

## NiTi Şekil Hafızalı Alaşımlarda Cu İlavesinin Termal ve Mikroyapı Özelliklerine Etkileri

<sup>1</sup>Fethi Dağdelen\*, <sup>2</sup>Soner Buytoz, <sup>3</sup>İsmail Akbaş  
<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Elazığ, Türkiye  
fdagdelen@firat.edu.tr

(Geliş/Received:13.10.2016; Kabul/Accepted:22.02.2017)

### Özet

Bu çalışmada Ni-50%Ti, Ni-45%Ti, Ni-55%Ti, Ni-50%Ti-%5Cu ve Ni-45%Ti-10%Cu alaşımları ark-ergitme yöntemi ile üretildi ve bunların şekil hatırlama özellikleri, mikroyapısı ve mikrosertlikleri araştırıldı. Ni-50%Ti alaşımının dönüşüm sıcaklıkları  $A_s = -16.08$ ,  $A_f = -5.07$ ,  $M_s = -31.08$ ,  $M_f = -40.48$  °C, Ni-45%Ti şekil hatırlamalı alaşımda  $A_s = 22.69$ ,  $A_f = 43.76$ ,  $M_s = 45.07$ ,  $M_f = 13.55$ °C ve Ni-55%Ti alaşımında ise  $A_s = 66.80$ ,  $A_f = 88.80$ ,  $M_s = 56.00$ ,  $M_f = 29.20$ °C olarak belirlendi. NiTi SMAs Cu eklenmesiyle alaşımın dönüşüm sıcaklıklarını önemli ölçüde değiştirdi ve Cu konsantrasyonunun %10 olması durumunda,  $Ni_{45}Ti_{45}Cu_{10}$  alaşımında şekil hatırlama özelliğinin kaybolduğu görüldü. Buna karşılık Cu yüzdesinin artması alaşımın mikrosertliğini arttırdığı tespit edildi. Eş atomlu NiTi alaşımının faz dönüşümünü gerçekleştirmek için gerekli olan aktivasyon enerjisi değerinin nikelce zengin  $Ni_{55}Ti_{45}$  alaşımına göre düşük olduğu belirlendi. Yani nikel fazlalığı aktivasyon enerjisini arttırdığı fakat titanyumca zengin alaşımla kıyaslandığında yine düşük olduğu görüldü. Ayrıca Cu katkısının, aktivasyon enerjisini önemli ölçüde düşürdüğü belirlendi. Alaşımların oda sıcaklığında kristal yapıları XRD analizleri ile araştırıldı. Alaşımların mikroyapısı optik mikroskop aracılığı ile incelendi ve yapı içinde çok miktarda çökeltiler gözlemlendi..

**Anahtar Kelime:** Şekil Hatırlamalı Alaşım, dönüşüm sıcaklığı, mikrosertlik.

## The Effects on thermal and microstructure properties of Cu addition in NiTi SMAs

### Abstract

In this study, we fabricated Ni-50%Ti, Ni-45%Ti, Ni-55%Ti, Ni-50%Ti-%5Cu and Ni-45%Ti-10%Cu by arc-melting method. Shape memory properties, microstructure and microhardness properties of these sample were investigated. Transformation temperature of Ni-50%Ti, Ni-45%Ti, Ni-55%Ti, Ni-50%Ti-%5Cu were determined  $A_s = -16.08$ ,  $A_f = -5.07$ ,  $M_s = -31.08$ ,  $M_f = -40.48$  °C and  $A_s = 22.69$ ,  $A_f = 43.76$ ,  $M_s = 45.07$ ,  $M_f = 13.55$ °C and  $A_s = 66.80$ ,  $A_f = 88.80$ ,  $M_s = 56.00$ ,  $M_f = 29.20$ °C, respectively. NiTi SMA addition to Cu(Cu addition to NiTi SMA) was substantially changed of transformation temperature of alloys. it was not exhibited shape memory properties in the  $Ni_{45}Ti_{45}Cu_{10}$  alloy. Also, the rise of Cu percent in NiTi was increased in microhardness of alloys. The activation energy for phase transformation of equal atom NiTi alloy was determined fallen according to  $Ni_{55}Ti_{45}$  alloy. Ni excess increased the activation energy, but it has been seen that activation energy in Ni-rich alloy is lower than Ti-rich alloy. Also, It has been defined that Cu contribution significantly decreased activation energy. XRD analysis of alloys was carried out at room temperature. The micro structures of these alloys were investigated by optical microscope and it was seen that there are many precipitate in the microstructure.

**Key words:** Shape memory alloy, transformation temperature, microhardness.

### 1.Giriş

Şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA) arasında NiTi süper plastiklik, yüksek damping kapasitesi ve mükemmel Şekil Hafıza Etkilerinden (ŞHE) dolayı mühendislik ve sağlık alanların birçok

uygulamalarda kullanılır. Bu alaşımların farklı kompozisyonunda hazırlanması ve üçüncü elementin ilave edilmesi, alaşımın mekanik özelliklerini ve faz dönüşüm sıcaklığını değiştirdiği bilinir. Yapılan araştırmalarda NiTi şekil hafızalı alaşımın kimyasal bileşiminin

değişimi yanısıra üçüncü elementin mekanik ve termal histeresise etkisi üzerine yoğunlaşmıştır [1]. Mühendislik alanındaki uygulamaları hedefleyen NiTişekil hafızalı alaşımlara eklenen en uygun elementler Cu, Pd, Fe, Pt, Al, Hf, Zr ve Auterch' dir [2]. Bu alaşımlara, Cu'nun ilavesi üretim ve maliyet açısından caziptir. NiTi ŞHA' larda Ni yerine Cu ilavesi dönüşüm histeresisini büyük ölçüde etkiler. Ayrıca NiTi alaşımlarında %10(at)'dan daha fazla Cu ilavesi halinde B2(kübik)-B19(orthorombik) dönüşüm gözlenir. Bazen dönüşüm üç basamaklı meydana gelir ve ara faz olarak R (rombohedral) faz gözlenir ve dönüşüm B2(austenit)-R-B19'(martensit) şeklinde gerçekleşir.

Bu çalışmada beş farklı alaşım (Ni50Ti50, Ni45Ti55, Ni55Ti45, Ni45Ti50Cu5, Ni45Ti45Cu10) ark-ergitme yöntemiyle üretildi. Üretilen alaşımların mikroyapısı, mekanik özellikleri ve dönüşüm sıcaklıklarının değişimi ve aktivasyon enerjileri araştırıldı. Ayrıca Cu katkısının NiTi alaşımlarında mikroyapı ve termal özellikler üzerine etkileri belirlendi.

## 2. Materyal ve Metod

Ni<sub>50+x</sub>Ti<sub>50-x</sub>(x=%at.0,5) ve Ni<sub>45</sub>Ti<sub>55-y</sub>Cu<sub>y</sub> (y=%at.0,5,10)ŞHA lar, % 99.9 saflıktaki Ni, Ti ve Cu metal tozları kütlice istenilen kompozisyonlarda hazırlanıp, mekanik karıştırıcıda 8-10mm çaplarında seramik bilye ile karıştırıldı. Karıştırılmış bu metal tozları 10MPa basınç altında 13mm çaplı peletler haline getirildi. Peletler ark-ergitme sisteminde argon atmosferinde ergitilerek Tablo 1' deki alaşım grupları elde edildi. Ark-ergitme işlemi birkaç kez tekrarlanarak alaşımların homojen hale gelmesi sağlandı. Alaşımların dönüşüm sıcaklıkları ve aktivasyon enerjilerini belirlemek için Perkin Elmer Sapphire DSC (Differential Scanning Calorimetry) kullanıldı. Oda sıcaklığında kristal yapıları, Bruker Discover D8 marka X-ışınları difraktogramı kullanılarak belirlendi. Alaşımların değişik kompozisyona göre, mikroyapısında ve mikrosertliklerinde meydana gelen değişimleri gözlemek için Nikon Eclipse MA200 optik mikroskop ve Emco Test DuraScan-20 marka mikrosertlik ölçüm sistemleri kullanıldı.

## 3. Bulgular

### 3.1. Termal özellikler

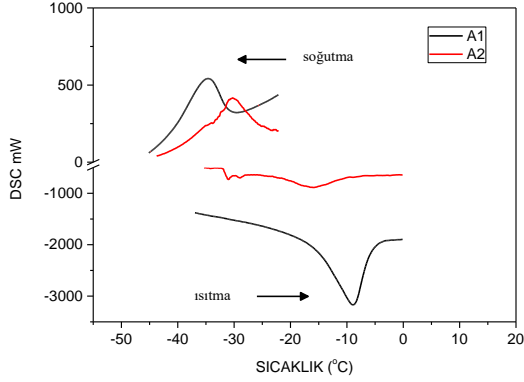
Ni<sub>50+x</sub>Ti<sub>50-x</sub>(x=%at.0,5) ve Ni<sub>45</sub>Ti<sub>55-y</sub>Cu<sub>y</sub> (y=%at.0,5,10) şekil hatırlamalı alaşım gruplarının dönüşüm sıcaklığı belirlemek için, DSC ölçümleri 10 °C/min. ısıtma-soğutma hızıyla azot gazı atmosferinde yapıldı. Elde edilen DSC eğrileri Şekil 1 a-c'de verildi ve dönüşüm sıcaklıkları değeri Tablo 2' de özetlendi. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, eş atomlu Ni<sub>50</sub>Ti<sub>50</sub> alaşımına göre, atomikçe Ni oranı arttığında, dönüşüm histeresisinin azaldığı ve dönüşüm sıcaklıklarının önemli ölçüde değiştiği gözlemlendi(Şekil 1 a ve b)[3,4]. Ayrıca Ni<sub>55</sub>Ti<sub>45</sub> 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<sub>45</sub>Ti<sub>55-y</sub>Cu<sub>y</sub>) (y=0) Ni<sub>45</sub>Ti<sub>55</sub> alaşımı ise Ti oranınca zengin alaşım olarak ifade edilebilir. Bu alaşımın yine eş atomlu Ni<sub>50</sub>Ti<sub>50</sub> alaşımı ile kıyaslanırsa bütün dönüşüm sıcaklığının arttığı tespit edildi. Ni<sub>45</sub>Ti<sub>55-y</sub>Cu<sub>y</sub> (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 1.c)

**Tablo 1.**Hazırlanan şekil hatırlamalı alaşım gruplarının atomik kompozisyonları

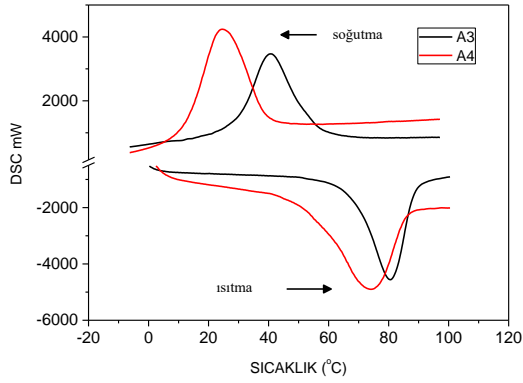
Alaşımlar	%at.	%at.	%at.
A1	50Ni	50Ti	----
A2	55Ni	45Ti	----
A3	45Ni	55Ti	----
A4	45Ni	50Ti	5Cu
A5	45Ni	45Ti	10Cu

Alaşımların termal aktivasyon enerjileri araştırıldı. Bunun için DSC ısıtma hızı 10, 15, 20, 25 °C /min seçildi. Aktivasyon enerjilerinin belirlenmesindeki amaç martensit plakalarının oluşması için gerekli enerji seviyesinin bulunmasıdır. Bu faz dönüşümü meydana geldiği zaman DSC piklerinden faydalanılarak Johnson-

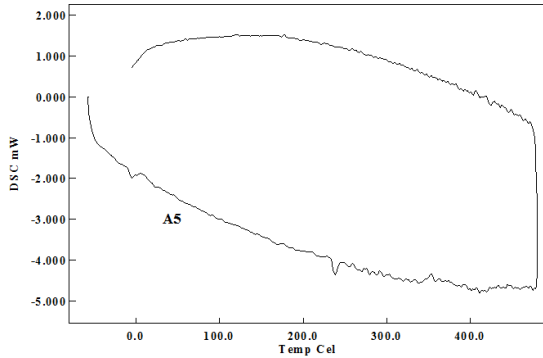
Mehl–Avrami (JMA) denklemi yardımıyla elde edilebilir [7].



(a)



(b)



Şekil 1. Alaşımların DSC eğrileri a)  $Ni_{50+x}Ti_{50-x}$  ( $x=$ % at. 0, 5), b)  $Ni_{45}Ti_{55-y}Cu_y$  ( $y=$ % at.0, 5) ve c)  $Ni_{45}Ti_{45}Cu_{10}$

JMA denklemi izotermal olmayan durumlarda uygulanır ve genellikle aşağıdaki gibi yazılır.

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

$$-\ln(1 - X) = (kt)^n \quad (2)$$

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

$$k = k_0 \exp(-E/RT) \quad (3)$$

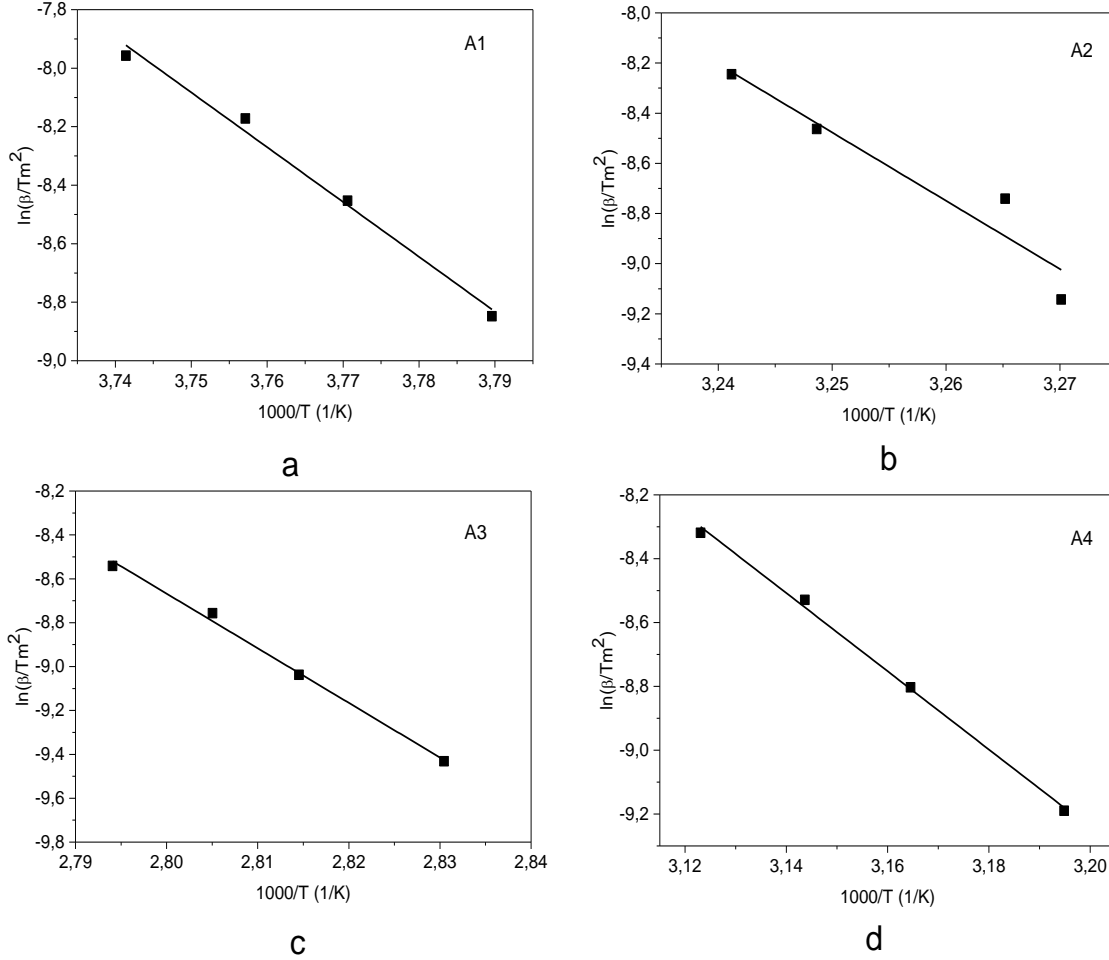
elde edilen DSC piklerinden aktivasyon enerjisi hesaplamak için Kissinger metodu kullanılır

$$\ln(\beta/T^2) = A - E/RT \quad (4)$$

$\beta$  ısıtma hızı,  $T$  pikin maksimum noktası,  $E$  termal aktivasyon enerjisi,  $R$  gaz sabiti ve  $A$  integrasyon sabitidir. Şekil 2' de  $\ln\beta/T^2$  nin  $1/T$  bağlı grafiği verildi. Kissinger metodundan faydalanılarak elde edilen aktivasyon enerjileri Tablo 2 verildi. Tablo 2 'ye 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

**Tablo 2.** Ni<sub>50-x</sub>Ti<sub>50-x</sub> (x=%at.0,5) ve Ni<sub>45</sub>Ti<sub>55-y</sub>Cu<sub>y</sub> (y=%at.0, 5, 10) Alaşım gruplarının dönüşüm sıcaklıkları ve aktivasyon enerjisi değerleri.

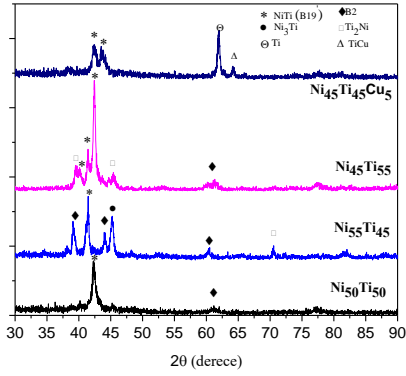
Alaşım	A <sub>s</sub> (°C)	A <sub>f</sub> (°C)	A <sub>p</sub> (°C)	M <sub>s</sub> (°C)	M <sub>f</sub> (°C)	M <sub>p</sub> (°C)	R <sub>p</sub> (°C)	E <sub>a</sub> (kJ/mol)
A1	-16.08	-5.07	-8.87	-31.08	-40.48	-34.66	-----	155.63
A2	22.69	43.76	33.40	45.07	13.55	25.52	7.39	226.47
A3	66.80	88.8	80.6	56.00	29.20	40.40	-----	207.03
A4	11.20	54.00	39.80	25.90	-4.40	9.10	-----	101.84
A5	----	----	----	----	----	----	-----	-----

**Şekil 2.** Alaşımların farklı ısıtma hızlarından alınan DSC sonuçları yardımıyla çizilen  $\ln(\beta/T_m^2)$ - $1000/T$  bağlı değişim grafiği.

### 3.2. Kristal yapı

A1-A5 alaşımlarının kristal yapısını belirlemek için alınan XRD sonuçları Şekil 3'de 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<sub>3</sub>Ti hegzagonal fazlarının pikleri belirlendi. A3 alaşımında 40.10°, 41.48° ve 42.50° de B19', 39.58° ve 45.46° de Ti<sub>2</sub>Ni 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 belirlemiştir.



Şekil 3. Alaşımların X-ışını desenleri

### 3.3 Mikroyapı

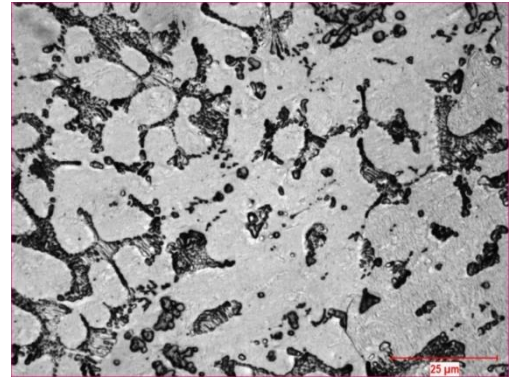
Şekil 4' de  $Ni_{50+x}Ti_{50-x}$  ( $x=\%at.0,5$ ) ve  $Ni_{45}Ti_{55-y}Cu_y$  ( $y=\%at.0,5,10$ ) şekil hatırlatmalı malzemelerin yapılarını analiz etmek için optik mikroyapıları verilmiştir.

Şekil 4a-4c' de görüleceği üzere, Ni miktarının % atomik ağırlık olarak artmasıyla yapı içerisinde ötektik yapıdan (Şekil 4a) tane sınırlarında çökeltilerin arttığı (Şekil 4b ve Şekil 4c) 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 4c). Pan ve çalışma arkadaşları, bakır ilaveli Ni-Ti alaşımlarının hızlı katılma göstermesi durumunda  $Ti_2Ni$  çökeltilerinin de yoğun olarak tane sınırlarında kümelenerek katılma 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 Cu' ca zengin çok küçük taneli çökeltilerin yoğunluğunun da arttığı açıkça görülmektedir (Şekil 4d ve Şekil 4e). Benzer bulgular Morakabati ve çalışma arkadaşları tarafından da gözlemlenmiştir [10]. Cu içeren bu çökeltiler Şekil 3' 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].

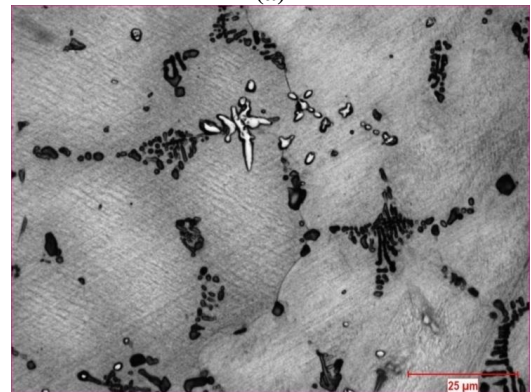
Cu ilaveli NiTi şekil hatırlatmalı malzemenin SEM mikroyapısı ve EDX verisi Şekil 5a,b' de

verilmiştir. Şekil 5a' da görülen SEM mikroyapısı, Şekil 4d' de verilen optik mikroyapının sol üst bölgesinin yüksek büyütmeyle çözünürlüğüne aittir. 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 5b' de verilen EDX verisinde göre mikroyapı, atomik ağırlık olarak %45,39 Ti, %50,91Ni ve %3,41Cu ile katılma gerçekleştirmiştir.

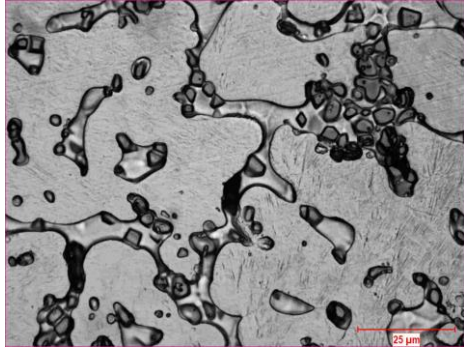
Mehrabi ve çalışma arkadaşlarının da aptıkları çalışmalarda; NiTiCu alaşımlarında Cu konsantrasyonuna bağlı olarak yer yer ikizlemeye benzer martensit yapının oluştuğunu belirtmişlerdir [12]. NiTiCu alaşımlarında ötektik matriste Ti, Ni, içeren tipik çökeltilerle birlikte, Cu miktarına bağlı olarak  $Ti_2Cu$ ,  $Ti_2Ni$  ve  $Ti_2(Ni, Cu)$  kompleks bileşiklerin oluştuğu Schuster ve arkadaşları [13] tarafından da bildirilmiştir.



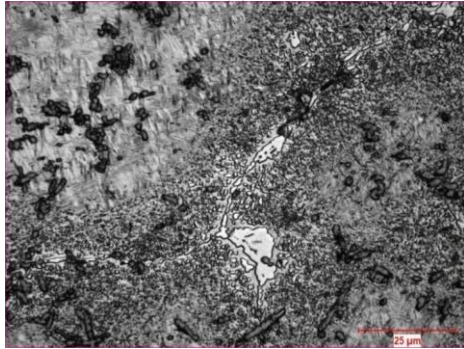
(a)



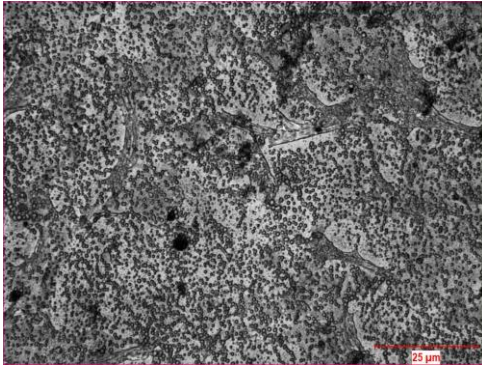
(b)



(c)

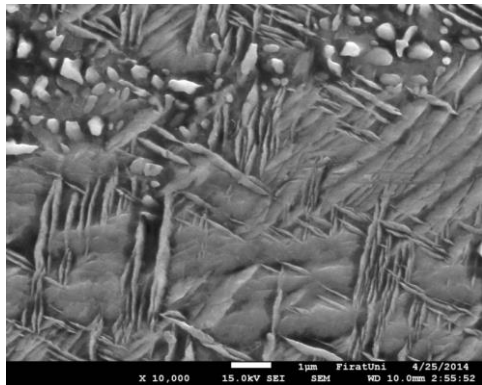


(d)

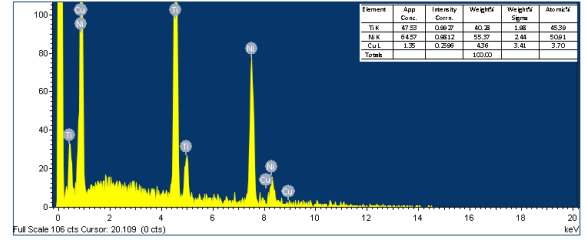


(e)

Şekil 4. Alaşımların optik mikroyapıları a) A1 alaşımı, b) A2 alaşımı, c) A3 alaşımı, d) A4 alaşımı, e) A5 alaşımı



(a)



(b)

Şekil 5. a) A4 alaşımının SEM görüntüsü, b) A4 alaşımının EDX sonuçları.

### 3.4 Mikrosertlik

$Ni_{50+x}Ti_{50-x}$  ( $x=\%at.0,5$ ) ve  $Ni_{45}Ti_{55-y}$  ( $y=\%at.0,5,10$ ) 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 Tablo 3’de verilmiştir.

Mikrosertlik ve yorulma, çekme gerilmesi gibi diğer mekanik özellikler şekil hatırlamalı alaşımların kırılabilirliği ile ilgili bilgilendirilme konusunda önemli bir etkidir [14]. Sertlik değerinin artması sünekliliğin azalması olarak düşünülebilir. Vickers sertlik ölçümü, mikroyapı ile mikrosertlik arasındaki ilişkiyi anlamada önemli bir ölçüm yöntemidir. Bu ölçüm aşağıdaki bağıntıyla ilişkilidir.

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

Burada  $\theta$  derinlik açısı,  $P$  uygulanan yük ve  $d$  diyagonalin 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 artmasından kaynaklanabilir

**Tablo 3.** Ni<sub>x</sub>Ti<sub>50-x</sub> (x=%at.0, 5) ve Ni<sub>45</sub>Ti<sub>55-y</sub>Cu<sub>y</sub> (y=%at.0, 5, 10) alaşım gruplarının mikrosertlik değerleri

Alaşım	A1	A2	A3	A4	A5
Mikrosertlik(HV)	302	315	290	465	420

#### 4. Tartışma

Farklı kompozisyonlarda hazırlanan NiTi şekil hatırlamalı alaşımlarla, bu alaşıma Cu ilave ederek ŞHE ve mikroyapılarının arasındaki değişimleri incelenilen bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar gözlenmiştir.

- Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, eş atomlu Ni<sub>50</sub>Ti<sub>50</sub> alaşımına göre, atomikçe Ni oranı arttığında, dönüşüm histeresininin azaldığı ve dönüşüm sıcaklıklarının önemli ölçüde değiştiği gözlemlendi.
- Ti oranınca zengin alaşım eş atomlu Ni<sub>50</sub>Ti<sub>50</sub> alaşımı ile kıyaslanırsa bütün dönüşüm sıcaklığının arttığı tespit edildi.
- NiTi alaşımına bakır ilavesi dönüşüm sıcaklığını azalttığı ve aktivasyon enerjisini önemli şekilde düşürdüğü, ayrıca Cu miktarının %10 olması durumunda şekil hatırlama etkisinin kaybolduğu tespit edildi.
- NiTi alaşımına Cu ilavesiyle mikroyapıda küçük taneli çökeltilerin yoğunluğunun arttığı açıkça görüldü.

Nikel oranı arttıkça malzemenin sertlik özelliğinin arttığı, aynı zamanda NiTi alaşımına bakır katkısı alaşımın sertlik değerini ciddi bir şekilde artırdığı gözlemlendi.

#### 5. Kaynaklar

1. Gou, L., Liu, Y., Ng, T.Y. (2014). An investigation on the crystal structures of Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50-x</sub>Cu<sub>x</sub> shape memory alloys based on density functional theory calculations, *Intermetallics*, **53**, 20-25.
2. Bozzolo, G., Noebe, R.D., Mosca, H.O. (2005). Site preference of ternary alloy in addition to NiTi: Fe, Pt, Au, Al, Cu, Zr and Hf, *Journal of Alloys and Compounds*, **389**, 80-94.
3. Atiyah, A.A., Ali, A.R.K.A., Dawood, N.M. (2015). Characterisation of NiTi and NiTiCu Porous Shape Memory Alloys Prepared by Powder Metallurgy (Part I), *Arab. J. Sci. Eng.*, **40**, 901-9013.
4. Nespoli, A., Passaretti, F., Villa, E. (2013). Phase transition and mechanical damping properties:

ADMTA study of NiTiCu Shape Memory Alloys, *Intermetallics*, **32**, 394-400.

5. Otsuka, K., Ren, X. (2005), Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys, *Progress in Materials Science*, **50**, 511-678.
6. Ercan, E., (2013), Investigation of Oxidation Behavior at Ni-Rich NiTi Shape Memory Alloy, *Firat University, Master's Thesis Institute of Science and Technology*.
7. Torrens-Serra J., Venkataraman, S., Stoica, M., Kuehn, U. S., Eckert, J. (2011). Non-Isothermal Kinetic Analysis of the Crystallization of Metallic Glasses using the Master Curve Method, *Materials*, **4**, 2231-2243.
8. Pan, G., Balagna, C., Martino, L., Pan, J., Spriano, S. (2014). Micro structure and transformation temperatures in rapid solidified Ni-Ti alloys. Part II: The effect of copper addition, *Journal of Alloys and Compounds* **589**, 633-642.
9. Harikrishnan, K., Chandra, K., Misra, P.S., Agarwala, Vinod S. (2009). B19 orthorhombic martensitic Transformation in Aged NiTiCu Shape Memory Alloys, *ESOMAT DOI:10.1051/esomat/200902020*.
10. Morakabati, M., Kheirandish, Sh., Aboutalebi, M., Taheri, A. Karimi., Abbasi, S.M. (2010). The effect of Cu addition on the hot deformation behavior of NiTi shape memory alloys, *Journal of Alloys and Compounds* **499**, 57-62.
11. Houand, Li., Grumman, D.S. (1995), Transformational Super elasticity in Sputtered Titanium-Nickel Thin Films, *Scripta Metallurgica et Materialia*, **3**, 989-995.
12. Mehrabi, K., Bruncko, M., Kneissl, A.C. (2012). Microstructure, mechanical and functional properties of NiTi-based shape memory ribbons, *Journal of Alloys and Compounds* **526**, 45-52
13. Priyadarshini, B.G., Aich, S., Chakraborty, M. (2011). *Metal. Mater. Trans. A* **42**, 3248-3290.
14. S. Miyazaki, K., Mizukoshi, T., Ueki, T., Sakuma, Yinong Liu, (1999). Fatigue life of Ti-50 at.% Ni and Ti-40Ni-10Cu (at.%) shape memory alloy wires, *Materials Science and Engineering* **A273-275**, 658-663.