

**ŞEKİL HATIRLAMALI Cu-Al-Co ALAŞIMLARININ  
ÜRETİMİ VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**Ferdi KÜRÜM**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Fizik Anabilim Dalı:**

**Danışmanı: Prof. Dr. Yıldırım AYDOĞDU**

**HAZİRAN-2013**

**T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞEKİL HATIRLAMALI Cu-Al-Co ALAŞIMLARININ ÜRETİMİ VE  
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ferdi KÜRÜM**

**(092114102)**

**Anabilim Dalı: Fizik**

**Programı: Katıhal Fiziği**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yıldırım AYDOĞDU**

**HAZİRAN-2013**

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞEKİL HATIRLAMALI Cu-Al-Co ALAŞIMLARININ ÜRETİMİ VE**  
**FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ferdi KÜRÜM**

**( 092114102)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :23 Mayıs 2013**

**Tezin Savunulduğu Tarih :7 Haziran 2013**

**Tez Panışmanı :** **Prof. Dr. Yıldırım AYDOĞDU** (Gazi Üniversitesi)   
**Diğer Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Osman ADIGÜZEL** (Fırat Üniversitesi)   
**Prof. Dr. Raşit ZENGİN** (Fırat Üniversitesi) 

**HAZİRAN-2013**

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca ilminden faydalandığım, insani ve ahlaki değerleriyle de örnek edindiğim, yanında çalışmaktan onur duyduğuyum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli hocam Prof. Dr. Yıldırım AYDOĞDU' ya teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezimin hazırlanması esnasında, tezimin tüm aşamalarında daha önceden edindiği tecrübe ve bilgi birikimini kullanmaktan kaçınmayarak bana elinden gelen tüm yardımı yapan sayın hocalarım Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN ve Arş. Gör. Dr. Mediha KÖK'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Değerli eşim Sermin KÜRÜM ve aileme desteklerinden ve sabırlarından dolayı teşekkür ederim.

Ferdi KÜRÜM

ELAZIĞ-2013

## İÇİNDEKİLER

|                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ÖNSÖZ .....</b>                                                     | <b>I</b>   |
| <b>İÇİNDEKİLER.....</b>                                                | <b>II</b>  |
| <b>ÖZET .....</b>                                                      | <b>III</b> |
| <b>SUMMARY .....</b>                                                   | <b>IV</b>  |
| <b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>                                          | <b>V</b>   |
| <b>TABLolar LİSTESİ .....</b>                                          | <b>VI</b>  |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                  | <b>1</b>   |
| <b>2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR.....</b>                             | <b>3</b>   |
| 2.1. Martensitik Faz Dönüşümleri .....                                 | 5          |
| 2.2. Termoelastik Martensit Dönüşüm .....                              | 8          |
| 2.3. Şekil Hatırlama Etkisi .....                                      | 9          |
| 2.3.1. Tek Yönlü Şekil Hatırlatma Olayı.....                           | 11         |
| 2.3.2. Çift Yönlü Şekil Hatırlama Olayı.....                           | 12         |
| 2.4. Süper Elastiklik.....                                             | 13         |
| 2.5. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Uygulama Ve Kullanım Alanları ..... | 15         |
| <b>3. DENEYSEL İŞLEMLER .....</b>                                      | <b>16</b>  |
| 3.1. Alaşım Üretimi .....                                              | 16         |
| 3.2. Isıl işlem .....                                                  | 16         |
| 3.3. EDX analizi .....                                                 | 16         |
| 3.4. X-Işınları Analizi .....                                          | 17         |
| 3.5. Termal Analiz .....                                               | 17         |
| 3.6. Metalografik Gözlemler .....                                      | 17         |
| <b>4. BULGULAR .....</b>                                               | <b>19</b>  |
| 4.1. Termal Analiz .....                                               | 20         |
| 4.1.1. DSC ölçümleri .....                                             | 20         |
| 4.2. Metalografik Gözlemler .....                                      | 24         |
| 4.2.1. Mikrosertlik Ölçümü.....                                        | 28         |
| <b>5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR .....</b>                                | <b>30</b>  |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                  | <b>31</b>  |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                  | <b>32</b>  |

## ÖZET

Bu çalışmada Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım sisteminde, Kobalt etkisinin, alaşımın kristal yapısına, dönüşüm sıcaklığına, mikro yapıya etkisi incelenmiştir. Cu-Al-Co alaşım sisteminin çoğu bakır bazlı alaşımlar gibi 18R martensit yapı sergiledikleri tespit edilmiştir. Dönüşüm sıcaklıkları incelendiğinde, faz dönüşümünün bütün alaşım sistemi için 250 °C nin üzerinde olduğu bulunmuş ancak kobalt oranına göre düzenli bir artış veya azalış görülmemiştir. Bunun sebebinin Kobalt oranı değişirken, Cu ve Al oranlarındaki değişim olmasıdır. Cu-Al-Co alaşım sistemin mikro yapı incelemeleri sonucu, dört alaşım sisteminde de martensit faz ve bununla birlikte çökeltilere rastlanmıştır. Kobalt oranının artması çökeltilerin büyümesine neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan Vickers mikrosertlik ölçümlerine göre, ortalama sonuçlar kıyaslanırsa, Kobalt miktarıyla mikrosertlik artmıştır. Bu sonuç bize Kobalt katkısının Cu-Al alaşımının dayanaklığını artırdığını gösterir.

**Anahtar kelimeler:** Şekil hatırlamalı alaşım; çökelti; martensit; Vickers sertlik.

## **SUMMARY**

### **THE PRODUCTION OF CUALCO SHAPE MEMORY ALLOYS, AND INVESTIGATION OF PHYSICAL PROPERTIES**

In this study, the effect of Co content on crystal structure, transformation temperature and microstructure of Cu-Al-Co shape memory alloy system were investigated. It was detected that similar to most other copper-based systems, Cu-Al-Co alloy system had also 18R type martensitic structure. The transformation temperatures was found higher than 250 °C for the whole range of compositions of this alloy while a regular increase or decrease in the value with Co content was not observed. This was attributed to variation of Cu and Al contents while the Co content was changed. The microstructural examination of four different Cu-Al-Co alloys indicated the presence of martensite phase together with precipitates. It was realized that the size of precipitates increases with increasing Co content. Additional to that, if the average hardness values obtained from the Vickers micro-hardness tests are compared, it can be stated that the hardness value increases with increasing Co content. All these results point out that increasing Co content increases the strength in Cu-Al-Co shape memory alloy system.

**Keywords:** Shape memory alloy; participate; martensite; Vicker hardness.

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|             |                                                                                                      |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1.  | Şekil Hatırlama Olayının Şematik Gösterimi .....                                                     | 4  |
| Şekil 2.2.  | Austenit ve martensit fazların kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi .....              | 6  |
| Şekil 2.3.  | Martensitik dönüşümün Difüzyonsuz tabiatına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişim .....            | 7  |
| Şekil 2.4   | AuCd (termoelastik) ve FeNi (termoelastik olmayan) martensitik dönüşümlerin histerisiz eğrileri..... | 9  |
| Şekil 2.5   | Şekil Hatırlama Etkisi.....                                                                          | 10 |
| Şekil 2.6.  | Tek yönlü şekil hatırlama olayının mekanizması .....                                                 | 12 |
| Şekil 2.7.  | Çift yönlü şekil hatırlama olayı.....                                                                | 13 |
| Şekil 2.8.  | Süper elastiklik Mekanizmasının Gösterimi.....                                                       | 14 |
| Şekil 2.9.  | Süper elastiklik. As, Af, Ms ve Mf sıcaklıklarında zor-zorlanma eğrisi.....                          | 14 |
| Şekil 3.1.  | Vickers sertlik değeri için kullanılan elmas kare piramit .....                                      | 18 |
| Şekil 4.1.  | Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım sisteminin X ışınları difraktogramı. ....                          | 19 |
| Şekil 4.2.  | F1 alaşımının azot gazı atmosferinde 25 °C/dak. Isıtma hızıyla alınan DSC ölçümü .....               | 20 |
| Şekil 4.3.  | F2 alaşımının azot gazı atmosferinde 25 °C/dak. Isıtma hızıyla alınan DSC ölçümü .....               | 21 |
| Şekil 4.4.  | F3 alaşımının azot gazı atmosferinde 25 °C/dak. Isıtma hızıyla alınan DSC ölçümü .....               | 21 |
| Şekil 4.5   | F4 alaşımının azot gazı atmosferinde 25 °C/dak. Isıtma hızıyla alınan DSC ölçümü .....               | 22 |
| Şekil 4.6.  | Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım Kobalt oranına göre pik sıcaklıklarının değişim eğrisi. ....       | 23 |
| Şekil 4.7.  | F1 alaşımının a)100 büyütmede ve b)1000 büyütmede optik mikroskop görüntüleri.....                   | 25 |
| Şekil 4.8.  | F2 alaşımının a)100 büyütmede ve b)1000 büyütmede optik mikroskop görüntüleri.....                   | 26 |
| Şekil 4.9.  | F3 alaşımının a)100 büyütmede ve b)1000 büyütmede optik mikroskop görüntüleri.....                   | 27 |
| Şekil 4.10. | F4 alaşımının a)100 büyütmede ve b)1000 büyütmede optik mikroskop görüntüleri.....                   | 28 |

## TABLÖLER LİSTESİ

|                   |                                                                                                    |    |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1.</b> | Alaşımların üretiminde kullanılan ağırlıkça element oranları.....                                  | 16 |
| <b>Tablo 3.2.</b> | Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım sisteminin EDX sonuçları .....                                   | 17 |
| <b>Tablo 4.1.</b> | Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım sisteminde kompozisyona göre dönüşüm sıcaklığındaki değişim..... | 22 |
| <b>Tablo 4.2.</b> | Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım sisteminde kompozisyona göre mikro sertliğin değişimi.....       | 29 |

## 1.GİRİŞ

Dünyadaki teknolojik gelişmeler açısından, yeni malzemelerin elde edilmesi ve geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu gelişmeler sadece malzeme elde etmeye yönelik olmamalı, bunun yanı sıra malzemelere yeni işlevler katabilmeli ve malzemenin kullanım alanını genişleterek fonksiyonelliğini artırabilmelidir. Bu alandaki yeniliklerle birlikte malzemelerin fonksiyonelliği mekaniksel elementler ve geliştirilmiş mekaniksel sistemlerde kullanıla bilinir. Şekil hatırlamalı alaşımlar da bu felsefe sonucu ortaya çıkan yeni bir malzeme sınıfıdır. Bazı alaşımların, sıcaklığın değiştirilmesi ve zorlanma etkisi ile şekillerini değiştirmesi ve ters dönüşümle tekrar orijinal şeklini alması olayı şekil hatırlama etkisi olarak adlandırılır ve günümüzde endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil hatırlama olayı, çok farklı özellikte numune hazırlayabilme yolunu açmaktadır. Şekil hatırlama özelliğine sahip termoelastik martensit yapılar deforme edildiğinde makroskobik şekil değişimi gerçekleşecek şekilde önemli etkiler meydana gelir. Deformasyonun etkisiyle yapı içerisinde ikizlemeler, varyant ara yüzey hareketleri ve varyantların birleşimi gibi oluşumlar gerçekleşir. Malzemedeki şekil değişimleri ikiz ara yüzeylerin hareketi sonucunda olur ve materyal ısıtıldığında ana faza dönüşen numune ilk şeklini geri alır( schetky,1980).

Şekil hatırlama Özelliğine sahip malzemeler şekil hatırlamalı alaşımlar olarak adlandırılırlar. Dönüşüm olayına göre metal ve alaşım sistemlerindeki faz dönüşümleri, çekirdeklenme-büyüme dönüşümleri ve martensitik dönüşümler olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Çekirdeklenme-büyüme dönüşümleri sabit sıcaklıkta termal etkileşme ile difüzyonlu olarak meydana gelir. Martensitik dönüşüm ise sistemin sıcaklığı değiştirilerek veya deforme edilerek meydana gelebileceği gibi her iki etkinin birlikte uygulanması ile gerçekleşebilir(Aksoy ve Sarı,2006).

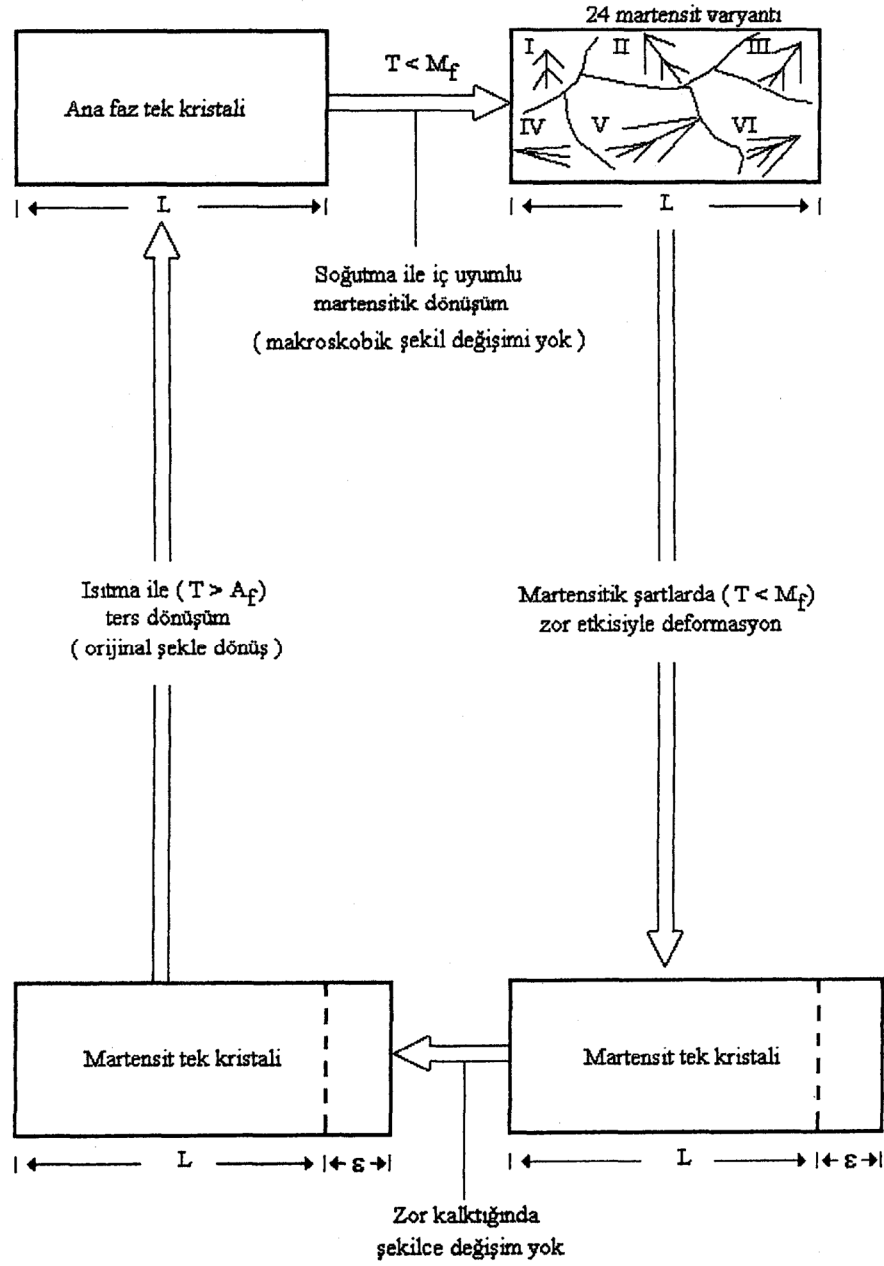
Şekil hatırlamalı alaşımlar, sıcaklık ve gerilim etkisi altında kaybettikleri şekillerini tekrar kazanabilen malzemelerin eşsiz bir sınıfını oluşturmaktadır. Ayrıca bu malzemeler süper elastik özelliklerinden dolayı mikro elektronik, biyo mekaniksel ve uçuş endüstrisinde fonksiyonel malzeme olarak kullanılmaktadır. Şekil hatırlamalı metallerin bu özelliği, günlük yaşamı kolaylaştıracak birçok teknolojik ürünün geliştirilmesine olanak sağlamıştır.

Çok büyük deformasyonları bile aşabilen zarar görmeyen süper elastik gözlük çerçeveleri, kan damarlarına yerleştirilerek pıhtıların yakalanmasında filtre görevi gören malzemeler, dişlerin estetik görünümündeki deformasyonları düzeltme işlevini üstlenen kavisli teller, açık kalp ameliyatları ve sinir sistemi cerrahisinde kullanılan malzemeler, yangın durumunda yanıcı ve zehirli gazların çıkışını kapatacak şekilde yapılmış yangın güvenlik valfları, şekil hatırlama özelliğine sahip metallerden üretilmektedir. Buna örnek olarak kan damarına yerleştirilen filtre verilebilir. Nikel titanyum alaşımlı telden yapılmış çapa şeklindeki filtre, damar içine sokulmadan önce düz bir tel haline getirilir. Damar içine yerleştirildikten sonra tel, vücut ısı ile harekete geçerek filtre fonksiyonu sağlayacak orijinal şekline döner ve toplardamarın içinden geçmekte olan pıhtıları tutar. Metallerin şekil hatırlaması gelecekte teknolojinin hizmetine çok geniş kapsamlı olarak sunulabilecektir.

## 2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR

Şekil hatırlama olayının gözlenmesi, ilk olarak ABD donanma savaş gereçleri laboratuvarlarında (NOL) nikel-titanyum (NiTi) alaşımının şekil hatırlama etkisi gösterdiği keşfedilmiştir. Bu keşif ise 1960 yılında araştırmacıların kazara, yanan bir sigaranın alaşımın şeklini değiştirdiğini fark etmeleriyle anlaşılmıştır. Buna çok ilginç bir olay olarak bakıldı. Burada düşük sıcaklıktaki numuneyi deforme ettikten sonra sıcaklığını yükselttiler ve numunenin orijinal haline geri döndüğünü gördüler. Bu olay, alışılmış plastik deformasyon göz önüne alındığı zaman oldukça ilgi çekicidir. Daha sonraki yıllarda, Illinois üniversitesinde araştırmacılar, altın-kadmiyum alaşımlarında şekil hatırlama olayını gözlemlediler. Ayrıca demir-platin, indiyum-kadmiyum gibi farklı alaşımların farklı sıcaklıklarda şekil hatırlama gösterdiklerini buldular. Bütün bu alaşımlar için ortak özellik, termoelastik martensitik dönüşüm göstermeleridir.

Şekil hatırlama alaşımların bu olayın mekanizması Şekil 2.1 de gösterilmiştir.  $T < M_f < M_s$  sıcaklığında tamamen martensit fazdaki bir numuneye dışarıdan bir zor uygulamakla şekli değişir. Burada  $M_s$  ve  $M_f$  sıcaklıkları sırasıyla martensit başlama ve bitiş sıcaklıklarıdır. Yapılan bu plastik deformasyon sonucundan zor ortadan kaldırılınca numune deforme edilmiş şeklini korur. Plastik deformasyonu ortadan kaldırmak için deforme edilmiş numunenin sıcaklığı  $T < A_f < A_s$  olacak şekilde artırılır. Burada  $A_s$  austenit başlama sıcaklığı,  $A_f$  de austenit bitiş sıcaklığıdır. Numune uygulanan bu ısıtma işlemi sonucunda deformasyondan önceki orijinal faza, yani austenit yapıya ulaşır ve austenit fazda iken sahip olduğu şeklini alır. Numunenin böyle bir dönüşüm mekanizması ile orijinal şeklini tekrar kazanması, şekil hatırlama olayı olarak adlandırılır. Isıtma sonucunda orijinal şeklini kazanan numunenin, tekrar  $T < M_f$  sıcaklığına kadar soğutulmasıyla deforme edilmiş şeklini kazanmasın ada tersinir (çift yönlü) şekil hatırlama olarak adlandırılır (Zengin, 2002).



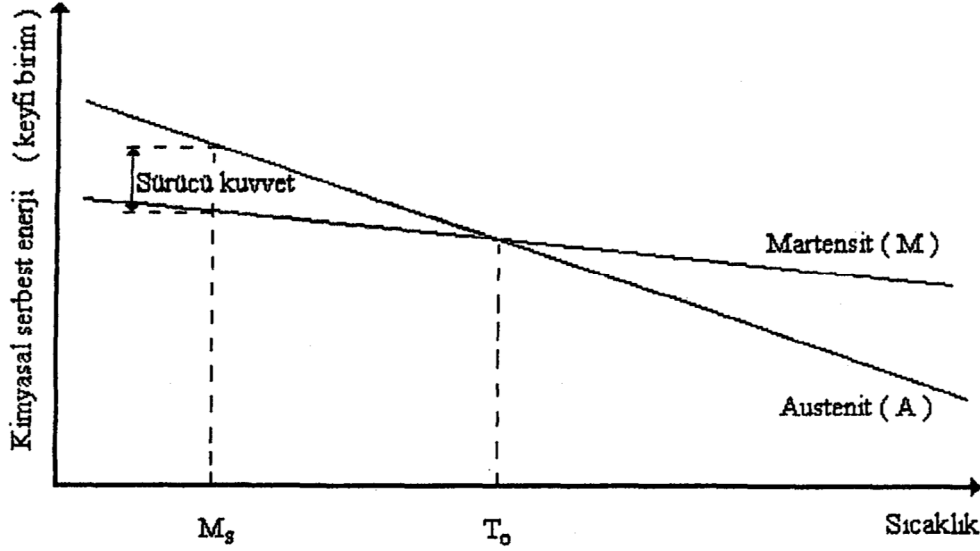
Şekil 2.1. Şekil Hatırlama Olayının Şematik Gösterimi (Aydoğdu,1995)

## 2.1. Martensitik Faz Dönüşümleri

Martensitik faz dönüşümleri ilk olarak 1864 yılında Sorby tarafından, sonra 1866 yılında Tschernoff ve 1878 yılında Martens tarafından demir bazlı alaşımlarda gözlenmiştir. Martens'in tanımına benzer bir gözlem 1895 yılında Osmond tarafından yapılmış ve ürün faz martensit, yüksek sıcaklık fazı austenit ve olaya da Martensitik geçiş adı verilmiştir (Clapp, 1995). Martensitik faz dönüşümü, metal ve alaşım ana fazda (austenit faz) iken sıcaklık ile zor etkisinin ayrı ayrı veya birlikte uygulanması ile meydana gelir. Martensitik dönüşüm olayı bir kristal yapıdan yeni bir kristal yapıya dönüşüm olmasına rağmen, dönüşüm öncesi faz olan ana fazdaki atomların komşulukları, dönüşüm sonrası martensitik fazda aynı kalır. Metal ve alaşımlarda birinci derecede yapısal değişim olan bu dönüşüm difüzyonsuzdur. Yani yapısal değişim esnasında ara yüzeyin içinden geçen atomların taşınmasının düzenli olduğunu ifade eder. Bu sebeple ana fazdaki atomik düzen aynen ürün faz olan martensit faza aktarılır (Balo, 1999). Difüzyonsuz faz dönüşümleri en genel şekilde; yüksek sıcaklık fazında belirli bir kristal yapıda bulunan numunenin sıcaklık, zor ve bunların farklı kombinezonlarının etkisiyle, daha küçük serbest enerjili düşük sıcaklık fazındaki bir kristal yapıyı tercih etmesi şeklinde bilinir. Difüzyon olmadığı için dönüşüm öncesi atomik komşuluklar dönüşümden sonra da aynı kalır (Kalaylı, 1993). Bu dönüşümlerde yüksek sıcaklık fazına austenit faz (ana faz), düşük sıcaklık fazına ise martensit faz (ürün faz) adı verilir. Difüzyonsuz dönüşüm sırasında maddenin kompozisyonu değişmez kalır (Christian, 1975).

Martensitik faz dönüşümü, numune sıcaklığının hızla düşürülmesi veya austenit yapıya dıştan uygulanan bir mekanik zor ya da her ikisinin aynı anda uygulanmasıyla meydana gelir. Austenit kristal yapı, bir  $T_0$  sıcaklığında termodinamik dengededir. Kristal yapı bu sıcaklıktan hızla soğutulursa kritik bir  $M_s$  sıcaklığından sonra, austenit kristal yapı içerisinde martensit yapı oluşmaya başlar. Bu  $M_s$  sıcaklığına martensit bağlama 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. Bu Şekil 2.2'de görülmektedir. Bu anda dışarıdan uygulanacak bir mekanik zor ile  $M_s$  sıcaklığı  $T_0$  sıcaklığının çok altına düşmeden dönüşüm başlayabilir. Dışarıdan uygulanan bu mekanik zor  $M_s$ 'ya arttıracak gibi dönüşen hacim miktarını da artırır (Ortin, 1988).  $M_s$  sıcaklığında başlayan martensit dönüşüm belli bir sıcaklık aralığında devam eder ve durur. Dönüşümün bittiği bu sıcaklığa martensit bitiş sıcaklığı ( $M_f$ ) denir. Martensit

haldeki dönüşmüş numune ısıtılınca tekrar ana faz olan austenit yapıya dönüşür. Bu nedenle martensitik dönüşüm tersinir bir olaydır. Ters dönüşüm de martensit dönüşümde olduğu gibi belli bir sıcaklıkta başlayıp belli bir aralıkta devam ettikten sonra tamamlanır. Bu sıcaklıklar da austenit başlama ( $A_s$ ) ve austenit bitiş ( $A_f$ ) sıcaklıkları olarak adlandırılır (Aydoğdu, 1995).



Şekil 2.2. Austenit ve martensit fazların kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi (Aydoğdu, 1995).

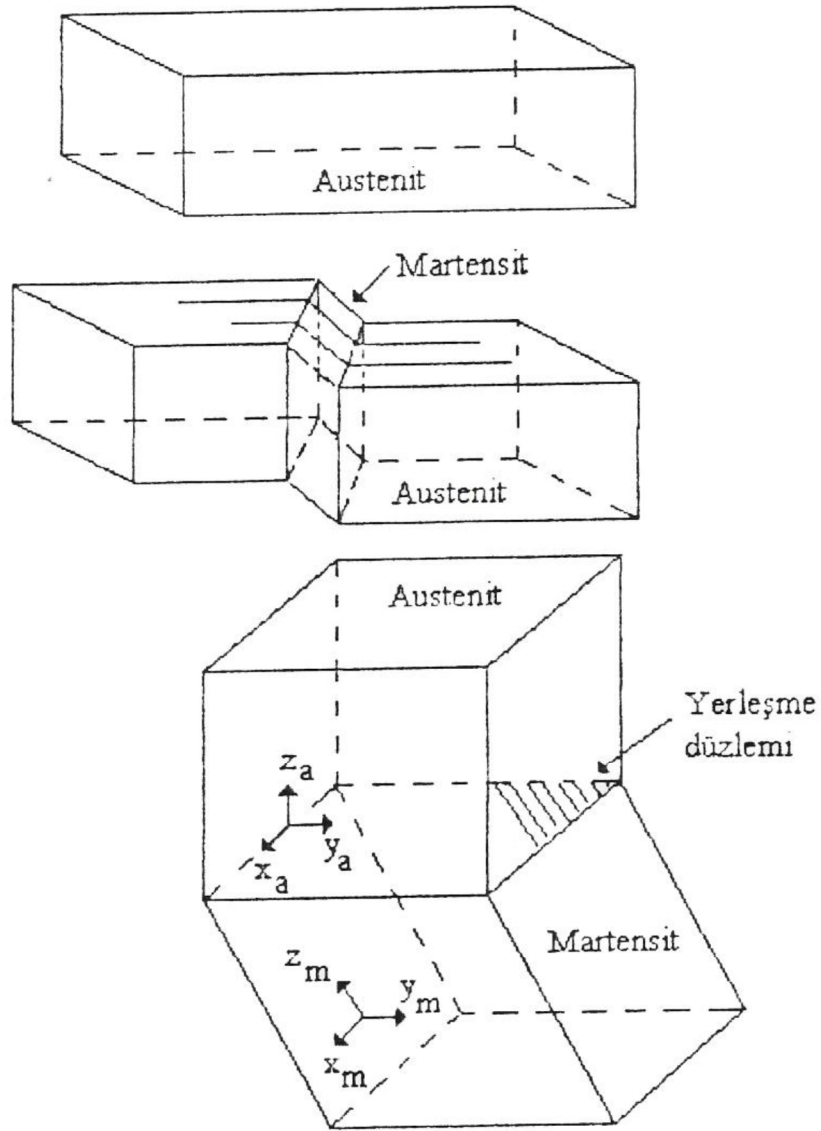
Martensitik dönüşümün genel özellikleri şu başlıklar altında özetlenebilir (Aydoğdu,1995)

1. Martensit faz, bir ara faz katı çözeltilisidir.
2. Dönüşüm difüzyonsuzdur. Yani kristaldeki atomların dönüşüm öncesindeki komşulukları dönüşüm sonrasında da korunur.
3. Dönüşüm, sınırlı bir şekil değişikliğiyle meydana gelir. Ana faz durumunda, numunenin yüzeyi düzeltilip parlatıldıktan sonra sıcaklığı düşürülürse yüzey üzerinde meydana gelen martensitik fazlı bazı bölgeler, kabartılar şeklinde gözlenir. Austenit yapı ile martensit yapı arasındaki sınırda bir bozulma çizgisi ortaya çıkar. Martensitik dönüşümlere eşlik eden şekil değişiklikleri şekil hatırlama olayında önemli rol oynar.
4. Bir martensitik dönüşümde bozulmamış olarak kalan ve ana faz ile ürün fazı ayıran düzleme yerleşme düzlemi (habit plane) denir (Şekil 2.3). Şekil 2.3'de görüldüğü gibi

yerleşme düzlemi değişmez bir düzlemdir ve bu düzlem üzerindeki doğrultular bozulmamıştır

5. Austenit faz ile martensit faz örgüleri arasında sınırlı bir dönme bağıntısı vardır.

6. Dönüşümde kristal örgü kusurları da oluşur.



**Şekil 2.3.** Martensitik dönüşümün Difüzyonsuz tabiatına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişim (Aydoğdu, 1995)

Martensitik dönüşüm, difüzyonsuz tabiatının yanı sıra bir kristal yapıdan yeni bir kristal yapıya dönüşümle karakterize edilir. Difüzyonsuz martensitik dönüşümler çoğu metaller,

alaşımlar ve bileşiklerde gözlenmiştir. Günümüzde “Martensitik Dönüşüm” terimi yaygın olarak kullanılır ve katılardaki bir katı-katı faz dönüşümünü ifade eder (Schetky, 1980). Martensitik dönüşümlerin sahip olması gereken özellikler şöyle sıralanabilir (Schetky, 1980):

**1. Fiziksel Görünüş:** Mikroskop altında iğne benzeri keskinlik gözlenir.

**2. Kristal Gruplaması:** Bazen bozulmuş kübik, ortorombik ve hatta mono klinik kristaller olarak görünmesine rağmen, genelde yapı; biçimi bozulmuş bcc, hcp veya fcc’ dir.

**3. Metastabilite:** Martensit yapılar genelde su verilmiş formda olanları metastabildir (yarı kararlıdır) ve bu özellikle karbon çelikleri gibi ara yer alaşımlarında belirgindir. Gerçekte martensit yapılar materyalin gelişimine ve sıcaklığa bağlı olarak saniyelerden birkaç yıla kadar dizilerek daha kararlı yapılara ayrışır.

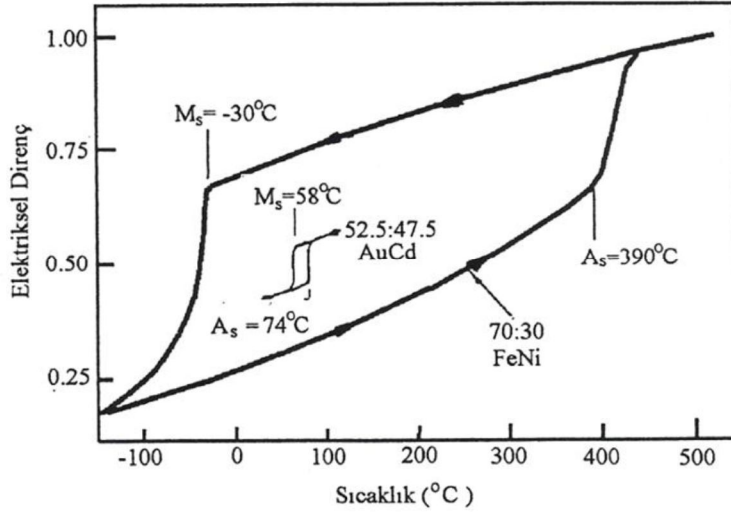
**4. Sertlik:** Genelde martensit materyaller sert değildir. Çeliklerde martensitin kalıntı gerilme ortaya çıkar. Çünkü ara yer C veya N atomları sadece örgü distorsiyonlarına yardım etmez, aynı zamanda dislokasyonların hareketlerini de engeller.

İki tip martensitik dönüşüm vardır. Bunlar termoelastik ve termoelastik olmayan martensitik dönüşümlerdir. Şekil hatırlamalı alaşımlar termoelastik martensitik dönüşüm gösterirler. Çünkü büyüme kinetikleri ve dar histerisiz şekil hatırlama olayı için gereklidir (Çakmak, 1992).

## **2.2. Termoelastik Martensit Dönüşüm**

Martensitik dönüşümler, termoelastik ve termoelastik olmayan dönüşümler olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 2.4 de elektriksel iletkenliğin sıcaklığa karşı değişimi görülmektedir. Burada ters dönüşüm martensitik dönüşüm ile birleşmiştir. Bu grafikte alaşım oranları Fe-%30 Ni ve Au-%47,5Cd dir. FeNi alaşımında dönüşüm sıcaklığının ( $A_s$  -  $M_s$ ) histerезisi oldukça geniştir. Bu genişlik yaklaşık olarak 400 °C dir. AuCd alaşımında ise bu genişlik oldukça küçüktür. Bu değer 15°C dir. Sürücü kuvvete ve kimyasal olmayan serbest enerjiye duyulduğunda görünür ki dönüşüm, FeNi alaşımında daha büyük AuCd alaşımında ise daha küçüktür. Burada büyük histerisiz gösteren FeNi alaşımı termoelastik

olmayan bir martensit dönüşümü gösterir. Küçük histerezis gösteren AuCd alaşımı termoelastik bir martensit dönüşümü gösterir.



**Şekil 2.4** AuCd (termoelastik) ve FeNi (termoelastik olmayan) martensitik dönüşümlerin histerisiz eğrileri (Aydoğdu,1995)

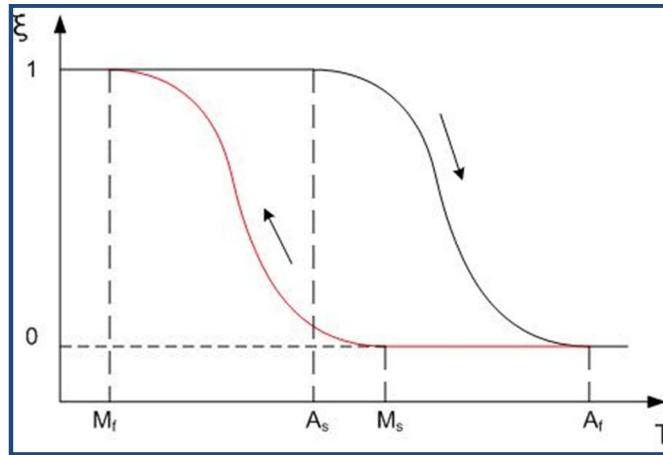
### 2.3. Şekil Hatırlama Etkisi

Şekil hatırlama olayı gösteren bir alaşım belirli bir kristal yapıya sahip olmalıdır. Bu yapı martensit haldeyken sıcaklık ve zora bağlı olarak değişebilir. Şekil hatırlama özelliğine sahip alaşımdan yapılmış bir çubuk, martensit dönüşüm sağladıktan sonra yonca yaprağı şeklinde eğilirse ve daha sonra ısıtılırsa austenit halde tekrar çubuk haline döner. Görüldüğü gibi şekil hatırlama olayı gösteren alaşım için martensit faz dönüşümü esastır (Aydoğdu,1995).Şekil hatırlamalı alaşımlardaki etki austenit ve martensit olarak bilinen iki yapı arasındaki katı-katı faz transformasyonunun bir sonucudur (Smith ve Hashemi,2006). Difüzyonsuz gerçekleşen bu dönüşüm düzlemsel kayma benzeri bir mekanizma ile çalışır.

Austenit faz soğutulurken martensit forma dönüşür. Martensit faz birbirine zıt plakaların ardışık kırıklar oluşturarak bir araya gelmesi ile oluşan bir yapı görünümündedir (Smith ve Hashemi, Fourth Edition). Bu nedenle stres altında bu yapıyı deforme etmek oldukça kolaydır. Kuvvet altında düzlemsel formunu alan martensit yapısı ısıtılarak tekrar austenit şekline geri döner.

Martensit ve austenit faz arasındaki geçişler sıcaklıkla belli bir yolu takip ederler. Şekil 2.5’de görülen sıcaklıklar, Ms: Martensit başlangıç; Mf: Martensit bitiş; As: Austenit başlangıç; Af: Austenit bitiş için tanımlanmıştır.

Şekil 2.5’de de görüldüğü gibi soğutularak elde edilen martensit tekrar ısıtıldığında austenit faza doğru giderken aynı yolu takip etmez ve bir histerisiz oluşturarak daha düşük sıcaklıklarda faz geçişini gerçekleştirir. Süperelastisite ise; Af sıcaklığının üzerinde malzemenin strese maruz kalması halinde martensit forma geçişi ve stresin ortadan kalkması ile birlikte austenit fazındaki şekline, hiçbir bozulmaya uğramadan geri dönmesi olarak bilinir. Bunun nedeni stresin ortadan kalkması halinde Af sıcaklığının üzerinde kararlı olmayan martensit formun hızlı bir geçiş yapmasıdır. Stres-bazlı martensit dönüşümü olan süper elastik davranış kayma için kritik stres aşılmadığı sürece geçerlidir. Malzemenin termo mekanik muamelelerle işlenmesi sonucu kritik stres arttırılabilir (Otsuka ve Kakeshita,2002).



Şekil 2.5 Şekil Hatırlama Etkisi

Şekil hatırlama etkisi tek yönlü ve çift yönlü olabilir. Malzemenin sadece ısıtma ile austenit faza geçiş yapması tek yönlü, ısıtma ile austenit faza geçiş ve tekrar soğutma ile martensit faza geçiş yapması ve bu işlemin birçok kez tekrar edilebilmesi ise çift yönlü şekil hatırlama etkisi olarak tanımlanır. Çift yönlü etki malzemenin işlenmesi sırasındaki mekanik-ısıl muameleler ve bu muamelelerin kontrolü ile mümkün olabilir (Otsuka ve Kakeshita,2002).

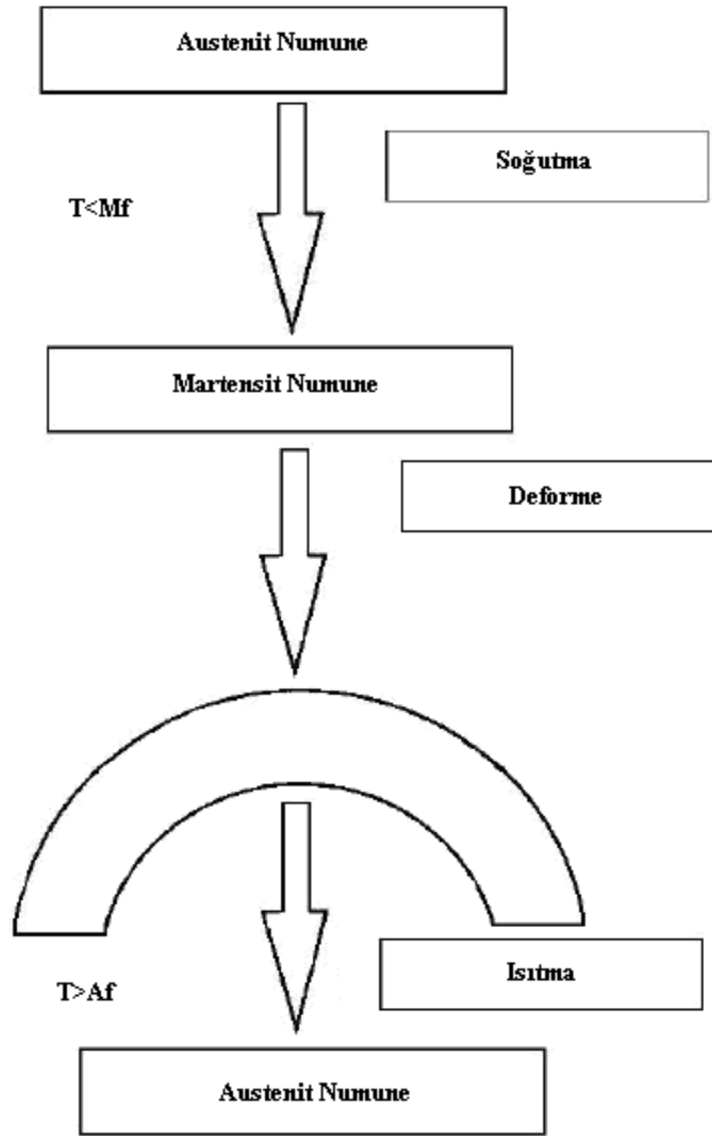
### 2.3.1. Tek Yönlü Şekil Hatırlatma Olayı

Tek yönlü şekil hatırlama olayında numune martensitin bitiş sıcaklığının altında ( $T < M_f$ ) deforme edilirse, uygulanan zor numune üzerinden kaldırıldığında numune deformasyon öncesi şekline geri dönemez. Isıtma sonucunda numunede kalan zor kademeli olarak geri döner. Sıcaklığın tekrar numunenin deforme edildiği sıcaklığa düşürülmesi üzerine, numune deforme edilmiş şeklini geri kazanamaz. Tek yönlü şekil hatırlama olayı aşağıdaki basamaklardan oluşur (Funakuboh,1987).

- $T < M_f$ 'de numuneyi deforme etmek
- Numunenin yüksek sıcaklık şeklini kazanması için  $T > A_f$ 'ye kadar ısıtmak
- Tekrar  $T < M_f$ 'ye kadar soğutmak

Tek yönlü şekil hatırlama olayı NiTi, TiNb, NiAl, FePt, CuZnSi, CuZnSn, FeMnC gibi birçok alaşım sistemlerinde gözlenmiştir. Bu şekil hatırlama türünün zorlanma limiti, kendiliğinden martensit dönüşümün biçim zorlamasına bağlıdır. Bu limit, deformasyon etkili bir martensit tek kristalinin sadece terslenmesiyle ortaya çıkar. Pratikte bu seviye sadece  $\beta$ -faz tek kristalinde ulaşılır (Funakuboh,1987).

Tek yönlü şekil hatırlama tersinmez şekil hatırlama olayı denir. Örnek olarak, austenit haldeki bir çubuk sıcaklık düşürülerek martensit halde döndürüldüğünde şeklini değiştirmez. Fakat martensit haldeki bu çubuğa bir deformasyon uygulanırsa şekli bozulur. Bu şekil bozukluğunun Şekil 2.6'deki gibi olduğu düşünülürse numune ısıtıldığında tekrar çubuk haline dönerek austenit fazdaki orijinal şeklini geri kazanır.



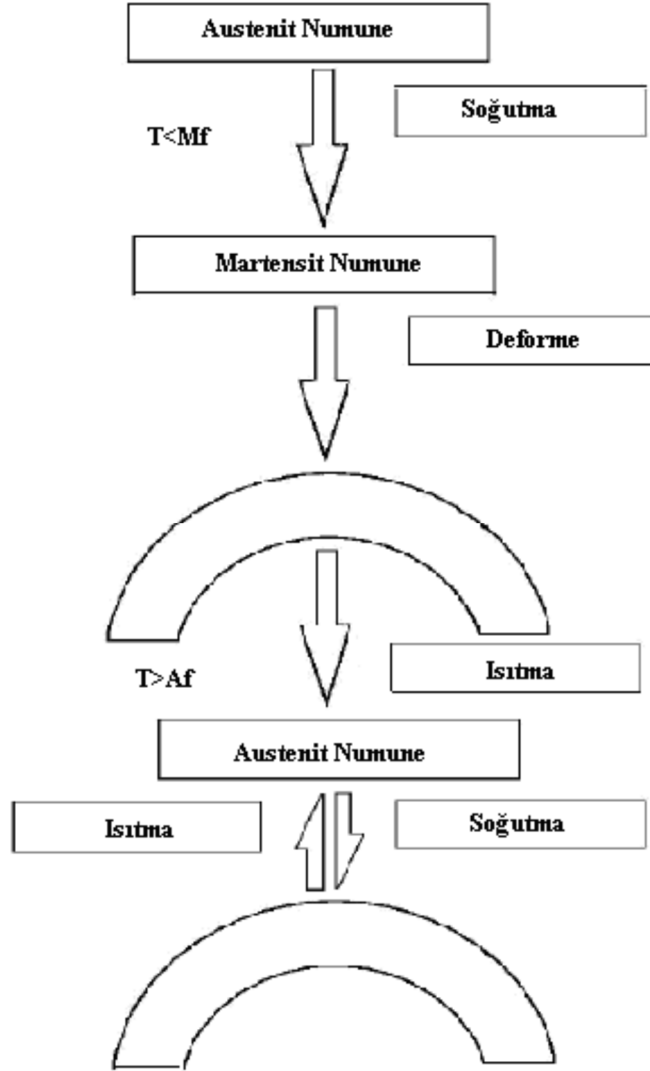
Şekil 2.6. Tek yönlü şekil hatırlama olayının mekanizması (Aydoğdu,1995)

### 2.3.2 Çift Yönlü Şekil Hatırlama Olayı

Şekil hatırlamalı alaşımlarda gözlenen martensit dönüşümleri uygulanan zor ve sıcaklık etkisine bağlı olarak çift yönlülük (tersinirlik) gösterirler. Tersinirlik nedeniyle bu alaşımlar diğer alaşımlardan farklı davranış sergilerler (Deleay ve Krishan, 1974).

Gerçek çift yönlü şekil hatırlama olayında ise,  $T < M_f$  sıcaklığında yani martensit fazda numune deforme edildikten sonra uygulanan zor kaldırılır ve numune deforme edilmiş şeklini korur. Deforme edilmiş numunenin sıcaklığı  $T > A_f$ 'ye yükletilince plastik deformasyon ortadan kalkar numune deforme edilmemiş haline geri döner. Orijinal şeklini alan numune tekrar  $T < M_f$  sıcaklığına soğutulur ve deforme edilmiş şeklini alır ve Şekil

2.7’de gösterilmiştir. Bu çift yönlü şekil hatırlama olayına tersinir şekil hatırlama olayı denir (Zengin,2002)

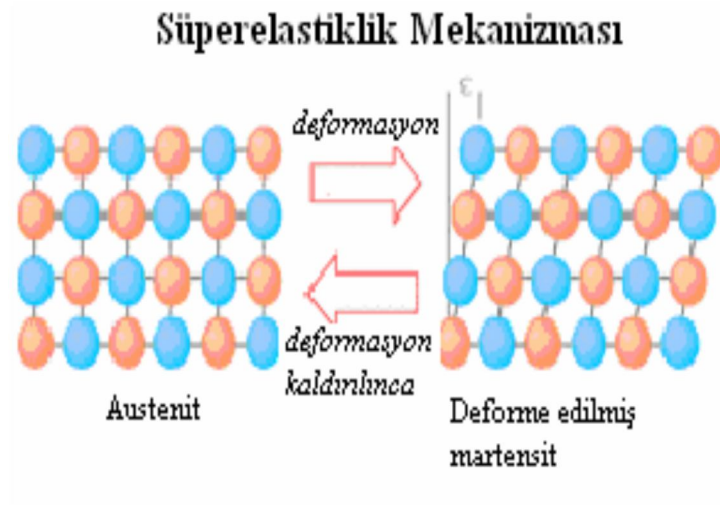


Şekil 2.7 Çift yönlü şekil hatırlama olayı(Aydoğdu,1995)

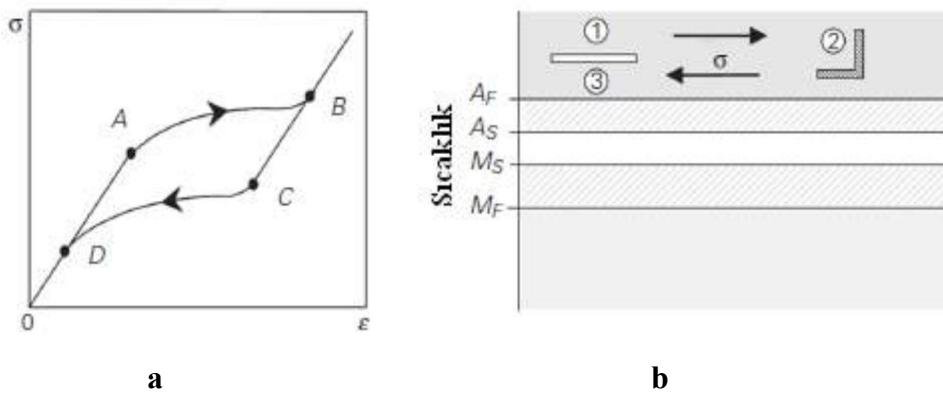
#### 2.4.Süper Elastiklik

Şekil hatırlamalı alaşımlarda lineer olmayan esnek davranış süper elastikliktir. Bu durumda küçük bir kuvvet ile oldukça fazla bir deformasyon oluşabilir. Buna rağmen yük malzeme üzerinden kaldırılırsa, malzeme ısıtmaya gerek kalmaksızın orijinal sekline geri dönebilir (şekil 2.8) (Baksan,2006). Süper elastiklik, şekil hatırlamalı alaşımlarda  $A_f$  sıcaklığının üstünde meydana gelir. Sekil 2.9.a’da şekil hatırlamalı alaşımların süper elastikliğini göstermektedir. Mekaniksel yükleme, A noktasında kritik değere ulaşınca

kadar elastik cevaba neden olur. B noktasının sonuna kadar martensit donuşum (Austenit-Martensit) meydana gelir. Bu noktada numunenin kristal yapısı deforme olmuş Martensittir. Yüksek zor değerleri için, őril hatırlamalı alasım lineer bir cevap verir. Yklenmeme durumunda numune elastik dönüşüm gösterir (B→C). C' den D' ye ters martensit dönüşüm (martensit-austenit) meydana gelir. D noktasının üstünde numune elastik boşalma gösterir. Yükleme-yklenmeme durumu bittiği zaman őril hatırlamalı alasım artan zorlanmaya sahip olmaz. (Machado ve Savi, 2003).



**Şekil 2.8** Süper elastiklik Mekanizmasının Gösterimi



**Şekil 2.9** Süper elastiklik. As, Af, Ms ve Mf sıcaklıklarında zor-zorlanma eğrisi(Kök,2011)

Süper elastik etkisinin gözleendiği diğer bir yolda şekil 2.9.b' de grlmektedir. (1) durumunda sadece (austenit gibi) bir faz vardır. Sabit sıcaklıkta, mekaniksel yükleme

deforme olmuş martensit dönüşüm olana kadar uygulanır. (2)' de, yüklenmeme durumunda ters dönüşüm yer değiştirir (deforme olmuş martensit→austenit). (3) durumda; numune artan zorlanma göstermez (Machado ve Savi., 2003).

## **2.5. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Uygulama Ve Kullanım Alanları**

Süper elastik ve şekil hatırlama etkili malzemeler günümüzde pratik ve ileri düzey birçok uygulamada tercih edilmektedirler. Bu malzemeler, makine-teçhizat ve yapı malzemeleri, medikal aygıtlar ve araçlar gibi endüstriyel ve tıbbi uygulamaların yanı sıra; elektronik aygıtlar, uzay araçları gibi ileri düzey uygulamalarda ve süper elastik gözlük çerçeveleri, telefon antenleri gibi günlük hayatı kolaylaştıran birçok üründe kullanılmaktadırlar. Son yıllarda robotik alanında yapılan uygulamalar da yaygınlaşmaktadır.

Nitinol yüksek biyo uyumluluk ve süper elastiklik göstermesi nedeniyle intravasküler bir tıbbi gereç olan kalp stenlerinde kullanılır (Chung vd.,2004). Dönüşüm sıcaklığı genelde 30 °C olan bu stentler vücut içerisinde Af sıcaklığının üzerinde süper elastiklik davranış gösterirler (Stoeckel vd.,2004). Damar içi esnek davranışı ve operasyon kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedirler. Ayrıca kata terler ve çeşitli operasyonlarda kullanılan yönlendirici kablolar için de bu malzemeler yaygın olarak kullanılır.

### 3. DENEYSEL İŞLEMLER

#### 3.1. Alaşım Üretimi

Tablo 3.1 de belirlenen kompozisyonda hazırlanan %99.9 saflıktaki Bakır (Cu), %99.9 saflıkta Alüminyum (Al) elementi ve %99.9 saflıkta Kobalt (Co) elementi toz halde hazırlanıp, daha sonra 1 tonluk basınç altında pelet haline getirilmiştir. Pelet haline gelen karışım ark fırınında eritilerek ingot şekline alaşımlar elde edilmiştir. Elde edilen alaşımlar yeniden eritilerek homojenlik artırılmıştır.

**Tablo 3.1.** Alaşımın üretiminde kullanılan ağırlıkça element oranları

| Numune Kodu | Cu % Ağırlıkça | Al % Ağırlıkça | Co % Ağırlıkça |
|-------------|----------------|----------------|----------------|
| F1          | 86,5           | 13             | 0,5            |
| F2          | 86             | 13             | 1              |
| F3          | 85,5           | 13             | 1,5            |
| F4          | 85             | 13             | 2              |

#### 3.2. Isıl işlem

Isıl işlem alaşımların faz stabil itesini sağlamak, homojenleştirmek ve martensitik fazı elde etmek için kullanılır. Bu çalışmada Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşımlar grubunu homojen ize etmek için, alaşımlar, 850 °C de 72 saat ısıtılma uygulanmış ve tuzlu buzlu suda ani soğutulmuştur.

#### 3.3. EDX analizi

Homojenleştirilen Cu-Al-Co alaşım sisteminin, istenilen oranlarda üretilip üretilmediğini anlamak için EDX analizi SEM (Jeol JSM 7001F) Marka cihaz ile yapılmıştır. EDX analizi sonuçları yüzde ağırlıkça ve atomikçe değerleri Tablo 4,2 de verilmiştir.

**Tablo 3.2.** Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım sisteminin EDX sonuçları

| Numune Kodu | <u>Cu</u>   |            | <u>Al</u>   |            | <u>Co</u>   |            | c/a  |
|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|------|
|             | % Ağırlıkça | % Atomikçe | % Ağırlıkça | % Atomikçe | % Ağırlıkça | % Atomikçe |      |
| F1          | 88,43       | 76,95      | 10,98       | 22,50      | 0,59        | 0,56       | 1,46 |
| F2          | 88,52       | 77,63      | 10,58       | 21,23      | 1,20        | 1,13       | 1,44 |
| F3          | 86,25       | 75,37      | 10,47       | 21,54      | 3,29        | 3,10       | 1,49 |
| F4          | 84,97       | 74,32      | 10,31       | 21,23      | 4,73        | 4,46       | 1,51 |

### 3.4. X-Işınlari Analizi

Bu çalışmada Cu-Al-Co alaşım sisteminin x-ışınları analizleri Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü x-ışını difraktometresi ile  $\text{CuK}_\alpha$  ( $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$ ) radyasyonu kullanılarak alınmıştır. Ölçümler  $2\theta=20-80^\circ$  arasında  $2^\circ/\text{min}$ . sabit tarama hızı ile yapıldı. X-ışınları difraktometresi ile alaşım sisteminin faz değişimi belirlendi.

### 3.5. Termal Analiz

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), şekil hatırlamalı alaşımların faz dönüşüm sıcaklığını belirlemede sıklıkla kullanılan bir cihazdır. Bu çalışmada, Cu-Al-Co alaşım sisteminin dönüşüm sıcaklıkları belirlemek için DSC ölçümleri  $25^\circ\text{C}/\text{dak}$ . Isıtma/soğutma hızıyla azot gazı atmosferinde Perkin Elmer Sapphire DSC ile alındı.

Diferansiyel Termal Analiz (DTA) cihazı, DSC de gözlemlediğimiz martensit dönüşüm sıcaklığının yanında daha yüksek sıcaklıklarda alaşımda meydana gelen değişimler hakkında bilgi verir. Ayrıca numunelerin DTA sına bakarak numuneye uygulamamız gereken ısıtma işlem sıcaklıkları hakkında bilgi sahibi olunabilir. Bu çalışmada, Cu-Al-Co alaşım sisteminin yüksek sıcaklıkta faz geçişini belirlemek için DTA ölçümleri  $25^\circ\text{C}/\text{dak}$ . ısıtma hızıyla Perkin Elmer Pyris TG/DTA ile alındı.

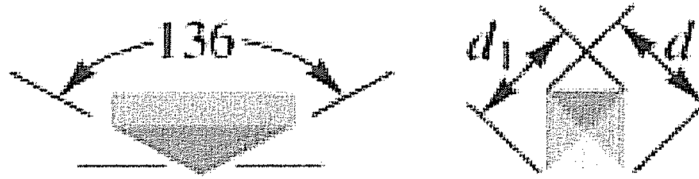
### 3.6. Metalografik Gözlemler

Cu-Al-Co alaşım sisteminin optik mikroskop ölçümleri yapılabilmesi için polyester reçine ile soğuk kalıplama yapıldı. Soğuk kalıplama yapılan alaşımlar ipek ve kadife çuha ile parlatma işleminden sonra, 50 ml HCl, 10 g  $\text{CuSO}_4$  ve 50 ml saf su ile hazırlanan

çözelti ile kimyasal dağlama yapıldı. Bu şekilde hazırlana alaşımların optik mikroskop ölçümleri NIKON ECLİPSE MA200 marka cihaz ile alındı.

Vickers sertlik deneyi ölçüm yönteminde baskı elemanı olarak tepe açısı  $136^\circ$  olan elmas kare piramit kullanılır. F yükü ile malzemeye bastırılan piramit ucun bıraktığı dörtgen izin köşegenleri ölçülerek hesaplanan ortalama köşegen uzunluğu formülde yerine konularak sertlik değerleri bulunur.

Vickers sertliği yüke bağlı değildir. Ölçme hatalarını azaltmak ve heterojen yapılarda ortalama değer elde edebilmek için yükü ve dolayısıyla izi büyötmek faydalıdır. Ancak köşegen uzunluğu sertliği ölçölen parça veya tabaka kalınlığının en çok üçte ikisi kadar olmalıdır. Yöük 1-120 kgf arasında değışebilir. Normal yük olarak 30kgf seçile bilinir. Vickers yönteminde büyük piramit açısından dolayı az derinliklerine rağmen geniş diyagonaller elde edilir. Yöükün numune üzerinde kalma süresi yaklaşık 20 saniyedir. Bu süre sonunda baskı ucu numune üzerinden kaldırılır ve deney bitirilir.



**Şekil 3.1.** Vickers sertlik değeri için kullanılan elmas kare piramit

Vickers sertlik değerinin tespiti için aşağıdaki formölden yararlanılır.

$$VSD = 1,85 F/d^2$$

Burada F uygulanan yükü (kg), d iz köşegenlerinin ortalaması (mm) olup  $d = (d_1 + d_2)/2$

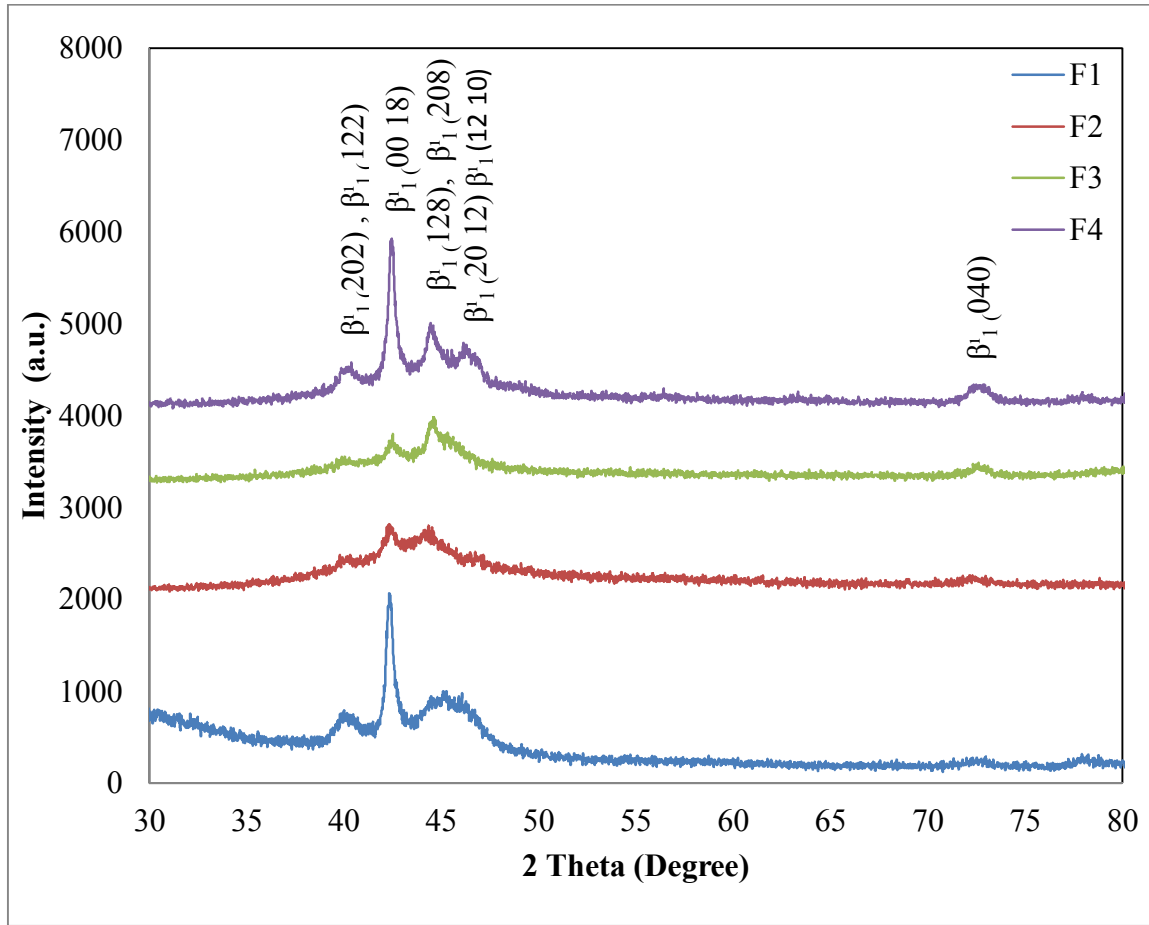
formölüyle hesaplanır.  $d_1$  ve  $d_2$  sırasıylaölçölen köşegen uzunluklarıdır.

Vickers sertlik deneyi çok yumuşak ve çok sert tabakalar içinde uygun olan bir yöntemdir. Deneyde yük düşük olduğu için genellikle ince parçalarda ve sadece yüzeyi sert olan özel işleml görmüş malzemelerde tercih edilir.

Bu çalışmada SERTLİK ölçümü EMCO TEST marka DuraScan cihazı ile yapılmıştır...

#### 4. BULGULAR

Cu-Al-Co alaşım sisteminin oda sıcaklığında alınan x ışınları difraktogramı şekil 4.1 de verilmiştir. Elde edilen pikler literatüre göre indekslenmiştir (Aydoędu ve ark., 2004; Zhang ve ark., 2013). X ışınları difraksiyonuna bakıldığında alaşım sisteminin hepsinde  $\beta'_1$  (18R) martensit yapı görölmektedir. F1 ve F4 alaşımları için ana faza ait pikler daha belirgin iken F2 ve F3 alaşımlarında piklerin şiddeti dūřüktür. Bunun sebebi bulk halde x ışını alınan numunede, gelen x ışınlarının bir kısmının çökeltilere denk gelmesinden olabilir. Çünkü çökeltilerin bulunduğu bölgede x ışını piklere amorfya yakın bir karakteristik gösterir. Piklerin belirgin olduğu F1 ve F4 alaşımının x ışınları pikleri kıyaslanırsa, (12 10) piki ile (20 12) piki F1 alaşımında net değilken, F4 alaşımında yarılma gerçekleşmiş ve bu iki pik belirgin hale gelmiştir.



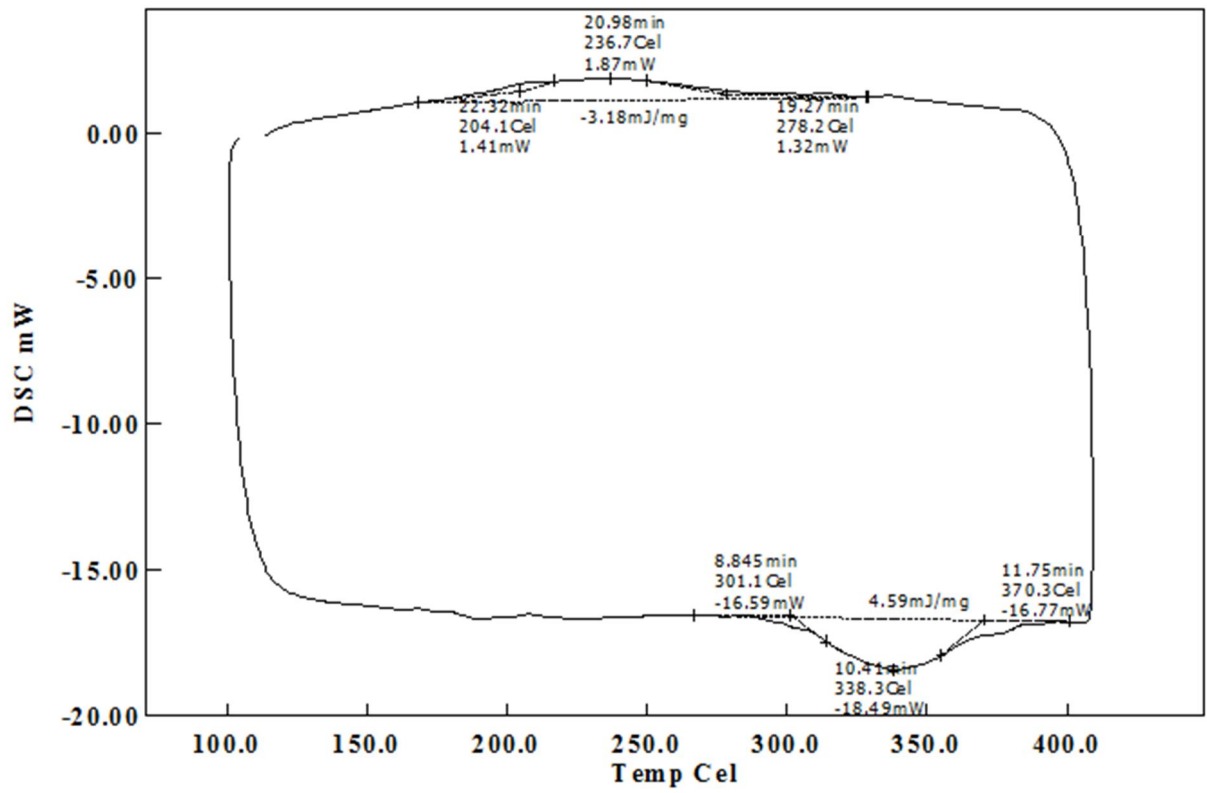
şekil 4.1 Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım sisteminin X ışınları difraktogramı.

#### 4.1. Termal Analiz

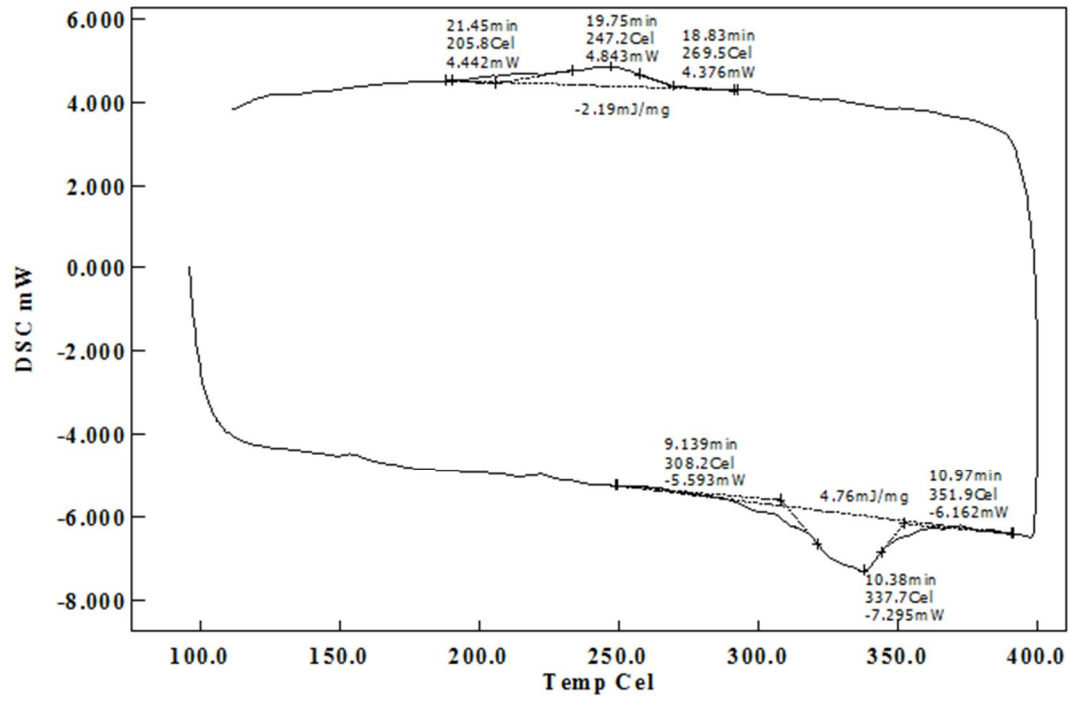
Termal analiz ölçümleri iki basamakta gerçekleştirildi. Birinci basamakta düşük sıcaklıklar için DSC ölçümleri alındı.

##### 4.1.1. DSC ölçümleri

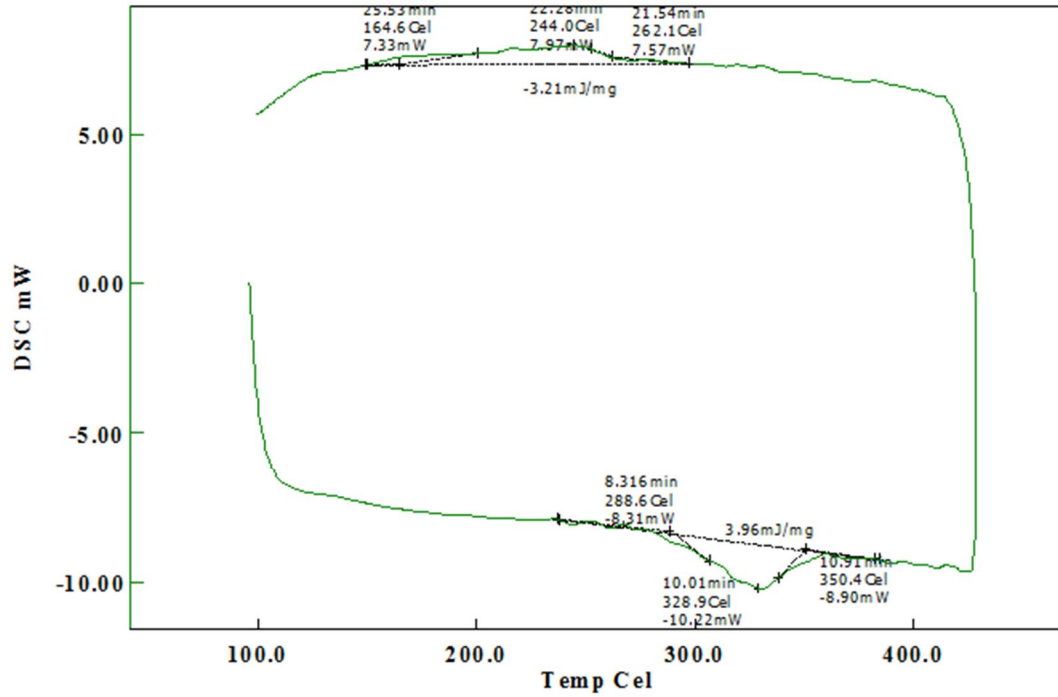
F1, F2, F3 ve F4 olarak kodlanmış, Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım sisteminin 25 °C/dak ısıtma hızıyla alınan DSC ölçümleri Şekil 4.2-4.5 te verilmiştir.



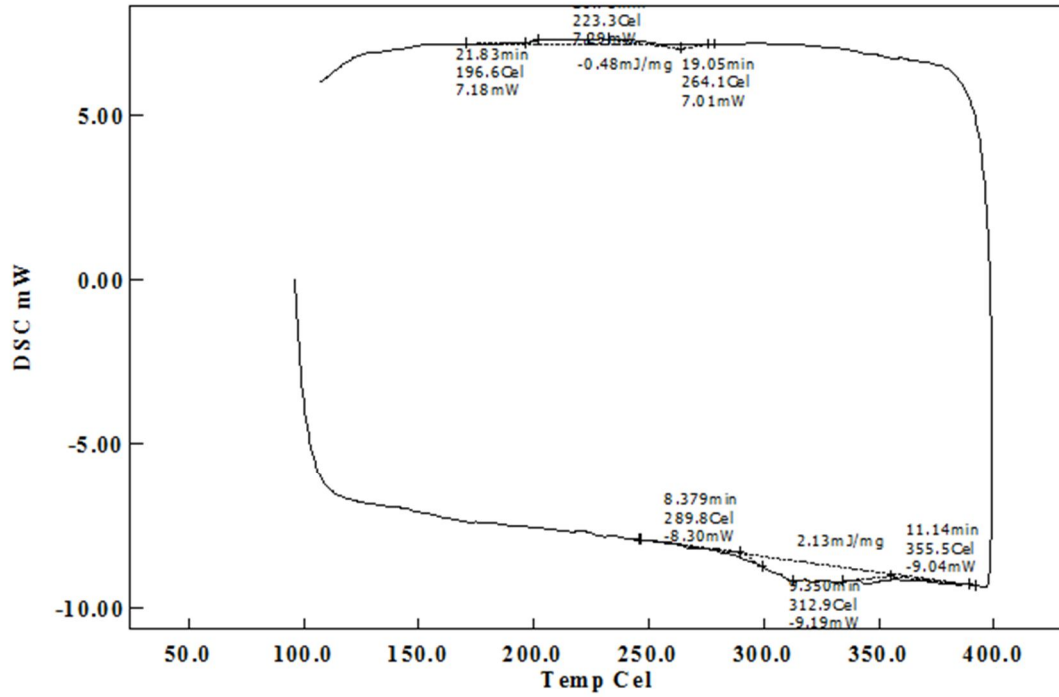
Şekil 4.2. F1 alaşımının azot gazı atmosferinde 25 °C/dak. Isıtma hızıyla alınan DSC ölçümü



Şekil 4.3. F2 alaşımının azot gazı atmosferinde 25 °C/dak. Isıtma hızıyla alınan DSC ölçümü



Şekil 4.4. F3 alaşımının azot gazı atmosferinde 25 °C/dak. Isıtma hızıyla alınan DSC ölçümü

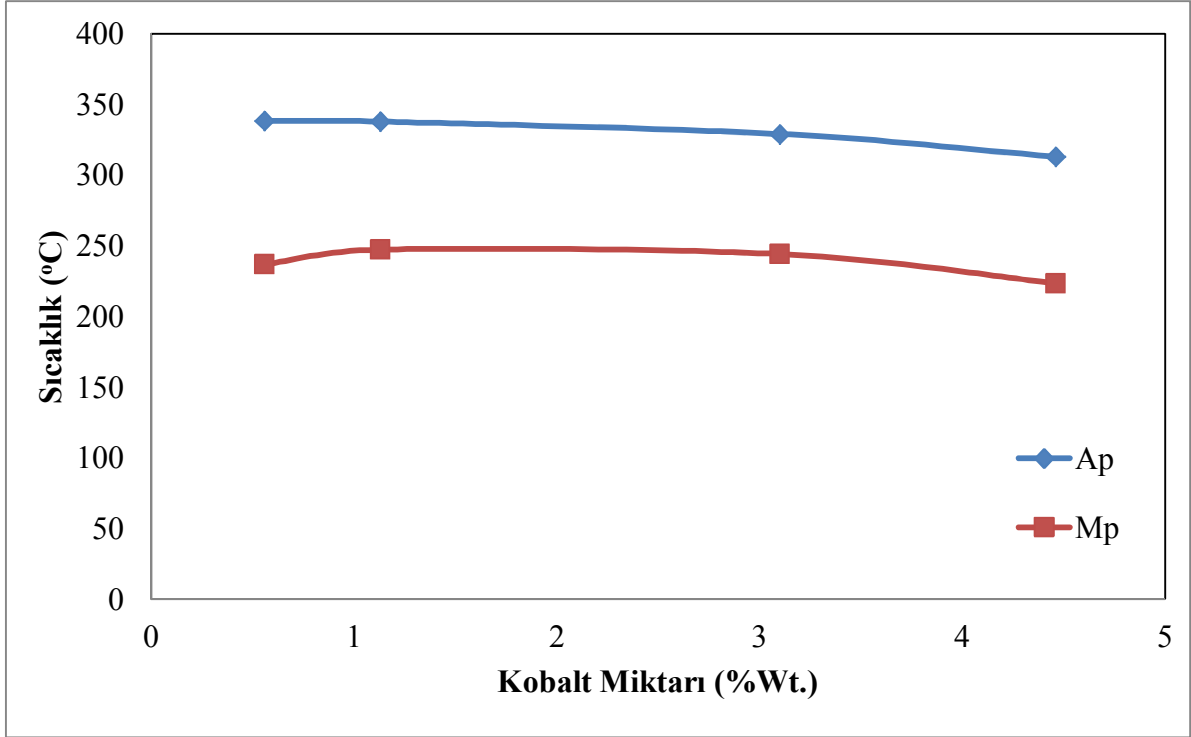


Şekil 4.5 F4 alaşımının azot gazı atmosferinde 25 °C/dak. Isıtma hızıyla alınan DSC ölçümü

Tablo 4.1 Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım sisteminde kompozisyona göre dönüşüm sıcaklığındaki değişim.

|    | A <sub>s</sub><br>(°C) | A <sub>p</sub><br>(°C) | A <sub>r</sub><br>(°C) | M <sub>s</sub><br>(°C) | M <sub>p</sub><br>(°C) | M <sub>r</sub><br>(°C) | T <sub>0</sub><br>(°C) | ΔH <sub>ave</sub><br>(J/g) | ΔS (J/g)<br>°C |
|----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|----------------|
| F1 | 301,1                  | 338,3                  | 370,3                  | 278,2                  | 236,7                  | 204,1                  | 289,6                  | 3,88                       | 0,013          |
| F2 | 308,2                  | 337,7                  | 351,9                  | 269,5                  | 247,2                  | 205,8                  | 288,8                  | 3,47                       | 0,012          |
| F3 | 288,6                  | 328,9                  | 350,4                  | 262,1                  | 244,0                  | 164,6                  | 275,3                  | 3,58                       | 0,013          |
| F4 | 289,6                  | 312,9                  | 355,5                  | 264,1                  | 223,3                  | 196,6                  | 276,8                  | 2,21                       | 0,008          |

Tablo 4.1 e göre, Co oranı arttıkça Austenit pik dönüşüm sıcaklığı azalmıştır. Ayrıca T<sub>0</sub> değerinde azalma eğilimi göstermektedir. Ama Co oranı değişimi ile dönüşüm sıcaklıkları değerinde kararlı bir artış veya azalış yoktur. Bunun sebebi, Alaşım sisteminin içinde Co oranını artırırken Cu veya Al oranını sabit tutulamamasıdır. Bu nedenle dönüşüm sıcaklığındaki değişimler sadece Co oranına bağlanamaz. Tablodaki değerlere göre austenit ve martensit dönüşüm için pik değerlerinin EDX sonuçlarından elde edilen Kobalt oranına göre grafiği çizildi. (Şekil 4.6) Grafiğe göre austenit pik sıcaklık değeri (A<sub>p</sub>), kobalt oranı ile azalırken, Martensit pik dönüşüm sıcaklığı değeri (M<sub>p</sub>) F1 ve F2 değerleri için artış gösterirken, kobalt oranının artmasıyla azalmıştır.



**Şekil 4.6.** Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım Kobalt oranına göre pik sıcaklıklarının değişim eğrisi.

DSC ölçümlerinden martensitik ve austenit dönüşüm esnasında entalpi ve entropi değişimi belirlenebilir. Sıcaklığın fonksiyonu olarak ısıtma ve soğutma esnasında dönüşüm pikinin integrali entalpi değişimini verir. Ortalama entalpi değeri

$$\Delta H_{\text{ort}} = (\Delta H_{\text{ısıtma}} + \Delta H_{\text{soğutma}}) / 2$$

olarak hesaplanır (Kök,2011). Entropi değişimi ise, ortalama entalpi değişimi değerinin  $T_0=0,5 (A_s+M_s)$  denge sıcaklığına bölümüne eşittir.

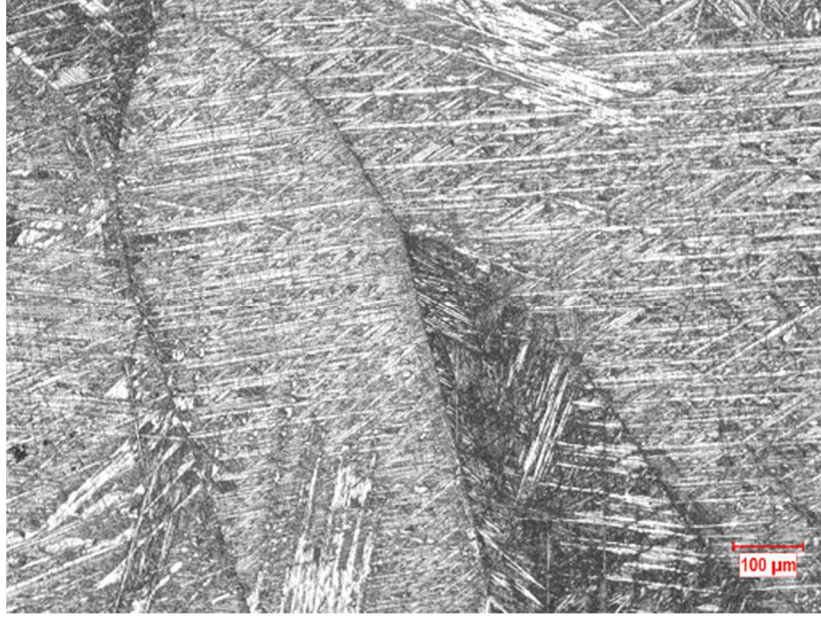
Cu-Al-Co alaşım sisteminin kobalt oranına göre entalpi değişimi değeri tabloda verilmiştir. F1,F2 ve F3 alaşımlarının entalpi ve entropi değişimi değerleri hemen hemen aynı iken, F4 alaşımına entalpi ve entropi değeri düşmüştür. Entalpi değişimindeki bu sonuç literatürle uyum içindedir (Ma ve ark., 2003)

## 4.2. Metalografik Gözlemler

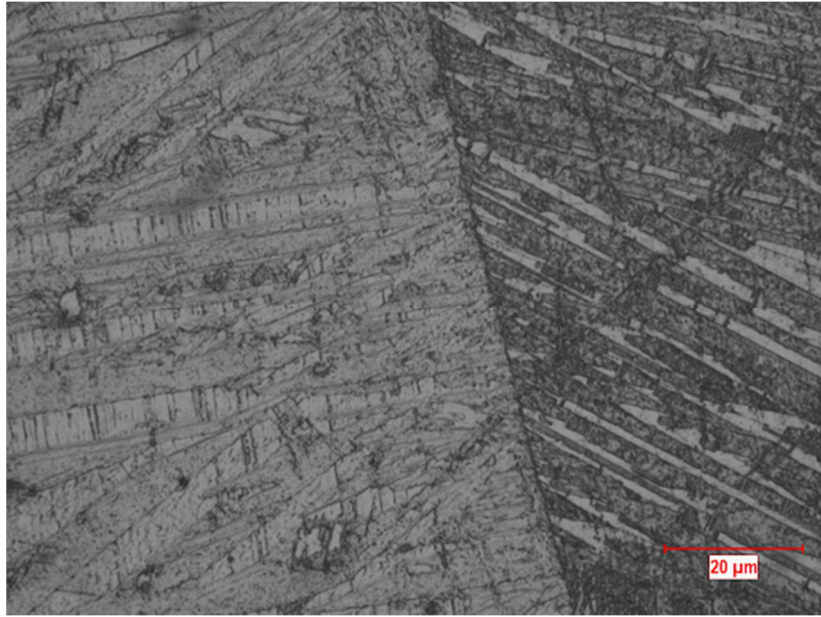
Cu-Al-Co alaşım sistemin optik mikroskop görüntüleri dağlama çözeltisi kullanıldıktan sonra metalografik olarak incelendi. Bu alaşım sistemi üzerinde başta martensit plakalar olmak üzere, çökelti fazlarının metalografik incelemeleri yapıldı.

şekil 4.7 de F1 alaşımının 100 ve 1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. şekil 4.7.a da iki taneler arasında farklı tipte martensit plakalara rastlanmıştır. Açık renkli tanelerde paralel martensit plakalar görülürken, koyu renkli bölgede ise V tipi ve mızrak tipi martensit plakalar görölmektedir. 1000 büyüt meelik optik mikroskop görüntüsüne bakıldığında (şekil 4.7.b), açık renkli bölgede paralel martensit plakalar arasında kayma bantlarına rastlanmıştır. Bu kayma bantlarının oluşmasının sebebi, alaşımın hızlı soğutulması esnasında meydana gelen sıcaklık farkı nedeniyle martensit plakalarda bazı belirgin değişiklikler ortaya çıkar bunlardan biride kayma bandı oluşumudur. Koyu renkli bölgede ise mızrak tipi martensit plakalar açıkça görölmektedir.

Cu-Al-Co alaşım sistemin optik mikroskop görüntüleri dağlama çözeltisi kullanıldıktan sonra metalografik olarak incelendi. Bu alaşım sistemi üzerinde başta martensit plakalar olmak üzere, çökelti fazlarının metalografik incelemeleri yapıldı. şekil 4.7-4.10. da Cu-Al-Co alaşım sisteminin 1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. şekil 4.7 de iki tane arasında farklı tipte martensit plakalara rastlanmıştır. Açık renkli tanelerde paralel martensit plakalar görülürken, koyu renkli bölgede ise V tipi ve mızrak tipi martensit plakalar görölmektedir (Ma ve ark., 2003) Ayrıca açık renkli bölgede paralel martensit plakalar arasında kayma bantlarına rastlanmıştır. Bu kayma bantlarının oluşmasının sebebi, alaşımın hızlı soğutulması esnasında meydana gelen sıcaklık farkı nedeniyle martensit plakalarda meydana gelen belirgin değişikliklerdir. Koyu renkli bölgede ise mızrak tipi martensit plakalar açıkça görölmektedir. şekil 4.7.b sol taraftaki ve sağ taraftaki açık ve koyu bölgenin oluşmasının sebebi martensit plakaların yöneliminin farklı olmasıdır. Her 4 alaşım için çökeltilere rastlanmış ancak F1 ve F2 çok net gözlenememiştir. F3 ve F4 alaşımlarında kobalt miktarının artmasıyla çökeltilerin büyüklüğü artmıştır ve fark edilebilir hale gelmiştir. Bu çökelti kobalt elementinden kaynaklanmıştır.



(a)

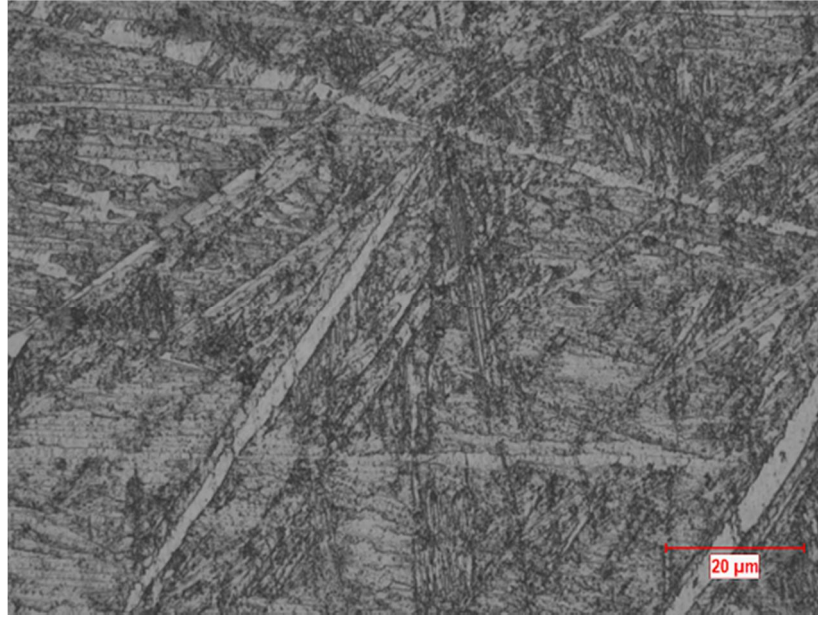


(b)

**Şekil 4.7.** F1 alaşımlarının a)100 büyütmede ve b)1000 büyütmede optik mikroskop görüntüleri



(a)

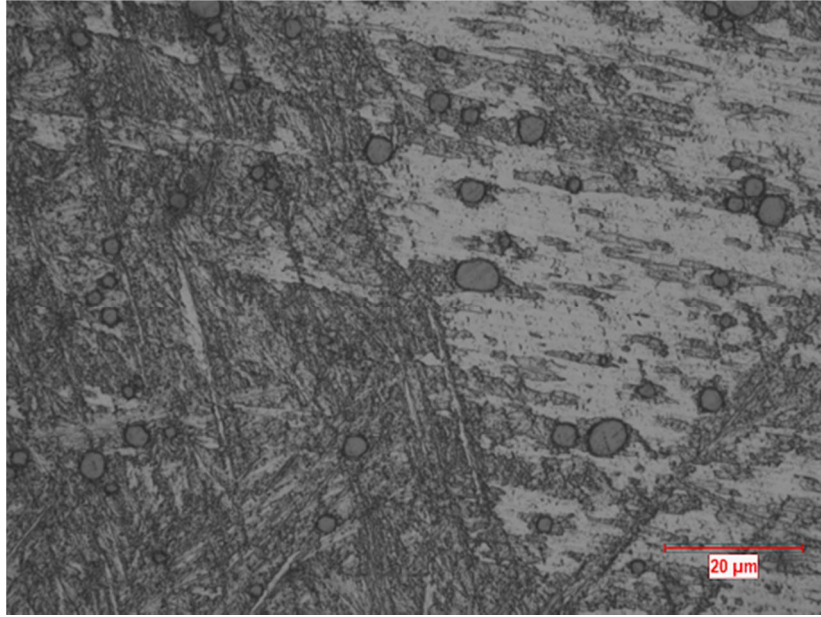


(b)

**Şekil 4.8.** F2 alaşımlının a)100 büyütmede ve b)1000 büyütmede optik mikroskop görüntüleri

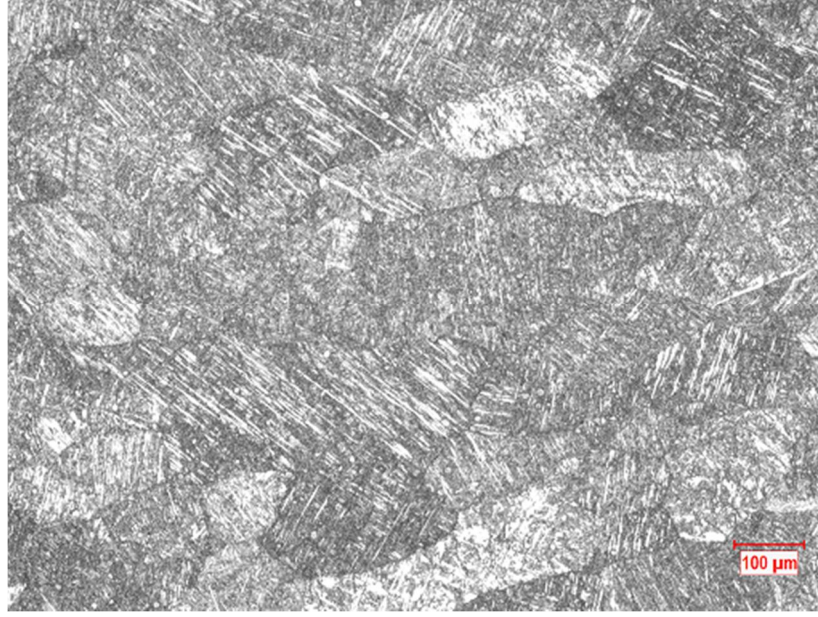


(a)

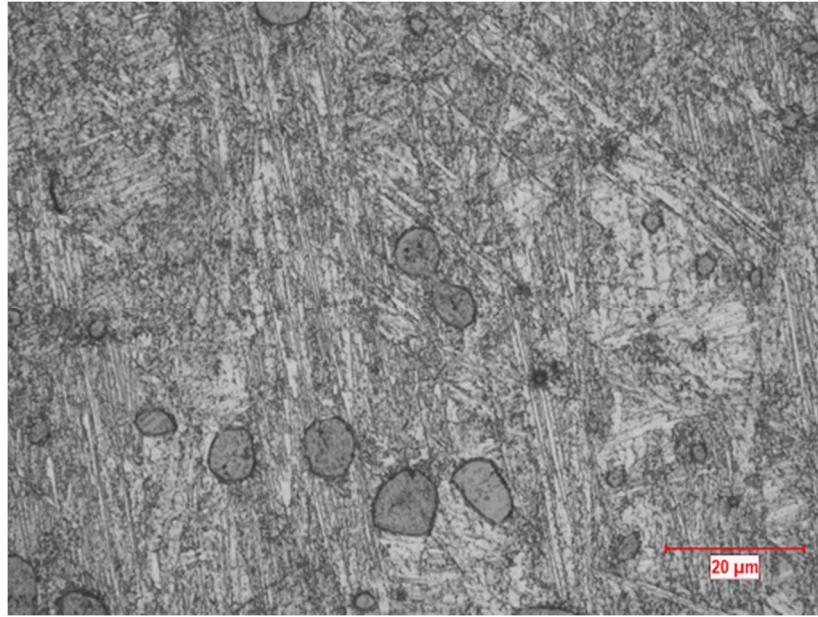


(b)

**Şekil 4.9.** F3 alaşımlının a)100 büyütmede ve b)1000 büyütmede optik mikroskop görüntüleri



(a)



(b)

**Şekil 4.10.** F4 alaşımlarının a)100 büyütmede ve b)1000 büyütmede optik mikroskop görüntüleri

#### **4.2.1. Mikrosertlik Ölçümü**

Termoelastik martensit dönüşüm gösteren bakır bazlı alaşımlar, demir bazlı alaşımlara göre genellikle daha az serttirler. Dislokasyonların oluşması, örgü distorsiyonunun ve ara yer atomlarının etkisiyle bu alaşımların sertliklerinde önemli bir değişiklik ortaya çıkar. Bu çalışmada Cu-Al-Co alaşım sisteminde Kobalt katkısının sertliğe etkisi incelenmiştir. Mikro

sertlik ölçümleri için optik mikroskop için hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Numuneler üzerinde Vickers sertlik ölçümleri yapıldı. Bu çalışmada Cu-Al-Co alaşım siteminde mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri için optik mikroskop için hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Numuneler üzerinde Vickers sertlik ölçümleri yapıldı. Her numuneden bir ölçme anında 3 ölçüm yapılmış bu sonuçlar Tablo 4.2 da verilmiştir. Tablo ya göre en düşük mikrosertlik değeri Co oranını düşük olduğu F1 alaşımında görülmektedir. F1 alaşımın sertlik ölçümleri alınırken hem koyu bölgenin hem açık bölgenin sertlik değerleri alınmıştır. Bu değerlerin hemen hemen aynı çıkması, iki farklı tanede aynı fazın olduğunu ve renk farkının sebebinin martensit plakaların yöneliminden olduğunu gösterir. Ayrıca çok az miktarda da olsa çökeltilere rastlanmıştır ancak bu çökeltiler çok küçük olduğu için mikrosertlik ölçümleri yapılamamıştır. F2 alaşımında da farklı bölgelerde sertlik değeri alınmış ve her bir bölge için sertlik değerinin aynı çıktığı bulunmuştur. F1 alaşımı gibi az da olsa çökeltilere rastlanmış ancak çok küçük olduğu için mikro sertlik ölçümü alınamamıştır. F1 alaşımına göre sertlik değeri artmıştır. F3 ve F4 alaşımlarında martensit bölgedeki ve çökeltilerdeki mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve çökeltideki sertlik değerlerinin yüksek çıktığı bulunmuştur. Ortalama sertlik değerleri hesaplanırken çökelti değerleri de eklenirse F4 alaşımının mikrosertlik değerinin F1, F2 ve F3 e göre çok yüksektir. Buradan Kobalt katkısı ile mikrosertlik değerinin arttığı sonucuna varılabilir. Bu sonuç literatürle uyum içindedir. Kobalt elementi 3d geçiş metalidir ve kobalt elementi mukavemeti artırmak için Cu bazlı şekil hatırlamalı alaşımlara katılmıştır (Funakubo,1987).

**Tablo 4.2.** Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşım sisteminde kompozisyona göre mikro sertliğin değişimi.

|    | <b>1. ölçüm<br/>(Hv)</b> | <b>2. ölçüm<br/>(Hv)</b> | <b>3. ölçüm<br/>(Hv)</b> | <b>Ortalama<br/>(Hv)</b> | <b>Çökelti (Hv)</b> |
|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| F1 | 223                      | 218                      | 218                      | 219,7                    | -----               |
| F2 | 306                      | 298                      | 315                      | 306,3                    | -----               |
| F3 | 270                      | 287                      | 289                      | 282,0                    | 485                 |
| F4 | 293                      | 295                      | 298                      | 295,3                    | 734                 |

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Kobalt katkısının Cu-Al-Co şekil hatırlamalı alaşımı üzerine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

a) Dört farklı kobalt oranı ile Cu-Al-Co alaşımının kristal yapı analizi sonuçlarına göre, Bütün alaşımlarda 18R martensit faza ait karakteristik pikler gözlenmiştir. Bu alaşımlarda, amorf bölgelerin olduğu x ışının difraktogramında net bir şekilde görülmüştür. Bunun sebebinin Kobalttan kaynaklanan çökeltiler olduğu düşünülmüştür.

b) Cu-Al-Co alaşım sisteminde, dönüşüm sıcaklıklarındaki değişim incelenirse, bütün alaşımların dönüşüm sıcaklığının 250 °C nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu da bize Cu-Al-Co alaşımlarının yüksek sıcaklık şekil hatırlama etkisi sergilediğini gösterir. Kobalt katkısıyla dönüşüm sıcaklıklarında düzgün bir artış veya azalış gözlenmemiştir. Bunun sebebinin, kobalt elementi ile birlikte kompozisyondaki diğer elementlerinden değişmesi olarak açıklanabilir.

c) Alaşım sisteminin mikro yapısı incelendiğinde, martensit yapı ile çökeltilere rastlanmıştır. Kobalt oranının artmasıyla çökeltilerin büyüklüğünde gözle görülür bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca dört alaşım grubunun mikro sertlikleri ölçülmüş ve çökeltilerin artmasıyla genel mikro sertlik değerinde artış görülmüştür.

## KAYNAKLAR

1. **Aydoğdu A**, 1995, Şekil Hatırlamalı Cu-Al-Ni Alaşımlarındaki Martensitik Dönüşümler Üzerinde Termal Yaşlandırma Etkileri. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
2. **Baksan B. Ve Gurler R.**, 2006, Bakır Esaslı Sekil Bellekli Alaşımların Üretimi ve Çekme Deneyi ile Karakterizasyonu, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü dergisi, 10,. Cilt.
3. **Chung CY, Chernenko VA, Khovailo VV, Pons J, Cesari E, Takagi T**, 2004, Thin films of ferromagnetic shape memory alloys processed by laser beam ablation. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 378, 443-447
4. **Clapp P.C**, 1995. How Would We Recognize a Martensitic Transformation is It Bumped into us on a Dark and Austy Night?, J. De Phys. III 5 (C8) 11- 19
5. **Çakmak S**, 1992. Bakır Bazlı Alaşımlarda Martensit Varyantların Grup Kombinasyonları. Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
6. **Delaey, L., Krishnan, R.V., TAS, H. and Warlimont, H.**, 1974, Thermoelasticity, Pseudoelasticity and the Memory Effects Associated with Martensitic Transformations. Part 1, Journal of Materials Science 9, 1521-1535.
7. **Funakuboh**, 1987, Shape Memory Alloys, (Japoncadan İngilizceye çeviri), J.b.Kennedy, Gordon and Breach Science Publishers, London.
8. **Guy G.A**, 1963, The Materials Information Society, U.S.A.
9. **Kayalı N.**, 1993. Cu-Zn-Al Alaşımlarında Martensit Stabilizasyonu ve Yaşlandırma Etkileri. Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
10. **Kök M**, 2011, Ni-Mn-Ga Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımının Fiziksel Özellikleri Üzerine Alaşım Oranı ve Isıl İşlem Etkisinin İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ
11. **Machodo L.G. ve Savi M.A.**, 2003, Medical Application of Shape Memory Alloys, Brazilian Journals of Medical and Biological Research, 36, 683-691
12. **Ortin, J. and Planes, A.**, 1988, Thermodynamic Analysis of Thermal Measurements in Thermoelastic Martensitic Transformation. Acta Metal., 36, 8, 1873-1889.
13. **Otsuka K, Kakeshita T**, 2002, Science and technology of shape-memory alloys. New developments. Mrs Bulletin, 27, 91-100
14. **Schetky L.M**, 1980, Shape Memory Alloys, Scientific American, 68-76
15. **Smith W, Hashemi J**, 2006, Foundations of Materials Science and Engineering Foundations of Materials Science and Engineering, Texas Tech University
16. **Smith W, Hashemi J**, 2006, Foundations of Materials Science and Engineering Foundations of Materials Science and Engineering, Texas Tech University
17. **Stoeckel D, Pelton A, Duerig T**, 2004, Self-expanding nitinol stents: material and design considerations. European Radiology, 14, 292-301
18. **Sarı U., Aksoy I.**, (2006). Electron microscopy study of 2H and 18R martensites in Cu– 11.92 wt%Al–3.78 wt% Ni shape memory alloy, Journal of Alloys and Compounds 417, 138–142.
19. **Zengin R**, 2002, Bakır Bazlı Alaşımların Basınç ve Radyasyon Etkisi Altında Şekil Hatırlama Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

## ÖZGEÇMİŞ

### **Kişisel Bilgiler:**

Doğum Tarihi : 1983  
Doğum Yeri : ELAZIĞ  
Uyruğu : T.C.  
Medeni Hali : Evli

### **Eğitim:**

**İlköğretim** : (1995)

Elazığ Selçuklular İlkokulu

**Ortaöğretim** : ( 1998 )

Elazığ Mezre Orta Okulu

**Lise** : ( 2001 )

Elazığ Mehmet Akif Ersoy Lisesi

**Lisans** : ( 2009 )

Uludağ Üniversitesi, Fen ve Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü(Bursa)