

**CoAl ESASLI FERROMANYETİK ŞEKİL HATIRLAMALI  
ALAŞIMLARIN ÜRETİMİ VE  
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Türkan MALKOÇ  
Doktora Tezi  
Fizik Anabilim Dalı  
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN  
MAYIS-2014**

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

**CoAl ESASLI FERROMANYETİK ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLARIN  
ÜRETİMİ VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Türkan MALKOÇ**

**( 01214201 )**

**Anabilim Dalı: Fizik**

**Programı: Katıhal Fiziği**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 24 Nisan 2014**

**MAYIS-2014**

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

**CoAl ESASLI FERROMANYETİK ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLARIN**  
**ÜRETİMİ VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Türkan MALKOÇ**

**( 01214201 )**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 24 Nisan 2014**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 16 Mayıs 2014**

**Tez Danışmanı :** Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN (F.Ü)

**Diğer Jüri Üyeleri :** Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU (F.Ü)

Prof. Dr. Raşit ZENGİN (F.Ü)

Prof. Dr. Mehmet CEYLAN (F.Ü)

Prof. Dr. Mehmet Ali AKSAN (İ.Ü)

**MAYIS-2014**

T. C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

**CoAl ESASLI FERROMANYETİK ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLARIN  
ÜRETİMİ VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN  
Danışman

Türkan MALKOÇ  
Doktora Öğrencisi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ (FÜBAP) KOORDİNASYON BİRİMİ  
FÜBAP FF.13.05 NOLU PROJE  
DOKTORA TEZİ PROJESİ SON RAPORU

ELAZIĞ - 2014

## ÖNSÖZ

Doktora tez konusunun belirlenmesinde, projenin hazırlanması ve malzeme temininin de, çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN' e, ayrıca yine çalışmalarımın her aşamasında yanımda olan; bilgi, tecrübe, öneri olmak üzere maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Arş. Gör. Dr. Mediha KÖK' e her türlü yardımından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bana her zaman güvenen ve destek olan, özel hayatımdaki sorumluluklarımı hafifleten annem Elif GÖKHAN, ablam Vesile GÖKHAN ve abim H. Bayram GÖKHAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Sabırla işlerimin bitmesini bekleyen her türlü desteklerini esirgemeyen eşim Soner MALKOÇ' a, biricik kızım Elif Sude MALKOÇ' a ve biricik oğlum Yiğit MALKOÇ' a anlayış ve varlıklarından dolayı teşekkür ederim.

Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi FÜBAP tarafından **FF.13.05** nolu proje olarak desteklenmiştir. Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi FÜBAP' a teşekkürlerimi sunarım.

**TÜRKAN MALKOÇ**  
**ELAZIĞ-2014**

## İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| ÖNSÖZ .....                                                      | I   |
| İÇİNDEKİLER .....                                                | II  |
| ÖZET .....                                                       | IV  |
| SUMMARY .....                                                    | V   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                           | VI  |
| TABLolar LİSTESİ .....                                           | X   |
| KISALTMALAR LİSTESİ .....                                        | XI  |
| SEMBOLLER LİSTESİ .....                                          | XII |
| 1. GİRİŞ.....                                                    | 1   |
| 2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR .....                             | 7   |
| 2.1. Martensitik Dönüşüm .....                                   | 8   |
| 2.2. Termoelastik Martensitik Dönüşümler .....                   | 9   |
| 2.3. Martensitik Dönüşümün Termodinamiği.....                    | 10  |
| 2.4. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Genel Karakteristikleri ..... | 12  |
| 2.4.1. Şekil Hatırlama Etkisi .....                              | 12  |
| 2.4.1.1. Tek Yönlü Şekil Hatırlama .....                         | 14  |
| 2.4.1.2. Çift Yönlü Şekil Hatırlama .....                        | 15  |
| 2.4.2. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kullanım Alanları .....     | 16  |
| 3. MANYETİK MALZEMELER .....                                     | 21  |
| 3.1. Manyetik Dipoller .....                                     | 21  |
| 3.2. Manyetizma Türleri .....                                    | 22  |
| 3.2.1. Diamanyetizma .....                                       | 23  |
| 3.2.2. Paramanyetizma .....                                      | 24  |
| 3.2.3. Ferromanyetizma .....                                     | 25  |
| 3.2.4. Antiferromanyetizma .....                                 | 26  |
| 3.2.5. Ferrimanyetizma .....                                     | 27  |
| 3.3. Curie Sıcaklığı .....                                       | 28  |
| 3.4. Manyetik Histerisiz (M-H) Eğrisi .....                      | 29  |

|           |                                                                   |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.</b> | <b>FERROMANYETİK ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR (FSMA)</b>           | <b>31</b>  |
| 4.1.      | Ferromanyetik Şekil Hatırlama Etkisi Gösteren Alaşımlar .....     | 32         |
| 4.2.      | Ferromanyetik Düzen ve Geçiş Metallerinin Ferromanyetizması ..... | 33         |
| <b>5.</b> | <b>MATERYAL VE METOD .....</b>                                    | <b>36</b>  |
| 5.1.      | Numune Hazırlama .....                                            | 36         |
| 5.2.      | Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) - EDX Analizi.....             | 37         |
| 5.3.      | Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçümü.....               | 38         |
| 5.4.      | X - Işını Analizi (XRD).....                                      | 39         |
| 5.5.      | Optik Mikroskop İncelemesi ve Vickers Sertlik Ölçümleri .....     | 40         |
| 5.6.      | TG / DTA ile Curie Sıcaklığının ( $T_c$ ) Belirlenmesi .....      | 42         |
| 5.7.      | Manyetik Ölçümler .....                                           | 43         |
| <b>6.</b> | <b>BULGULAR .....</b>                                             | <b>45</b>  |
| 6.1.      | SEM - EDX Analizi Sonuçları .....                                 | 45         |
| 6.2.      | Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçüm Sonuçları .....     | 53         |
| 6.3.      | X - Işını Kırınımı (XRD) Ölçüm Sonuçları .....                    | 60         |
| 6.4.      | Optik Mikroskop ve Vickers Sertlik Ölçümleri.....                 | 63         |
| 6.5.      | TG / DTA ile Curie Sıcaklığı ( $T_c$ ) Ölçümleri .....            | 74         |
| 6.6.      | Manyetik Ölçüm Sonuçları .....                                    | 78         |
| <b>7.</b> | <b>SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>                                 | <b>84</b>  |
| <b>8.</b> | <b>İLERİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER.....</b>                        | <b>88</b>  |
|           | <b>KAYNAKLAR.....</b>                                             | <b>89</b>  |
|           | <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                              | <b>101</b> |

## ÖZET

Bu çalışmada, CoAl bazlı iki farklı Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşım grubu  $\text{Co}_{86-x}\text{Al}_{14}\text{Cr}_x$  ( $x = 0$  ve 4 atomikçe) ve  $\text{Co}_{35}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{40-y}\text{Cr}_y$  ( $y = 0$  ve 4 atomikçe) Arc Melter’ da vakum altında üretildi. Alaşımların homojenliğini arttırmak için birkaç kez eritme işlemi uygulandı.

Bütün alaşımlara 1200 °C’ de 24 saat ısıtma işlemi uygulandı. Alaşımların dönüşüm sıcaklığı, entalpi değişimi, entropi değişimi ve Curie sıcaklığı gibi termal özellikleri DSC (Diferansiyel Tarama Kalorimetresi) ve TG/DTA (Termogravimetrik Analiz) cihazları kullanılarak belirlendi. X-ışını difraksiyon deseni, optik görüntüleri ve Vickers sertlik ölçümleri kristal yapı ve yüzey morfolojisini belirlemek için kullanıldı. Ayrıca alaşımların manyetizasyon ölçümleri oda sıcaklığında PPMS (Fiziksel Özellik Ölçüm Sistemi) kullanılarak yapıldı.

Termal ölçümler sonucunda, ilk alaşım grubu olan  $\text{Co}_{86}\text{Al}_{14}$  ve  $\text{Co}_{82}\text{Al}_{14}\text{Cr}_4$  alaşımları yüksek sıcaklık şekil hatırlama özelliği gösterdiler. Co-Al alaşımının dönüşüm sıcaklığı Cr katkısı ile arttı. Aksine Cr katkısı ile entalpi değişimi ve entropi değişimi azaldı. Her iki alaşımın x- ışını difraksiyon deseninde  $\epsilon$  ve  $\gamma$  faz gözlemlendi. Aynı zamanda Co-Al alaşımının piklerinin şiddeti Cr katkısı ile azaldı. Optik görüntülerde  $\epsilon$  ve  $\gamma$  faz bölgeleri yine görüldü ve  $\epsilon$  faz bölgeleri Cr katkısı ile azaldı. Cr’ un katkısıyla Co-Al alaşımının Vickers sertlik değeri arttı. Son olarak Cr katkısı Co-Al alaşımının manyetizasyon doyumunu ve Curie sıcaklığını azalttı.

Co-Al alaşımının aksine,  $\text{Co}_{35}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{40}$  ve  $\text{Co}_{35}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{36}\text{Cr}_4$  şeklinde ikinci grup alaşımların dönüşüm sıcaklıklarının Cr katkısı ile azaldığı görüldü. Alaşımların x-ışını difraksiyon deseninden  $\gamma$  ve  $\beta$  faz olarak adlandırılan iki faz görüldü. Co-Al-Ni-Cr alaşımının piklerinin şiddetinin Co-Al-Ni alaşımına göre düştüğü ve yayvanlaştığı görüldü. Birinci gruptan farklı olarak optik resimlerde, dendrit yapı görüldü. Cr ile Co-Al-Ni alaşımının Vickers sertlik değeri artarken, manyetik doyum ve Curie sıcaklığı değeri azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Co-bazlı Şekil Hatırlamalı Alaşımlar, Curie sıcaklığı, Martensitik Dönüşüm, Ferromanyetik Şekil Hatırlama Olayı.



## SUMMARY

### **Production of CoAl Based Ferromagnetic Shape Memory Alloys and Investigation of Their Physical Properties**

In this study, Co-based two different Ferromagnetic Shape Memory alloys group as  $\text{Co}_{86-x}\text{Al}_{14}\text{Cr}_x$  ( $x = 0$  and  $4$  by atomic percentage) and  $\text{Co}_{35}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{40-y}\text{Cr}_y$  ( $y = 0$  and  $4$  by atomic percentage) were produced in Arc Melter under vacuum. Re-melting was applied for a few times so as to increase the homogeneity of alloys.

All the produced alloys were heat treated at  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 24 hour. Thermal properties of alloys such as transformation temperatures, enthalpy changes, entropy changes and Curie temperatures were determined by using DSC (Differential Scanning Calorimetry) and TG/DTA (Thermogravimetric Analyzer) instruments. XRD diffraction patterns, optical images and Vickers hardness measurements were performed to identify crystal structure and surface morphology. Additionally, the magnetization properties of alloys were measured by using PPMS (Physical Properties Measurement System) at room temperature.

As a result of thermal measurements, first group of alloys as  $\text{Co}_{86}\text{Al}_{14}$  and  $\text{Co}_{82}\text{Al}_{14}\text{Cr}_4$  indicated high temperature shape memory property. The transformation temperature of the CoAl alloy increased with adding the Cr element. On the other hand, the enthalpy change and entropy change decreased by addition of Cr.  $\epsilon$  and  $\gamma$  phase were seen in XRD patterns in both of alloys. At the same time, peak intensities of the CoAl alloy were decreased the Cr addition.  $\epsilon$  and  $\gamma$  phase were also seen In the optical images, it was found that the  $\epsilon$  phase region was diminished. Vickers hardness value of CoAl alloy was increased by addition of Cr. Finally, the Cr addition lead to a decrease in magnetization saturation and Curie temperature of CoAl alloy.

Transformation temperatures of second group alloys as (  $\text{Co}_{35}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{40}$  and  $\text{Co}_{35}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{36}\text{Cr}_4$  ) decreased by addition of Cr. Two phases,  $\gamma$  and  $\beta$  were seen in XRD diffraction patterns of alloys. In CoAlNiCr, the intensities of these phase decreased and became broader than that of CoAlNi alloy. In the second group of alloys, dendrite type structure was seen in the optical image. While Vickers hardness of CoAlNi alloy increased, magnetization saturation and Curie temperature of CoAlNi alloys decreased with increasing the Cr content in the samples.

**Key Words:** Co-based Shape Memory Alloys, Curie Temperature, Martensitic Transformation, Ferromagnetic Shape Memory Effect.

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.1.</b> Ana ve Martensit fazın kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklık ve martensit dönüşümle ilişkisi (Funakubo, 1987).....                                                                                                                                                                                                  | 10 |
| <b>Şekil 2.2.</b> Şekil Hatırlamalı alaşımların farklı fazları (Darjan, 2007).....                                                                                                                                                                                                                                                      | 13 |
| <b>Şekil 2.3.</b> Tek yönlü şekil hatırlama olayının şematik gösterimi. ....                                                                                                                                                                                                                                                            | 15 |
| <b>Şekil 2.4.</b> Çift yönlü şekil hatırlama olayı .....                                                                                                                                                                                                                                                                                | 16 |
| <b>Şekil 2.5.</b> Çeşitli Aktüatörlerin Güç/Ağırlık Performansları (Huang,1998).....                                                                                                                                                                                                                                                    | 18 |
| <b>Şekil 2.6.</b> 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 (Otsuka ve Kakeshita, 2002)..... | 18 |
| <b>Şekil 2.7.</b> Damarlardaki Kan Pıhtısının Tutulması için SMA' dan Yapılmış Filtre (Auricchio vd., 2000).....                                                                                                                                                                                                                        | 19 |
| <b>Şekil 2.8.</b> Damarlardaki tıkanma sorunlarının çözümü için SMA' dan yapılmış stent (Auricchio, 2002; Auricchio vd., 2000).....                                                                                                                                                                                                     | 19 |
| <b>Şekil 2.9.</b> Ortodontik Düzeltme İşlevli Kavisli Tellerin Dişlerde Kullanılarak Üç Haftada Alınan Sonuçları (Auricchio vd., 2000).....                                                                                                                                                                                             | 20 |
| <b>Şekil 3.1.</b> Manyetik davranış çeşitleri (Erdoğan, 2001).....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 22 |
| <b>Şekil 3.2.</b> Manyetik dipollerin yönü (Yener, 2007).....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 23 |
| <b>Şekil 3.3.</b> Manyetik malzemelerin periyodik tablodaki yerleri. ....                                                                                                                                                                                                                                                               | 25 |
| <b>Şekil 3.4.</b> Antiferromanyetik bir malzemenin dışa yansıyan mıknatıslanması ve alınganlığa karşı sıcaklığının şematik gösterimi.....                                                                                                                                                                                               | 27 |
| <b>Şekil 3.5.</b> Ferrimanyetik bir malzemenin birim hücresi.....                                                                                                                                                                                                                                                                       | 28 |
| <b>Şekil 3.6.</b> Manyetik histerisiz (M-H) eğrisi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 29 |

|                                                                                                                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Şekil 3.7. (a) Sert mıknatıslık özelliklerine sahip malzemenin (b) Yumuşak mıknatıslık özelliklerine sahip malzemenin histerisiz eğrisi (Göktaş, 2007).....</b>                            | <b>30</b> |
| <b>Şekil 4.1. Ferromanyetik şekil hatırlama etkisi (Işık, 2007) .....</b>                                                                                                                     | <b>31</b> |
| <b>Şekil 4.2. Ferromanyetik şekil hatırlama alaşımlarından elde edilen sıcaklık kontrollü sensörlerin çalışma mekanizması.....</b>                                                            | <b>31</b> |
| <b>Şekil 4.3. Üç çeşit FSMA davranışının faz diyagramının şematik gösterimi (Heill, 2005).....</b>                                                                                            | <b>32</b> |
| <b>Şekil 4.4. Bakırın 3d ve 4s enerji bantlarının yapısı, enerjileri ve Fermi düzeyinin konumu.....</b>                                                                                       | <b>34</b> |
| <b>Şekil 4.5. Nikelin mutlak sıfır sıcaklığındaki bant yapısı (Gündüz, 1992) .....</b>                                                                                                        | <b>34</b> |
| <b>Şekil 4.6. Nikelin Curie sıcaklığı (<math>T \cong 631</math> K) üzerindeki bant yapısı. Net manyetik momentin sıfır olması nedeniyle madde ferromanyetik özelliğini yitirmektedir.....</b> | <b>35</b> |
| <b>Şekil 5.1. Ark yöntemi ile eritme sistemi (Arc- Melter).....</b>                                                                                                                           | <b>37</b> |
| <b>Şekil 5.2. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ölçüm cihazı.....</b>                                                                                                                   | <b>39</b> |
| <b>Şekil 5.3. X-ışını Kırınım (XRD) cihazı.....</b>                                                                                                                                           | <b>40</b> |
| <b>Şekil 5.4. Vickers sertlik ölçümünün şematik olarak gösterilmesi (URL-1, Mart 2014).....</b>                                                                                               | <b>41</b> |
| <b>Şekil 5.5. Bu çalışmada kullanılan Optik mikroskop.....</b>                                                                                                                                | <b>41</b> |
| <b>Şekil 5.6. Yüksek Sıcaklık Diferansiyel Termal Analiz (TG / DTA) cihazı.....</b>                                                                                                           | <b>42</b> |
| <b>Şekil 6.1. Co-Al alaşımının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü ....</b>                                                                                                          | <b>46</b> |
| <b>Şekil 6.2 Co-Al alaşımının EDX spektrum görüntüsü .....</b>                                                                                                                                | <b>46</b> |
| <b>Şekil 6.3. Co-Al-Cr alaşımının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü</b>                                                                                                            | <b>48</b> |

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6.4.</b> Co-Al-Cr alaşımasının EDX spektrum görüntüsü.....                                                                   | 48 |
| <b>Şekil 6.5.</b> Co-Al-Ni alaşımasının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü                                                  | 50 |
| <b>Şekil 6.6..</b> Co-Al-Ni alaşımasının EDX spektrum görüntüsü.....                                                                  | 50 |
| <b>Şekil 6.7.</b> Co-Al-Ni-Cr alaşımasının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü.....                                          | 51 |
| <b>Şekil 6.8.</b> Co-Al-Ni-Cr alaşımasının EDX spektrum görüntüsü.....                                                                | 52 |
| <b>Şekil 6.9.</b> Co-Al alaşımına ait 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrisi.....                                                           | 54 |
| <b>Şekil 6.10.</b> Co-Al-Cr alaşımına ait 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrisi.....                                                       | 54 |
| <b>Şekil 6.11.</b> Co-Al ve Co-Al-Cr alaşımlarının 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrilerinin karşılaştırılması.....                       | 55 |
| <b>Şekil 6.12.</b> Co-Al-Ni alaşımına ait 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrisi.....                                                       | 56 |
| <b>Şekil 6.13.</b> Co-Al-Ni-Cr alaşımına ait 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrisi.....                                                    | 56 |
| <b>Şekil 6.14.</b> Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrilerinin karşılaştırılması.....                 | 57 |
| <b>Şekil 6.15.</b> Co-Al ve Co-Al-Cr alaşımlarına ait x-ışını difraktogramlarının karşılaştırılması.....                              | 61 |
| <b>Şekil 6.16.</b> Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımlarına ait x-ışını difraktogramlarının karşılaştırılması.....                        | 62 |
| <b>Şekil 6.17.</b> Co-Al alaşımasının a) 200 büyütmeli, b) 500 büyütmeli, c) 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü.....            | 64 |
| <b>Şekil 6.18.</b> Co-Al-Cr alaşımasının a) 200 büyütmeli, b) 500 büyütmeli, c) 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü.....         | 67 |
| <b>Şekil 6.19.</b> Co <sub>37,5</sub> Ni <sub>37,5</sub> Al <sub>25</sub> alaşımasının Optik mikroskop görüntüsü (Maziarz, 2008)..... | 68 |
| <b>Şekil 6.20.</b> Co-Al-Ni alaşımasının a) 200 büyütmeli, b) 500 büyütmeli, c) 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü.....         | 70 |

|                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 6.21.</b> Co-Al-Ni-Cr alaşımasının a) 200 büyütmeli, b) 500 büyütmeli, c) 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü.....                                                                            | 72 |
| <b>Şekil 6.22.</b> $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{40}\text{Al}_{25}$ alaışının döküm, tavlama ve sıcak haddeleme sonrası $\text{HV}_{10}$ ' a göre sertlik ölçümlerinin grafiksel gösterimi (Maziarz, 2008)..... | 73 |
| <b>Şekil 6.23.</b> Alaşımların $\text{HV}_{0,1}$ ' e göre sertlik ölçümlerinin grafiksel gösterimi.....                                                                                                     | 74 |
| <b>Şekil 6.24.</b> Co-Al ve Co-Al-Cr alaşımlarının 100-800 °C aralığında manyetik alan altında kütle değişim eğrisi.....                                                                                    | 75 |
| <b>Şekil 6.25.</b> Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının 100-800 °C aralığında manyetik alan altında kütle değişim eğrisi.....                                                                              | 75 |
| <b>Şekil 6.26.</b> Co-Al için faz diyagramı (Niitsu vd., 2011; Omori vd., 2005).....                                                                                                                        | 77 |
| <b>Şekil 6.27.</b> Co-Al alaışının oda sıcaklığındaki M-H eğrisi.....                                                                                                                                       | 79 |
| <b>Şekil 6.28.</b> Co-Al-Cr alaışının oda sıcaklığındaki M-H eğrisi.....                                                                                                                                    | 79 |
| <b>Şekil 6.29.</b> Co-Al ve Co-Al-Cr alaşımlarının oda sıcaklığındaki M-H eğrilerinin karşılaştırılması.....                                                                                                | 80 |
| <b>Şekil 6.30.</b> Co-Al-Ni alaışının oda sıcaklığındaki M-H eğrisi.....                                                                                                                                    | 81 |
| <b>Şekil 6.31.</b> Co-Al-Ni-Cr alaışının oda sıcaklığındaki M-H eğrisi.....                                                                                                                                 | 81 |
| <b>Şekil 6.32.</b> Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının oda sıcaklığındaki M-H eğrilerinin karşılaştırılması.....                                                                                          | 82 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 5.1.</b> Hazırlanan toz numunelerin Atomik Yüzde (%at), Ağırlık Yüzde (%wt) ve Elektron konsantrasyonu (e/a) değerleri.....    | 37 |
| <b>Tablo 6.1.</b> EDX ölçümlerinden elde edilen Atomik Yüzde (%at), Ağırlık Yüzde (%wt) ve Elektron konsantrasyonu (e/a) değerleri..... | 45 |
| <b>Tablo 6.2.</b> Co-Al alaşımı için hazırlanan alaşım oranları ile EDX alaşım oranlarının karşılaştırılması.....                       | 47 |
| <b>Tablo 6.3.</b> Co-Al-Cr alaşımı için hazırlanan alaşım oranları ile EDX alaşım oranlarının karşılaştırılması.....                    | 49 |
| <b>Tablo 6.4.</b> Co-Al-Ni alaşımı için hazırlanan alaşım oranları ile EDX alaşım oranlarının karşılaştırılması.....                    | 51 |
| <b>Tablo 6.5.</b> Co-Al-Ni-Cr alaşımı için hazırlanan alaşım oranları ile EDX alaşım oranlarının karşılaştırılması.....                 | 52 |
| <b>Tablo 6.6.</b> Alaşımların dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametreleri.....                                                   | 58 |
| <b>Tablo 6.7.</b> Alaşımların austenit ve martensit bitiş sıcaklıkları ile dönüşüm sıcaklık aralıkları (TTR).....                       | 59 |
| <b>Tablo 6.8.</b> Alaşımların austenit ve martensit başlama sıcaklıkları ile $A_s$ - $M_s$ sıcaklık farkı.....                          | 60 |
| <b>Tablo 6.9.</b> Alaşımların $HV_{0,1}$ ' e göre Vickers sertlik değerleri.....                                                        | 72 |
| <b>Tablo 6.10.</b> TG/DTA yöntemi ile elde edilen Curie sıcaklıkları.....                                                               | 76 |
| <b>Tablo 6.11.</b> Numunelerin Saturasyon ( $M_s$ ), Remenans ( $M_r$ ) ve Koersivite ( $H_c$ ) değerleri. ....                         | 82 |

## KISALTMALAR LİSTESİ

|         |                                                                         |
|---------|-------------------------------------------------------------------------|
| FSMA    | : Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımlar                             |
| DSC     | : Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (Differential Scanning Calorimetry) |
| TG/DTA  | : Termal Gravimetri ve Diferansiyel Termal Analiz Cihazı                |
| SEM     | : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)           |
| PPMS    | : Fiziksel Özellik Ölçüm Sistemi (Physical Property Measurement System) |
| a.u.    | : Keyfi Birim                                                           |
| SMA     | : Şekil Hatırlamalı Alaşım                                              |
| NiTiNOL | : Nikel-Titanyum Naval Ordnance Laboratuvarı                            |
| EMC     | : Elektromanyetik Uyum                                                  |
| EMI     | : Elektromanyetik Girişim                                               |
| Edte    | : Elektronlar arasındaki değiş-tokuş enerjisi                           |
| XRD     | : X- ışını Kırınım Cihazı                                               |
| EDX     | : Energy Dispersive X-ray spectroscopy                                  |
| TTR     | : Dönüşüm Sıcaklık Aralığı (Temperature Transformation Region)          |

## SEMBOLLER LİSTESİ

|            |                                        |
|------------|----------------------------------------|
| $A_s$      | : Austenit başlama sıcaklığı           |
| $A_f$      | : Austenit bitiş sıcaklığı             |
| $M_s$      | : Martensit başlama sıcaklığı          |
| $M_f$      | : Martensit bitiş sıcaklığı            |
| $M$        | : Mıknatıslanma                        |
| $H$        | : Dış manyetik alan                    |
| $C$        | : Curie sabiti                         |
| $T_c$      | : Curie sıcaklığı                      |
| $T_o$      | : Denge sıcaklığı                      |
| $e/a$      | : Elektron konsantrasyonu              |
| $\Delta S$ | : Entropi değişimi                     |
| $\Delta H$ | : Entalpi değişimi                     |
| $\Delta E$ | : Enerji değişimi                      |
| $\Delta Q$ | : Isı enerjisi değişimi                |
| $F_E$      | : Fermi Enerjisi                       |
| $P$        | : Basınç                               |
| $V$        | : Hacim                                |
| $\lambda$  | : Dalgaboyu                            |
| $\chi$     | : Manyetik duyarlılık (Susceptibility) |
| $M_s$      | : Doyum Mıknatıslanması (Saturasyon)   |
| $M_r$      | : Kalıcı Mıknatıslanma (Remenans)      |
| $H_c$      | : Zorlayıcı alan (Koerzivite)          |
| $Co$       | : Kobalt                               |
| $Al$       | : Alüminyum                            |
| $Ni$       | : Nikel                                |
| $Cr$       | : Krom                                 |



## 1. GİRİŞ

Malzeme biliminde uygun bir ısı prosedür ile gerçek şekline veya boyutuna geri dönebilme yeteneğine sahip metalik malzemeler, şekil hatırlamalı alaşımlar olarak isimlendirilir. Şekil hatırlamalı alaşımlar ısı değişimlere duyarlı fonksiyonel malzemelerdir. Temel karakteristikleri, kritik dönüşüm sıcaklığının üzerinde ve altında iki farklı şekil veya kristal yapıya sahip olmalarıdır. Nispeten düşük sıcaklıklarda deforme edilebilen bu malzemeler, daha yüksek sıcaklıklarda deformasyon öncesi şekillerine dönebilmektedirler. Bu malzemeler sadece ısıtma halinde "tek yönlü şekil hatırlamaya sahip malzemeler" olarak tanımlanırken, yeniden soğutma halinde ise "iki yönlü şekil hatırlamalı malzemeler" olarak tanımlanmaktadır (Akdoğan ve Nurveren; 2002). Şekil hatırlama etkisi, kristalografik olarak difüzyon özelliği ve tersinir martensit dönüşüm gösteren bazı özel alaşımlarda gözlenmektedir (Fremond ve Miyazaki; 1996).

Şekil hatırlamalı dönüşüm, ilk kez AuCd alaşımlarında 1932 yılında Chang ve Read tarafından anlaşılmış, 1938 de söz konusu yapısal dönüşümün pirinç malzemedeki de olduğu görülmüştür. 1951 yılında ise AuCd alaşımlı bir çubukta gözlenen şekil hatırlama olayından sonra 1962’ de Buehler ve arkadaşları tarafından Ni%50Ti alaşımlarında şekil hatırlama etkisi belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra, şekil hatırlamalı alaşımların hem ticari kullanımlarına, hem de metalurjik araştırmalarına hız verilmiştir.

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 de malzemenin kullanım alanını genişleterek fonksiyonelliğini artırabilmelidir. Bu alandaki yeniliklerle birlikte malzemelerin fonksiyonelliği, mekanikte kullanılan elementlerde ve geliştirilmiş mekaniksel sistemlerde kullanılabilir. Şekil hatırlamalı alaşımlar (SMA) da bu düşüncenin eseridir. Şekil hatırlamalı alaşımların benzersiz özelliklerini kullanarak daha yoğun, otomatik ve önceden düşünülmemeyecek kadar iyi kapasitede makineler üretmek mümkündür (Funakubo, 1987). Aktüatörlerde (Çalıştırıcı), medikal cihazlarda ve akıllı yapıların uygulamalarında sıkça kullanılan şekil hatırlamalı alaşımlara son yıllarda büyük bir ilgi vardır. Çünkü bu malzemeler uygulanan zor sonucu meydana gelen zorlamanın düzeltilme özelliği ve austenit, martensit faz arasında sıcaklık faz dönüşümü meydana getirme özelliği gösterirler (Freed, 2009). Şekil hatırlamalı alaşımlar martensit dönüşümünden dolayı özel bir sıcaklıkta ısıtıldığında deforme olmuş halden orijinal hale

dönmesi olayından dolayı tıbbi alanda ve mühendislikte kullanılmaktadır (Omorı, vd., 2006).

Endüstride en fazla görünen şekil hatırlamalı NiTi alaşımları ve bakır esaslı alaşımlar önemli ticari değere sahip alaşım sistemleridir. Bu sistemlerin sahip oldukları özellikleri birbirinden oldukça farklıdır. Bakır esaslı alaşımlarda % 4-5 olan şekil hatırlama gerinim (yük altındaki bir malzemenin, yük uygulanmadan önceki duruma kıyasla şeklini ne oranda değiştirdiğini ifade eder) 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, eritilmeleri ve açık havada preslemek daha kolaydır, daha geniş potansiyel dönüşüm sıcaklık aralığına sahiptirler. Sonuçta her iki alaşım sisteminde de kullanılacağı ortama göre göz önünde bulundurulması gereken avantaj ve dezavantajları olduğu söylenebilir (Otsuka ve Kakeshita, 2002).

Son zamanlarda demir esaslı SMA üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Bu tip alaşımlarda görülen uzun aralıkta düzenlenen termoelastik martensit dönüşüm şekil hatırlama etkisi için gerekli koşulları sağlamaktadır. Bu alaşımlar arasında FePt, FePd ve FeNiCoTi ısıl işlemlerle termoelastik martensit dönüşüme sahip oldukları için eğitilerek şekil hatırlama özelliği kazandırılabilir. Fakat FeNi, FeMnSi ve FeMnSiCrNi gibi alaşımlar düzenli termoelastik olmayan bir martensit dönüşüme uğrarlar ve iyi bir şekil hatırlama etkisine sahip değildirler. Bu tür alaşımlar diğer bilinen şekil hatırlama alaşımlarından karakteristik açıdan farklıdır, şöyle ki şekil hatırlama etkisi zor kaynaklı martensite bağlıdır, geniş ölçülü dönüşüm histerisiz gösterirler ve genelde geri kazanılan birim şekil değiştirme miktarı %4 ü geçmez. Bu nedenlerden dolayı bu tip alaşımlar henüz ticari bir potansiyele sahip değildirler. Fakat yeni ve istenilen özellikleri karşılayabilen şekil hatırlama alaşımları ile ilgili bilimsel araştırmalar devam etmekte olup bu araştırmaların çoğu  $\beta$ -Ti alaşımları ve Fe-esaslı alaşımları kapsamaktadır (Akdoğan ve Nurveren, 2003).

Şekil hatırlamalı alaşımların makroskobik davranışları iki önemli olgu olarak ayrılabilir. Birincisi lineer olmayan esnek davranış gösteren pseudo-esnekliktir (süper elastiklik). Bu durumda küçük bir kuvvet ile oldukça fazla bir deformasyon oluşabilir buna rağmen yük malzeme üzerinden kaldırılırsa, malzeme ısıtmaya gerek kalmaksızın orijinal şekline geri dönebilir. Diğer olgu ise şekil hatırlama etkisidir. Buda kendi içinde ikiye

ayrılır. Eğer şekil hatırlamalı alaşımda tek yönlü şekil hatırlama etkisi meydana gelirse, yükleme ve yüklememe dönüşünden sonra artan gerilme gösterir. Sıcaklığın artması ile bu gerilme eski haline basitçe dönebilir. Malzemenin sadece ısıtma ile şeklini hatırlayabilmesi olarak da tanımlanabilir. Bazı malzemeler ısıtmayı takiben tekrar soğutulduklarında değişim gösteriyorsa bu iki yönlü şekil hatırlama etkisidir (Baksan ve Gürler, 2006; Freed, 2009).

Sıcaklık ve zora bağlı durumlarda şekil hatırlamalı alaşımlar farklı fazlarda bu yeteneğini gösterebilirler. Bu fazlar arasında en önemli iki tanesi austenit ve martensit fazdır. Austenit faz, yüksek sıcaklık ya da düşük zor altında kararlıdır (Heil, 2005). Tam tersi martensit faz, düşük sıcaklık ya da yüksek zor altında kararlıdır. Martensit faz dönüşümü, austenit fazından martensit fazına difüzyonsuz olarak gerçekleşen atomların ortak hareketidir (Thamburaja ve Nikabdullah, 2009).

Elektronlar atom çekirdeği çevresinde yörünge hareketi yaparken ayrıca kendi eksenleri etrafında dönebilirler. Dönme yönüne bağlı olarak her elektronda bir manyetik kutup çifti oluşur. Bu nedenle her elektron bir mıknatıs sayılabilir. Bir elektron çekirdek etrafında yörünge hareketi yaparken atomun çevresinde bir manyetik alan oluşturur. Ancak aynı enerji düzeyinde yörünge hareketi yapan iki elektronun dönme yönleri zıt olduğundan birbirlerinin alanlarını yok ederler dolayısıyla net bir manyetik alan oluşamaz (Onaran, 2006). Bir atomlar topluluğuna bir manyetik alan uygulandığında pek çok davranış tipi gözlemlenebilir. Bunlar;

Diamanyetik davranış; Herhangi bir atom üzerinde bir manyetik alan etkidiğinde yörünge elektronlarından dolayı manyetik momenti etkilemekle bütün atomlar için bir manyetik kutup çifti oluşur. Bu kutup çiftleri manyetik alana karşı koyarak manyetikliğin sıfırdan daha az olmasına neden olur. Bu davranış diamanyetizm diye adlandırılır.

Paramanyetik davranış; Malzemeler, atomları çift olmayan elektronlara sahip olduğunda net bir manyetik moment, her atomla ilgili elektron dönüşünden doğar. Manyetik alan uygulandığında kutup çiftleri alanla hizaya gelerek pozitif bir manyetikleşmeye neden olur. Buna karşı kutup çiftleri etkileşmediği için, kutup çiftlerini hizaya getirmek için büyük bir manyetik alan gereklidir. Paramanyetizma denilen bu etki sadece yüksek sıcaklıklarda etkilidir.

Ferromanyetik davranış; 3d seviyesindeki (demir, nikel ve kobalt) veya 4f seviyesindeki (gadolinium) doldurulmamış enerji seviyelerinden dolayıdır. Ferromanyetik malzemelerde kalıcı çift manyetik alanda kutup çiftlerinin doğal yöneliminden dolayı

kolayca hizaya gelirler (Erdoğan, 2001). Alaşımların manyetik özelliği kimyasal bağ yapısına ve elektron konsantrasyonuna güçlü bir şekilde bağlıdır (Kulkova vd., 2004 ).

Şekil hatırlama özelliği ile manyetik özelliği birlikte gösteren ‘Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımlar (FSMA)’ ilk kez Webster tarafından bildirildikten sonra geniş bir şekilde çalışılmaya başlanmıştır (Goryczka vd., 2008; Pirge vd., 2009). FSMA’ lar son yıllarda teknolojik önemi ve fiziksel özelliklerinin ilginçliği dolayısıyla çok cazip malzemeler haline gelmiştir; uzay uygulamaları ve diğer alanlarda harekete geçiriciliği ve duyarlılığı ile sıklıkla araştırılmıştır (Dhaka vd., 2009; Yu vd., 2009). FSMA larda, deformasyon numuneye kuvvet uygulayarak değil manyetik alan uygulayarak oluşur ve manyetik alana verilen yanıt yeterince hızlı olabilir (Murakami vd., 2002). Curie sıcaklığının ( $T_c$ ) altında, alaşımlarda ferromanyetik fazdan (P; ana faz), manyetik olmayan faza dönüş meydana gelir. Manyetik olmayan fazın anlamı manyetikliğin kendiliğinden meydana gelmemesidir. Bu olay martensit dönüşümün meydana gelmesiyle birleştirilebilir. Bu alaşımların, martensit başlangıç sıcaklığı  $M_s$  ve ters dönüşümün bitiş sıcaklığı  $A_f$  manyetik alanın uygulanmasıyla hızlı bir şekilde düşer (Umetsu vd., 2009). Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımların bu özellikleri, şekil hatırlama etkisinin sadece sıcaklık ve strese bağlı değil manyetik alana da bağlı olabileceğini göstermiştir (Han vd., 2009). Bu alaşımlarda, deformasyon numuneye dokunmadan manyetik alanın etkisiyle olmalıdır. Alaşımların manyetik alana cevabı da yeterince hızlı olmalıdır. Bu özellik bilinen şekil hatırlamalı alaşımlardan farklıdır (Baksan ve Gürler, 2006).

Ferromanyetik malzemelerin en popülerleri  $Ni_2MnGa$  Heusler alaşımlardır. Bunun dışındaki diğer alaşımlar, Fe-Pb, Fe-Pt, Ni-Mn-(Al, Sn, Sb, In), Co-Ni-(Al, Ga), Ni-Fe-(Al, Ga), Cu-Mn-(Al, Ga) dir (Liu vd., 2005; Tanaka vd., 2006; Liu vd., 2006).

Oikawa ve arkadaşları; kobaltın Ni-Al-Fe  $\beta$  ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımın martensit ve manyetik geçiş sıcaklığına etkisini incelemiştir. Bu araştırmada elde edilen sonuçlar şöyledir. Kobalt katkısı  $M_s$  ve  $A_f$  sıcaklığını düşürür bunun yanında Curie sıcaklığını yükseltir. Bunu şöyle açıklamışlardır; Kobalt, bu alaşımların martensit ve manyetik geçiş sıcaklığını kontrol eden etkin bir elementtir (Oikawa vd., 2006).

H.J. Yu ve arkadaşları ferromanyetik şekil hatırlama özelliği gösteren NiFeGa alaşımına Germanyum (Ge) katkılıyıp martensit dönüşüm sıcaklığının değişimini incelemişlerdir.  $Ni_{56.5-x}Fe_{17}Ga_{26.5}Ge_x$  ( $x= 0, 0.5, 1, 2$ ),  $Ni_{56.5}Fe_{17-y}Ga_{26.5}Ge_y$  ( $y= 0, 0.5, 1, 2$ ),  $Ni_{56.5}Fe_{17}Ga_{26.5-z}Ge_z$  ( $z= 0, 0.5, 1, 2$ ) alaşımları üretilmiştir. Ge miktarının artmasıyla Martensit dönüşüm sıcaklığının azaldığı gözlenmiştir (Yu vd., 2009).

V. Khovaylo ve arkadaşları; Kobalt (Co) elementinin  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{37}\text{Sn}_{13}$  alaşımının faz geçişine etkisini incelemiştir. Kobalt içeren malzemeler için deneysel sonuçlar, yapısal kararsızlık ve değişim etkileşiminin kobaltın konsantrasyonuna bağlı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bir kısım Mn yerine Co konulduğunda  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{37-x}\text{Co}_x\text{Sn}_{13}$  alaşımında martensit dönüşüm ve manyetik dönüşüm sıcaklığında Co katkısının küçük bir etki yaptığı görülmüştür. Tam tersi bir kısım Ni yerine Co konulduğunda bu dönüşüm sıcaklıklarına büyük bir etki yapmıştır.

Co-Ni-Al alaşımları, ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlar içinde gelecek vaat eden alaşımlardandır. Çünkü termal uygulamalar boyunca şekillendirilmek için yeterli süneklik meydana gelir. Alaşımı meydana getiren bileşenler diğer ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlara göre ucuzdur ayrıca dönüşüm sıcaklığını ve Curie sıcaklığını ( $T_c$ ) kumanda etme yeteneğine sahiptirler (Khovaylo vd., 2008).

Co-Ni-Al alaşımları B2 (kübik) yapıdan, L10 (tetragonal  $c/a= 0,816$ ) yapıya termoelastik martensit geçiş göstermektedir (Moya vd., 2006).  $\beta$  tabanlı Co-Ni-Al ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlar sıcak-soğuk kullanılabilirliği ile geniş alanda dikkat çekmektedir. Bu alaşımların  $T_c$  Curie sıcaklığı artan Co miktarı ile artmaktadır.  $T_c$  sıcaklığı martensit dönüşüm sıcaklığından yüksek olduğu zaman, martensit faz dönüşümü manyetik alandan meydana gelir ve ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşım üretilir. Co-Ni-Al klasik şekil hatırlamalı alaşımdır fakat bu alaşımın şekil değişimi sadece %0,06 dır (Guo-Fu vd., 2006).

Son zamanlarda, Co-Ni-Al alaşımı, Ni-Mn-Ga ve Ni-Fe-Ga alaşımlarına alternatif olarak kullanılmaktadır. Çünkü iyi bir sünekliğe sahiptir. Tane sınırlarında  $\gamma$  fazın çökmesi iyi sünekliğin temelidir.  $\gamma$  faz numunenin kesme ve çekme sonrası sıcaklık uygulaması ile yer değiştirebilir. Curie sıcaklığı ( $T_c$ ) ve özellikle martensit dönüşüm sıcaklığı ayrı ayrı, değişen Co ve Al oranı ile -150 ile 200 °C aralığında kontrol edilebilir. Co-Ni-Al alaşımı için önerilen kompozisyon sınırı Al için %20' den %30' a, Co için %40' tan azdır (Maziarz vd., 2008).

Ferromanyetik maddeler kendi içerisinde sert ve yumuşak ferromagnetler diye sınıflandırılırlar. Sürekli olarak mıknatıslanma durumunu koruyan ferromagnetlere sert ferromagnet, mıknatıslanmasını sürekli olarak korumayan ferromagnetlere de yumuşak ferromagnetler denir ( Mattis, 1981).

Co-bazlı alaşımlarda e/a oranı önemli bir veridir. Bu oranın artması ile Co-bazlı şekil hatırlamalı alaşımların As ve Ms sıcaklıklarında da düzenli bir şekilde artış gözlenir (Zhang ve Liu, 2008).

Bu çalışmanın amacı, teknolojik öneminden dolayı Ferromanyetik şekil hatırlama özelliği gösteren  $\text{Co}_{86-x}\text{Al}_{14}\text{Cr}_x$  ( $x = 0$  ve 4 atomikçe) ve  $\text{Co}_{35}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{40-y}\text{Cr}_y$  ( $y = 0$  ve 4 atomikçe) alaşımlarının dökümünü yapmak, ısıt işlemler uygulayarak numuneleri homojenleştirip şekil hatırlama özelliklerini uygun metot ve teknikler yardımıyla belirlemektir.

## 2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR

Şekil hatırlama olayı gösteren bir alaşım, belirli bir kristal yapıya sahip olmalıdır. Bu yapı martensit yapıda iken sıcaklık ve zora bağlı olarak değişebilir. Şekil hatırlama özelliğine sahip alaşımdan yapılmış bir çubuk, martensit dönüşüm sağlandıktan sonra yonca yaprağı şeklinde eğilirse ve daha sonra ısıtılırsa austenit halde tekrar çubuk haline döner. Buradan da görüldüğü gibi şekil hatırlama olayı gösteren alaşım için martensit faz dönüşümü esastır (Adıgüzel ve Ceylan, 1988).

Günümüzde şekil hatırlamalı alaşımlar, gösterdikleri sıra dışı hafıza özellikleriyle mühendislik ve tıp alanlarındaki uygulamalarıyla gündemdedirler. NiTi alaşımları daha iyi şekil hatırlama özelliği ve korozyon direnci göstermelerine karşın, ucuzlukları nedeniyle bakır bazlı alaşımlar çeşitli uygulamalarda daha iyi bir alternatif sunmaktadırlar. Özellikle ince taneli bakır bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar taneler arası kırılmaya bir çözüm getirmiş ve bunların mekanik özelliklerinde belirgin bir gelişme kaydedilmiştir (Saranlı, vd., 1997).

Şekil hatırlama olayı, mekanikteki elastik bir yayın davranışına benzetilebilir.  $L_0$  boyundaki esnek bir yay esneklik sınırları içerisinde bir kuvvet uygulanırsa, yayın boyu  $L$  olur. Yay üzerindeki kuvvet kaldırılınca yay yine eski boyunu alır, yani  $L_0$  olur. Şekil hatırlama olayı da buna benzerdir. Martensit dönüşüm tamamlandıktan sonra ( $M_f$  sıcaklığının altında) numune deforme edilirse ve daha sonra sıcaklık yükseltip austenit hale döndüğünde numune, austenit haldeki normal durumunu alıyorsa bu olaya şekil hatırlama olayı denir (Otsuka ve Shimizu, 1986).

Şekil hatırlama oluşumundan dolayı şekli geri alma, numunenin tümünü  $A_f$  sıcaklığının üstüne ısıtmakla olmaktadır. Şekil hatırlama alaşımlarının sürücü kuvveti, ana ve martensit fazlar arasındaki ters dönüşüm üzerindeki kimyasal serbest enerjideki farklılıktan dolayıdır. Bununla birlikte, numunelerin şeklinin eski haline dönmesi daima ters dönüşümle olmaktadır. Şekil hatırlama olayı gözlenebilmesi için;

- a) Martensitik dönüşüm termoelastik olmalıdır,
- b) Deformasyon, dislokasyon kayması ile değil ikizlenme benzeri bir mekanizma ile olmalıdır,
- c) Ana faz düzenli olmalıdır (Funakubo, 1987).

## 2.1. Martensitik Dönüşüm

Martensit dönüşüm, metal ve alaşımlarda, yüksek sıcaklık fazında iken malzemeye dışarıdan sıcaklık, zor, manyetik alan gibi etkilerin ayrı ayrı veya birlikte uygulanması ile martensit fazın elde edilmesidir. Martensit faz dönüşümünün en önemli özelliği difüzyonsuz olarak gerçekleşmesidir. Böylece martensit fazdaki atomların komşulukları, dönüşüm öncesi komşuluklar ve kristalin kompozisyonu değişmez (Ortin ve Planes, 1989).

Martensit dönüşüm, ilk olarak metaller, seramikler ve polimerler üzerinde yaptığı çalışmalar sonucunda Adolf Martens tarafından açıklanmıştır. Daha sonra martensit yapının, atomik difüzyon olmaksızın gerçekleşen örgü dönüşümünden kaynaklandığı gösterilmiştir. Kristaller martensit adı verilen böyle dönüşümlerle oluşmaktadır ve atomik difüzyonsuz örgü dönüşümleri martensit dönüşüm olarak adlandırılmaktadır. Martensit dönüşüm, austenit yapıdan, martensit yapıya atomların kooperatif hareketi (difüzyon) ile meydana gelir. Çoğu yapıda, austenit fcc yüzey merkezli kübik örgüden, bcc cisim merkezli kübik örgü veya bct 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 (Funakubo, 1987).

Difüzyonsuz martensit dönüşümler çelik gibi birçok metal, alaşım ve bileşiklerde gözlenmektedir. Dönüşüm asıl olarak çeliklerin sertleştirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, çelik gibi metallerin mukavemetini de arttırmaktadır (Meyers ve Chawla, 1998).

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

Malzeme deforme edildiğinde, martensit tabakaların konfigürasyonunda 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 sergilerler (Delaey vd., 1974).

Metal ve alaşım sistemlerindeki faz dönüşümleri, çekirdeklenme-büyüme dönüşümleri ve martensitik dönüşümler olmak üzere iki çeşittir (Barrett ve



Massalski, 1980). 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 (Otsuka ve Shimizu, 1986). Bu dönüşümler, atomların birlikte hareketini kapsadığı için difüzyonsuz dönüşümlerdir.

Kural olarak, tüm metaller soğutma veya ısıtma sıcaklığı yeteri kadar hızlı tutulduğunda, difüzyonsuz dönüşüme uğrayabilirler. Birçok çeşit metalik veya metalik olmayan bileşiklerde ve minerallerde martensitik dönüşüm meydana gelebilir (Nishiyama, 1978).

## **2.2. Termoelastik Martensitik Dönüşümler**

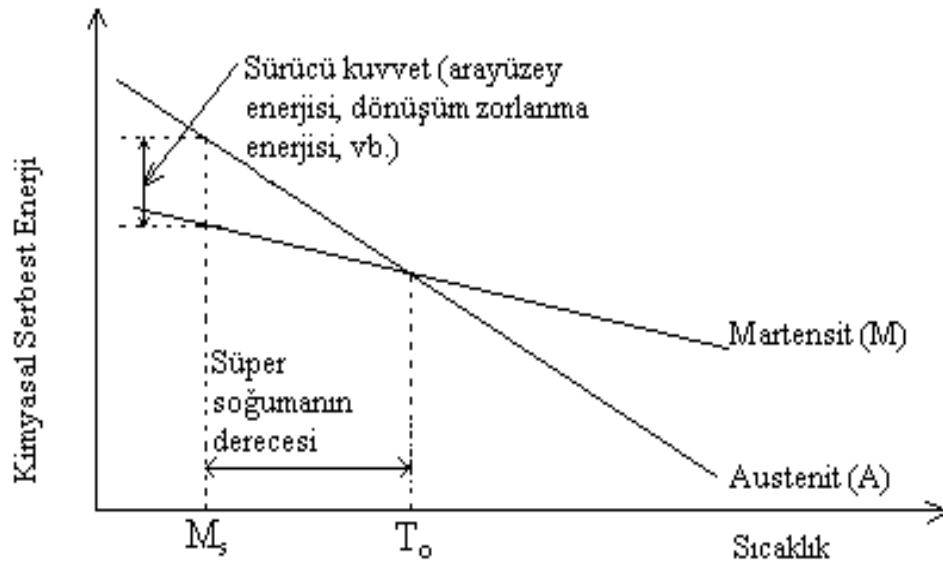
Martensitik dönüşümler termoelastik ve termoelastik olmayan dönüşümler olarak ikiye ayrılır. Termoelastik martensitik dönüşüm, habit düzlemin (austenit ve martensit fazları arasında habit düzlemi olarak adlandırılan bir invaryant düzlemi) hareketiyle, aynı kimyasal bileşim ve ana fazdaki atomik düzeni koruyarak atomların küçük uyumlu hareketiyle ilerler ve kristal yapıdaki değişime ilave olarak habit düzlemde bir kesme deformasyonuna sebep olur. Termoelastik martensitik dönüşümde plastik deformasyon ikiz oluşumu mekanizması ile meydana gelirken, şekil hatırlama etkisi göstermeyen alaşımlarda kayma 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 morfolojik olarak fark bulunmamasına rağmen, dönüşüm sıcaklıkları ve dönüşüm sonrası ürünler farklıdır. Atermal dönüşümde şekil hatırlama olayı gözlenmezken izotermal dönüşümün gerçekleşmesi için ise ya ortam sıcaklığının ya da bir mekanik zorun uygulanması gerekmektedir. Termoelastik olmayan dönüşümlerde yine kayma mekanizması ile meydana gelen yapının önceki haline gelmesi mümkün değildir. Bu duruma örnek olarak çelikler verilebilir ve yüzey sertleşmesi olarak kullanılır.

Martensitik dönüşümlerin izotermal ve atermal olması alaşımın kimyasal bileşimine bağlı değildir. Bu yüzden izotermal ve atermal dönüşümlerin her ikisi 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 termo mekanik etki ile oluşur (Işık, 2007; Yurtsever, 2012).

### 2.3. Martensitik Dönüşümün Termodinamiği

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 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 (Funakubo, 1987).



Şekil 2.1. Ana ve Martensit fazın kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklık ve martensit dönüşümle ilişkisi (Funakubo, 1987).

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  $\Delta E$  enerji değişimi;

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

olur. Böyle bir değişim esnasında sistemin  $\Delta Q$  ısı enerjisi değişimi, yukarıdaki ifadeden hesaplanınca;

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

bulunur. Görülüyor ki, sabit P basıncına karşı iş yaparak hacim değiştiren bu kapalı sistemin, ısı enerjisinde meydana gelen  $\Delta Q$  farkı, iki ifade farkına eşittir.  $(E + PV)$  terimlerinden ibaret olan bu ifadeye sistemin ihtiva ettiği ısı veya Entalpi' si adı verilir. Bu tarife 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 (Aytekin, 1966).

Salzbrenner ve Cohen tarafından kabul edilen  $T_o$  denge sıcaklığı,

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

şeklindedir. Burada  $M_s$  martensit başlama sıcaklığı,  $A_s$  austenit başlama sıcaklığıdır (Salzbrenner ve Cohen, 1978).  $T_o$  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 (Tong ve Wayman, 1974).

Termal olarak etkilenmiş bir termoelastik martensitik dönüşüm süresince kalorimetrik teknikler vasıtasıyla ölçülen enerji, üç farklı katkının 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 spesifik 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 (Ortin ve Planes, 1988).

Ergime, buharlaşma, demirin  $\alpha$ - $\beta$  allotropik dönüşümü gibi faz dönüşümleri tabiatta, genellikle sabit basınç altında (veya 1 atm basınçta) ve sabit sıcaklıklarda olmaktadır. Bu bakımdan sabit sıcaklıkta entropi değişiminin hesaplanması önemlidir. Buna göre sabit basınçta entalpi ifadesinin türevi;

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

şeklindedir. Buna göre, termodinamiğin birinci kanunundan faydalanarak,  $\Delta E = \Delta Q - P \Delta V$  yazıldığında;

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

bulunur. O halde, sabit basınçta;

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

denklemleri yardımı ile, entalpi değişimi bilinirken, entropi değişimi hesaplanabilir (Aytekin, 1966).

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 (Prado, vd., 1995).

## 2.4. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Genel Karakteristikleri

Şekil hatırlama davranışı, ilk olarak 1932' de Ölander'in Altın-Kadmiyumda 'rubber like effect ' çalışmasında ve 1938' de Greninger ve Mooradian' nın Pirinç (Bakır – Çinko) alaşımlar çalışmasında gözlemlenmiştir (Schetky, 1980). Yıllar sonra (1951 de) Chang ve Read şekil dönüşümü (Shape Recovery) terimini ilk kez kullanmışlardır. Onlar da Altın- Kadmiyum 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 (Darjan, 2007).

### 2.4.1. Şekil Hatırlama Etkisi

Şekil hatırlamalı alaşımlar, belli bir sıcaklığın üstüne kadar ısıtıldığında, belirgin şekil değişimi gösteren metal alaşımlarıdır. Bu alaşımlar özel bir sıcaklıkta şeklini ve

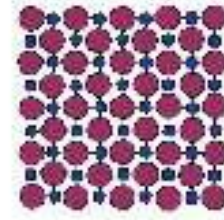
boyutunu hatırlar. Bu davranışından dolayı, bu tarz malzemeler akıllı malzemeler olarak da adlandırılabilirler. Genel olarak bu malzemeler, oldukça düşük sıcaklıklarda plastik olarak deforme edildikten sonra, daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında deformasyondan önceki şekillerine geri dönerler (Baksan ve Gürler, 2006; Darjan, 2007; Sharma vd., 2008). Şekil hatırlamalı alaşımlar Şekil 2.2’ de görüldüğü gibi iki faza sahiptirler. Biri yüksek sıcaklık fazı - Austenit – (İsmi İngiliz metalurjist William Chander Austen’ den almıştır) diğeri ise düşük sıcaklık fazı – Martensit – (İsmi Alman metalograf Adolf Martens’ ten almıştır) dir (Darjan, 2007; Chatterjee vd., 2008).

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 (Rahman, 2008).

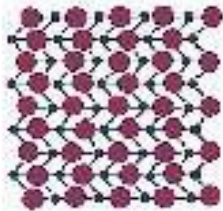
### ***Austenit***

Yüksek Sıcaklık Fazı  
Kübik Kristal Yapı

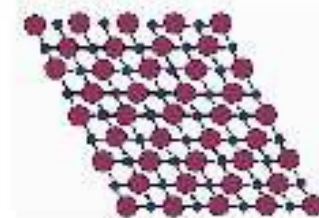


### ***Martensit***

Düşük Sıcaklık Fazı  
Monoklinik Kristal Yapı



İkizlenmeli Martensit



Deforme Olmuş Martensit

Şekil 2.2. Şekil Hatırlamalı alaşımların farklı fazları (Darjan, 2007).

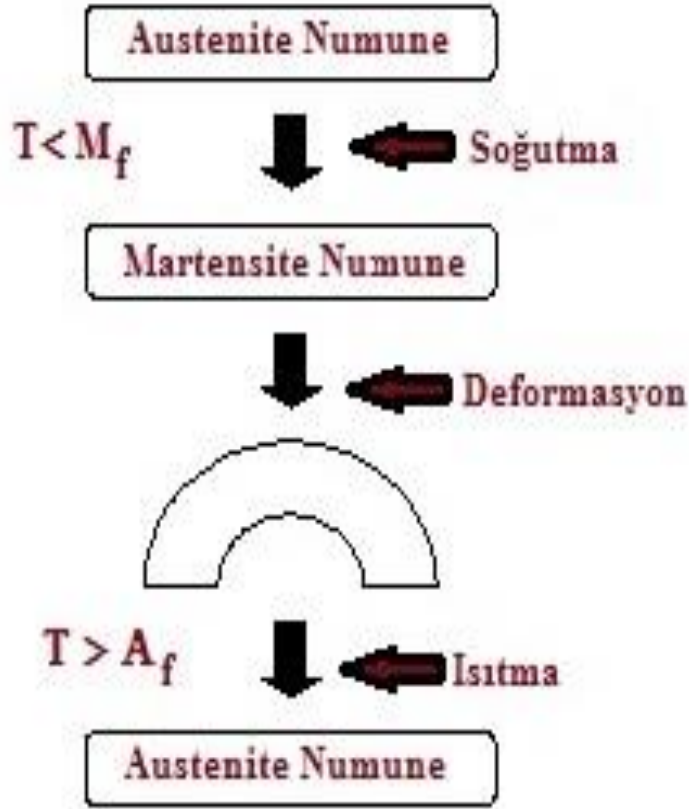
#### 2.4.1.1. Tek Yönlü Şekil Hatırlama

Tek ve çift yönlü şekil hatırlama olayı gösterebilen alaşımların temel özellikleri, kritik bir dönüşüm sıcaklığının altında ve üstünde iki ayrı şekil ve konfigürasyon göstermeye yatkınlıklarıdır. Kristalografik yapıdaki değişmeler boyutlardaki değişmeyle bağlantılıdır ve alaşım düşük ve yüksek sıcaklık şekillerinin varlığını gösterir (Adıgüzel ve Ceylan, 1988).

Alaşım martensit bitiş sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta ( $T < M_f$ ) deforme edilince uygulanan zorun kaldırılması durumunda numune kendi orijinal durumuna geri dönemez. Isıtma sonucunda, numunedeki artık zor, sıcaklık kritik bir sıcaklığın üzerine çıkarken kademeli olarak geri döner. Sıcaklığın tekrar düşürülmesi üzerine, numune deforme edilmiş şeklini kazanamaz. Martensit dönüşümü ve yeniden yönelimle artık zorlanma oluşturma özelliği ve ısıtma sonucunda deformasyon öncesi orijinal  $\beta$ -faz yöneliminin tekrar elde edilebilmesi, tek yönlü şekil hatırlama olayının temel mekanizmasıdır (Friend, 1986).

Tek yönlü şekil hatırlama olayı NiTi, TiNb, NiAl, FePt, CuZnSi, CuZnSn, FeMnC gibi birçok alaşım sistemlerinde gözlenmiştir (Honna, 1986; Sade, vd., 1988; Tautzenberger, 1989). 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  $\beta$ -faz tek kristallerinde ulaşılır.

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



Şekil 2.3. Tek yönlü şekil hatırlama olayının şematik gösterimi.

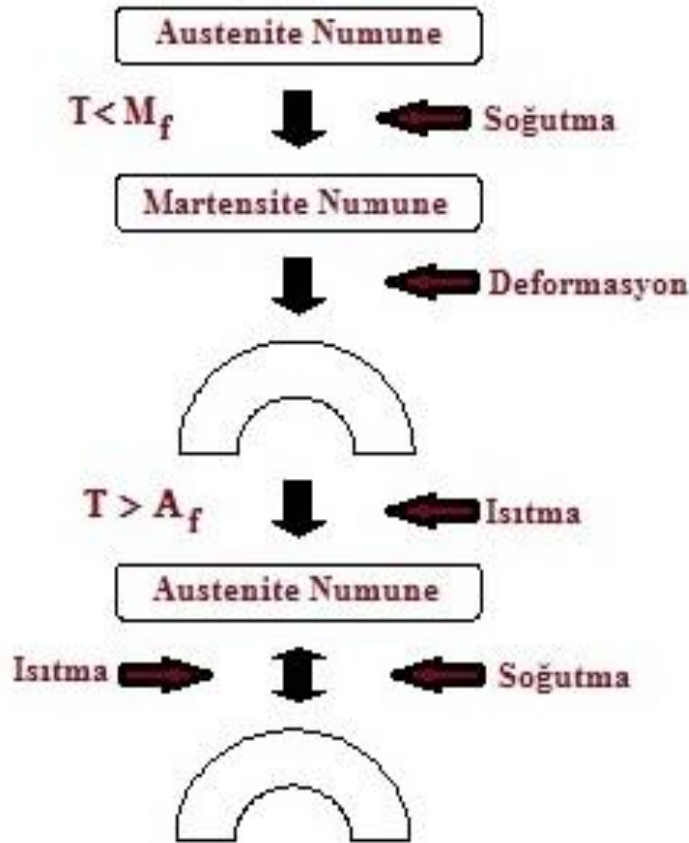
#### 2.4.1.2. Çift Yönlü Şekil Hatırlama

Çift yönlü şekil hatırlama davranışı, maddenin yüksek ve düşük sıcaklık şekillerini dışarıdan bir etkiye ihtiyaç duymaksızın sadece sıcaklık etkisiyle hatırlamasıdır (Saranlı, vd., 1997). Şekil hatırlamalı alaşımlarda gözlenen martensit dönüşümleri uygulanan zor ve sıcaklık etkisine bağlı olarak çift yönlülük (tersinirlik) gösterirler (Delaey, vd., 1974).

Tersinir (Çift yönlü şekil hatırlama) şekil hatırlama olayının mekanizması Şekil 2.4' de şematik olarak gösterildiği gibidir.  $T < M_f$  sıcaklığında tamamen martensit fazdaki bir numuneye dışarıdan zor uygulanmakla istenilen uygun 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 şeklini alır. Bu da tersinir şekil hatırlama olayının bir sonucudur (Hornbogen, 1988).

Şekil hatırlamalı alaşımlardaki dönüşümün kristaloğrafik açıdan tersinirliği, termoelastik dönüşümün veya martensit dönüşümün belirgin bir özelliğidir. Bundan dolayı şekil hatırlama olayı, termoelastik martensit dönüşümü gösteren alaşımlarda ortaya çıkar (Perkins ve Sponholz, 1984).

Çift yönlü şekil hatırlama kapasitesindeki artış,  $\gamma$  çökeltilerinin büyüklüğündeki artış ile doğru orantılıdır (Lovey, vd., 1994). Şekil hatırlama etkisi, martensit hacim oranındaki artışla azalma gösterir. Çift yönlü şekil hatırlama etkisi yaklaşık 10000 çevrim sonra etkisini kaybeder. CuZnAl alaşımlarında, çift yönlü şekil hatırlama özelliğindeki bu azalma hızı, martensitik yapıya sahip NiTi gibi diğer şekil hatırlamalı alaşımlardan daha yüksektir (Langauer, vd., 1995).



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 geniş eyleme geçirme özelliğinden dolayı yaygın olarak



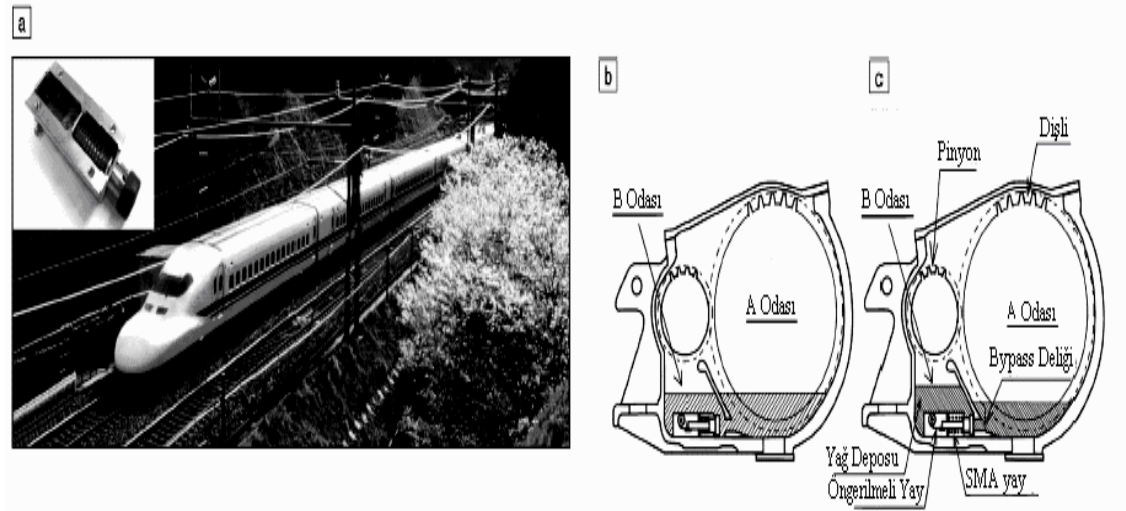
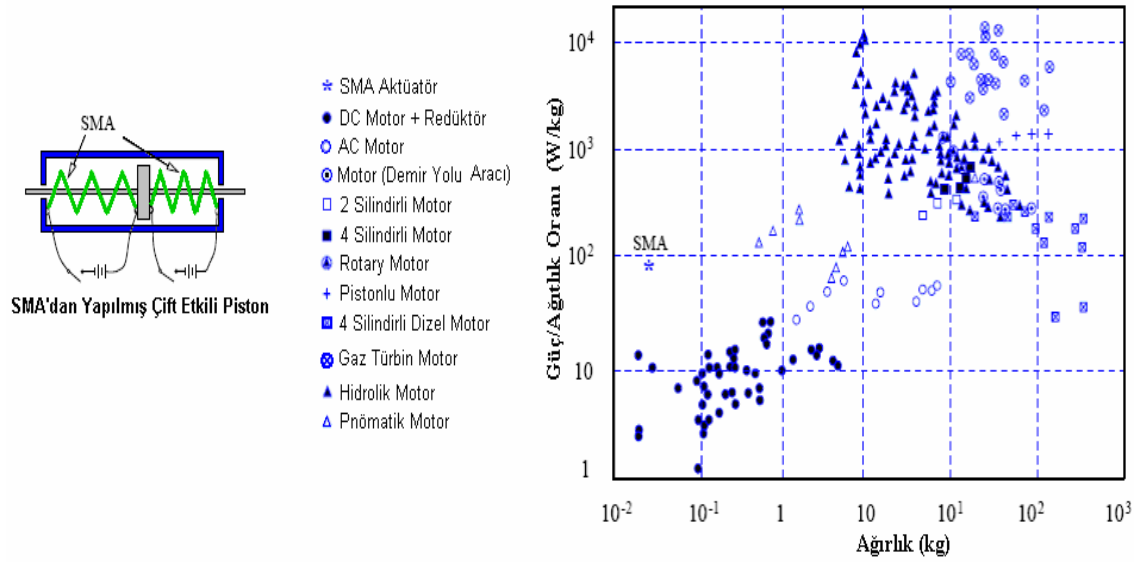
kullanılmaktadır. Uygulamalarda kullanılmak sureti ile uygun bir tasarım yapabilmek için bu malzemenin doğasını anlamak ve tahmin etmek önemlidir. Histerisiz, direnç ve mikro yapıdaki değişimler, süper elastik gibi etkileri bünyesinde taşıyan bu malzemeler bu suretle karmaşık bir yapıya sahiptir (Sivakumar, vd., 2005).

Sistemler içerisinde kullanılan aktüatör tasarımları yapılırken önemli kıstaslar 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 performans kriterine göre değerlendirilmektedir (Huang, 1998; Akdoğan, 2004). Bu performans kriterlerine göre Şekil 2.5' de gösterildiği gibi var olan tüm aktüatörlerin performansları bir grafik halinde gösterilmektedir.

Şekil Hatırlamalı Alaşımlar içerisinde endüstride ticari değere sahip iki tür alaşım bulunmaktadır. Bunlar şekil hatırlamalı NiTi alaşımları ve bakır esaslı alaşımlar olmaktadır. Bu alaşımların sahip oldukları özellikleri bakımından birbirinden oldukça 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 ışığında NiTi alaşımları ve bakır esaslı alaşımların kullanılacağı yere göre göz önünde bulundurulması gereken avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmaktadır (Hodgson, 2002; Otsuka ve Kakeshita, 2002; Akdoğan ve Nurveren, 2003).

Şekil hatırlamalı alaşımlar ile yapılan endüstriyel uygulamalara örnek olarak, Shinkansen hızlı trenleri Şekil 2.6' da gösterildiği gibi otomatik yağ seviye ayarlayıcısı olarak kullanımı verilebilir. Trenin yüksek hızlara çıktığı vakit ortamdaki sıcaklığın artması ile birlikte Şekil hatırlamalı alaşımlardan yapılan yayın tetiklenmesiyle valfin açılması sağlamaktadır. Buradaki amaç iki odaya ayrılan dişli kutusunun arasındaki bağlantıyı sağlayan deliğin açma-kapamasının yağın sıcaklık değeriyle sistemin kontrolünün sağlanmasıdır.

Düşük sıcaklıklarda iki oda arasındaki yağ akışı açıkken, sıcaklığın artması durumunda ise yağın iki oda arasındaki bağlantısı sınırlandırma yoluna giderek akışkan basıncı ayarı yapılmaktadır (Otsuka ve Kakeshita, 2002).

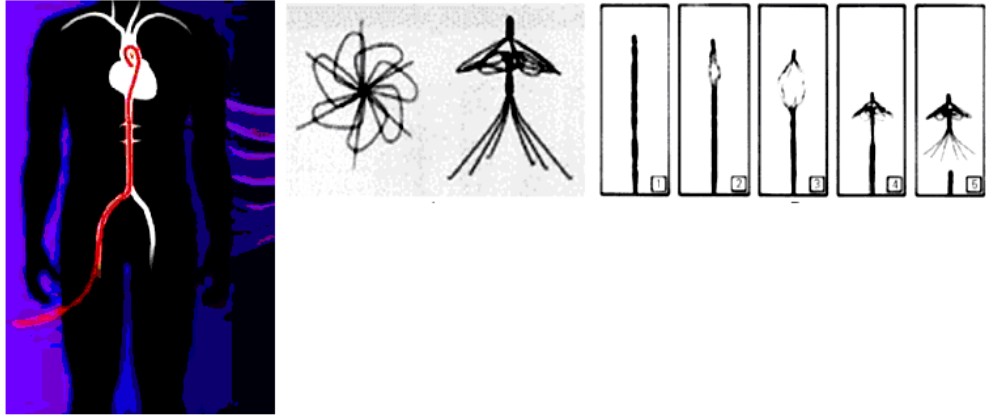


Şekil 2.6. Shinkansen hızlı trenlerinde otomatik yağlama ünitesinde SMA'nın uygulanması. (a) Otomatik yağlama ünitesinin uygulandığı Shinkansen Nozomi-700 hızlı trenin fotoğrafı ve kullanılan SMA valfi (b), (c) SMA'dan yapılan valfin iç yapısının düşük ve yüksek sıcaklıklardaki durumu (Otsuka ve Kakeshita, 2002).

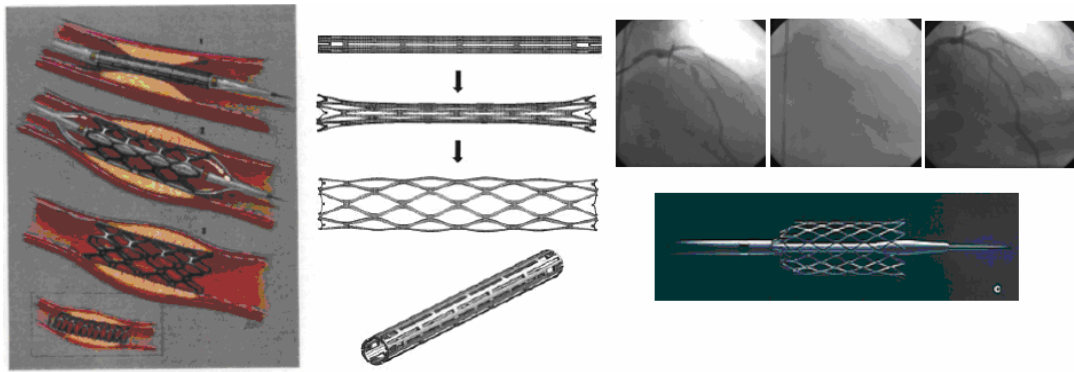
Şekil Hatırlamalı Alaşımların bu fonksiyonel özelliklerinin avantajından ötürü damarlar içindeki kan pıhtılarını yakalayan bir filtre olarak. NiTi alaşımlı telden yapılmış

apa şeklindeki filtre damar içine sokulmadan önce düz bir tel haline getirilir. Şekil 2.8’ de gösterildiği gibi damar içine yerleştirildikten sonra tel, vücut ısısı ile harekete geçerek filtre fonksiyonu sağlayacak orijinal şekline döner ve toplardamarın içinden geçmekte olan pıhtıları tutar (Auricchio vd., 2000; Hodgson, 2002; Akdoğan ve Nurveren, 2003).

Yine ekil 2.7’ de gösterildiği gibi NiTi alaşımından yapılan ve yukarıda bahsedilen konuya benzer olarak üretilen stent, damar tıkanıklıklarında kullanılmaktadır. NiTi alaşımlı telden yapılmış stent, damar içine sokulmadan önce düz bir tel haline getirilir. Damar içine yerleştirildikten sonra stent, vücut ısısı ile harekete geçerek damarın tıkanan yerinde orijinal şekline dönerek damardaki tıkanıklığın açılması sağlanmaktadır (Auricchio vd., 2000; Auricchio, 2002; Tremblay, 2004).



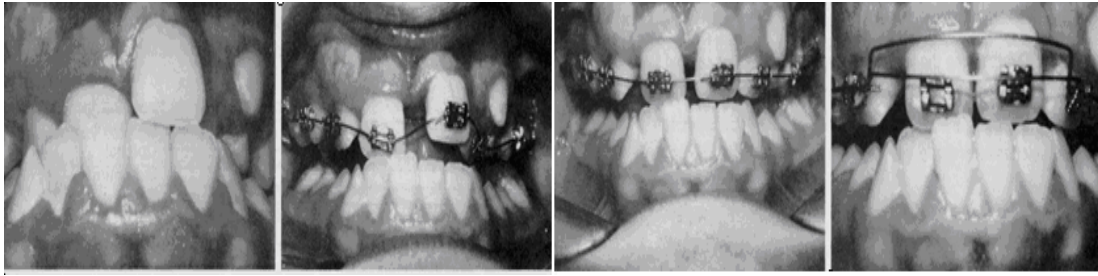
**Şekil 2.7.** Damarlardaki Kan Pıhtısını Tutulması için SMA' dan Yapılmış Filtre (Auricchio vd., 2000).



**Şekil 2.8.** Damarlardaki tıkanma sorunlarının zm için SMA' dan yapılmış stent (Auricchio vd., 2000; Auricchio, 2002).

Şekil Hatırlamalı Alaşımların sahip oldukları elastik ya da süper elastik özelliklerinden faydalanılarak tasarlanmış ve piyasaya sürülmüş birçok ürün vardır. Çok büyük deformasyonları dahi absorbe ederek zarar görmeyen süper elastik NiTi alaşımdan imal edilmiş gözlük çerçeveleri üretilmektedir. Canlının vücudundaki damarlara yerleştirilen, NiTi kılavuz tellerden ibaret kontrol edilebilir kateterler yapılmıştır (Akdoğan ve Nurveren, 2003). Ayrıca Şekil 2.9’ da gösterildiği gibi dişlere geniş bir hareket imkanı sağlayan ve yıllardır kullanılan ortodontik düzeltme işlevli kavisli teller şeklinde NiTi ürünler vardır.

Şekil hatırlamalı alaşımlar, medikal uygulamaların yanı sıra, uçak hidrolik sistemlerinde, yarıiletken gaz tüp bağlantılarında, otomotivde radyatör pervanelerinde, egsoz çıkış kontrollerinde, uydu sistemlerinde, termostatik cihazlarda kullanılmaktadır. Bu özelliklerinden ötürü gün geçtikçe kullanım alanları genişleyerek hayatlarımızda yerini alacaklardır.



**Şekil 2.9.** Ortodontik Düzeltme İşlevli Kavisli Tellerin Dişlerde Kullanılarak Üç Haftada Alınan Sonuçları (Auricchio vd., 2000).

### 3. MANYETİK MALZEMELER

( $\mu \neq \mu_0$ ) Manyetik alanı iyi bir şekilde yönlendirme özelliğine sahip olan bu grup malzemeler EMC (Elektromanyetik Uyum) / EMI (Elektromanyetik Girişim) için önem taşımaktadır. Elektromanyetik dalga, Maxwell denklemleri ile tanımlı ve birbirine bağlı elektrik ve manyetik alan bileşenlerini içeren dalgadır. Zamanla değişim gösteren bir akım kaynağı tarafından yaratıldığında oluşturacağı etki kaynağın çevresine ışık hızı ile yayılır. Dalga yayılımı olarak adlandırılan bu olay sistemlerin temas etmeden de birbirleri ile etkileşimini sağlar. Boşlukta ışık hızı ( $c=3.10^8$  m/s) ile ilerleyen bir dalganın değişim yapısı ilerlediği yönde belirli aralıklar ile kendisini tekrar eder. Bu tekrarlama uzaklığı Elektromanyetik dalganın dalga boyu ( $\lambda$ ) olarak adlandırılır (Staelin vd., 1994; Collin, 1966).

Elektronlar atom çekirdeği çevresinde yörünge hareketi yaparken ayrıca kendi eksenleri etrafında dönebilirler. Dönme yönüne bağlı olarak her elektronda bir manyetik kutup çifti (dipol) oluşur, bu nedenle her elektron bir mıknatıs sayılabilir. Bir elektron çekirdek etrafında yörünge hareketi yaparken atomun çevresinde bir manyetik alan oluşturur. Ancak aynı enerji düzeyinde yörünge hareketi yapan iki elektronun dönme yönleri zıt olduğundan birbirlerinin alanlarını yok ederler dolayısıyla net bir manyetik alan oluşamaz (Onaran, 2006).

#### 3.1. Manyetik Dipoller

Atom içindeki her elektron iki manyetik momente sahiptir. Manyetik moment manyetik alanın şiddetidir ve manyetik momentler, çekirdeğin etrafında elektronların yörünge hareketlerinden ve elektronların kendi eksenleri etrafında dönmelerinden meydana gelir (Erdoğan, 2001).

Serbest bir elektronun manyetik momenti başlıca üç sebepten kaynaklanabilir:

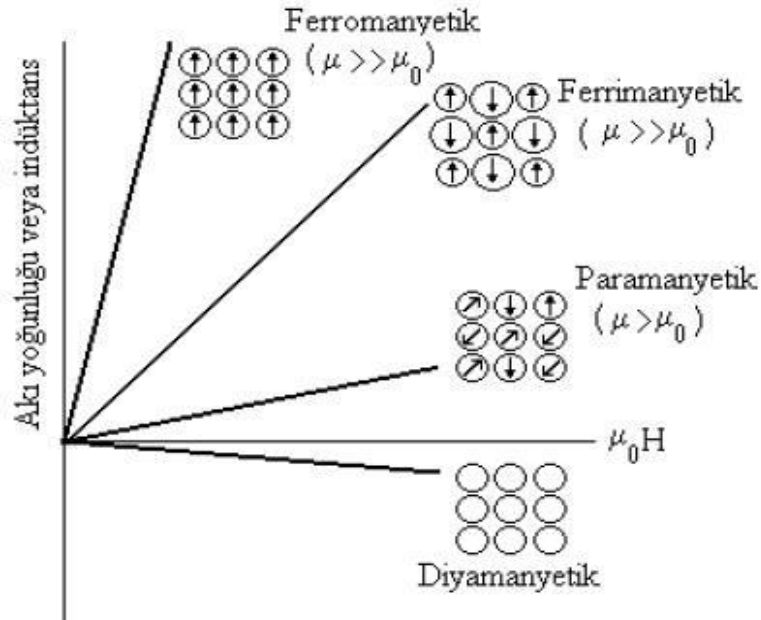
- elektronların sahip oldukları spinden,
- elektronların çekirdek etrafındaki yörünge açısal momentumundan ve
- bir dış manyetik alanda kazandıkları yörünge momentinden (Kittel, 2005).

### 3.2. Manyetizma Türleri

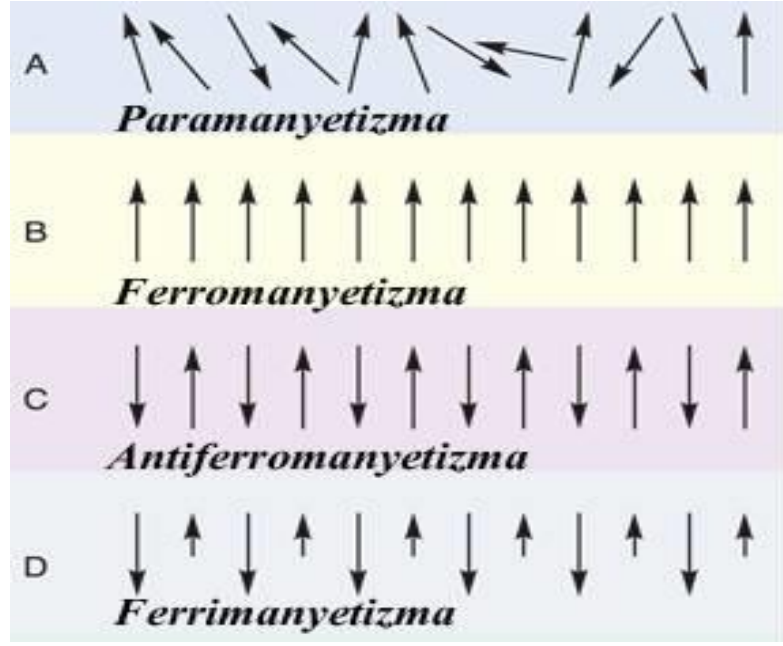
Malzemelere bir manyetik alan uygulandığında pek çok davranış tipi gözlenir. Şekil 3.1’ de diamanyetik, paramanyetik, ferrimanyetik ve ferromanyetik malzemelerin manyetik davranışları görülmektedir (Erdoğan, 2001).

- Manyetizma maddenin atom ve kristal yapısına bağlıdır.
- Manyetik özelliklerin büyüklükleri ve sıcaklığa bağlılıkları farklıdır
- Manyetizmanın bazı türleri şunlardır;
  - Diamanyetizma
  - Paramanyetizma
  - Ferromanyetizma
  - Antiferromanyetizma
  - Ferrimanyetizma

Şekil 3.2’ de manyetik dipollerin yönü görülmektedir. Paramanyetizma’ da manyetik dipoller rastgele yönelim göstermektedir. Ferromanyetizma’ da manyetik dipoller paralel ve düzenli bir dizilim sergilerler. Antiferromanyetizma’ da manyetik dipoller birbirlerine paralel ve zıt yönelmişlerdir. Ferrimanyetizmada manyetik dipoller zıt yönde, farklı büyüklükte ve birbirlerine paraleldirler.



Şekil 3.1. Manyetik davranış çeşitleri (Erdoğan, 2001).



Şekil 3.2. Manyetik dipollerin yönü (Yener, 2007).

### 3.2.1. Diamanyetizma

- Atomları sürekli manyetik dipol momente sahip olmayan maddelere diamanyetik maddeler denir.
- Diamanyetizm, manyetizmanın bir formu olup yalnızca dışarıdan etkiyen bir manyetik alan olduğunda kendini gösterir.
- Diamanyetik maddelerin mıknatıslanmaları çok zayıf ve mıknatıslanması da mıknatıslayıcı alanla zıt yönlüdür.
- Bazı diamanyetik elementler,
  - Bizmut,
  - Civa,
  - Gümüş,
  - Karbon,
  - Kurşun,
  - Bakır.
- Diamanyetik maddelerde normal konumda çekirdek etrafında zıt yönde ve aynı hızla dönen elektronlar birbirlerinin manyetik momentlerini yok ederler.
- Bir dış alan uygulanınca elektronlar fazladan  $F=qv \times B$  gibi ek bir manyetik kuvvet altında kalırlar.

- Ek kuvvet nedeniyle elektronların gördüğü merkezci kuvvet artık aynı olamaz ve manyetik momenti alana anti paralel elektronun, hızı artarken paralel alanınki azalır. Sonuçta elektronların manyetik momentleri birbirlerini yok edemez ve madde manyetik alana zıt yönde bir dipol moment gösterir.
- Her madde böyle davranmakla birlikte bu etki onlarda önemsenmeyecek kadar küçüktür.

### 3.2.2. Paramanyetizma

- Manyetik momente sahiptirler, alan tarafından zayıfça çekilirler.
- Eşleşmemiş elektronlara sahiptirler. Eşlenmemiş elektron sayısı arttıkça manyetik özellikleri artar.
- Paramanyetik maddeler manyetik alan kalktığında manyetizmaları yoktur.
- Paramanyetik maddelerin mıknatıslanmaları çok zayıf ve bu mıknatıslanmaları da mıknatıslayıcı alan yönündedir.
- Bu tür maddeleri oluşturan maddelerin atom ve iyonlarının büyük bir kısmında elektronların spin ve açısal momentumundan kaynaklanan manyetik etkileri birbirlerini yok ederler.
- Manyetik duyarlılıkları ( $\chi$ ) küçük ve pozitifdir ( $10^{-2}$  -  $10^{-4}$ ).
- Manyetik duyarlılık sıcaklık arttıkça değişmez veya azalır.
- Bazı koşullar altında paramanyetik maddelerin mıknatıslanmasının alanla doğru, mutlak sıcaklıkla ters orantılı olduğu Pierre Curie tarafından bulunmuştur.

$$M = C \times \frac{B}{T}$$

- Çok yüksek dış etkili alanlar ve düşük sıcaklıklarda mıknatıslanma maksimum ve doyum değerine ulaşır.
- Bu durumda bütün manyetik dipoller dış alan yönünde dizilmiş olurlar.
- Curie bağıntısı bu durumda geçerliliğini yitirir.





- Ferromanyetik maddeler bir manyetik alan içinde alan yönünde ve çok şiddetli olarak mıknatıslanırlar.
- Bu maddelerin manyetik momentleri, termik etkilere rağmen dış manyetik alanla üst üste gelirler.
- Eğer maddenin sıcaklığı, Curie sıcaklığından daha yukarıya çıkarılırsa bu üst üste gelme bozulur ve madde ferromanyetik halden diamanyetik hale gelir.
- Ferromanyetizma atom ve iyonların kendine özgü bir özelliği değil, komşu atom ve iyonların yapısal kurgu içinde etkileşim biçimlerinden kaynaklanır.
- Ferromanyetik bir madde bir solenoidin veya halka sarımının içine sokularak, bunların içinde ferromanyetik madde yokkenki (Boşluk veya hava) halinden çok daha büyük değerlerde B değerleri elde edilir (Yener, 2007).

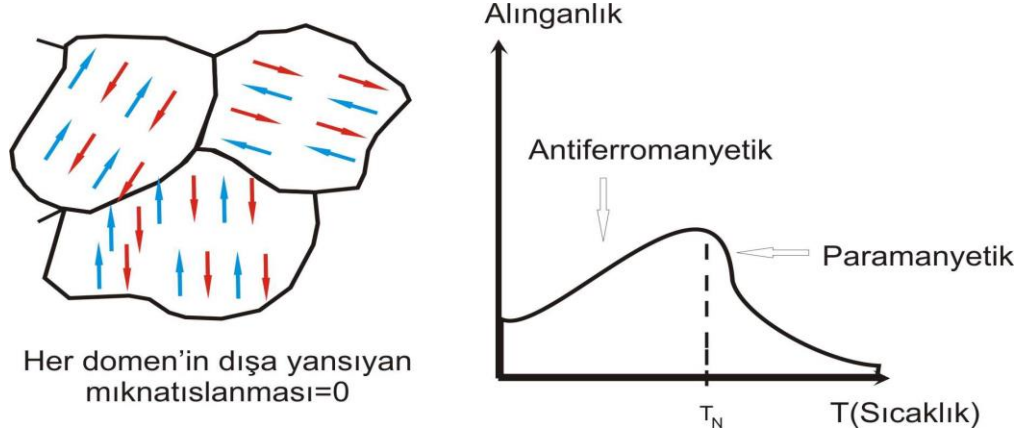
#### 3.2.4. Antiferromanyetizma

Bu mıknatıslanma türünde de elektronların spin momentleri mıknatıslanmadan sorumludur. Elektronların yörüngesel hareketlerinden kaynaklanan manyetik moment bu mıknatıslanmada da var olup çok çok küçük olduğundan kendisini hissettirmiyor. Atomlar maddeyi oluşturmak üzere birim kristalde yerlerini alırken öyle dizilirler ki “değişim enerjisi” bozucu (negatif) olur. Kristal şebekesi içindeki her atomun spin momentleri komşu atomun spin momentine göre  $180^\circ$  farklı yönde yönelir.

Antiferromanyetik maddeler mıknatıslık kazanır, ancak her atomun dışa yansıyacak manyetik momentleri komşu atomun zıt yönlü manyetik momentleri tarafından giderildiğinden, maddenin mıknatıslanması dışarıdan algılanmaz. Bu durum Şekil 3.4’ de gösterilmiştir.

Antiferromanyetizma’ da manyetik dipoller birbirlerine paralel ve zıt yönelirler. Yönelmeleri sonucu atom veya iyonların manyetik momentleri birbirlerini yok eder, net manyetik moment sıfır olur.

İyonik bileşiklerin çoğu; oksitler, sülfatlar, klorürler vb. antiferromanyetizma özelliği gösterirler. Antiferromanyetik davranışı açıklamak için metal oksitlerdeki süper değişim olarak adlandırılan davranışı incelemek gerekir. Bunun mekanizması kısaca; manyetik spinlerin oksijen orbitallerindeki antiparalel çiftleşmesi olarak tarif edilir.



**Şekil 3.4.** Antiferromanyetik bir malzemenin dışa yansıyan mıknatıslanması ve alınganlığa karşı sıcaklığının şematik gösterimi.

### 3.2.5. Ferrimanyetizma

Ferrimanyetizma, antiferromanyetizmanın bir özel hali gibi düşünülebilir. Elektronların spin momentleri, bu mıknatıslanma çeşidinde de önemlidir. Ferrimanyetik maddelerin “Birim kristalinde” “A” ve “B” olarak adlandırılan iki kısım vardır.

- Her iki kısım içinde “değişim enerjisi” yapıcı  $U (+)$
- Kısımlar arasındaki “değişim enerjisi” bozucu  $U (-)$

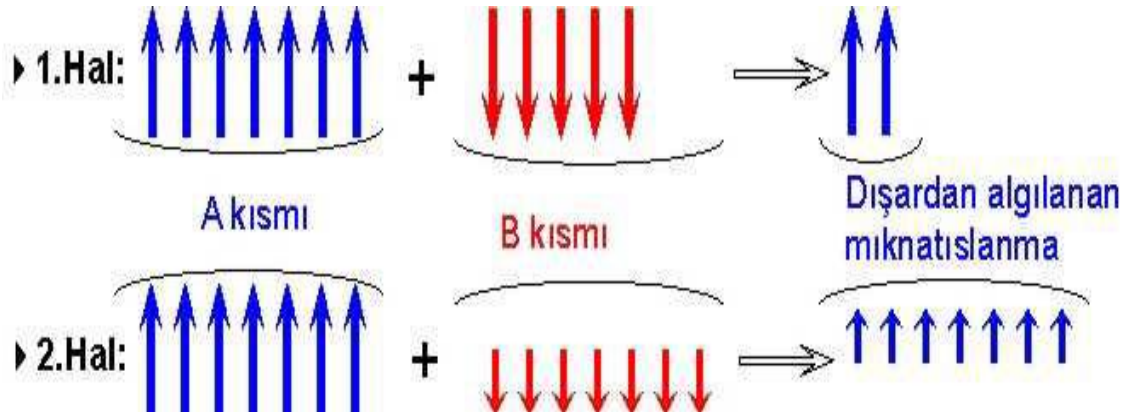
Antiferromanyetik maddelerin mıknatıslanması dışa yansımadığı halde (dışarıdan algılanamadığı halde) ferrimanyetik maddelerin mıknatıslanması dışa yansır (maddenin dışında algılanabilir). Ferrimanyetik maddeler nasıl dışa yansıyan bir kalıcı mıknatıslanma kazanabiliyor? Bunun için iki olasılık vardır:

- Birim kristalin “A” ve “B” kısımlarında eşit sayıda atom bulunmayabilir veya
- “A” ve “B” kısımlarında eşit sayıda atom bulunmakla birlikte, “A” ve “B” kısmını dolduran atomların spin momentlerinin büyüklükleri birbirinden farklıdır.

Bu iki olasılığın hangisi geçerli olursa olsun birim hücre, şekilde gösterilmeye çalışıldığı gibi dışa yansıyan net mıknatıslanma gösterir.

Ferrimanyetik maddeler de domen yapısına sahiptir.

- Her domenin kendisine özgü mıknatıslanma doğrultusu vardır.
- Hiçbir dış alan olmasa da ferrimanyetik maddeler kendiliğinden kalıcı mıknatıslanma kazanabilirler.



Şekil 3.5. Ferrimanyetik bir malzemenin birim hücresi.

Ferrimanyetik maddeler de manyetik histerisiz gösterir. Domenlerin uygulanan dış alana karşı davranışları ferromanyetik maddelerdeki gibidir. Ferrimanyetik maddeler ısıtılınca, ısı enerjisinin kristal şebekesinde neden olduğu bozucu titreşimler nedeniyle Curie sıcaklığında ( $T_c$ ) kalıcı mıknatıslanmalarını yitirip paramanyetik hale dönüşürler (Gould and Tobochnik, 2006).

### 3.3. Curie Sıcaklığı

Spinleri  $S$  olan ve birim hacimde  $N$  sayıdaki iyonların oluşturduğu bir paramagnet göz önüne alınsın. Manyetik momentleri birbirine paralel olmaya zorlayan bir etkileşim varsa bir ferromagnet oluşacaktır. Böyle bir etkileşmenin varlığı kabul edilsin ve buna değiş-tokuş alanı densin. Bu alana moleküler alan veya bunu ilk kez düşünen Pierre Weiss' in anısına Weiss alanı da denir. Isısal çalkantı etkisi değiş-tokuş alanının yönlendirme etkisine zıt yönde olur ve yüksek sıcaklıklarda spin düzenini yok eder. Bu alanın büyüklüğü  $10^3$  T kadar olabilir.

Manyetik her atomun manyetizasyona orantılı bir alan etkisinde olduğu varsayılır;

$$B_E = \lambda M$$

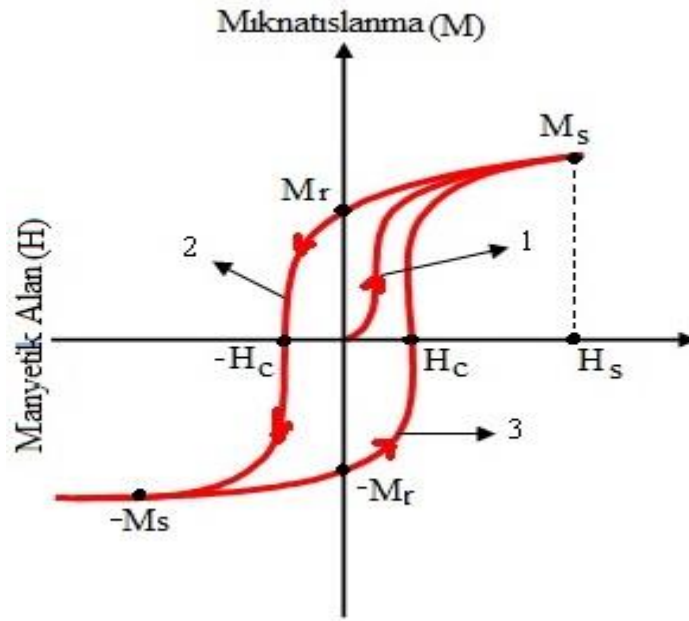
Burada  $\lambda$  sıcaklıktan bağımsız sabittir. İşte böyle bir malzeme için kalıcı manyetizasyonun kaybolduğu sıcaklığa  $T_c$  Curie sıcaklığı denir (Kittel, 2005).  $T < T_c$  olan düzenli ferromanyetik faz ile  $T > T_c$  olan düzensiz paramanyetik fazı birbirinden ayırır.

### 3.4. Manyetik Histerisiz (M-H) Eğrisi

Manyetizasyon ölçümü (Histerisiz eğrisi) maddelerin manyetik karakteristiklerinin tespit edilmesi için yaygın olarak yapılan ölçümlerden biridir. Şekil 3.6' da tipik bir histerisiz eğrisi görülmektedir.

Manyetik maddenin kullanılacağı alanlara uygun manyetik özellikler taşıyıp taşımadığı histerisiz eğrisi analiz edilerek anlaşılabilir. Histerisiz eğrisinden manyetik maddenin doyum manyetizasyonu (saturasyon), zorlayıcı alanı (koersivite), manyetik geçirgenliği ile ilgili bilgiler elde edilebilir (Karaağaç, 2007).

Bu bakımdan bu eğrilerin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Buna göre histerisiz eğrisini oluşturan süreç incelenirse;



Şekil 3.6. Manyetik histerisiz (M-H) eğrisi.

Ferromanyetik maddeye bir dış manyetik alan uygulandığında, atomik dipoller dış manyetik alanla aynı yönde yönelirler. Uygulanan dış manyetik alanın artırılmasıyla tüm dipoller aynı yönde yönelerek madde doyum mıknatıslanması durumuna gelir ( $M_s$ ). Daha sonra dış manyetik alan azaltılsa bile bu yönelimin büyük bir kısmı değişmeden kalır. Dış manyetik alan sıfır olduğu anda maddedeki mıknatıslanma artık kalıcı mıknatıslanmadır ( $M_r$ ). Uygulanan dış manyetik alanın negatif yönde artırılmasıyla maddedeki

mıknatıslanma azalır ve belli bir manyetik alan değerinde sıfır olur. Manyetik alanın bu değerine koersivite denilir ( $-H_c$ ).

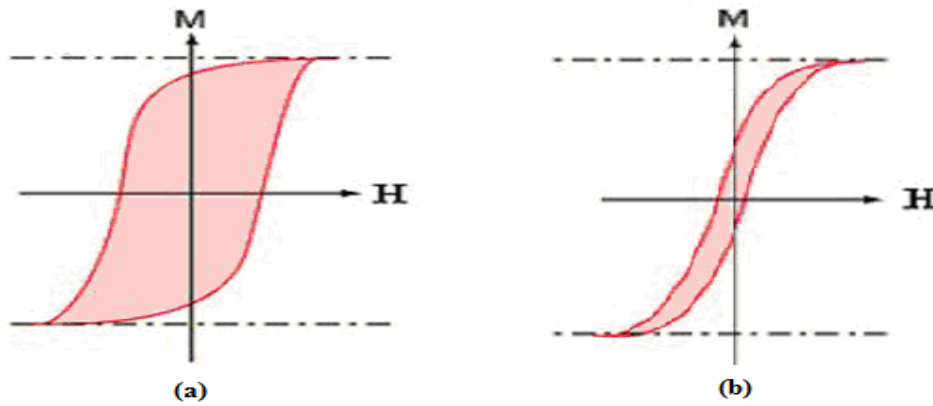
Dış manyetik alanın negatif yöndeki arttırılması sürerse madde negatif yönde mıknatıslanmaya başlar ve pozitif yönde olduğu gibi doyum mıknatıslanma değerine ulaşır ( $-M_s$ ). Sonrasında manyetik alan artmaya devam etse bile mıknatıslanma sabit kalır ve artmaz. Bu noktadan sonra manyetik alan azaltılarak sıfır olursa negatif mıknatıslanmanın büyük bir kısmı değişmeden kalarak maddede kalıcı negatif mıknatıslanma oluşur ( $-M_r$ ).

Sıfır olan manyetik alan pozitif yönde arttırılırsa maddenin negatif mıknatıslanması giderek azalır ve manyetik alanın belli bir değerinde sıfır olur. Bu değer pozitif koersivite değeridir ( $H_c$ ). Manyetik malzemeler sahip oldukları zorlayıcı alana göre ikiye ayrılmaktadırlar. Zorlayıcı alanı 125 Oe' den küçük olan malzemelere yumuşak, büyük olan malzemelere ise sert manyetik malzeme adı verilir (Cullity ve Graham, 2009).

Manyetik alanın artmasıyla maddedeki mıknatıslanma tekrar doyum mıknatıslanma değerine ulaşır. Böylece tam bir histerisiz çevrimi gerçekleşmiş olur.

Şekil 3.7' de Sert ve yumuşak mıknatıslık özelliklerine sahip malzemelerin histerisiz eğrileri görülmektedir (Göktaş, 2007).

Histerisiz eğrisinin alanı yumuşak mıknatıslık özelliklerine sahip maddelerde küçük iken sert mıknatıslık özelliklerine sahip maddelerde daha büyüktür (Karpuz, 2006). Yumuşak manyetik malzemeler yüksek başlangıç geçirgenliği ve düşük koersiviteye sahiptir. Bu özelliğe sahip malzemeler uygulanan oldukça düşük manyetik alanla doyum mıknatıslanmasına ulaşırlar (kolayca manyetik ve demanyetik olurlar) ve enerji kaybının düşük olduğu histerisize sahip olurlar (Calister, 2004).

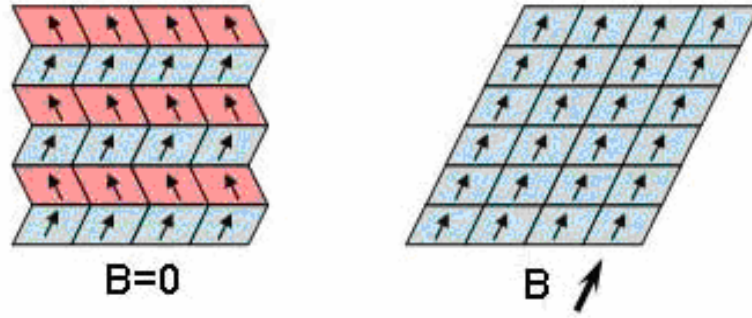


**Şekil 3.7. (a)** Sert mıknatıslık özelliklerine sahip malzemenin, **(b)** Yumuşak mıknatıslık özelliklerine sahip malzemenin histerisiz eğrisi (Göktaş, 2007).

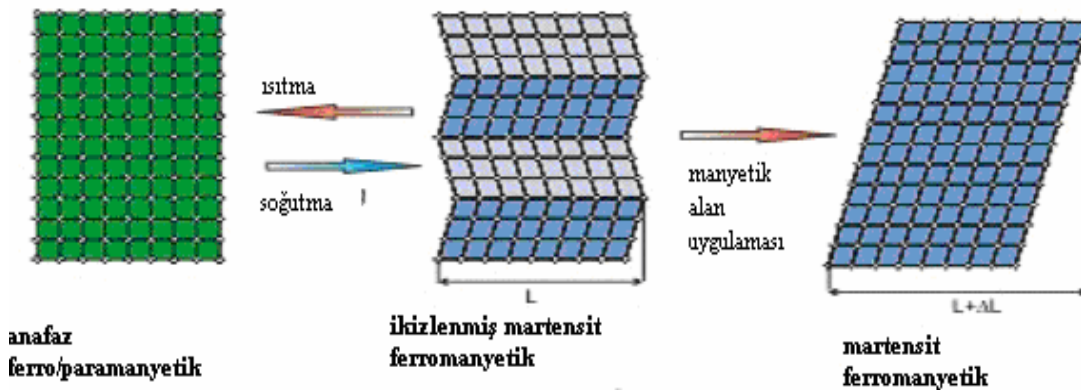
#### 4. FERROMANYETİK ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR (FSMA)

Şekil hatırlama alaşımlarında gözlenen şekil hatırlama etkisi, termo-mekanik davranış, pseudoelastik davranış ve ferromanyetik şekil hatırlama etkisi ile karakterize edilebilir. Ferromanyetik malzemedeki şekil hatırlama etkisi, malzemeye bir manyetik alan uygulandığını gösterir. Ferromanyetik şekil hatırlama etkisi düşük sıcaklık martensit fazdaki tek kristal  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  alaşımının manyetik alanla zorlanma oluşturma çalışmaları esnasında ilk olarak Ullakko ve grubu tarafından bildirilmiştir (Ullakko vd., 1997).

Geleneksel şekil hatırlamalı alaşımların dezavantajı olan yavaş cevap vermesi ferromanyetik özellik gösteren şekil hatırlamalı alaşımlarla giderilebilir. Bu malzemeler çok fonksiyonlu malzemeler sınıfındadır ve ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşım olarak adlandırılır. FSMA' lar termoelastik martensit dönüşümle birlikte ferromanyetik özellik gösterirler (Chernenko ve Besseghini, 2008).



Şekil 4.1. Ferromanyetik şekil hatırlama etkisi (Işık, 2007).



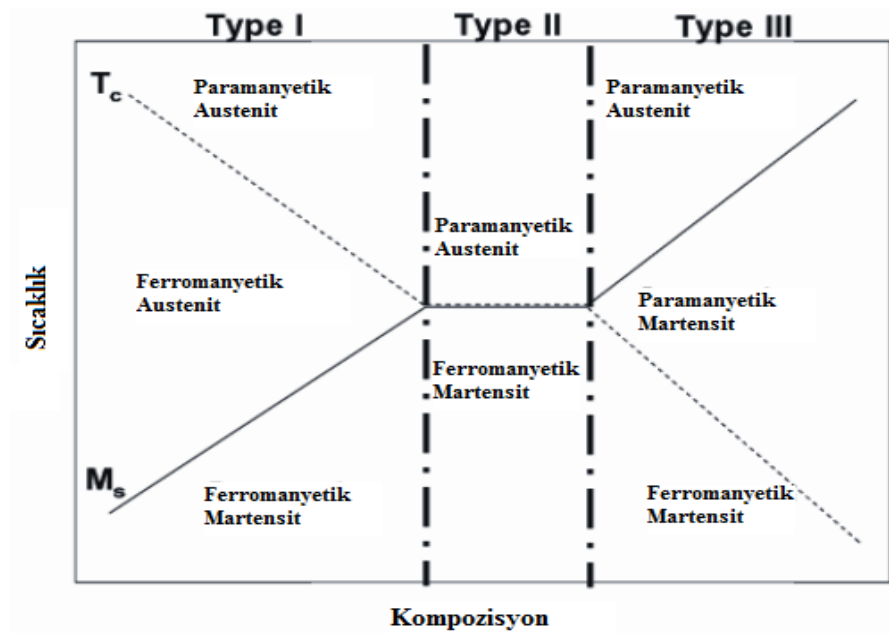
Şekil 4.2. Ferromanyetik şekil hatırlama alaşımlarından elde edilen sıcaklık kontrollü sensörlerin çalışma mekanizması.

Ferromanyetik malzemeler atomik düzeyde uzun mesafeli manyetik düzen fenomeni sergilerler. Bu fenomen, bir alanda çiftlenmemiş elektron spinlerinin birbirleri ile paralel olarak sıralanmasına neden olur. Şekil 4.1' de ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımların yapısında oluşan martensit varyantların manyetik alan uygulanması ile değişimi, Şekil 4.2' de ise ferromanyetik şekil hatırlama alaşımlarından elde edilen sıcaklık kontrollü sensörlerin çalışma mekanizması görülmektedir (Işık, 2007).

#### 4.1. Ferromanyetik Şekil Hatırlama Etkisi Gösteren Alaşımlar

Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlarda meydana gelen dönüşümlerin uygun tarifi için beş sıcaklık değerine ihtiyaç vardır. Bunlardan dördü tersinir martensit dönüşümü, beşincisi ferromanyetiklikten paramanyetik davranışa dönüşüm sıcaklığı olan  $T_c$  Curie sıcaklığıdır.

Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlarda tersinir martensit faz dönüşümü tek sıcaklık değerinde değil bir sıcaklık aralığında meydana gelir. Her faz dönüşümü için iki sıcaklık değeri tarif etmek gereklidir. Soğutma esnasında martensit başlama ( $M_s$ ) ve martensit bitiş ( $M_f$ ) tanımlanır. Isıtma esnasında austenit başlama ( $A_s$ ) ve austenit bitiş ( $A_f$ ) tanımlanır.



Şekil 4.3. Üç çeşit FSMA davranışının faz diyagramının şematik gösterimi (Heill, 2005).



Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımları, martensit ve manyetik davranışa göre sınıflandırmayı Oikawa ve arkadaşları üç farklı çeşit halinde gruplandırmışlardır. Bu davranışlar Tip1, Tip2 ve Tip3 olarak adlandırılmıştır. Martensit ve manyetik dönüşümün devamını Oikawa ve arkadaşları, 'yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa geçişte bu dönüşümler meydana gelir' diye tanımlanmışlardır. Tip 1 FSMA' da; paramanyetik austenit manyetik dönüşümle ferromanyetik austenit olur. Tip 2 FSMA' larda, paramanyetik austenit, martensit ve manyetik dönüşüm olarak (eş zamanlı olarak) ferromanyetik martensit olur. Tip 3 FSMA' larda, paramanyetik austenit martensit olarak paramanyetik martensit'e, sonra manyetik dönüşümle ferromanyetik martensit'e dönüşür. Şekil 4.3' de bütün FSMA davranışların manyetik ve martensit geçişleri şematik olarak verilmiştir (Heill, 2005).

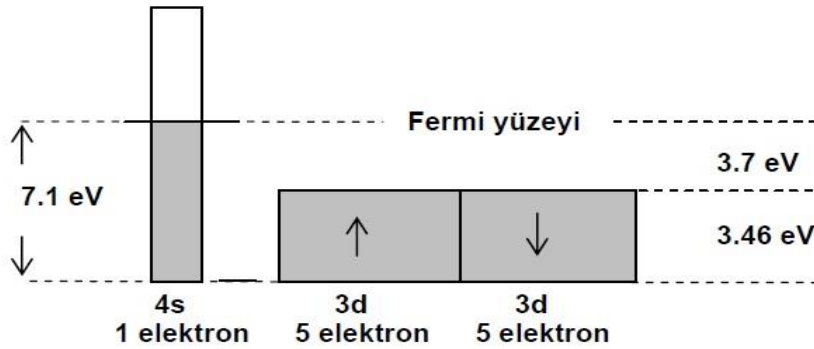
#### **4.2. Ferromanyetik Düzen ve Geçiş Metallerinin Ferromanyetizması**

Ferromanyetik maddeler diamanyetik ve paramanyetik maddelerden oldukça farklı bir karakter taşırlar. Bu maddelerde M mıknatıslanma şiddeti ile H arasındaki basit doğrusal ilişki oldukça karmaşık bir hal alır. Ferromanyetik bir maddede manyetik alanın küçük değerleri için M alan şiddeti ile orantılı olarak değişirken M' nin bir sınır (doyma) değerine ulaşmasından sonra aradaki ilişki doğrusal olmaktan uzaklaşır. Ayrıca ferromanyetik maddeler manyetik alan ortadan kalksa bile mıknatıslık karakterlerini sürdürürler. Başka bir deyişle bu tür bir madde için manyetik alan olmasa bile daima sıfırdan farklı net bir manyetik moment mevcuttur. Bu özellik alan şiddeti ile manyetik indüksiyon (B) arasındaki histerisiz ilişkisi veya 'artık mıknatıslanma' olayı ile kendini belli eder. Ferromanyetik davranışı diamanyetik ve paramanyetik durumlardan ayıran diğer bir fark ise bu davranışın yalnızca kristal yapıya sahip katılara özgü olmasıdır. Isıtılarak sıvı veya gaz haline getirilen ferromanyetik bir madde bu özelliğini Curie sıcaklığı üzerinde kaybederek paramanyetik özellik kazanır.

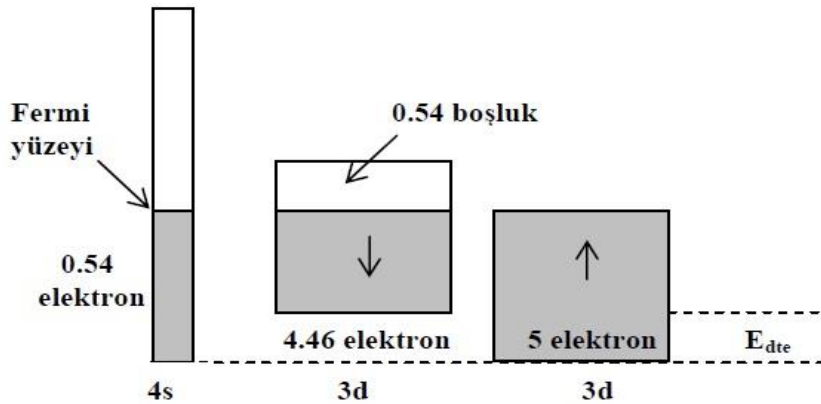
Ferromanyetik maddelerde rastlanılan kalıcı mıknatıslık özelliği ve buna yol açan fiziksel unsurların nitelikleri, bu maddelerin enerji bant yapılarına bakılarak anlaşılabilir. Olayın daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla ferromanyetik özellik gösteren ve göstermeyen iki metalin enerji bant yapısı kıyaslanabilir. Bu amaçla periyodik cetvelin 4. grubunda yer alan geçiş elementlerinin sonunda nikelden (  $Z = 28$  ) hemen sonra gelen bakırın (  $Z = 29$  ) enerji bantlarının yapısına bakılabilir. Bu gruptaki elementlerin ortak özellikleri 3d

katmanları tamamen dolmamış olmasına rağmen daha üstteki 4s katmanlarına elektron yerleşmiş olmasıdır.

Bakır atomu, kendisinden hemen önceki sırada bulunan nikel atomunun 3d katmanındaki tek elektron eksikliğini tamamlamış ve bu katman 10 elektronla tamamen doldurulmuş durumdadır. İki elektron alabilen 4s katmanı ise bakırın tek değerlilik elektronunu barındırmaktadır. Serbest bakır atomlarından bakır kristaline geçildiğinde 3d ve 4s katmanlarının yerini Şekil 4.4' de görülen enerji bantları alır. Bunlardan atom başına iki elektron alabilecek durumda olmasına karşın bir elektron almış dolayısıyla da yarısına kadar dolu bulunan 4s bandında elektronla dolu durumdaki en üst enerji düzeyinin enerjisi (Fermi enerjisi)  $F_E = 7.1 \text{ eV}$  dur. Dolu durumdaki 3d bandı ise atom başına 10 elektrondan beşinin spinlerinin aynı bir yönde diğer beşinin ise buna karşı yönde yönelmesi sonucu iki kısmi banda ayrılmıştır. 3d bandının toplam manyetik momenti sıfır olduğundan bakır ferromanyetik olamayan bir maddedir.



Şekil 4.4. Bakırın 3d ve 4s enerji bantlarının yapısı, enerjileri ve Fermi düzeyinin konumu.



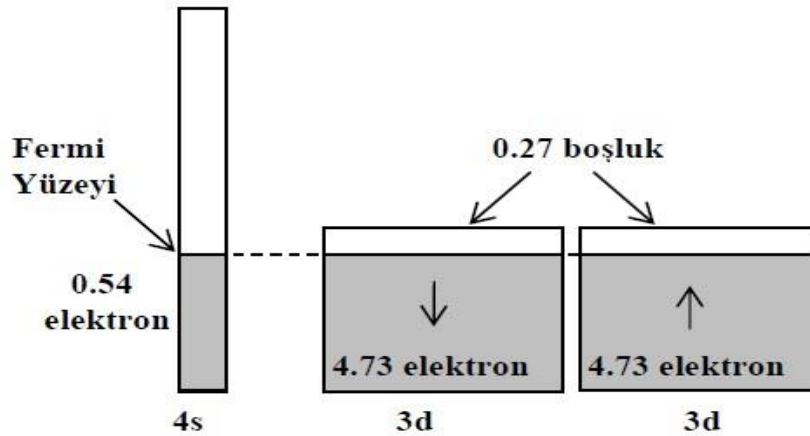
Şekil 4.5. Nikelin mutlak sıfır sıcaklığındaki bant yapısı.

Şekil 4.5' de 3d ve 3d kısmi bantları Edte (değiş-tokuş enerjisi) sonucu birbirinden bir miktar uzaklaşmıştır. Kısmi bantlardan birisi, atom başına 5 elektronla tamamen dolu, diğeri atom başına 0.54 kadar bir boşluk bulunacak biçimde kısmen dolu olup bunun sonucunda da toplam net manyetik moment sıfırdan farklıdır.

Periyodik cetvelde bakırın hemen önünde yer alan nikel ise 3d enerji katmanında 8 elektron bulundurmakla kısmen dolu olmasına karşılık daha üstteki 4s katmanı iki elektron alınarak tamamen doldurulmuştur. Böylelikle nikel atomunun 3d katmanında iki çiftlenmemiş elektron bulunmakta bu ise net manyetik momentin sıfırdan farklı olmasına yol açmaktadır. Nikel kristalinde ortaya çıkan 3d ve 4s enerji bantlarının yapısı Şekil 4.5' de gösterilmiştir.

Nikel kristalinin bant yapısı madde Curie sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara çıkarıldığında Şekil 4.6' daki görünümü kazanır. Bu sıcaklık bölgesinde termik enerjinin değiş-tokuş enerjisinden daha baskın karakter kazanması ile nikel kristali artık ferromagnetik özelliğini yitirip paramanyetik hale gelir.

Sonuç olarak, herhangi bir kristalde elektronlar arasındaki değiş-tokuş enerjisi (Edte) enerjisinde meydana gelen azalma miktarı Fermi enerjisindeki ( $E_F$ ) artma miktarından büyükse o madde daha büyük bir manyetik momente, daha büyük bir mıknatıslanmaya sahip olarak ferromanyetik davranış gösterir. Böylesi bir durum yalnızca sınırlı sayıda birkaç element (Fe, Co, Ni,...), bazı alaşımlar veya metal tuzlarında gözlenebilir. Bu maddelerde bile kendiliğinden mıknatıslanmayı (kalıcı mıknatıslık) sağlayan enerji farkının atom başına 0.1-0.2 eV' dan daha büyük olmadığı saptanmıştır (Gündüz, 1992).



**Şekil 4.6.** Nikelin Curie sıcaklığı ( $T \cong 631$  K) üzerindeki bant yapısı. Net manyetik momentin sıfır olması nedeniyle madde ferromanyetik özelliğini yitirmektedir.

## 5. MATERYAL VE METOD

### 5.1. Numune Hazırlama

Bu çalışmada, istenilen alaşımları hazırlamak için % 99,9 saflıkta Co, % 99,7 saflıkta Al, % 99,9 saflıkta Ni ve % 99,9 saflıkta Cr (Merk marka -325 merch) toz numuneler Tablo 5.1' de belirtilen oranlarda karıştırılarak ~ 15 MPa basınç altında 13mm çapında peletler haline getirildi. Pelet yapılan  $Co_{86-x} Al_{14} Cr_x$  ( $x = 0$  ve 4 atomikçe) ve  $Co_{35} Al_{25} Ni_{40-y} Cr_y$  ( $y = 0$  ve 4 atomikçe) alaşımları, daha sonra Arc Melter yöntemi ile eritildiler. Bu çalışmada kullanılan Arc Melter eritme sistemi Şekil 5.1' de görüldüğü gibidir. Bütün numuneler homojenleştirilmek için 1200 °C de 24 saat bekletilip tuzlu-buzlu suda soğutuldular.

Alaşımların Elektron konsantrasyonu ( $e/a$ ) oranları aşağıdaki formül kullanılarak hesaplandı,

$$\frac{e}{a} = \sum_i (valans)_i \times (atomik\ oran)_i$$

burada;  $i$ , alaşımlardaki elementlerin toplamını gösterir. Atomik Yüzde (%at), Ağırlık Yüzde (%wt) oranları ise ;

$$\frac{e_v}{a} = f_A \cdot e_v^A + f_B \cdot e_v^B$$

formülüyle hesaplandı. Burada  $\frac{e_v}{a}$  oranı elektron konsantrasyonu,  $f_A$  ve  $f_B$  ise elementlerin atomik oranıdır.

Martensit fazının  $e/a$  oranının küçük olması, örgü deformasyonunun da az olduğunu gösterir. Bu durum ise dönüşüm esnasında enerji değişikliğinin de küçük olmasına yol açar; bu küçük enerji değişikliği de martensitik dönüşüm sıcaklığını azaltacak şekilde malzemeyi etkiler (Akis vd., 2011).

Tablo 5.1' de hazırlanan alaşım oranları ile hesapladığımız  $e/a$  oranları görülmektedir.  $e/a$  oranları incelenirse  $e/a > 7,70$  olduğu görülür.

Borisenko ve arkadaşları, elektron konsantrasyonunun  $e/a > 7,65$  olduğu bölgede, martensit dönüşümün paramanyetik bölgede gerçekleştiğini ve yüksek sıcaklık bölgesinde martensit dönüşümün olmasının yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı malzemelerin uygulamalarında cazip bir özellik olarak ortaya çıktığını belirtmişlerdir (Borisenko vd., 2006).



**Şekil 5.1.** Ark yöntemi ile eritme sistemi (Arc- Melter).

**Tablo 5.1.** Hazırlanan toz numunelerin Atomik Yüzde (%at), Ağırlık Yüzde (%wt) ve Elektron konsantrasyonu (e/a) değerleri.

| Numune Adı        | Atomik Yüzde (% at) |    |    |    | Ağırlık Yüzde (% wt) |       |       |       | e/a  |
|-------------------|---------------------|----|----|----|----------------------|-------|-------|-------|------|
|                   | Co                  | Al | Ni | Cr | Co                   | Al    | Ni    | Cr    |      |
| Co - Al           | 86                  | 14 | -  | -  | 93                   | 7     | -     | -     | 8,16 |
| Co - Al - Cr      | 82                  | 14 | -  | 4  | 89,189               | 6,971 | -     | 3,838 | 8,04 |
| Co - Al - Ni      | 35                  | 25 | 40 | -  | 40,63                | 13,2  | 46,15 | -     | 7,9  |
| Co - Al - Ni - Cr | 35                  | 25 | 36 | 4  | 40,78                | 13,33 | 41,77 | 4,112 | 7,74 |

## 5.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) - EDX Analizi

Günümüz elektron mikroskopları ile malzemelerin mikro yapı ve bileşimleri hakkında ayrıntılı bilgiye erişmek mümkündür. Bunun için yapılması gereken problemin çözümü için uygun mikroskobu seçmek ve gerekli inceleme yöntemlerini uygulamaktır.

SEM, mikroskobun elektron tabancasından çıkan elektron demetini hedefteki numunenin yüzeyinde küçük bir noktaya çarptırarak, numuneden çıkan elektronik sinyalleri toplayan ve çözümleyen bir alettir. Esas olarak, havası boşaltılmış bir kolon içindeki elektron tabancasının meydana getirdiği elektronlar yönlendirilerek kolonun alt

kısmına yerleştirilmiş numunenin yüzeyinde küçük bir noktaya çarptırılır. Geri saçılan küçük açılı elektronlar yüzeydeki girinti ve çıkıntılarla girişime uğrayarak, elektron sinyallerini oluşturan ikincil geri saçılma elektronlarını meydana getirirler.

SEM görüntüleme yöntemiyle, parlatılmış veya dağlanmış düzgün yüzeylerden yüksek büyütmelemlerde malzemelerin mikro yapılarını gösteren görüntüler elde edilir. Düzgün bir yüzeyden elde edilen geri saçılan elektron görüntüsünün aydınlığı, incelenen malzemenin atom numarasıyla doğrudan ilişkilidir. Büyük atom numaralı elementler, küçük atom numaralı elementlere göre elektronların geri saçılmaları daha olasıdır. SEM, hem parlatılmış hem de pürüzlü yüzeylerden net görüntüler verebilir. SEM ile birlikte bir enerji dispersif x-ışınları (EDX) detektörü kullanmak suretiyle, malzeme üzerindeki küçük parçacıkların (fazların) kimyasal analizleri yapılabilir. Sınırlayıcı bir takım faktörlere rağmen, SEM analiz yöntemleri malzemeler hakkında pratik olarak değerli bilgiler vermektedir.

EDX ile maddenin hangi elementlerden veya fazlardan hangi miktarlarda meydana geldiği belirlenebilir. EDX analizi elektron-madde etkileşimi sonucunda oluşan x-ışınlarının enerji seviyeleri üzerinden analiz eden, pratik ve hızlı bir x-ışını inceleme sistemidir. Alaşımların üretilen oranlarla uyum içinde olup olmadığına bakılmak için, EDX ölçümleri; Jeol JSM 7001F SEM-EDX cihazı kullanılarak yapılmıştır.

### **5.3. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçümü**

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), şekil hatırlamalı alaşımların faz dönüşüm sıcaklığını belirlemede sıklıkla kullanılan bir cihazdır (Choon vd., 2007).

En çok kullanılan ve en önemli şekil hatırlamalı alaşım karakterizasyon yöntemi DSC ile malzemelerden alınan çok küçük numunelerin ısıtılması ve soğutulması yolu ile absorbe ettiği veya verdiği ısının ölçülmesi ile dönüşüm sıcaklık alanları bulunur. Kullanılan malzemeler çok küçük miktarda (miligram bazında) kullanılır ve numuneler herhangi bir gerilme altında olmadığından ölçüm sonuçları malzemenin gerilmesiz durumdaki dönüşüm sıcaklıklarını verir. Dönüşüm nedeniyle numunenin absorbe ettiği veya verdiği enerjiler endotermik ve ekzotermik pikler olarak hem soğutma hem de ısıtma esnasında ölçülebilir. Piklerin başlangıç ve bitiş noktaları numunenin faz dönüşüm sıcaklıklarını verir (Kök, 2011).



**Şekil 5.2.** Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ölçüm cihazı.

Üretilen alaşımların faz dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek için Şekil 5.2’ de görülen Perkin Elmer Sapphire Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile 20 °C/ dak ısıtma ↔ soğutma hızıyla azot gazı atmosferinde ısı akısı ölçümleri yapılmıştır.

#### **5.4. X - Işını Analizi (XRD)**

Kristal yapı, atomlar ve atom gruplarının belli bir hacimde belli bir düzene sahip olmalarından oluşur. Kristalde X-ışınlarının kırınımına uğraması, kristal yapının özelliklerini incelemeye olanak sağlamıştır. X-ışınlarıyla, kristaldeki atomların dizilimleri ve atomların oluşturdukları düzlemlere karşı gelen bir takım noktaları veya daireleri araştırılmaktadır.

X-ışınları kısa dalga boylu elektro manyetik ışınımlardır. X-ışınları tek renkli değildirler. X-ışınları, çekirdek etrafındaki elektronlar tarafından belirli bir saçılmaya uğratılırlar. Yani kristale yöneltilen X-ışınları, kristal içindeki atomlar tarafından yansıtılır (Cullity, 1966).



**Şekil 5.3.** X-ışını kırınım (XRD) cihazı.

Günümüzde kullanılan modern X-ışını (XRD) cihazları bilgisayar kontrollü olup, sonuçlar çok hassas bir şekilde tespit edilebilmektedir. Bir XRD analizinde sonuçlar şiddet-açı ( $2\theta$ ) diyagramı şeklinde verilmektedir. Elde edilen sonuçlar, analiz edilen malzemenin mikro yapısı hakkında da ipuçları verir. Örneğin çok ince taneli bir malzemenin analizinde kırınım çizgilerinin genişliği artar. Yani tane boyutu küçüldükçe kırınım çizgileri kalınlaşır. Bu kalınlaşmanın ise kırınım çizgisinin yarı maksimum genişliği şeklinde ölçülmesi adet olmuştur (Okumuş, 2006).

Alaşımın hangi fazlarda oluştuğunu belirlemek için kristal yapı analizi Bruker Discover D8 X-ray diffraction (XRD) ile yapılmıştır. Şekil 5.3’ de bu çalışmada kullanılan X-ışını kırınım (XRD) cihazı görülmektedir.

### **5.5. Optik Mikroskop İncelemesi ve Vickers Sertlik Ölçümleri**

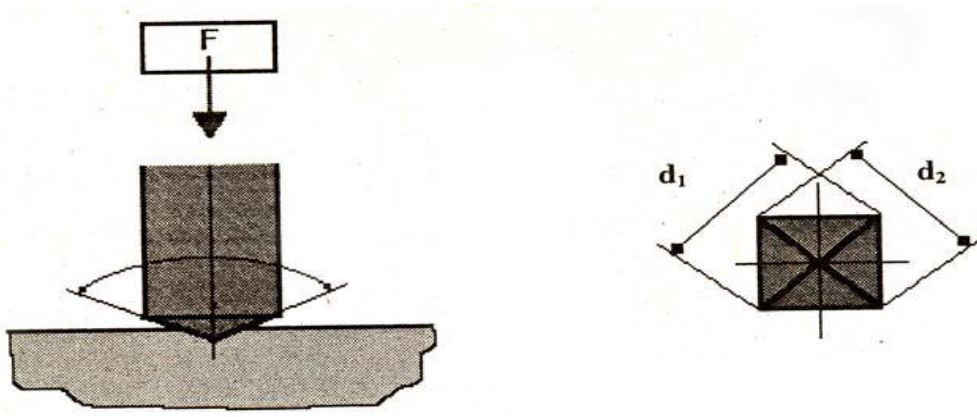
Optik mikroskop, metal ve alaşımların yüzey morfolojisini incelenmesinde kullanılan mikroskoplardır. Işık kaynağından alınan ışık demetleri yansıtıcı aynalar üzerinden önceden hazırlanmış numune yüzeyine düşürülür. Numune yüzeyinden farklı açılarda yansıyan ışık demetleri, objektif ve okülerden geçerek görüntü olarak belirirler.

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 acıda 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 (Salman ve Gülsoy, 2004).

Vickers sertlik ölçme yöntemi, Şekil 5.4' de görüldüğü gibi 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 ibarettir. Bu yöntem, çok sert malzemelerin ölçümlerinde veya daha hassas ölçümler için tercih edilir.



**Şekil 5.4.** Vickers sertlik ölçümünün şematik olarak gösterilmesi (URL-1, Mart 2014).



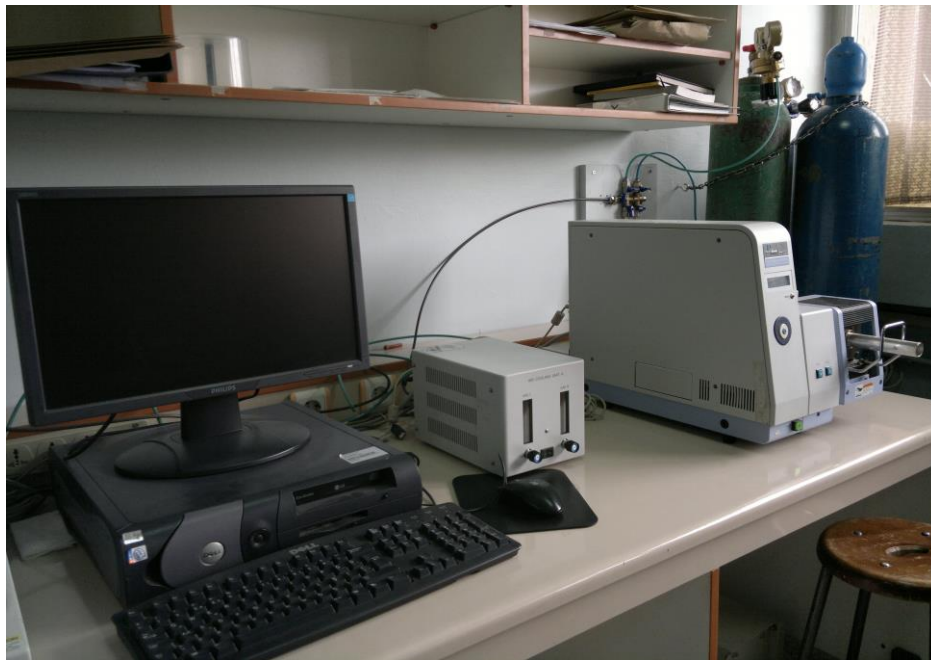
**Şekil 5.5.** Bu çalışmada kullanılan Optik mikroskop.

Optik Mikroskop incelemesi ve Vickers sertlik ölçümlerin yapılabilmesi için alaşımlara polyester ile soğuk kalıplama uygulanmış, daha sonra kalıp halindeki alaşımlara parlatma yapılmıştır. 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 gerçekleştirilmiştir. Dağlama çözeltisi olarak %75 Hidroklorik asit + %25 Nitrik asit kullanılmıştır.

Alaşımların mikro yapısını ve mikrosertliğini incelemek için Nikon Eclipse MA200 marka optik mikroskop ve Emco Test Dura Scan-10 marka mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri  $HV_{0,1}$ ' e göre alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan Optik mikroskop Şekil 5.5' de görülmektedir.

#### 5.6. TG / DTA ile Curie Sıcaklığının ( $T_C$ ) Belirlenmesi

TG / DTA cihazı, şekil hatırlamalı alaşımlar için DSC de gözlemlediğimiz martensit dönüşüm sıcaklığının yanında daha yüksek sıcaklıklarda alaşımda meydana gelen değişimler hakkında bilgi verir. Ayrıca numunelerin DTA eğrisine bakarak numuneye uygulamamız gereken ısıtma sıcaklıkları hakkında bilgi sahibi olunabilir.



Şekil 5.6. Yüksek Sıcaklık Diferansiyel Termal Analiz (TG / DTA) cihazı.

Curie ( $T_c$ ) sıcaklığı, sıcaklık arttırılırken ferromanyetik fazdan paramanyetik faza geçiş sıcaklığı olarak tanımlanır. Curie sıcaklığı altındaki sıcaklıklarda kendiliğinden mıknatıslanma çok yüksektir (Özçelik, 2009).

DTA fırınının üzerine mıknatıs yerleştirilirse numunenin kütlesi bilinen kütlesinden daha az görülür. Tam Curie sıcaklığının olduğu yerde numunenin mıknatıslığı kaybolur, yani numune ferromanyetik halden paramanyetik hale geçer. Numunenin TG’ de görünen kütlesinde ise ani bir artış olur (Brown, 2004).

Bu çalışmada Şekil 5.6’ da görülen Perkin Elmer Diamond marka yüksek sıcaklık diferansiyel termal analiz cihazı (DTA) ile Co-Al, Co-Al-Cr, Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının 20 °C/dak ısıtma hızı ile hava atmosferinde 100-800 °C aralığında manyetik alan altında kütle değişim eğrisi elde edildi. Bu eğrilerden numunelerin Curie sıcaklığı ( $T_c$ ) tespit edildi.

## 5.7. Manyetik Ölçümler

Doyma mıknatıslanması bir manyetik malzemeden elde edilebilecek en büyük mıknatıslanma değeridir. En büyük mıknatıslanma değeri malzeme içerisindeki manyetik bölgelerin hepsinin paralel olması ve aynı yöne yönelmesi ile elde edilir (Mıknatıslanma daha fazla artmaz, çünkü atomik manyetik momentler birbirine paralel yönelmiştir). Doyma mıknatıslanması sıcaklıktan ters orantılı olarak etkilenir. Çünkü ısısal titreşimlerden dolayı atomların manyetik momentlerinin yönelimi değişir ve toplam mıknatıslanma azalır. Doyma mıknatıslanması, sadece ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerde görülmektedir. Diğer manyetik malzemelerde ise bu doyum halinin olmamasının nedeni ısısal titreşimler veya değiş-tokuş etkileşimleridir. Çünkü bu tip etkileşimler örgü içerisindeki atomların manyetik momentlerinin aynı yönelimde olmalarına izin vermemektedirler (Kantarıcı, 2009).

Zorlayıcı alan, manyetik malzemenin mıknatıslanmasını sıfır yapmak için dışarıdan uygulanması gereken manyetik alan değeridir. Manyetik malzemelerde genel olarak zorlayıcı alan değeri 10000 A/m’nin üzerinde olan malzemeler ‘sert manyetik malzemeler’, zorlayıcı alanı 10000 A/m’nin altında olanlar ‘yumuşak manyetik malzemeler’ olarak isimlendirilirler. Sert manyetik malzemelerde manyetik bölgeler kolayca düzenlenemez ve bölge duvarları kolayca hareket edemez. Bunun sağlanması için malzeme güçlü bir manyetokristalografik anizotropiye sahip olmalıdır (Kantarıcı, 2009).

Kalıcı mıknatıslanma ise, manyetik malzeme doyma değerine kadar mıknatıslandıktan sonra alan kaldırıldığında kalan indüksiyonun veya mıknatıslığın değerini tanımlamak için kullanılır (Solak, 2006).

Üretilen alaşım grupları manyetik olduğu için Fiziksel Ölçüm Sistemi (PPMS) (Quantum Dizayn PPMS 9T) manyetik ölçümler için kullanılmıştır. Manyetizasyon ölçümleri oda sıcaklığında -7T ve 7T aralığında alınmıştır.

Bu çalışmada alaşımların saturasyon değeri (doyma mıknatıslanması), koersivite değeri (zorlayıcı alan) ve remenans (kalıcı mıknatıslanma) değerleri M-H eğrisi yardımıyla ölçüldü.

## 6. BULGULAR

### 6.1. SEM - EDX Analizi Sonuçları

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

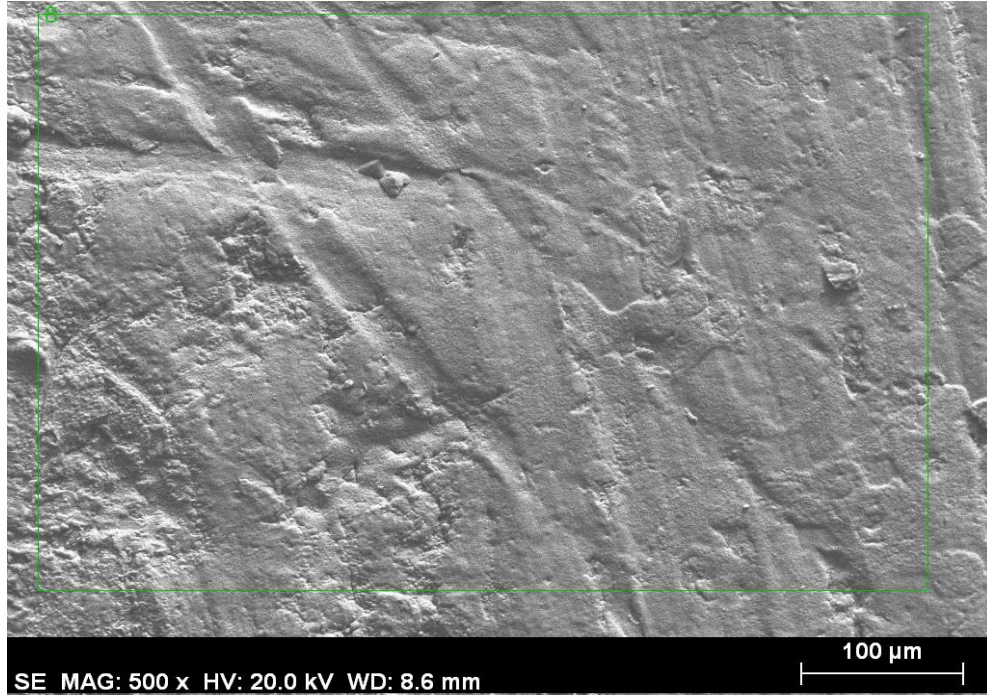
EDX, incelenen alan içerisindeki elementlerin dağılımlarını veya belli bölgelerin yarı-kantitatif analizlerini verir. Alaşımların üretilen oranlarla uyum içinde olup olmadığına bakmak için EDX ölçümleri önemli bir ölçüm tekniğidir.

Yapılan çalışmada, numune hazırlanırken belirlenen oranların EDX ölçüm sonuçlarıyla kıyaslanması durumunda, istenilen oranların yaklaşık olarak elde edildiği söylenebilir. Tablo 6.1’ de bu çalışmada hazırlanan alaşımların EDX ölçümlerinden elde edilen ortalama atomik ve ağırlık yüzdeleri ile hesaplanan elektron konsantrasyonu (e/a) değerleri görülmektedir.

Şekil hatırlamalı alaşımlarda martensit fazının e/a oranının küçük olması, örgü deformasyonunun az olduğunu gösterir. Bu durum, dönüşüm esnasında enerji değişiminin küçük olmasına yol açar, bu küçük enerji değişikliği de martensitik dönüşüm sıcaklığını azaltır (Akis vd., 2011). Tablo 6.1 dikkate alındığında Co-Al alaşımına Cr katkısının e/a oranını arttırdığı, dolayısıyla örgü deformasyonunu da arttırdığı söylenebilir. Co-Al-Ni alaşımına Cr katkısı ise e/a oranını düşürdüğü gibi örgü deformasyonunu da düşürdüğü söylenilebilir.

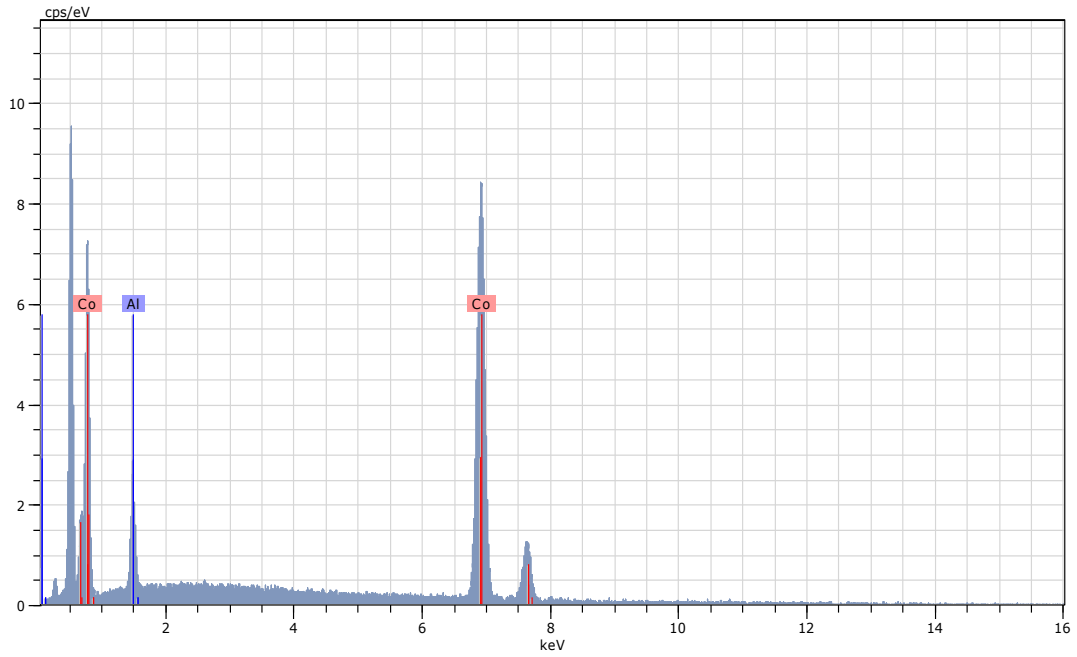
**Tablo 6.1.** EDX ölçümlerinden elde edilen Atomik Yüzde (%at), Ağırlık Yüzde (%wt) ve Elektron konsantrasyonu (e/a) değerleri.

| Numune Adı        | Atomik Yüzde (% at) |       |       |      | Ağırlık Yüzde (% wt) |       |       |      | e/a  |
|-------------------|---------------------|-------|-------|------|----------------------|-------|-------|------|------|
|                   | Co                  | Al    | Ni    | Cr   | Co                   | Al    | Ni    | Cr   |      |
| Co - Al           | 84,5                | 15,5  | -     | -    | 92,20                | 7,79  | -     | -    | 8,07 |
| Co - Al - Cr      | 85,2                | 8,46  | -     | 6,33 | 89,71                | 4,2   | -     | 6,08 | 8,29 |
| Co - Al - Ni      | 43,38               | 17,12 | 39,48 | -    | 47,90                | 8,67  | 43,42 | -    | 8,35 |
| Co - Al - Ni - Cr | 34,33               | 25,34 | 36,29 | 4,03 | 40,08                | 13,54 | 42,21 | 4,15 | 7,70 |



Şekil 6.1. Co-Al alaşımlarının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü.

Şekil 6.1’ de Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile alınan Co-Al alaşımlarının mikro yapısı görülmektedir. Co-Al alaşımlarının SEM görüntüsünde tane sınırları net olarak görülmemektedir. SEM görüntüsünde yer yer yükseltiler ve çukurluklar dikkat çekmektedir.



Şekil 6.2. Co-Al alaşımlarının EDX spektrum görüntüsü.



**Tablo 6.2.** Co-Al alaşımı için hazırlanan alaşım oranları ile EDX alaşım oranlarının karşılaştırılması.

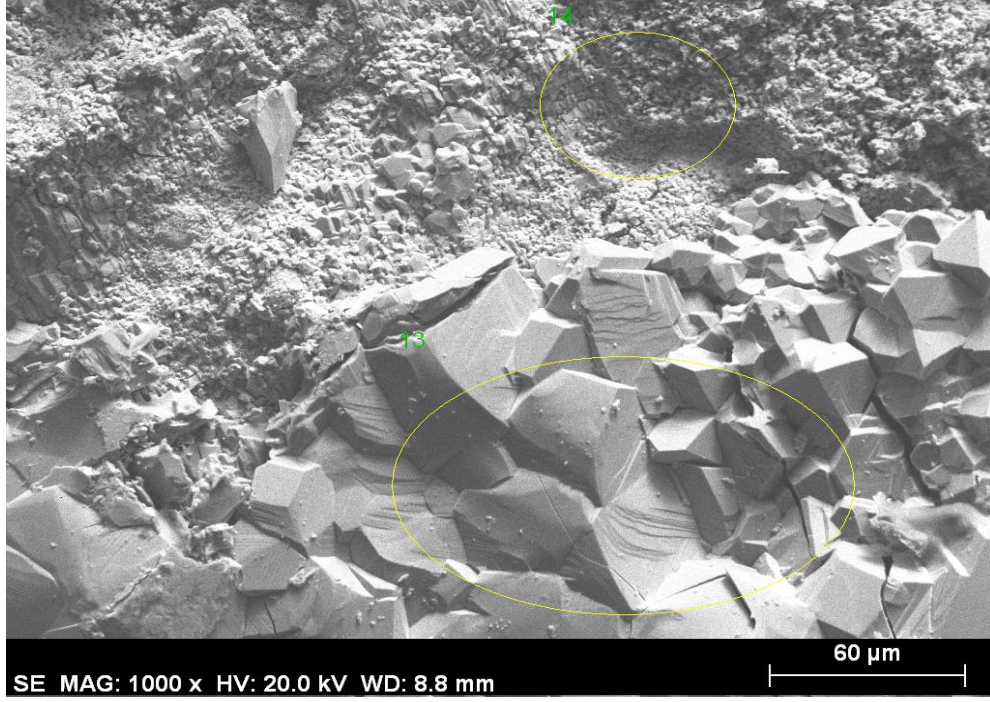
| Co-Al                         | Atomik Yüzde (% at) |      |    |    | Ağırlık Yüzde (% wt) |      |    |    | e/a  |
|-------------------------------|---------------------|------|----|----|----------------------|------|----|----|------|
|                               | Co                  | Al   | Ni | Cr | Co                   | Al   | Ni | Cr |      |
| Hazırlanan<br>Alaşım Oranları | 86                  | 14   | -  | -  | 93                   | 7    | -  | -  | 8,16 |
| EDX Alaşım<br>Oranları        | 84,5                | 15,5 | -  | -  | 92,20                | 7,79 | -  | -  | 8,07 |

Co-Al alaşımının şekil 6.1' deki tüm alandan alınan EDX spektrum görüntüsü şekil 6.2' de verildi. EDX spektrumuna bakıldığında zaman Co ve Al pikleri görölmektedir.

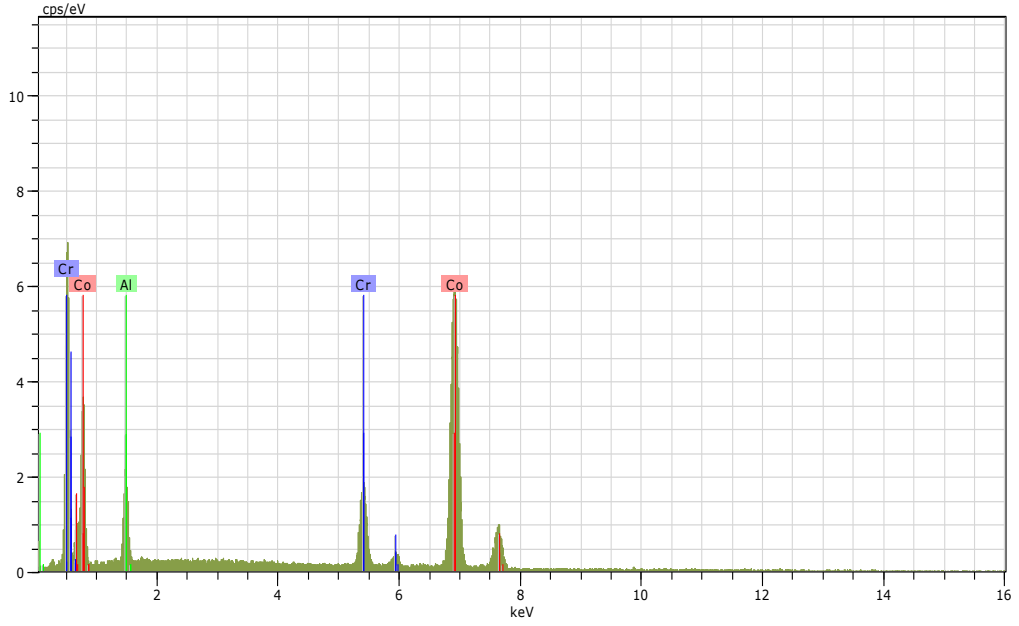
Tablo 6.2' de Co-Al alaşımının hazırlanan atomik yüzde oranları ile ağırlık yüzde oranlarının, EDX ölçümü sonucu elde edilen atomik ve ağırlık yüzde oranlarının karşılaştırılması görölmektedir. %86 Co ve %14 Al oranı EDX ölçümlerinin ortalaması sonucunda atomikçe %84,5 Co ve %15,5 Al olarak bulunmuştur. Benzer şekilde ağırlıkça %93 Co ve %7 Al oranı EDX ölçümlerinin ortalaması sonucunda ağırlıkça %92,20 Co ve %7,79 Al olarak belirlenmiştir. EDX ile ölçölen alaşım oranları, hazırlanan alaşım oranlarına yakın sonuçlardır.

Alaşımların e/a oranlarına bakıldığında üretilen alaşımın e/a oranının daha düşük olduğu görölmektedir, dolayısıyla örgü deformasyonunun bu durumda daha az olduğu söylenebilir.

şekil 6.3' de Co-Al-Cr alaşımının SEM görüntüsü görölmektedir. SEM görüntüsünde iki farklı faz ve bu fazlardaki tane sınırları göze çarpmaktadır. Fazlardan birinde büyük taneler ve tane sınırları dikkat çekmekte, diğesinde ise küçük taneler ve yer yer küçük tane grupları görölmektedir. Farklı fazların oluşmasında; kullanılan elementler, hazırlanan alaşım oranları, homojenizasyon sıcaklığı ve süresi etkili olabilir. Ayrıca ısıl işlem sırasında meydana gelen termal dalgalanmalar da homojenizasyonu ve de numune içerisindeki oluşumları etkilemiş olabilir.



Şekil 6.3. Co-Al-Cr alaşımasının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü.



Şekil 6.4. Co-Al-Cr alaşımasının EDX spektrum görüntüsü.

Şekil 6.4’ de Co-Al-Cr alaşımasının büyük elipsoid bölgeden alınan EDX spektrum görüntüsü ve incelenen bölgedeki elementlerin dağılımı görülmektedir. Şekil 6.4’ de Co ve Cr kaynaklı iki büyük x-ışını piki ve Al kaynaklı bir büyük pik görülmektedir.



**Tablo 6.3.** Co-Al-Cr alaşımı için hazırlanan alaşım oranları ile EDX alaşım oranlarının karşılaştırılması.

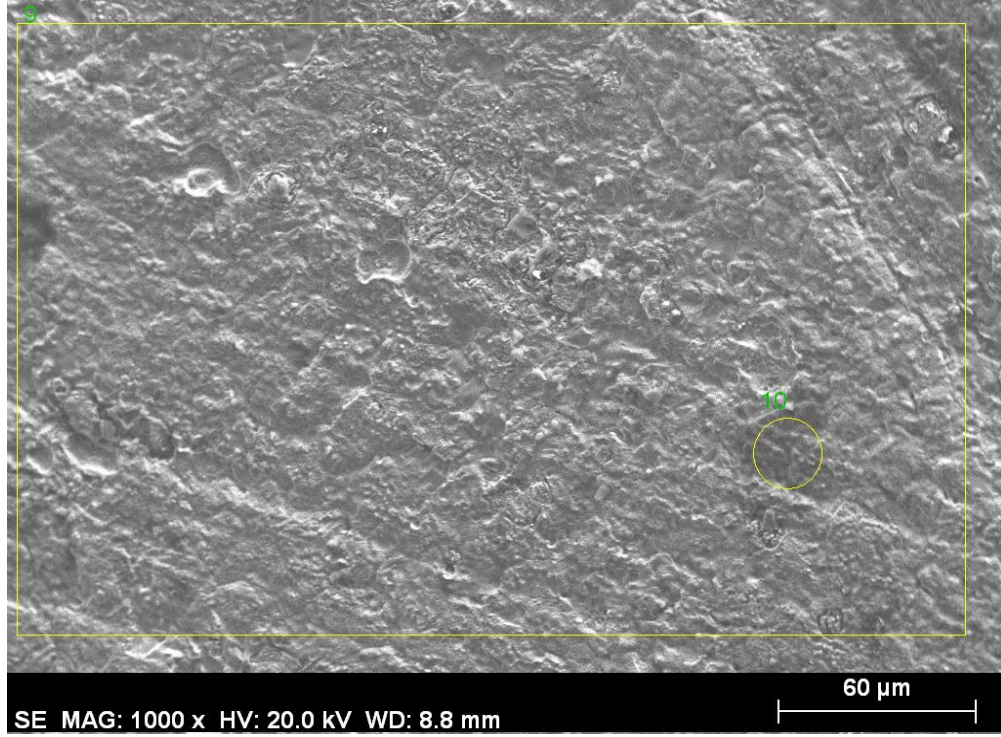
| Co-Al-Cr                      | Atomik Yüzde (% at) |      |    |      | Ağırlık Yüzde (% wt) |       |    |       | e/a  |
|-------------------------------|---------------------|------|----|------|----------------------|-------|----|-------|------|
|                               | Co                  | Al   | Ni | Cr   | Co                   | Al    | Ni | Cr    |      |
| Hazırlanan<br>Alaşım Oranları | 82                  | 14   | -  | 4    | 89,189               | 6,971 | -  | 3,838 | 8,04 |
| EDX Alaşım<br>Oranları        | 85,2                | 8,46 | -  | 6,33 | 89,71                | 4,2   | -  | 6,08  | 8,29 |

Tablo 6.3' de Co-Al-Cr alaşımının hazırlanan atomik yüzde oranları ile ağırlık yüzde oranlarının, EDX ölçümü sonucu elde edilen atomik ve ağırlık yüzde oranlarının karşılaştırılması görölmektedir.

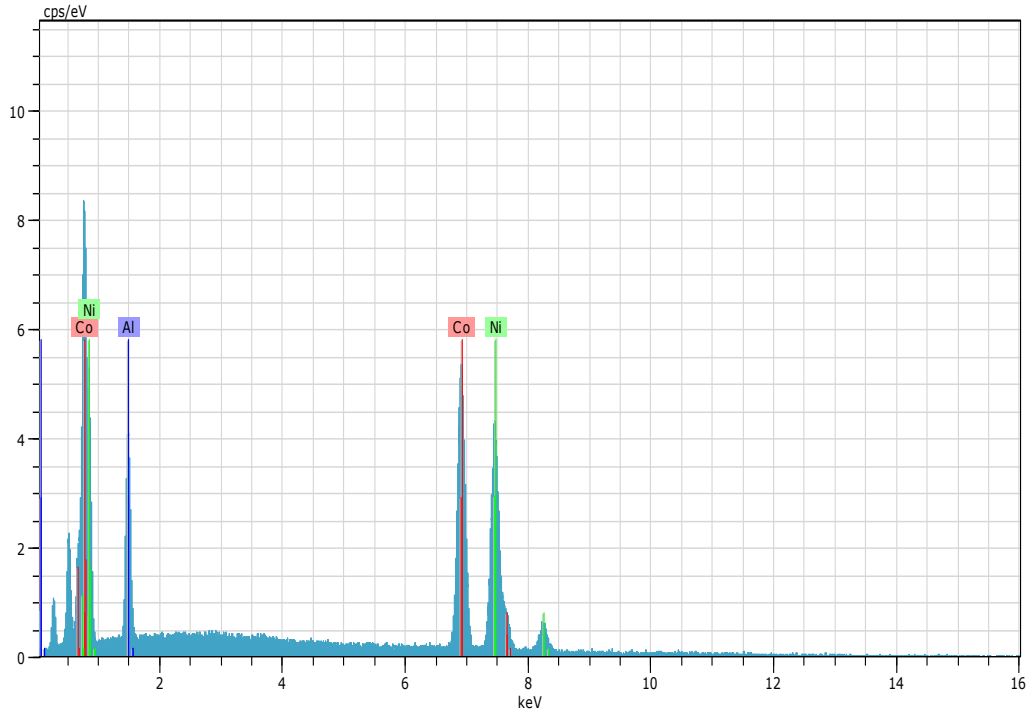
Bu sonuçlara göre, Co-Al-Cr alaşımı atomikçe %85,2 Co, %8,46 Al ve %6,33 Cr olarak, benzer şekilde ağırlıke %89,71 Co, %4,2 Al ve %6,08 Cr olarak belirlendi. EDX ile ölçölen oranlara bakıldığı zaman Al atomik yüzde oranının hazırlamış olduğumuz orandan az olduğu görölr. Alüminyumun, homojenleştirme işlemleri esnasında oksitlenmiş olması ve buna buna bağlı olarak kayıpların görölmesi muhtemeldir. Tablo 6.3' de e/a oranlarına bakıldığında üretilen alaşımın e/a oranının hazırlanan numuneden daha büyük olduğu görölmektedir. Fakat 8,29 olan e/a oranı değeri CoAl bazlı bir alaşımın şekil hatırlama özelliği sergilemesi için beklenen sonuçtur.

şekil 6.5' de Co-Al-Ni alaşımının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü görölmektedir. Alaşımın SEM görüntüsünde çökelti fazları ve yer yer küçük taneler dikkat çekmektedir.

şekil 6.6' da Co-Al-Ni alaşımının EDX spektrum görüntüsü görölmektedir. Co-Al-Ni alaşımına ait EDX spektrum görüntüsü tüm bölgeden alınan x-ışını piklerinin altındaki alanlarla orantılı olarak değişimini gösterir.



Şekil 6.5. Co-Al-Ni alaşımlının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü.

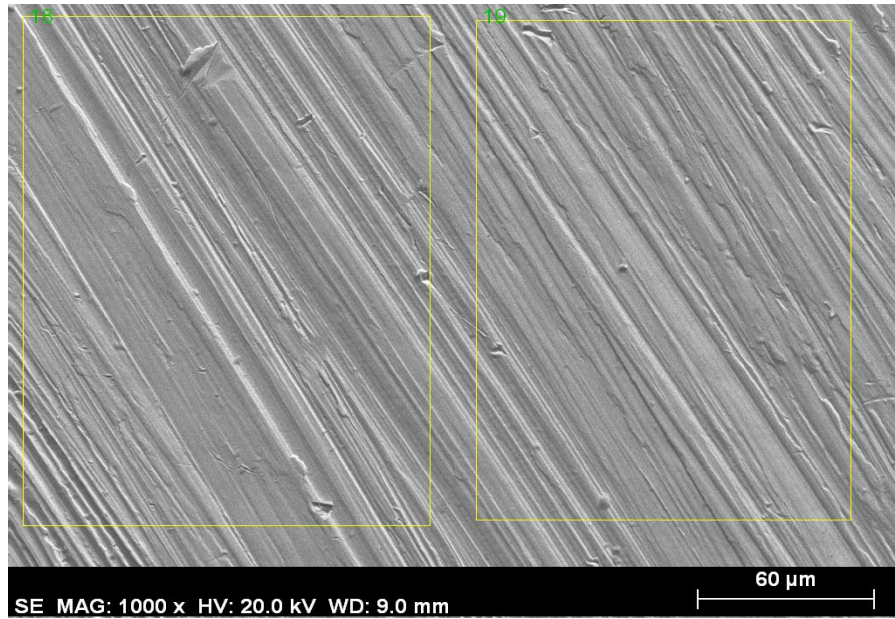


Şekil 6.6. Co-Al-Ni alaşımlının EDX spektrum görüntüsü.

**Tablo 6.4.** Co-Al-Ni alaşımı için hazırlanan alaşım oranları ile EDX alaşım oranlarının karşılaştırılması.

| Co-Al-Ni                      | Atomik Yüzde (% at) |       |       |    | Ağırlık Yüzde (% wt) |      |       |    | e/a  |
|-------------------------------|---------------------|-------|-------|----|----------------------|------|-------|----|------|
|                               | Co                  | Al    | Ni    | Cr | Co                   | Al   | Ni    | Cr |      |
| Hazırlanan<br>Alaşım Oranları | 35                  | 25    | 40    | -  | 40,63                | 13,2 | 46,15 | -  | 7,9  |
| EDX Alaşım<br>Oranları        | 43,38               | 17,12 | 39,48 | -  | 47,90                | 8,67 | 43,42 | -  | 8,35 |

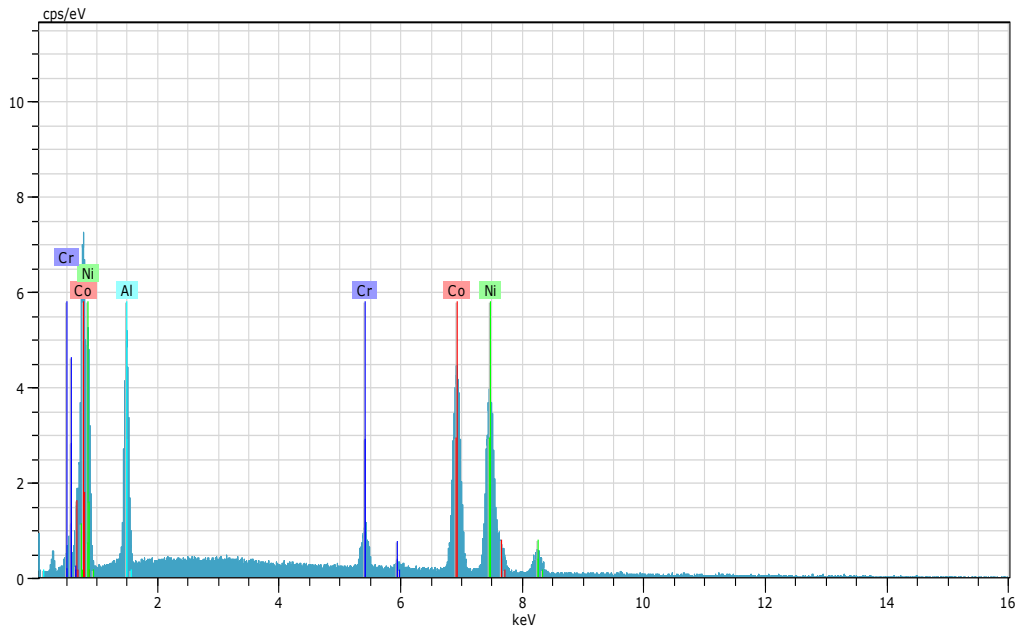
Tablo 6.4’ de Co-Al-Ni alaşımı için hazırlanan alaşım oranları ile EDX alaşım oranlarını karşılaştırılmaktadır. Buna göre; %35 Co, %25 Al ve %40 Ni oranı EDX ölçümlerinin ortalaması sonucunda atomikçe %43,38 Co, %17,12 Al ve %39,48 Ni olarak bulunmuştur. Ağırlıke %40,63 Co, %13,2 Al ve %46,15 Ni oranı EDX ölçümlerinin ortalaması sonucunda ağırlıke %47,90 Co, %8,67 Al ve %43,42 Ni olarak belirlenmiştir. Ni oranı yaklaşık olarak aynı olduğu halde, yine Al oranı düşük çıkmıştır. Alaşımın homojenizasyon sıcaklığı, homojenizasyon süresi ve alüminyumun oksitlenmesi gibi sebepler oranlar arasındaki farkın sebebi olabilir. Ağırlık yüzde oranları incelendiğinde de Al değeri beklenenden daha düşüktür.



**şekil 6.7.** Co-Al-Ni-Cr alaşımının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü.

Son olarak SEM ile alınan Co-Al-Ni-Cr alaşımasının görüntüsü Şekil 6.7’ de verildi. Alaşımanın SEM görüntüsünde düzenli fakat pürüzlü bir yapı mevcuttur. Yapı içinde taneler ve plakalar görülmemektedir.

Şekil 6.8’ de Co-Al-Ni-Cr alaşımasının EDX spektrum görüntüsü tüm bölgeden alınan sonucu vermektedir. Alaşım içindeki elementler, x-ışını piklerinin altındaki alanlarla orantılı olacak şekildedir. Elde edilen pikler incelenirse alüminyumun alaşım içinde sadece bir büyük pik ile temsil edildiği görülür.



Şekil 6.8. Co-Al-Ni-Cr alaşımasının EDX spektrum görüntüsü.

**Tablo 6.5.** Co-Al-Ni-Cr alaşımı için hazırlanan alaşım oranları ile EDX alaşım oranlarının karşılaştırılması.

| Co-Al-Ni-Cr                   | Atomik Yüzde (% at) |       |       |      | Ağırlık Yüzde (% wt) |       |       |       | e/a  |
|-------------------------------|---------------------|-------|-------|------|----------------------|-------|-------|-------|------|
|                               | Co                  | Al    | Ni    | Cr   | Co                   | Al    | Ni    | Cr    |      |
| Hazırlanan<br>Alaşım Oranları | 35                  | 25    | 36    | 4    | 40,78                | 13,33 | 41,77 | 4,112 | 7,74 |
| EDX Alaşım<br>Oranları        | 34,33               | 25,34 | 36,29 | 4,03 | 40,08                | 13,54 | 42,21 | 4,15  | 7,70 |

Tablo 6.5, Co-Al-Ni-Cr alaşımı için hazırlanan alaşım oranları ile EDX sonuçlarını göstermektedir. Co - Al - Ni - Cr alaşım oranları incelendiğinde Tablo 6.5' de alaşım oranlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görülür. Öyle ki; %35 Co, %25 Al, %36 Ni ve % 4 Cr oranı EDX lmlerinin ortalaması sonucunda atomikçe %34,33 Co, %25,34 Al, %36,29 Ni ve %4,03 Cr olarak bulunmuştur. Ağırlıkça %40,78 Co, %13,33 Al, %41,77 Ni ve %4,112 Cr oranı EDX lmlerinin ortalaması sonucunda ağırlıkça %40,08 Co, %13,54 Al, %42,21 Ni ve % 4,15 olarak belirlenmiştir.

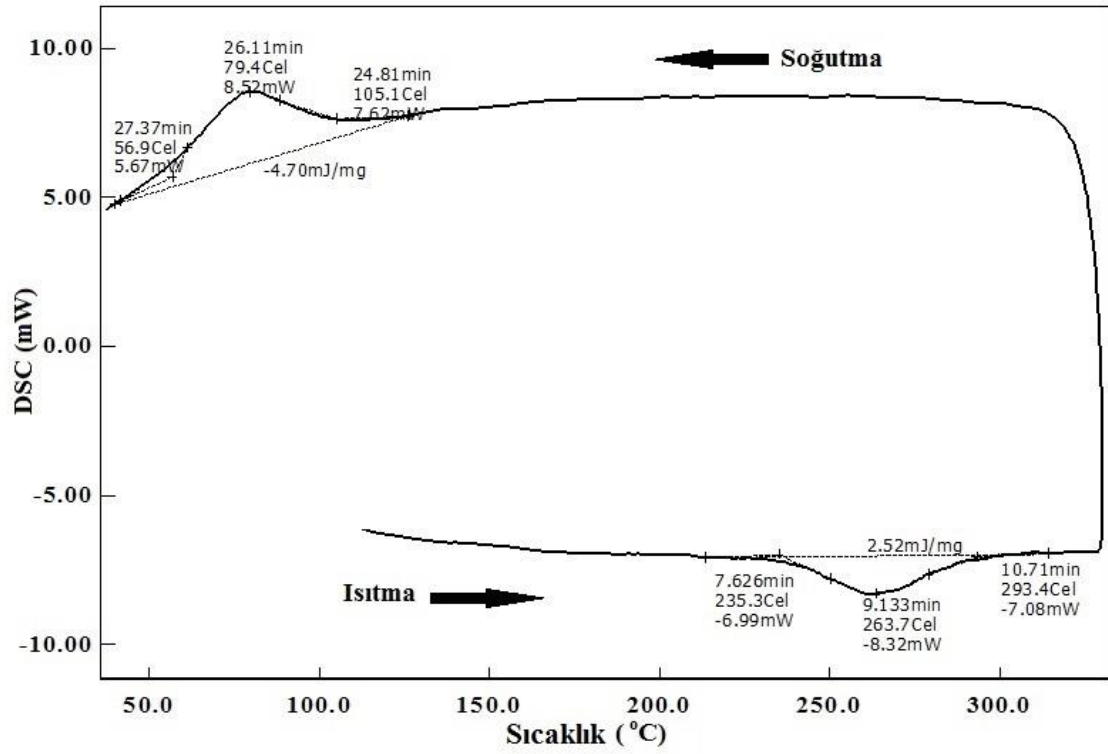
## 6.2. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) lm Sonuçları

Üretilen alaşımların faz dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek için Perkin Elmer Sapphire Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile 20 C/ dak ısıtma soğutma hızıyla azot gazı atmosferinde yapıldı.

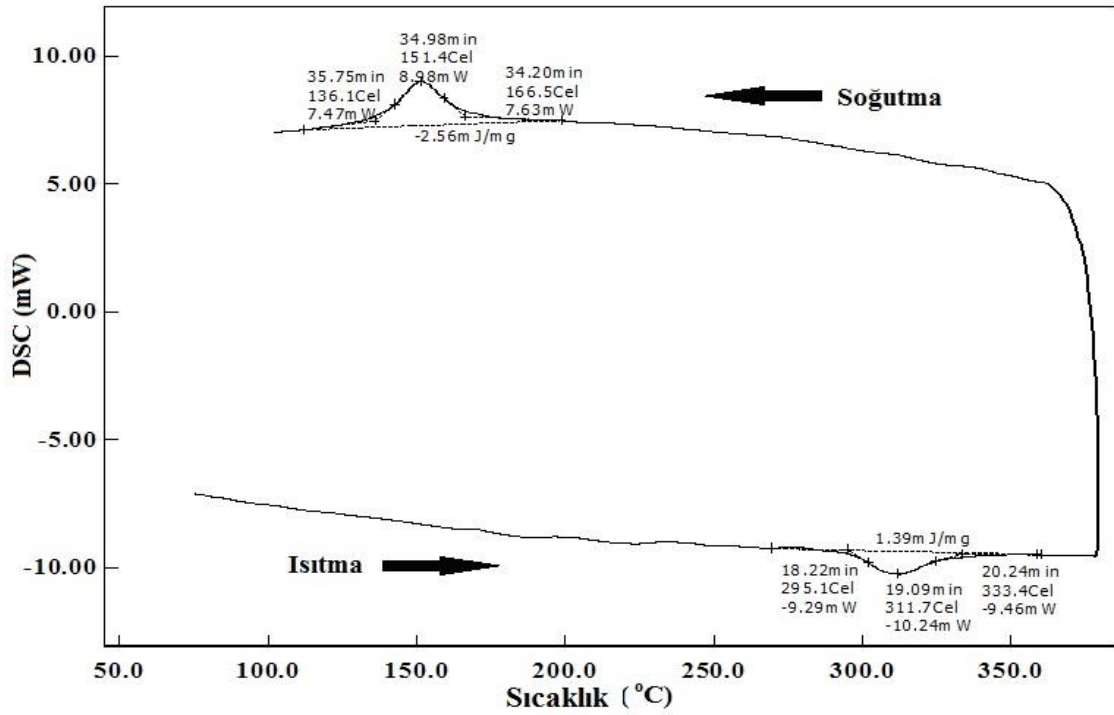
şekil 6.9' da Co-Al alaşımına ait 20 C/dak. ile alınan DSC eğrisi grlmektedir. Co-Al için Austenit başlama sıcaklığı 235,3 C ' dir. Austenit bitiş sıcaklığı 293,4 C, martensit başlama sıcaklığı 105,1 C ve martensit bitiş sıcaklığı ise 56,9 C' dir.

Omori ve arkadaşları, Co-14at%Al alaşımı ile yaptıkları çalışmada dönüşüm sıcaklıklarını;  $M_s=112$  C,  $M_f=75$  C,  $A_s=236$  C,  $A_f=260$  C olarak lmşler ve bu değerler aynı oranda bizim çalışmamızda elde ettiğimiz dönüşüm sıcaklıklarıyla uyuşmaktadır, dönüşüm sıcaklıklarının birebir aynı olmaması, homojenizasyon işlemlerinden kaynaklanabilir. Çünkü; Omori ve arkadaşları, Arc Melter' da eritilen Co-14at%Al alaşımını soğuk haddeleme sonrası 1200 C' de sıcak haddelemeye tabii tutmuşlar ve ardından 1200 C' de 1 saat homojenizasyon sonrası suda soğutma işlemlerini gerçekleştirmişler ve yukarıdaki dönüşüm sıcaklıklarını bulmuşlar (Omori, vd., 2003; Omori, vd., 2006).

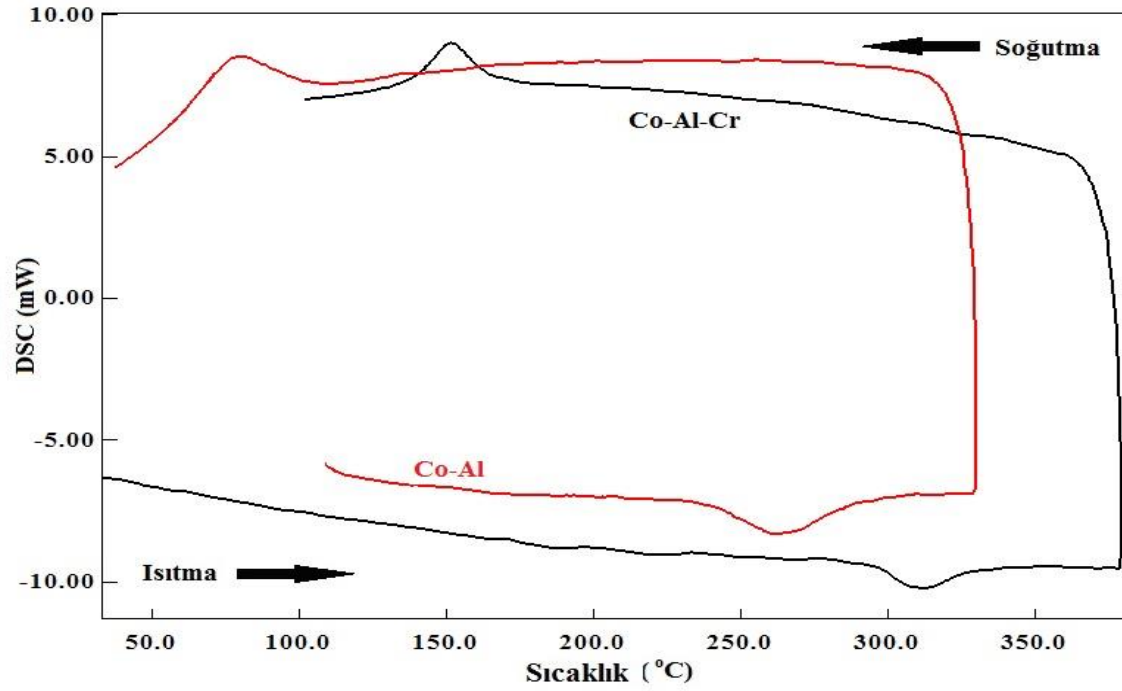
Bu alışmada, Co-Al alaşımı için llen dönüşüm sıcaklıkları ile Omori ve arkadaşlarının benzer oranda hazırladıkları Co-Al alaşımı için belirlenen dönüşüm sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu grlmektedir.



Şekil 6.9. Co-Al alaşıma ait 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrisi.



Şekil 6.10. Co-Al-Cr alaşıma ait 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrisi.



**Şekil 6.11.** Co-Al ve Co-Al-Cr alaşımlarının 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrilerinin karşılaştırılması.

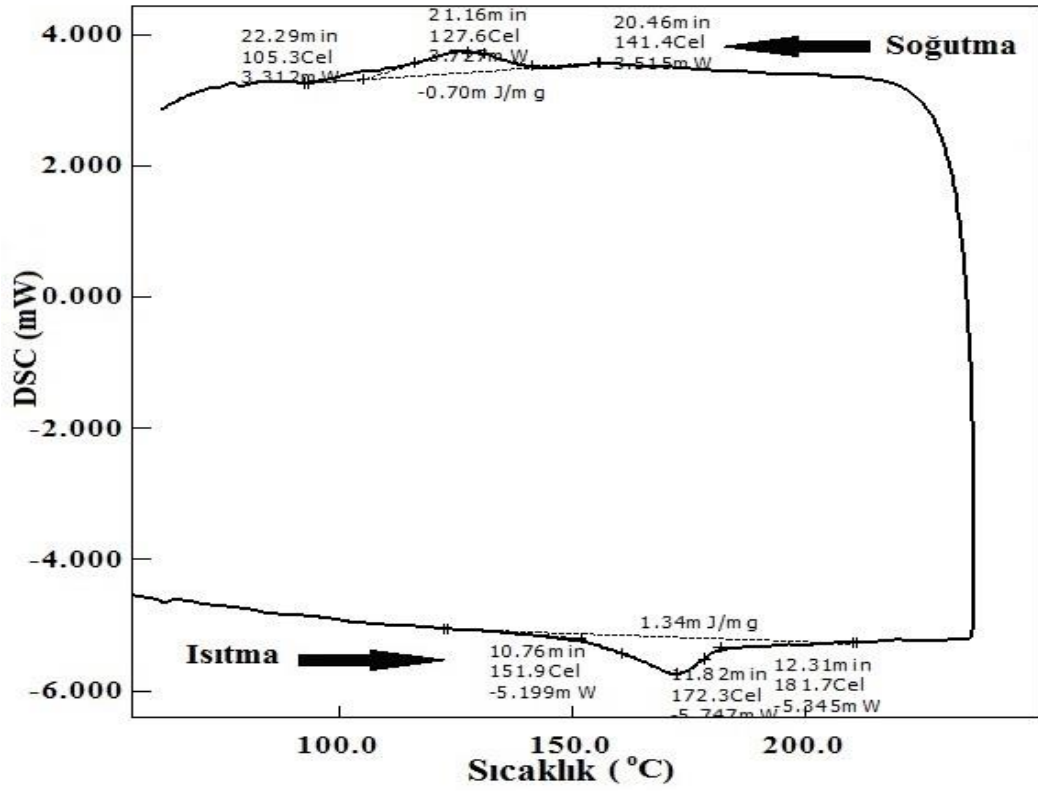
Şekil 6.10' da Co-Al-Cr alaşımına ait 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrisi görülmektedir. Co-Al-Cr için Austenit başlama sıcaklığı 295,1 °C ' dir. Co-Al alaşımına Cr katkısının dönüşümün başlama sıcaklığını arttırdığı görülmektedir.

Şekil 6.10' dan da görüldüğü gibi piklerin entalpi değerleri çok düşüktür, Co- Al-Cr alaşımının entalpi değeri ile Co-Al alaşımının entalpi değeri karşılaştırılırsa, Co-Al alaşımının entalpi değerinin yaklaşık yarısı kadar olduğu görülür.

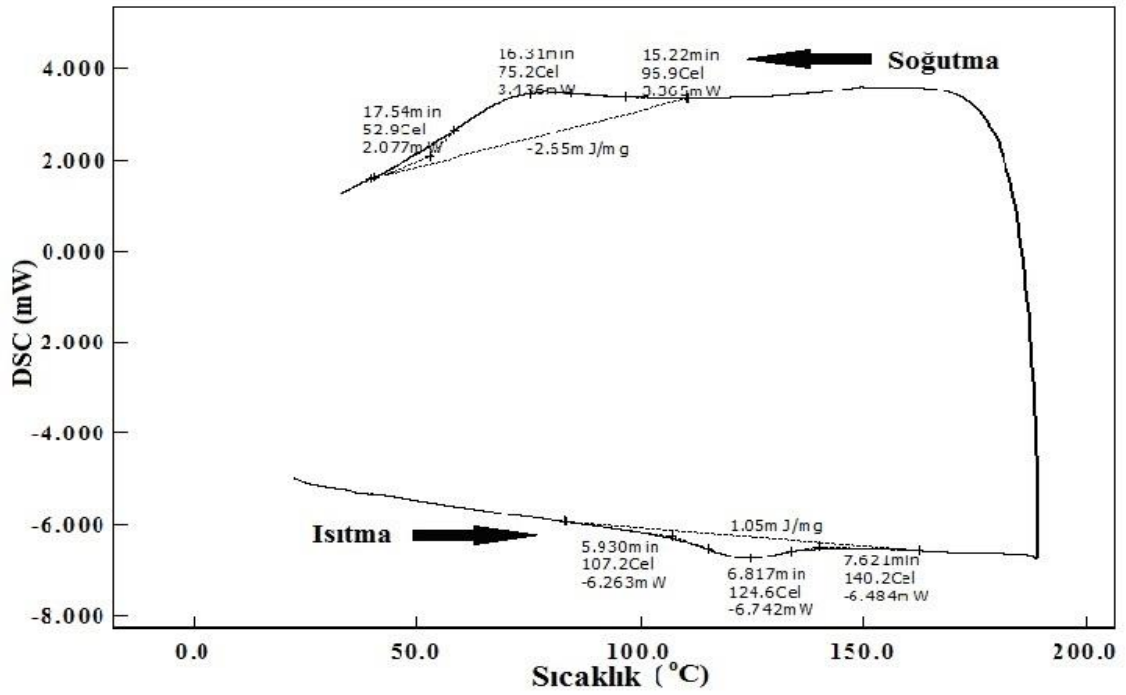
Şekil 6.11' de Co-Al ve Co-Al-Cr alaşımlarının DSC eğrileri karşılaştırılmaktadır. Şekil incelenirse, Co-Al alaşımının Co-Al-Cr alaşımından daha önce dönüşüme başladığı ve histerisizin geniş olduğu görülebilir. Şekil hatırlamalı Co-Al alaşımına Cr katkısı martensit dönüşüm sıcaklıklarını etkilemektedir. Bunun yanında ısıtma sıcaklığı veya süresi dönüşüm sıcaklığını ayarlamayı sağlar (Guitierrez vd., 2007). Isıtma işlemle dönüşüm sıcaklığını kontrol etmek alaşımın kompozisyon oranını değiştirmekten daha kolaydır (Kök, 2011).

Şekil 6.12' de Co-Al-Ni alaşımının DSC eğrisi görülmektedir. Manyetik şekil hatırlamalı Co-Al-Ni alaşımında austenit ve martensit başlama sıcaklıkları sırasıyla 151,9 °C ve 141,4 °C olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar literatürdeki sonuçlarla uyum içerisindedir (Maziarz, 2008; Morito vd., 2002).



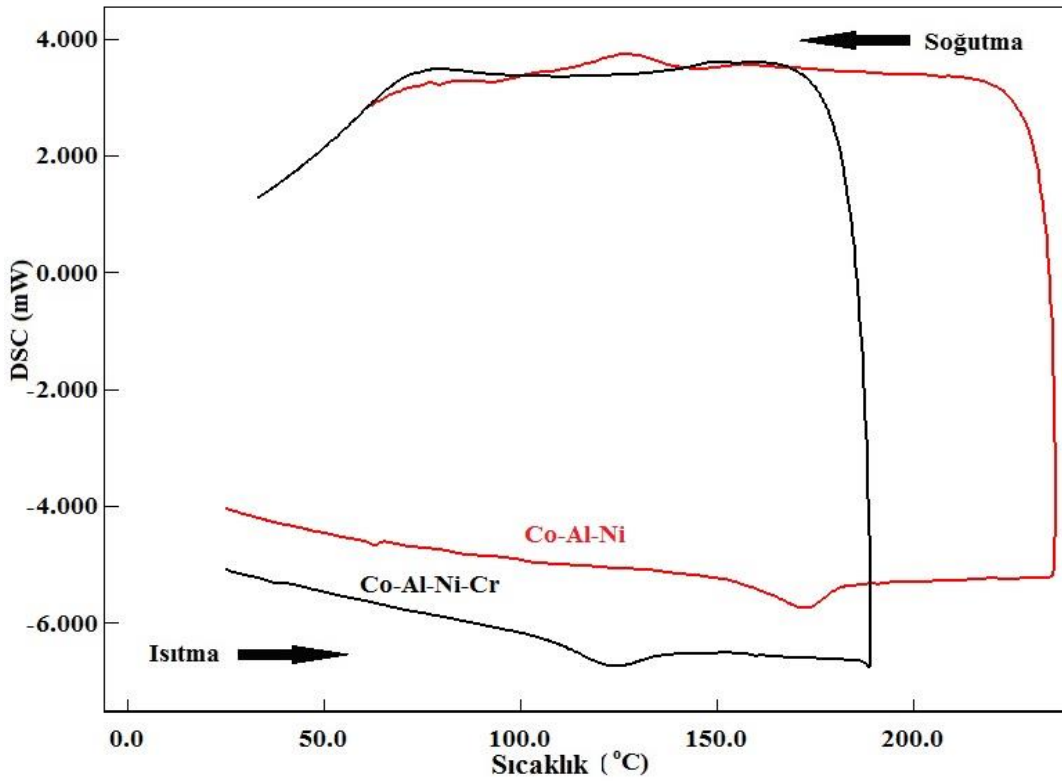


Şekil 6.12. Co-Al-Ni alaşımına ait 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrisi.



Şekil 6.13. Co-Al-Ni-Cr alaşımına ait 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrisi.





Şekil 6.14. Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının 20 °C/dak. ile alınan DSC eğrilerinin karşılaştırılması.

Şekil 6.13' de Co-Al-Ni-Cr alaşımının DSC eğrisi görülmektedir. Austenit başlama sıcaklığı 107,2 °C' dir. Bu durumda Cr katkısı Co-Al-Ni alaşımının dönüşüme başlama sıcaklığını azaltmakta, yani martensit dönüşüm daha erken başlamaktadır.

Valiullin ve arkadaşları,  $\text{Co}_{38}\text{Ni}_{34}\text{Al}_{28}$  alaşımı ile yaptıkları çalışmada  $A_f$  austenit bitiş sıcaklığını 70 °C ve  $M_f$  martensit bitiş sıcaklığını da -4 °C olarak bulmuşlar, buradan dönüşüm sıcaklık aralığı hesaplanırsa TTR değerinin 74 °C olduğu görülür (Valiullin vd., 2006). Bu değer bizim çalışmamızdan farklı oranlarda Co-Al-Ni alaşımından hesaplanmasına rağmen yaklaşık 30 °C' lik fark ile oldukça yakın bir sonuç vermiştir.

Wojciech Maziarz, yaptığı çalışmada benzer oranlardaki Co-Al-Ni alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarını  $A_s = 157$  °C,  $M_s = 167$  °C olarak bulmuştur. Yapılan çalışma ile birkaç derece farklılığın sebebinin alaşım kompozisyonu, homojenleştirme zamanının daha uzun tutulması olduğu düşünülmektedir. Çünkü Maziarz yaptığı çalışmada homojenizasyonu sağlamak için Co-Al-Ni alaşımını 1200 °C' de 32 saat bekletmiştir (Maziarz, 2008).

Guo-Fu ve arkadaşları ise  $\text{Co}_{41}\text{Ni}_{32}\text{Al}_{27}$  alaşımıyla yaptıkları çalışmada, oranları aynı olan alaşımların farklı homojenizasyon sıcaklıkları sonucunda dönüşümlerini

incelemişler ve buna göre; 1300 °C' de 4 saat homojenizasyon sonucunda austenit ve martensit başlama sıcaklıklarını  $A_s=44$  °C ve  $M_s=41$  °C olarak ölçmüşlerdir. Aynı orandaki alaşımanın 1350 °C' de 2 saat homojenizasyon sonucunda austenit ve martensit başlama sıcaklıklarını da  $A_s=1$  °C ve  $M_s=29$  °C olarak belirlemişlerdir. Bu sonuçlar, homojenizasyon sıcaklığının ve zamanının dönüşüm sıcaklıklarını etkilediğini göstermektedir (Guo-fu vd., 2006).

Şekil 6.14' de Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının DSC eğrileri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Burada Cr katkısı ile dönüşüm sıcaklığının azaldığı ve buna bağlı olarak da dönüşüm sıcaklık aralığının arttığı dikkat çekmektedir.

DSC ölçümleri sonucunda elde edilen dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametreleri Tablo 6.6' da görüldüğü gibidir.

Salzbrenner ve Cohen tarafından kabul edilen  $T_o$  denge sıcaklığı,

$$T_o = \frac{1}{2}(M_s + A_s) \quad (6.1)$$

şeklindedir. Burada  $M_s$  martensit başlama sıcaklığı,  $A_s$  austenit başlama sıcaklığıdır. Entropi değişimi  $\Delta S$  ise;

$$\Delta S = \frac{\Delta H_{ort}}{T_o} = \frac{1/2(\Delta H_{ısıtma} + \Delta H_{soğutma})}{T_o} \quad (6.2)$$

denklem' i yardımı ile hesaplandı. Burada  $\Delta H$ , entalpi değişimidir.

Tablo 6.6 dikkate alındığında Co-Al alaşımına Cr katkısı dönüşüm sıcaklıklarını arttırdığı halde entalpi değişimini azaltmaktadır. Bu durumda entropi değişiminde de azalma gözlenmektedir.

**Tablo 6.6.** Alaşımların dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametreleri.

| Numune Adı  | $A_s(^{\circ}\text{C})$ | $A_f(^{\circ}\text{C})$ | $M_s(^{\circ}\text{C})$ | $M_f(^{\circ}\text{C})$ | $T_o(^{\circ}\text{C})$ | $\Delta H_{ısıtma}$<br>(J/g) | $\Delta H_{soğutma}$<br>(J/g) | $\Delta S$<br>(J/g $^{\circ}\text{C}$ ) |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| Co-Al       | 235,3                   | 293,4                   | 105,1                   | 56,9                    | 170,2                   | 2,52                         | 4,70                          | 0,0212                                  |
| Co-Al-Cr    | 295,1                   | 333,4                   | 166,5                   | 136,1                   | 230,8                   | 1,39                         | 2,56                          | 0,0085                                  |
| Co-Al-Ni    | 151,9                   | 181,7                   | 141,4                   | 105,3                   | 146,65                  | 1,34                         | 0,70                          | 0,0069                                  |
| Co-Al-Ni-Cr | 107,2                   | 140,2                   | 95,9                    | 52,9                    | 101,55                  | 1,05                         | 2,55                          | 0,0177                                  |

**Tablo 6.7.** Alaşımların austenit ve martensit bitiş sıcaklıkları ile dönüşüm sıcaklık aralıkları (TTR).

| Numune Adı  | $A_f (^{\circ}\text{C})$ | $M_f (^{\circ}\text{C})$ | $\text{TTR} = A_f - M_f (^{\circ}\text{C})$ |
|-------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|
| Co-Al       | 293,4                    | 56,9                     | 236,5                                       |
| Co-Al-Cr    | 333,4                    | 136,1                    | 197,3                                       |
| Co-Al-Ni    | 181,7                    | 105,3                    | 40,3                                        |
| Co-Al-Ni-Cr | 140,2                    | 52,9                     | 87,3                                        |

TTR (Temperature Transformation Region), yani dönüşüm sıcaklık aralığı değeri; şekil hatırlamalı alaşımların çalışma aralığını gösterir. Aralık ne kadar dar olursa, alaşımın fiziksel özellikleri üzerine çalışmak o kadar kolay olur (Kök, 2011).

Tablo 6.7' de görüldüğü gibi dönüşüm sıcaklık aralığı (TTR), Co-Al için 236,5 °C ve Co-Al-Cr için 197,3 °C olarak hesaplandı. Böylelikle Cr katkısının dönüşüm sıcaklık aralığını azalttığı görüldü. Fakat Co-Al-Ni alaşımına Cr katkısı dönüşüm sıcaklık aralığını arttırmaktadır. Co-Al-Ni alaşımı için hesaplanan TTR değeri 40,3 °C iken, Co-Al-Ni-Cr alaşımı için TTR değeri 87,3 °C ' dir.

Co-Al alaşımının TTR değerinin 236,5 °C olduğu düşünülürse dönüşüm sıcaklık aralığının oldukça geniş olduğu DSC eğrisinden de görülebilir.

Omori ve arkadaşlarının benzer oranda Co-Al alaşımı ile yaptıkları çalışmada TTR değeri 185 °C ' dir (Omori vd., 2003). Bu değer ile çalışmamızda hesapladığımız TTR değeri arasında yaklaşık 50 °C kadar bir fark mevcuttur, bu fark homojenizasyon sıcaklıklarının ve işlemlerinin farklı olmasından ve soğutma işleminin suda yapılmasından kaynaklanabilir. Alaşım oranları da dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametreler üzerinde etkilidir.

Co-Al-Ni alaşımı için hesaplanan TTR değeri 40,3 °C' dir. Dönüşüm küçük bir aralıkta meydana gelmektedir. Co-Al-Ni-Cr alaşımı için TTR değeri 87,3 °C' dir. Bu değere bakıldığında Cr katkısının Co-Al-Ni alaşımının dönüşüm sıcaklık aralığını yaklaşık iki kat arttırdığı görülmektedir. Dönüşüm sıcaklık aralığı ne kadar büyük olursa, o numune ile çalışmak o kadar zor olur (Kök, 2011). Bu durumda Co-Al-Ni alaşımına Cr katkısının, numune ile çalışma yapılmasını zorlaştırdığı sonucuna varılabilir.

**Tablo 6.8.** Alaşımların austenit ve martensit başlama sıcaklıkları ile  $A_s$ - $M_s$  sıcaklık farkı.

| Numune Adı  | $A_s$ (°C) | $M_s$ (°C) | $A_s$ - $M_s$ (°C) |
|-------------|------------|------------|--------------------|
| Co-Al       | 235,3      | 105,1      | 130,2              |
| Co-Al-Cr    | 295,1      | 166,5      | 128,6              |
| Co-Al-Ni    | 151,9      | 141,4      | 10,5               |
| Co-Al-Ni-Cr | 107,2      | 95,9       | 11,3               |

Co-bazlı alaşımlarda  $A_s$ - $M_s$  arasındaki fark ne kadar az ise alaşım o kadar termoelastik yapı gösterir (Akis, vd., 2011). Buna göre; Tablo 6.8’ de Co-Al alaşımı için bu değer 130,2 °C, Co-Al-Cr alaşımı için 128,6 °C, Co-Al-Ni alaşımı için 10,5 °C ve son olarak da Co-Al-Ni-Cr alaşımı için 11,3 °C olarak hesaplandı. Bu çalışmada elde edilen alaşımlar  $A_s$ - $M_s$  farkına göre sıralandığında;

$$\text{Co-Al} > \text{Co-Al-Cr} > \text{Co-Al-Ni-Cr} > \text{Co-Al-Ni}$$

şeklinde olduğu görülür. Bu durumda en termoelastik yapı Co-Al-Ni alaşımına aittir denilebilir. Bilindiği gibi, FSMA’ lar termoelastik martensit dönüşümle birlikte ferromanyetik özellik gösterirler (Chernenko ve Besseghini, 2008). Termoelastik dönüşümlerde sadece orijinal kristal yapı ve yönelimi eski halini almakla kalmayıp mikroyapı da eski halini hatırlar. Bu tür dönüşümlerde, sıcaklık düşürüldükçe martensit plakaları oluşup büyürler. Bu plakalar, soğutma işleminin devam etmesi ile birbirlerine ya da tane sınırına ulaşıncaya kadar büyümeye devam ederler. Sıcaklık yükseltildiğinde ise ara yüzeyin geri hareketiyle martensitik oluşumlar büzülerek ana faza dönüşür (Eskil, 2006).

Maziarz’ ın Co-Al-Ni alaşımı ile yaptığı çalışmada  $A_s$  ile  $M_s$  arasındaki fark 10 °C’ dir ve bu değer bizim çalışmamızda hesapladığımız 10,5 °C değerine çok yakındır. Sonuçların uyumu üretilen her iki alaşımın da oldukça yüksek bir termoelastik yapı sergilediklerini göstermektedir.

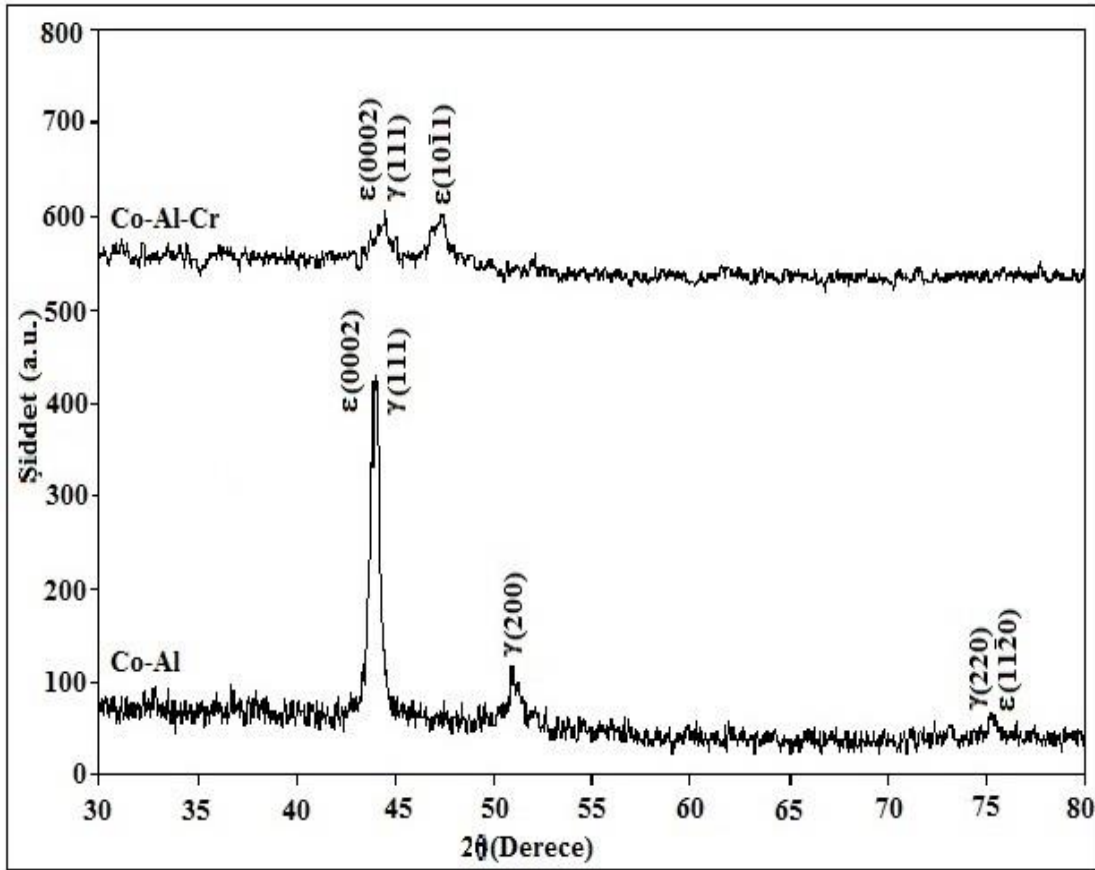
### 6.3. X - Işını Kırınımı (XRD) Ölçüm Sonuçları

Alaşımların hangi fazlarda oluştuğunu belirlemek için kristal yapı analizi Bruker Discover D8 X-ışını kırınım (XRD) cihazı ile yapıldı. Numuneler herhangi bir parlatma ve dağlama işlemine tabi tutulmadılar. Böylece numune içindeki farklı fazların, parlatma ve

dağlama işlemlerinden etkilenecek orijinal bileşimlerinin bozulma ihtimali engellenmiş oldu.

X-ışını analizleri sonucunda elde edilen veriler ikili gruplar halinde Şekil 6.15 ve Şekil 6.16' da görüldüğü gibidir. İndislemeler, literatür bilgilerine göre yapıldı (Ando vd., 2006; Omori vd., 2005; Chen vd., 2009; Kanth, vd., 2010; Liu vd., 2004; Liu vd., 2005; Liu vd., 2006; Kainuma, 1996).

Şekil 6.15' de Co-Al ve Co-Al-Cr alaşımları için x-ışını difraktogramı karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Co-Al için  $44^\circ$  civarında şiddeti oldukça büyük olan  $\gamma(111)$  ve  $\epsilon(0002)$  indisli pikler (Ando vd., 2006; Omori vd., 2005; Chen vd., 2009) mevcut iken Co-Al-Cr alaşımı için aynı bölgede şiddeti daha küçük olan pikler mevcuttur. Cr katkısı Co-Al alaşımı için ölçülen piklerin şiddetini düşürmüştür ve  $48^\circ$  civarında ise yeni bir pik meydana gelmiştir. Ayrıca  $51^\circ$  ve  $75^\circ$  civarında mevcut olan  $\gamma(200)$ ,  $\gamma(220)$  ve  $\epsilon(11\bar{2}0)$  pikleri şiddetini düşürerek belirsiz hale gelmiştir.

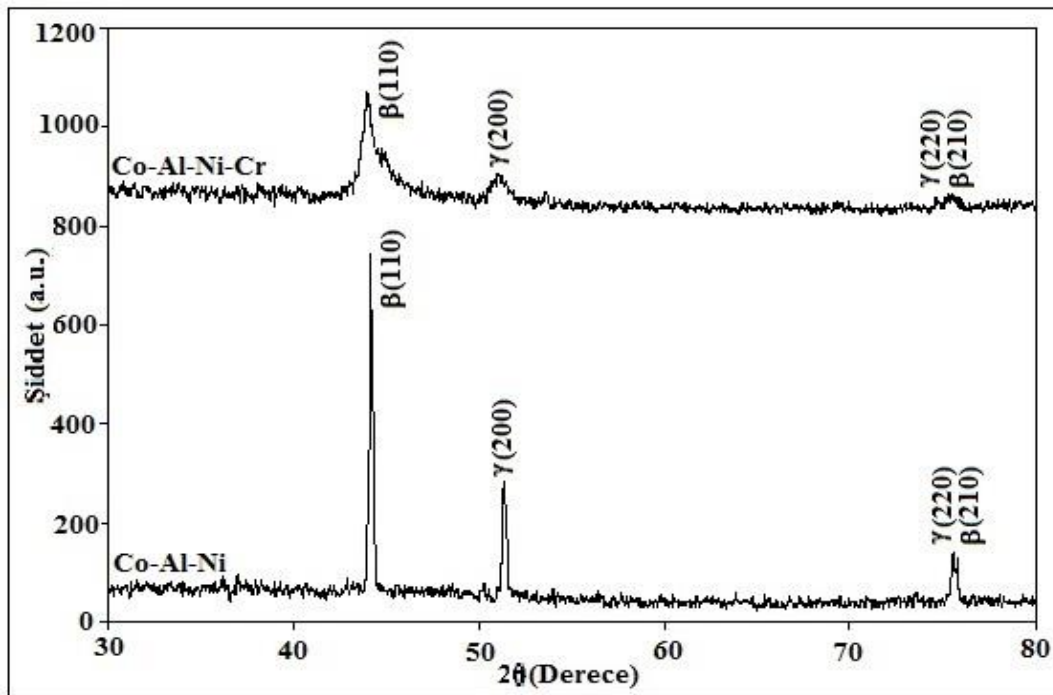


Şekil 6.15. Co-Al ve Co-Al-Cr alaşımlarına ait x-ışını difraktogramlarının karşılaştırılması.

Şekil 6.16' da ise Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımları için x-ışını difraktogramı karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Co-Al-Ni alaşımı için yaklaşık  $44^\circ$  civarında çok keskin ve şiddeti büyük olan  $\beta(110)$  indisli piki, yaklaşık  $51^\circ$  civarında yine keskin ve şiddeti büyük olan  $\gamma(200)$  indisli piki ve son olarak da  $76^\circ$  civarı göze çarpan  $\gamma(220)$  ve  $\beta(210)$  pikleri (Kanth, vd., 2010) Cr katkısı ile keskinliğini yitirmekte, yayvan hale gelmekte ve şiddetinde belirgin bir düşme gözlenmektedir.

CoNiAl alaşımları birçok alaşım türünden farklı olarak yüksek sıcaklıklarda birden fazla faz ihtiva edebilir ve bu bölgede genellikle  $\beta(B2) + \gamma(A1)$  çift faz yapısına sahiptirler.  $\gamma$  (fcc) fazı kırılgan olan  $\beta$  fazının aksine malzemenin sünekliğini artırır.  $\gamma$  fazı martensitik dönüşüme yol açmaz ve ilerleyen martensit plakalarının ilişkilerini olumsuz etkiler (Akis, 2012). Bu çalışmada Co-Al-Ni alaşımının  $\gamma$  ve  $\beta$  şeklinde çift faz yapısına sahip olduğu x-ışını piklerinden de görülmektedir.

Tablo 6.6' da alaşımların DSC dönüşüm sıcaklıklarına bakıldığında Co-Al-Ni alaşımında austenit başlama sıcaklığı  $151,9^\circ\text{C}$  ve Co-Al-Ni-Cr alaşımının austenit başlama sıcaklığı ise  $107,2^\circ\text{C}$ ' dir. Yani martensit dönüşüm Cr katkısı ile daha erken gerçekleşmiştir. Bu durum yapılan çalışmada elde edilen sonuçların literatür ile de uyum içerisinde olduğunu göstermektedir (Cullity, 1966; Kanth, vd., 2010; Ando, vd., 2006; Akis, 2012; Omori vd., 2005; Chen vd., 2009).



Şekil 6.16. Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımlarına ait x-ışını difraktogramlarının karşılaştırılması.



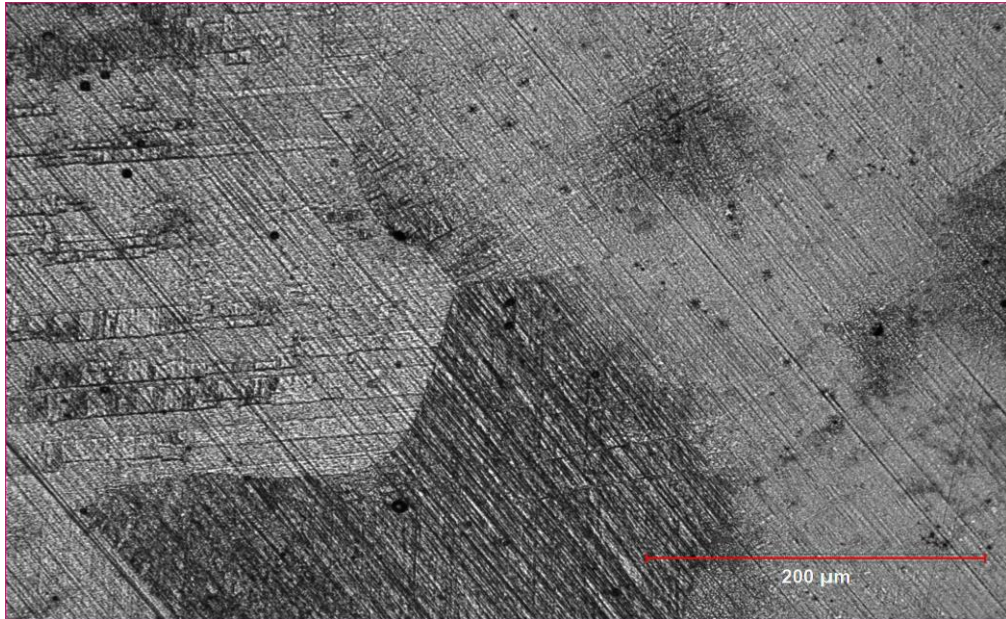
#### 6.4. Optik Mikroskop ve Vickers Sertlik Ölçümleri

Alaşımın mikro yapısını ve mikrosertliğini incelemek için Nikon Eclipse MA200 marka optik mikroskop ve Emco Test Dura Scan marka sertlik ölçüm cihazı kullanıldı.

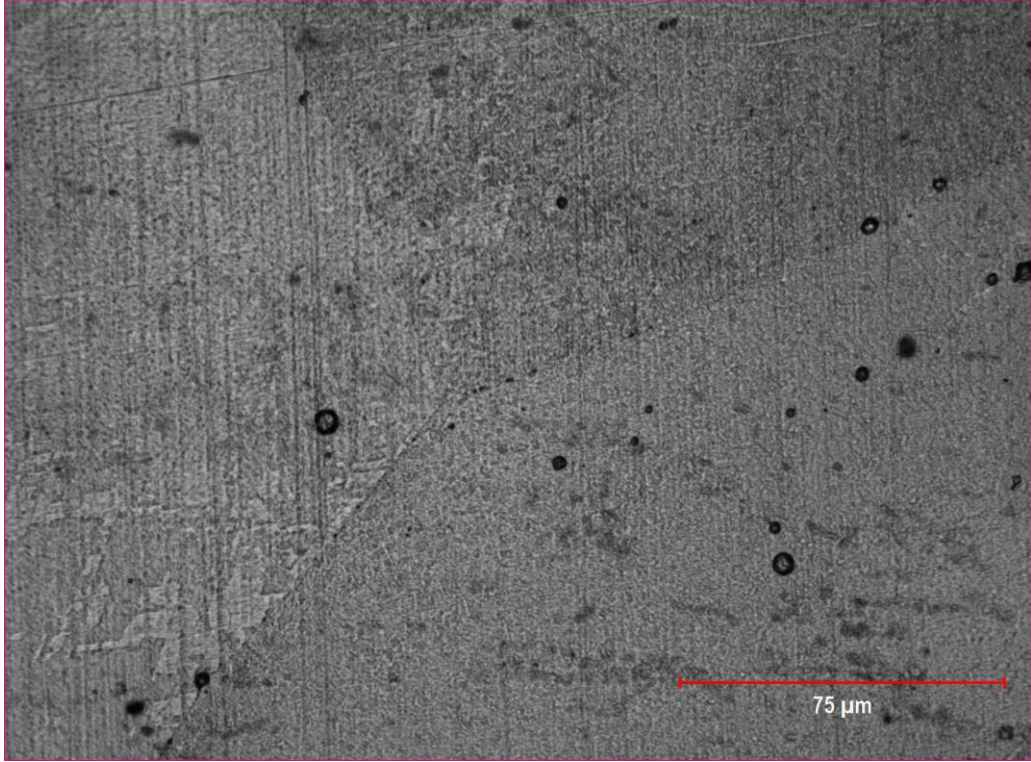
Optik Mikroskop Görüntülerini almak için alaşımlarda oluşan yapıların gözlenmesi amacı ile parlatma yapıldı. Dağlama çözeltisi olarak %75 Hidroklorik asit ve %25 Nitrik asit hazırlandı. Numuneler dağlama çözeltisinde bir müddet bekletildi. Her bir numunenin yapısı optik mikroskop' da 200, 500 ve 1000 büyütme ile gözlendi ve yüzeyde oluşan yapıların optik filmleri alındı.

Şekil 6.17' de Co-Al alaşımının a) 200 büyütmeli, b) 500 büyütmeli, c) 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Co-Al alaşımının 200 ve 500 büyütmeli optik görüntüleri incelendiğinde tane sınırları net olarak gözlenmektedir, 1000 büyütmede ise tane sınırları net olarak gözlenmemektedir. Bu durum tanelerin oldukça büyük olduğunu gösterir. Ayrıca bütün büyütmelerde martensit plakalar görüldüğü gibi  $\gamma$  ve  $\epsilon$  faz bölgeleri de görülmektedir. Bununla birlikte yapı içindeki siyah noktaların, parlatma veya dağlamadan kaynaklanan boşluklar veya çökelti fazları olduğu düşünülmektedir.

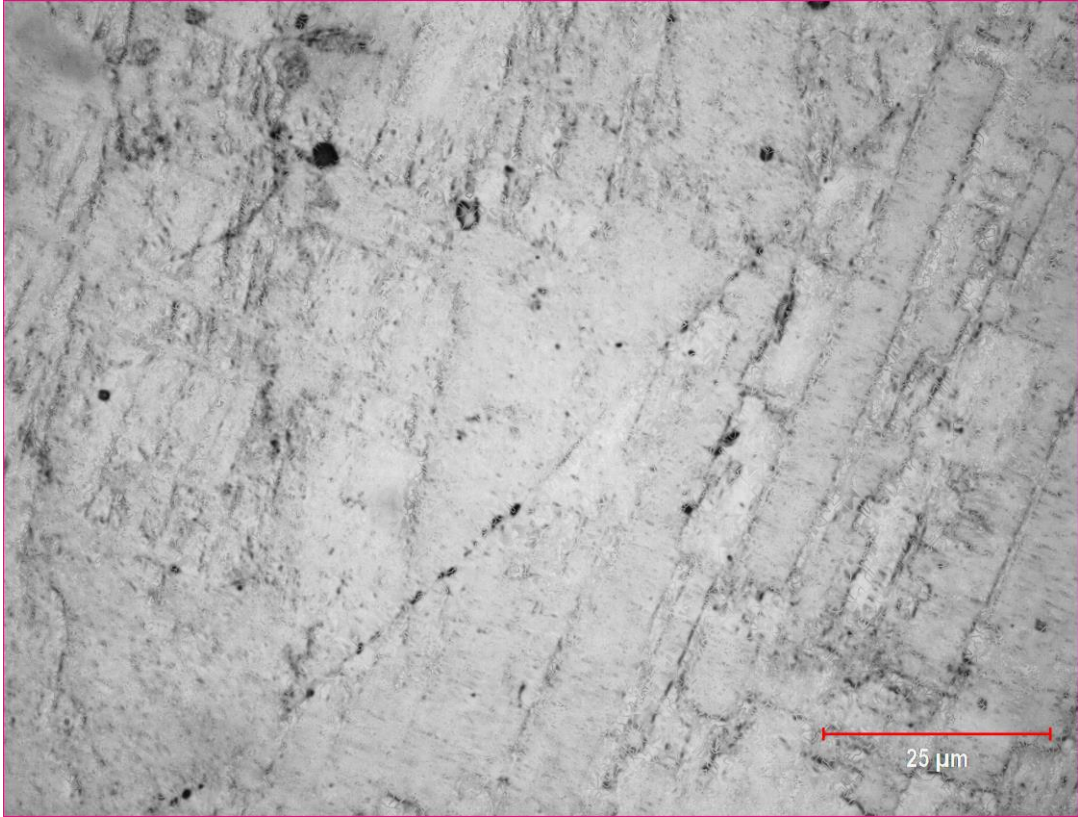
Bu optik mikroskop sonucu ile alaşımın x-ışını difraktogramı karşılaştırıldığında  $44^\circ$  civarında gözlenen  $\gamma(111)$  ve  $\epsilon(0002)$  piklerinin varlığıyla desteklenmektedir. Co-Al alaşımının iki farklı fazı içinde barındırdığı anlamına gelmektedir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 6.17.** Co-Al alaşıımının a) 200 büyötmeli, b) 500 büyötmeli, c) 1000 büyötmeli optik mikroskop göröüntüsü.



Co-Al alaşımının optik mikrografında koyu renkli yerlerinde ince levha şeklinde  $\gamma$  faz bölgelerinin ve açık renkli yerlerinde ise  $\epsilon$  faz bölgelerinin varlığı dikkat çekmektedir. Ayrıca büyütmeler dikkate alındığında 1000 büyütmede tane sınırlarının gözlenememesi, tanelerin oldukça büyük olduğu sonucunu vermektedir. Tüm bu sonuçlar literatür ile uyum içerisindedir (Omori, vd., 2003; Omori, vd., 2005; Omori, vd., 2006 Chen, vd., 2009; Niitsu, vd., 2011).

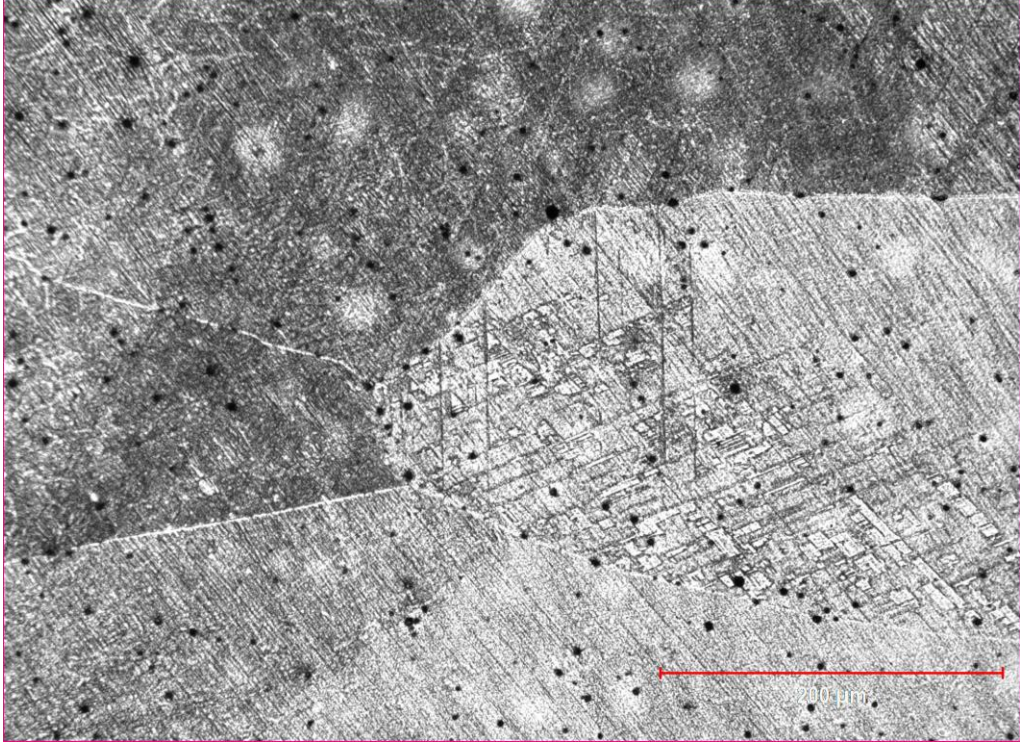
şekil 6.18' de Co-Al-Cr alaşımının a) 200 büyütmeli, b) 500 büyütmeli, c) 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü grlmektedir. 200 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde dört farklı tane sınırı ve bu taneler içerisinde yer alan martensit plakalar dikkat çekmektedir. Ayrıca, koyu ve açık renkli bölgeler bize farklı fazların varlığını göstermektedir. 500 büyütmeli optik mikroskop görüntüsünde de yine dört farklı tane sınırı, farklı yönelimlere sahip martensit plakalar, koyu ve açık renkli faz bölgeleri göze çarpmaktadır. Son olarak 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde üç farklı tane sınırı, martensit plakalar, koyu ve açık renkli faz bölgeleri grlmektedir.

Co-Al alaşımına Cr katkısı, tane boyutlarını küçülttüğü gibi farklı faz bölgelerinin de oluşumuna sebep olmuştur. şekil 6.15' de Co-Al-Cr' un x-ışını difraktogramında Cr katkısı ile Co-Al alaşımın da  $48^\circ$  civarında yeni difraksiyon piklerinin meydana geldiği ve bunun da farklı faz bölgesinin oluştuğu düşünülmektedir. Bu durum x-ışını kırınımı ve optik mikroskop sonuçlarının uyumlu olduğunu gösterir. Benzer şekilde Co-Al alaşımının optik mikroskop görüntüsünde açık renkli  $\epsilon$  faz bölgelerindeki martensit plakaların bölgesel bir şekilde daha geniş bir alana yayıldığı grlmektedir. Fakat, şekil 6.17 ve şekil 6.18' deki 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntülerine bakıldığında Cr katkısı ile  $\epsilon$  faz bölgelerinin azaldığı dikkatimizi çekmektedir.

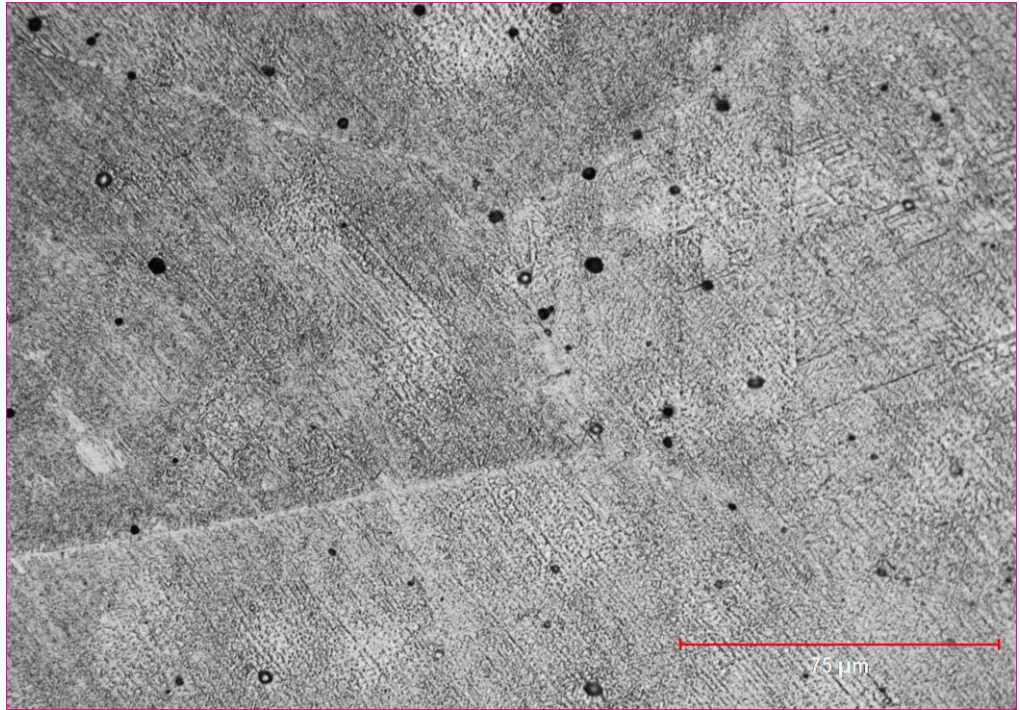
Co-Al-Cr alaşımının SEM görüntüsüne bakıldığında (şekil 6.3) net bir şekilde gözlenen iki farklı faz bölgeleri, şekil 6.18' de 200 büyütmeli optik mikroskop görüntüsünde de belirgin tane sınırları ile birlikte gözlenmektedir. Farklı fazların oluşmasında homojenizasyon sıcaklığı ve süresi, alaşım kompozisyonu etkili olabilir, ya da oluşturulan yeni alaşımın özelliğinden dolayı farklı faz bölgeleri meydana gelmiş olabilir. Bununla birlikte, siyah noktaların, parlatma veya dağlamadan kaynaklanan boşluklar veya çökelti fazları olduğu düşünülmektedir.

SEM görüntüsü (şekil 6.3) incelendiğinde fazlardan birinde oldukça büyük taneler ve tane sınırları dikkat çekmekte, diğerinde ise küçük taneler ve yer yer küçük tane grupları grlmektedir. Bu durum yapı içinde düzensiz tane gruplarının varlığını

göstermektedir. Ayrıca, yapı içinde irili ufaklı bölgeler ve tane sınırlarının bulunduğu göze çarpmaktadır. Her tane ayrı ayrı incelendiğinde de bu taneler içerisinde farklı faz bölgeleri görülmektedir.

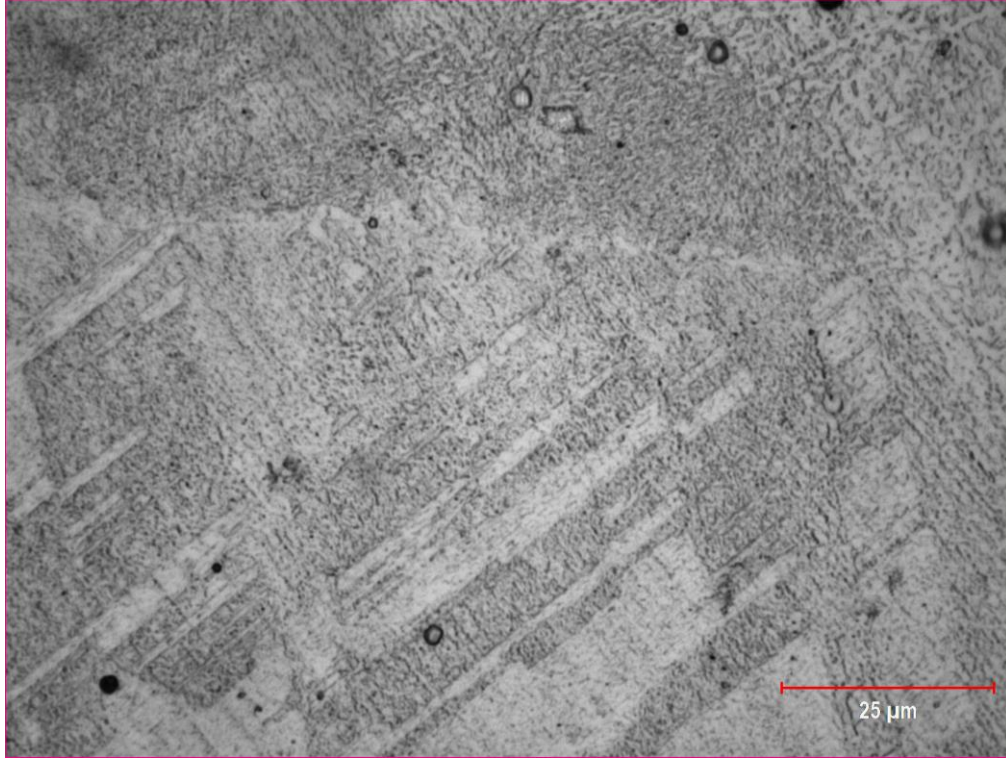


(a)



(b)





(c)

**Şekil 6.18.** Co-Al-Cr alaşımasının a) 200 büyütmeli, b) 500 büyütmeli, c) 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü.

Co-Al alaşımasının yapısı içinde,  $\gamma$  ve  $\epsilon$  faz bölgelerinin varlığı bilinmektedir (Omori, vd., 2005; Omori, vd., 2006; Cullity, 1966; Niitsu, vd., 2011; Omori, vd., 2003; Chen, vd., 2009). Cr katkısı Co-Al alaşımı için ölçülen x-ışını kırınım piklerinin şiddetini düşürmüştür. Literatür ile uyumlu olduğu gibi tüm bu sonuçlar birbirleriyle de uyum içerisinde

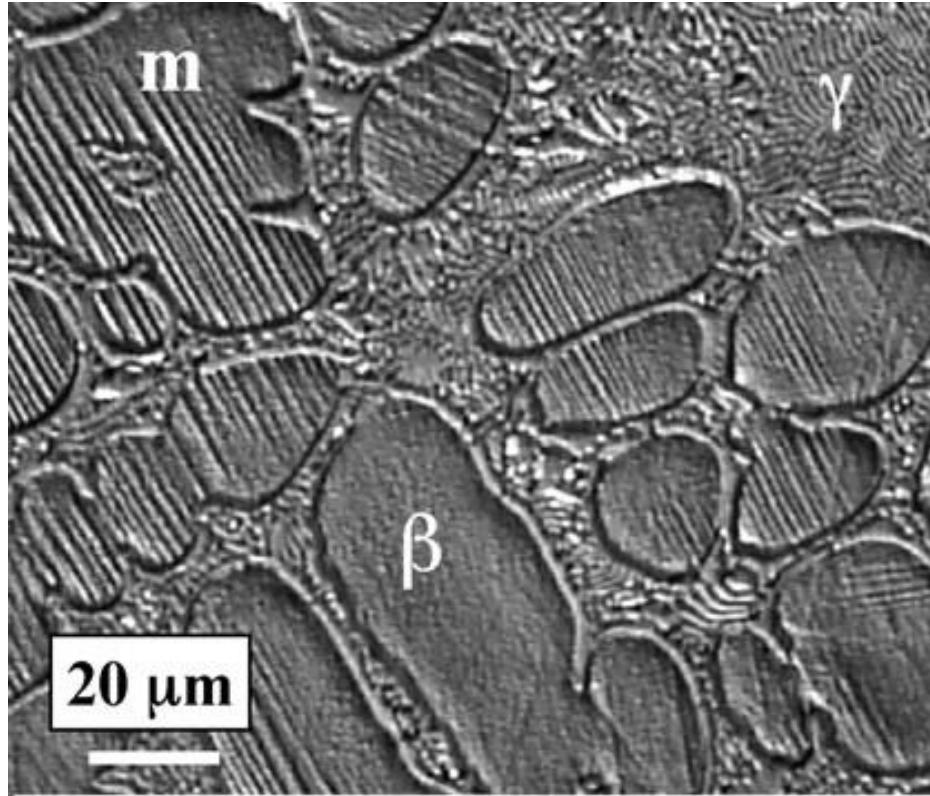
Co-Al-Ni alaşımasının a) 200 büyütmeli, b) 500 büyütmeli, c) 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.20’ de verildi. Yapı incelendiğinde dendritler ve bu dendritlerin içerisinde farklı yönelimlere sahip martensit plakalar görülmektedir. 200 büyütmede net gözlenmeyen martensit plakalar 500 büyütmede daha net gözlenmektedir.

Dendrit oluşumu, yapısal aşırı soğuma sonucu kararsız ve düzlemsel olan katı-sıvı arayüzeyinin kırılmasıyla başlar. Bu karmaşıklığın tepe ve çukur noktaları arasında büyüme farklılığı oluştuğunda karmaşıklık artar ve tepe noktaları çözünen atomları ittikçe, çukur noktalara oranla daha hızlı büyüme gösterirler. Bu nedenle, karmaşıklık artık sinüsoidal değil, kolonsal olma eğilimindedir. Şartlar elverişli olduğu takdirde (katı-sıvı arayüzey enerjisi ve büyüme kinetiğinin anizotropik özellikleri gibi) kristalografik olarak

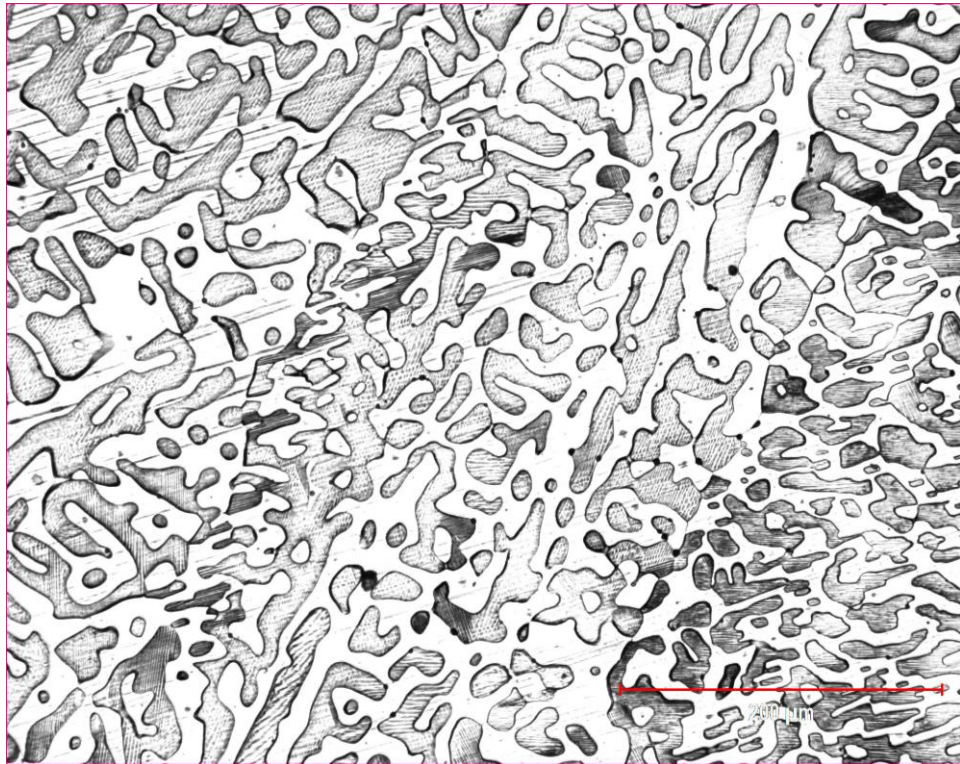
kazanılmış büyüme yönünde büyüme görülebilir. Bir diğer deyişle, ikinci ve diğer dendrit kolları oluşabilir. Ancak, yönlenmiş katılaşmada olduğu gibi ısı akışı tek yönde tutulursa, ısı akışına ters yönde büyüyen hücresel yapılar elde edilecektir (URL-2, Mart 2014).

Maziarz,  $\text{Co}_{37.5}\text{Ni}_{37.5}\text{Al}_{25}$  numunesi ile yaptığı çalışmada Şekil 6.19’ da görüldüğü gibi optik mikroskop ile gözlemlediği dendritik yapıların tepe noktalarını  $\beta$  ve çukur noktalarını ise  $\gamma$  olarak belirlemiştir. Ayrıca, tepe ve çukur bölgelerin her ikisinde de bulunan martensit plakaları m harfi ile simgelemiştir (Maziarz, 2008).

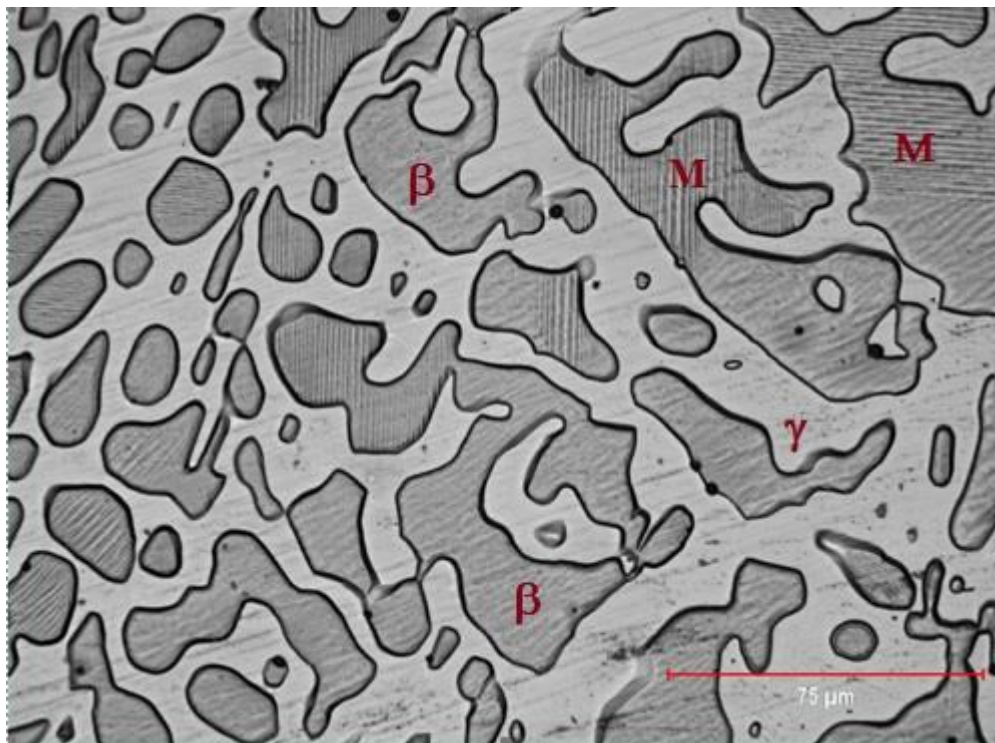
Şekil 6.20 (b)’ de alaşımın optik mikrografında dendritik yapılar ve benzer şekilde tepe bölgelerde yani  $\beta$ -faz bölgelerinde martensit plakalar gözlemlendi. Fakat,  $\gamma$ -faz bölgelerinde martensit hiçbir plaka gözlenmedi. Alaşım oranları ve numunenin homojenleştirme işlemi yapı içindeki oluşumları etkilemektedir, bu sebepten dolayı yapı içinde farklılıkların oluştuğu söylenebilir.



**Şekil 6.19.**  $\text{Co}_{37.5}\text{Ni}_{37.5}\text{Al}_{25}$  alaşımının optik mikroskop görüntüsü (Maziarz, 2008).

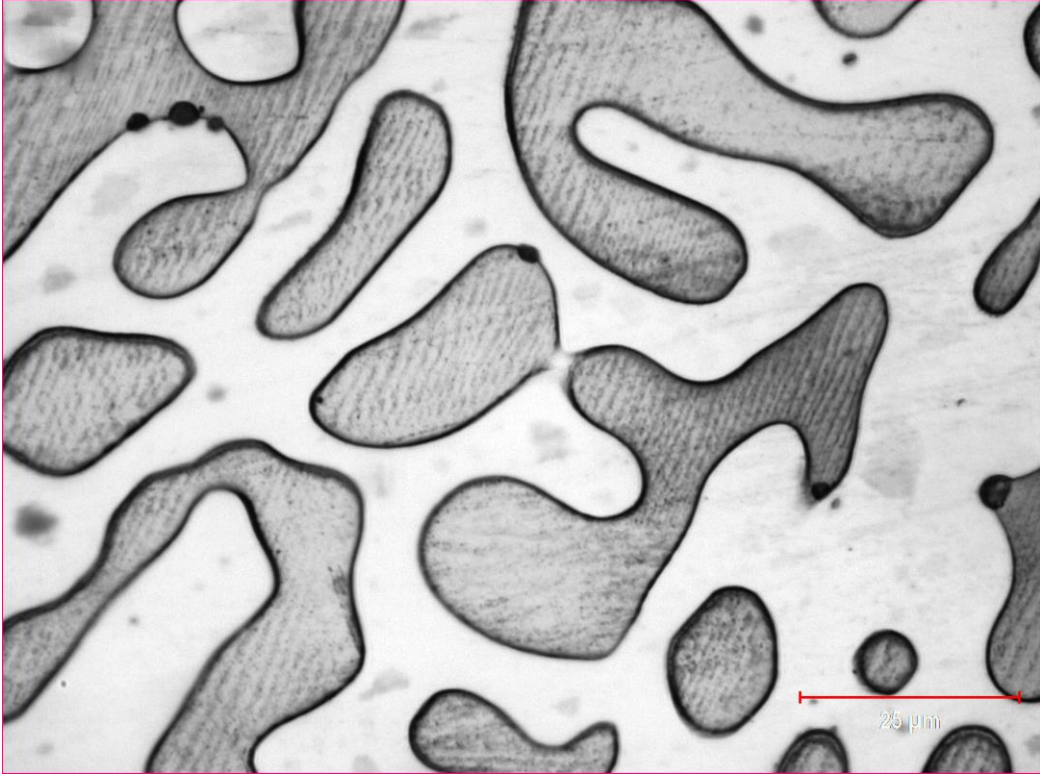


(a)



(b)





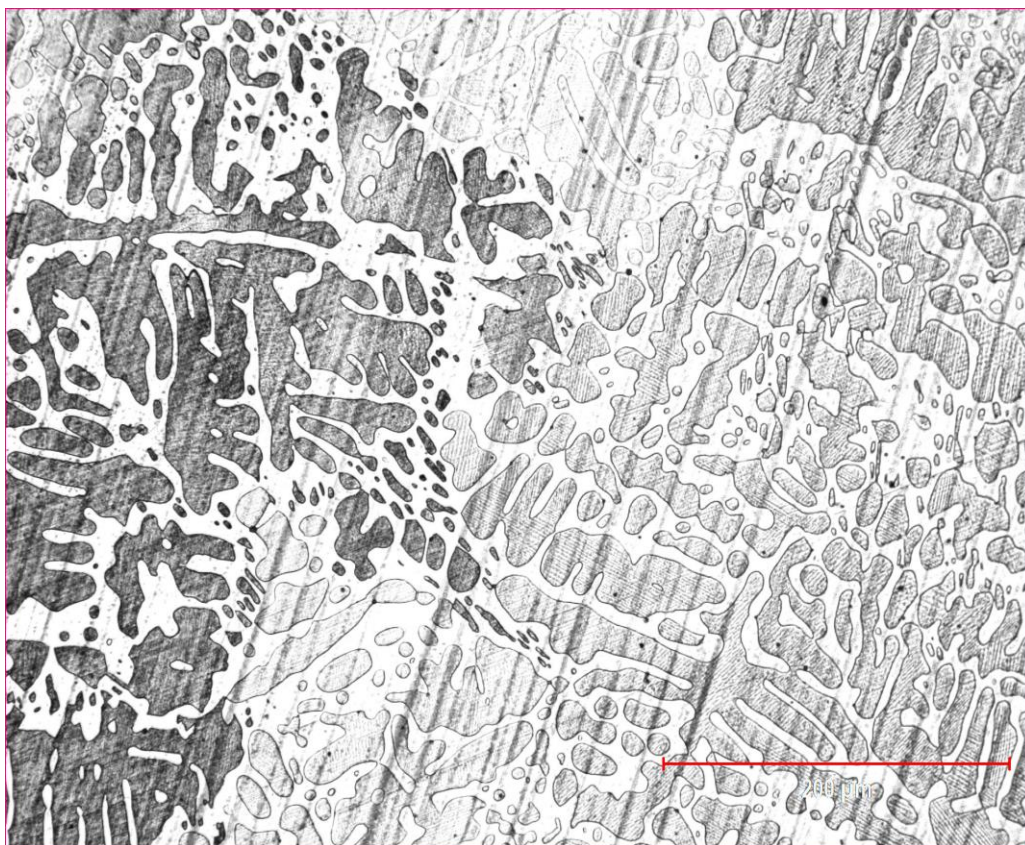
(c)

**Şekil 6.20.** Co-Al-Ni alaşımasının a) 200 büyütmeli, b) 500 büyütmeli, c) 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü.

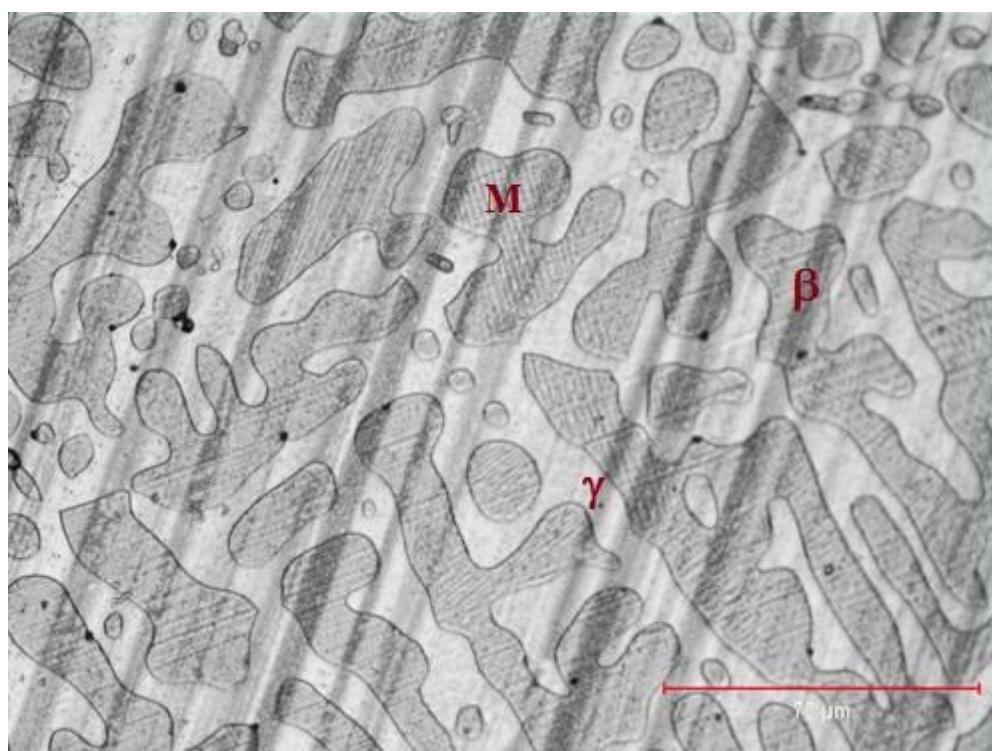
Şekil 6.21’ de Co-Al-Ni-Cr alaşımasının a) 200 büyütmeli, b) 500 büyütmeli, c) 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü verildi. Co-Al-Ni alaşımında ortaya çıkan dendrit yapılar ve  $\beta$ -faz bölgesinde görülen martensit plakalar Co-Al-Ni-Cr alaşımında da gözlemlendi. Yapı içinde,  $\gamma$ -faz bölgesinde martensit plakalar görülmemektedir.  $\beta$ -faz bölgesinde görülen martensit plakaların farklı yönelimlerde olduğu görülmektedir.

Co-Al-Ni alaşımı ile Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının mikrograf yapısı karşılaştırıldığında Cr katkısının  $\beta$ -faz bölgesini genişlettiği görülmektedir. Fakat Cr katkısı dendritik yapısını değiştirmemiştir.

Co-Al-Ni alaşımıyla yapılan çalışmada, optik mikroskopta gözlediğimiz dendrit yapılar literatür ile uyum içerisindedir (Maziarz, 2008; Liu vd., 2005; Katrych ve Steurer, 2009; Guo-fu vd., 2006; Liu vd., 2006; Tanaka vd., 2004).

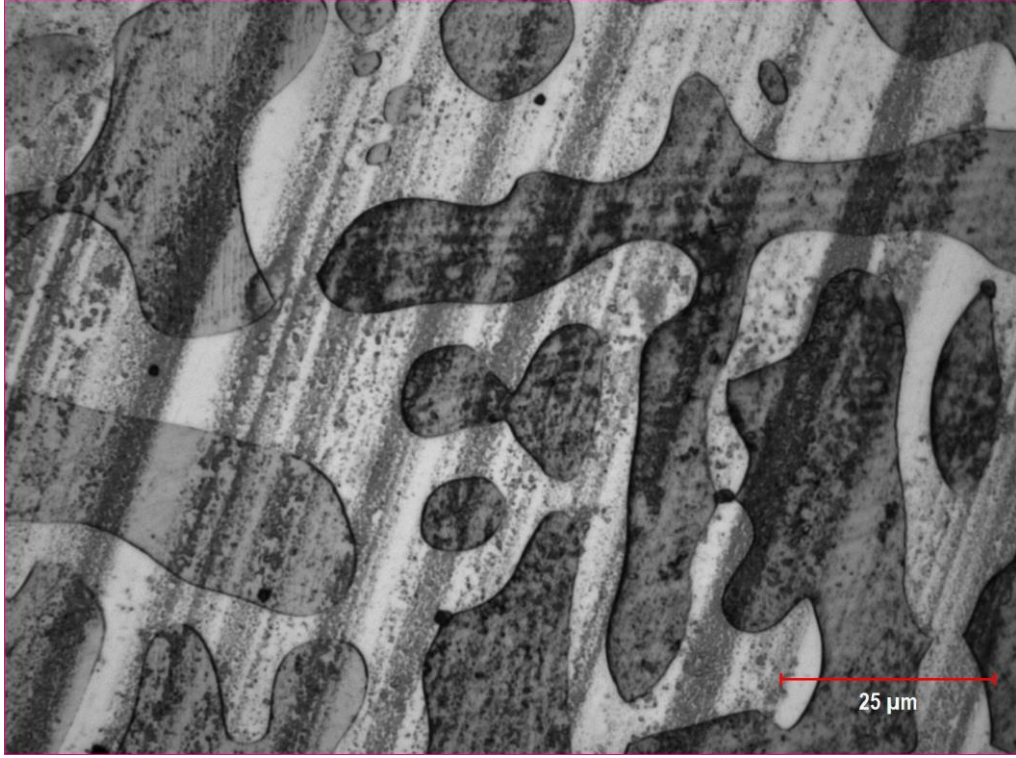


(a)



(b)





(c)

**Şekil 6.21.** Co-Al-Ni-Cr alaşımasının a) 200 büyütmeli, b) 500 büyütmeli, c) 1000 büyütmeli optik mikroskop görüntüsü.

**Tablo 6.9.** Alaşımların  $HV_{0,1}$ ’ e göre Vickers sertlik değerleri.

| Numune Adı          | Vickers Sertlik Değeri<br>(HV) |
|---------------------|--------------------------------|
| Co-Al alaşımı       | 203,40 HV                      |
| Co-Al-Cr alaşımı    | 239,22 HV                      |
| Co-Al-Ni alaşımı    | 322,71 HV                      |
| Co-Al-Ni-Cr alaşımı | 327,87 HV                      |

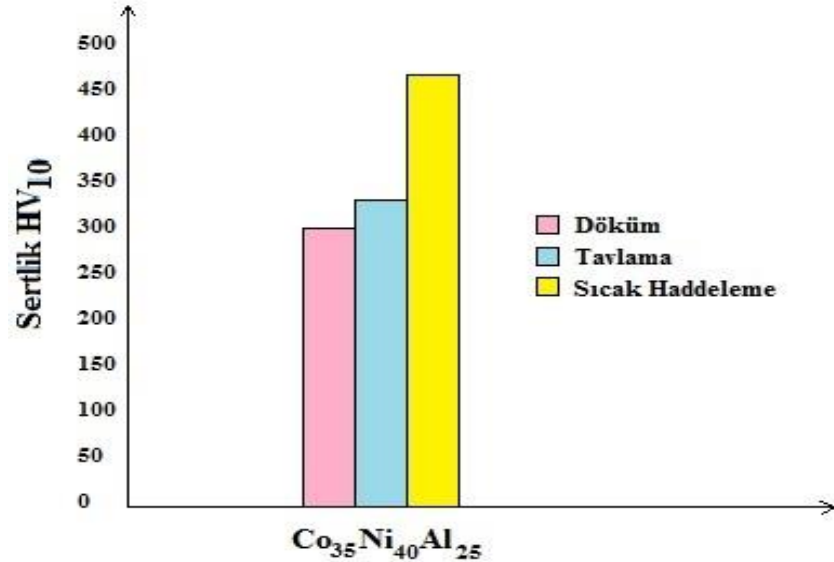
Durascan-10 Mikrosertlik cihazı ile  $HV_{0,1}$ ’ e göre, 20’ lik objektif ve 200 büyütme ile numunenin birçok bölgesinden yaklaşık 7 ölçüm alınarak ortalaması hesaplanan Vickers sertlik değerleri Tablo 6.9’ da görüldüğü gibidir. Şekil 6.23’ de alaşımların  $HV_{0,1}$ ’ e göre sertlik ölçümleri grafiksel olarak karşılaştırılmaktadır.



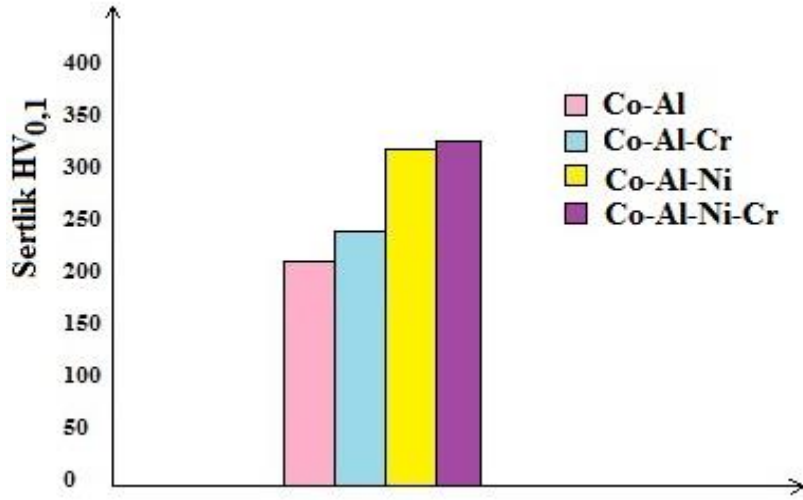
Vickers sertlik ölçüm değerleri incelendiğinde; Co-Al' un 203,40 HV, Co-Al-Cr' un 239,22 HV, Co-Al-Ni 322,71 HV ve Co-Al-Ni-Cr' un Vickers sertlik değeri 327,87 HV olarak belirlendi. Bu alaşımların mikrosertlik değerleri karşılaştırıldığında ikili alaşım olan Co-Al' un alaşımının mikrosertlik değeri en küçüktür. Co-Al ile Co-Al-Cr ve Co-Al-Ni ile Co-Al-Ni-Cr alaşımlarını kendi aralarında karşılaştırırsak Cr katkısının alaşımın mikrosertlik değerini arttırdığı söylenebilir.

Co-Al alaşımına Cr katkısı, malzemenin sünekliğini azaltmaktadır. Co-Al-Cr alaşımının sünekliğinin azalması hcp yapının yüksek sertleşme oranına sahip olması ve  $\epsilon$  martensit fazın yüksek hacim fonksiyonu ile ilişkilidir (Ando, vd., 2006). Sonuç olarak incelediğimiz Co-bazlı her iki alaşım grubunda Cr' un sertliği arttıran bir özellik sergilediği görülmektedir.

Maziarz yaptığı çalışmada benzer oranda  $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{40}\text{Al}_{25}$  alaşımını Şekil 6.22' deki döküm, tavlama ve sıcak haddeleme işlemlerine tabii tuttukten sonra  $\text{HV}_{10}$ ' a göre sertlik ölçümlerini almıştır. Bu çalışmada tavlama işlemi sonucu sertlik değeri  $\sim 330$  HV bulunmuştur (Maziarz, 2008). Bizim çalışmamızda Co-Al-Ni alaşımının sertlik değeri 322,71 HV bulunmuş olup sonuçlar birbirine yakındır.



**Şekil 6.22.**  $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{40}\text{Al}_{25}$  alaşımının döküm, tavlama ve sıcak haddeleme sonrası  $\text{HV}_{10}$ ' a göre sertlik ölçümlerinin grafiksel gösterimi (Maziarz, 2008).



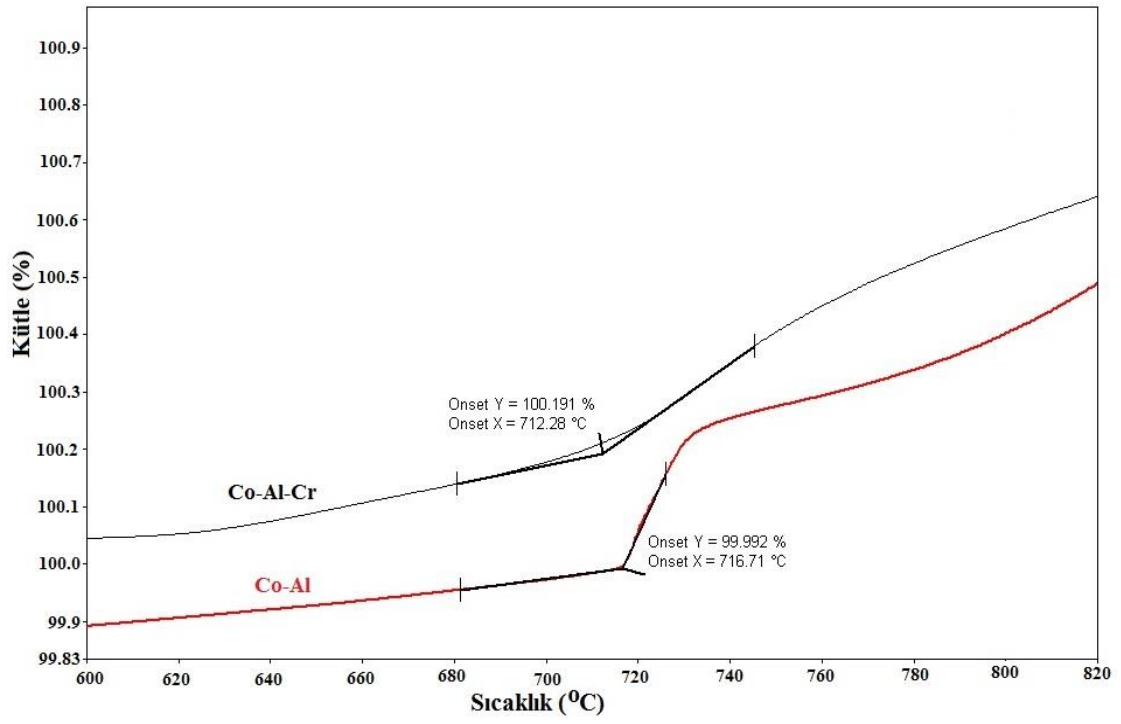
şekil 6.23. Alaşımaların HV<sub>0,1</sub> ' e göre sertlik ölçümlerinin grafiksel gösterimi.

#### 6.5. TG / DTA ile Curie Sıcaklığı (T<sub>C</sub>) lmleri

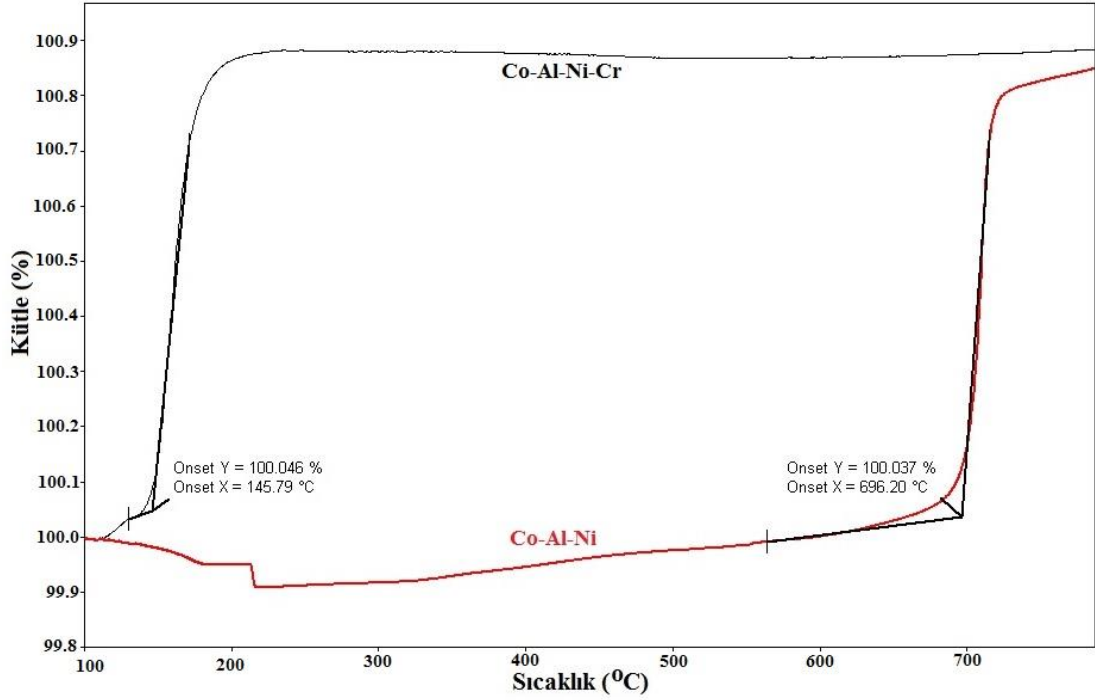
Perkin Elmer Diamond marka diferansiyel termal analiz cihazı (TG/DTA) ile Co-Al, Co-Al-Cr, Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımalarının 20 C/dak ısıtma hızı ile hava atmosferinde 100-800 C aralığında manyetik alan altında kütle değişim eğrilerinin sonucu şekil 6.24 ve şekil 6.25' de verildi. Bu eğrilerden numunelerin Curie sıcaklığı (T<sub>C</sub>) tespit edildi. Elde edilen T<sub>C</sub> Curie sıcaklıkları Tablo 6.10' da grlmektedir.

şekil 6.24' de görüldüğü gibi Co-Al alaşımına Cr katkısı Curie sıcaklığını düşürmektedir, yani; Curie sıcaklığında numune ferromanyetik halden paramanyetik hale geçmekte, dolayısıyla ferromanyetik davranışı kaybetmektedir. Bu durumda Cr katkısı ile alaşım ferromanyetikliğini daha erken kaybetmekte ve paramanyetik hale geçmektedir.

Omori ve arkadaşları, Co-14at%Al alaşımıyla yaptıkları çalışmada Curie sıcaklığını 689 C olarak bulmuşlardır (Omori vd., 2006). Curie sıcaklığı benzer oranda hazırladığımız Co-Al alaşımı için 716,71 C olarak belirlendi, iki ölçüm arasında 27,71 C' lik bir fark ortaya çıkmıştır. Alaşım oranları arasındaki fark, homojenizasyon sıcaklığı ve süresi, soğutma şartları bu farkın sebebidir. Çünkü Omori ve arkadaşları homojenizasyonu sağlamak için Co-Al numunesini 1200 C ' de 1 saat bekletip suda soğuturlarken, bu çalışmada homojenizasyonu sağlamak için Co-Al numunesi 1200 C ' de 24 saat bekletilip tuzlu-buzlu suda soğutuldu.



Şekil 6.24. Co-Al ve Co-Al-Cr alaşımlarının 100-800 °C aralığında manyetik alan altında kütle değişim eğrisi.



Şekil 6.25. Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının 100-800 °C aralığında manyetik alan altında kütle değişim eğrisi.

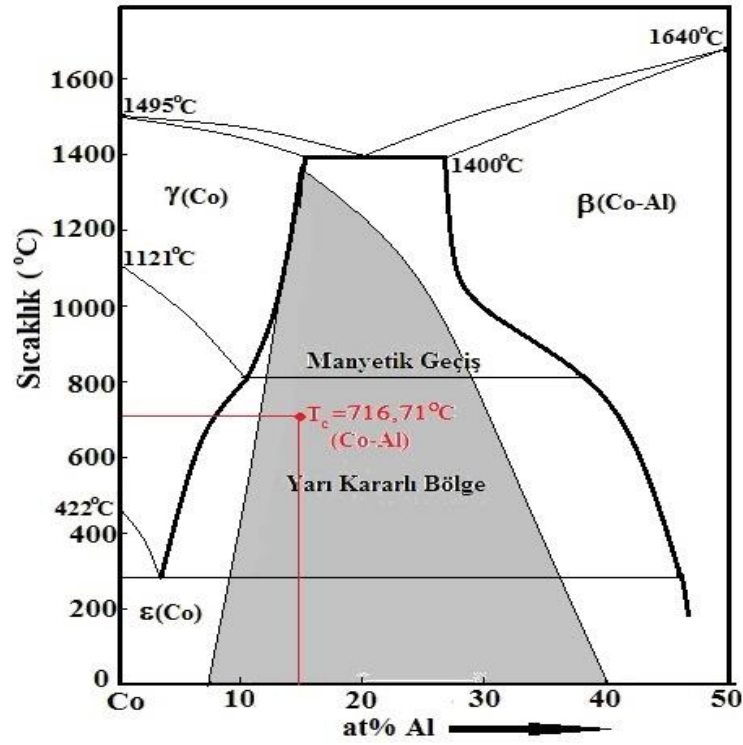
Şekil 6.25' de Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının 100-800 °C aralığında manyetik alan altında kütle değişim eğrisi ve bu eğrilere bağlı olarak Curie sıcaklıkları görülmektedir. Co-Al-Ni için 696,20 °C ve Co-Al-Ni-Cr için ise 145,79 °C olarak belirlenen Curie sıcaklıkları arasındaki fark yaklaşık 550 °C' dir. Cr katkısının bu farkın büyük olmasında etkisi olduğu söylenebilir. Çünkü Cr elementi, antiferromanyetik özellik gösteren bir maddedir, antiferromanyetizma' da manyetik dipoller birbirlerine paralel ve zıt yönelmişlerdir. Ferromanyetizmada düzenli ve birbirine paralel dizilim sergileyen manyetik dipoller, Curie sıcaklığının üstünde, ısısal enerjinin etkisiyle, rastgele yönelim sergilerler. Manyetik dipollerin yönelimleri alaşımın hangi davranışı sergilediğini gösteren önemli bir olgudur. Bunun sonucu olarak Cr katkısıyla Co-Al-Ni alaşımı daha düşük sıcaklıklarda ferromanyetik davranışı daha erken kaybetmekte ve paramanyetik hale geçmektedir.

Curie sıcaklığının altında, manyetik momentler paralel olarak dizildikleri için madde ferromanyetiktir. Curie sıcaklığının üstünde, ısısal enerji, dipollerin gelişigüzel yönelmesine neden olacak kadar yüksektir; bu yüzden madde paramanyetik olur (Serway, 1992). Ferromanyetik - paramanyetik faz geçişleri, hal değişimi noktasında (Curie sıcaklığında), iç enerji ve entropide herhangi bir olağanüstü değişimin meydana gelmediği (hal değiştirme gizli ısısının sıfır olduğu) 'ikinci dereceden' bir hal değişikliğidir (Gündüz, 1992).

Tablo 6.10' a göre; Co-Al alaşımı için  $T_c$  değeri 716,71 °C, Co-Al-Cr için 712,28 °C, Co-Al-Ni için 696,20 °C ve Co-Al-Ni-Cr için ise 145,79 °C' dir. Alaşımların Curie sıcaklıkları incelenirse Co-Al, Co-Al-Cr ve Co-Al-Ni alaşımlarının Curie sıcaklık değerleri birbirine oldukça yakındır. Cr katkısı, alaşımların Curie sıcaklıklarını düşürmüştür. Fakat Co-Al-Ni-Cr alaşımının Curie sıcaklığına dikkat edilirse 145,79 °C' nin diğer alaşımların Curie sıcaklığından oldukça düşük olduğu görülür.

**Tablo 6.10.** TG/DTA yöntemi ile elde edilen Curie sıcaklıkları.

| Numune Adı  | Curie sıcaklığı ( $T_c$ ) |
|-------------|---------------------------|
| Co-Al       | 716,71 °C                 |
| Co-Al-Cr    | 712,28 °C                 |
| Co-Al-Ni    | 696,20 °C                 |
| Co-Al-Ni-Cr | 145,79 °C                 |



Şekil 6.26. Co-Al için faz diyagramı (Niitsu vd., 2011; Omori vd., 2005).

Tablo 6.1' de Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının atomik yüzdelere bakılırsa, ferromanyetik özellik gösteren Co ve Ni elementlerinin atomik yüzdelerinin toplamının diğer alaşımların ferromanyetik özellik gösteren elementlerinin atomik yüzdelerinden düşük olduğu görülür. Bu durum; alaşım oranlarının, Curie sıcaklıklarının üzerinde etkili olduğunu gösterir.

Şekil 6.26' da Co-Al için ikili faz diyagramı görülmektedir. Yaptığımız çalışmada bulduğumuz 716,71 °C olan Curie sıcaklığı değeri faz diyagramında manyetik geçiş bölgesine karşılık gelmektedir (Niitsu vd., 2011; Omori vd., 2005).

Kanth ve arkadaşları, Co<sub>37</sub>Ni<sub>35</sub>Al<sub>28</sub> alaşımıyla yaptıkları çalışmada numunelerini 1100 °C ' de 24 saat homojenleştirip suda soğutmuş ve Curie sıcaklığını ölçmüşler. β ve γ faz bölgeleri için sırasıyla 52 °C, 782 °C olarak iki farklı faz bölgesi için Curie sıcaklıklarını belirlemişlerdir (Kanth, vd., 2010). Bu sonuçlar göz önünde tutulduğunda bu çalışmada Co-Al-Ni alaşımı için bulunan 696,20 °C olan Curie sıcaklığı değerinin γ-faz bölgesindeki Curie sıcaklığı değeriyle yaklaşık olarak eşdeğer olduğu söylenebilir. Alaşım oranlarının, homojenizasyon sıcaklıklarının ve süresinin farklı olmasının Curie sıcaklığının değişiminde etkili olduğu görülmüştür.

Kobaltın Curie sıcaklığı  $1394^{\circ}\text{K}$ ’ dir, Nikelin Curie sıcaklığı ise  $631^{\circ}\text{K}$ ’ dir (Serway, 1992), bu iki değer kıyaslandığında ferromanyetik özellik gösterdiği halde Nikel’ in Curie sıcaklığının çok yüksek olmadığı görülmektedir. Co-Al alaşımına göre, Co-Al-Ni alaşımının Curie sıcaklığı değerinin daha düşük olması buna bağlanabilir. Ayrıca Co-Al-Ni-Cr alaşımının (Tablo 6.10) Curie sıcaklığının oldukça düşük olmasında da Co oranının az olması, Nikelin Curie sıcaklığının düşük olması, Alüminyumun paramanyetik ve de Cr’ un antiferromanyetik özellik göstermesi, kısaca; alaşım içerisindeki elementlerin fiziksel özelliklerinin etkisinin olduğu görülür.

## 6.6. Manyetik Ölçüm Sonuçları

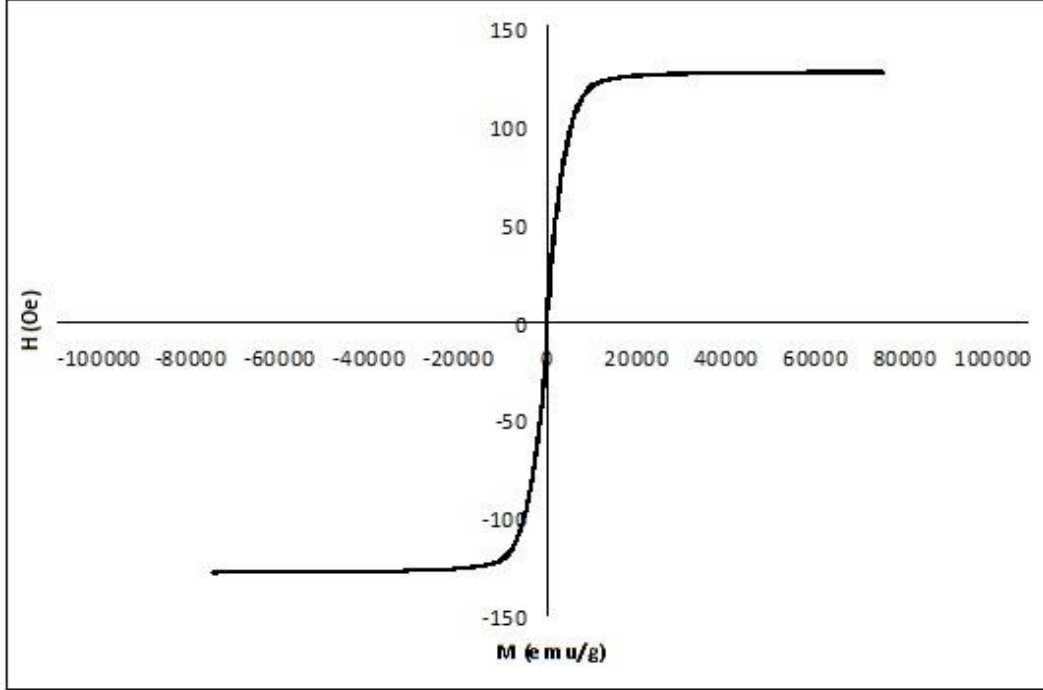
Manyetik  $\text{Co}_{86-x}\text{Al}_{14}\text{Cr}_x$  ( $x = 0$  ve 4 atomikçe) ve  $\text{Co}_{35}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{40-y}\text{Cr}_y$  ( $y = 0$  ve 4 atomikçe) şekil hatırlamalı alaşım gruplarının manyetik ölçümleri Fiziksel Özellik Ölçüm Sistemi (PPMS) (Quantum Dizayn PPMS 9T) cihazı kullanılarak oda sıcaklığında -7T (-70000 Oe) ve 7T (70000 Oe) aralığında alınmıştır.

Alaşımların, manyetik ölçümler sonucu elde edilen manyetik histerisiz eğrileri Şekil 6.27-6.31’ de görülmektedir. Ayrıca bu eğrilerden belirlenen doyum mıknatıslanması, kalıcı mıknatıslanma ve zorlayıcı alan değerleri Tablo 6.11’ de verilmiştir.

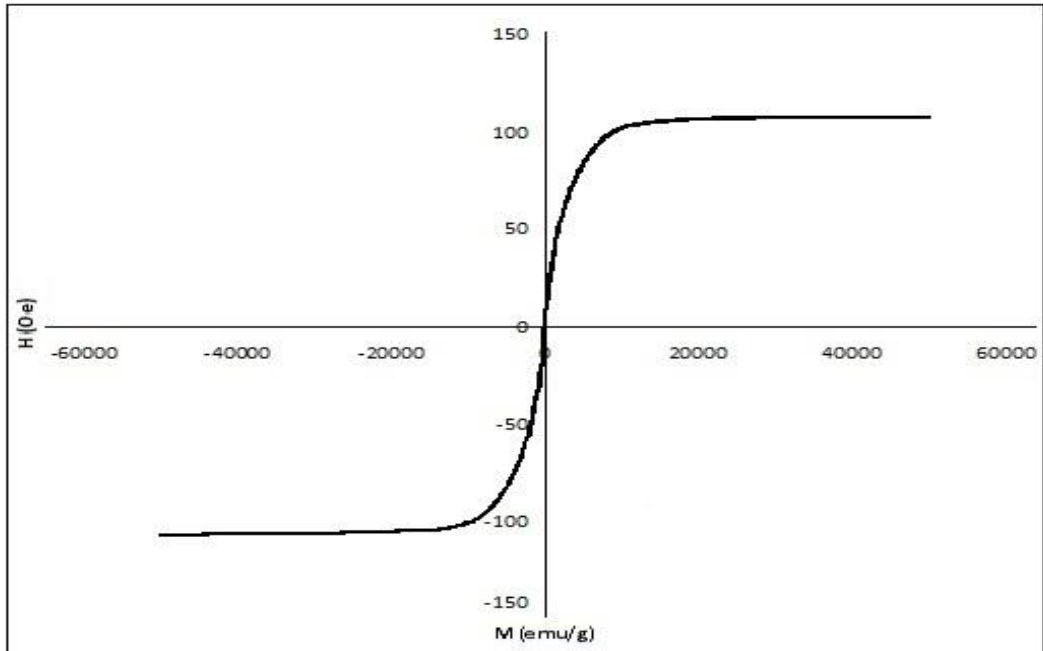
Şekil 6.27’ de Co-Al alaşımının manyetik histerisizine göre; Co-Al alaşımının manyetik doyuma ulaştığı değer  $127,23\text{ emu/g}$  olarak belirlenmiştir. Omori ve arkadaşları yakın oranda çalıştıkları Co-Al alaşımı için doyum mıknatıslanması değerini oda sıcaklığında  $122\text{ emu/g}$  olarak ölçmüşlerdir (Omori vd., 2006). Bu değer bizim çalışmamızda ölçtüğümüz  $127,23\text{ emu/g}$  olan doyum mıknatıslanması değerine oldukça yakındır. Bu değer yüksek çıkmasının nedeni; yüksek manyetik moment değerine sahip ( $\approx 1,6\ \mu_B$ ) kobalt elementinin alaşım içinde atomik yüzdesinin fazla olmasıdır. Co-Al alaşımı için ölçülen değerler göz önüne alındığında  $5\text{ emu/g}$  gibi küçük bir kalıcı mıknatıslanma değeri ve  $110\text{ Oe}$  gibi bir zorlayıcı alan değeri dar histerisiz eğrisinin varlığını göstermektedir.

Histerisiz eğrisinin alanı yumuşak mıknatıslık özelliklerine sahip maddelerde küçük iken sert mıknatıslık özelliklerine sahip maddelerde daha büyüktür (Karpuz, 2006). Zorlayıcı alanı  $125\text{ Oe}$ ’ den küçük olan malzemelere yumuşak, büyük olan malzemelere

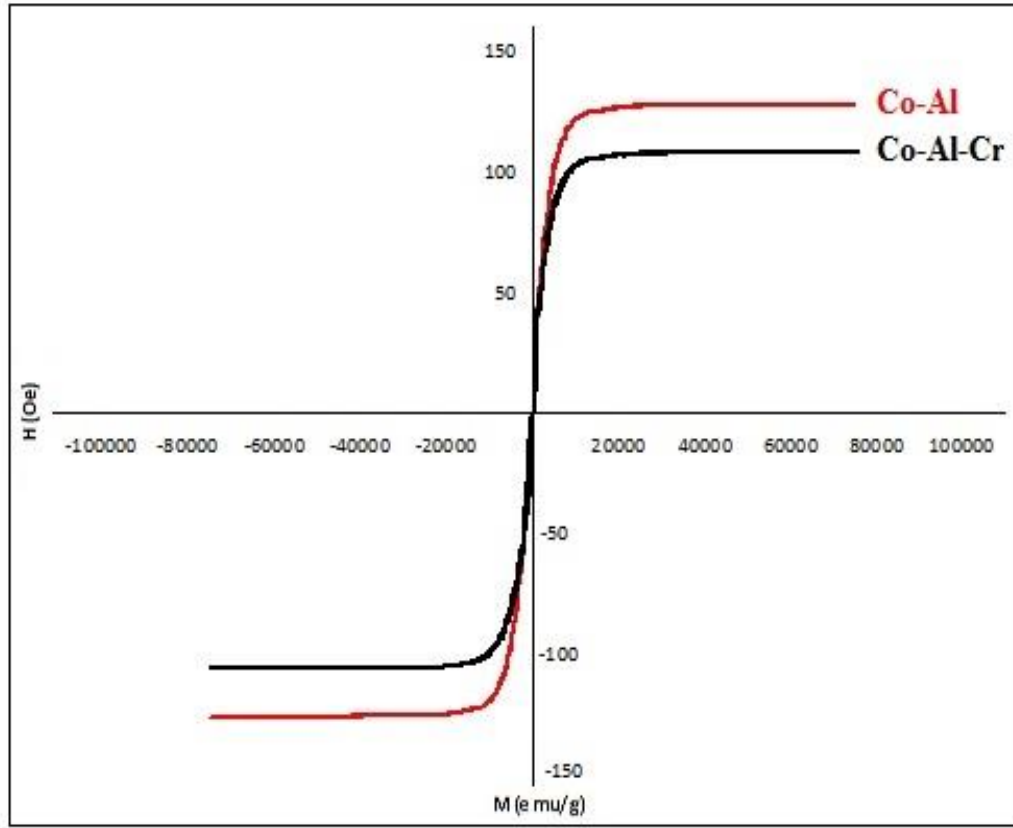
ise sert manyetik malzeme adı verilir (Cullity ve Graham, 2009). Bu durumda denilebilir ki elde ettiğimiz Co-Al alaşımı yumuşak bir manyetik malzemedir.



Şekil 6.27. Co-Al alaşımının oda sıcaklığındaki M-H eğrisi.



Şekil 6.28. Co-Al-Cr alaşımının oda sıcaklığındaki M-H eğrisi.

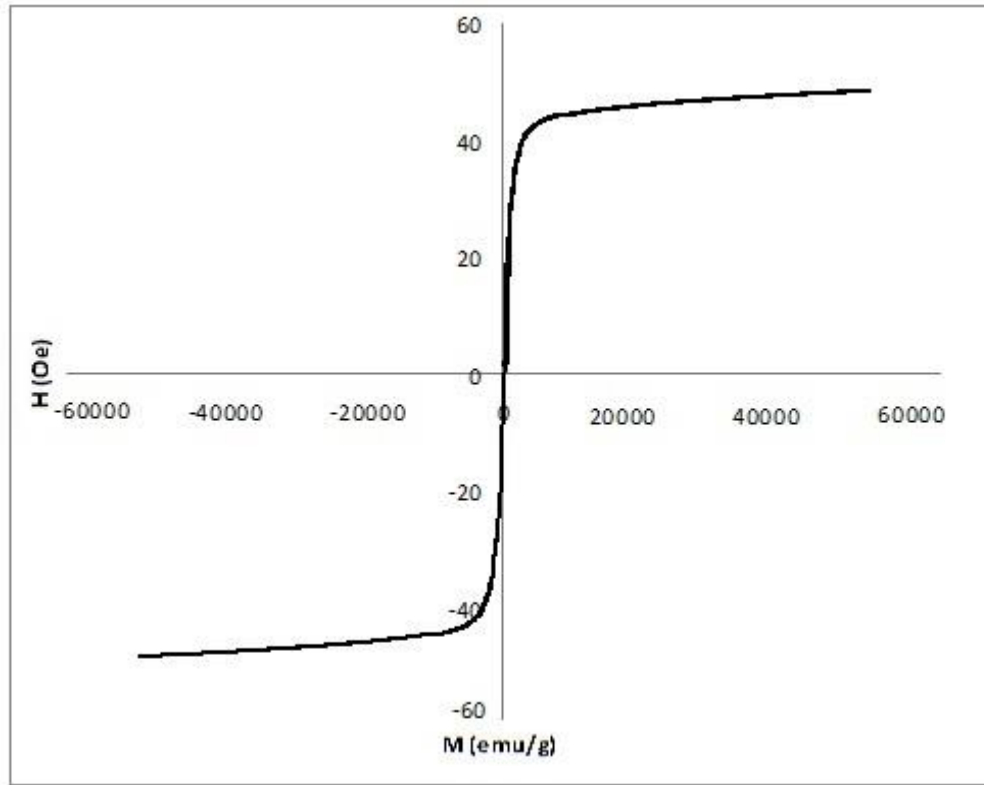


**Şekil 6.29.** Co-Al ve Co-Al-Cr alaşımlarının oda sıcaklığındaki M-H eğrilerinin karşılaştırılması.

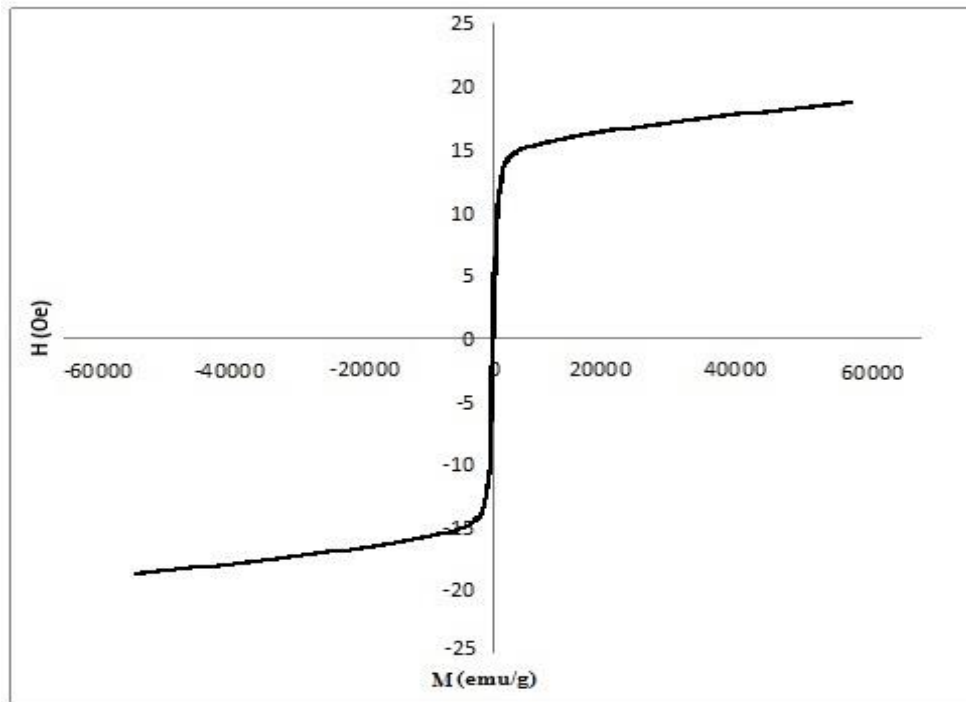
Şekil 6.28’ de Co-Al-Cr alaşımının oda sıcaklığındaki manyetizasyon eğrisi görülmektedir. Ayrıca Tablo 6.11’ de doyum mıknatıslanması, kalıcı mıknatıslanma ve zorlayıcı alan değerleri görülmektedir. Co-Al-Cr alaşımının bu değerleri; Co-Al alaşımı ile kıyaslanırsa bir düşme meydana geldiği görülür. Özellikle doyum mıknatıslanması değerlerindeki düşme çok belirgindir. Bu düşmenin nedeni; Tablo 6.1’ de görülen EDX sonuçlarıyla ilişkili olabilir. Antiferromanyetik özellik gösteren ve  $\mu_B = 0$  olan krom elementi, ağırlıkça ferromanyetik olan kobalt ve paramanyetik olan alüminyum elementinin oranını ve dolayısıyla manyetik etkisini azaltmıştır.

Co-Al-Cr alaşımı için ölçülen kalıcı mıknatıslanma değeri 3,5 emu/g’ dir. Ayrıca zorlayıcı alanı 125 Oe’den küçük, yani; 49 Oe olarak ölçüldüğünden malzememiz yumuşak manyetik malzemedir diyebiliriz. Şekil 6.29 incelenirse Co-Al alaşımına Cr katkısının manyetikliği düşürdüğü görülür. Tablo 6.11 dikkate alındığında Cr katkısının doyum mıknatıslanması, kalıcı mıknatıslanma ve zorlayıcı alan değerlerinin her üçünü de düşürdüğü görülmektedir.

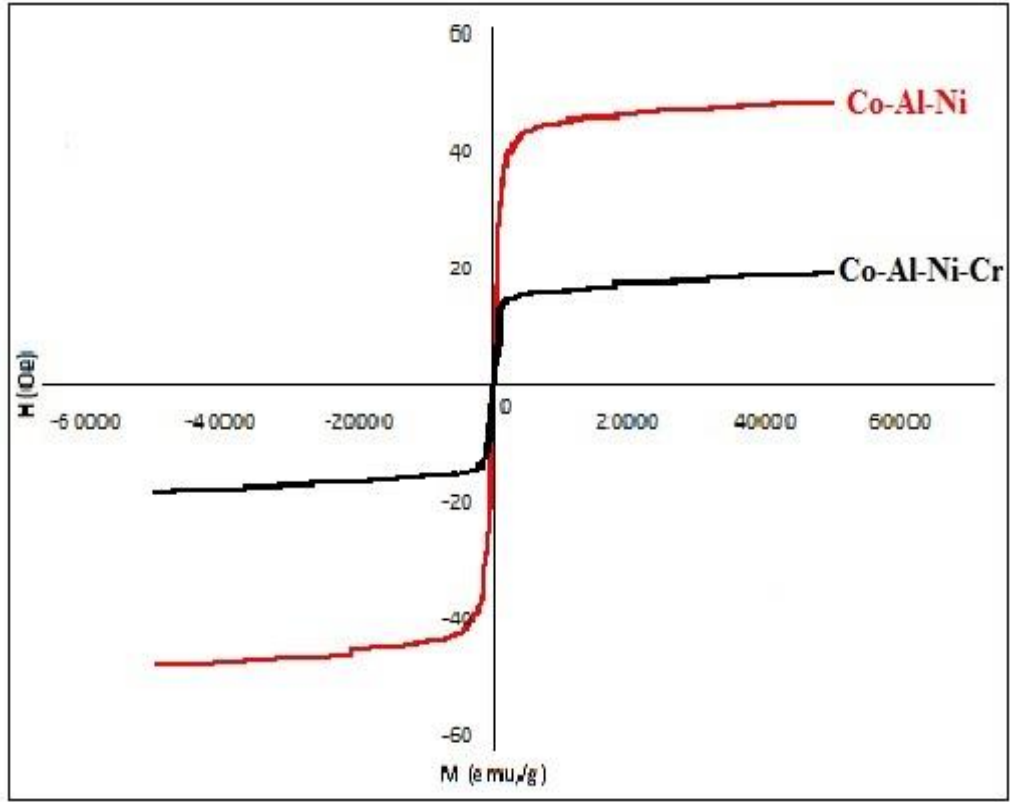




Şekil 6.30. Co-Al-Ni alaşımlarının oda sıcaklığındaki M-H eğrisi.



Şekil 6.31. Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının oda sıcaklığındaki M-H eğrisi.



Şekil 6.32. Co-Al-Ni ve Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının oda sıcaklığındaki M-H eğrilerinin karşılaştırılması.

**Tablo 6.11.** Numunelerin Saturasyon ( $M_s$ ), Remenans ( $M_r$ ) ve Koersivite ( $H_c$ ) değerleri.

| Numune Adı  | Doyum Miknatıslanması<br>(Saturasyon ( $M_s$ )) | Kalıcı Miknatıslanma<br>(Remenans ( $M_r$ )) | Zorlayıcı Alan<br>(Koersivite ( $H_c$ )) |
|-------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| Co-Al       | 127,23 emu/g                                    | 5 emu/g                                      | 110 Oe                                   |
| Co-Al-Cr    | 107,06 emu/g                                    | 3,5 emu/g                                    | 49 Oe                                    |
| Co-Al-Ni    | 48,30 emu/g                                     | 1,5 emu/g                                    | 80 Oe                                    |
| Co-Al-Ni-Cr | 18,67 emu/g                                     | 3,5 emu/g                                    | 105 Oe                                   |

Co-Al-Ni alaşımında kalıcı miknatıslanma değeri 1,5 emu/g, zorlayıcı alan değeri 80 Oe bulunmuştur, bu da Co-Al alaşımında olduğu gibi bu alaşımın yumuşak manyetik özellik sergilediğini gösterir. Şekil 6.30’ da Co-Al-Ni alaşımının oda sıcaklığındaki M-H eğrisi (manyetik histerisizi) ve bu eğri yardımıyla ölçülen değerler Tablo 6.11’ de verilmiştir. Tablo 6.11 incelendiğinde Co-Al-Ni alaşımı için 48,30 emu/g olarak ölçülen değer miknatıslanmanın doyuma ulaştığı değerdir.

Liu ve arkadaşları  $\text{Co}_{39}\text{Ni}_{33}\text{Al}_{28}$  alaşımı ile yaptıkları çalışmada martensit faz sıcaklığında aldıkları M-H eğrisinden saturasyon değerini 48,67 emu/g olarak bulmuşlardır (Liu, vd., 2004). Yaptığımız çalışmada Co-Al-Ni alaşımı için bulduğumuz ölçüm sonuçları literatür ile uyum içerisindedir (Liu, vd., 2004). Bu değer, Co-Al alaşımı ile kıyaslanırsa oldukça düşük olduğu görülür. Bu düşmenin sebebi; EDX sonuçlarına göre atomikçe kobalt oranının birinci grup alaşımlara göre yarı yarıya inmesi ve Bohr magneton değeri  $0,6 \mu_B$  olan nikelin atomikçe oranının % 39 gibi bir değere sahip olmasıdır.

Son olarak, Şekil 6.31' de Co-Al-Ni-Cr alaşımının oda sıcaklığındaki M-H eğrisi görülmektedir. Bu eğriden ölçülen doyum mıknatıslanması değeri 18,67 emu/g olduğu tespit edilmiştir. Bu düşmenin sebebinin, diğer alaşımlarda olduğu gibi atomik oranlardaki değişim olduğu düşünülmektedir. Ferromanyetik olan ve manyetik moment değeri  $1,6 \mu_B$  olan kobalt elementinin alaşım içindeki değeri düşerken, manyetik moment değeri  $0,6 \mu_B$  olan nikel elementinin oranı, paramanyetik olan alüminyum oranının ve antiferromanyetik olan krom elementlerinin oranının artmasıdır. Dolayısıyla Co-Al-Ni-Cr alaşımının doyum mıknatıslanması değerinde de ciddi bir azalış görülmüştür. Bu alaşımda da düşük kalıcı mıknatıslanma ve zorlayıcı alan değeri, alaşımın yumuşak manyetik özellik sergilediğini gösterir.

## 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

EDX ölçümlerinden elde edilen Atomik Yüzde (%at), Ağırlık Yüzde (%wt) ve hesaplanan Elektron konsantrasyonu (e/a) değerleri hazırladığımız alaşımların yüzdeleri ile hemen hemen aynı orandadır.

Co-bazlı alaşımlarda e/a oranı önemli bir veridir. Bu oranın artırılması ile  $A_s$  ve  $M_s$  sıcaklıklarında da düzenli bir şekilde artış gözlenir (Zhuhong, vd., 2008). Ayrıca e/a oranı, EDX sonuçlarına göre; Co-Al alaşımına Cr katkısı neticesinde artmakta ve buna bağlı olarak da austenit ve martensit başlama sıcaklıkları da artmaktadır. Co-Al-Ni alaşımına Cr katıldığında e/a oranı EDX sonuçlarına göre azalmaktadır ve dolayısıyla  $A_s$  ve  $M_s$  sıcaklıkları da düzenli bir şekilde azalmaktadır.

Co-bazlı alaşımlarda  $A_s$ - $M_s$  arasındaki fark ne kadar az ise alaşım o kadar termoelastik yapı gösterir (Akis, vd., 2011). Termoelastik dönüşümlerde, sadece orijinal kristal yapı ve yönelimi eski halini almakla kalmayıp mikroyapı da eski halini hatırlamaktadır. Bu tür dönüşümlerde, sıcaklık düşürüldükçe martensit plakalar oluşup büyürler. Bu plakalar soğutma işleminin devam etmesiyle birbirlerine ya da tane sınırına ulaşıncaya kadar büyümeye devam ederler. Sıcaklık yükseltildiğinde ise ara yüzeyin geri hareketiyle martensitik oluşumlar büzülerek ana faza dönüşür (Eskil, 2006). Bu çalışmada elde edilen alaşımlar  $A_s$ - $M_s$  farkına göre sıralandığında Co-Al > Co-Al-Cr > Co-Al-Ni-Cr > Co-Al-Ni şeklinde olduğu görülmektedir. Bu durumda termoelastik yapı özelliği en iyi Co-Al-Ni alaşımında görülmüştür.

Birinci grup alaşımlarda (Co-Al, Co-Al-Cr) termodinamik parametreler kıyaslandığında, Cr katkısı entalpi ve entropi değerini düşürmüştür. İkinci grup alaşımlarda (Co-Al-Ni, Co-Al-Ni-Cr) ise Cr katkısı entalpi ve entropi değerlerini arttırmıştır.

Şekil hatırlamalı Co-Al alaşımına Cr katkısı martensit dönüşüm sıcaklıklarını etkilemektedir. Bunun yanında ısı işlem sıcaklığı veya süresi dönüşüm sıcaklığını ayarlamayı sağlar (Guitierrez vd., 2007). Isıl işlemle dönüşüm sıcaklığını kontrol etmek alaşımın kompozisyon oranını değiştirmekten daha kolaydır (Kök, 2011).

Dönüşüm sıcaklık aralığı değeri; şekil hatırlamalı alaşımların çalışma aralığını gösterir. Aralık ne kadar dar olursa, alaşımın fiziksel özellikleri üzerine çalışmak o kadar kolay olur (Kök, 2011). Yapılan çalışmada Co-Al alaşımına Cr katkısının dönüşüm sıcaklık aralığını azalttığı, Co-Al-Ni alaşımına Cr katkısının ise dönüşüm sıcaklık aralığını arttırdığı görüldü.

Bu çalışmada alaşım gruplarının x-ışını difraktogramlarının indislenmesi literatür bilgileri doğrultusunda gerçekleştirildi (Ando vd., 2006; Omori vd., 2005; Chen vd., 2009; Kanth, vd., 2010; Liu vd., 2004; Liu vd., 2005; Liu vd., 2006; Kainuma, 1996).

Co-Al için  $44^\circ$  civarında şiddeti oldukça büyük olan  $\gamma$  faza ait (111) piki ve  $\epsilon$  faza ait (0002) piki (Ando vd., 2006; Omori vd., 2005; Chen vd., 2009) mevcut iken Co-Al-Cr alaşımı için aynı bölgede şiddeti daha küçük olan pikler gözlemlendi. Ayrıca, Cr katkısı ile Co-Al alaşımı için ölçülen piklerin şiddeti azalmakta ve  $48^\circ$  civarında ise yeni pikler meydana gelmektedir. Bunun sebebi şöyle açıklanabilir; Co-Al alaşımına Cr katkısı, malzemenin sünekliğini azaltmaktadır. Co-Al-Cr alaşımının sünekliğinin azalması hep yapının yüksek sertleşme oranına sahip olması ve  $\epsilon$  martensit fazın yüksek hacim fonksiyonu ile ilişkilidir (Ando, vd., 2006).

Co-Al-Ni alaşımı için yaklaşık  $44^\circ$  civarında çok keskin ve şiddeti büyük olan  $\beta(110)$  piki, yaklaşık  $51^\circ$  civarında yine keskin ve şiddeti büyük olan  $\gamma(200)$  piki ve son olarak da  $76^\circ$  civarı göze çarpan  $\gamma(220)$  ve  $\beta(210)$  pikleri (Kanth, vd., 2010) görülmektedir. CoNiAl alaşımları birçok alaşım türünden farklı olarak yüksek sıcaklıklarda birden fazla faz bulundurabilir ve bu bölgede genellikle  $\beta(B2) + \gamma(A1)$  çift faz yapısına sahiptirler.  $\gamma$  (fcc) fazı kırılgan olan  $\beta$  fazının aksine malzemenin sünekliğini artırır.  $\gamma$  fazı martensitik dönüşüme yol açmaz ve ilerleyen martensit plakalarının ilişkilerini olumsuz etkiler (Akis, 2012).  $\gamma$  ve  $\beta$  faza ait pikler, Cr katkısı ile keskinliğini yitirmekte, yayvan hale gelmekte ve şiddetinde belirgin bir düşme gözlenmektedir. Ayrıca Cr katkısı ile yaklaşık  $74,5^\circ$  civarında şiddeti oldukça düşük yeni bir pik oluşmaktadır. Cr katkısı ile piklerin şiddetinin azalması ve yayvanlaşması kristalde tane boyutunun ve faz miktarının arttığını göstermektedir. Ayrıca kristalin büyüklüğü azaldıkça pikin genişliği artmakta yani, pik yayvanlaşmaktadır (Cullity, 1966).

Co-Al alaşımının 200 ve 500 büyütme optik görüntüleri incelendiğinde tane sınırları net olarak gözlenmektedir, 1000 büyütmede ise tane sınırları net olarak gözlenmemektedir. Bu durum tanelerin oldukça büyük olduğunu gösterir. Ayrıca bütün büyütmelerde martensit plakalar görüldüğü gibi  $\gamma$  ve  $\epsilon$  faz bölgeleri de görülmektedir. Bununla birlikte yapı içindeki siyah noktaların, parlatma veya dağlamadan kaynaklanan boşluklar veya çökelti fazları olduğu düşünülmektedir.

Co-Al alaşımının koyu renkli yerlerinde ince levha şeklinde  $\gamma$  faz bölgelerinin ve açık renkli yerlerinde ise  $\epsilon$  faz bölgelerinin varlığı dikkat çekmektedir. Tüm bu sonuçlar

literatür ile uyum içerisinde (Niitsu, vd., 2011; Omori, vd., 2003; Omori, vd., 2005; Omori, vd., 2006; Chen, vd., 2009).

Co-Al alaşıma Cr katkısı, tane boyutlarını küçülttüğü gibi farklı faz bölgelerinin de oluşumuna sebep olmuştur. 1000 büyütme optik görüntülerine bakıldığında Cr katkısı ile açık renkli  $\varepsilon$  faz bölgelerinin azaldığı dikkatimizi çekmektedir. Farklı fazların oluşmasında homojenizasyon sıcaklığı ve süresi, alaşım kompozisyonu etkili olabilir, ya da oluşturulan yeni alaşımın özelliğinden dolayı farklı faz bölgeleri meydana gelmiş olabilir. Bununla birlikte, siyah noktaların, parlatma veya dağlamadan kaynaklanan boşluklar veya çökelti fazları olduğu düşünülmektedir.

Literatür bilgisi doğrultusunda; Co-Al alaşımın da,  $\gamma$  ve  $\varepsilon$  faz bölgelerinin varlığı bilinmektedir. Cr katkısı Co-Al alaşımı için ölçülen x- ışını kırınım piklerinin şiddetini düşürmüştür. Literatür ile uyumlu olduğu gibi tüm bu sonuçlar birbirleriyle de uyum içerisinde (Omori, vd., 2005; Omori, vd., 2006; Cullity, 1966; Niitsu, vd., 2011; Omori, vd., 2003; Chen, vd., 2009 ).

Co-Al-Ni alaşımı incelendiğinde dendritler ve bu dendritlerin içerisinde farklı yönelimlere sahip martensit plakalar görülmektedir. Co-Al-Ni alaşımıyla yapılan çalışmada, optik mikroskopta gözlediğimiz dendrit yapılar literatür ile uyum içerisinde (Maziarz, 2008; Liu vd., 2005; Katrych ve Steurer, 2009; Guo-fu vd., 2006; Liu vd., 2006; Tanaka vd., 2004). 200 büyütmede net gözlenmeyen martensit plakalar 500 büyütmede daha net gözlenmektedir. Co-Al-Ni alaşımında rastladığımız dendrit yapılar ve  $\beta$ -faz bölgesinde görülen martensit plakalar Co-Al-Ni-Cr alaşımının' da da gözlemlendi. Aynı şekilde  $\gamma$ -faz bölgesinde martensit plakalar yine görülmemektedir.  $\beta$ -faz bölgesinde görülen martensit plakalar düzensiz yapıdadır.

$\gamma$  fazın şekil hatırlamalı alaşım içinde meydana gelmesi, alaşımın sünekliğini artırır (Liu vd., 2006). Örneğin bu nedenle, Ni-Al alaşımına Fe veya Co katılarak  $\beta+\gamma$  faza sahip CoNiAl ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlar elde edilmiştir (Kök, 2011).

Cr katkısının dendritik yapıyı değiştirmede ve  $\beta$ -faz bölgelerinin Co-Al-Ni alaşımında görülen  $\beta$ -faz bölgelerinden biraz daha geniş olması şeklinde bir etki yaptığı görülmektedir.

Ayrıca, Vickers sertlik ölçümleri incelendiğinde; Co-bazlı her iki alaşım grubunda da Cr katkısının sertliği arttıran bir özellik sergilediği görülmektedir.

Omori ve arkadaşları, Co-14at%Al alaşımıyla yaptıkları çalışmada Curie sıcaklığını 689 °C olarak bulmuşlar (Omori vd., 2006). Bu değer yakın oranda hazırladığımız Co-Al

alaşımı için 716,71 °C olarak ölçüldü. Co-Al alaşımına Cr katkısı Curie sıcaklığını düşürmektedir, yani; Curie sıcaklığında numune ferromanyetik halden paramanyetik hale geçmekte, dolayısıyla ferromanyetikliğini kaybetmektedir. Bu durumda Cr katkısı ile Co-Al ve Co-Al-Ni alaşımları ferromanyetik özelliklerini daha erken kaybetmekte ve paramanyetik hale geçmektedirler.

Tablo 6.1' de Co-Al-Ni-Cr alaşımının atomik yüzdelere bakılırsa, ferromanyetik özellik gösteren Co ve Ni elementlerinin atomik yüzdelerinin toplamının diğer alaşımların ferromanyetik özellik gösteren elementlerinin atomik yüzdelerinden düşük olduğu görülür. Bu durum; alaşım oranlarının, Curie sıcaklıklarının üzerinde etkili olduğunu gösterir.

Omori ve arkadaşları benzer oranda çalıştıkları Co-Al alaşımı için doyum mıknatıslanması değerini oda sıcaklığında 120 emu/g olarak ölçmüşlerdir (Omori vd., 2006). Bu değer bizim çalışmamızda ölçtüğümüz 127,23 emu/g olan doyum mıknatıslanması değerine oldukça yakındır.

İki farklı alaşım grubu olan Co-Al, Co-Al-Cr ve Co-Al-Ni, Co-Al-Ni-Cr alaşımlarının oda sıcaklığında elde edilen manyetik histerisizlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, Cr katkısı her iki alaşım grubunda doyum mıknatıslanması değerini düşürmüştür. Bu düşüşün nedeninin manyetik moment değeri yüksek olan Co elementinin atomikçe değerinin azalması, dolayısıyla da alaşım içindeki tesirinin azalması olarak açıklanabilir. Cr elementinin antiferromanyetik olması da önemli bir etkidir. Her iki alaşım grubunda da kalıcı mıknatıslanma ve zorlayıcı alan değerinin düşük olması, alaşımların yumuşak manyetik malzeme özelliği sergilediğini gösterir.

## 8. İLERİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Bu çalışmada Co bazlı iki farklı alaşım grubu  $\text{Co}_{86-x}\text{Al}_{14}\text{Cr}_x$  ( $x = 0$  ve 4 atomikçe) ve  $\text{Co}_{35}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{40-y}\text{Cr}_y$  ( $y = 0$  ve 4 atomikçe) şeklinde alaşım kompozisyonuna sahip olacak şekilde üretildiler. Bu alaşımların üretimi ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi üzerine yapılan tüm deneysel işlemlerin ışığı altında aşağıda önerilen çalışmaların da yapılabileceği sonucuna varılmıştır, buna göre;

1. Öncelikle farklı alaşım kompozisyonunda Co-bazlı ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlar üretilebilir ve fiziksel özellikleri incelenebilir.
2. Ürettiğimiz alaşım gruplarına farklı ısı işlemler uygulanabilir ve ısı işlemin alaşımlar üzerindeki etkisi incelenebilir.
3. Alaşımlara zor uygulanabilir ve bunun etkisi incelenebilir.
4. Co-bazlı ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlarda çökelti oluşumunun şekil hatırlama davranışı üzerine etkileri incelenebilir.
5. Aynı oranda alaşımlar üretilirken toz metalürjisi kullanılabilir ve Ark Melter yöntemiyle üretilen alaşımların fiziksel özellikleri arasındaki farklar incelenebilir.
6. Alaşımların sıcaklıkla elektriksel özelliklerinin değişimi ve dönüşüm sıcaklığı ile elektriksel özellikler arasındaki ilişki incelenebilir.
7. Alaşımlar üzerine termal çevrim uygulanabilir ve bunun alaşım üzerindeki etkisi incelenebilir.
8. Co-bazlı ferromanyetik alaşımların şekil hatırlama özelliklerini etkileyen kristalografik dönüşüm parametreleri incelenebilir.
9. Mekaniksel alaşımlama yöntemiyle ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşım üretimi gerçekleştirilebilir ve şekil hatırlama davranışlarının karakterizasyonu incelenebilir.
10. Alaşımlara yaşlandırma işlemi uygulanabilir, yaşlandırma sonucu oluşan çökelti faz yoğunlukları gözlenebilir ve bu yoğunlukların farklı sıcaklıklarda yaşlandırmayla nasıl değiştiği araştırılabilir.
11. Dislokasyonlar gözlenebilir ve yoğunlukları hesaplanabilir.



## KAYNAKLAR

- Adıgüzel, O. ve Ceylan, M.,** 1988. Shape Memory Phenomena in Noble Metal Copper Based Alloys. J. Inst. Sci. Techn., Gazi Üniv., 1, 1, 35-41.
- Akdoğan, A. ve Nurveren, K.,** 2002. Akıllı Malzemeler ve Uygulamaları, Machinery MakinaTek, sayı 57, s. 35.
- Akdoğan, A. ve Nurveren, K.,** 2003. Şekil Hafızalı Alaşımlar. Mühendis ve Makine Dergisi, Ankara, 521, 35–45.
- Akdoğan, A.,** 2004. “Akıllı Malzemeler” Makine Tek., Sayı 85, İstanbul.,
- Akis, A.Ç., Eşkil, M., Seval, E.,** 2011. ‘Farklı Etkiler Altında Şekil Hatırlamalı CoNiAl Alaşımlarının Martensitik Dönüşüm Sıcaklıklarındaki Değişimler’, e-Journal of New World Sciences Academy, Volume: 6, Number: 1, ISSN: 1306-3111.
- Akis, A.Ç.,** 2012. ‘Şekil Hatırlamalı Co-Ni-Al-Si Alaşımında Yaşlandırma Olayının Martensitik Faz Dönüşümü Üzerine Etkileri’, Yüksek Lisans Tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ando, K., Omori, T., Sato, J., Sutou, Y., Oikawa, K., Kainuma, R., Ishida, K.,** 2006. ‘Effect of Alloying Elements on fcc/hcp Martensitic Transformation and Shape Memory Properties in Co-Al Alloys’, Materials Transactions, Vol.47, No.9pp. 2381 to 2386.
- Auricchio, F., Di Loreto, M., Sacco, E.,** 2000. “Finite Element Analysis of a Stenotic Artery Revascularization Through A Stent Insertion”, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, Vol. 00, PP. 1- 15, Malaysia.
- Auricchio, F.,** 2002. “Shape Memory Alloys: Applications and Finite-Element Modeling”, Meccanica Strutturale, Università degli Studi di Pavia, Italy.

- Aytekin, V.**, 1966. Metalurji Termodinamiği. İstanbul Teknik Üniv., Berksoy Matbaası, İstanbul.
- Baksan, B. ve Gürler, R.**, 2006. Bakır Esaslı Şekil Bellekli Alaşımların Üretimi ve Çekme Deneyi ile Karakterizasyonu, , SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü dergisi, 10,. Cilt.
- Barrett, C.S. ve Massalski, T.B.**, 1980. Structure of Metals. Pergamon Press, Oxford, 270-276.
- Borisenko I.D., Koledov V.V., Khalovailo V.V. ve Shavrov V.G.**, 2006. Martensitic and Magnetic Phase Transition in Ternary Ferromagnetic alloys Ni-Mn-Ga, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 300, 486-488.
- Brown E.M.**, 2004, Introduction to Thermal Analysis Techniques and Applications, Kluwer Academic, Newyork.
- Calister D.W.**, 2004, Fundamental Of Materials Science and Engineering, John Wiley&Son, Newyork.
- Chatterjee, S., Thakur, M., Giri, S., Majumdar, S., Debd, A.K., Deb, S.K.**, 2008. Transport, magnetic and structural investigations of Co-Ni-Al shape memory alloy Journal of Alloys and Compounds 456, 96-100.
- Chen, F., Tian, B., Tong, Y., Zheng, Y.**, 2009. ‘Transformation Behavior and Shape Memory Effect of a CoAl Alloy’, International Journal of Modern Physics B, Vol.23, Nos.6&7, 1931-1936.
- Chernenko V.A. ve Besseghini S.**, 2008. Ferromagnetic Shape Memory Alloys: Scientific and Applied Aspects, Sensors and Actuators, 142, 542-548.
- Collin, R.E.**, 1966. “Foundations for Microwave Engineering”, Mc Graw Hill,

- Cullity, B.D.**, 1966. (Çeviri) ‘X-Işınlarnın Difraksiyonu’, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, Gümüşsuyu.
- Cullity, B.D. ve Graham, C.D.**, 2009. Introduction to Magnetic Materials, Wiley, USA.
- Darjan, C.**, 2007. Shape Memory Alloys, Seminer, Slovakia.
- Delaey, L., Krishnan, R.V., Tas, H., Warlimont, H.**, 1974. Thermoelasticity, Pseudoelasticity and the Memory Effects Associated with Martensitic Transformations. Journal of Materials Science, 9, 1521–1535.
- Dhaka R.S., D’ Souza S.W., Marinaj M., Chakrabarti A., Schlagel D.L., Lograsso T.A. ve Barmam S.R.**, 2009. Photoemission study of the (100) Surface of NiMnGa and Mn<sub>2</sub>NiGa ferromagnetic Shape memory Alloys, Surface Science, 1999-2004.
- Erdoğan, M.**, 2001. (Çeviri), Malzeme Bilimi ve Mühendislik malzemeleri, Nobel Yayın Dağıtım.
- Eskil, M.**, 2006. ‘Fe-Mn-Si Alaşımlarının Mekanik Ve Termal Etkiler Altında Şekil Hatırlama Özelliklerinin İncelenmesi’, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Fremont, M. ve Miyazaki, S.**, 1996. Shape Memory Alloys. Springer Verlag CISM Courses and Lectures No:351, 147s. Berlin.
- Freed, Y.**, 2009. Jacob Aboudi, Micromechanical Prediction of The way-Way Shape Memory Effect in Shape Memory Alloy Composites, International journals of Solids and Structures, , 1634-1647.
- Friend, C.M.**, 1986. The Effect of Applied Stress on the Reversible Strain in CuZnAl Shape Memory Alloys. Scripta Metall., 20, 995-1000.

- Funakubo, H.**, 1987. Shape Memory Alloys, (Japonca' dan İngilizce' ye çeviri), J.B. Kennedy, Gordon and Breach Science Publishers, London.
- Goryczka T., Lelatko J., G'orka-Kostrubiec B., Ochinn P., ve Morawiec H.**, 2008. Martensitic Transformation in Melt Spun Ni-Mn-Ga Ribbon, The European Physical Journal Special Topic, 131-136
- Gould, H. ve Tobochnik, J.**, 2006. Thermal and Statistical Physics, Princeton University Press, 39, 50-52, 67.
- Göktaş, A.**, 2007. "Sol-Jel Metodu ile Manyetik Film Yapımı ve Karakterizasyonunun İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Guo-Fu, X., Zhi-Min, Y., Feng-Hua, L., Shen-Zhou, M., Oikawa, K.**, 2006. 'Martensitic and Magnetic Transformation of  $\text{Co}_{41}\text{Ni}_{32}\text{Al}_{24}\text{Sb}_3$  and  $\text{Co}_{41}\text{Ni}_{32}\text{Al}_{27}$  Alloys', Trans. Nonferrous Met. Soc. China 16, 776-782.
- Gutierrez J., Lazpita P., Barandiaran J.M., Fdez-Gubieda M.L., Chaboy J. ve Kawamura N.**, 2007, Annealing Influence on the Atomic Ordering and Magnetic Moment in a Ni-Mn-Ga alloy, Journal of Magnetism and Magnetic materials, 316, 610-613.
- Gündüz, E.**, 1992. Modern Fiziğe Giriş, Ege Üniversitesi Fen Fakültesi, İzmir.
- Han, Z.D., Wang, D.H., Zhang, C.L., Xuan, H.C., Zhang, J.R., Gu, B.X., Du, Y.W.**, 2009. Effect of lattice Contraction on Martensitic Transformation and magnetocaloric Effect in Ge Doped Ni-Mn-Sn Alloys, Materials Science and Engineering, 40-43.
- Heil, T.M.**, 2005. A Phase-Field Computer Model of Microstructure Evolution In a Ferromagnetic Shape Memory Alloy, Blackburg, Virginia, USA.

- Hodgson, D.E.**, 2002. “Shape Memory Applications”, Inc., Wu, M.H., Memory Technologies, and Biermann R.J., Harrison Alloys, Inc.
- Honna, 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.
- Hornbogen, E.**, 1988. Fatigue of Copper-Base Shape Memory Alloys. Engineering Aspect of Shape Memory Alloys, Michigan State University, Kellogg Center, 5-7.August 1988, Unpublished Study.
- Huang, W.**, 1998. “Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures”, Doktora Tezi, University of Cambridge , Peterhouse.
- Işık, A.**, 2007. ‘FePd Ferromagnetik Şekil Hafıza Alaşımının Kristalografisi’, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Jiles, D.C.**, 2003. Recent Advances and Future Direction in Magnetic Materials, Acta Materialia, 51, 5907-5939.
- Kantarci, N.**, 2009. ‘Sm1-Xgdxni4b Bileşiklerinin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması’, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kanth, B.R., Ramarao, N.V., Panda, A.K., Gopalan, R., Mitra, A., Mukhopadhyay, P.K.**, 2010. ‘Effect of Annealing on the Martensitic Transformation of a CoNiAl Ferromagnetic Shape Memory Alloy’, Journal of Alloys and Compounds 491, 22-25.
- Karaağaç, Ö.**, 2007. “CoCu Alaşım Filmlerin Elektrodpozisyonu, Yapısal ve Manyetik Özellikleri Üzerine Depozisyon Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Karpuz, A.,** 2006. “Fe-Cu Alaşım Filmlerin Büyütölmesi, Yapısal ve Manyetik Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Katrych, S. ve Steurer, W.,** 2009. ‘Stability Range of the Ternary W-Phase in the System Al-Co-Ni’, Journal of Alloys and Compounds 481, 258-263.
- Kittel, C.,** 2005. Introduction to Solid State Physics, John Wiley&Son, USA.
- Khovaylo, V., Koledov, V., Shayrov, V., Ohtsuka, M., Miki, H., Takagi, T., Novosad, V.,** 2008. Influence of cobalt on Phase Transition in  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{37}\text{Sn}_{13}$ , Materials Science and Engineering A, 481-482, 322-325.
- Kök, M.,** 2011. "Ni-Mn-Ga Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımının Fiziksel Özellikleri Üzerine Alaşım Oranı ve Isıl İşlem Etkisinin İncelenmesi", Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Kulkova, S. E., Ereameev, S. V., Kulkov, S.S.,** 2004. Electronic Structure and magnetic Properties of Co- and Mn- based Heusler Alloys and thin Film, Solid State Communication, , 793-797.
- Liu, Z.H., Dai, X.F., Zhu, Z.Y., Hu, H.N., Chen, J.L., Liu, G.D., Wu, G.H.,** 2004. ‘Martensitic Transformation and Magnetic Properties of Co-Ni-Al Shape Memory Alloy Ribbons’, J. Phys. D: Appl. Phys. 37, 2643-2647.
- Liu, J., Zheng, H. X., Xia, M.X., Huang, Y. L., Li, J. G.,** 2005. Martensitic, Transformation and Magnetic Properties in Heusler CoNiGa Magnetic Shape Memory Alloys, Scripta Materialia, 935-938.
- Liu, J. ve Li, J. G.,** 2006. Magnetic Force Microscopy Observations of CoNiGa and CoNiAl Alloys with Two-Phase Structures, Scripta Materialia 55, 755-758.

- Liu H., Wang H.Y., S.Y. Yu, Dai X.F., Chen J.L., Wu G.H., Liu Y., 2006.** Phase Equilibrium of ferromagnetic Shape Memory Alloy Co<sub>39</sub>Ni<sub>33</sub>Al<sub>28</sub>, Scripta Materialia, 1299-1304.
- Langauer, S., Bochnak, I., Janak, G., Makroczy, P. And Longauerova, M., 1995.** Shape Memory Effect in CuZnAl Alloys Quenched from Alfa+Beta Phase Zone. J. Phys. IV, 5(C8), 847-852.
- Lovey, F.C., Torra, V., Isalgue, A., Roqueta, D. And Sade, M., 1994.** Interaction of Single Variant Martensitic Transformation with Small  $\gamma$  Type Precipitates in Cu-Zn-Al. Acta Metall., 42, 453-460.
- Mattis, D.C., 1981.** The Theory of Magnetism, Springer Verlag.
- Maziarz, W., 2008.** ‘Structure Changes of Co-Ni-Al Ferromagnetic Shape Memory Alloys after Vacuum Annealing and hot Rolling’, Journal of Alloys and Compounds 448, 223-226.
- Morito, H., Fujita, A., Fukamichi, K., Kainuma, R., Ishida, K., 2002.** ‘Magnetocrystalline Anisotropy in single-crystal Co-Ni-Al Ferromagnetic Shape Memory Alloy’, Applied Physics Letters. Volume 81, Number 9.
- Murakami, Y., Shinko, D., Oikawa, K., Kainuma, R., Ishida, K., 2002.** Magnetic Domain Structure in Co-Ni-Al Shape Memory Alloys Studied by Lorentz Microscopy and Electron Holography, Acta materialia, 2173-2184.
- Meyers, M.A. ve Chawla, K.K., 1998.** Mechanical Behavior of Materials. Prentice Hall, 680 s. USA.
- Moya X., Mañosa L., Planes A., Krenke T. , Acet M. ve Wassermann E.F., 2006.** Martensitic transition and Magnetic Properties in Ni-Mn-X Alloys, Materials Science and Engineering, 911-915.

- Niitsu, K., Omori, T., Nagasako, M., Oikawa, K., Kainuma, R., Ishida, K., 2011.** ‘Phase Transformations in the B2 Phase of Co-rich Co-Al Binary Alloys’, Journal of Alloys and Compounds 509, 2697-2702.
- Nishiyama, Z., 1978.** Martensitic Transformation. Academic Press, New York, 238-249.
- Oikawa, K., Tanaka, Y., Sutou, Y., Omori, T., Luo, F., Kainuma, R., Ishida, K., 2006.** Effect of Aging and Co Addition on Martensitic and Magnetic Transition in Ni-Al-Fe  $\beta$  Based Shape Memory Alloys, ISIJ international, 46, 1287-1291.
- Okumuş, M., 2006.** "Al-Ni-Si Alaşımlarının Hızlı Katılaştırma ile Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.
- Omori, T., Sutou, Y., Oikawa, K., Kainuma, R., Ishida, K., 2003.** ‘Shape Memory Effect Associated with FCC-HCP Martensitic Transformation in Co-Al Alloys’, Materials Transactions, Vol.44, No.12pp, 2732-2735.
- Omori, T., Sutou, Y., Oikawa, K., Kainuma, R., Ishida, K., 2005.** ‘Shape Memory Effect in the Ferromagnetic Co-14at%Al Alloy’, Scripta Materialia 52, 565-569.
- Omori, T., Sutou, Y., Oikawa, K., Kainuma, R., Ishida, K., 2006.** ‘Shape Memory and Magnetic Properties Co-Al Ferromagnetic Shape Memory Alloys’, Materials Science and Engineering, , 1045-1049.
- Onaran, K., 2006.** Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi.
- Ortin, J. ve Planes, A., 1988.** Thermodynamic Analysis of Thermal Measurements in Thermoelastic Martensitic Transformations. Acta Metall., 36, 8, 1873-1889.
- Ortin, J. ve Planes, A., 1989.** Thermodynamics of Thermoelastic Martensitic Transformations. Acta Metall., 37(5), 1433-1441.



- Otsuka, K. ve Shimizu, K.,** 1986. Pseudoelasticity and Shape Memory Effects in Alloys. International Metal Reviews, 31, 3, 93-114.
- Otsuka, K. ve Kakeshita, T.,** 2002. Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments, MRS Bulletin, 91 -100.
- Özçelik, B.,** 2009. ICSM 2009 Kış Okulu Ders Notları.
- Perkins, J. ve Sponholz, R.O.,** 1984. Stress-Induced Martensitic Transformation Cycling and Two Way Shape Memory Training in Cu-Zn-Al alloys. Metall. Trans. A, 15A, 313-321.
- Pirge, G., Hacıoğlu, A., Ermiş, M., Altıntaş, S.,** 2009. Determination of Composition of NiMnGa Magnetic Shape Memory Alloys using Hybrid Evolutionary Algorithms, Computational Materials Science, 189-193.
- Prado, M.O., Decorte, P.M., Lovey, F.,** 1995. Martensitic Transformation in Cu-Mn-Al Alloys. Scripta Metallurgica et Materialia, 33, 6, 877-883.
- Rahman, M.A.,** 2008. Patents On Superelastic Shape Memory Alloys, Recent patents on Mechanical Engineering,1, 65-67
- 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.
- Salzbrenner, R.J. ve Cohen, M.,** 1978. On the Thermodynamics of Thermoelastic Martensitic Transformations. Acta Metallurgica, 27, 739-748.
- Saranlı, G., Karabay, Y.Z., Tarhan, E., Bor, Ş.,** 1997. Cu-Zn-Al Şekil Bellekli Alaşımların Üretim Karakterizasyonu. 9<sup>th</sup> International Metallurgy and Materials Congress, 11-15.06.1997, İstanbul, 1293-1298.

**Schetky, L.M.**, 1980. Shape Memory Alloys, Scientific American, 68-76.

**Serway, A.R.**, 1992. (Çeviri Editörü: Kemal ÇOLAKOĞLU ), ‘Fen ve Mühendislik için Fizik’. Palme Yayıncılık, Ankara, 859.

**Sharma, S.V., Nayak, M. M., Dinesh, N.S.**, 2008. Shape memory alloy based motor, Sadhana, 33-5, 699-712.

**Sivakumar, S., Kumar, K., Rao, L., Rao, M.**, 2005. “A Review of the Constitutive Models for Shape Memory Alloys”, International Conference on Smart Materials Structures and Systems, Bangalore, India.

**Solak, M.**, 2006. ‘Sıcaklık, Stres ve Diğer Çevresel Faktörlerin Manyetik Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması’, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

**Staelin, D. H., Morgenthaler, A. W., Kong, J. A.**, 1994. “Electromagnetic Waves” Prentice Hall.

**Tanaka, Y., Ohmori, T., Oikawa, K., Kainuma, R., Ishida, K.**, 2004. ‘Ferromagnetic Co-Ni-Al Shape Memory Alloys with  $\beta+\gamma$  Two-Phase Structure’, Materials Transactions, Vol.45, No.2pp, 427-430

**Tanaka Y., Oikawa K., Sutou Y., Ohmori T., Kainuma R. ve Ishida K.**, 2006. Martensitic Transition and superelasticity of Co-Ni-Al ferromagnetic Shape memory Alloys with  $\beta+\gamma$  two-phase structure, Materials Science and Engineering, 1054-1060.

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

**Thamburaja, P. Nikabdullah, N.A.,** 2009. Macroscopic Constitutive Model For Shape Memory Alloys: Theory and Finite –Element Simulations, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. , , 1074-1086.

**Tremblay, M.,** 2004. “Les Implants Medicaux en Alliage a Memoire de Forme”, Memry.

**Ullakko, K., Huang, J.K., Kokorin, V.V., O’handley R.C.,** 1997. Magnetically Controlled SME in Ni<sub>2</sub>MnGa.

**Umetsu R.Y., Ito W., Ito K., Koyama K., Fujita A., Oikawa K., Kanomata T., Kainuma R. ve Ishida K.,** 2009. Anomaly in Entropy Change Between Parents and martensite Phases in the Ni<sub>50</sub>Mn<sub>34</sub>In<sub>16</sub> Heusler Alloys, Scripta Materialia, 25- 28.

**URL-1 MEGEP (Meslekî Eğitim Ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi)**  
[http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/metal/moduller/sertlik\\_olcme\\_yontemleri.pdf](http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/metal/moduller/sertlik_olcme_yontemleri.pdf), **20 Mart 2014.**

**URL-2.** <http://web.sakarya.edu.tr/~mcolak/dersnotu/Katilasma.pdf>, **1 Mart 2014.**

**Valiullin, A.I., Kositsin, S.V., Kositsina, I.I., Kataeva, N.V., Zavalishin, V.A.,** 2006. ‘Study of Ferromagnetic Co-Ni-Al Alloys with Thermoelastic L<sub>10</sub> Martensite’, Materials Science and Engineering A 438-440, 1041-1044.

**Yener, D.,** 2007. Manyetik Malzemeler, Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektronik Malzemeler ve Cihaz Fiziği Dönem Projesi, 2006-2007 Bahar Dönemi.

**Yu, H.J., Fu, H., Sun, J. X., Wang, Z.G., Zu, X.T.,** 2009. Transformation Temperatures in Polycrystalline Ni<sub>56.5-x</sub>Fe<sub>17</sub>Ga<sub>26.5</sub>Ge<sub>x</sub> Ferromagnetic Shape Memory Alloys, Journals of Alloys Compound.

**Yurtsever, Ö.,** 2012. ‘NiTi Şekil Bellekli Alaşımlar (Sunum)’, İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

**Zhang P.N. ve Liu J.,** 2008. Microstructure and Mechanical Properties in Co–Ni–Ga–Al Shape Memory Alloys with Two-Phase Structure. Journal of Alloys and Compounds, 462, 225–228.

**Zhuhong, L., Shuyun, Y., Hong, Y., Guangheng, W., Yinong, L.,** 2008. Phase Separation And Magnetic Properties Of Coenial Ferromagnetic Shape Memory Alloys. Intermetallics, 16,( 447-452).

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Ad, Soyad** : Türkan Malkoç  
**Doğum Tarihi** : 1976  
**Medeni Durum** : Evli  
**Doğum Yeri** : Malatya

### EĞİTİM BİLGİLERİ

|               |                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doktora       | Fırat Üniversitesi- <b>Fizik Bölümü</b> 02/2002 – 04/2014<br><u>Uzmanlık Alanı</u> : Katıhal Fiziği<br><u>Doktora Tezinin Konusu</u> : Co-Al Esaslı Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımların Üretimi ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi |
| Yüksek Lisans | Fırat Üniversitesi- <b>Fizik Bölümü</b> 09/1999 – 02/2002<br><u>Uzmanlık Alanı</u> : Katıhal Fiziği<br><u>Doktora Tezinin Konusu</u> : Şekil Hatırlamalı Cu-Al-Ni Alaşımları Üzerine Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi                        |
| Lisans        | Fırat Üniversitesi- <b>Fizik Bölümü</b> 09/1995 – 06/1999                                                                                                                                                                                      |
| Ön Lisans     | Eskişehir Anadolu Üniversitesi Açık Öğretim Fakültesi (AÖF) -<br><b>Hukuk Bölümü</b> 10/2011 – 08/2013<br><u>Uzmanlık Alanı</u> : Adalet Programı                                                                                              |

### İŞ DENEYİMİ (Tam Zamanlı)

|                                                       |                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Alacakaya Lisesi (Elazığ)</b>                      | <b>Pozisyon</b> : Fizik ve Matematik Öğretmenliği<br><b>İşe Başlama ve Süresi</b> : 2004 Mart (3 ay) |
| <b>Türkiye İstatistik Kurmu (TİK)</b>                 | <b>Pozisyon</b> : Anketör<br><b>İşe Başlama ve Süresi</b> : 2007 Ocak (1 ay)                         |
| <b>Adularya Enerji Elektrik Üretimi A.Ş. (Ankara)</b> | <b>Pozisyon</b> : Ruhsat Hakları Personeli<br><b>İşe Başlama ve Süresi</b> : 2008 Nisan (2 yıl 6 ay) |