

Makale

Şekil Hafızalı Alaşımlar ve Endüstriyel Uygulamaları

Ersin TOPTAŞ, Nihat AKKUŞ

Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Mekatronik Eğitimi Bölümü, İSTANBUL

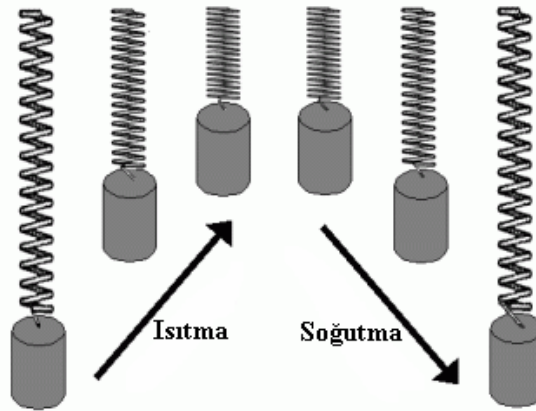
Özet

Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞHA) terimi, geometrisinin değiştiği durumlarda uygun ısı prosedürü uygulanarak kristal yapılarında faz dönüşümleri etkisiyle önceki şekline tekrar dönebilen metalik malzemeler için kullanılır. Bu malzemeler belirli sıcaklık farkı altında faz değişimine uğrayarak hacimsel ve geometrik şekil değişiklikleri göstermektedir. Eğer bu malzemeler doğru bir biçimde tasarlanırsa, bu değişim tamamen tersinir kılınabilmekte ve bu alaşımlar aktüatör olarak kullanılabilir. Şekil Hafızalı Alaşımların sahip oldukları üstün özelliklerin, araştırmalar neticesinde bulunulması ve ilan edilmesi ile birlikte kısa zamanda endüstrinin ilgisini çekmiştir. Bu nedenle şekil hafıza alaşımların deformasyonlar sonucunda alaşımın minimum iş yaparak önceki şekline geri dönebilmesinin yanında faz dönüşümleri sırasında ürettiği güç üretimi ile birlikte güç/ağırlık oranının diğer iletim organlarından büyük olması endüstriye yeni bir bakış açısı sunmuştur. Bu makalede ŞHA sahip olduğu özellikler tanıtarak endüstriyel uygulamalar hakkında örnekler ile bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şekil Hafızalı Alaşımlar, Süperelastik, Şekil Hafıza Etkisi, Aktüatör.

1. Giriş

Şekil Hafızalı Alaşımlar terimi, dış etkenlerden dolayı bozulan geometrinin, uygun bir ısı prosedürü uygulanarak gerçek şekline veya boyutuna geri dönebilen malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu malzemeler kristal yapılarında meydana gelen martenzit ve ostenit faz dönüşümleri sonucunda şekil değişimi yapabilmektedir. Düşük sıcaklıkta martenzit yapıya sahipken kolay deformasyona uğrayan malzeme, uygun sıcaklıkta ısıtıldığında yüksek sıcaklık fazı olan ostenit faza geçerek deformasyon öncesi orijinal şekillerine tekrar dönebilmektedir [1, 2]. Bu malzeme grubu sadece ısıtılması halinde tek yönlü şekil hafızaya sahip malzemeler olarak tanımlanırken, yeniden soğutma halinde ise iki yönlü şekil hafızalı malzemeler olarak tanımlanmaktadır [3]. Buda bize böyle metallerin, deforme edilmesine karşın faz değişimlerini kontrol ederek deformasyonun ortadan kaldırabildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 1. SMA'nın Isı ile İlişkisi [4]

İlk olarak şekil hafızalı dönüşüm 1932 yılında Chang ve Read tarafından Au-Cd alaşımlarında gözlenmiştir. 1938 yılında da bu dönüşümün pirinç (CuZn) malzemede de olduğu Greninger ve Mooradian tarafından saptanmıştır [5]. Metalografik gözlemler sonucunda 1951 yılında AuCd alaşımlı bir çubukta Şekil Hafıza Etkisi (SME) tespit edilmesinden sonra 1960'lı yıllarda Buehler ve arkadaşları tarafından ABD Donanma Silah Laboratuvarlarında (Naval Ordnance Laboratory-(NOL)) eş-atomlu nikel (Ni) titanyum (Ti) alaşımlarda Şekil Hafıza Etkisi belirlenmiştir [3]. Bu malzemenin bu laboratuvarlarda bulunmasından ötürü nikel, titanyum ve araştırma yapılan laboratuvarın baş harflerinde oluşan Nitinol adıyla patentleşmiştir [2, 5]. Günümüzde Nitinol telleri endüstriyel robotlarda kas fiberleri olarak kullanılmaktadır. Bugün şekil hafızalı alaşımlar artık, orijinal şekillerini "hatırlayıp" bu şekle dönebilmelerinin yanı sıra, yeni şekiller de öğrenebilmektedirler. Martenzit halde tekrar tekrar deforme edilerek ve ısıtılarak istenilen şekilde ostenit haline getirilen alaşım, bu süreç esnasında soğutulduğunda yeni şekle adapte olabilmektedir.

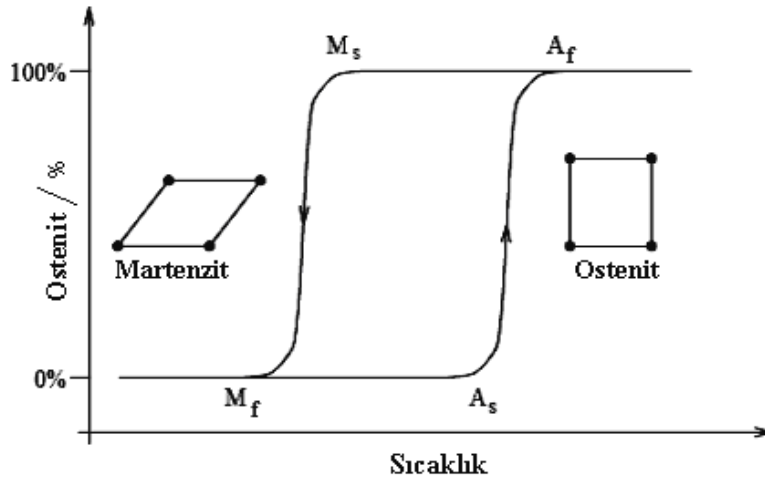
Araştırmalarda şimdiye kadar çok sayıdaki alaşımların şekil hafıza etkisine sahip olduğu bilinmekte ve de bu özelliğe sahip yeni malzemeler bulmak için önemli çabalar harcanmaktadır. Tablo 1'de şimdiye kadar bulunan şekil hafıza etkisine sahip alaşımlar gösterilmektedir. Fakat bugüne kadar çok değişik alaşım elementleri şekil hafıza etkisi özelliği göstermesine karşın, bunlardan sadece yeterince uzayabilen ve şekil değişimlerinde kullanılabilir kadar kuvvet yaratabilen malzemeler endüstriyel olarak ilgi çekici olmuştur. Günümüze kadar Ni-Ti alaşımları ve bakır esaslı olan CuZnAl ve CuAlNi gibi malzemeler endüstriyel önemi olan şekil hafızalı alaşımlardır [3].

Tablo 1. Şekil Hafıza Etkisine Sahip Alaşımlar [6]

Alaşım	Kimyasal Bileşimi	Dönüşüm Sıcaklık Aralığı	Dönüşüm Histerezisi
		(°C)	(°C)
AgCd	44 ~ 49 %Cd	-190 ~ 50	~ 15
AuCd	46.5 ~ 50 %Cd	30 ~ 100	~ 15
CuAlNi	14 ~ 14.5 %Al 3 ~ 4.5 %Ni	-140 ~ 100	~ 35
CuSn	~15 %Sn	-120 ~ 30	
CuZn	38.5 ~ 41.5 %Zn	-180 ~ -10	~ 10
CuZnX (X=Si,Sn,Al)	%X (az miktarda)	-180 ~ 200	~ 10
InTi	18 ~ 23 %Ti	60 ~ 100	~ 4
NiAl	36 ~ 38 %Al	-180 ~ 100	~ 10
TiNi	46.2 ~ 51 %Ni	-50 ~ 110	~ 30
TiNi X (X=Pd,Pt)	50 %Ni+X 5 ~ 50 %X	-200 ~ 700	~100
TiNiCu	~ 15 %Cu	-150 ~ 100	~ 50
TiNiNb	~ 15 %Nb	-200 ~ 50	~ 125
TiNiAu	50 %Ni+Au	20 ~ 610	
TiPd X (X=Cr,Fe)	50 %Pd+X ~ 15 %X	0 ~ 600	~ 50
Mn-Cu	5 ~ 35 %Cu	-250 180	~ 25
FeMnSi	32 %Mn, 6 %Si	-200 ~ 150	~ 100
Fe-Pt	~ 25 %Pt	~ -130	~ 4
Fe-Pd	~ 30 %Pd	~ 50	
FeNi X (X=C,Co,Cr)	%X (az miktarda)		

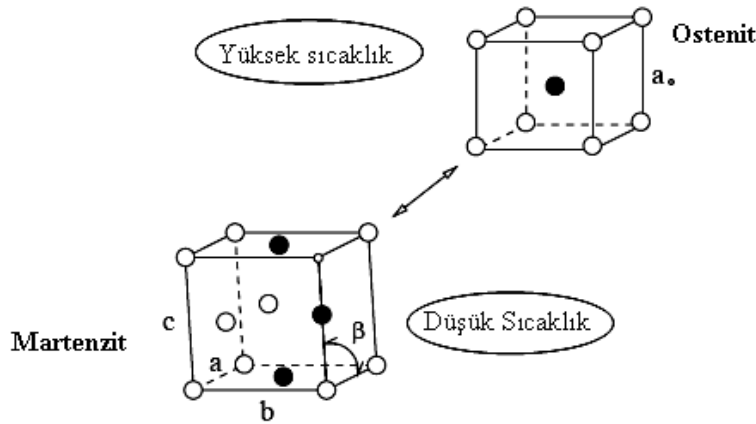
Şekil hafızalı alaşımlarda, yüksek sıcaklıktaki ostenitik fazın uzun süren dönüşümü sonucunda termoelastik martenzitin meydana gelmesi martenzitik dönüşüm olarak isimlendirilir. Atomların yer değiştirme miktarı çok büyük olmamasına rağmen, hepsinin birden hacimsel yönde aynı doğrultuda taşınmasından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

Her alaşımın katılma sıcaklığı farklı olduğundan martenzitik dönüşüm, belirli bir sıcaklık aralığında tamamlanmaktadır (Şekil 2). Dönüşümün başlangıç ve bitişi gerçekte geniş bir sıcaklık aralığını kapsamasına rağmen çoğu zaman dar bir sıcaklık aralığında meydana gelmektedir.



Şekil 2. SMA'nın Sıcaklık Geçişleri ve Histerisiz Eğrisi [7]

Şekil 2 'de görüldüğü gibi şekil hafızalı alaşımlarda martenzit ile ostentit dönüşümlerinin tekrarlanması sırasında geniş bir histeriz çevrim ortaya çıkmaktadır. Martenzit yapılı şekil hafızalı alaşımlar ısıtıldığı zaman metalin kristal yapısı belirli bir sıcaklıktan itibaren ostentite dönüşür. Bu dönüşümün olduğu sıcaklığa ostentit başlangıç sıcaklığı (A_s) ve dönüşümün bittiği sıcaklığa da ostentit bitiş sıcaklığı (A_f) olarak isimlendirilmektedir. Ostentit yapılı şekil hafızalı alaşımlar soğutulduğu takdirde malzemenin kristal yapısı martenzit yapı haline dönüşecektir. Bu dönüşümün olduğu sıcaklığa martenzit başlangıç sıcaklığı (M_s) ve dönüşümün bittiği sıcaklığa da martenzit bitiş sıcaklığı (M_f) olarak isimlendirilmektedir [5]. Bu sıcaklıkların oluşumu esnasında A_s - A_f ve M_s - M_f sıcaklıkları arasında Şekil Hafızalı Alaşımlar, martenzit ve ostentiti ihtiva eden karışık bir düzene sahiptir. NiTi için bu dönüşüm sıcaklıklarına örnek verecek olursak eğer $M_f=25^\circ\text{C}$, $M_s=50^\circ\text{C}$, $A_s=58^\circ\text{C}$, $A_f=78^\circ\text{C}$ 'dir [7].



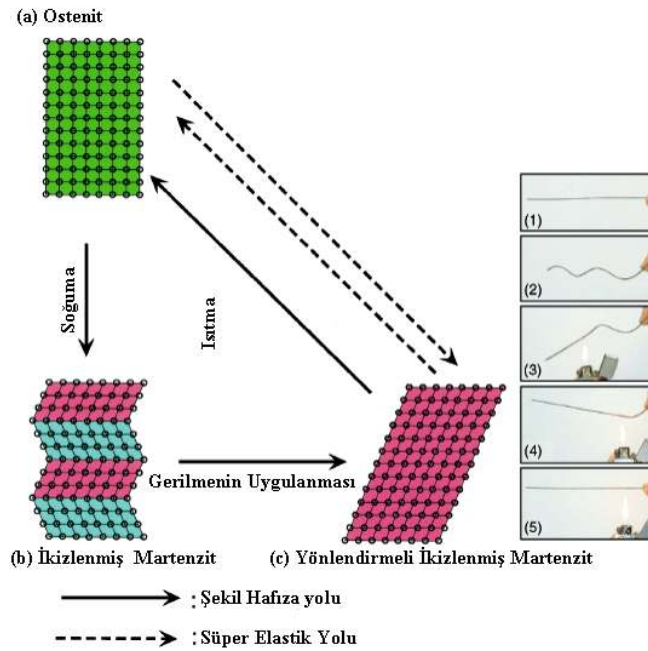
Şekil 3. Nitinol Alaşımlarında Faz Dönüşümleri

Şekil hafızalı alaşımlarından bir tanesi olan Nitinol alaşımının anafazı, kübik hacim merkezli B2-tipi kristal yapıya sahiptir. Martenzit faz üzerinde yapılan araştırmalar neticesinde monoklinik bir yapıda olduğu anlaşılmıştır. Ti-49.75Ni alaşımının kafes parametreleri Şekil 3'de gösterildiği üzere $a=0.2889$ 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 [8].

Termomekanik Yapısı

Normal malzemelerde atomların sıralı halde dizilmesiyle kristal kafes yapıları ve birim hücreler ortaya çıkmaktadır [9]. Malzemelerin iç ve dış gerilmeler altında bırakılmasıyla atom yapısında değişimler ortaya çıkar. Bu değişim

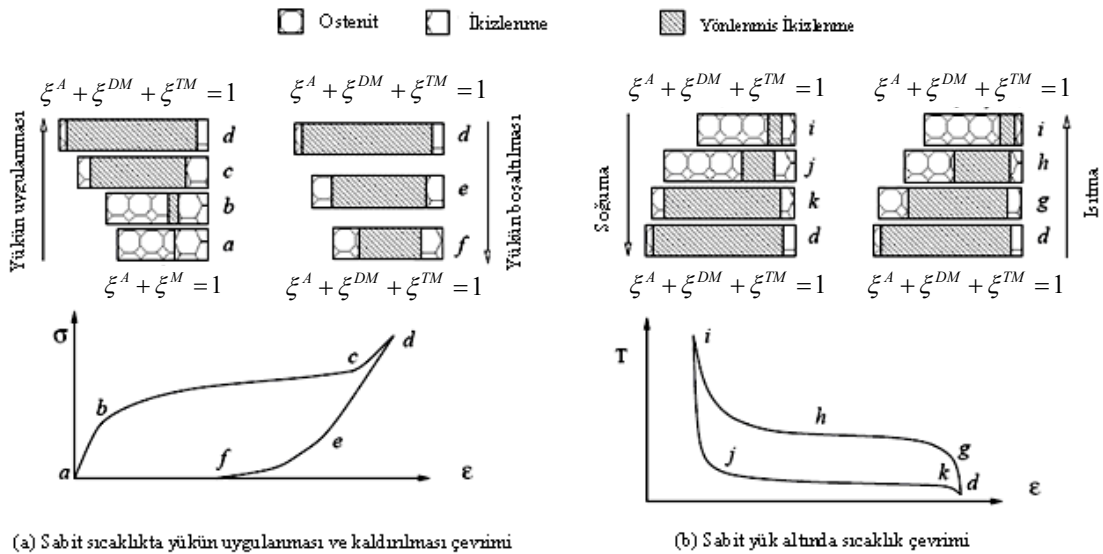
özellikle bir sıra atomun şekilde görüldüğü gibi diğer sıraya göre bir miktar ilerlemesi şeklindedir. Buna genel olarak ikizlenme adı verilir. Ayrıca bu malzeme yapısı içerisinde ostenit faz ile martenzit faz arasında ki geçiş esnasında yönlendirmeli ikizlenmiş martenzit (detwinning martensite) görülmektedir. Bu yönlendirmeli ikizlenmiş martenzit, süperelastik deformasyonun temel deformasyon mekanizması olarak kabul edilmektedir [9].



Şekil 4. SMA'nın Hal Değişimleri [10]

Bilindiği gibi martenzit, oldukça düşük bir gerilme değerinde dahi birkaç yüzde gerilim üretecek şekilde kolaylıkla deforme edilebilmektedir. Oysa yüksek sıcaklık fazı olan ostenit daha fazla akma dayanımına sahip olduğundan, kolaylıkla deforme edilemez özellik gösterir. Numunenin malzeme yapısı ostenite dönüştüğünde şekil değişiminin olmadan önceki şeklini hatırlaması ile orijinal boyutlarına korunur. Ostenit fazda iken ısıtma veya gerilme olması geri kazanılabilir bir şekil tutumu sağlamaz. Çünkü yapıda faz değişimi meydana gelmemektedir [8].

SMA telini örnek olarak tek boyut da yük ve sıcaklık uygulanarak, telin malzeme yapısında meydana gelen durumu inceleyelim. Bu durumda faz dönüşümleri esnasında ostenit oranı ξ^A , ikizlenmiş martenzit oranı ξ^{TM} ve yönlendirmeli ikizlenmiş oranı ξ^{DM} alındığında malzeme içerisinde meydana gelen faz değişimleri Şekil 5'de görüldüğü gibidir.

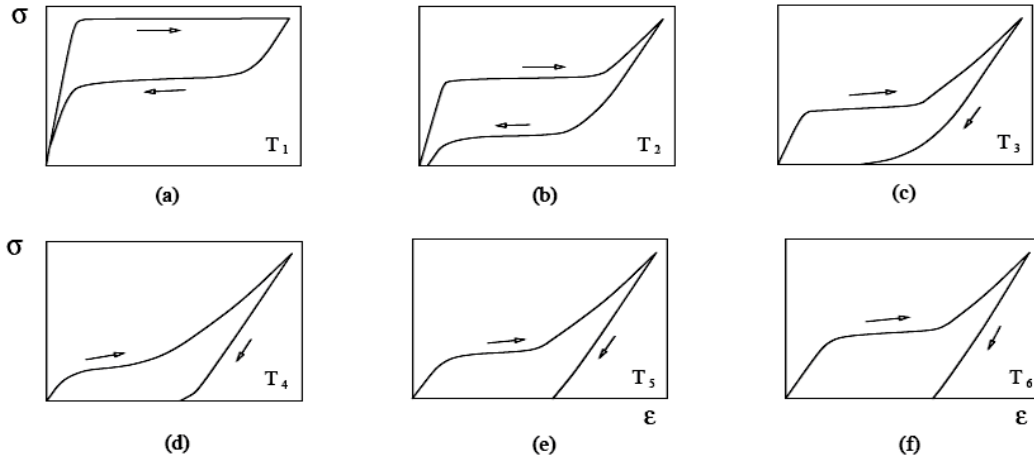


(a) Sabit sıcaklıkta yükün uygulanması ve kaldırılması çevrimi

(b) Sabit yük altında sıcaklık çevrimi

Şekil 5. Bir Çubukta Meydana Gelen Faz Değişimleri [6]

Eğer sıcaklık uygun yüksek değerde olsa gerilme sıcaklık ilişkisi Şekil 5 (a)'da gösterildiği gibi süperelastik davranışı görülmektedir. Şekil 5 dikkatle incelenecek olursa faz dönüşümlerin başladığı kritik gerilme değeri, sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Fakat kritik gerilme sıcaklığın etkisi ile çevrim noktalarında bir değişme olmamaktadır. Bu kritik gerilmenin sıcaklıkla değişimi aynı zamanda Şekil 6'de gösterilmektedir.



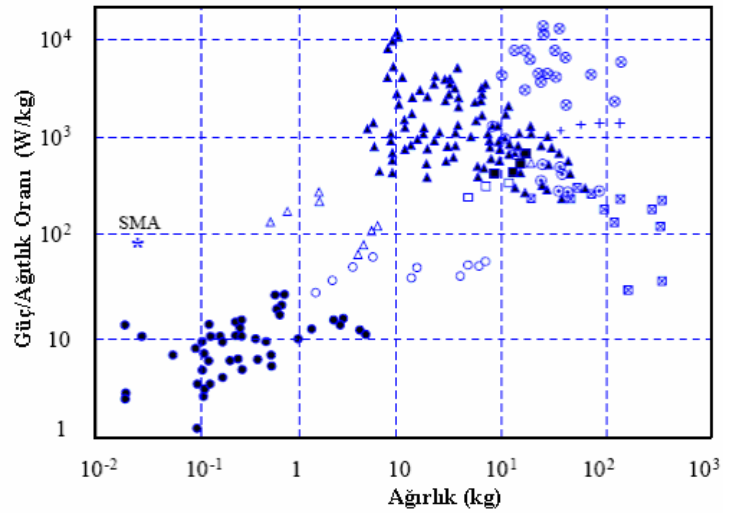
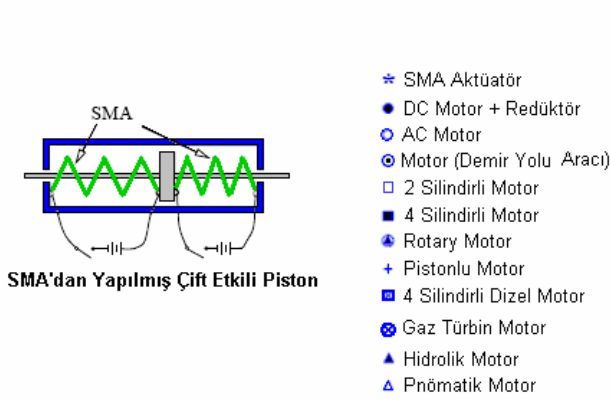
Şekil 6. Sabit Sıcaklıklarda ki $\sigma - \varepsilon$ ilişkisi ($T_1 > \dots > T_6$) [11]

Bu malzeme türlerinde hafıza etkisi iki farklı yödedir ve bunlar tek ve iki yönlü olarak tabir edilir. Tek yönlü malzemede malzeme deformasyona uğratılmadığı anda ısıtılıp soğutulsa bile malzemede herhangi bir şekil değişimi olmamaktadır. Bu malzemede sadece deformasyona uğratılıp ısıtıldığı anda orijinal şekline dönebilmektedir. İki yönlü şekil hafızaya sahip malzemelerde ise deformasyona uğratılmasa bile soğutulup ısıtılması durumunda şekil değişimi ortaya çıkmaktadır [6, 8, 11].

Endüstride Şekil Hafızalı Alaşımların Önemi ve Uygulamaları

Akıllı metaller uzay araştırmalarında, tıpta, otomotiv endüstrisinde, mikroeletromekanik gibi muhtelif alanlarda çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere başladı. Böyle malzemelerin seçimi en önemli faktörlerden birisi ise malzemenin ortamla olan uyumluluğun iyi sonuçlar vermesidir. Şekil hafızalı Alaşımlar geniş iş yoğunluğu kapasitesi ve büyük birim şekil değiştirme özelliklerine sahip olmasından ötürü bu kategoriye girmektedir. Bu malzemeler şu anda, tepki hareketlerinde ki hızın, ihtiyaçlar doğrultusunda önemi az olan uygulamalarda geniş eyleme geçirme özelliğinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamalarda kullanılmak sureti ile uygun bir tasarım yapabilmek için bu malzemenin doğasını anlamak ve tahmin etmek önemlidir. Histerezis, direnç ve mikro yapıdaki değişimler, süper elastik gibi etkileri bünyesinde taşıyan bu malzemeler bu suretle karmaşık bir yapıya sahiptir [12].

Sistemler içersinde kullanılan aktüatör tasarımları yapılırken önemli kıstaslar vardır. Bunlar tasarımın sistem içersinde kaplamış olduğu hacmi ve sisteme ek olarak getirmiş olduğu ağırlık açısından önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu önem uçaklar ve uzay araçları söz konusu olduğunda daha da önem kazanmaktadır. Bu sistemlerde amaç kullanılan aktüatörlerin asgari ağırlıkta ve hacimde elde edilmesiyle, görevini yapabilmesidir. Şimdiye kadar üretilen aktüatörler kendi aralarında Güç/Ağırlık performans kriterine göre değerlendirilmektedir [6,1]. Bu performans kriterlerine göre Şekil 7 'de gösterildiği gibi var olan tüm aktüatörlerin performansları bir grafik halinde gösterilmektedir.

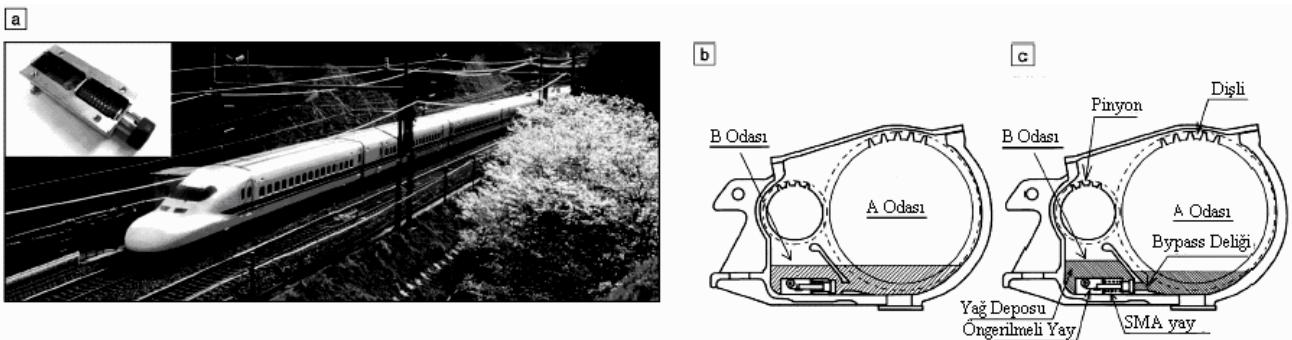


Şekil 7. Çeşitli Aktüatörlerin Güç/Ağırlık Performansları [6]

Şekil Hafızalı Alaşımlar içerisinde endüstride ticari değere sahip iki tür alaşım bulunmaktadır. Bunlar şekil hafızalı NiTi alaşımları ve bakır esaslı alaşımlar olmaktadır. Bu alaşımların sahip oldukları özellikleri bakımından birbirinden oldukça farklıdır. Bakır esaslı alaşımlarda % 4-5 olan şekil hafıza şekil değiştirme değeri, NiTi alaşımlarda yaklaşık %8'dir. Daha fazla ısıl karalılığa sahip olan NiTi alaşımlar, 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. Bu bilgiler ışığında NiTi alaşımları ve bakır esaslı alaşımların kullanılacağı yere göre göz önünde bulundurulması gereken avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmaktadır [3, 8, 10].

Şekil Hafızalı Alaşımların Endüstriyel Uygulamaları :

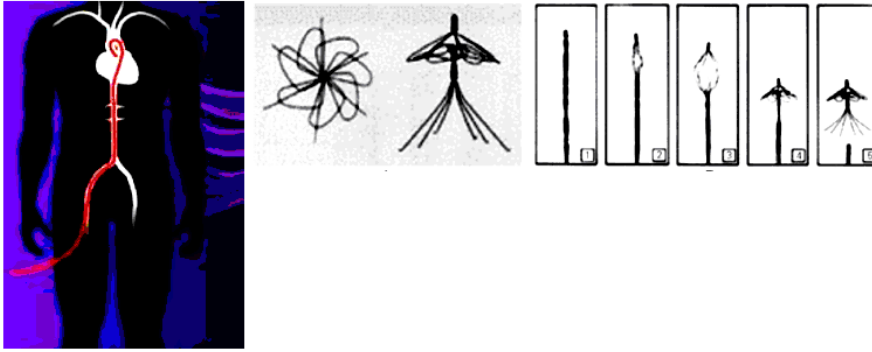
a-) Mekanik Uygulama: ŞHA ile yapılan endüstriyel uygulamalara örnek olarak, Shinkansen hızlı trenlerinde Şekil 8'de gösterildiği gibi otomatik yağ seviye ayarlayıcısı olarak kullanılmıştır. Trenin yüksek hızlara çıktığı vakit ortamdaki sıcaklığın artması ile birlikte ŞHA'dan yapılan yayın tetiklenmesiyle valfin açılması sağlamaktadır. Buradaki amaç iki odaya ayrılan dişli kutusunun arasındaki bağlantıyı sağlayan deliğin açma-kapamasının yağın sıcaklık değeriyle sistemin kontrolü sağlanmıştır. Düşük sıcaklıklarda iki oda arasındaki yağ akışı açıkken, sıcaklığın artması durumunda ise yağın iki oda arasındaki bağlantısı sınırlandırma yoluna giderek akışkan basıncı ayarı yapılmaktadır [10].



Şekil 8. Shinkansen hızlı trenlerinde otomatik yağlama ünitesinde SMA'nın uygulanması.(a) Otomatik yağlama ünitesinin uygulandığı Shinkansen Nozomi-700 hızlı trenin fotoğrafı ve kullanılan SMA valfi (b),(c) SMA'dan yapılan valfin iç yapısının düşük ve yüksek sıcaklıklardaki durumu [10]

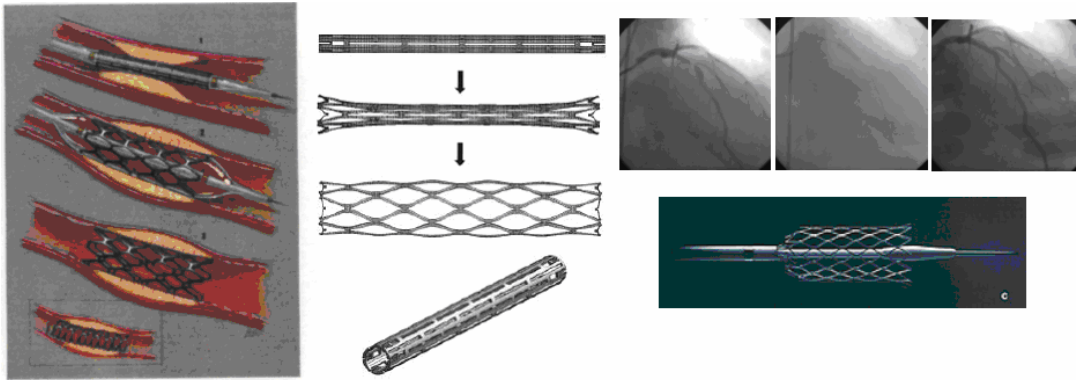
b-) Biyomedikal Uygulamalar: Şekil Hafızalı Alaşımların bu fonksiyonel özelliklerinin avantajından ötürü damarlar içindeki kan pıhtılarını yakalayan bir filtre olarak. NiTi alaşımlı telden yapılmış çapa şeklindeki filtre damar içine sokulmadan önce düz bir tel haline getirilir. Şekil 9 'da gösterildiği gibi damar

içine yerleştirildikten sonra tel, vücut ısısı ile harekete geçerek filtre fonksiyonu sağlayacak orijinal şekline döner ve toplardamarın içinden geçmekte olan pıhtıları tutar [3, 8, 13].



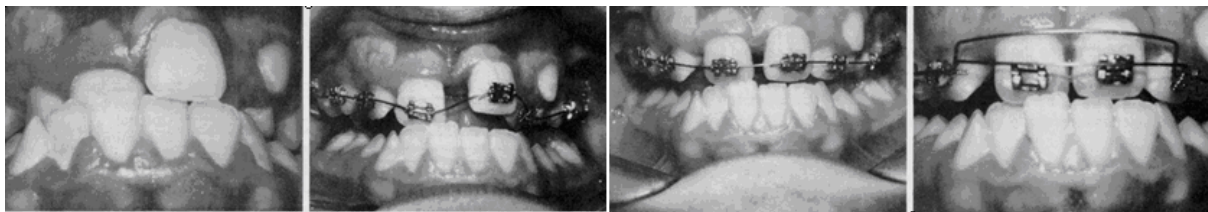
Şekil 9. Damarlardaki Kan Pıhtısını Tutulması için SMA'dan Yapılmış Filtre [13].

Yine Şekil 10'da gösterildiği gibi NiTi alaşımından yapılan ve yukarıda bahsedilen konuya benzer olarak üretilen stent damar tıkanıklarında kullanılmaktadır. NiTi alaşımlı telden yapılmış stent damar içine sokulmadan önce düz bir tel haline getirilir. Damar içine yerleştirildikten sonra stent, vücut ısısı ile harekete geçerek damarın tıkanan yerinde orijinal şekline dönerek damardaki tıkanıklığın açılması sağlanmaktadır [13,14,15].



Şekil 10. Damarlardaki tıkanma sorunlarının çözümü için SMA'dan yapılmış stent [14,13]

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 alaşımından imal edilmiş gözlük çerçeveleri üretilmektedir. Canlının vücudundaki damarlara yerleştirilen, Şekil 11. 28'de görüleceği üzere NiTi kılavuz tellerden ibaret kontrol edilebilir kateterler yapılmıştır [8]. Ayrıca Şekil 11'de gösterildiği gibi dişlere geniş bir hareket imkanı sağlayan ve yıllardır kullanılan ortodontik düzeltme işlevli kavisli teller şeklinde NiTi ürünler vardır.



Şekil 11. Ortodontik Düzeltme İşlevli Kavisli Tellerin Dişlerde Kullanılarak Üç Haftada Alınan Sonuçlar [13]

Hafızalı alaşımlar, medikal uygulamaların yanı sıra, uçak hidrolik sistemlerinde, yarıiletken gaz tüp bağlantılarında, otomotivde radyatör pervanelerinde, egzoz çıkış kontrollerinde, uydu sistemlerinde,

termostatik cihazlarda kullanılmaktadır. Bu özelliklerinden ötürü gün geçtikçe kullanım alanları genişleyerek hayatlarımızda yerini alacaktır.

Sonuçlar

Bu malzemeler içyapısında ki yapısal değişikler sonucunda meydana gelen süperelastik ve şekil hafıza etkisi gibi üstün özellikleri bünyesinde bulundurması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda alternatif bir eyleme geçirici olarak kullanılmasında büyük potansiyel içermektedir. Endüstrinin gelişim süreci içersinde üretilen ürünün üretilmesi veya geliştirilmesinde daha esnek, hafif ve minyatürleşme yönündeki yönelme, hareket iletim organlarında da bir gelişim sürecine girilmesine sebep olunmuştur. Bu nedenle Şekil Hafıza Alaşımların deformasyonlar sonucunda alaşımın minimum iş yaparak önceki şekline geri dönebilmesinin yanında, faz dönüşümleri sırasında ürettiği güç ile birlikte performans oranı oldukça iyidir. Bu malzemelerin iç yapıları yani faz dönüşümleri kontrol altına alınabilirirse bir çok uygulamada aktüatör olarak kullanılması, performans kriterleri olarak diğer sistemlere göre avantaj sağlayacaktır.

Kaynaklar

1. Akdoğan, A., 2004, "Akıllı Malzemeler" MakinaTek, Sayı 85, İstanbul
2. Vizyon 2023 Projesi Malzeme Teknolojileri Strateji Grubu, 2004, "Malzeme Teknolojileri Stratejisi" Tubitak, Ankara
3. Hodgson,D.E., 2002, "Shape Memory Applications", Inc., Wu, M.H., Memory Technologies, and Biermann R.J., Harrison Alloys, Inc.,
4. Texas A&M University, 2006, <http://smart.tamu.edu>.
5. Mihalcı,I. 2001, "Fundamental Characteristics And Design Method For Nickel-Titanium Shape Memory Alloy", Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.,Vol. 45, No 1, pp. 75-86,
6. Huang, W., 1998, "Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures", Doktora Tezi, University of Cambridge , Peterhouse
7. Gorbet, R. 1996, "A Study of the Stability and Design of Shape Memory Alloy Actuators", Doktora Tezi, University of Waterloo , Canada
8. Akdoğan A., Nurveren K., 2003, "Şekil Hafızalı Alaşımlar", Mühendis ve Makine Dergisi, Ankara
9. Callister,W., 1994, "Materials Science and Engineering: An Introduction", John Wiley & Sons, Inc. New York, NY.
10. Otsuka, K.,Kakeshita, T., 2002 "Science and Technology of Shape-Memory Alloys:New Developments", MRS Bulletin
11. Funakubo, H., 1987, "Shape Memory Alloys",Translated by J.B. Kennedy, Gordon and Breach Science Publishers, New York
12. Sivakumar, S., Kumar, K., Rao, L., Rao, M., 2005 "A Review of the Constitutive Models for Shape Memory Alloys", International Conference on Smart Materials Structures and Systems, Bangalore, India
13. Auricchio, F., Di Loreto, M., Sacco, E., 2000, "Finite Element Analysis of a Stenotic Artery Revascularization Through A Stent Insertion", Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, Vol. 00, PP. 1-15, Malaysia
14. Auricchio, F., 2002, "Shape Memory Alloys:Applications and Finite-Element Modeling", Meccanica Strutturale, Università delgi Studi di Pavia, Italy
15. Tremblay, M., 2004, "Les Implants Medicaux en Alliage a Memorie de Forme", Memry