



**NiTi ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLARA BAKIR
KATKISININ FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

İsmail AKBAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN**

ELAZIĞ, 2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİTİ ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLARA BAKIR KATKISININ FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

İsmail AKBAŞ

(122114101)

Anabilim Dalı: Fizik

Programı: Katıhal Fiziği

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 04.11.2015

ELAZIĞ, 2017

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİTİ ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLARA BAKIR KATKISININ FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

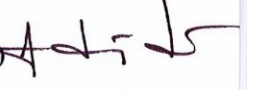
YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail AKBAŞ

(122114101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 04.11.2015

Tezin Savunulduğu Tarih: 12.04.2017

Tez Danışmanı:	Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN(Fırat Üniversitesi)	
Diğer Jüri Üyeleri :	Doç.Dr.Serkan ALAGÖZ(İnönü Üniversitesi)	
	Doç.Dr. Mediha KÖK(Fırat Üniversitesi)	

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tez konusunun belirlenmesinde, projenin hazırlanması ve malzeme teminininde, çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Yrd.Doç.Dr.Fethi DAĞDELEN' e teşekkürlerimi sunarım.

Sabırla işlerimin bitmesini bekleyen her türlü desteklerini esirgemeyen kızım Nazlıcan AKBAŞ'a ve oğlum Aybar AKBAŞ'a anlayış ve varlıklarından dolayı teşekkür ederim.

İsmail AKBAŞ

ELAZIĞ-2017

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	III
ABSTRACT	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	VI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	VII
1. GİRİŞ.....	1
2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR.....	2
2.1. Martensitik Dönüşüm.....	3
2.2. Termoelastik Martensitik Dönüşümler.....	4
2.3. Martensitik Dönüşümün Termodinamiği	5
2.4. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Genel Karakteristikleri	7
2.4.1. Şekil Hatırlama Etkisi	8
2.4.1.1. Tek Yönlü Şekil Hatırlama	9
2.4.1.2. Çift Yönlü Şekil Hatırlama	11
2.4.2. ŞekilHatırlamalı Alaşımların Kullanım Alanları	12
3. MATERYAL VE METOD	17
3.1. Numune Hazırlama	17
3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) - EDX Analizi	18
3.3. X - Işını Analizi (XRD)	18
3.4. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçümü.....	19
3.5. Optik Mikroskop İncelemesi ve Vickers Sertlik Ölçümleri	20
4. BULGULAR	22
4.1. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçüm Sonuçları	22
4.2. SEM - EDX Analizi Sonuçları	26
4.3. X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçüm Sonuçları	28
4.4. Optik Mikroskop ve Vickers Sertlik Ölçümleri	29
4.5. Mikrosertlik	30
4.6. Sonuç ve Tartışma	34
KAYNAKLAR.....	36

ÖZET

Bu çalışmada NiTi şekil hatırlamalı alaşımına farklı oranlarda Cu(bakır) ilave edilerek hazırlanan NiTiCu alaşımlarının şekil hatırlama özellikleri araştırıldı. Üretilen Ni-%50Ti, Ni-%45Ti, Ni-%55Ti, Ni-%50Ti-%5Cu ve Ni-%45Ti-%10Cu alaşımlarının DSC(Diffarenciyel Scanning Callorimetry) ile faz dönüşüm sıcaklıkları belirlendi. DSC sonuçlarına göre Ni-%55Ti ikili şekil hatırlamalı faz dönüşüm sıcaklıklarının en yüksek olduğu gözlemlendi. %10Cu ilave edilen üçlü NiTiCu şekil hatırlama etkinin kaybolduğu belirlendi. Numunelerin aktivasyon enerji değerleri Ni-%50Ti, Ni-%45Ti, Ni-%55Ti, Ni-%50Ti-%5Cu alaşımları için sırasıyla 155,63 kJ/mol, 226,47kJ/mol, 207,3 kJ/mol ve 101,84 kJ/mol olduğu belirlendi. Titanyum elementinin artması alaşımın aktivasyon enerjisini arttırdığı söylenebilir. Bunun yanında %5 Cu ilavesi NiTi alaşımının Martensit fazdan Austenite faza geçiş için gerekli aktivasyon enerjisini bir hayli düşürdüğü söylenebilir. Ayrıca X-ışını, SEM ve optik mikroskop gözlemleriyle yapı tayini yapıldı. Ni-%50Ti, Ni-%45Ti alaşımları oda sıcaklığında austenite fazda olduğundan SEM ve optic mikrograflarında martensit plakalar gözükmedi, fakat Ni-%55Ti, Ni-%50Ti-%5Cu alaşımlarının mkrograflarında yer yer martensit plakalara rastlandı. Oda sıcaklığında alınan XRD ölçüm sonuçlarına da Ni-%50Ti ve Ni-%45Ti alaşımları için çok az miktarda martensit fazı temsil eden B19' ve B2 fazlarının piklerine rastlandı. Ni-%55Ti ve Ni-%50Ti-%5Cu alaşımlarında ise Martensit piki ifade eden piklerin sayıları ve şiddetlerinin arttığı görüldü.

Anahtar Kelimeler: Cu katkılı şekil hafızalı alaşımlar, Cu-Ni-Ti alaşımları, faz dönüşümleri, dönüşüm sıcaklıkları

SUMMARY

EFFECTS OF CU DOPING ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF NITI BASED SHAPE MEMORY ALLOYS

In this study, shape memory characteristics of NiTiCu alloys prepared by adding Cu (copper) to NiTi shape memory alloys at different ratios, were investigated. Phase transformation temperatures of the alloys produced in this study, Ni-50Ti, Ni-% 45Ti, Ni-% 55Ti, Ni-% 50Ti- 5Cu and Ni-% 45Ti- 10Cu, were determined by differential scanning calorimetry (DSC). According to DSC results, it was observed that phase conversion temperatures of the alloy Ni-% 55Ti dual shape memory were the highest. It was determined shape memory effect of the 10% Cu added triple NiTiCu was disappeared. The activation energy values of the samples were determined as 155.63 kJ / mol, 226.47 kJ / mol, 207.3 kJ / mol and 101.15 kJ / mol for the alloys Ni- 50% Ti, Ni- 45% Ti, Ni- 55% Ti, Ni- , 84 kJ / mol, respectively. It can be said that with the increasing titanium ratio activation energy of the alloy increases. Besides, it can be said that the addition of 5% Cu to NiTi alloy greatly reduces the activation energy required for transition from the Martensite phase to the Austenite phase. In addition, X-ray, SEM and optical microscope observations were performed in order to determine the structure. Martensite plates were not observed in SEM and optic micrographs because Ni- 50% Ti and Ni-% 45Ti alloys were in austenite phase at room temperature, but micrographs of Ni-% 55Ti, Ni-% 50Ti- 5Cu alloys revealed martensite platelets in some places. XRD measurements taken at room temperature also revealed peaks of the B19 / and B2 phases representing very little martensite phase for Ni- 50% Ti and Ni-% 45 Ti alloys. In Ni-55% Ti and Ni-50% Ti-5% Cu alloys, increased numbers and intensity of the martensite peaks were observed.

Keywords: Cu- based shape memory alloys, Cu-Ni-Ti alloys, phase transformations, transformation temperatures.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Ana ve Martensit fazın kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklık ve martensit dönüşümle ilişkisi	5
Şekil 2.2.	Şekil Hatırlamalı alaşımların farklı fazları	9
Şekil 2.3.	Tek yönlü şekil hatırlama olayının şematik gösterimi	10
Şekil 2.4.	Çift yönlü şekil hatırlama olayı.....	12
Şekil 2.5.	Çeşitli Aktüatörlerin Güç/Ağırlık Performansları	14
Şekil 2.6.	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	14
Şekil 2.7.	Damarlardaki Kan Pıhtısını Tutulması için SMA' dan Yapılmış Filtre	15
Şekil 2.8.	Damarlardaki tıkanma sorunlarının çözümü için SMA' dan yapılmış stent	16
Şekil 3.1.	Ark yöntemi ile eritme sistemi (Arc- Melter).	18
Şekil 3.2.	Bruker Discover D8 X-ray diffraction (XRD) analiz sistemi.	19
Şekil 3.3.	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ölçüm cihazı.	20
Şekil 3.4.	Bu çalışmada kullanılan Optik mikroskop.....	21
Şekil 4.1.	DSC curve of a) Ni _{50+x} Ti _{50-x} (x=%at.0,5)	23
Şekil 4. 2.	DSC curve of Ni ₄₅ Ti _{55-y} Cu _y (y=%at.0, 5)	24
Şekil 4.3.	DSC curve of a) Ni _{50+x} Ti _{50-x} (x=%at.0,5) and b) Ni ₄₅ Ti _{55-y} Cu _y (y=%at.0, 5) c) Ni ₄₅ Ti ₄₅ Cu ₁₀ alloys	24
Şekil 4.4.	$\ln\left(\frac{\beta^2}{T_m}\right)$ nin 1000/T bağlı değişimi.	25
Şekil 4.5.	SEM micrograph of a) A4 SMA, b) A2 SMA	27
Şekil 4.6.	Alaşımları oda sıcaklığında elde edilen X-ışını paterni	29
Şekil 4.7.	Optical micrographs of a) A1 SMA,b) A2 SMA,c) A3 SMA,d) A4 SMA,e) A5 SMA	33

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 3.1. Hazırlanan şekil hatırlamalı alaşım gruplarının atomikçe kompozisyonları.....	17
Tablo 4.1. $\text{Ni}_{50+x}\text{Ti}_{50-x}$ ($x=\% \text{at.0,5}$) ve $\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{55-y}\text{Cu}_y$ ($y=\% \text{at.0,5,10}$) Alaşım gruplarının dönüşüm sıcaklıkları ve aktivasyon enerjisi değerleri	26
Tablo 4.2. Hazırlanan şekil hatırlamalı alaşım gruplarının atomikçe kompozisyonları ographs of a) A1 SMA,b) A2 SMA,c) A3 SMA,d) A4 SMA,e) A5	28

SEMBOLLER LİSTESİ

A_f	: Martensit $\rightarrow$ austenit faz dönüşümünde austenit yapının tamamlandığı sıcaklık
A_s	: Martensit $\rightarrow$ austenit faz dönüşümünde austenit yapının başlama sıcaklığı
a_0	: Austenit örgünün örgü parametreleri
bcc	: Cisim merkezli kübik yapı
bct	: Cisim merkezli tetragonal
d	: Kristal yapıda düzlemler arası mesafe
ΔH	: Entalpi
ΔS	: Entropi
fcc	: Yüzey merkezli kübik
fct	: Yüzey merkezli tetragonal yapı
hkl	: Kristal yapı düzlemlerini belirleyen indis sistemi (Miller indisi)
M_f	: Austenit $\rightarrow$ martensit faz dönüşümünde austenit yapının tamamlandığı sıcaklık
M_s	: Austenit $\rightarrow$ martensit faz dönüşümünde austenit yapının başlama sıcaklığı
T	: Sıcaklık
T_c	: Kritik sıcaklık
T_0	: Austenit yapının termodinamik dengedeki sıcaklığı
T_m	: Maksimum pik sıcaklığı
α	: Çökelti fazı (fcc)
α_1	: 6R tipindeki martensit yapı
β	: e / a oranı (elektron / atom) 1,5 civarında olan süper örgülü kübik austenite faz
β_1	: DO ₃ türü ana faz yapısı (bcc) β_2 : B2 türü ana faz yapısı (bcc) β_1 : 18R tipindeki martensit yapı
β_2	: 9R tipindeki martensit yapı
γ	: Çökelti fazı
γ_2	: Beta brass yapı
γ_2'	: 2H tipindeki martensit yapı
Δd	: Kristal yapıda düzlemler arası mesafe farkı
ϵ	: Zorlanma
σ	: Zor
σ_T^{M-P}	: Martensit fazdan ana faza dönüşümü başlatan zor eşiği
σ_T^{P-M}	: Ana fazdan martensit faza dönüşümü başlatan zor eşiği

1. GİRİŞ

Yapılan uygun bir ısıtım işlemi ile gerçek şekline veya boyutuna geri dönebilme özelliğine sahip alaşımlar, şekil hatırlamalı alaşımlar olarak adlandırılır. Bu alaşımlar ısıtım değişimlere duyarlı malzemelerdir. En önemli karakteristikleri, kritik dönüşüm sıcaklığının üstünde ve altında iki farklı şekil veya Kristal yapıya sahip olmalarıdır. Kısmi olarak düşük sıcaklıklarda deforme edilebilen bu malzemeler, daha yüksek sıcaklıklarda deformasyon öncesi şekillerine dönebilmektedirler. Bu malzemeler ısıtıldıklarında "tekyönlü şekil hatırlamaya sahip malzemeler" olarak tanımlanırken, yeniden soğutmaları durumunda ise "ikiyönlü şekil hatırlamalı malzemeler" olarak tanımlanmaktadır [1]. Şekil hatırlama etkisi, kristalografik olarak difüzyon özelliği ve tersinir martensit dönüşüm gösteren bazı özel alaşımlarda gözlenmektedir [2].

Şekil hatırlamalı dönüşüm, ilk kez AuCd alaşımlarında 1932 yılında Chang ve Read tarafından farkedilmiş, 1938 de söz konusu dönüşümün pirinç malzemesinde de olduğu görülmüştür. 1951 yılında ise AuCd alaşımlı bir malzemesinde şekilhatırlama olayının anlaşılmasından sonar 1962' de Buehler ve arkadaşları Ni%50Ti alaşımlarında da şekil hatırlama etkisi tespit etmişlerdir. Bu tespit ile birlikte, şekil hatırlamalı alaşımlar ile ilgili hem ticari hem de metalurjik araştırmalar hız kazanmıştır.

Teknolojinin ilerlemesi açısından, yeni malzemelerin üretilmesi ve geliştirilmesi çok önem taşımaktadır. Bu gelişmeler sadece malzeme elde etmeye yönelik değil, yeni işlevler kazandırmak ve malzemenin kullanım alanını artırarak yeteneklerini de artırabilmelidir. Bu malzemelerin fonksiyonelliği, teknolojiye kullanılan elementlerde ve yenilikçi mekaniksel sistemlerde kullanılabilir. Şekil hatırlamalı alaşımlar (SHA) bu çalışmaların ve gelişmenin bir sonucudur. Şekil hatırlamalı alaşımlara ait özellikleri kullanarak daha üstün iyi kapasitede makineler üretmek mümkündür [3]. Aktüatörlerde (Çalıştırıcı), medikal cihaz tasarımında ve akıllı sistemlerde sıklıkla kullanılan şekil hatırlamalı alaşımlara her geçen zamanda ilgi artarak devam etmiştir. Çünkü bu malzemeler uygulanan zorlamalar sonucunda meydana gelen şekil değişikliğini düzeltilebilme özelliği ve austenit, martensit faz arasında sıcaklık faz dönüşümü meydana getirme özelliği gösterirler [4]. Şekil hatırlamalı alaşımlar martensit dönüşümünden dolayı özel bir sıcaklıkta ısıtıldığında deforme olmuş halden orijinal hale

dönmesi olayından dolayı tıbbi alanda ve mühendislikte kullanılmaktadır [5].

Endüstride sıklıkla karşılaşılan,şekil hatırlamalı NiTi alaşımları ve bakır esaslı alaşımlardır ve çok önemli ticari değere sahiplerdir. Bu alaşımlar sahip oldukları özellikler bakımından birbirinden oldukça farklıdır. Bakır esaslı alaşımlarda % 4-5 olan şekil hatırlama gerinim (yük altındaki bir malzemenin, yük uygulanmadan önceki duruma kıyasla şeklini ne oranda değiştirdiğini ifade eder)'e sahip iken, NiTi alaşımlarda %8' dir civarındadır. Daha çok ısıl karalılığa sahip olan NiTi alaşımları, gerilmeli korozyona karşı hassas olan bakır esaslı alaşımlarla kıyaslandığında çok daha üstün bir korozyon direncine ve çok daha yüksek sünekliğe sahiptir. Diğer taraftan bakır esaslı alaşımların fiyatı daha düşük, eritmeleri ve açıkavada preslenmeler daha kolay ve dahageniş dönüşüm sıcaklık aralığına sahiptirler. Sonuçta her iki tür alaşımın kullanılacakları yere ve ortama göre gereken avantaj ve dezavantajları olduğu söylenebilir [6].

2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR

Şekil hatırlama özelliğine sahip bir alaşım, belirli bir kristal yapıya sahiptir. Bu yapı martensit yapıda iken sıcaklık ve zora bağlı olarak değişebilir. Şekil hatırlama özelliğine sahip çubuk şeklindeki herhangi bir alaşım, martensit dönüşüm oluştuktan sonra yonca yaprağı şeklini alır ve daha sonra ısıtılırsa austenit halde tekrar eski haline yani çubuk şekline döner. Buradan da anlaşıldığı gibi şekil hatırlama olayı gösteren bu alaşımlar için martensit faz dönüşümü esastır [7].

Çağımızda şekil hatırlamalı bu alaşımlar, gösterdikleri bu üstün hafıza özellikleriyle mühendislik ve tıp alanlarındaki birçok uygulamada sıklıkla kullanılma imkanı elde etmişlerdir. NiTi alaşımları daha iyi şekil hatırlama özelliği ve korozyon direnci göstermelerine rağmen, düşük fiyata sahip olmaları sebebiyle bakır bazlı alaşımlar birçok uygulamada daha avantajlı alternatif sunmaktadırlar. Özellikle ince taneli bakır bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar taneler arası kırılma ve bunların mekanik özelliklerinde çok belirgin bir ilerleme sağlamıştır.

Şekil hatırlama olayını, mekanikteki esnek bir yayın davranışına benzetebiliriz. L_0 boyundaki esnek bir yay esneklik sınırları içerisinde bir kuvvet uygulanırsa, yayın boyu L olur. Yay üzerindeki kuvveti ortadan kaldırılınca yay yine eski boyunu alır, yani L_0 olur. Şekil hatırlama olayı da buna benzetilebilir. Martensit dönüşüm tamamlandıktan sonra (M_f sıcaklığının altında) malzeme deforme olursa ve daha sonra sıcaklık yükseltilip austenit hale döndüğünde malzeme, austenit haldeki normal durumuna dönüyorsa bu olaya şekil hatırlama olayı denir [8].

Şekil hatırlama oluşumundan dolayı şekli geri alma, numunenin tümünü A_f sıcaklığının üstüne ısıtmakla olmaktadır. Şekil hatırlama alaşımlarını oluşturan kuvvet, ana ve martensit fazlar arasındaki ters dönüşüm sırasında ortaya çıkan kimyasal serbest enerjideki farklılıktan dolayıdır. Bununla birlikte, numunelerin şeklinin eski haline dönmesi daima ters dönüşümle olmaktadır. Şekil hatırlama olayının gözlenebilmesi için;

a) Martensitik dönüşüm termoelastik olmalıdır,

b) Deformasyon, dislokasyon kayması ile değil ikizlenme benzeri bir mekanizma ile olmalıdır,

c) Ana faz düzenli olmalıdır [3].

2.1. Martensitik Dönüşüm

Martensit dönüşüm, metal ve alaşımlarda, yüksek sıcaklık fazında iken malzemeyedışarıdan sıcaklık, zor, manyetik alan gibi etkilerin ayrı ayrı veya birlikteuygulanması ile martensit fazın elde edilmesidir. Martensit faz dönüşümünün en önemli özelliği difüzyonsuz olmasıdır. Böylece martensit fazdaki atomların komşulukları, dönüşüm öncesi komşuluklar ve kristalin kompozisyonunda herhangi bir değişme olmaz [9].

Martensit dönüşüm, ilk olarak metaller, seramikler ve polimerler üzerinde yaptığı araştırmalar bilinen Adolf Martens tarafından açıklanmıştır. Daha sonra martensit yapının, atomik difüzyonsuz gerçekleşen örgü dönüşümünden kaynaklandığı gösterilmiştir. Kristaller martensit adı verilen bu şekildeki dönüşümlerle oluşmaktadır ve atomik difüzyonsuz örgü dönüşümleri martensit dönüşüm olarak adlandırılmaktadır.Martensit dönüşüm, austenit yapıdan, martensit yapıya atomların difüzyonu ile meydana gelir. Çoğu yapıda,austenit fcc yüzey merkezli kübik örgüden, bcc cisim merkezli kübik örgü veya bcc cisim merkezli tetragonal örgü yapısında olan mercek veya tabak şekilli bölgelere dönüşüm gözlenmektedir. Martensit dönüşüm, kısaca kesme deformasyonu içeren ve kooperatif atomik hareketle sonuçlanan örgü dönüşümüdür [3].

Difüzyonsuz martensit dönüşümlere çelik gibi birçok metal, alaşım ve bileşiklerde karşılaşılmaktadır. Dönüşüm en çok çeliklerin sertleştirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, çelik gibi metallerin zora karşı dayanma gücünüde arttırmaktadır [10].

Martensit dönüşümle ilgili en önemli etki şekil hatırlama etkisidir. Bu alaşımlar, uygulanan deformasyona (sıcaklık, zor, manyetik alan, vb) karşılık ilk şekillerini hatırlayabilmektedirler.

Malzeme deforme edildiğinde, martensit tabakaların yapılanmasında iç değişimler meydana gelmektedir. Martensit dönüşümler, alaşımlarda kesme gibi

mekanizmalarla oluşur. Ürün faz içerisinde dislokasyonlar, ikizlenmeler ve istiflenme kusurları gibi örgü kusurları meydana gelir. Şekil hatırlama alaşımlarında gözlenen martensit dönüşümler, uygulanan zor, sıcaklık, manyetik alan gibi etkilere bağlı olarak tersinirlik gösterirler. Isıtma, manyetik alanın kaldırılması, kuvvetin kaldırılması gibi işlemlerle malzeme ilk haline martensit dönüşümle dönebilmektedir. Bu tersinirlik sebebiyle bu alaşımlar farklı mekanik özellikler gösterirler [11].

Metal ve alaşım sistemlerindeki faz dönüşümleri, çekirdeklenme-büyüme dönüşümleri ve martensitik dönüşümler olmak üzere iki çeşittir [12]. Martensitik dönüşüm olayında bir kristal yapıdan yeni bir kristal yapıya dönüşüm olmasına rağmen, dönüşüm öncesi faz olan ana fazdaki atomların komşulukları dönüşüm sonrası oluşan martensitik fazda aynı kalır [6]. Bu dönüşümler, atomların birlikte hareketini kapsadığı için difüzyonsuz dönüşümlerdir.

Genel bir kural olarak, bütün metaller soğutma veya ısıtma sıcaklığı yeteri kadar hızlı yapıldığında, difüzyonsuz dönüşüme uğrayabilirler. Çok sayıda metalik veya metalik olmayan bileşiklerde ve minerallerde martensitik dönüşüm meydana gelebilir [12].

2.2. Termoelastik Martensitik Dönüşümler

Martensitik dönüşümler termoelastik ve termoelastik olmayan dönüşümler olarak iki farklı biçimde gerçekleşir. Termoelastik martensitik dönüşüm, habit düzlemin (austenit ve martensit fazları arasında habit düzlemi olarak adlandırılan bir invaryant düzlemi) hareketiyle, aynı kimyasal bileşim ve ana fazdaki atomik düzeni muhafaza ederek atomların küçük uyumlu hareketiyle gelişir ve kristal yapıdaki değişime ilave olarak habit düzlemde bir kesme şekil bozukluğuna sebep olur. Termoelastik martensitik dönüşümde plastik şekil bozukluğu ikiz oluşumu mekanizması ile meydana gelirken, şekil hatırlama etkisi göstermeyen alaşımlarda sürüklenerek yer değiştirme mekanizması ile meydana gelir.

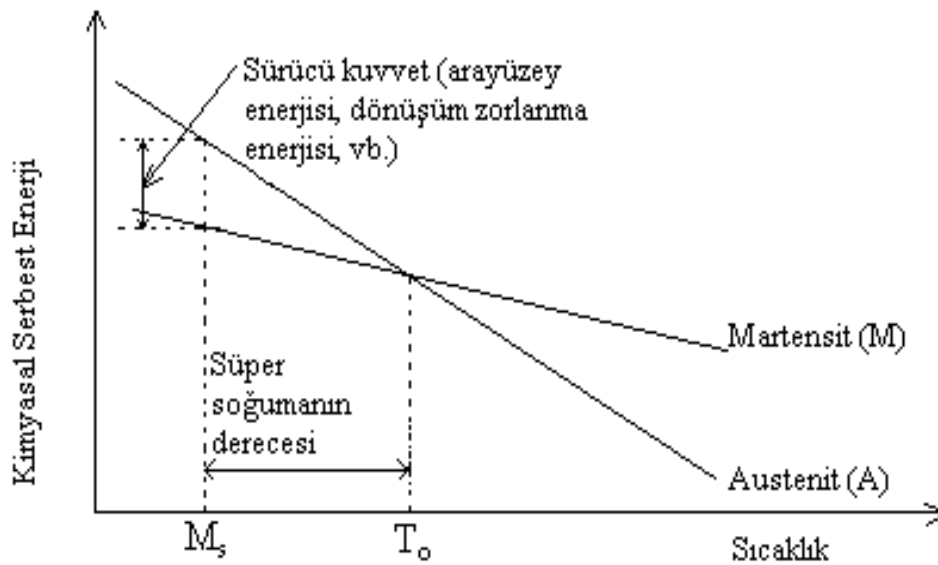
Sıcaklık etkisiyle meydana gelen martensitik dönüşümler, alaşım sistemlerine göre atermal ve izotermal olarak meydana gelir. Bu iki çeşit faz geçişi arasında biçimsel

olarak fark bulunmamasına rağmen, dönüşüm sıcaklıkları ve dönüşüm sonrası ürünler farklıdır. Atermal dönüşümde şekil hatırlama olayı izlenmezken izotermal dönüşümün oluşması için ise ya ortam sıcaklığının yada bir mekanik zorun uygulanması gerekmektedir. Termoelastik olmayan dönüşümlerde yine kayma mekanizması ile meydana gelen yapının önceki haline gelmesi mümkün değildir. Bu duruma uygun en iyi örnek olarak çelikler verilebilir ve yüzey sertleşmesi olarak kullanılır.

Martensitik dönüşümlerin izotermal ve atermal olması alaşımın kimyasal bileşimi ile ilgili değildir. Bu nedenle izotermal ve atermal dönüşümlerin her ikisi de aynı alaşım içerisinde meydana gelebilir. Ancak meydana gelen dönüşümlerin bu iki tipi için dönüşüm sıcaklıkları ve dönüşüm sonrası ürün yapıları farklıdır. Tek yönlü şekil hatırlama etkisi termomekanik etki ile oluşur [13].

2.3. Martensitik Dönüşümün Termodinamiği

Austenit Kristal yapı, bir T_0 sıcaklığında termodinamik olarak dengededir. Kristal yapı bu sıcaklıktan hızla soğutulursa kritik bir M_s Sıcaklığından sonra, austenit kristal yapı içerisinde Şekil 2.1' de görüldüğü gibi, martensit yapı oluşmaya başlar. Bu M_s sıcaklığına martensit başlama sıcaklığı denir ve değişik alaşımlar için farklı değerlere sahiptir. $(T_0 - M_s)$ sıcaklık farkı, fazlar arasındaki kimyasal serbest enerjiyi, bu enerji de dönüşüm için gerekli sürücü kuvveti doğurur [3].



Şekil 2.1.Ana ve Martensit fazın kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklık ve martensit dönüşümle ilişkisi [3].

Kapalı bir sistemin, sabit bir P basıncına karşı hacmi V_1 ' den V_2 ' ye kadar değiştirilecek olursa, enerji de (termodinamiğin birinci kanununa göre) E_1 ' den E_2 ' ye değişmiş olur, bu durumda da ΔE enerji değişimi;

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \Delta Q - P(V_2 - V_1) \quad (2.1)$$

olur. Böyle bir değişim esnasında sistemin ΔQ ısı enerjisi değişimi, yukarıdaki ifadeden hesaplanınca;

$$\Delta Q = (E_2 + PV_2) - (E_1 + PV_1) \quad (2.2)$$

bulunur. Görüldüğü gibi, sabit P basıncına karşı iş yaparak hacmi değişen bu kapalı sistemin, ısı enerjisinde meydana gelen ΔQ enerji farkı, iki ifade farkına eşittir. $(E + PV)$ terimlerinden oluşan bu ifadeye sistemin ihtiva ettiği ısı veya Entalpi' si adı verilir. Bu tanıma göre, sistemin ısı enerjisindeki değişimi, ilk ve son termodinamik durumlardaki entalpilerinin farkına eşittir. Genel olarak entalpi H harfi ile gösterildiğine göre;

$$H = E + PV \quad (2.3)$$

$$\Delta Q = H_2 - H_1 \quad (2.4)$$

bağıntıları yazılabilir [14].

Salzbrenner ve Cohen tarafından kabul edilen T_0 denge sıcaklığı,

$$T_o = \frac{1}{2}(M_s + A_s) \quad (2.5)$$

şeklinde dir. Burada M_s martensit başlama sıcaklığı, A_s austenit başlama sıcaklığıdır [15].

T_0 denge sıcaklığı Tong ve Wayman' a göre,

$$T_o = \frac{1}{2}(M_s + A_f) \quad (2.6)$$

olarak alınmıştır. Burada A_f austenit bitiş sıcaklığıdır [16].

Termal olarak etkilenmiş bir termoelastik martensitik dönüşüm süresince kalorimetrik teknikler vasıtasıyla ölçülen enerji, üç farklı katkının etkisinin sonucudur;

(i) Bir kimyasal entalpi terimi veya dönüşümün gizli (latent) ısısı,

(ii) Depolanan elastik enerji terimi,

(iii) Arayüzeylerin hareketine karşı koyan engeller içerisinde (engellere rağmen) arayüzeyleri hareket ettirmek için harcanan işin sebebini açıklayan terim. İlk iki katkı tersinir katkılardır, son terim ise tersinmez bir katkıdır.

Austenit ve martensit arasındaki özellikli ısı farkı ihmal edilirse; ters dönüşümde ölçülen ısı, ileri dönüşümde buna karşılık gelen ısıdan mutlak değer olarak daha büyük olmasına rağmen; numunenin entropi değişimi, her iki dönüşüm için aynıdır [17].

Ergime, buharlaşma, demirin α - β allotropik dönüşümü gibi faz dönüşümleri doğada, genellikle sabit basınç altında (veya 1 atm basınçta) ve sabit sıcaklıklarda olmaktadır. Bu nedenle sabit sıcaklıkta entropi deki değişiminin hesap edilmesi önem kazanır. Bu duruma göre sabit bir basınçta entalpi ifadesinin türevi;

$$\Delta H = \Delta E + P\Delta V \quad (2.7)$$

Şeklinde olur. Buna göre, termodinamiğin birinci kanunundan yararlanarak, $\Delta E = \Delta Q - P\Delta V$ eşitliği yazılabilir;

$$\Delta H = \Delta Q \quad (2.8)$$

bulunur. O halde, sabit basınçta;

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{\Delta H}{T} \quad (2.9)$$

denklemini yardımı ile, entalpideki değişim biliniyor, entropideki değişim hesaplanabilir[14].

Prado ve arkadaşları, entalpi değişimini, $\Delta H^{M \rightarrow A}$ (burada M martensite fazı ve A austenit veya ana fazı gösterir.) martensitik geçişin farklı alaşımları için aynı zamanda ölçmüşler, bu değerlerden $\Delta S^{M \rightarrow A} = \Delta H^{M \rightarrow A} / T_0$ formülüyle entropi değişimlerini hesaplamışlar ve bu değerlerin yaklaşık %10' luk bir doğruluğa sahip olduğunu söylemişlerdir [18].

2.4. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Genel Karakteristikleri

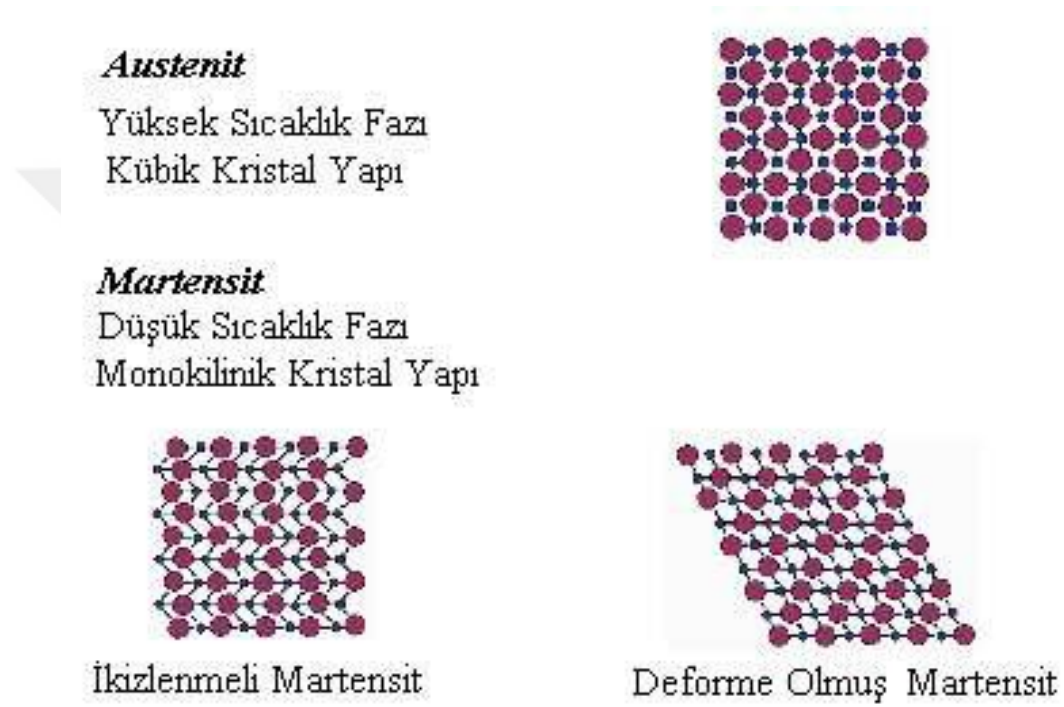
Şekil hatırlama davranışı, ilk olarak 1932' de Olander'in Altın-Kadmiyumda 'rubber like effect' çalışmasında ve 1938' de Greninger ve Mooradian' nın Pirinç (Bakır – Çinko)alaşımlar çalışmasında gözlemlenmiştir [19]. Bu çalışmalardan yıllar sonra (1951 de) Chang ve Read şekil dönüşümü (Shape Recovery) terimini ilk kez kullanmışlardır. Onlar da Altın-Kadmiyum alaşımı ile ilgili çalışmışlardır. 1962' de William J. Buehler ve çalışma arkadaşları, Naval Ordnance laboratuvarın da Nikel-Titanyum alaşımlarının şekil hatırlama etkisini keşfetmişlerdir. Bu alaşıma NiTiNOL (Nikel-Titanyum Naval Ordnance Laboratuvarı) ismini vermişlerdir. Günümüze kadar geçen süre içerisinde şekil hatırlama etkisi üzerine yoğun şekilde çalışmalar yapılmış ve bu alaşımlar çeşitli sektörler (mühendislik, sağlık, askeri gibi) tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Bu alaşımların fiziksel davranışlarının kontrol edilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir [20].

2.4.1. Şekil Hatırlama Etkisi

Şekil hatırlamalı alaşımlar, her alaşımda farklı olmak üzere belli bir sıcaklığın üstüne kadar ısıtıldığında, belirgin şekil değişimi gösteren metal alaşımlarıdır. Bu alaşımlar özel bir sıcaklığa ulaştıklarında önceki şeklini ve boyutunu hatırlarlar. Bu davranışından dolayı, bu tarz malzemeler akıllı malzemeler olarak da adlandırılabilirler. Genel olarak bu malzemeler, oldukça düşük sıcaklıklarda plastik olarak deforme edildikten sonra, daha yüksek sıcaklıklara ulaştıklarında deformasyondan önceki şekillerine geridönerler [20,21,22]. Şekil hatırlamalı alaşımlar Şekil2.2' de görüldüğü gibi iki faza sahiptirler. Biri yüksek sıcaklık fazı Austenit (İsmi İngiliz metalurjist William Chandler Austen' den almıştır) diğeri ise düşük sıcaklık fazı Martensit (İsmi Alman metalograf Adolf Martens' ten almıştır) dir [20,23]. Martensit'ten Austenit'e, Austenit'ten Martensit'e meydana gelen faz

dönüşümlerinin dört geçiş sıcaklığı şu şekilde isimlendirilir. Martensit bitiş (M_f), Martensit başlangıç (M_s), Austenit bitiş (A_f), Austenit başlangıç (A_s) dir. Sıcaklık sıralaması $M_f < M_s < A_s < A_f$ dir.

$M_s < T < A_f$ sıcaklığı aralığında herhangi bir faz farkı görülmemektedir ve $M_f < T < A_f$ sıcaklığında martensit ve austenit fazı birlikte olduğu bilinmektedir [24].



Şekil 2.2. Şekil Hatırlamalı alaşımların farklı fazları [20].

2.4.1.1. Tek Yönlü Şekil Hatırlama

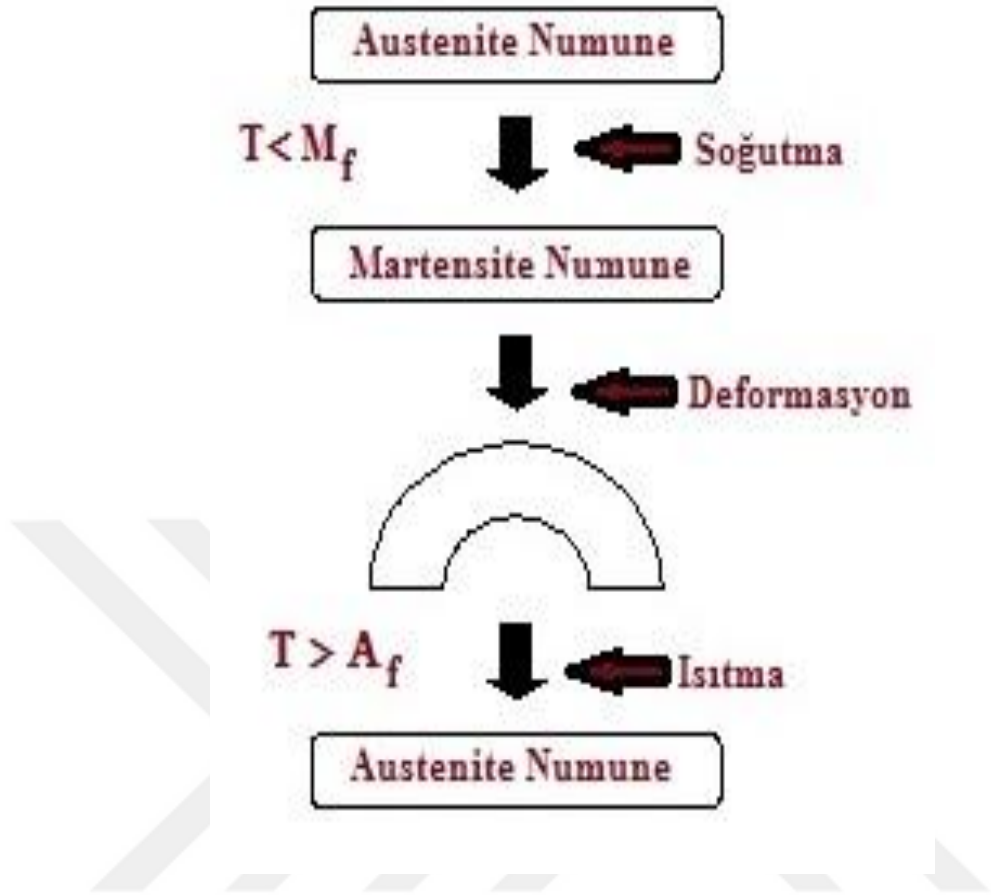
Tek ve çift yönlü şekil hatırlama özelliğine sahip alaşımların temel özellikleri, kritik bir dönüşüm sıcaklığının altında ve üstünde iki ayrı şekil ve konfigürasyon göstermeye yatkınlıklarıdır. Kristalografik yapıda oluşan değişimler boyutlardaki değişme ile bağlantılıdır ve alaşım düşük ve yüksek sıcaklık şekillerine sahip olduğunu gösterir [7].

Alaşım martensit bitiş sıcaklığının altındaki herhangi bir sıcaklıkta ($T < M_f$) deforme edilirse uygulanan zorun kaldırılması ile alaşım önceki orijinal durumuna geri

dönemez. Isıtma sonucunda, numunedeki artık zor, sıcaklık kritik bir sıcaklığın üzerine çıkarken aşamalı olarak geri döner. Sıcaklığın tekrar düşürülmesi ile, numune deforme edilmiş şeklini geri kazanamaz. Martensit dönüşümü ve yeniden yönelimle artık zorlanma oluşturma özelliği ve ısıtma işlemi sonrası deformasyon öncesi orijinal β -faz yöneliminin tekrar elde edilebilmesi, tek yönlü şekil hatırlama olayının temel mekanizmasıdır [25].

Tek yönlü şekil hatırlama olayı NiTi, TiNb, NiAl, FePt, CuZnSi, CuZnSn, FeMnC gibi birçok alaşım sistemlerinde gözlenmiştir [26,27,28]. Bu şekil hatırlama türünün zorlanma limiti, kendiliğinden martensit dönüşümün biçim zorlanmasına bağlıdır. Bu limit, deformasyon etkili bir martensit tek kristalinin sadece terslenmesiyle ortaya çıkar. Pratikte bu seviyeye sadece β -faz tek kristallerinde ulaşılır.

Tek yönlü şekil hatırlama olayına tersinmez şekil hatırlama olayı da denir. Örnek olarak, austenit haldeki bir alaşım çubuk sıcaklık düşürülerek martensit hale geri döndürüldüğünde şeklini değiştirmez. Fakat martensit haldeki bu çubuğa bir deformasyon uygulanırsa şekli bozulur. Bu şekil bozukluğunun Şekil 2.3' deki gibi kavisli şekilde olduğu varsayılırsa, numune ısıtıldığında tekrar çubuk şeklini alarak austenit fazdaki ilk şeklini alır.



Şekil 2.3. Tek yönlü şekil hatırlama olayının şematik gösterimi.

2.4.1.2.Çift Yönlü Şekil Hatırlama

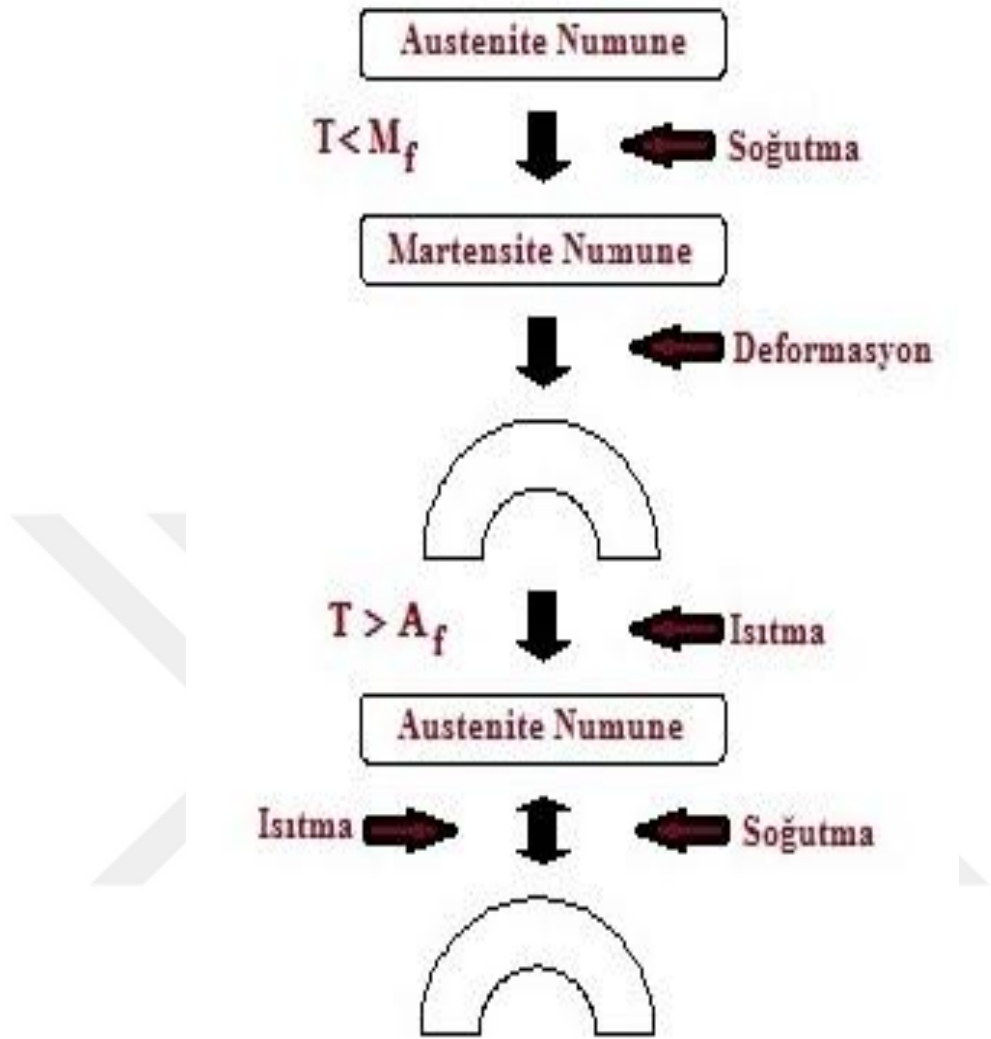
Çift yönlü şekil hatırlama davranışı ise, bir maddenin yüksek ve düşük sıcaklıkta sahip olduğu şekline dışarıdan bir etkiye ihtiyaç duymaksızın sadece sıcaklık etkisiyle dönmesidir. Şekil hatırlamalı alaşımlarda gözlenen martensit dönüşümleri uygulanan zor ve sıcaklık etkisine bağlı olarak çift yönlülük (tersinirlik) gösterirler [29].

Tersinir (Çift yönlü şekil hatırlama) şekil hatırlama olayının oluşumu Şekil 2.4’de gösterildiği gibidir. $T < M_f$ sıcaklığında tamamen martensit fazdaki bir numuneye dışarıdan zor kullanarak istenilen bir şekil verilebilir. Yapılan bu plastik deformasyon sonucunda, uygulanan zorun kaldırılmasıyla numune deforme edilmiş şeklini korur. Deforme edilmiş numunenin sıcaklığı $T > A_f$ ’ ye yükseltilince plastik deformasyon

ortadan kalkar ve deformasyon öncesi şekle ulaşılır. Numunenin sıcaklığı tekrar $T < M_f$ sıcaklığına düşürülürse daha önceki deforme edilmiş şekline döner. Bu da tersinir şekil hatırlama olayının bir sonucudur [30].

Şekil hatırlamalı alaşımlardaki dönüşümün kristaloğrafik açıdan tersinirliği, termoelastik dönüşümün veya martensit dönüşümün öne çıkan bir özelliğidir. Bundan dolayı şekil hatırlama olayı, termoelastik martensit dönüşüm özelliği gösteren alaşımlarda ortaya çıkar [31].

Çift yönlü şekil hatırlama kapasitesindeki artış, γ çökeltilerinin büyüklüğündeki artış ile doğru orantılıdır [32]. Şekil hatırlama etkisi, martensit hacim oranındaki artışla beraber azalma gösterir. Çift yönlü şekil hatırlama etkisi yaklaşık 10000 tekrardan sonra bu özelliğini kaybeder. CuZnAl alaşımlarında, çift yönlü şekil hatırlama özelliğindeki bu azalma hızı, martensitik yapıya sahip NiTi gibi diğer şekil hatırlamalı alaşımlardan daha yüksektir [33].



Şekil 2.4. Çift yönlü şekil hatırlama olayı.

2.4.2.Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kullanım Alanları

Bu malzemeler şu anda, tepki hareketlerinde ki hızın, ihtiyaçlar doğrultusunda önemi az olan uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Histerisiz, direnç ve mikro yapıdaki değişimler, süper elastik gibi etkileri bünyesinde barındıran malzemeler bundan dolayı kompleks bir yapıya sahiptir [34].

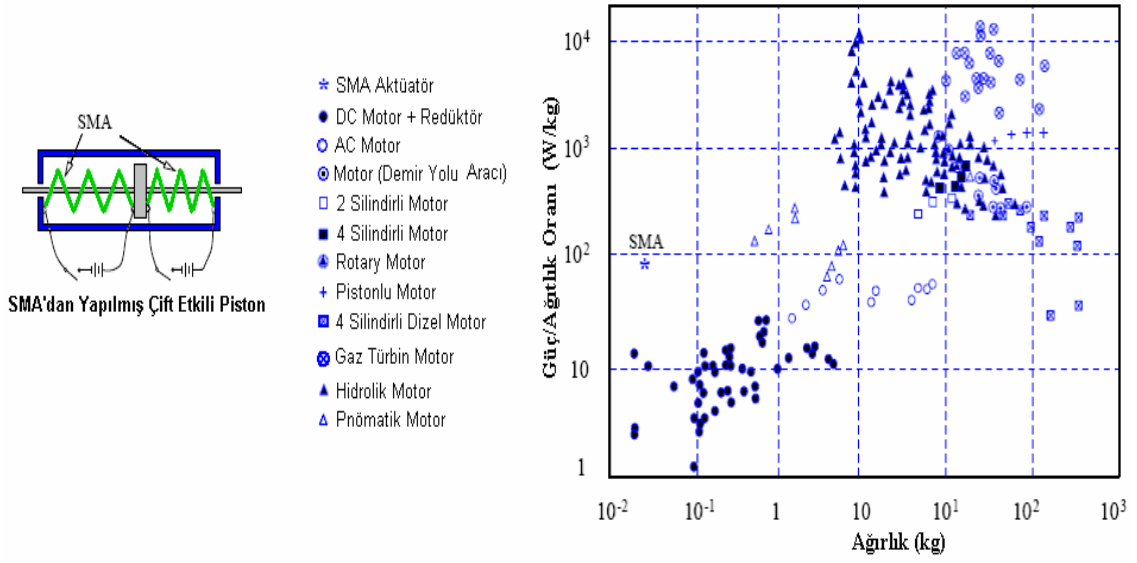
Sistemlerde kullanılan aktüatör tasarımları yapılırken önemli kriterler vardır. Bunlar tasarımın sistem içerisinde kaplamış olduğu hacmi ve sisteme ek olarak getirmiş

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 oranından elde edilen performans kriterine göre değerlendirilmektedir [35,36]. Bu performans kriterlerine göre Şekil 2.5' de gösterildiği gibi var olan tüm aktüatörlerin performansları bir grafik halinde gösterilmektedir.

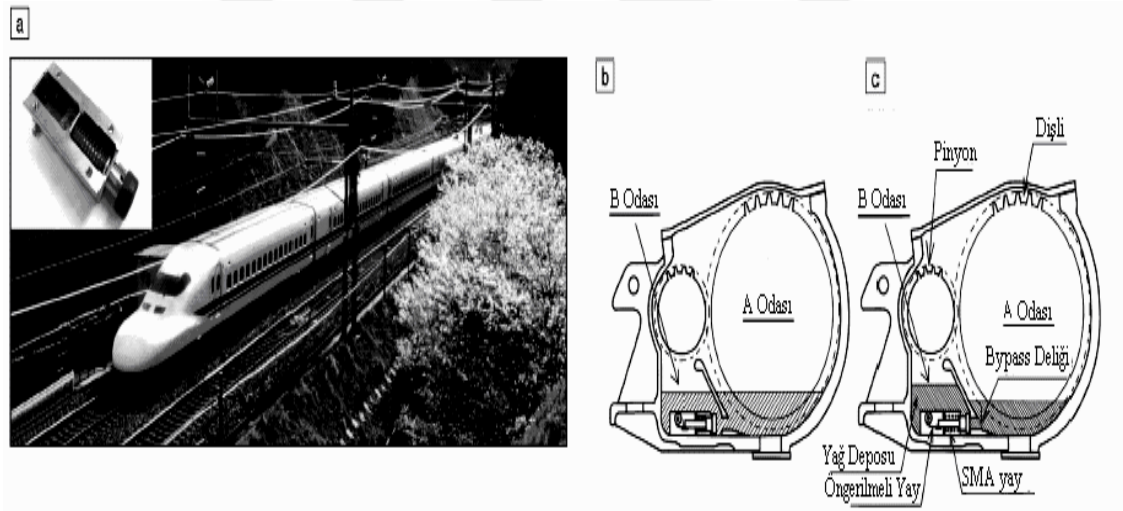
Şekil Hatırlamalı Alaşımlar içerisinde endüstride yaygın kullanımı olan ve ticari değere sahip iki tür alaşım bulunmaktadır. Bunlar şekil hatırlamalı NiTi alaşımları ve bakır esaslı alaşımlardır. Bu alaşımlar sahip oldukları özellikleri bakımından birbirinden çok farklıdır. Bakır esaslı alaşımlarda % 4–5 olan şekil hatırlama şekil değiştirme değeri NiTi alaşımlarda yaklaşık %8'dir. Daha fazla ısıl karalılığa sahip olan NiTi alaşımları, gerilmeli korozyona karşı hassas olan bakır esaslı alaşımlarla karşılaştırıldığında mükemmel bir korozyon direncine ve çok daha yüksek sünekliğe sahiptir. Diğer taraftan bakır esaslı alaşımlar daha ucuzdur, eritmeleri ve açık havada extrude (preslenmek) edilmeleri daha kolaydır, daha geniş potansiyel dönüşüm sıcaklık aralığına sahiptirler. Bu bilgiler doğrultusunda NiTi alaşımları ve bakıresaslı alaşımların kullanılacakları uygulamalara göre göz önüne alınması gereken avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmaktadır [1,37,38].

Şekil hatırlamalı alaşımların kullanıldığı bir çok endüstriyel uygulama vardır. Örnek olarak, Shinkansen hızlı trenleri Şekil 2.6' da gösterildiği gibi yağ seviyesini otomatik olarak algılamak ve ayarlamak için kullanımı verilebilir. Trenin yüksek hızlara çıkmasıyla ortamdaki sıcaklığın artması ile birlikte şekil hatırlamalı alaşımlardan yapılan yayın sürülmesiye valfin kontrolü sağlanmaktadır. Buradaki amaç iki odaya ayrılan dişli kutusunun arasındaki bağlantıyı sağlayan deliğin açma-kapamasının yağın sıcaklık değerine bağlı olarak sistemin kontrolünün sağlanmasıdır.

Düşük sıcaklıklarda iki oda arasındaki yağ akışı açıkken, sıcaklığın artması durumunda ise yağın iki oda arasındaki bağlantısını sınırlandırarak akışkan basıncı ayarı yapılmaktadır [38].



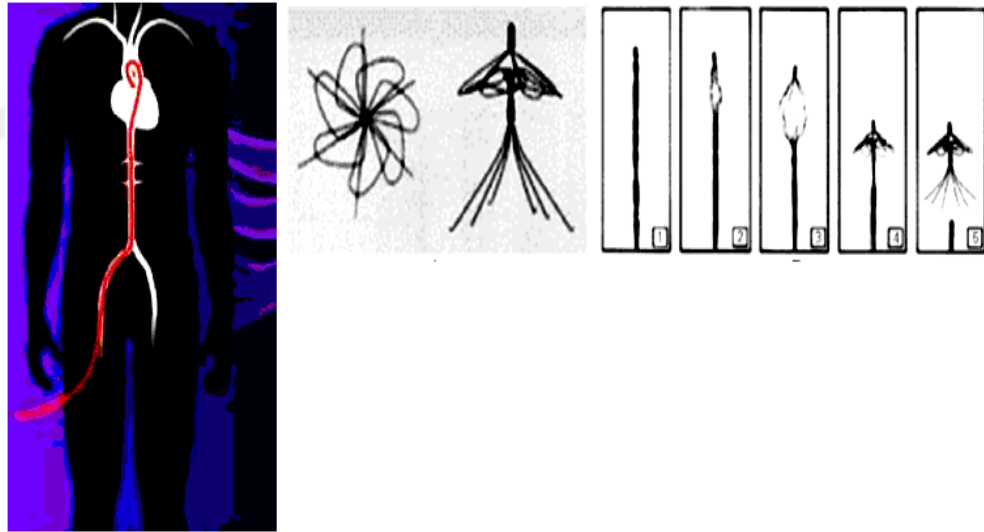
Şekil 2.5. Çeşitli Aktüatörlerin Güç/Ağırlık Performansları [38].



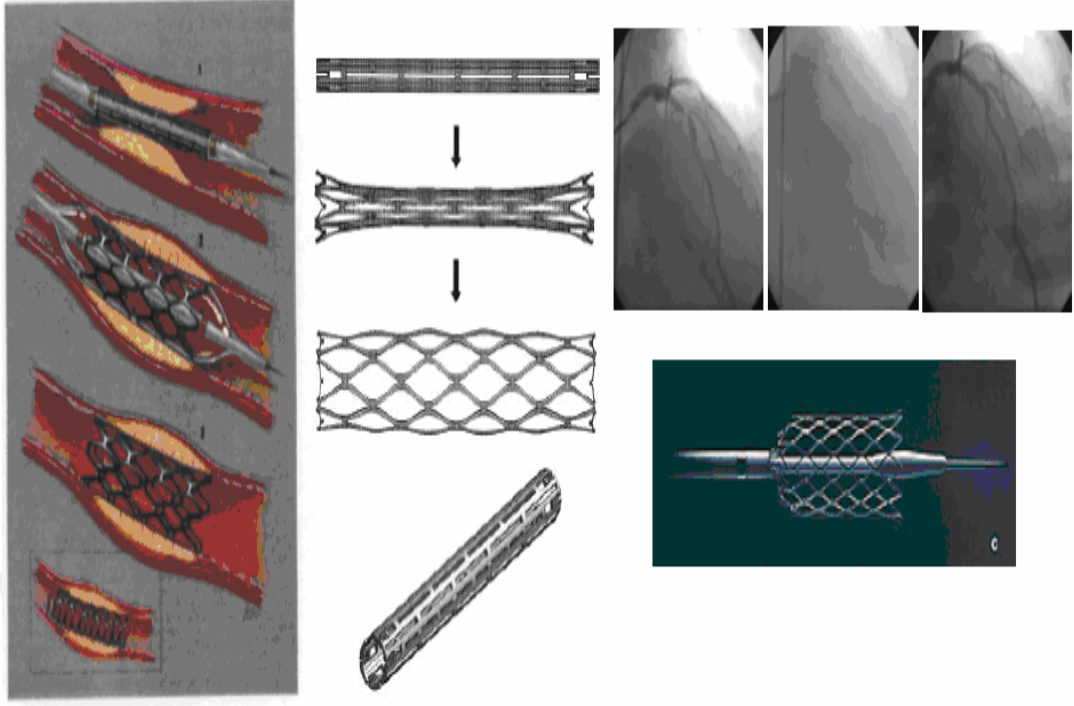
Şekil 2.6. Shinkansen hızlı trenlerinde otomatik yağlama ünitesinde SHA' nın uygulanması. (a) Otomatik yağlama ünitesinin uygulandığı Shinkansen Nozomi-700 hızlı trenin fotoğrafı ve kullanılan SHA valfi (b), (c) SHA' dan yapılan valfin iç yapısının düşük ve yüksek sıcaklıklardaki durumu [38].

Şekil Hatırlamalı Alaşımların bu özelliğinden yararlanılarak damarlar içindeki kan pıhtılarını yakalayan bir filtre olarak kullanılan malzeme yapılmıştır. NiTi alaşımlı telden yapılmışçapa şeklindeki filtre damar içine sokulmadan önce düz bir tel haline getirilir. Şekil 2.8’de gösterildiği gibi damar içine yerleştirildikten sonra tel, vücut ısı ile harekete geçerek filtre fonksiyonu sağlayacak orijinal şekline döner ve toplardamarın içinden geçmekte olan pıhtıları tutar [1,37,39].

Şekil 2.7’ de görüldüğü gibi NiTi alaşımından yapılan ve kandaki pıhtıyı tutan filtreye benzer olarak üretilen stent, damar tıkanıklıklarında kullanılmaktadır. NiTi alaşımlı telden yapılmış stent, damar içine girmeden önce düz bir tel haline getirilir. Damar içine sokulduktan belirli bir süre sonra stent, vücut ısı ile harekete geçerek damarın tıkanan yerinde orijinal şekline dönerek damardaki tıkanıklığın açılması sağlanmaktadır [39,40,41].



Şekil 2.7. Damarlardaki Kan Pıhtısını Tutulması için SHA' dan Yapılmış Filtre [39].



Şekil 2.8. Damarlardaki tıkanma sorunlarının çözümü için SHA' dan yapılmış stent [39,40]

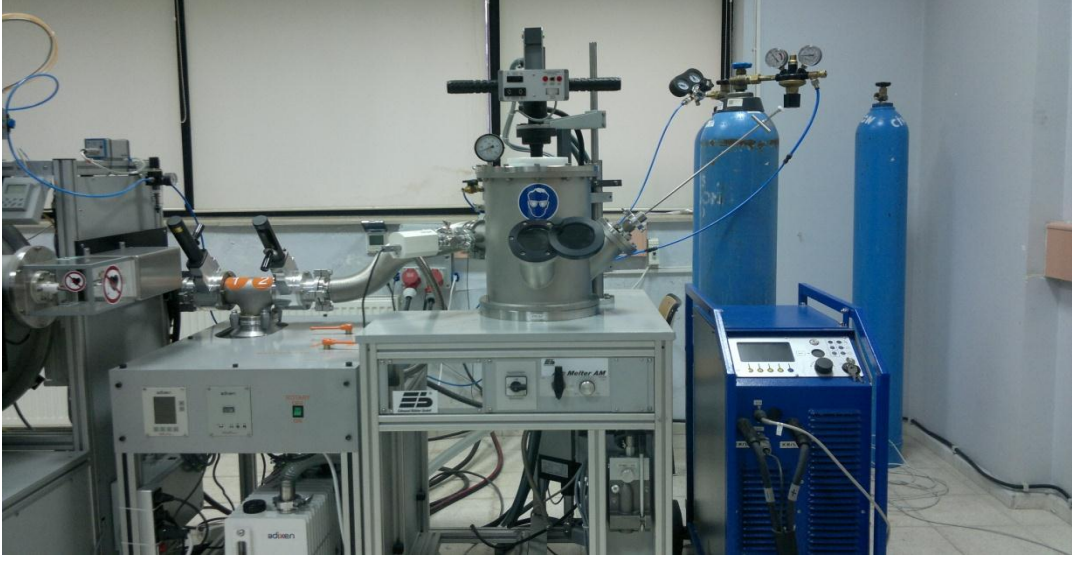
3. MATERYAL VE METOD

3.1. Numune Hazırlama

$Ni_{50+x}Ti_{50-x}$ ($x = \%at. 0, 5$) ve $Ni_{45}Ti_{55-y}Cu_y$ ($y=\%at. 0, 5, 10$) şekil hatırlamalı alaşımlar, % 99.9 (Merk marka -325 merch) saflıktaki Ni, Ti ve Cu tozu kullanılarak hazırlandı. Metal tozları kütlege istenilen kompozisyonlarda hazırlanıp, 10MPa basınç altında pelet haline getirildi ve peletler Şekil 3.1'deki ark ergitme yöntemiyle argon atmosferinde eritilerek tablo 1 deki alaşım grupları elde edildi. Homojenliği sağlamak için eritme işlemi birkaç kez tekrarlandı. Elde edilen alaşımlar uygun ebatlarda kesilerek deneysel işlemler için hazırlandı. Kesme işlemi sürecinde numunenin ısınmasını önlemek için su ile soğuması sağlandı.

Tablo 3.1. Hazırlanan şekil hatırlamalı alaşım gruplarının atomikçe kompozisyonları

Alaşım	%at.	%at.	%at.
A1	50Ni	50Ti	-----
A2	55Ni	45Ti	-----
A3	45Ni	55Ti	-----
A4	45Ni	50Ti	5Cu
A5	45Ni	45Ti	10Cu



Şekil 3.1. Ark yöntemi ile eritme sistemi (Arc- Melter).

3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) - EDX Analizi

Bir alaşımanın hangi elementlerden veya fazlardan oluştuğunu belirlemek için EDX analizine ihtiyaç duyulur. Bu analiz yöntemi elektron-madde etkileşimi sonucunda oluşan x-ışınlarının enerji seviyeleriyle analiz eden bir sistemdir. Üretilen alaşımların oranlarını belirlemek için Jeol JSM 7001F SEM-EDX cihazı kullanılarak EDX ölçümleri yapıldı.

3.3. X - Işını Analizi (XRD)

Kristal yapı, atomlar ve atom gruplarının belli bir hacimde belli bir düzene sahip olmalarından oluşur. X-ışınları kısa dalga boylu elektromanyetik ışınlardır.

Alaşımların hangi fazlarda oluştuğunu belirlemek için kristal yapı analizi Bruker Discover D8 X-ray diffraction (XRD) ile yapıldı (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Bruker Discover D8 X-ray diffraction (XRD) analiz sistemi.

3.4. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçümü

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), şekil hatırlamalı alaşımların faz dönüşüm sıcaklığını belirlemede kullanılan yöntemlerden biridir. Alaşımların karakterizasyon yöntemlerinden biri olan DSC yardımı ile alaşımların ısıtılma ve soğutulma esnasında faz dönüşüm sıcaklıkları belirlenebilir. Üretilen alaşımların faz dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek için Şekil 3.3’ deki Perkin Elmer Sapphire Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile 10 °C/dak ısıtma ↔ soğutma işlemiyle azot gazı atmosferinde ölçümler yapıldı.



Şekil 3.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ölçüm cihazı.

3.5. Optik Mikroskop İncelemesi ve Vickers Sertlik Ölçümleri

Optik mikroskop, metal ve alaşımların yüzey morfolojisini incelenmesinde kullanılan yöntemlerden biridir. Işık kaynağından alınan ışık demetleri yansıtıcı aynalar üzerinden önceden hazırlanmış numune yüzeyine düşürülür. Numune yüzeyinden farklı açılarda yansıyan ışık demetleri objektiften geçerek görüntüyü oluştururlar. Optik mikroskobu ölçümlerinde önemli noktalardan biri iyi görüntü elde etmektir. Parlatılmış numune yüzeylerinden sağlıklı görüntü almak için numuneyi dağlama önemli bir işlemdir. Sadece mükemmel olarak parlatılmış numune yüzeylerinden içyapı ile alakalı, sağlıklı görüntüler almak güçtür. Çünkü tüm numune yüzeyi düz olduğundan ve yüzeyden yansıyan ışık demetleri aynı açıda yansıyacağından görüntü tek fazdaki renkte oluşur. Dağlanmış numune yüzeylerinde ise durum böyle değildir. Dağlanmış yüzeyin değişik ayrıntı ve konumlarına göre yansımalar farklılaşır ve görüntü anlam kazanır.[22]

Optik Mikroskop incelemesi ve Vickers sertlik ölçümlerin yapılabilmesi için

alaşımlara polyester ile soğuk kalıplama yapıldı, daha sonra kalıp halindeki alaşımlara parlatıldı. Parlatma yapılırken 240' dan başlayarak 400-600-800-1200-2000' lik zımpara kağıtlarıyla zımparalama, son olarak da kadife çuha ve elmas pasta ile parlatma işlemi gerçekleştirildi. Dağlama çözeltisi olarak %75 Hidroklorik asit + %25 Nitrik asit kullanılmıştır.

Vickers sertlik ölçme yönteminde, sertliği ölçülecek malzeme yüzeyine, tabanı kare olan piramit şeklindeki bir ucun belirli bir yük altında batırılması ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegenlerinin ölçülmesinden oluşur. Bu yöntem, çok sert malzemelerin ölçümünde veya daha hassas ölçümler için tercih edilir.

Nikon Eclipse MA200 marka optik mikroskop ve Emco Test DuraScan-20 marka mikrosertlik ölçüm cihazı alaşımların mikro yapısını ve mikrosertliğini incelemek için kullanıldı(Şekil 3.5). Sertlik ölçümleri $HV_{0,3}$ ' e göre alınmıştır.



Şekil 3.4.Bu çalışmada kullanılan Optik mikroskop.

4. BULGULAR

4.1. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçüm Sonuçları

$Ni_{50+x}Ti_{50-x}$ ($x=\%at.0,5$) ve $Ni_{45}Ti_{55-y}Cu_y$ ($y=\%at.0,5,10$) şekil hatırlamalı alaşım grupların dönüşüm sıcaklığı belirlemek için, DSC ölçümleri $10\text{ }^{\circ}C/min$. ısıtma-soğutma hızıyla azot gazı atmosferinde yapıldı. Elde edilen DSC eğrileri Şekil 4.1-4.3’de verildi ve dönüşüm sıcaklıkları değeri Tablo 4.1’ de özetlendi. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, eş atomlu $Ni_{50}Ti_{50}$ alaşımına göre, atomikçe Ni oranı arttığında, dönüşüm histeresisinin azaldığı ve dönüşüm sıcaklıklarının önemli ölçüde değiştiği gözlemlendi (Şekil 4.1 ve 4.2)[3,4]. Ayrıca $Ni_{55}Ti_{45}$ numunesinde martensit fazdan austenit faza geçiş esnasında yeni bir fazı işaret eden küçük bir pikin olduğu görüldü. Bu pik nikelce zengin NiTi şekil hatırlamalı alaşımlarda sıklıkla rastlanan rombohedral (R) fazı işaret etmektedir [5,6]. Ayrıca ikinci alaşım grubunda, $(Ni_{45}Ti_{55-y}Cu_y)$ ($y=0$) $Ni_{45}Ti_{55}$ alaşımı ise Ti oranınca zengin alaşım olarak ifade edilebilir. Bu alaşımın yine eş atomlu $Ni_{50}Ti_{50}$ alaşımı ile kıyaslanırsa bütün dönüşüm sıcaklığının arttığı tespit edildi. $Ni_{45}Ti_{55-y}Cu_y$ ($y=0, 5$) alaşım grubunda Titanyum oranınca zengin NiTi şekil hatırlamalı alaşımda Ti oranını azaltarak Cu katkısı yapıldı. NiTi alaşımına bakır ilavesi dönüşüm sıcaklığını azalttığı [3,4], Cu miktarının %10 olması durumunda şekil hatırlama etkisinin kaybolduğu tespit edildi(Şekil 4.3).

Alaşımaların termal aktivasyon enerjileri araştırıldı. Bunun için DSC ısıtma hızı 10, 15, 20, 25 $^{\circ}C /dk$. seçildi. Aktivasyon enerjilerinin belirlenmesindeki amaç martensit plakalarının oluşması için gerekli enerji seviyesinin belirlenmesidir. Bu faz dönüşümü meydana geldiği zaman DSC piklerinden faydalanılarak Johnson–Mehl–Avrami (JMA) denklemi yardımıyla elde edilebilir [7]. JMA denklemi izotermal olmayan durumlarda uygulanır ve genellikle aşağıdaki gibi yazılır.

$$X = 1 - \exp[-(kt)^n] \quad (4.1)$$

$$-\ln(1 - X) = (kt)^n \quad (4.2)$$

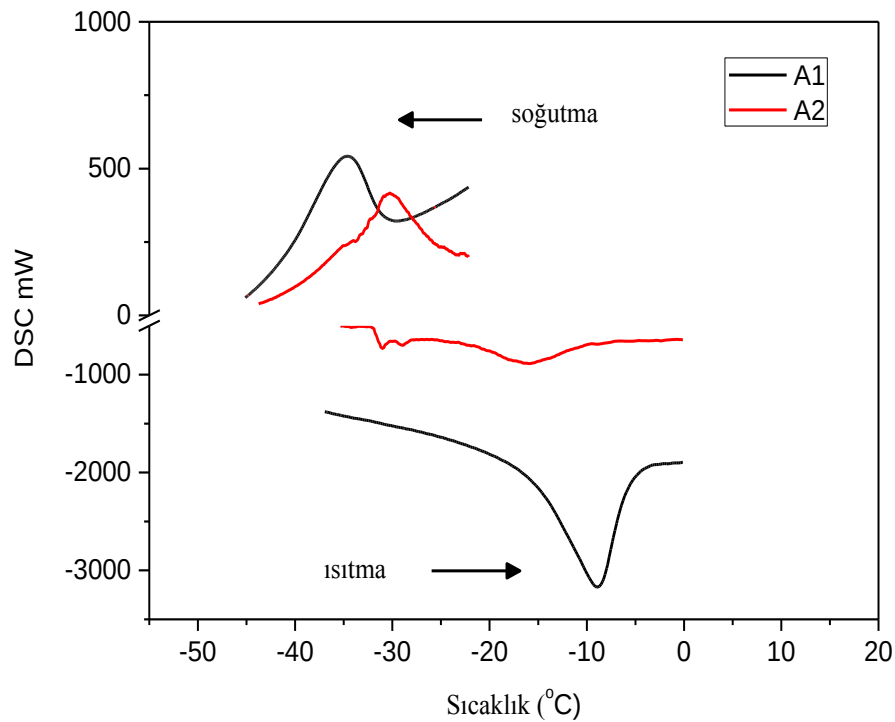
Burada k ve n bir sabit, t izotermal şartlar altında dönüşüm kinetiklerini tanımlamak için kullanılır. Denklem 2 ve 3 basit Arrhenius denklemine dönüştürülür.

$$k=k_0 \exp(-E/RT) \quad (4.3)$$

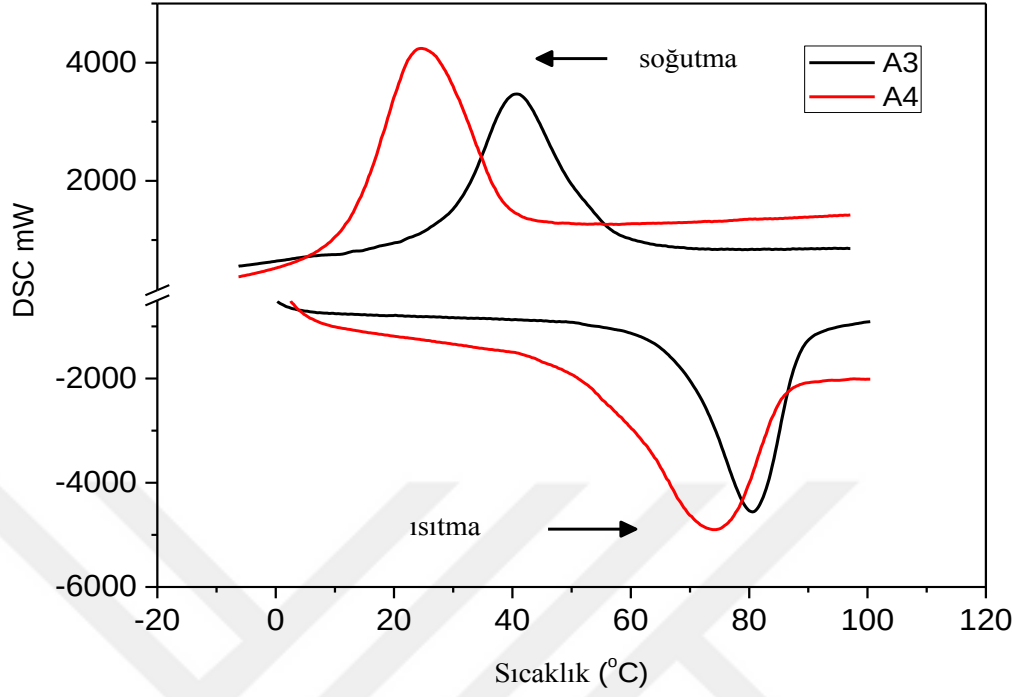
elde edilen DSC piklerinden aktivasyon enerjisi hesaplamak için Kissinger metodu kullanılır

$$\ln(\beta/T^2) = A - E/R \quad (4.4)$$

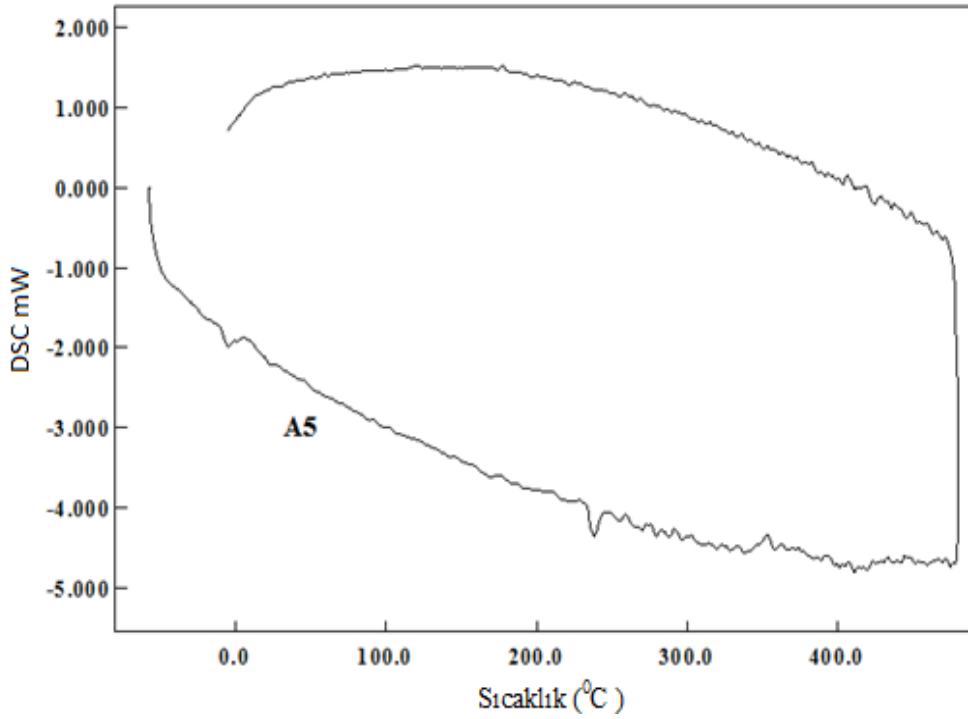
β ısıtma hızı, T pikin maksimum noktası, E termal aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti ve A integrasyon sabitidir. Şekil 4.4' de $\ln\beta/T^2$ nin $1/T$ bağılı grafiği verildi. Kissinger metodundan faydalanılarak elde edilen aktivasyon enerjileri Tablo 4.1 verildi. Tablo 4.1'e bakıldığında A1 alaşımının faz dönüşümünü gerçekleştirmek için gerekli olan aktivasyon enerjisi değerinin A2(nikelce zengin) alaşımına göre düşük olduğu görülmüştür. Yani Ni konsantrasyonunun fazlalığı alaşımların aktivasyon enerjisini arttırmıştır. Ayrıca A1(Ni50%Ti) alaşımının aktivasyon enerjisi A3(titanyumca zengin) alaşımla kıyaslanırsa yine düşük olduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak A2 ile A3 alaşımları kendi arasında kıyaslanırsa, ikili NiTi alaşımlarda Ni oranının fazlalığı aktivasyon enerjisini önemli ölçüde arttırmaktadır. NiTi alaşımına bakır ilavesi, aktivasyon enerjisini önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür. Faz dönüşümü gerçekleşmediği için A5 alaşımının aktivasyonu enerjisi hesaplanmadı.



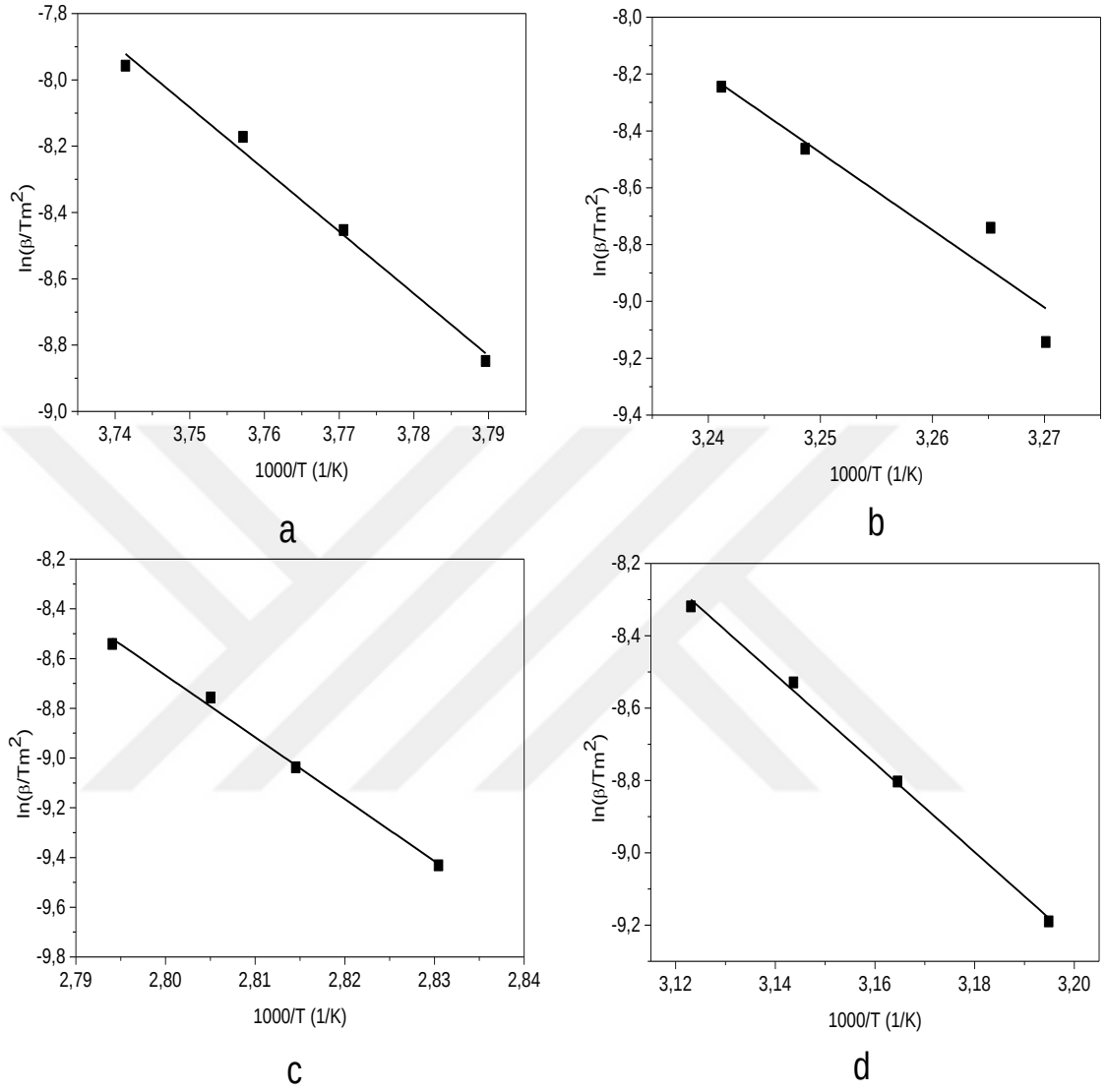
Şekil 4.1. DSC eğrisi of a) $\text{Ni}_{50+x}\text{Ti}_{50-x}$ ($x=\% \text{at.0,5}$) alaşımı



Şekil 4. 2. DSC curve of $\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{55-y}\text{Cu}_y$ (y=%at.0, 5) alaşımı



Şekil4.3. DSC grafiği a) $\text{Ni}_{50+x}\text{Ti}_{50-x}$ (x=%at.0,5) ve b) $\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{55-y}\text{Cu}_y$ (y=%at.0, 5) c) $\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{45}\text{Cu}_{10}$ alaşımı



Şekil 4.4. $\ln(\beta/T_m^2)$ nin $1000/T$ bağılı değişimi. **a)** $\text{Ni}_{50+x}\text{Ti}_{50-x}$ ($x=\%at.0,5$) and **b)** $\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{55-y}\text{Cu}_y$ ($y=\%at.0, 5$) **c)** $\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{45}\text{Cu}_{10}$ alaşımı

Tablo 4.1. $\text{Ni}_{50+x}\text{Ti}_{50-x}$ ($x=\% \text{at.0,5}$) ve $\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{55-y}\text{Cu}_y$ ($y=\% \text{at.0,5,10}$) Alaşım gruplarının dönüşüm sıcaklıkları ve aktivasyon enerjisi değerleri

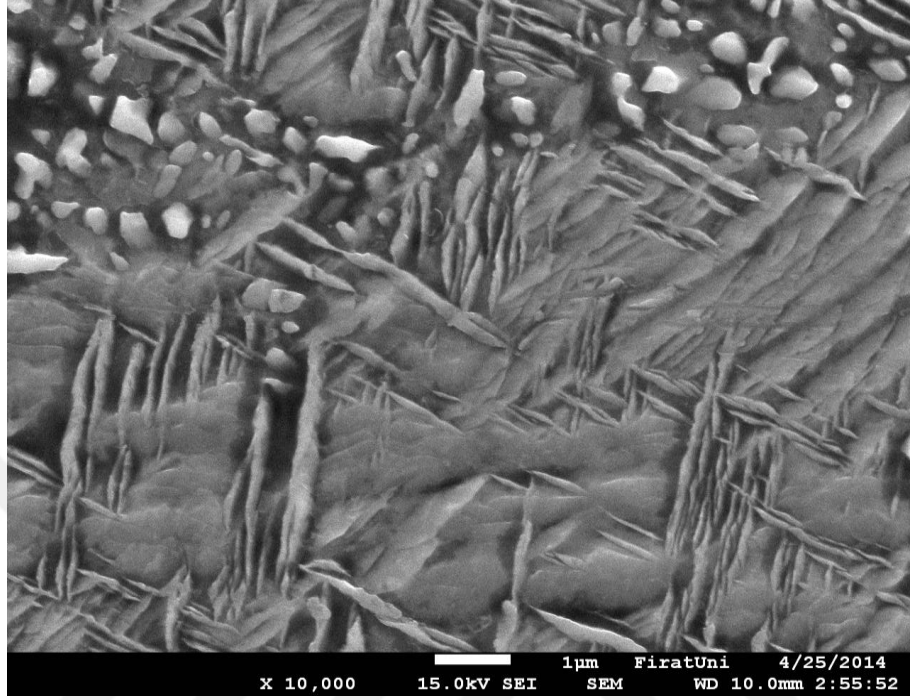
Alaşım kodu	$A_s(^{\circ}\text{C})$	$A_r(^{\circ}\text{C})$	$A_p(^{\circ}\text{C})$	$M_s(^{\circ}\text{C})$	$M_r(^{\circ}\text{C})$	$M_p(^{\circ}\text{C})$	$R_p(^{\circ}\text{C})$	$E_a(\text{kJ/mol})$
A1	-16.08	-5.07	-8.87	-31.08	-40.48	-34.66	-----	155.63
A2	22.69	43.76	33.40	45.07	13.55	25.52	7.39	226.47
A3	66.80	88.8	80.6	56.00	29.20	40.40	-----	207.03
A4	11.20	54.00	39.80	25.90	-4.40	9.10	-----	101.84
A5	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

4.2. SEM - EDX Analizi Sonuçları

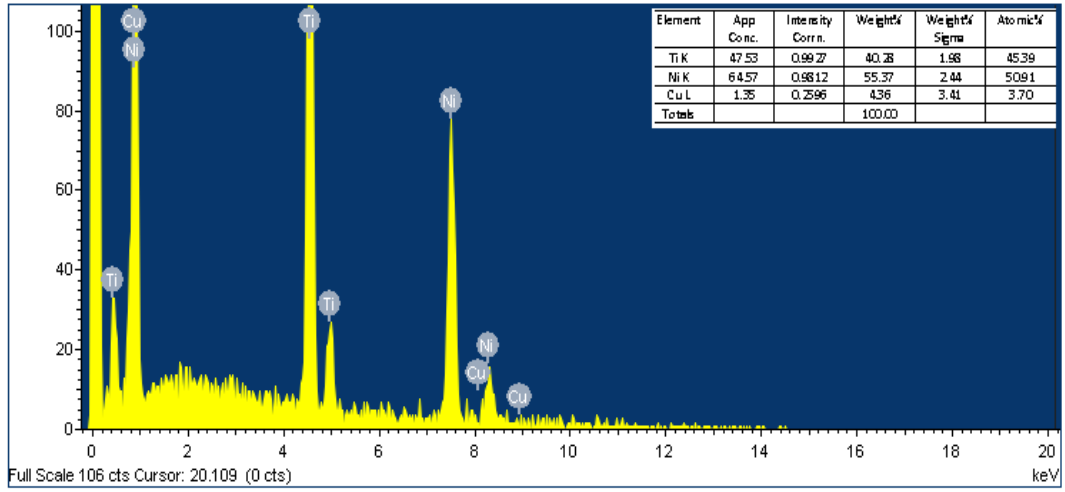
Metal malzemelerin mikro yapısını incelemek için kullanılan en önemli cihazlardan birisi Taramalı Elektron Mikroskopudur. Üretilen alaşımların SEM görüntüleri ve EDX ölçümleri Jeol JSM 7001F SEM-EDX cihazı kullanılarak alındı.

Yapılan çalışmada, numune hazırlanırken belirlenen oranların EDX ölçüm sonuçlarıyla kıyaslanması durumunda, istenilen oranların yaklaşık olarak elde edildiği söylenebilir. Tablo4.2 de bu çalışmada hazırlanan alaşımların EDX ölçümlerinden elde edilen ortalama atomik ve ağırlık yüzdeleri ile hesaplanan elektron konsantrasyonu (e/a) değerleri görülmektedir.

Cu ilaveli NiTi şekil hatırlatmalı malzemenin SEM mikroyapısı ve EDX verisi Şekil 4.5’ de verilmiştir. Şekil 5a’ dan da görüldüğü üzere, mikroyapıda yoğun olarak ikizlemeye benzer martenzit plakalarıyla birlikte, beyaz renkte görünen küçük çökeltiler mevcuttur ve bu mikroyapı malzeme mikroyapısının her bölgesinde hemen hemen aynı görüntü vardır. Şekil 4.5.b’ de verilen EDX verisinde göre mikroyapı, atomik ağırlık olarak %45,39 Ti, %50,91Ni ve %3,41Cu ile katılaşma gerçekleştirmiştir. Mehrabi ve çalışma arkadaşlarının da yaptıkları çalışmalarda NiTiCu alaşımlarında Cu konsantrasyonuna bağlı olarak yer yer ikizlemeye benzer martensityapının oluştuğunu belirtmişlerdir [12]. NiTiCu alaşımlarında ötektik matriste Ti, Ni içeren tipik çökeltilerle birlikte, Cu miktarına bağlı olarak Ti_2Cu , Ti_2Ni ve $\text{Ti}_2(\text{Ni,Cu})$ kompleks bileşiklerin oluştuğu Schuster ve arkadaşları tarafından da bildirilmiştir [13].



(a)



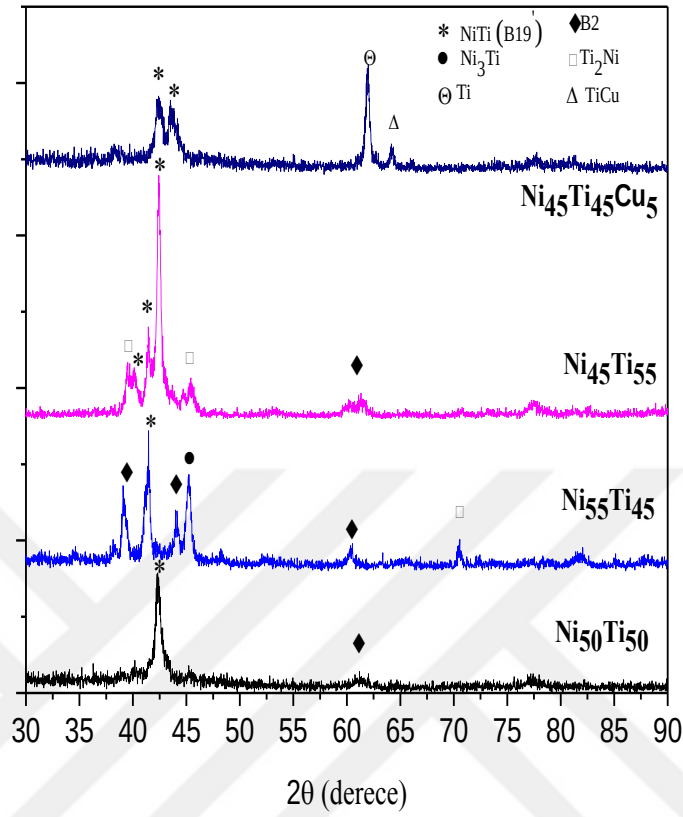
Şekil 4.5. SEM mikroyapı grafiği a) A4 SHA, b) A2 SHA

Tablo 4.2. Hazırlanan şekil hatırlamalı alaşım gruplarının atomikçe kompozisyonları

Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
Ti K	47.53	0.9927	40.28	1.98	45.39
Ni K	64.57	0.9812	55.37	2.44	50.91
Cu L	1.35	0.2596	4.36	3.41	3.70
Toplam			100.00		

4.3. X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçüm Sonuçları

A1-A5 alaşımlarının kristal yapısını belirlemek için alınan XRD sonuçları Şekil 4.6’da verilmiştir. İndislemeler literatürden detaylı bir şekilde incelenerek yapıldı [3,8]. A1 (atomlu NiTi) alaşımında keskin pikin 42.42° de B19 (NiTi monoklinik) fazının piki olduğu ve 61.32° de B2(NiTi austenit) pikine rastlandı. A2 alaşımında B19’de gözlenirken, bunun yanı sıra 41.48° , 44.10° ve 60.44° de B2, 45.22° de ise Ni_3Ti hegzagonal fazlarının pikleri belirlendi. A3 alaşımında 40.10° , 41.48° ve 42.5° de B19’, 39.58° ve 45.46° de Ti_2Ni piki, 60.96° da B2 fazının pikine rastlandı [8]. Cu katkılanan A4 alaşımında ise 42.18° ve 43.98° de B19’ ve 43.56° da B2, 61.98° de Ti ve 64.24° de TiCu fazı keskin şekilde oluşmuştur.



Şekil 4.6. Alaşımları oda sıcaklığında elde edilen X-ışını difraktogramı

4.4. Optik Mikroskop ve Vickers Sertlik Ölçümleri

Şekil 4.7' de $Ni_{50+x}Ti_{50-x}$ ($x=\%at.0,5$) ve $Ni_{45}Ti_{55-y}Cu_y$ ($y=\%at.0,5,10$) şekil hatırlatmalı malzemelerin yapılarını analiz etmek için optik mikroyapıları verilmiştir. Şekil 4.7.a-4.7.c' de görüleceği üzere, Ni miktarının % atomik ağırlık olarak artmasıyla yapı içerisinde ötektik yapıdan (Şekil 4.7.a) tane sınırlarında çökeltilerin arttığı (Şekil 4.7.b ve Şekil 4.7.c) tespit edildi. Bu çökeltiler titanyumca zengin Ti_2Ni çökeltileri olarak, tane sınırlarında yoğun bir şekilde bulunmakla birlikte düzgün köşeli ve oval türde bir görünüme sahiplerdir (Şekil 4.7.c). Pan ve çalışma arkadaşları, bakır ilaveli Ni-Ti alaşımlarının hızlı katılaşma göstermesi durumunda Ti_2Ni çökeltilerinin de yoğun olarak tane sınırlarında kümelenerek katılaşma gösterdiklerini ifade etmişlerdir[9]. Şekil hatırlatmalı malzeme mikroyapısına Cu elementinin etkisi Şekil 4.d

ve Şekil 4.e' de net bir şekilde görülmektedir. Farklı Cu miktarlarıyla alaşımlanan NiTi şekil hatırlatmalı alaşımların mikroyapıları karşılaştırıldığında, artan Cu miktarıyla malzeme mikroyapısında bakırca zengin çok küçük taneli çökeltilerin yoğunluğunun da arttığı açıkça görülmektedir (Şekil 4.7.d ve Şekil 4.7.e). Benzer bulgular Morakabati ve çalışma arkadaşları tarafından da gözlemlenmiştir [10]. Cu içeren bu çökeltiler Şekil 4.6' de verilen XRD sonuçlarına göre $Ti_2(Ni, Cu)$ çökeltileridir ve malzemenin plastiklik özelliğini ve işlenebilirliğini azalttığı gibi mekanik gerilmesini ve sertliğini de arttırmaktadırlar [11].

4.5.Mikrosertlik

$Ni_{50+x}Ti_{50-x}$ ($x=\%at.0,5$) ve $Ni_{45}Ti_{55-y}Cu_y$ ($y=\%at.0,5,10$) alaşımlarına 300 gr yük altında (HV0.3) Durascan20 mikrosertlik cihazı ile sertlik ölçümleri alınmıştır. Her bir numuneden en az 5 değer kaydedilip aritmetik ortalaması alınmış ve Tablo3 te verilmiştir. Mikro sertlik ölçümleri şekil hatırlatmalı alaşımların kırılabilirliği ile ilgili bilgilendirilme konusunda önemli bir etkidir . Sertlik değerinin artması sünekliğin azalması olarak düşünülebilir. Vickers sertlik ölçümü, mikroyapı ile mikro sertlik arasındaki ilişkiyi anlamada önemli bir ölçüm yöntemidir. Bu ölçüm aşağıdaki bağıntıyla ilişkilidir.

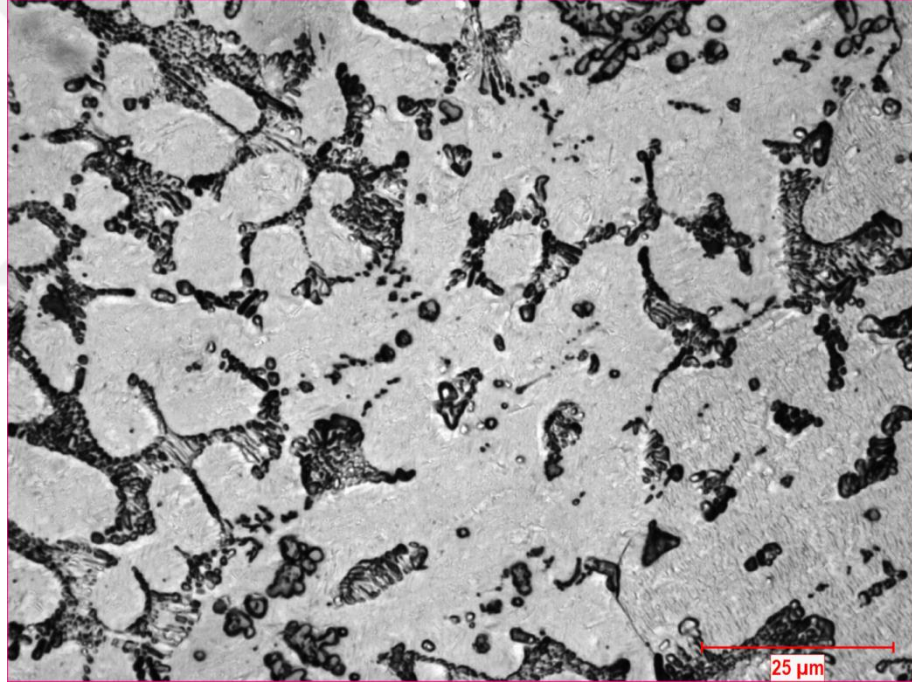
$$HV = \frac{2P \sin(\frac{\theta}{2})}{d^2} \quad (5)$$

Burada θ derinlik açısı, P uygulanan yük ve d diagonalın ortalama boyudur.

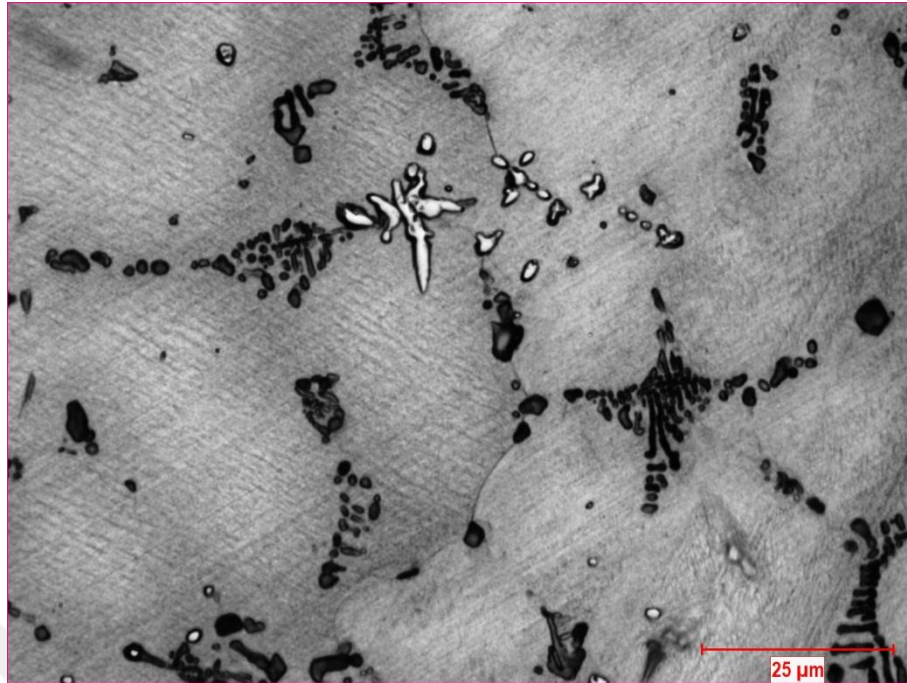
$Ni_{55}Ti_{45}$ ve $Ni_{45}Ti_{55}$ alaşımı, eş atomlu NiTi alaşımının oda sıcaklığındaki sertlik değerleri kıyaslanırsa, Nikel oranı arttıkça malzemenin sertlik özelliğinin arttığı, titanyum oranı arttıkça sertlik özelliğinin azaldığı görüldü. Buradan Ti elementinin alaşımın sertliğe katkısının, Ni elementinden daha az olduğunu gösterir. Ancak titanyumca zengin NiTi alaşımına bakır katkısı sertlik değerini ciddi bir şekilde artırmıştır. Bunun sonucun iki sebebi olabilir: birincisi Cu elementinin sertlik değerinin alaşımı oluşturan diğer elementlerden aşırı yüksek olması, ikincisi ise; Cu elementinin oranı arttıkça titanyum elementinin oranının düşmesi ve nikel miktarının artması olabilir.

Tablo 3. $\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{55-x}\text{Cu}_x$ ($x=\%0, 5$) ve $\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{55-y}\text{Cu}_y$ ($y=\%0, 5, 10$) alaşım gruplarının mikrosertlik değerleri

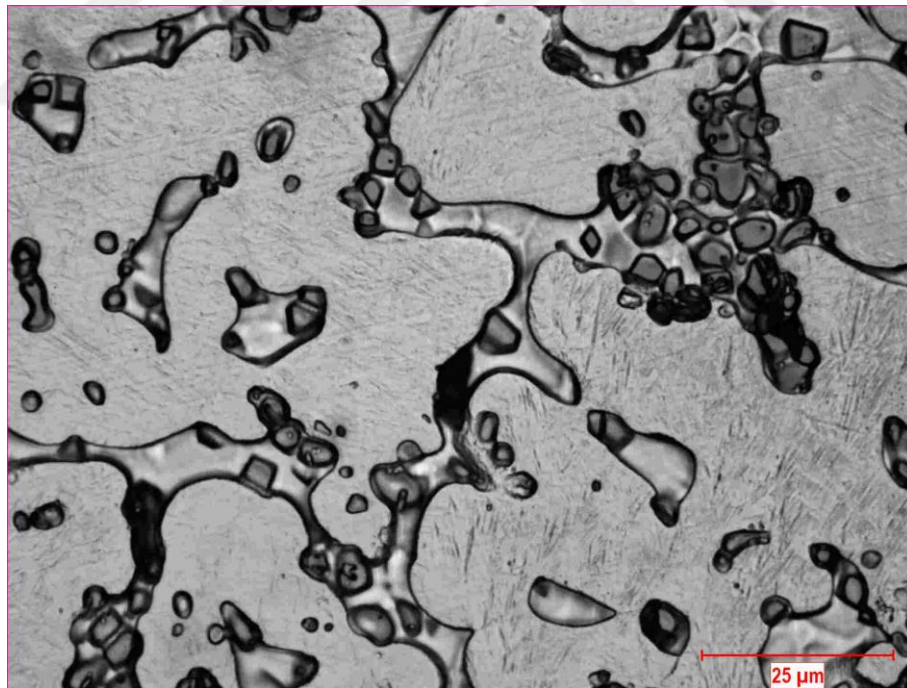
ALAşIM	A1	A2	A3	A4	A5
MİKRO SERTLİK(HV)	302	315	290	465	420



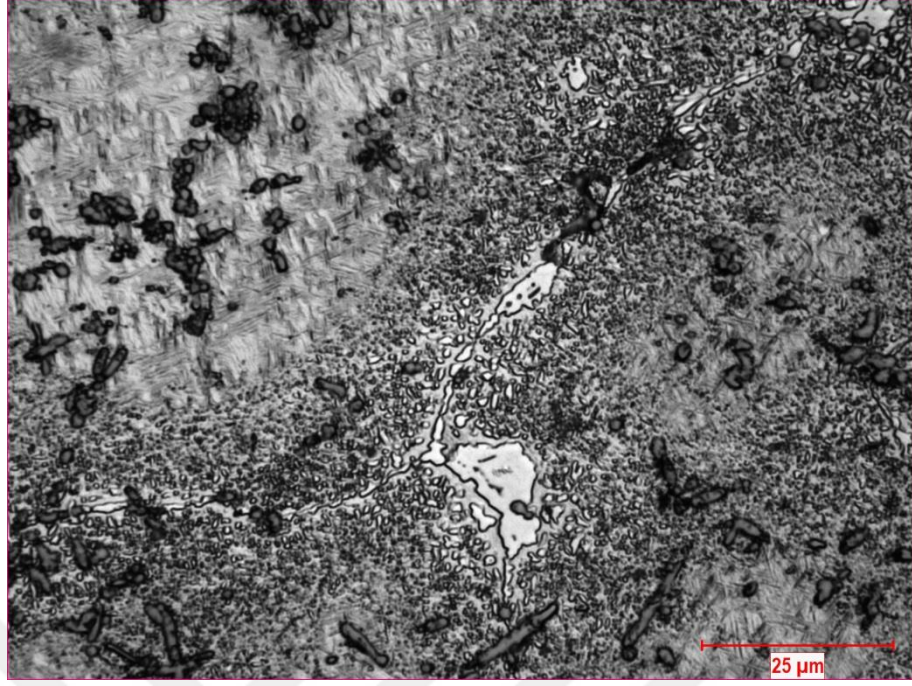
(a)



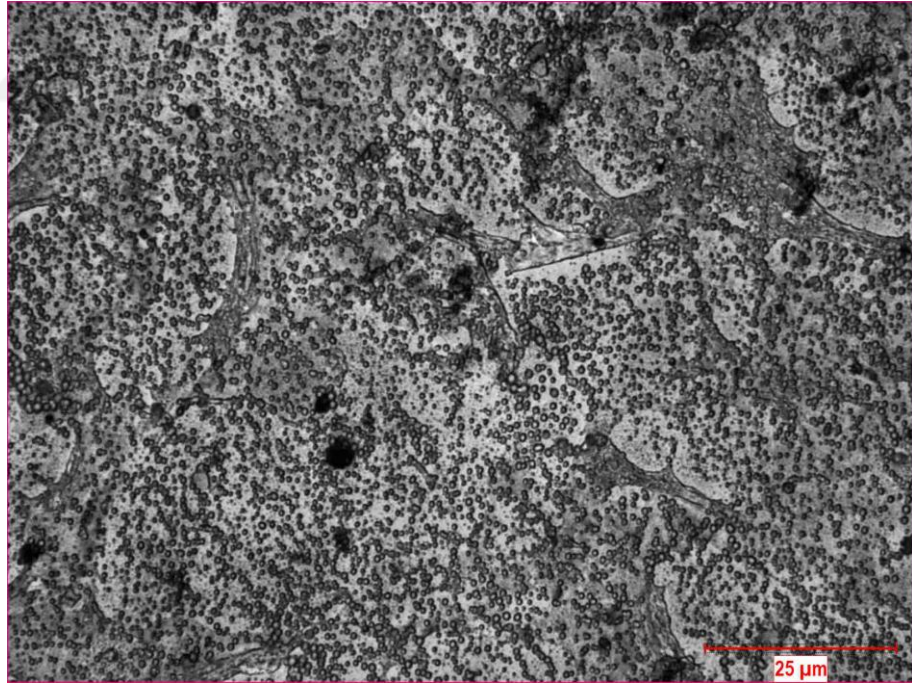
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.7. Optik mikroskopik a) A1 SHA, b) A2 SHA, c) A3 SHA, d) A4 SHA, e) A5 SHA

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, üç farklı oranlarda üretilen NiTi şekil hafızalı alaşımlar ve bu alaşıma %5 ve %10 Cu ilavesiyle elde edilen NiTiCu alaşımlarının şekil hatırlama özellikleri ve yapı tayini araştırıldı. Alaşımların DSC eğrilerinin sonuçlarına bakılırsa Ni%50Ti şekil hatırlamalı alaşımın martensit fazdan austenite faza geçiş sıcaklıkları $A_s = -16.08$ °C ve $A_f = -5.07$ °C olarak tespit edildi. Aynı alaşımın austenite fazdan martensit faza geçiş sıcaklıkları, yani $M_s = -31.08$ °C ve $M_f = -40.48$ °C olarak bulundu. Bu değerlerin sıfırın altında olması ilgi çekicidir. Yani A1 olarak adlandırılan Ni%50Ti alaşımı oda sıcaklığında austenite fazda şekil hatırlamalı bir alaşımdır. A2 olarak adlandırdığımız Ni-%45Ti alaşımının dönüşüm sıcaklıkları ise $A_s = 22.69$ °C, $A_f = 43.76$ °C, $M_s = 45.07$ °C ve $M_f = 13.55$ °C olarak belirlendi. Bu sonuç, oda sıcaklığında A2 alaşımında yapı içinde martensit faz ve austenite fazı temsil eden fazların bulunabileceğinin öncüsüdür. Ayrıca, NiTi alaşımlarında Ni oranının artması dönüşüm sıcaklıklarının önemli ölçüde arttığını söyleyebiliriz. Ayrıca bu değişimle NiTi alaşımının dönüşüm sıcaklıklarının 0 °C nin üzerine çıktığı önemli bir sonuçtur. A3 olarak adlandırılan Ni-%55Ti alaşımının DSC eğrisinden belirlenen martensit fazdan austenite faza ve austenite fazdan martensit faza geçiş sıcaklıkları ise $A_s = 66.80$ °C, $A_f = 88.80$ °C, $M_s = 56.00$ °C ve $M_f = 29.20$ °C dir. %5Cu ilave edilen Ni-%50Ti-%5Cu A4 alaşımının dönüşüm sıcaklıkları ise $A_s = 11.20$ °C, $A_f = 54.00$ °C, $M_s = 25.90$ °C ve $M_f = -4.40$ °C olarak belirlendi. Ti oranının %50 kalması ve %5 Cu ilavesi yani Ni oranının azalması faz dönüşüm sıcaklıklarını önemli ölçüde düşürdüğü belirlendi. Son hazırlanan Ni%45Ti-%10Cu ve A5 olarak adlandırılan alaşımının DSC çalışmalarından herhangi bir faz dönüşüm pikine rastlanmadı. Bu sonuçlardan başka A2 numunesinde rombehebral fazı temsil eden pike rastlandı ve bu fazın piki $R_p = 7.39$ °C de gözlemlendi. Alaşımların aktivasyon enerji değerleri Kissinger denkleminde faydalananarak hesaplandı. A1 için 155.63 kJ/mol, A2 için 226.47 kJ/mol, A3 için 207.03 kJ/mol ve A4 için 101.84 kJ/mol olarak bulundu. Bu değerlere bakılırsa A4 numunesinin aktivasyon enerjisi en küçük olduğu belirlendi.

Cu ilaveli NiTi şekil hatırlatmalı malzemenin SEM mikroyapısı ve EDX sonucunda mikroyapıda yoğun olarak ikizlemeye benzer martensit plakalarıyla birlikte, beyaz renkte görünen küçük çökeltieler görüldü. Bu mikroyapı malzeme mikroyapısının her bölgesinde hemen hemen aynı görüntüye sahiptir. EDX sonucuna göre mikroyapı,

atomik ağırlık olarak %45,39 Ti, %50,91Ni ve %3,41Cu ile katılaşma gerçekleştirmiştir.

A1-A5 alaşımlarının kristal yapısının XRD sonuçlarına göre, A1 (eşit atomlu NiTi) alaşımında keskin pikin 42.42° de B19 (NiTi monoklinik) fazının piki olduğu ve 61.32° de B2(NiTi austenit) pikine rastlandı. Oda sıcaklığında XRD pikleri alındığından alaşımda austenite piklerine rastlanması beklenen bir sonuçtur. Yani DSC sonuçları ile uyushmaktadır. A2 alaşımında B19'de gözlenirken, bunun yanı sıra 41.48° , 44.10° ve 60.44° de B2, 45.22° de ise Ni_3Ti hegzagonal fazlarının pikleri belirlendi. A3 alaşımında 40.10° , 41.48° ve 42.5° de B19', 39.58° ve 45.46° de Ti_2Ni piki, 60.96° da B2 fazının pikine rastlandı. Yapı içinde B2 ve B19' fazın olması oda sıcaklığında martensit fazların olduğunun ispatıdır. Cu katkılanan A4 alaşımında ise 42.18° ve 43.98° de B19' ve 43.56° da B2, 61.98° de Ti ve 64.24° de TiCu fazı keskin şekilde oluşmuştur.

$Ni_{50+x}Ti_{50-x}$ ($x=\%at.0,5$) ve $Ni_{45}Ti_{55-y}Cu_y$ ($y=\%at.0,5,10$) şekil hatırlatmalı malzemelerin yapılarını analiz etmek için optik mikroyapılara bakılmıştır. Burada, Ni miktarının % atomik ağırlık olarak artmasıyla yapı içerisinde ötektik yapıdan tane sınırlarında çökeltilerin arttığı görüldü. Bu çökeltiler titanyumca zengin Ti_2Ni çökeltileri olarak, tane sınırlarında yoğun bir şekilde bulunmakla birlikte düzgün köşeli ve oval türde bir görünüme sahiplerdir. Şekil hatırlatmalı alaşım mikroyapısına Cu elementinin etkisi net bir şekilde görülmüştür. Farklı Cu miktarlarıyla alaşımlanan NiTi şekil hatırlatmalı alaşımların mikroyapılarına bakıldığında, artan Cu miktarıyla malzeme mikroyapısında bakırca zengin çok küçük taneli çökeltilerin yoğunluğunun da arttığı görülmüştür.

$Ni_{50+x}Ti_{50-x}$ ($x=\%at.0,5$) ve $Ni_{45}Ti_{55-y}Cu_y$ ($y=\%at.0,5,10$) alaşımlarının mikrosertlik cihazı ile sertlik ölçümlerine göre, Nikel oranı arttıkça malzemenin sertlik özelliğinin arttığı, titanyum oranı artıkça sertlik özelliğinin azaldığı görüldü. Bu ise, Ti elementinin alaşımın sertliğe katkısının, Ni elementinden daha az olduğunu gösterir. Ancak titanyumca zengin NiTi alaşımına bakır katkısı sertlik değerini ciddi bir şekilde artırmıştır. Bu sonucun iki sebebi olabilir: birincisi Cu elementinin sertlik değerinin alaşımı oluşturan diğer elementlerden aşırı yüksek olması, ikincisi ise; Cu elementinin oranı artıkça titanyum elementinin oranının düşmesi ve nikel miktarının artması olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Akdoğan, A., Nurveren, K.**, 2002. Akıllı Malzemeler ve Uygulamaları, Makine Teknolojileri, 57, 34-39.
- [2] **Miyazaki, F.** 1996. Springer, Shape Memory Alloys (CISM International Centre for Mechanical Sciences)
- [3] **Funakubo, H.**, 1987. Shape Memory Alloys, (Japonca'dan İngilizce'ye çeviri), J. B. Kennedy, Gordon and Breach Science Publishers, London.
- [4] **Freed, Y., J Aboudi**, 2009. International Journal of Solids and Structures, Elsevier.
- [5] **Sutou, Y.**, 2006, "Effects of grain size and texture on damping properties of Cu–Al–Mn-based shape memory alloys", *Materials Science and Engineering: A*, 438, 743-746.
- [6] **Otsuka, K., Tomoyuki, K.**, 2002. "Science and technology of shape-memory alloys: new developments. *MRS BULLETIN*: 27, 91-100.
- [7] **Adıgüzel, O., Ceylan, M.**, 1988, Shape Memory Phenomena in Noble Metal Copper Based Alloys, *J. Inst. Sci. Techn.*, Gazi Üniversitesi, 1, 35-41.
- [8] **Otsuka, K., Shimizu, K.**, 1986, Pseudoelasticity and Shape Memory Effects in Alloys, *International Metals Reviews*, 31, 93-114.
- [9] **Ortin, J., Planes, A.**, 1991, Thermodynamics and Hysteresis Behaviour of Thermoelastic Martensitic Transformations, *Journal De Physique IV, Volume1*, C4 13-23.
- [10] **Ortin, J., Planes, A.**, 1989. Thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations, *Acta Metallurgica*, 37, 1433-1441.
- [11] **Chawla, L.**, 1998, "Research methods to investigate significant life experiences: Review and recommendations, *Environmental Education Research*, 4, 383-397.
- [12] **Nishiyama, Z.**, 1978, Martensitic Transformation, *Academic Pres*, New York.
- [13] **Işık, A.**, 2007, FePd Ferromagnetik Şekil Hafıza Alaşımının Kristalografisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

- [14] **Aytekin, V.**, 1966, Metalurji Termodinamiği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Berksoy Matbaası, İstanbul.
- [15] **Salzbrenner, R.J., Cohen, M.**, 1978, On the Thermodynamics of Thermoelastic Martensitic Transformations, *Acta Metallurgica*, 27, 739-748.
- [16] **Tong, H. Wayman, C.M.**, 1974. Characteristic temperatures and other properties of thermoelastic martensites, *Acta Metallurgica*, 22, 887-896.
- [17] **Ortin, J., Planes, A.**, 1989, Thermodynamics of Thermoelastic Martensitic Transformations, *Acta Metal.*, 37, 5, 1433-1441.
- [18] **Prado, M.O., Decorte, P.M., Lovey, F.**, 1995. Martensitic transformation in Cu-Mn-Al alloys, *Scripta metallurgica et materialia*, 33.6 877-883.
- [19] [http://dx.doi.org/10.1016/1044-5803\(94\)90089-2](http://dx.doi.org/10.1016/1044-5803(94)90089-2).
- [20] **Darjan, C.**, 2007. Shape Memory Alloys, Fakulteta Za Matematiko in Fiziko, Oddelek Za Fiziko, *Seminesrka Naloga*, Universaa V. LjubLjani.
- [21] **Baksan, B., Gürler, R.**, 2006, Bakır Esaslı Şekil Bellekli Alaşımların Üretimi ve Çekme Deneyi ile Karakterizasyonu, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10 Cilt, Sayı1
- [22] **Sharma, V.K., Chattopadhyay, M.K., Roy, S. B.**, 2008. Studies on the field-induced martensite to austenite phase transition in Ni₅₀Mn₃₄In₁₆ alloy, *Journal of Physics, Condensed Matter*, 20, 42-52.
- [23] **Chatterjee, S., Abinandanan, T.A., Chattopadhyay K.**, 2008. Phase formation in Ti/Ni dissimilar welds, *Materials Science and Engineering: A*, 490, 1, 7-15.
- [24] **Rahman, Muhammad A.**, 2008. Patents on superelastic shape memory alloy, *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 1, 65-67.
- [25] **Friend, C. M.**, 1986 "The effect of applied stress on the reversible strain in CuZnAl shape memory alloys." *Scripta metallurgica* 20.7 995-1000.
- [26] **Hona, T.**, 1986. The Mechanism of the All-Round Shape Memory Effect, Shape

Memory Alloys 86, *Proceedings of the International Symposium on Shape Memory Alloys*, China Academic Publishers, 83-88.

[27] **Sade, M., Halter, K., Hornbogen, E.**, 1988. The Effect of Thermal Cycling on the Transformation Behaviour of Fe-Mn-Si Shape Memory Alloys, *Z. Metallkunde*, 79, 487-491.

[28] **Tautzenberger, P.**, 1989, Properties and Applications of Shape Memory Actuators, *The Martensitic Transformation in Science and Technology*, (Eds. E. Hornbogen and N. Jost), DG Informations Gesselschaft, Verlag, Germany, 213-222

[29] **Delaey, L., Krishan, R.V., Tas, H., Warlimont, H.**, 1974, Thermoelasticity, Pseudoelasticity and the Memory Effect Associated with Martensitic Transformations, Part 1, *Journal of Materials Science*, 9, 1521-1535

[30] **Hornbogen, Erhard.**, 1990. Thermo-mechanical fatigue of shape memory alloys, *Thermal Effects in Fracture of Multiphase Materials*. Springer Berlin Heidelberg, 156-167.

[31] **Perkins, J., Sponholz R. O.**, 1984, Stress-induced martensitic transformation cycling and two-way shape memory training in Cu-Zn-Al alloys, *Metallurgical transactions A*, 15, 313-321.

[32] **Lovey, F. C.**, 1994. Interaction of single variant martensitic transformation with small γ type precipitates in Cu Zn Al, *Acta metallurgica et materialia*, 42, 453-460.

[33] **Rafaja, D., et al.** 1998. Combined refinement of diffusion coefficients applied on the Nb-C and Nb-N systems, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29, 439-446.

[34] **Sivakumar, S.**, 2005. A Review of the Constitutive Models for Shape Memory Alloys, *International Conference on Smart Materials Structures and Systems*, Bangalore, India.

[35] **Huang, S., Wei R.**, 1998. Autonomous intelligent cruise control with actuator delays, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 23, 27-43.

[36] **Akdogan, E.K., Allahverdi, M., Safari, A.**, 2005. Piezoelectric composites for

sensor and actuator applications, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 52, 746-775.

[37] **Hodgson, Darel E.**, 2002. Damping applications of shape-memory alloys, *Materials Science Forum*. Vol. 394. Trans Tech Publications

[38] **Otsuka, K., Tomoyuki, K.**, 2002. Science and technology of shape-memory alloys: new developments, *MRS BULLETIN* 27, 91-100.

[39] **Auricchio, F.**, 2001. A robust integration-algorithm for a finite-strain shape-memory-alloy superelastic model, *International Journal of plasticity*, 17.7 971-990.

[40] **Auricchio, F., Lorenza P.**, 2002. Improvements and algorithmical considerations on a recent three- dimensional model describing stress- induced solid phase transformations, *International Journal for numerical methods in engineering*, 55, 1255-1284.

[41]. **Tremblay, M.R., Mark H.Y.**, 2002, Tactile feedback man-machine interface device, U.S. Patent No. 6,424,333.

İsmail AKBAŞ ÖZGEÇMİŞ

Kisisel Bilgiler:

DoğumTarihi: 1964

DoğumYeri: Malatya

Uyruğu: T.C.

Medeni Hali :Bekar

Eğitim:

İlköğretim:

Malatya Günedoğru İlkokulu

Ortaöğretim:

Malatya Günedoğru ortaokulu

Lise:

Malatya Yeşiltepe Lisesi

Lisans:(1985-1990)

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
(Elazığ)

Lisans:(2008-2012)

İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü (Malatya)

Yüksek Lisans: Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Elazığ)

**Tez Konusu: NiTi ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLARA BAKIR KATKISININ
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN(Fırat Üniversitesi)