemenin istenilen özellikleri yerine getirecek uygun işleme metodlarının geliştirilmesidir.

Isıl işlem ile istenilen hafıza şeklini vermek için sık sık 500°C-800°C arasında sıcaklıklar tercih edilir ve bu sıcaklık değeri yeterli zamanın ayarlanmasıyla birlikte en az 300°C-350°C olmalıdır. Şekil hafızalı alaşımın ısıl işlemi sırasında arzulanan hafıza şeklinin sağlanması için kontrollü davranmak gerekir. Aksi takdirde hafıza etkisi kazandırılmaz. Kazandırılan maksimum hafıza etkisi, gerinim ve/veya gerilme ile gerekli çevrim miktarına bağlı olarak sınırlıdır (Tablo 3)

Tablo 3. Tahmini Çevrim Sayısı ile Müsaade Edilen Maksimum Gerinim ve Gerilme Arasındaki İlişki<sup>[6]</sup>.

Çevrim sayısı	Maksimum gerinim (%)	Maksimum gerilme (MPa)
1	8	500
100	4	275
10 000	2	140
100 000 +	1	70



## Bakır Esaslı Şekil Hafızalı Alaşımlar

Bakır esaslı alaşımlar, CuZnAl ve CuAlNi alaşımlar şeklinde üçlü alaşımlar olabileceği gibi ayrıca manganezde içeren dördümlü modifikasyonuda mümkündür. Bor, seryum, kobalt, demir, titanyum, vanadyum ve zirkonyum gibi elementler ince taneli yapı elde etmek için bünyeye katılır. Çizelge 4'de bu tip alaşımların en önemli özellikleri verilmiştir.

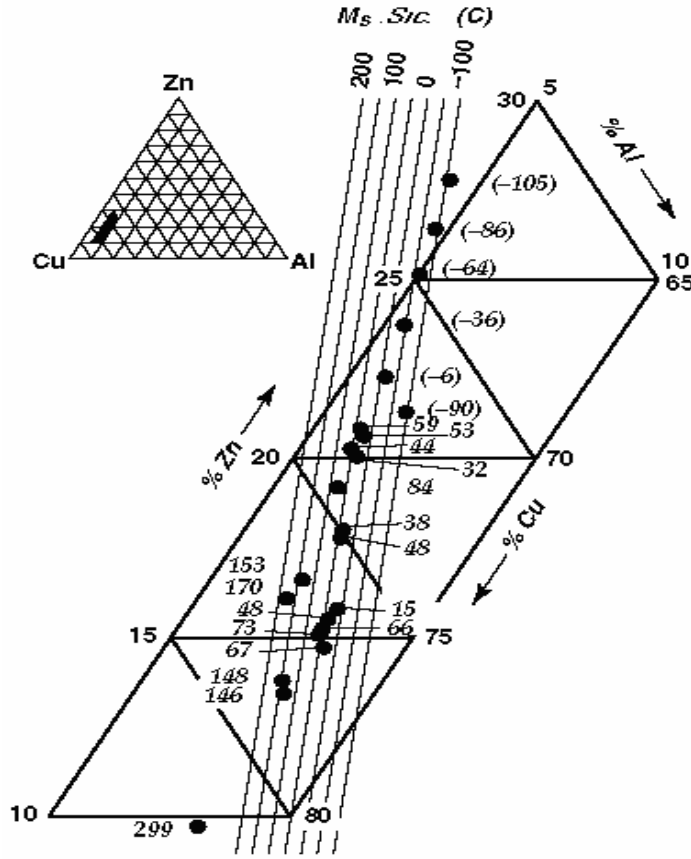
**Tablo 4. Bakır Esaslı Şekil Hafızalı Alaşımların Özellikleri**

	CuZnAl	CuAlNi
<b>Isıl özellikler</b>		
Erime sıcaklığı (°C)	950~1120	100~1050
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	7.64	7.12
Elektrik direnci (micro-ohm*cm)	8.5~9.7	11~13
Isıl iletkenlik (W/cm*°C)	120	30~43
Isı kapasitesi (J/kg*°C)	400	373~574
<b>Mekanik özellikler</b>		
Young modülü (GPa)		
Beta faz <sup>(a)</sup>	72 <sup>(a)</sup>	85 <sup>(a)</sup>
Martenzit <sup>(a)</sup>	70 <sup>(a)</sup>	80 <sup>(a)</sup>
Akma dayanımı (MPa)		
Beta faz	350	400
Martenzit	80	130
Maksimum çekme dayanımı (MPa)	600	500~800
<b>Şekil hafıza özellikleri</b>		
Dönüşüm sıcaklıkları (°C)	<120	<200
Gerikazanılır gerinim (%)	4%	4%
Histeresis, delta (°C)	15-25	15~20

<sup>a)</sup> Ms ve As dönüşüm sıcaklıkları arasında şekil hafızalı alaşımların Young modüllerini tayin etmek çok zordur. Bu sıcaklıklarda alaşımlar lineer olarak bir elastisite sergiler ve modül hem sıcaklığa hem de gerinime bağlıdır.

CuZnAl alaşımlarının bileşimleri ve martenzit başlangıç sıcaklıkları arasındaki ilişkiye ait grafik Şekil 7'de görülmektedir. Bu tip alaşımlarda alüminyum miktarı %11-14.5, nikel miktarı ise %3-5 civarındadır. Martenzitik dönüşüm sıcaklıkları kimyasal bileşimin değiştirilmesiyle ayarlanabilir.

Şekil 7 ve aşağıdaki (4.1) ve (4.2) no.lu ampirik bağıntılardan faydalanılarak alaşıma ait martenzit başlangıç sıcaklığı için tahmini bir değer elde edilebilir (Yüzde olarak verilen değerler ağırlık esaslıdır).



Şekil 7. CuZnAl Alaşımalar İçin Bileşim ve  $M_s$  Sıcaklıkları Arası İlişki<sup>71</sup>.

$$\text{CuZnAl: } M_s (^{\circ}\text{C}) = 2212 - 66.9 (\% \text{ağ. Zn}) - 90.65 (\% \text{ağ. Al}) \quad (4.1)$$

$$\text{CuAlNi: } M_s (^{\circ}\text{C}) = 2020 - 134 (\% \text{ağ. Al}) - 45 (\% \text{ağ. Ni}) \quad (4.2)$$

Öte yandan mangan hem CuZnAl, hem de CuAlNi alaşımların dönüşüm sıcaklıklarını düşürür ve yüksek alüminyum içerikli alaşımların ötektoid noktasını değiştirir. Daha iyi süneklilik için alüminyumun yerine katılır.

Bakır esaslı şekil hafızalı alaşımlar doğada metastabil halde olduğundan şekil hafıza etkisini sağlayan beta fazının korunması için bu fazda ısıl işlem ve ardından da kontrollü soğutma yapılmalıdır. Uzun süreli ısıtma çinko buharlaşmasına ve tane büyümesine neden olduğundan kaçınılmalıdır. Su verme sertleştirme işlemi olarak kullanılır. Açık havada soğutma işlemi bazı yüksek alüminyum içerikli CuZnAl ve CuAlNi alaşımları için yeterli olabilir. Sadece soğutulmuş parçalarda dönüşüm sıcaklıkları genellikle kararsız olduğundan dönüşüm sıcaklıklarını kararlı hale getirmek için  $A_f$  sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda soğutma sonrası yaşlandırma yapılmalıdır.

CuZnAl alaşımlarında soğutma hızı yüksek olduğunda martenzit faza direkt dönüşüm olması,

martenzitin kararlılığını hassaslaştırır. Bu etki tersinir dönüşümün daha yüksek sıcaklıklara kaymasına neden olur. Bu nedenle dönüşüm gecikir ve tam olarak şekil geri kazanımı sağlanamaz. Ms sıcaklığının üzerindeki ortam şartlarında yavaş soğutma veya beta fazlı halde ara yaşlandırma sureti ile basamaklı soğutma tercih edilmelidir.

Bakır esaslı alaşımların ısıl kararlılığı ayrışım kinetikleri ile sınırlıdır. Bu nedenle CuZnAl ve CuAlNi alaşımların sırasıyla 150~200°C üzerindeki sıcaklıklarda uzun süreli maruz bırakılmasından kaçınılmalıdır. Daha düşük sıcaklıklarda yaşlandırma, dönüşüm sıcaklıklarını değiştirir. Beta fazında yaşlandırma durumunda da benzer sonuçlar doğar. Martenzitik halde yaşlandırılmış alaşımlar yaşlanma kaynaklı martenzit stabilizasyon etkisi gösterir. CuAlNi alaşımları yüksek sıcaklıklarda CuZnAl alaşımlarından daha kararlıdır. Bu yüzden dönüşüm sıcaklıklarının sıkı kontrolünün istenildiği farklı sıcaklık uygulamalarında bu faktörleri dikkate almak gerekir.

## ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

Genelde bilindiği gibi şekil hafızalı alaşım elemanı, martenzitik durumdayken deforme edildiğinde serbest enerjiye sahip olur ve ısıtıldığı zaman bünyesinde bulundurduğu bu serbest enerjiyi kullanarak minimum iş yaptığı önceki şekline geri döner. Bu fonksiyonel davranıştan yararlanılarak biyomedikal uygulamalarda kullanılan damarlar içindeki kan pıhtılarını yakalayan bir filtre geliştirilmiştir. NiTi alaşımlı telden yapılmış çapa şeklindeki filtre damar içine sokulmadan önce düz bir tel haline getirilir. Damar içine yerleştirildikten sonra tel, vücut ısısı ile harekete geçerek filtre fonksiyonu sağlayacak orijinal şekline döner ve toplardamarın içinden geçmekte olan pıhtıları tutar.

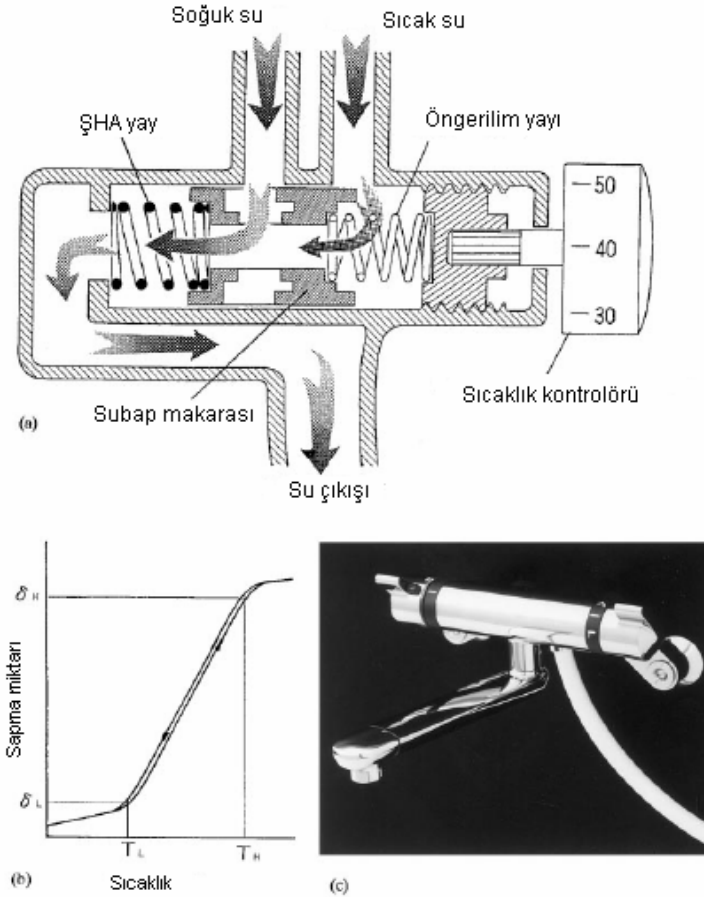
Zorlamalı enerji esaslı ürün tipinin en başarılı uygulaması ise Raychem Şirketi'nin yaptığı Cryofit hidrolik kaplinlerdir. Bu kaplinler birleştirilecekleri metal tüpden çok az küçük olacak şekilde dizayn edilmiş silindirik bileziklerdir. Çapları, malzeme martenzitik fazda iken genişletilir, montajı yapılır ve daha sonra ısıtılarak ostenit faza getirilir. Böylece çap yeniden daralır eski boyutuna dönmeye çalışır ve sıkı bir şekilde metal tüpe montelenir. Metal tüp kaplinin orijinal çapına dönmelerini engeller ve yaratılan gerilme sayesinde kaynak işlemi ile elde edilen bir bağlantıya eşdeğer üstün bir birleşme sağlanmış olur.

Cryofit kaplinlere benzer biçimde Betalloy kaplinleri CuZnAl alaşımıdır. Bakır ve alüminyum tüpler için Raychem Şirketi tarafından tasarlanmış ve piyasaya sürülmüştür. Bu uygulamada da yine aynı şekilde CuZnAl şekil hafızalı silindir ısınınca büzölmeye başlar ve tüp ile birleşme sağlayarak tübün etrafında çizgisel basma yapar.

Bazı uygulamalarda şekil hafızalı eleman, düşünülen hareket sınırları çerçevesinde güç üretmek amacıyla tasarlanır. Örnek bir uygulama Beta Phase Inc. tarafından geliştirilen devre kartlı konnektörlerdir. Elektrikle çalışan rabitalı sistemde şekil hafızalı eyleyici, rabita ısındığında bir yayı açmak için kuvvet yaratmak amaçlı kullanılır. Bu kuvvet ile rabitadaki devre kartının geri çekilmesi sağlanır. Soğutma durumunda NiTi eyleyici zayıf kalır ve yay eyleyiciyi deforme ederken devre kartı rabitaya sıkıca kapanır. Böylece bağlantı gerçekleşir.

Aynı prensibe dayanarak, CuAlZn şekil hafızalı alaşımların bu alanda birçok uygulamaları

mevcuttur. Yine bunlardan biri, yangın durumunda yanıcı ve zehirli gazların çıkışını kapatacak şekilde dizayn edilmiş CuZnAl eyleyicilerden oluşan yangın güvenlik valfleridir[2]. Dönüşümün belirli bir sıcaklık aralığında meydana gelmesinden yararlanarak seçilen belirli bir geri kazanım miktarıyla kesin bir mekanizma hareketi sağlamak için şekilsel geri kazanımın bir kısmı kullanılabilir. Bunu sağlayan düzenek, bir valfi istenilen miktarda kapatmayı veya açmayı sağlayan bir tertibattır. Şekil hafızalı alaşımdan yapılmış yay sıcaklığa duyarlı olduğundan boyutlarını değiştirerek çıkış akışkanının sıcaklığı ayarlar. Alaşımın duyarlı olması istenilen sıcaklık değeri manuel ayarlanır. Şekil 8.'de karıştırma valfi ve parçaları görülmektedir.

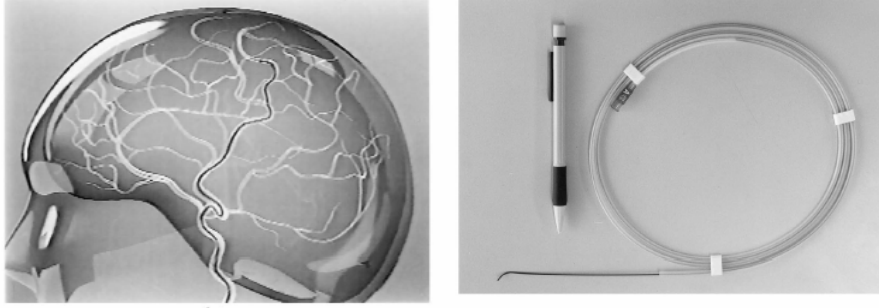


**Şekil 8.** Şekil Hafızalı Alaşım Yay ve Öngerilmiş Yay Kullanılarak Geliştirilmiş Karıştırma Valfi.

(a) İç yapı görülmektedir. Makaranın pozisyonu ve çıkış suyunun sıcaklığı sıcaklık kontrolörü döndürülerek ayarlanır. Kontrolörün dönüşü şekil hafızalı alaşımın boyutunu değiştirmektedir. (b) Karıştırma valfinde kullanılan şekil hafızalı elemanın sıcaklık ve sapma miktarı arasındaki ilişki şematik olarak görülmektedir. (c) Geliştirilmiş karıştırma valfinin dış görünümü.

Şekil hafızalı alaşımların sahip oldukları elastik ya da süperelastik özelliklerinden faydalanılarak tasarlanmış ve piyasaya sürülmüş birçok ürün vardır. Çok büyük deformasyonları dahi absorbe ederek zarar görmeyen süperelastik NiTi alaşımdan imal edilmiş gözlük çerçeveleri üretilmektedir. Canlının vücudundaki damarlara yerleştirilen, Şekil 9'da görüleceği üzere NiTi kılavuz tellerden ibaret kontrol edilebilir kateterler yapılmıştır[8]. Ayrıca dişlere geniş bir

hareket imkanı sağlayan ve yıllardır kullanılan ortodontik düzeltme işlevli kavisli teller şeklinde NiTi ürünler vardır.



*Şekil 9. Medikal Uygulamalarda Kullanılan Kateterler İçin Süperelastik Kılavuz Tel. (a) Beyine Ait Bir Uygulama; (b) Kılavuz Telin Görünümü.*

NiTi alaşımlar, sahip oldukları üstün özellikler sayesinde özellikle biyomedikal uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bu alaşımlar korozyona karşı son derece dayanıklı olup mükemmel bir biyoyumluluk gösterir.

## SONUÇ

Günümüzde şekil hafızalı alaşım kullanılarak üretilmiş birçok ürün olmasına karşın bu alaşımların gelecekte hayatımızda ne derece yer alacağını önceden söylemek bazı nedenlerden ötürü biraz zordur. Çünkü bu tip alaşımların fiyatı şu an için oldukça yüksek değerlerdedir. Ama kullanım alanlarının artmasıyla maliyetleride gittikçe azalmaktadır.

Nitekim ikili alaşımların özelliklerini geliştirmek için çeşitli üçlü alaşım sistemleri üzerinde çalışmalar halen yapılmaktadır. Son zamanlarda demir esaslı şekil hafızalı alaşımlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu tip alaşımlarda görülen uzun aralıkta düzenlenen termoelastik martenzitik dönüşüm şekil hafıza etkisi için gerekli koşulları sağlamaktadır. Bu alaşımlar arasında FePt, FePd ve FeNiCoTi ısı işlemlerle termoelastik martenzit dönüşüme sahip olduklarından eğitilerek şekil hafıza özelliği kazandırılabilir. Fakat FeNi, FeMnSi ve FeMnSiCrNi gibi alaşımlar düzenli termoelastik olmayan bir martenzit dönüşüme uğrarlar ve iyi bir şekil hafıza etkisine sahip değildirler. Bu tür alaşımlar diğer bilinen şekil hafızalı alaşımlardan karakteristik açıdan farklıdır, şöyleki şekil hafıza etkisi gerilme kaynaklı martenzite bağlıdır, geniş ölçülü dönüşüm histerезisi gösterirler ve genelde geri kazanılan birim şekil değiştirme miktarı %4'ü geçmez. Bu nedenlerden dolayı bu tip alaşımlar henüz ticari bir potansiyele sahip değildirler. Fakat yeni ve istenilen özellikleri karşılayabilen şekil hafızalı alaşımlar ile ilgili bilimsel araştırmalar devam etmekte olup bu araştırmaların çoğu beta-Ti alaşımları ve Fe-esaslı alaşımları kapsamaktadır.

## KAYNAKÇA

1. Akdoğan, A. ve Nurveren, K., Akıllı Malzemeler ve Uygulamaları, Machinery MakinaTek, sayı 57, s. 35, 2002.

2. **Hodgson, D.E.**, Shape Memory Applications, Inc., Wu, M.H., Memory Technologies, and Biermann R.J., Harrison Alloys, Inc., 2002.
3. **Otsuka, K. and Kakeshita, T.**, Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments, MRS Bulletin, February, 2002.
4. **Wert, J.A.**, Laboratory Manual Chapters, Ch-4, University of Virginia, Department of Materials Science and Engineering, , 1998.
5. **Suwardie, J.H., et al.**, Thermal Characterization of a Nickel-based superalloy, Thermochimica Acta, 392-393, p 295-298, 2002.
6. **Humbrecht, J.V.**, Non-medical Applications of Shape Memory Alloys, Materials Science and Engineering, A273-275, 134-148, 1999.
7. **Funakubo, H.**, Shape Memory Alloys, Translated from the Japanese by Kennedy, J.B., Gordon and Breach Science Publishers, 1987.
8. **Otsuka, K. and Ren, X.**, Recent developments in the research of shape memory alloys, Review, Intermetallics 7, p.526, 526, 1999.