

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**NiMn BAZLI ALAŞIMLARIN ŞEKİL HAFIZA  
DAVRANIŞI ÜZERİNE SICAK EKSTRÜZYON VE ISIL  
İŞLEMİN ETKİSİ**

**Hazırlayan  
Serkan DAL**

**Danışman  
Doç. Dr. Bilal DEMİREL**

**Doktora Tezi**

**Mart 2021  
KAYSERİ**



**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**NiMn BAZLI ALAŞIMLARIN ŞEKİL HAFIZA  
DAVRANIŞI ÜZERİNE SICAK EKSTRÜZYON VE ISIL  
İŞLEMİN ETKİSİ  
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan  
Serkan DAL**

**Danışman  
Doç. Dr. Bilal DEMİREL**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından SDK-2019- 8663 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Mart 2021  
KAYSERİ**

## **BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK**

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Serkan DAL

İmza

**“NiMn Bazlı Alaşımların Şekil Hafıza Davranışı Üzerine Sıcak Ekstrüzyon ve Isıl İşlemin Etkisi”** adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

**Hazırlayan**

Serkan DAL

İmza

**Danışman**

Doç.Dr. Bilal DEMİREL

İmza

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği ABD Başkanı**

Doç. Dr. Mustafa Serdar ÖNSES

İmza

**Doç. Dr. Bilal DEMİREL** danışmanlığında **Serkan DAL** tarafından hazırlanan “**NiMn Bazlı Alaşımların Şekil Hafıza Davranışı Üzerine Sıcak Ekstrüzyon ve Isıl İşlemin Etkisi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği** Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ:**

Danışman : Doç. Dr. Bilal DEMİREL .....

Üye : Doç. Dr. Murat ESKİL .....

Üye : Doç. Dr. Şengül DANIŞMAN .....

Üye : Prof. Dr. Bülent KURT .....

Üye : Doç. Dr. Soner SAVAŞ .....

**ONAY:**

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ..... tarih ve .....sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... / ..... / .....

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince her zaman desteklerini ve teşviklerini gördüğüm, başta saygıdeğer danışman hocam Doç.Dr. Bilal DEMİREL olmak üzere, deneylerin yapılmasından yorumlanmasına kadar yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocam Doç.Dr. Murat ESKİL'e teşekkür ve minnetlerimi bir borç bilirim. Kıymetli görüşleriyle katkılarını sunan değerli hocalarım sayın Doç.Dr. Şengül DANIŞMAN ve Doç.Dr. Soner SAVAŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımın bir kısmında yardımlarını eksik etmeyen sayın Doç.Dr. Ali GÜNEN'e ayrıca teşekkür ederim.

Birlikte mesai harcadığımız Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü hocalarım sayın Prof. Dr. Bülent KURT, Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA, Doç.Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK ve Dr. Öğr. Üyesi Nilüfer KÜÇÜKDEVECİ'ye desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarım boyunca verdiği moral ve destek için Yusuf KARACA'ya teşekkür ederim. Proje desteği vererek çalışmalarına katkı sağlayan Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne ve doktora tez çalışmalarımın bitmesinde rolü olan tüm kurum ve kişilere minnet ve teşekkürü bir borç bilirim.

Her daim yanımda olan, sabır ve anlayış gösteren eşime ve çocuklarıma, manevi desteklerini hissettiğim aileme içten teşekkürlerimi sunarım.

Serkan DAL

Mart 2021, KAYSERİ

# NiMn BAZLI ALAŞIMLARIN ŞEKİL HAFIZA DAVRANIŞI ÜZERİNE SICAK EKSTRÜZYON VE ISIL İŞLEMİN ETKİSİ

Serkan DAL

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Doktora Tezi, Mart 2021  
Danışman: Doç. Dr. Bilal DEMİREL

## ÖZET

Bu tez çalışmasında yüksek sıcaklıklarda şekil hafıza özelliği sergileyen faklı bileşime sahip NiMnX alaşımları elde edilerek alaşım elementi, ısıtıl işlem ve sıcak ekstrüzyonun etkileri araştırılmıştır. Tüm örnekler ısıtıl işlemin etkilerini gözlemlemek için farklı sürelerde homojenize edilerek buzlu suda soğutulmuştur. Sıcak ekstrüzyonun etkilerini gözlemlemek için farklı sıcaklıklarda ekstrüzyon yapılarak kesitleri daraltılmıştır. Elde edilen örneklerin şekil hafıza özelliklerini etkileyen faz yapısı, mikroyapı, faz dönüşüm sıcaklıkları ve mikrosertlik değerlerindeki değişimler; X-ışını difraksiyonu (XRD), diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC), taramalı elektron mikroskobu (SEM), EDX analizleri, MAPPING analizleri, optik mikroskop ve mikrosertlik ölçümü deneyleri ile incelenmiştir. Alaşım elementlerinin oranlarının çok az miktarda değişmesi dahi östenit ve martenzit geçiş sıcaklıklarının değişimine sebep olmuştur. Homojenizasyon sürelerindeki artış ile beraber martenzit faz çeşitliliğinin artması, tanelerin kabalaşması ve yüksek sıcaklık fazlarındaki artış sonucunda şekil hafıza özelliklerinin zayıfladığı görülmüştür. Ekstrüzyon işlemi sonucunda  $A_{max}$ - $M_{max}$  arasındaki farkın azaldığı, yani ekstrüzyon işleminin termoelastik şekil hafıza özelliklerini geliştirdiği anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** NiMn alaşımları, şekil hafızalı alaşımlar, ısıtıl işlem, sıcak ekstrüzyon, faz dönüşümü, martenzit, mikrosertlik.

# THE EFFECT OF HOT EXTRUSION AND HEAT TREATMENT ON SHAPE MEMORY BEHAVIOR OF NiMn-BASED ALLOYS

Serkan DAL

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences  
PhD Thesis, March 2021  
Supervisor: Assoc. Prof. Bilal DEMİREL

## ABSTRACT

In this thesis study, the effects of alloying elements, heat treatment and hot extrusion were investigated by obtaining NiMnX alloys with different compositions exhibiting shape memory properties at high temperatures. All samples were homogenized at different times and cooled in ice water to observe the effects of heat treatment. Samples were extruded at different temperatures to observe the effects of hot extrusion. Changes in phase structure, microstructure, phase transformation temperatures and microhardness values affecting the shape memory properties of the samples were obtained by X-ray diffraction (XRD), differential scanning calorimetry (DSC), scanning electron microscopy (SEM), EDX analyzes, MAPPING analyzes, optical microscopy and microhardness tests. Even a slight difference in the ratio of alloying elements caused the change of austenite and martensite transformation temperatures. It was observed that the shape memory properties were weakened as a result of the increase in the martensite phase diversity, the growth of the grains and the increase of the high temperature phases with the increase in the homogenization time. As a result of the extrusion process, it was understood that the gap between  $A_{\max}$ - $M_{\max}$  was decreased, that is, the extrusion process improved the thermoelastic shape memory properties.

**Keywords:** NiMn alloys, shape memory alloys, heat treatment, hot extrusion, phase transformation, martensite, microhardness.

## İÇİNDEKİLER

### NiMn BAZLI ALAŞIMLARIN ŞEKİL HAFIZA DAVRANIŞI ÜZERİNE SICAK EKSTRÜZYON VE ISIL İŞLEMİN ETKİSİ

|                              |      |
|------------------------------|------|
| BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK..... | ii   |
| YÖNERGEYE UYGUNLUK.....      | iii  |
| KABUL ONAY .....             | iv   |
| TEŞEKKÜR.....                | v    |
| ÖZET.....                    | vi   |
| ABSTRACT.....                | vii  |
| İÇİNDEKİLER .....            | viii |
| KISALTMALAR .....            | xi   |
| TABLolar LİSTESİ.....        | xii  |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....       | xiv  |
| GİRİŞ .....                  | 1    |

## 1. BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1.Şekil Hafızalı Alaşımlar .....                                    | 4  |
| 1.1.1.Heusler Alaşımları .....                                        | 12 |
| 1.1.2. Ni-Mn Alaşımları .....                                         | 14 |
| 1.2. Valans Elektron Konsantrasyonu (Elektron/Atom (e/a) Oranı) ..... | 19 |
| 1.3. Debye-Scherrer Denklemi ile Tane Boyutu Hesaplama .....          | 21 |
| 1.4. Şekil Hafızalı Alaşım Üretim Yöntemleri .....                    | 22 |
| 1.5. Ekstrüzyon.....                                                  | 25 |
| 1.6. Şekil Hafızalı Alaşımların Başlıca Kullanım Alanları.....        | 29 |

## 2. BÖLÜM

### YÖNTEM ve MATERYAL

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Kullanılan Elementler ve Elde Edilmesi Planlanan Alaşımlar .....                                    | 30 |
| 2.2. Üretim, Metalografi ve Karakterizasyon Yöntemleri .....                                             | 32 |
| 2.2.1 Vakumlu İndüksiyon Fırınında Ergitme .....                                                         | 34 |
| 2.2.2. Isıl İşlem .....                                                                                  | 34 |
| 2.2.3. Ekstrüzyon İşlemi .....                                                                           | 35 |
| 2.2.4. Metalografik Numune Hazırlama .....                                                               | 38 |
| 2.2.5. XRD (X-Işını Difraksiyonu) Analizi .....                                                          | 40 |
| 2.2.6. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Analizi .....                                             | 40 |
| 2.2.7. SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu), EDX (Enerji Yayımlı X-Işını Analizi) ve MAPPING Analizi ..... | 40 |
| 2.2.8. Optik Mikroskop İncelemesi .....                                                                  | 40 |
| 2.2.9. Mikrosertlik Analizi .....                                                                        | 41 |

## 3. BÖLÜM

### BULGULAR ve TARTIŞMA

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Alaşım 1 ( $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{36}\text{Sn}_{10,5}\text{Ga}_{3,5}$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular .....                     | 42  |
| 3.2. Alaşım 2 ( $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{36}\text{Sn}_{12,5}\text{Ga}_{1,5}$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular .....                     | 48  |
| 3.3. Alaşım 3 ( $\text{Ni}_{46,57}\text{Mn}_{31,26}\text{Ga}_{6,63}\text{Sb}_{14,5}\text{Co}_{1,07}$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular .. | 53  |
| 3.4. Alaşım 4 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{17,5}\text{Mo}_2$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular .....                       | 57  |
| 3.5. Alaşım 5 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{18,5}\text{Mo}_1$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular .....                       | 68  |
| 3.6. Alaşım 6 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Sn}_{18,5}\text{Mo}_1$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular .....                       | 78  |
| 3.7. Alaşım 7 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{19,5}$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular .....                                  | 88  |
| 3.8. Alaşım 8 ( $\text{Ni}_{55}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{20}$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular .....                                      | 97  |
| 3.9. Alaşım 9 ( $\text{Ni}_{55}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{19}\text{Mo}_1$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular .....                           | 107 |
| 3.10. Alaşım 10 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{20,5}\text{Ga}_{22}\text{Mo}_2$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular .....                     | 118 |

#### 4. BÖLÜM

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| <b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b> | <b>129</b> |
| <b>KAYNAKÇA .....</b>             | <b>134</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>              | <b>146</b> |



## KISALTMALAR

|                    |                                                    |
|--------------------|----------------------------------------------------|
| $A_s$              | : Östenit sıcaklığı başlangıç noktası              |
| $A_{max}$          | : Östenit sıcaklığı maksimum noktası               |
| $A_f$              | : Östenit sıcaklığı bitiş noktası                  |
| $\text{\AA}$       | : Anstrom                                          |
| $^{\circ}\text{C}$ | : Celcius                                          |
| D                  | : Tane boyutu                                      |
| DSC                | : Diferansiyel Taramalı Kalorimetre                |
| EDX                | : Enerji Yayılımlı X-Işını Analizi                 |
| K                  | : Kelvin                                           |
| m                  | : Metre                                            |
| $M_s$              | : Martenzit sıcaklığı başlangıç noktası            |
| $M_{max}$          | : $M_{max}$ : Martenzit sıcaklığı maksimum noktası |
| $M_f$              | : Martenzit sıcaklığı bitiş noktası                |
| s                  | : Saniye                                           |
| SEM                | : Taramalı Elektron Mikroskobu                     |
| ŞHA                | : Şekil Hafızalı Alaşım                            |
| XRD                | : X-Işını Difraksiyonu                             |

## TABLOLAR LİSTESİ

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 1.1. Yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşım grupları ve özellikleri. ....                              | 10  |
| Tablo 1.2. Çeşitli yöntemlerle elde edilmiş şekil hafızalı alaşımlar ve kristal yapıları.....               | 24  |
| Tablo 2.1. Çalışmada elde edilmesi planlanan alaşım miktarları ve e/a oranları.....                         | 31  |
| Tablo 2.2. Alaşımlara uygulanan ısıtma işlem ve ekstrüzyon verileri.....                                    | 32  |
| Tablo 3.1. Alaşım 1 örneği için hesaplanan kafes parametreleri. ....                                        | 44  |
| Tablo 3.2. Alaşım 1 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.....                            | 44  |
| Tablo 3.3. Alaşım 2 örneği için hesaplanan kafes parametreleri. ....                                        | 49  |
| Tablo 3.4. Alaşım 2 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.....                            | 49  |
| Tablo 3.5. Alaşım 3 örneği için hesaplanan kafes parametreleri. ....                                        | 54  |
| Tablo 3.6. Alaşım 4 örneği için hesaplanan kafes parametreleri .....                                        | 61  |
| Tablo 3.7. Alaşım 4 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.....                            | 61  |
| Tablo 3.8. Alaşım 4 örneğinin ısıtma işlem ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları. ....  | 62  |
| Tablo 3.9. Alaşım 5 örneği için hesaplanan kafes parametreleri. ....                                        | 71  |
| Tablo 3.10. Alaşım 5 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.....                           | 72  |
| Tablo 3.11. Alaşım 5 örneğinin ısıtma işlem ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları. .... | 73  |
| Tablo 3.12. Alaşım 6 örneği için hesaplanan kafes parametreleri .....                                       | 81  |
| Tablo 3.13. Alaşım 6 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.....                           | 82  |
| Tablo 3.14. Alaşım 6 örneğinin ısıtma işlem ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları. .... | 83  |
| Tablo 3.15. Alaşım 7 örneği için hesaplanan kafes parametreleri .....                                       | 91  |
| Tablo 3.16. Alaşım 7 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.....                           | 92  |
| Tablo 3.17. Alaşım 7 örneğinin ısıtma işlem ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları. .... | 93  |
| Tablo 3.18. Alaşım 8 örneği için hesaplanan kafes parametreleri. ....                                       | 100 |
| Tablo 3.19. Alaşım 8 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.....                           | 101 |
| Tablo 3.20. Alaşım 8 örneğinin ısıtma işlem ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları. .... | 102 |
| Tablo 3.21. Alaşım 9 örneği için hesaplanan kafes parametreleri. ....                                       | 110 |

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 3.22. Alaşım 9 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.....                              | 111 |
| Tablo 3.23. Alaşım 9 örneğinin ısııl işlem ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz<br>dönüşüm sıcaklıkları. ....  | 112 |
| Tablo 3.24. Alaşım 10 rneği için hesaplanan kafes parametreleri. ....                                         | 121 |
| Tablo 3.25. Alaşım 10 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.....                             | 121 |
| Tablo 3.26. Alaşım 10 örneğinin ısııl işlem ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz<br>dönüşüm sıcaklıkları. .... | 122 |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Şekil hafıza davranışının şematik gösterimi .                                                                                            | 5  |
| Şekil 1.2. Şekil hafızalı bir malzemenin şekil ile beraber içyapılarının değişimi                                                                   | 5  |
| Şekil 1.3. Termal şekil hafıza ve süperelastiklik.....                                                                                              | 7  |
| Şekil 1.4. Bir şekil hafızalı alaşımın DSC analiziyle belirlenen faz dönüşüm sıcaklıkları.                                                          | 8  |
| Şekil 1.5. Heusler alaşımlarını oluşturan elementlerin temel kompozisyonları.....                                                                   | 12 |
| Şekil 1.6. Heusler alaşımlarının yapısı.....                                                                                                        | 13 |
| Şekil 1.7. Martenzit kristal yapı modülasyonları (10M ve 14M, sırasıyla 5M ve 7M'ye karşılık gelecektir) .....                                      | 16 |
| Şekil 1.8. Yüksek sıcaklıkta östenitik fazda kübik NiMnGa şekil hafızalı alaşımına ait Heusler yapısı.....                                          | 17 |
| Şekil 1.9. Ni-Mn-X alaşımlarında oluşan bazı fazların mikroyapı görüntüleri. (a-NiMnGa, b-NiMnGa, c-NiMnIn, d- NiMnGa martenzit ikiz yapıları)..... | 18 |
| Şekil 1.10. Ni-Mn-Ga alaşımlarında sıcaklık ve e/a oranının değişimi ile oluşabilecek fazlar.....                                                   | 20 |
| Şekil 1.11. % 50 sabit Ni konsantrasyonunda bir alaşım serisine dayalı faz diyagramı.                                                               | 21 |
| Şekil 1.12. Ekstrüzyon prosesi.....                                                                                                                 | 25 |
| Şekil 1.13. Direkt ekstrüzyonda malzeme akış modelleri.....                                                                                         | 27 |
| Şekil 1.14. 1990-2013 yılları arası şekil hafızalı alaşımların sektörlere göre dağılımı...                                                          | 30 |
| Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan % 99.98 saflıkta Ni, % 99.7 saflıkta Mn, %99.9 saflıkta Ga ve Mo elementleri. ....                                  | 31 |
| Şekil 2.2. Deneysel çalışma aşamaları. ....                                                                                                         | 33 |
| Şekil 2.3. İndüksiyonlu vakum ortamında ve Ar gazı destekli döküm düzeneği ve elde edilen numune örneği. ....                                       | 34 |
| Şekil 2.4. 1200 °C'ye kadar çıkabilen Isıl işlem fırını.....                                                                                        | 35 |
| Şekil 2.6. Ektrüzyon kalıbının şematik görünümü.....                                                                                                | 36 |
| Şekil 2.7. Elde edilen ekstrüzyon kalıpları. ....                                                                                                   | 37 |
| Şekil 2.8. Ekstrüzyon işleminde kullanılan yağlayıcılar.....                                                                                        | 37 |
| Şekil 2.9. Ekstrüzyon işlemi sonrası elde edilen örnekler. ....                                                                                     | 38 |
| Şekil 2.10. Kesiti alınan ve kalıplanarak hazırlanan numuneler.....                                                                                 | 39 |

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.11. Metalografik numune hazırlamada kullanılan cihazlar.....                                                                                | 39 |
| Şekil 2.12. Nikon (MA 100) markalı mikroskop ve görüntü analiz sistemi. ....                                                                        | 41 |
| Şekil 2.13. Future-Tech (FM 700) markalı mikrosertlik ölçüm cihazı. ....                                                                            | 41 |
| Şekil 3.1. 1A (a) ve 1B (b) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                                        | 43 |
| Şekil 3.2. 1A (a), 1B (b) ve 1C (c) örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                              | 45 |
| Şekil 3.3. Alaşım 1 numunesiden elde edilen EDX analizi görüntüleri.....                                                                            | 45 |
| Şekil 3.4. Alaşım 1 numunesi için elde edilen MAPPING analizi fotoğrafları. ....                                                                    | 46 |
| Şekil 3.5. 1A (a), 1B (b) ve 1C (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                                                  | 47 |
| Şekil 3.6. 1A, 1B ve 1C örneklerinin mikrosertlik değerleri. ....                                                                                   | 48 |
| Şekil 3.7. 2A (a) ve 2B (b) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                                        | 49 |
| Şekil 3.8. 2A (a), 2B (b) ve 2C (c) örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                              | 50 |
| Şekil 3.9. Alaşım 2 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri. ....                                                                              | 51 |
| Şekil 3.10. Alaşım 2 numunesi için döküm sonrası elde edilen MAPPING analizi<br>fotoğrafları.....                                                   | 51 |
| Şekil 3.11. 2A (a), 2B (b) ve 2C (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                                                 | 52 |
| Şekil 3.12. 2A, 2B ve 2C örneklerinin mikrosertlik değerleri. ....                                                                                  | 53 |
| Şekil 3.13. 3A (a) ve 3B (b) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                                       | 54 |
| Şekil 3.14. 3A (a), 3B (b) ve 3C (c) örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                             | 55 |
| Şekil 3.15. Alaşım 3 örneğinden elde edilen EDX analizi görüntüleri. ....                                                                           | 55 |
| Şekil 3.16. Alaşım 3 numunesi için döküm sonrası elde edilen MAPPING analizi<br>sonucu.....                                                         | 56 |
| Şekil 3.17. 3A (a), 3B (b) ve 3C (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                                                 | 56 |
| Şekil 3.18. 3A, 3B ve 3C örneklerinin mikrosertlik değerleri. ....                                                                                  | 57 |
| Şekil 3.19. 4A (a), 4B (b), 4C (c) ve 4D (d) örneklerinin XRD sonuçları.....                                                                        | 59 |
| Şekil 3.20. 4E1 (a), 4E2 (b) ve 4E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                            | 60 |
| Şekil 3.21. 4A, 4B, 4C ve 4D örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma<br>(b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri. .... | 62 |
| Şekil 3.22. 4E1, 4E2 ve 4E3 örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma (b)<br>rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri. ....  | 62 |
| Şekil 3.23. 4A, 4B, 4C ve 4D örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                                     | 63 |
| Şekil 3.24. 4E1, 4E2 ve 4E3 örneklerinin SEM görüntüleri.....                                                                                       | 64 |
| Şekil 3.25. Alaşım 4 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri. ....                                                                             | 65 |
| Şekil 3.26. Alaşım 4 numunesi için elde edilen MAPPING analizi sonucu. ....                                                                         | 66 |

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.27. 4A (a), 4B (b), 4C (c) ve 4D (d) optik mikroskop görüntüleri. ....                                                                      | 67 |
| Şekil 3.28. 4E1, 4E2 ve 4E3 örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                                                          | 67 |
| Şekil 3.29. Alaşım 4 numunesi için ısıtıl işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış<br>(b) örneklerin mikrosertlik değerleri. ....                  | 68 |
| Şekil 3.30. 5A (a), 5B (b), 5C (c) ve 5D (d) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                       | 69 |
| Şekil 3.31. 5E1 (a), 5E2 (b) ve 5E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                            | 71 |
| Şekil 3.32. 5A, 5B, 5C ve 5D örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma<br>(b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri. .... | 72 |
| Şekil 3.33. 5E1, 5E2 ve 5E3 örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve<br>soğutma (b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri. ....  | 73 |
| Şekil 3.34. 5A (a), 5B (b), 5C (c) ve 5D (d) örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                     | 74 |
| Şekil 3.35. 5E1 (a), 5E2 (b) ve 5E3 (d) örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                          | 74 |
| Şekil 3.36. Alaşım 5 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri. ....                                                                             | 75 |
| Şekil 3.37. Alaşım 5 örneğinden elde edilen MAPPING analizi sonucu. ....                                                                            | 76 |
| Şekil 3.38. 5A (a), 5B (b), 5C (c) ve 5D (d) optik mikroskop görüntüleri. ....                                                                      | 76 |
| Şekil 3.39. 5E1, 5E2 ve 5E3 örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                                                          | 77 |
| Şekil 3.40. Alaşım 5 numunesi ısıtıl işlem (a) ve ekstrüzyon yapılmış (b) örneklerin<br>mikrosertlik değerleri. ....                                | 78 |
| Şekil 3.41. 6A (a), 6B (b), 6C (c) ve 6D (d) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                       | 79 |
| Şekil 3.42. 6E1 (a), 6E2 (b) ve 6E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                            | 81 |
| Şekil 3.43. 6A, 6B, 6C ve 6D örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma<br>(b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri. .... | 83 |
| Şekil 3.44. 6E1, 6E2 ve 6E3 örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma (b)<br>rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri. ....  | 83 |
| Şekil 3.45. 6A, 6B, 6C ve 6D örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                                     | 84 |
| Şekil 3.46. 6E1, 6E2 ve 6E3 örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                                      | 85 |
| Şekil 3.47. Alaşım 6 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri. ....                                                                             | 86 |
| Şekil 3.48. Alaşım 6 numunesi için elde edilen MAPPING analizi sonucu. ....                                                                         | 86 |
| Şekil 3.49. 6A, 6B, 6C ve 6D örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                                                         | 87 |
| Şekil 3.50. 6E1, 6E2 ve 6E3 örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                                                          | 87 |
| Şekil 3.51. Alaşım 6 numunesi için ısıtıl işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış<br>(b) örneklerin mikrosertlik değerleri. ....                  | 88 |
| Şekil 3.52. 7A (a), 7B (b), 7C (c) ve 7D (d) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                       | 89 |

|                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 3.53. 7E1 (a), 7E2 (b) ve 7E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                            | 91  |
| Şekil 3.54. 7A, 7B, 7C ve 7D örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve<br>soğutma (b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri. .... | 92  |
| Şekil 3.55. 7E1, 7E2 ve 7E3 örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma<br>(b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri. ....  | 93  |
| Şekil 3.56. 7A, 7B, 7C ve 7D örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                                     | 94  |
| Şekil 3.57. 7E1, 7E2 ve 7E3 örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                                      | 94  |
| Şekil 3.58. Alaşım 7 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri. ....                                                                             | 95  |
| Şekil 3.59. Alaşım 7 numunesi için elde edilen MAPPING analizi sonucu. ....                                                                         | 95  |
| Şekil 3.60. 7A, 7B, 7C ve 7D örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                                                         | 96  |
| Şekil 3.61. 7E1, 7E2 ve 7E3 örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                                                          | 96  |
| Şekil 3.62. Alaşım 7 numunesi için ısıtma işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış<br>(b) örneklerin mikrosertlik değerleri. ....                  | 97  |
| Şekil 3.63. 8A (a), 8B (b), 8C (c) ve 8D (d) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                       | 98  |
| Şekil 3.64. 8E1 (a), 8E2 (b) ve 8E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                            | 100 |
| Şekil 3.65. 8A (a), 8B (b), 8C (c) ve 8D (d) örneklerinin DSC analizi sonuçları. ....                                                               | 101 |
| Şekil 3.66. 8E1 (a), 8E2 (b) ve 8E3 (c) örneklerinin DSC analizi sonuçları. ....                                                                    | 102 |
| Şekil 3.67. 8A (a), 8B (b), 8C (c) ve 8D (d) örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                     | 103 |
| Şekil 3.68. 8E1 (a), 8E2 (b) ve 8E3 (c) örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                          | 103 |
| Şekil 3.69. Alaşım 8 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri. ....                                                                             | 104 |
| Şekil 3.70. Alaşım 8 numunesi için döküm sonrası elde edilen MAPPING analizi<br>sonucu. ....                                                        | 105 |
| Şekil 3.71. 8A (a), 8B (b), 8C (c) ve 8D (d) örneklerinin optik mikroskop<br>görüntüleri. ....                                                      | 106 |
| Şekil 3.72. 8E1 (a), 8E2 (b) ve 8E3 (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                                              | 106 |
| Şekil 3.73. Alaşım 8 numunesi için Isıl işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış<br>(b) örneklerin mikrosertlik değerleri. ....                    | 107 |
| Şekil 3.74. 9A (a), 9B (b), 9C (c) ve 9D (d) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                       | 108 |
| Şekil 3.75. 9E1 (a), 9E2 (b) ve 9E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                                            | 110 |
| Şekil 3.76. 9A (a), 9B (b), 9C (c) ve 9D (d) örneklerinin DSC analizi sonuçları. ....                                                               | 111 |
| Şekil 3.77. 9E1 (a), 9E2 (b) ve 9E3 (c) örneklerinin DSC analizi sonuçları. ....                                                                    | 112 |
| Şekil 3.78. 9A (a), 9B (b), 9C (c) ve 9D (d) örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                     | 113 |
| Şekil 3.79. 9E1 (a), 9E2 (b) ve 9E3 (c) örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                                          | 114 |

|                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 3.80. Alaşım 9 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri. ....                                                          | 115 |
| Şekil 3.81. Alaşım 9 örneği MAPPING analizi sonucu. ....                                                                         | 115 |
| Şekil 3.82. 9A (a), 9B (b), 9C (c) ve 9D (d) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                      | 116 |
| Şekil 3.83. 9E1 (a), 9E2 (b) ve 9E3 (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                           | 117 |
| Şekil 3.84. Alaşım 9 numunesi için ısıtıl işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış (b) örneklerin mikrosertlik değerleri. ....  | 117 |
| Şekil 3.85. 10A (a), 10B (b), 10C (c) ve 10D (d) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                | 119 |
| Şekil 3.86. 10E1 (a), 10E2 (b) ve 10E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları. ....                                                      | 120 |
| Şekil 3.87. 10A (a), 10B (b), 10C (c) ve 10D (d) örneklerinin DSC analizi sonuçları. ....                                        | 122 |
| Şekil 3.88. 10E1 (a), 10E2 (b) ve 10E3 (c) örneklerinin DSC analizi sonuçları. ....                                              | 122 |
| Şekil 3.89. 10A (a), 10B (b), 10C (c) ve 10D (d) örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                              | 123 |
| Şekil 3.90. 10E1 (a), 10E2 (b) ve 10E3 (c) örneklerinin SEM görüntüleri. ....                                                    | 124 |
| Şekil 3.91. Alaşım 10 örneğinden elde edilen EDX analizi görüntüleri. ....                                                       | 125 |
| Şekil 3.92. Alaşım 10 örneği için edilen MAPPING analizi sonucu. ....                                                            | 125 |
| Şekil 3.93. 10A (a), 10B (b), 10C (c) ve 10D (d) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                  | 126 |
| Şekil 3.94. 10E1 (a), 10E2 (b) ve 10E3 (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri. ....                                        | 126 |
| Şekil 3.95. Alaşım 10 numunesi için ısıtıl işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış (b) örneklerin mikrosertlik değerleri. .... | 127 |

## GİRİŞ

Şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), ticari olarak 1960'lı yıllarda kullanılmaya başlansa da 1930'lu yıllardan itibaren (Dikici, 2010) keşfedildiklerinden beri yoğun bir bilimsel araştırma konusu olmuştur (Dimitris ve Pavlin, 2004; Sehitoglu et al., 2017). Son zamanlarda Heusler tipi Ni-Mn-X ( $X = \text{Ga, In, Sn ve Sb}$ ) ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlar (FSMA); manyetik şekil hafıza etkisi, manyetokalorik etki ve büyük magnetoresistance etkisi gibi önemli özellikleri nedeniyle ilgi görmektedirler (Li et al., 2017; Ulakko et al., 1996; Pons et al., 2000; Murray et al., 2000; Mullner et al., 2004; Bachaga et al., 2015; Jiang et al., 2005; Varzaneh et al., 2015; Wang et al. 2011; Prusik et al., 2016; Morawiec et al., 2010; Yang et al., 2012; Nespoli vd, 2017). Özellikle NiMnGa şekil hafızalı alaşımlar, nispeten yüksek sıcaklıklardaki şekil hafıza özellikleri ile dikkat çekmiştir (Gaitzsch et al., 2009; Xin ve Zhou, 2016; Yang et al., 2012; Xin et al., 2007). Ayrıca büyük geri kazanılabilir gerilme ve yüksek frekans tepkisi gibi özellikleri ile aktüatör ve sensör malzemesi olarak birçok kullanım alanı bulan bu alaşımlar, özellikle havacılık ve otomotiv sektörü için cazip hale gelmiştir (Prusik et al., 2016; Nespoli vd, 2017). NiMnGa şekil hafızalı alaşımlar, bileşimine bağlı olarak geniş bir dönüşüm sıcaklık aralığını göstermektedir (Wang ve Jiang, 2008; Yang et al., 2012). Yaygın olarak kullanılan şekil hafızalı alaşımlar genellikle 400 °C'nin altındaki sıcaklıklarda martenzit dönüşüm sıcaklığı ile sınırlıdır (Cesari et al., 2005). Ancak, özellikle stokiometrik  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  alaşımları 400 °C'nin üzerinde martensitik dönüşüm sıcaklıkları sergileyebilmektedirler (Xin et al., 2007; Yang et al., 2012). Bunun yanında NiMnGa alaşımlarının faz dönüşüm sıcaklıkları, kompozisyona bağlıdır. Yapılan bir çalışmada Ga içeriğinin % 1'lik değişiminin, martensitik dönüşüm sıcaklığında 85 °C'lik bir fark oluşturduğu ifade edilmiştir (Wang ve Jiang, 2008).

Şekil hafızalı alaşımların tavlanması da dönüşüm sıcaklıklarını ve içyapıyı etkileyen önemli unsurlardan biridir (Bernardini ve Vestroni, 2003). Polikristalin NiMnGa

ŞHA'nın mekanik ve şekil hafıza özelliklerini geliştirmek için tane küçültme işlemi etkili bir yöntemdir. Ni-Mn-Ga alaşımları genellikle kırılıgandır, bu da karmaşık bileşenlerin geleneksel plastik deformasyonla şekillendirilmesini zorlaştırır (Wei, 2016). Bununla beraber NiMnX alaşımının sünekliğini ve sıcak işlenebilirliğini arttırmak için, Fe, Co, Cr, Al, Ti, Cu, Nb, B veya nadir elementler gibi dördüncü element eklemeye olan ilgi artmaktadır (Yang et al., 2016; Gökdemir, 2006). Ni-Mn bazlı Heusler alaşımlarının ~600-800 °C sıcaklık aralığında L<sub>21</sub>-B2 faz geçişi gerçekleştiği bilinmektedir (Jetta, 2010; Wei, 2016). Yüksek sıcaklık fazı olan B2 fazı, hacim merkezli kübik (HMK) kafes yapısı sergilerken, nispeten düşük sıcaklık fazı düzenli bir yüzey merkez kübik (YMK) L<sub>21</sub> fazına sahiptir (Jetta, 2010).

Polikristalin yapılarda tercih edilen bir kristalografik yönelim elde etmenin pratik bir yoluda sıcak ekstrüzyondur (Chulist et al., 2010). Kısmen düzenli B2 fazı çok daha küçük burgers vektörüne sahiptir ve bu nedenle dislokasyon kayması için çok daha uygundur. Bu da dislokasyon kaymasının, yüksek sıcaklıkta B2 aşamasında başlatılabilir olabileceğini göstermektedir. Bu bakımdan sıcak ekstrüzyon tane boyutu, mekanik ve fonksiyonel özellikler için yararlı olabilir (Wei, 2016). Ekstrüzyon; silindirik bir kütüğün bir kovan içine yerleştirilerek uygulanan bir kuvvet etkisiyle bir kalıptan geçirilerek kesit alanının küçültülmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Ekstrüzyon işlemi sıcak ya da soğuk olarak yapılabilir. Metal ve alaşımların çoğu oda sıcaklığında yeteri kadar sünek olmadığından sıcak ekstrüze edilirler (Arabacı, 1996; Ayder, 2019). Ekstrüzyon yöntemi direkt, indirekt, hidrostatik ve darbeli olmak üzere dört şekilde yapılabilir. Direkt ekstrüzyon yönteminde kalıp ile kovan hareket etmemekte ve plastik şekil değiştirme metal bloğun kalıba doğru hareketi ile sağlanmaktadır (Arabacı, 1996). Ekstrüzyon işleminde Ekstrüzyon sıcaklığı, ekstrüzyon oranı ve kalıp tasarımı önemli parametrelerdir (Ayder, 2019). Yüksek sıcaklıklarda malzemelerin direnci azalacağından daha az kuvvetlerle ekstrüzyon gerçekleşir (Sünkür, 2016). Genellikle Cu, Ti, Fe ve diğer yüksek sıcaklık gerektiren alaşımların ekstrüzyon ürünleri 600-1200 °C çalışma sıcaklıklarında elde edilebilir (Sauer, 2006:9-58).

Bu çalışmada farklı kompozisyonlara sahip NiMnGa esaslı alaşımlar vakumlu indüksiyon fırınında ergitilerek şekil hafızalı alaşımlar elde edilmeye çalışılmıştır. Üretilen alaşımlar, öncelikle ısıl işlemin dönüşüm sıcaklıkları ve faz yapısına etkilerini gözlemlemek amacıyla farklı sürelerde 950 °C'de homojenize edilerek buzlu suda

soğutulmuştur. Sonrasında tel erozyon yöntemiyle silindirik numuneler elde edilerek 950 °C, 1000 °C ve 1050 °C’de ekstrüzyon yöntemi ile kesitleri daraltılmıştır. Ekstrüzyon sonucu elde edilen örneklerden kesit alınarak SEM-EDS, XRD, DSC, Vickers Mikro Sertlik, optik mikroskop çalışmaları ile faz dönüşümü, tane boyutu ve sertlik değişimleri üzerinde kompozisyonun, sıcaklık ve tane boyutunun etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ilave edilen alaşım elementlerinin ve ekstrüzyon sıcaklığının alaşımların tane boyutu ve mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir faktör olup olmadığı gösterilerek tartışılmıştır.



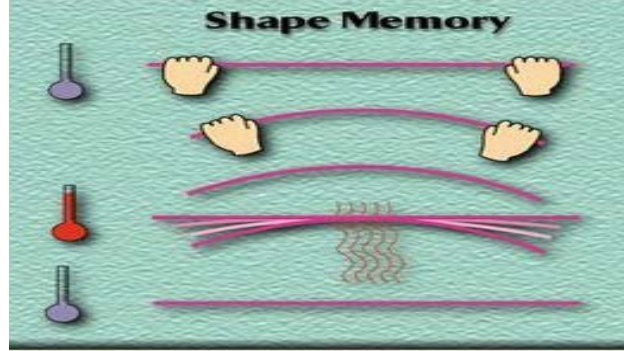
## 1. BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

#### 1.1. Şekil Hafızalı Alaşımlar

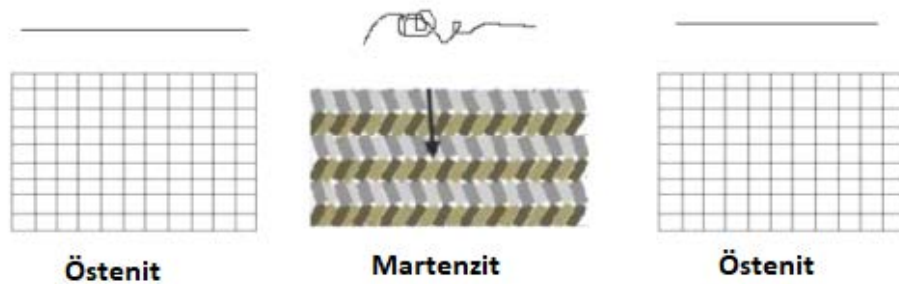
Çağımızı derin bir şekilde etkileyen malzemeler, ulaşım, konut, giyim, iletişim ve gıda üretimi gibi hayatımızın her alanında önemli yere sahiptir. Bu bakımdan toplumların ilerlemesi işlevsel ve yeni malzemelerin elde edilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Tarihsel olarak baktığımızda ilk uygarlıklar geliştirdikleri malzemelerin düzeylerine göre, taş devri, bronz çağı ve demir çağı gibi isimler almışlardır. (Callister ve Rethwisch, 2015). Günümüzde hala önemli bir yere sahip olan metal ve alaşımları özellikle sıcaklık, basınç ve zor etkisi altında mikroyapısal olarak değişik özellikler sergilerler (Gökdemir, 2006). Hızlı soğutma ile elde edilen çeliklerde, ilk olarak, Amerikan metalurjist Howe tarafından 1888 yılında farklı mikro yapılar bulunduğu gösterilmiştir. Onun bu yeni mikroyapılara vermiş olduğu ferrit, perlit ve sementit isimleri günümüzde hala kullanılırken, “hardenit”, gelişmelerle birlikte (Eskil, 2006) ilk kez 1890’lı yıllarda Adolph Martens tarafından Fe bazlı alaşımlarda gözlemlendiğinden bu bilim adamının adını alarak “martenzit” (martensite) olarak kullanılmaya başlanmıştır (Patel et al., 2020). Martenzit, Fe-C alaşımlarında östenit bölgesine girene kadar ısıtılarak östenitlenen alaşımın su verme işlemiyle düşük sıcaklıklara aniden soğutulmasıyla östenit fazından yayınmasız dönüşüm sonucunda elde edilen tek fazlı ve denge dışı oluşmuş bir yapıdır (Callister ve Rethwisch, 2015). Martenzit fazın keşfi şekil hafıza etkisi için büyük bir adım olmuştur. Fe-C sisteminde östenit fazından martenzit fazına meydana gelen değişim geri dönüşümsüzdür (Patel et al., 2020). Ancak uygun termomekanik işlemler gerçekleştirildiğinde önceden belirlenmiş şekil veya boyuta tekrar dönebilme özelliğine sahip olmaları (Şekil 1.1) akıllı malzemeler grubunda yer alan (Qader et al., 2019) şekil hafızalı alaşımları özel malzemeler haline getirmiştir (Flint ve Melcher, 1996; Auricchio ve Sacco, 2001; Jiang et al., 2005; Gaitzsch et al., 2006; Cesari et al., 2008;

Jetta, 2010; Yang et al., 2012; Zhu ve Yu, 2013; Xin ve Zhou, 2016; Buytoz ve Harputlugil, 2018).



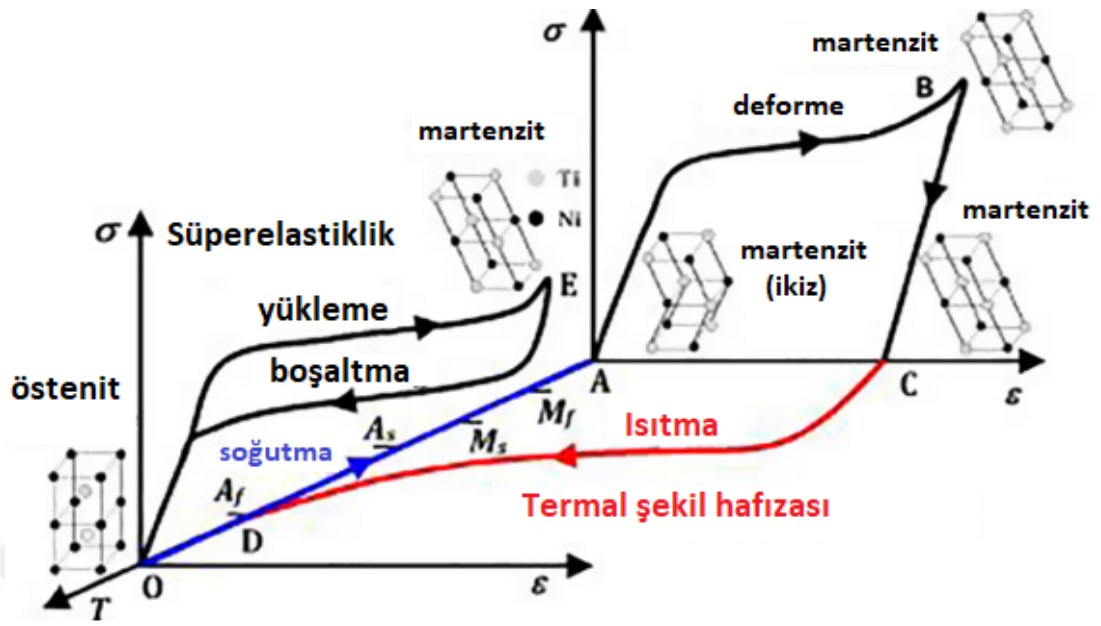
Şekil 1.1. Şekil hafıza davranışının şematik gösterimi (Kaya vd., 2016).

İlk olarak 1932 yılında Chang ve Read tarafından şekil hafızalı dönüşümler üzerine incelemeler yapılmış ve AuCd alaşımında metalografik gözlemler ve mukavemetindeki değişikliklere dayanarak dönüşümün ters çevrilebilirliğinden bahsedilmiştir (Patel et al., 2020). 1938 Yılında Buehler ve arkadaşları tarafından CuZn alaşımında da şekil hafıza dönüşümü gözlemlenmiş, ancak net bir şekilde ortaya atılamamıştır (Otsuka ve Ren, 1999). 1961'de ABD Donanma Mühimmat Laboratuvarı'nda şans eseri NiTi şekil hafızalı alaşım keşfedilmiştir (Patel et al., 2020). Bunun yanında 1951 yılında bükülmüş bir AuCd çubuk üzerinde denemeler ile şekil hafıza etkisi gözlemlenmiştir (Otsuka ve Ren, 1999; Kajiwara, 1999; Akdoğan ve Nurveren, 2003). Şekil hafıza etkisi, östenit ve martensit olmak üzere iki faz sergileyen bazı malzemelerde gözlenen bir olgudur (Şekil 1.2). Bu iki durum arasındaki faz dönüşümü difüzyonsuzdur ve sıcaklık, basınç, manyetik alan veya diğer değişkenlerdeki bir değişiklikle tetiklenebilir (Jetta, 2010; Qader et al., 2019). Genellikle şekil hafızalı alaşımlarda % 6-8 arasındaki zorlanmalar tamamıyla hatırlanır (Eskil, 2006).



Şekil 1.2. Şekil hafızalı bir malzemenin şekil ile beraber içyapılarının değişimi (Jetta, 2010).

Düşük sıcaklıktaki martensit fazında deforme edilen şekil hafızalı bir alaşım, üzerindeki zorlamalar kaldırıldığında (genellikle martenzit bitiş ( $M_f$ ) sıcaklığının altında), martenzit fazdan ana faza dönüşecek şekilde östenit bitiş ( $A_f$ ) sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara kadar ısıtıldığında kendi orijinal östenitik şeklini alır (Yan et al., 2003). Bu duruma şekil hafıza etkisi denir (Qader et al., 2019). Dönüşüm, "faz dönüşüm sıcaklığı" adı verilen belirli bir sıcaklıkta gerçekleşir. Bu sıcaklığın üzerinde, malzeme oldukça düzenli bir kübik yapı sergileyen östenit fazına sahipken bu sıcaklığın altında martensit adı verilen daha düzensiz bir yapı mevcuttur. Genellikle birden fazla varyantta bulunan martensit durumu tetragonal, monoklinik, triklinik vb. düzensiz bir kübik yapı biçimidir. Bu varyantlar birlikte var olur ve ikizleri oluşturur. Martensitin bu karmaşık yapısı, plastik gerilim yaşamadan büyük ölçüde deformasyona uğramasını sağlar. Isıtıldığında, kristal yapı yüzey merkezli kübik bir yapı oluşturacak şekilde yeniden sıralanır (Jetta, 2010). Şekil 1.3'te ısı etkisiyle meydana gelen şekil hafıza etkisi gösterilmektedir. Burada termal şekil hafızası durumunda malzeme A-B-C-D-A şeklinde bir yol izler. Yüklemeden sonra deformasyon A-B eğrisini izler. B noktası, gerilme-şekil değiştirme diyagramındaki nihai gerilme değerini geçmemelidir. Yük B noktasından boşaltıldıktan sonra, az miktarda gerinim geri kazanımı gerçekleşir ve gerinim C noktası ile gösterilir. Yükleme sırasında ikizlenmiş martensit değişerek bozulmuş martensite dönüşür. Bu dönüşüm, atomların düzenli hareketinde gerçekleşir. Hareketler bir atomlararası mesafeden daha azdır veya aksi takdirde malzeme şekil hafızası etkisi gösteremez. C-D yolu, alaşımın ısınması nedeniyle oluşan gerilim geri kazanım yoludur. Sıcaklık ekseninde östenit sıcaklığı başlangıç noktasına ( $A_s$ ) kadar hiçbir değişiklik olmaz ve bu noktaya ulaşıldıktan sonra kristal yapısındaki değişiklik nedeniyle gerinim geri kazanımı gerçekleşir ve Östenit sıcaklığı bitiş noktasında ( $A_f$ ) tamamlanır. Bu noktada şekil geri kazanımı gerçekleşse de, kristal yapı ilk deforme olmamış haline göre farklıdır. Bu nedenle malzemenin östenitten martensit fazına soğuması gerekir (Patel et al., 2020).

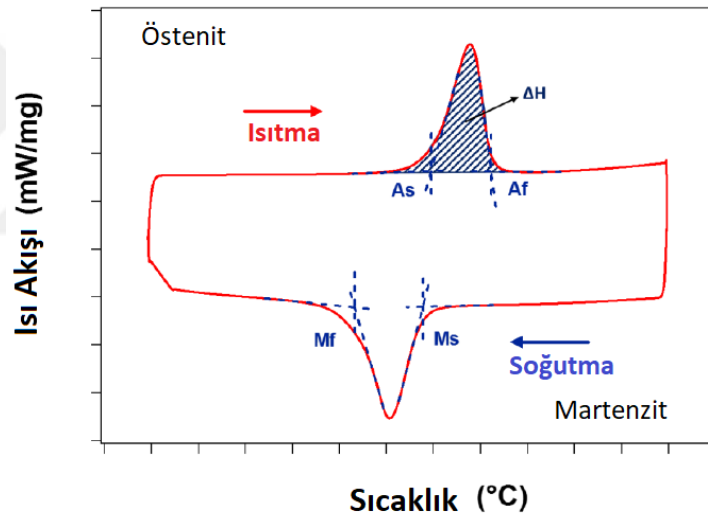


Şekil 1.3. Termal şekil hafıza ve süperelastiklik (Patel et al., 2020).

Şekil hafızalı alaşımlar, süper elastik özellikleri ve şekil hafıza etkisiyle yeni mühendislik ve endüstriyel alanda kullanılan mekanik uygulamalar için potansiyel adaylardır. Bu nedenle araştırmacılar tarafından gördüğü ilgi her geçen gün artmaktadır (Perez-Checa et al., 2018; Wang et al., 2011; Kalay vd., 2018). Şekil hafızalı alaşımlarda şekil hafıza etkisi, termoelastik martenzitik dönüşüm sergileyen bazı özel alaşımlarda tek ve çift yönlü şekil hafıza etkisi olarak görülebilir (Liu et al., 1998; Eşkil, 2000; Akdoğan ve Nurveren, 2003; Kurt ve Orhan, 2003; Simon, 2004). Tek yönlü şekil hafıza olayı, düşük sıcaklık fazında deforme edilen numune yüksek sıcaklıklarda deformasyon öncesi durumuna geri döner. Ancak tekrar soğutulduğunda deforme edilmeden önceki şeklini almaması durumunu ifade eder (Akdoğan ve Nurveren, 2003; Kurt ve Orhan, 2003; Simon, 2004). Bunun yanında araştırmalara göre tek yönlü şekil hafıza etkisi gösteren malzemelerde, çift yönlü şekil hafıza etkisi gösteren malzemelere nazaran eski şekline dönme oranı daha fazladır (Eşkil, 2006). Çift yönlü şekil hafıza etkisinde ise malzemeler tekrarlanan ısıtma-soğutma çevrimleri sonrası tekrar şekil değişimine uğrarlar (Kurt ve Orhan, 2003).

Şekil hafızalı alaşımlar, şekillerini deforme olmuş bir şekilden daha önceki bir deforme olmamış şekle geri kazanabilen malzemelerdir (Patel et al., 2020). Termodinamik olarak incelendiğinde şekil hafıza etkisi, martenzit ve östenit hallerinin serbest enerjisi ile

ilgilidir. Dönüşüm sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda, bir fazın serbest enerjisi diğerinden daha azdır ve bu sıcaklıkta daha kararlı hale gelir. Dönüşüm sıcaklıklarının üzerinde ikinci faz daha kararlı hale gelir. Düzenli faz, östenit olarak adlandırılırken, düzensiz faza martensit fazı denir (Jetta, 2010). Bu bakımdan şekil hafızalı alaşımlarda, şekil hafıza özelliğinin sergilenmesinde martenzit ve östenit dönüşümünün başlangıç ve bitiş sıcaklıkları en önemli parametredir (Wang et al., 2011 Kaya vd., 2016; Chowdhury ve Sehitoglu, 2017). Bu dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan teknik DSC (Differential Scanning Calorimeter) analizidir (Kurt ve Orhan, 2003; Wang et al., 2011; Kök ve Aydoğdu, 2013; Turabi, 2015; Lemke ve Coda, 2019). Şekil hafızalı alaşım özelliği sergileyen bir alaşım için elde edilmiş DSC analiz eğrisi Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Bir şekil hafızalı alaşımın DSC analiziyle belirlenen faz dönüşüm sıcaklıkları (Turabi, 2015).

Şekil hafızalı alaşımlarda elde edilen DSC analizlerinde görülen faz dönüşümleri, sırasıyla östenit başlangıç sıcaklığı, östenit bitiş sıcaklığı, martensit başlangıç sıcaklığı, martensit bitiş sıcaklığı anlamına gelen dört sıcaklık  $A_s$ ,  $A_f$ ,  $M_s$ ,  $M_f$  ile karakterize edilir (Jetta, 2010). DSC analizi sırasında malzeme ısıtıldığında, dönüşüm östenit başlangıç sıcaklığında ( $A_s$ ) başlar ve östenit bitiş sıcaklığında ( $A_f$ ) tamamlanır. Soğutma sırasında ise östenit fazından martenzit fazına dönüşüm, martensit başlangıç sıcaklığı ( $M_s$ ) ile başlar ve martensit bitiş sıcaklığında ( $M_f$ ) tamamlanır. Bu döngüde genel olarak martenzit fazından östenit fazına dönüşüm endotermik (ısı alan), östenit fazından

martenzit fazına dönüşüm ise ekzotermik (ısı veren) olarak gerçekleşir (Turabi, 2015). Burada meydana gelen dönüşüm sıcaklıklarının büyük ölçüde alaşım kompozisyona bağlı olduğu ve başka alaşım elementlerinin eklenmesinin bunları çeşitli şekillerde değiştirebileceği bildirilmiştir (Kök ve Aydoğdu, 2013; Lemke ve Coda, 2019). Şekil hafızalı alaşımın türüne bağlı olarak meydana gelen martenzit fazı; ince plaka, iğnemsî, kama gibi şekillerde görülebilir. Ayrıca bu faz; ikizlenmeler, yığılma kusurları, dislokasyonlar gibi kusurları da içerebilmektedir (Kaya vd., 2016; Chowdhury ve Sehitoglu, 2017).

Şekil hafıza özellikleri her malzeme için farklı sıcaklık aralıklarında sergilenebilir. Bu bakımdan çeşitli uygulama alanları için sıcaklık aralığı ve sıcaklık histerezisi önemlidir. Düşük sıcaklıklarda ( $<100^{\circ}\text{C}$ ) şekil hafıza özellikleri sergileyen ve insanların vücut ısılarıyla değişim gösteren NiTi tabanlı şekil hafızalı alaşımlar endüstriyel ve teknolojik alanlarda kapsamlı uygulamalara sahiptir (Perez-Checa et al., 2018; Qader et al., 2019). Öte yandan son yıllarda,  $100-500^{\circ}\text{C}$  aralığında çalışan yüksek dönüşüm sıcaklıklarına sahip (Perez-Checa et al., 2018) şekil hafızalı alaşımlara olan ilgi endüstride özellikle taşımacılık (havacılık, uzay, otomobil), petrol endüstrisi, kimya (Jiang et al., 2017) ve robot teknolojilerinde doğan ihtiyaçlardan dolayı önemli ölçüde artmıştır (Humbeeck, 2012; Jiang et al., 2017; Qader et al., 2019). Şu ana kadar FeMnSi, CuAlNi, NiAl, Ti (Pt, Pd, Au) (Perez-Checa et al., 2018), NiTi, NiMn, ve Co bazlı çok sayıda yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımlar üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu alaşımların yüksek martensitik dönüşüm sıcaklıklarında faz kararlılığı ve termal döngü kararlılığını çözmek için deneysel ve teorik olarak bir dizi çalışmalar yapılmıştır. Bu alaşımlar genellikle  $500^{\circ}\text{C}$ 'nin altında dönüşüm sıcaklıklarına sahip olduklarından daha yüksek sıcaklıkta iyi termal döngü kararlılığı, mekanik özellik ve şekil hafıza etkisine sahip, yeni yüksek sıcaklık sistemlerinin geliştirilmesi arzu edilmektedir (Jiang et al., 2017; Perez-Checa et al., 2018, Niendorf et al., 2019). Yüksek sıcaklıkta kullanılan bazı şekil hafızalı alaşımların dönüşüm parametreleri Tablo 1.1'de sunulmuştur.

Tablo 1.1. Yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşım grupları ve özellikleri (Jani et al., 2014).

| Grup       | Alaşım Kompozisyonu | Dönüşüm Sıcaklık Aralığı (°C) | Termal Histerezis (°C) | Gerinim (%)       | Geri Kazanma (%)      | Yorumlar                                                                            |
|------------|---------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 100-400 °C | Ti-Ni-Pd            | 100-530                       | 20-26                  | 2,6-5,4           | 90 <sup>PE</sup> -100 | Yüksek iş çıktısı, çoğu ticari olarak hazır ve yüksek malzeme maliyeti              |
|            | Ti-Ni-Pt            | 110-1100                      | 31-35                  | 3-4               | 100                   | Makul şekil hafıza etkisi, büyük histerezis ve nispeten düşük malzeme maliyeti.     |
|            | Ni-Ti-Hf            | 100-400                       | 60                     | 3                 | 100                   |                                                                                     |
|            | Ni-Ti-Zr            | 100-250                       | 54                     | 1,8               | 100                   |                                                                                     |
|            | Cu-Al-Ni            | 100-400                       | 21,5                   | 3-5 <sup>PE</sup> | 80-90 <sup>PE</sup>   | Düşük maliyetli, zayıf ila makul şekil hafıza etkisi ve gerilimde kırılma           |
|            | Cu-Al-Nb            | 100-400                       | 59-170                 | 55-7,6            | -                     | -                                                                                   |
|            | Co-Al               |                               | 121                    | 2                 | 90                    | -                                                                                   |
|            | Co-Ni-Al            | 100-300                       | 15,5                   | 5 <sup>PE</sup>   | 100 <sup>PE</sup>     | İyi işlenebilirlik, büyük histerezis ve yüksek sıcaklık Pseudoelastik               |
|            | Ni-Al               |                               | -                      | -                 | -                     | Düşük malzeme maliyeti, düşük histerezis ve zayıf çekme sünekliği.                  |
|            | Ni-Mn               | 100-670                       | 20                     | 3,9               | 90                    | -                                                                                   |
|            | Ni-Mn-Ga            | 100-400                       | 85                     | 10                | 70                    | -                                                                                   |
|            | Zr-Cu               | 100-600                       | 70                     | 8                 | 44                    | İyi süneklik ve işlenebilirlik, ancak zayıf şekil hafızası etkisi                   |
|            | Ti-Nb               | 100-200                       | 50                     | 2-3               | 97-100                | -                                                                                   |
|            | U-Nb                | 100-200                       | 35                     | 7                 | -                     | İyi süneklik ve şekil hafızası etkisi, ancak oksidasyon şüpheli ve Uranyum içeriyor |
| 400-700 °C | Ti-Pd               | 100-510                       | 40                     | 10                | 88                    | İyi süneklik (Ti - Pd), ancak yüksek malzeme maliyeti (Ti-Pt).                      |
|            | Ti-Au               | 100-630                       | 35                     | 3                 | 100                   |                                                                                     |
| >700 °C    | Ti-Pt-Ir            | 990-1184                      | 66,5                   | 10 <sup>PE</sup>  | 40 <sup>PE</sup>      | Yüksek akma dayanımı.                                                               |
|            | Ta-Ru               | 900-1150                      | 20                     | 4                 | 50                    | Kıvrılma mikroyapısı, ancak zayıf oksidasyon direnci ve küçük histerezis.           |
|            | Nb-Ru               | 425-900                       | -                      | 4,2               | 88                    |                                                                                     |

PE:Pseudoelastik.

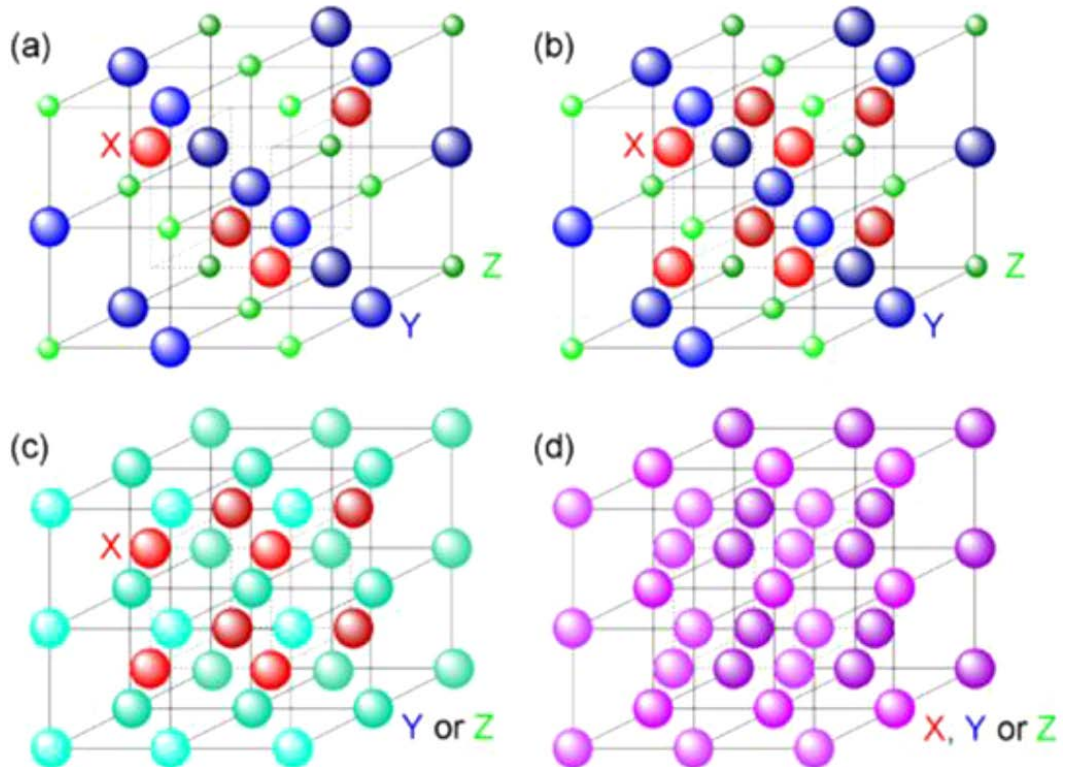
Şekil hafızalı alaşımlar, kritik bir değerin üzerinde gerilime maruz kaldıklarında, gerilimi ortadan kaldırırken neredeyse tamamen geri kazanılabilen elastik deformasyona uğrarlar. Bu süper elastik benzeri davranış, pseudoelastik olarak adlandırılır (Jetta, 2010; Patel et al., 2020). Burada dış gerilme uygulandığında, ostenit fazı martensit fazına dönüşür. Martensit fazı, herhangi bir plastik gerilme olmaksızın deformasyona uğrayabilen, kendi kendine uyum sağlayan karmaşık bir varyant yapı oluşturma kabiliyetine sahiptir. Gerilim giderildiğinde, malzeme bir ters faz dönüşümüne uğrar, yani deformasyon belirtileri olmadan ostenit fazına geri döner (Patel et al., 2020).

Geleneksel şekil hafızalı alaşımlarda faz dönüşümü, sıcaklık değiştirilerek gerçekleştirilirken sonralarda manyetik alanı değiştirerek şekil değişikliğinin sağlanabileceği de keşfedildi (Jetta, 2010). Makroskopik şekil değişikliğine neden olan sıcaklık ile beraber gerilme veya manyetik alan tarafından yönlendirilebilen bu alaşımlar tersine çevrilebilir martensitik dönüşüm sergiler. Büyük geri kazanılabilir gerilim ve yüksek frekans tepkisi, bu malzemeleri ümit verici manyetik aktüatör malzemesi olarak ilgi çekici yapar. Günümüzde Ni-Mn-Ga, Co-Ni-Ga, Fe-Pt, Co-Ni-Al, Fe-Pd ve Ni-Fe-Ga sistemleri gibi manyetik şekil hafızalı alaşım sistemleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ni-Mn-X (In, Sn, Sb) alaşım sistemleride son zamanlarda ilgi çekmektedir. Bu alaşımlar yüksek sıcaklıkta ekstrüzyon gibi plastik deformasyon yöntemleri ile geliştirilebilselerde çok kırılmandır. Ancak tane boyutunun iyileştirilmesinin mekanik özellikleri geliştirdiği bildirilmiştir (Prusik et al., 2016). Ayrıca şekil hafızalı alaşımlarda martenzit faz östenitten ikizlenme mekanizması ile meydana gelmesinden dolayı çeliklerdekinin aksine martenzit faz östenit fazına göre daha düşük sertlik değerlerine sahiptir (Kaya vd., 2016).

Hem yapısal hem de manyetik geçişler sergileyen Heusler alaşımları şekil hafızalı alaşım grubu olarak günümüzde ilgi çekici malzemelerdir. Bu alaşımlar da faz yapısı olarak yüksek sıcaklıkta kübik kristal yapıya sahip olan östenit fazı ve düşük sıcaklıkta daha düşük simetri yapısına sahip martenzit fazına sahiptirler (Sivaprakash et al., 2020).



Martenzit fazı genellikle östenit fazının düzensiz formu olduğundan östenitin yapısını anlamak çok önemlidir. XYZ ile ifade edilen ve  $C1_b$  yapısındaki yarı Heusler alaşımını incelediğimizde, alt birim hücrelerdeki hacim merkezli konumların dördü boşken, birim hücrenin geri kalanı Şekil 1.6. a'da gösterildiği gibidir (Jetta, 2010). Genel olarak intermetalik Heusler alaşımları, kübik  $L2_1$  fazının kristallografik konumlarda bulunan genel bir stokiyometrik formül olan  $X_2YZ$  ile özel bir alaşım sınıfına ayrılmıştır (Webster ve Ziebeck, 1998:75-79; Vasilev et al., 2003; Entel et al., 2006; Buchelnikov et al., 2006; Planes ve Manosa, 2006; Moya et al., 2007; Entel et al., 2008; Planes et al., 2009; Buchelnikov ve Sokolovskiy, 2011). Tam Heusler alaşımları olarak bilinen  $X_2YZ$  yapısı yüzey merkez kübik kafesine sahip  $L2_1$  yapısı sergilerler. Şekil 6 b'de görülen  $L2_1$  birim hücresi 4 tane yüzey-merkezli kübik alt örgünün iç içe geçmesiyle oluşur. X alt örgüsü (0, 0, 0) veya (1/2, 1/2, 1/2)'de, Y alt örgüsü (1/4, 1/4, 1/4)'te, Z alt örgüsü ise (3/4, 3/4, 3/4)'te yer almaktadır (Gaitzsch et al., 2006). Bunun yanında Heusler alaşımları atomik düzensizliğe çok duyarlıdır.  $L2_1$  yapısında, Y-Z atomlarındaki hafif bir düzensizlik Şekil 6 c'de gösterilen B2 yapısına yol açar. X-Y ve Y-Z atomlarındaki başka bir düzensizlik ise, Şekil 6 d'de gösterilen oldukça düzensiz bir A2 yapısına yol açar (Jetta, 2010).



Şekil 1.6. Heusler alaşımlarının yapısı (Jetta, 2010).

Şekil hafıza özelliği, manyetik şekil hafıza özelliği ve manyetokalorik (manyetik soğutma) özelliği özellikleri sayesinde ilgi çeken Heusler alaşımları; manyetik sensörler ve manyetik hafızalı sistemlerde uygulama alanı bulmaktadır. Ayrıca, manyetik direnç, spin enjeksiyon cihazlarının ve polarize ışık yayan LED (Light Emitting Diode) üretiminde de kullanılmaktadırlar (Pirge et al., 2004; Yıldırım, 2014). Isıl ve yapısal özellikleri bakımından Heusler alaşımları son yirmi yıldır incelenmektedir (Tróchez et al., 2019).  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  alaşımında, şekil hafıza etkisinin gözlenmesi ve  $\text{NiMnSb}$  alaşımında yarı-metalik ferromanyetizma özelliğinin keşfinden sonra, Heusler alaşımları ilgi çeken alaşımlar haline gelmiştir (Yıldırım, 2014). Son zamanlarda  $\text{Co}_2\text{MnGa}$ ,  $\text{FePt}$ ,  $\text{CoNi}$  ve  $\text{FeNiCoTi}$  (Pirge et al., 2004),  $\text{NiMnGa}$ ,  $\text{FePd}$ ,  $\text{CoNiAl}$  and  $\text{NiFeGa}$  gibi manyetik şekil hafızalı alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar artmıştır (Zhu ve Yu, 2013). Özellikle  $\text{NiMnGa}$  şekil hafızalı alaşımlar, Ullakko ve arkadaşları tarafından 1996'da keşfedildiklerinden beri ilgi duyulan alaşımlardır (Pirge et al., 2004; Gaitzsch et al., 2006). Stoikiometrik  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  ve stoikiometrik olmayan  $\text{Ni}_{2+x+y}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}_{1-y}$  bileşikler kapsamlı bir şekilde çalışılmış olsalarda uygulamalarda çok önemli yere sahip olan mekanik özellikler bakımından  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  bileşiği kırılıgandır ve bu da aktüatör uygulamaları için bir dezavantaj olarak karşımıza çıkar. Bu nedenle, bu bileşiğin sünekliğinin iyileştirilmesi için arayışlara girilmiştir. Bunlardan bir tanesi 3d elementleri, Fe veya nadir toprak elementleri ile değiştirmektir. Nadir toprak elementleri ile ikame etmek sünekliği artırırken, bazı nadir toprak elementlerinin çözünürlüğünün düşük olması bileşikte çökelti oluşumuna yol açabilir (Tróchez et al., 2019).

Genel olarak baktığımızda son 10 yıl içerisinde Ni-Mn bazlı Heusler alaşımları, dikkat çekici fiziksel özellikleri ve uygulamalar için geniş fonksiyonel işlevleri sayesinde artan ilgi ile araştırılmaya devam edilmektedir (Lazpita et al., 2016; Shen et al., 2020)

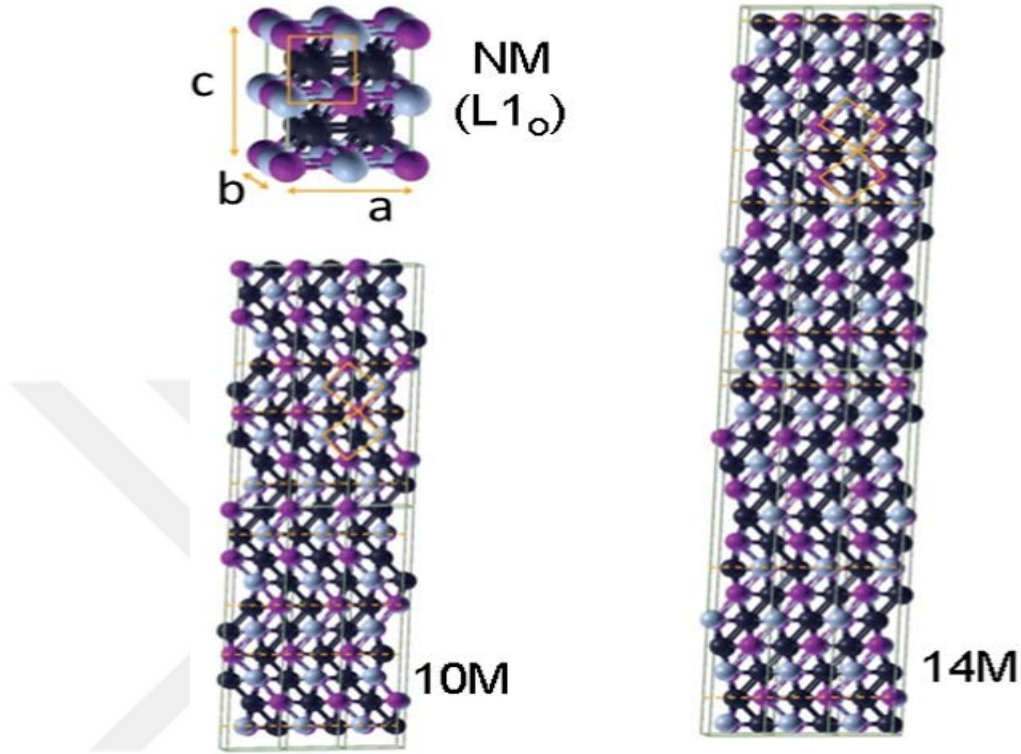
### 1.1.2. Ni-Mn Alaşımları

Şekil hafızalı alaşımlar, plastik olarak deforme edildikten sonra sıcaklık veya diğer fiziksel reaksiyonlar yoluyla eski şekillerini tekrar tekrar hatırlayabilirler (Karim et al. 2020). Bu özelliklerin yanı sıra manyetik faz geçişinin ve manyetik özelliğinin kontrolü iyi bir şekilde sağlanabilen Ni-Mn-X (X = In, Ga, Sn) şekil hafızalı Heusler alaşımları çok işlevli özellikler gösterir (Dubenko et al., 2009; Sivaprakash et al., 2020). Özellikle,

büyük manyetik alan kaynaklı gerinim nedeniyle sensörler ve aktüatörlerdeki potansiyel uygulamaları için ilgi çeken Ni-Mn alaşımları östenit yapısından modüle edilmiş martenzite, sonrasında azalan sıcaklık ile modüle edilmemiş martenzit yapısına dönen birkaç faz yapısı sergiler (Sozinov et al., 2002; Dubenko et al., 2009; Wang et al., 2019; Sivaprakash et al., 2020). Ni-Mn-X Heusler alaşımlarındaki manyetizma, temel olarak Mn bölgelerindeki manyetik atomlar tarafından belirlenir. Ni, Mn veya X atomunun kompozisyonunun değiştirilmesiyle, elektron konsantrasyonu ve atomlar arası mesafe değişeceğinden, kristal faz kararlılığı, manyetik ve diğer özellikler değişecektir (Dubenko et al., 2009).

Ni-Mn bazlı alaşımlarda homojenizasyon sonrasında yapılan hızlı soğutma işlemi öncelikle yüksek sıcaklık fazı olan  $\beta$  (B2) diğer bir yüksek sıcaklık fazı olan  $L2_1$  fazına dönüştürür. Soğutma daha da devam ederse, neredeyse termoelastik bir martensitik dönüşüm ile düşük sıcaklıkta hacim merkezli tetragonal  $L1_0$  fazına dönüşüm meydana gelir (Liu et al., 2009; Dubenko et al., 2009; Morawiec et al., 2010). Östenit sıralı yüzey merkez kübik  $L2_1$  kafes yapısında iken, martenzit tetragonal, ortorombik veya monoklinik yapıda olabilir. Kompozisyona bağlı olarak oluşan martenzit fazı Şekil 1.7'de gösterildiği gibi tetragonal yapıda beş katmanlı modüle edilmiş 5M, monoklinik yapıda yedi katmanlı modüle edilmiş 7M ve basit tetragonal kristal yapıya sahip modüle edilmemiş NM martensit yapısında olabilir (Pons et al., 2000; Pushin et al., 2013). Bu yapılar ayrıca periyodikliği ikiye katlayarak sırasıyla 10M ve 14M olarak adlandırılır (Chowdhury ve Sehitoglu, 2017). Belirli bir bileşim için gelişecek olan tam martensitik yapı ve bunun manyetik ve şekil hafıza özellikleri üzerindeki etkisi, onları öngörmek için hiçbir kural olmadığından tahmin edilemez. Bununla birlikte, martensitik ve basamaklı dönüşümler hala tam olarak anlaşılmamıştır (Khan vd, 2018). Malzemedeki bu faz dönüşümleri, malzemenin sıcaklığının ve elektron yoğunluğunun bir fonksiyonudur (Prusik et al., 2016; Morawiec et al., 2010). Ayrıca diğer bir göz önünde bulundurulması gereken faktör de atomik boyutun östenit-martenzit dönüşümü üzerindeki etkisidir (Yang et al. 2012). Şimdiye kadar Ni-Mn içeren şekil hafızalı alaşımlar üzerine birkaç alaşım sistemi geliştirilmiştir (Prusik et al., 2016). Bunlardan Ni-Mn- (Ga, In, Sn, Sb) alaşımları manyetik şekil hafıza özelliği ve martenzit dönüşüm sıcaklıkları sayesinde bilimsel araştırmalarda daha çok ön plana çıkmışlardır (Prusik et al., 2016; Khan vd, 2018; Czaja et al., 2019). Birçok kullanım alanı bulan bu alaşımlar

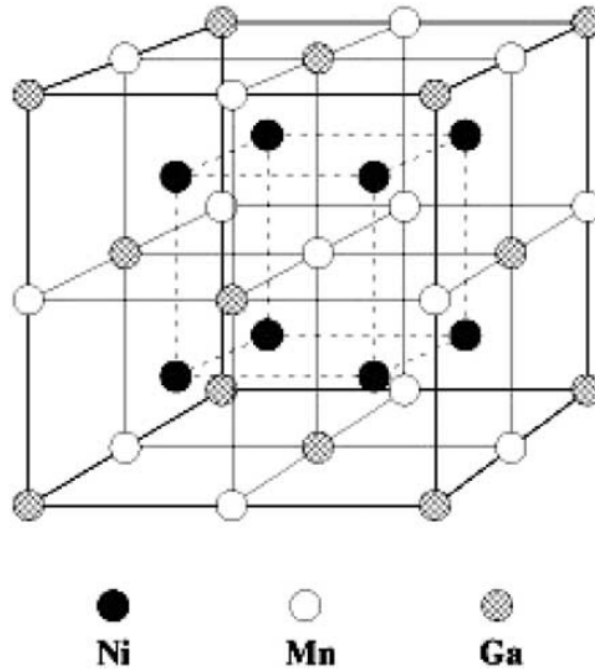
bileşimine bağlı olarak geniş bir martensitik dönüşüm (MT) sıcaklık aralığını göstermektedir (Wang ve Jiang, 2008; Yang et al., 2012).



Şekil 1.7. Martenzit kristal yapı modülasyonları (10M ve 14M, sırasıyla 5M ve 7M'ye karşılık gelecektir) (Chowdhury ve Sehitoglu, 2017).

400K ve üzerindeki bir sıcaklıkta martensitik dönüşüm sergileyen şekil hafızalı alaşımlar literatürde yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımlar olarak kabul edilmektedir (Czaja et al., 2019). Yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşım olarak NiMnGa alaşımlarında yapılan bir çalışmada 670-720 K gibi martenzit dönüşüm sıcaklıkları sergileyebildiği belirtilmiştir (Cesari et al., 2008). Tüm şekil hafızalı alaşımlarda olduğu gibi NiMnGa alaşımlarının da faz dönüşüm sıcaklıkları, kompozisyona bağlıdır (Jetta, 2010; Yang et al., 2012). Örneğin polikristal Ni-Mn-Ga alaşımları için yapılan bir çalışmada atomik nikel içeriğinin artmasıyla dönüşüm sıcaklığının yükseldiği bildirilmiştir (Kök ve Aydoğdu, 2013). Daha öncede bahsedildiği gibi bir şekil hafızalı alaşımın gösterdiği özellikler açısından içyapısı son derece önemlidir (Jiang et al. 2005; Xin et al., 2007; Wang ve Jiang, 2008). Ni-Mn-Ga alaşımı kimyasal kompozisyona ve ısıtma işlemine bağlı olarak yüksek sıcaklıklardan soğutma sırasında önce B2'den (kübik)  $L2_1$ 'e (kübik, östenit) yapısına dönüşür (Jetta, 2010; Khan vd, 2018). Stokiyometrik veya yarı

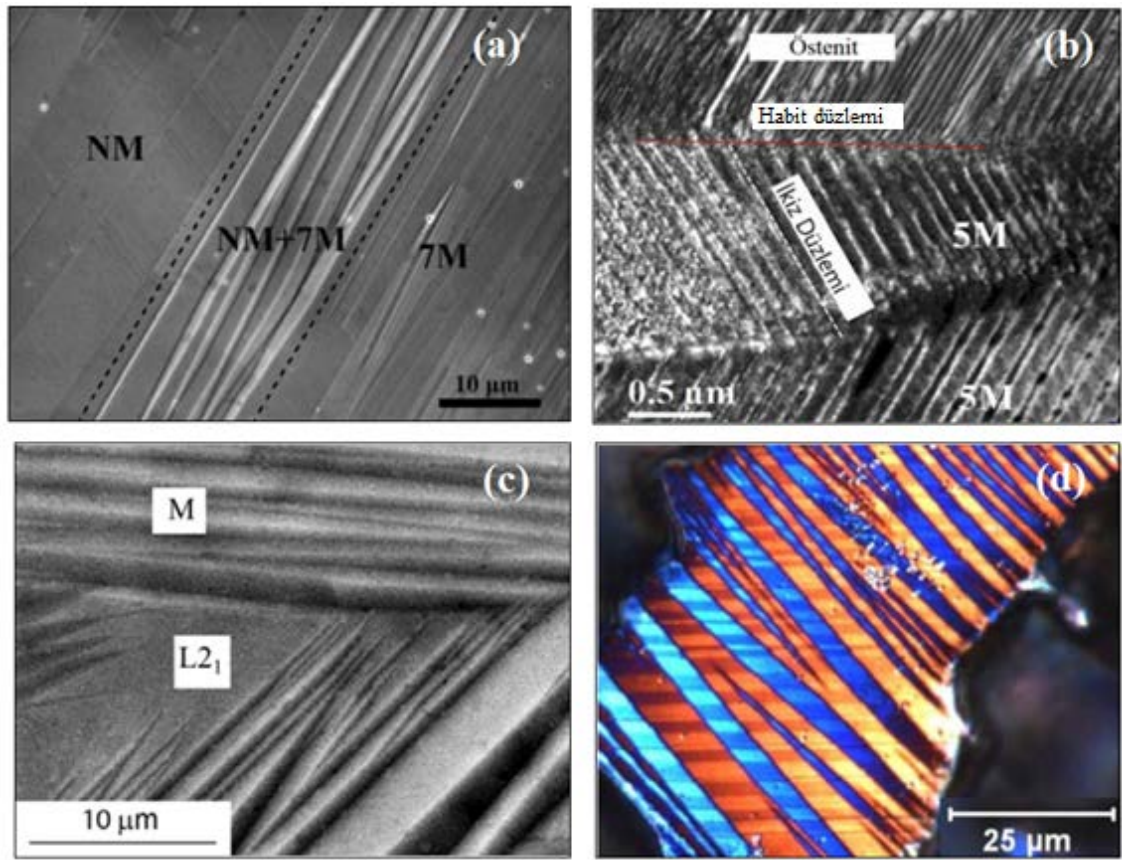
stokiyometrik bileşime sahip  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  alaşımları, tersinir bir martensitik dönüşüm sergiler. Bu termoelastik dönüşüm sırasında, yüksek sıcaklıklı östenitteki kübik Heusler yapısı, kübik-tetragonal, kübik-ortorombik veya monoklinik bir martensitik dönüşüme uğrar. Heusler ( $\text{L}_{21}$ ) tipi östenit yapısı Şekil 1.8'de gösterilmektedir (Pirge et al., 2004). Soğuma devam ettikçe Şekil 1.7'de gösterildiği gibi 7M (monoklinik) (Pons et al., 2000); 5M modüle edilmiş (tetragonal) (Pushin et al., 2013) ve NM modüle edilmemiş (tetragonal) yapı meydana gelebilir (Flint et al., 1996; Chulist et al., 2010; Çakır et al., 2014; Li et al., 2017; Khan vd, 2018). Literatürde kübik  $\text{L}_{21}$  fazının kafes parametresi  $a = 5,83 \text{ \AA}$  (Belosludtseva et al., 2016; Chao et al., 2019); tetragonal yapıdaki NM fazın kafes parametreleri yaklaşık olarak  $a = 7,75 \text{ \AA}$  ve  $c = 6,62 \text{ \AA}$  (Pons et al., 2000); tetragonal yapıdaki 5M fazının kafes parametreleri  $a = 5,90 \text{ \AA}$  ve  $b = 5,55 \text{ \AA}$  monoklinik yapıdaki 7M fazının kafes parametreleri  $a = 4,26 \text{ \AA}$   $b = 5,43 \text{ \AA}$   $c = 29,54 \text{ \AA}$  ve  $\beta = 94,3^\circ$  (Pons et al., 2000) olarak bildirilmiştir.



Şekil 1.8. Yüksek sıcaklıkta östenitik fazda kübik  $\text{NiMnGa}$  şekil hafızalı alaşımına ait Heusler yapısı (Pirge et al., 2004).

$\text{Ni-Mn-Ga}$  şekil hafızalı yapı içerisinde oluşan martensitik yapılar, yüksek bir manyetik anizotropiye, düşük ikiz sınır gerilimine sahiptir ve bu yapılar  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  alaşımına dev bir manyetostriksiyon kazandıran harici manyetik alan tarafından yeniden yönlendirilebilir. İkiz yapılar tipik olarak, yüksek simetrlili östenit fazdan düşük

simetriye sahip martenzit faza dönüşüm sırasında oluşur. Bu manyeto-yapısal dönüşümler, martensitik yapılar ile manyetik alan etkileri yakından ilgilidir ve bu bakımdan mikro yapılar ve manyetik alan yapıları arasındaki ilişkiyi bulmak çok önemlidir (Karim et al. 2020). Ni-Mn içerikli şekil hafızalı alaşımlar üzerine çeşitli yapılan çalışmalarda elde edilmiş faz dönüşüm mikroyapıları Şekil 1.9'da gösterilmektedir. Burada östenit ( $L2_1$ ) yapısı 7M, 5M, NM faz yapıları ve ikizlenme yapısı, görülmektedir.



Şekil 1.9. Ni-Mn-X alaşımlarında oluşan bazı fazların mikroyapı görüntüleri. (a- NiMnGa (Li et al., 2014), b-NiMnGa (Zhou et al., 2017), c-NiMnIn (Kaletina et al., 2019), d- NiMnGa martenzit ikiz yapıları (Chowdhury ve Sehitoğlu, 2017)).

Tek kristalleri çok yüksek mekanik dayanım sergilemekle birlikte, polikristalin NiMnGa şekil hafızalı alaşımların son derece kırılgan olduğu bilinmektedir. Tane küçültme işlemi polikristalin NiMnGa şekil hafızalı alaşımların mekanik özelliklerini ve şekil hafıza özelliklerini geliştirmek için etkili bir yöntemdir. Bununla beraber alaşımların sünekliğini ve sıcak işlenebilirliğini arttırmak için, Fe, Co, Cr, Al, Ti, Cu, Nb, B veya

nadir elementler gibi dördüncü element eklemeye olan ilgi artmaktadır (Jiang et al., 2005; Xin et al., 2007; Wang ve Jiang, 2008; Czaja et al., 2019). Ayrıca demir alaşımlarında Mo ilavesinin mekanik özellikler üzerindeki iyileştirici etkisi bilinmektedir (Upadhyay ve Saxena, 2020). Yakın zamanda yapılan başka bir çalışmada mekanik özellikleri arttırmak için NiMnGa/silikon kompozitler üzerine araştırmalar yapılmıştır (Feuchtwanger et al., 2018).

Diğer bir NiMnX alaşımı olan Ni-Mn-Sn sınıfı Heusler alaşımları, deformasyon sonucu manyetik olarak geri kazanılabilir şekil hafıza özellikleri ile dikkat çekmektedir. Bu alaşımların elastocaloric etkileri nedeniyle soğutucu olarak potansiyelleri incelenmiştir. Genellikle literatürde ark ergitme ve indüksiyonla ergitme ile elde edilen NiMnSn bazlı alaşımlarda (Czaja et al., 2018), östenit yapısı ferromanyetik özellik gösterirken, martenzit yapı antiferromanyetik özellik ile anılmaktadır (Chowdhury ve Sehitoglu, 2017). Bu alaşımlara katılaşmanın ardından, kimyasal ve yapısal homojenliği sağlamak için yaygın olarak genellikle ikinci bir aşama olarak 1070–1270 K aralığındaki sıcaklıklarda 30 dakika ila 4 hafta süren çok çeşitli tavlama prosedürleri uygulanmaktadır. Dörtlü  $\text{Ni}_{45}\text{Co}_5\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{10}$ ,  $\text{Ni}_{43}\text{Co}_7\text{Mn}_{41}\text{Sn}_9$ ,  $\text{Ni}_{43}\text{Co}_7\text{Mn}_{43}\text{Sn}_7$  ve  $\text{Ni}_{40}\text{Co}_{10}\text{Mn}_{41}\text{Sn}_9$  bileşimleri ferromanyetik yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımlar için ön plana çıkmış adaylardır (Czaja et al., 2019).

## 1.2. Valans Elektron Konsantrasyonu (Elektron/Atom (e/a) Oranı)

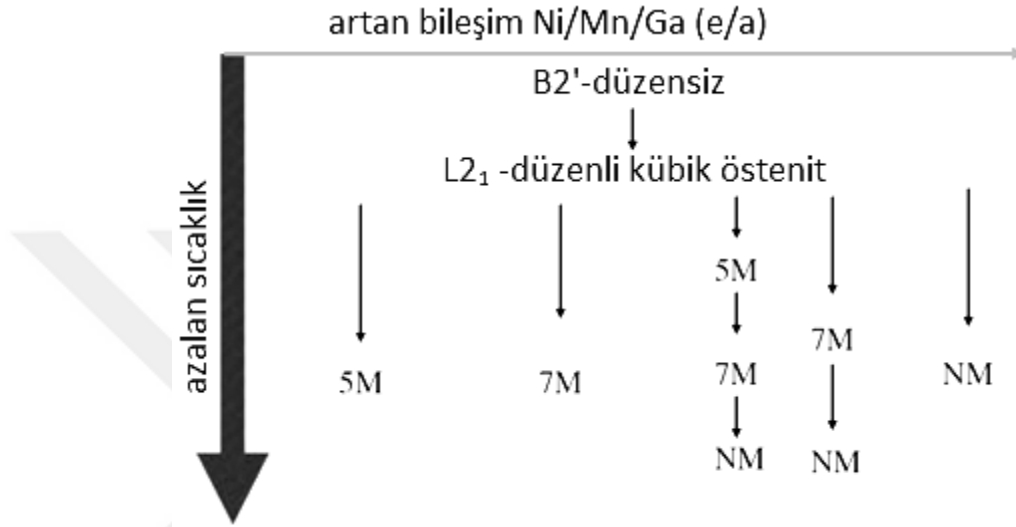
Şekil hafızalı alaşımlarda e/a oranı önemli bir veridir. Değerlik elektron konsantrasyonu (e/a) Ni-Mn alaşımlarının faz yapısının belirlenmesinde önemli bir faktör olduğu ve yapılan çalışmaların faz dönüşüm sıcaklıkları ile e/a arasında doğrusal ilişki olduğunu gösterdiği bilinmektedir (Mullner et al., 2004; Jiang et al., 2005; Bachaga et al., 2015; Varzaneh, 2015). Bu oranın değiştirilmesi ile şekil hafızalı alaşımlarda dönüşüm sıcaklıkları da değişir. Elektron/Atom (e/a) oranı alaşımda atom başına ortalama serbest (valans) elektron sayısıdır. e/a oranı aşağıdaki denklem 1.1 ile hesaplanır.

$$e/a = \sum_i^n (\text{valans})_i \times (\text{atomik oran})_i \quad (1.1)$$

burada;  $i$ ; alaşımlardaki elementlerin toplamını gösterir. Örnek verecek olursak; atomik olarak %55,5 Ni-% 25 Mn-% 17,5 Ga- % 2 Mo oranına sahip alaşım için elektron konsantrasyonu (Ni→10, Mn→7, Ga→3 ve Mo→6 değerlikli olduğundan); bu verilere

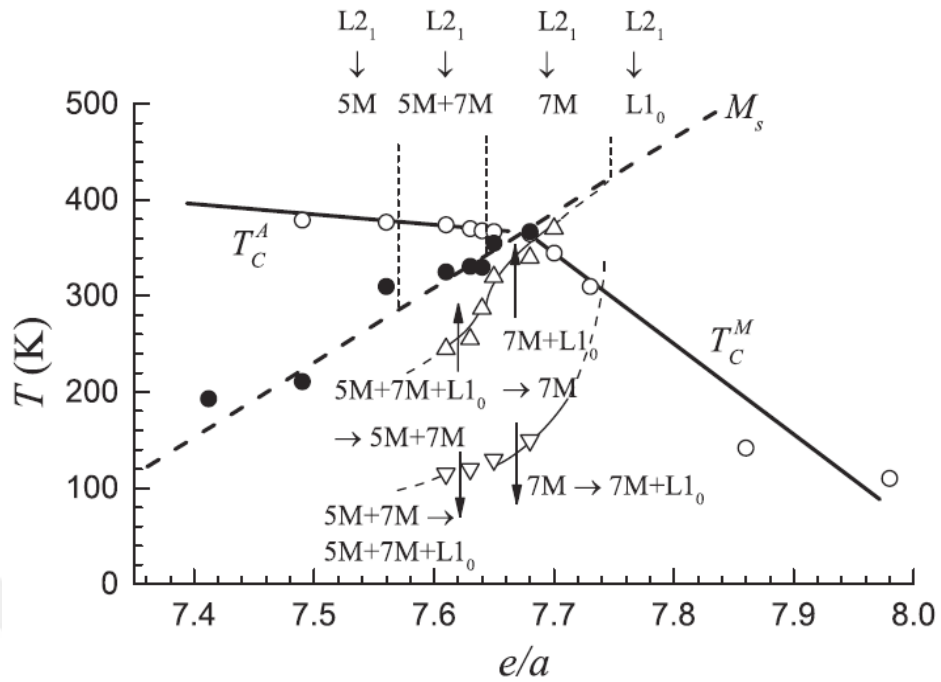
göre  $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{17,5}\text{Mo}_2$  kompozisyonu için  $e/a = 7,95$  olarak hesaplanır (Dal et al., 2021).

Artan değerlik elektron konsantrasyonu ( $e/a$ ) ile NiMnGa şekil hafızalı alaşımında meydana gelebilecek faz dönüşümleri Şekil 1.10'da gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Ni-Mn-Ga alaşımlarında sıcaklık ve  $e/a$  oranının değişimi ile oluşabilecek fazlar (Liu et al., 2009).

$\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{X}$  ( $\text{X} = \text{Ga}, \text{In}, \text{Sn}$  veya  $\text{Sb}$ ) Heusler alaşımları için yapılan çalışmalar incelendiğinde Şekil 1.11'de gösterildiği gibi genellikle artan valans elektron konsantrasyonu ( $e/a$ ) ile neredeyse doğrusal olarak martensit başlangıç sıcaklıklarının ( $M_s$ ) arttığı görülmüştür (Çakır et al., 2014). Ayrıca, üçlü Ni-Mn-Ga alaşımlarının yüksek elektron konsantrasyonu ( $e/a$ ), martenzit dönüşümlerinin hızlı bir şekilde bozulmasına yol açabilir (Yang et al., 2012).  $7,55 \leq e/a \leq 7,75$  konsantrasyon aralığında meydana gelen intermartensitik geçişler görülmektedir. Bu bileşim aralığında, östenit yapı, soğutmayla beraber modüle edilmiş 5M veya 7M martensit durumuna dönüşür (Li VD., 2016). Daha fazla soğutma, teorik çalışmalarda da öngörüldüğü gibi L1<sub>0</sub> modüle edilmemiş durumunun bir karışım olarak görünmesine yol açar (Çakır et al., 2014).



Şekil 1.11. % 50 sabit Ni konsantrasyonunda bir alaşım serisine dayalı faz diyagramı (Çakır et al., 2014).

### 1.3. Debye-Scherrer Denklemi ile Tane Boyutu Hesaplama

Ni-Mn-Ga alaşımlarının genellikle kırılğan bir yapıya sahip olması bu alaşımların geleneksel plastik deformasyon yöntemleri ile şekillendirilmesini zorlaştırır. Bu bakımdan mekanik ve şekil hafıza özelliklerini geliştirmek için tane boyutlarının iyileştirilmesi etkili bir yöntemdir (Prusik et al., 2016; Wei, 2016).

XRD verilerinden elde edilen sonuçlar ile ortalama tane boyutu  $D$ , Debye-Scherrer denklemi kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Denklem 1.2).

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1.2)$$

Burada  $\beta$ ; XRD grafiğindeki bir faz için y ekseninde ölçülen maksimum genliğin yarısı olan noktalar arasındaki eğrinin genişliğidir (radyan),  $\lambda$ ; X-ray kaynağının dalga boyunu ve  $\theta$ ; pikin XRD kırınım açısını ifade eder (Barret ve Massalski, 1980; Dal et al., 2021). Bir XRD verisinden  $\lambda=1.54060 \text{ \AA}$ ,  $2\theta=43^\circ$  ve  $\beta=0,4$  olarak elde edilen bir pikten tane boyutunu bu eşitlikle  $D=21,34 \text{ nm}$  olarak hesaplayabiliriz.

#### 1.4. Şekil Hafızalı Alaşım Üretim Yöntemleri

Şekil hafızalı alaşımların üretilmesinde genellikle, ergiyik hale getirilerek döküm vb. ile elde edilmesi ve yüksek sıcaklıklarda işlemeyi (tel çekme, haddeleme vb.) içeren birden çok imalat teknikleri beraber kullanılır (Özkale et al., 2016; Patel et al., 2020). NiTi alaşımları çoğunlukla tel ve yay şeklinde kullanıldıklarından termomekanik işlemlerle oluşturulurlar. Bu işlemler sonrasında genellikle iç gerilimlerin giderilmesi ve şekil hafıza özelliklerinin iyileştirilmesi için belirli bir sıcaklıkta bekletilerek homojenleştirme ısı işlemi gerekmektedir. Biyomedikal uygulamalarda kullanılmak üzere yoğunluğu düşük, gözenekli alaşımlar elde edebilmek için toz metalurjisi tekniği malzemelerin sonradan işlenmesinin çok daha az olduğu ürünleri üretmenin başka bir yoludur (Patel et al., 2020).

Döküm, toz metalurjisi, termal püskürtme ve ince film üretim yöntemleri gibi çeşitli geleneksel yöntemler ile elde edilen şekil hafızalı alaşımlarda bu yöntemlerin bileşimde düşük homojenlik, aşırı gözeneklilik, zayıf yüzey kalitesi ve işleme sırasında istenmeyen ikincil fazların oluşumu gibi bazı dezavantajlar oluşabilmektedir (Marattukalam et al., 2018). Son gelişmeler ile seçici lazer eritme (SLM), seçici lazer sinterleme gibi lazer tabanlı eklemeli üretim işlemleri (Marattukalam et al., 2018) ve elektrodepozisyon gibi elektrokimyasal işleme yöntemleri (Özkale et al., 2016) şekil hafızalı alaşımların elde edilmesinde kullanılmıştır. Ancak bu yöntemlerde de bazı dezavantajlar bildirilmiştir. Örneğin, Mo ve W gibi belirli elementlerin, sıradan elektrokimyasal çalışma koşullarında, banyoda diğer elementin birikmesini indükleyen başka bir metal olmadığı sürece, genellikle elektro-çökeltilemez olduğu anlatılmıştır (Özkale et al., 2016).

Literatürde NiMn alaşımlarının yaygın olarak vakumlu ark ergitme ve indüksiyon ergitme yöntemi ile elde edildiği görülmektedir. Bunların yanında Bridgman, Melt Spinning gibi diğer yöntemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tablo 1.2 de bazı NiMn alaşımlarına ait üretim yöntemi ve nihai olarak elde edilen faz yapıları gösterilmektedir. Ark ergitme yöntemi yaygın olarak kullanılan endüstriyel bir metalurjik işlemdir. Bu yöntemde grafit elektrotlara verilen akımla elektrotlarla pota içerisindeki metal arasında ark oluşması sayesinde eriyik oluşarak alaşımlar elde edilir. (Beaman et al., 2014) İndüksiyonla ergitme yönteminde ise yüksek sıcaklıklara

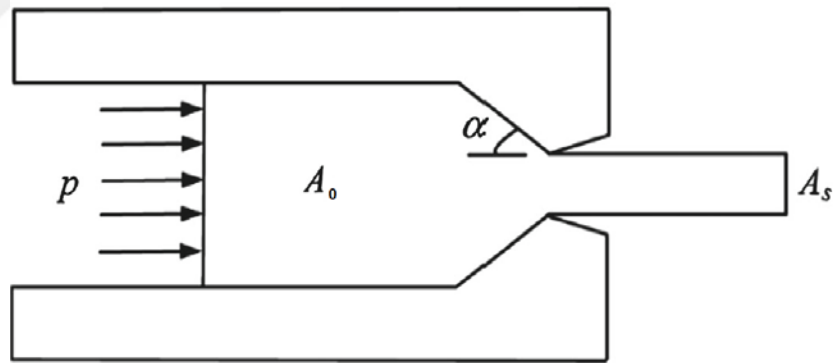
dayanıklı ve etrafında içerisinde akım geçen bakır borularla sarılı olan bir pota içerisinde ergiyik metal elde edilir. Bakır borulardan geçen alternatif akım manyetik alan oluşturur ve pota içerisinde bu sınırlar içerisinde kalan metallerde gerilim meydana gelerek ergime gerçekleşir (Kılıç et al., 2020). Melt spinning yönteminde doğrudan eriyikten metalik şeritler ve silindirik malzemeler çok hızlı soğutma hızları ile elde edilebilir. Bu yöntemde önce erimiş bir alaşım jeti oluşturulur ve daha sonra hızla hareket eden dönen bir yüzeye çarptırılarak hızlı soğuyan metal birikintileri oluşturulur. Elde edilen alaşım, bileşime, soğutma hızına ve jet akış hızına göre farklı özelliklerde olabilir (Kamal ve Mohammad, 2012:42). Bridgman metodu eriyikten tane büyütmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde elde edilmek istenen alaşım düşey durumda ısıya dayanıklı bir düzenek içerisine yerleştirilir. Fırın içerisinde ergiyik hale gelen alaşım fırının soğuk olan alt bölgesinde birikerek taneler oluşmaya başlar. Fırındaki sıcaklığın azaltılmasıyla alt bölgede başlayan kristalleşme devam eder ve kristalleşme tamamlandığında istenen alaşım meydana gelmiş olur. Bu yöntemde ısıнын optimizasyonu ve dağılımı son derece önemlidir (Kokh et al., 2005).

Tablo 1.2. Çeşitli yöntemlerle elde edilmiş şekil hafızalı alaşımlar ve kristal yapıları (Düzenlenmiştir) (Khan vd, 2018).

| Örnek Alaşımlar                                                    | Yöntem (İşlem)                                           | Kristal yapı                        |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| $\text{Ni}_{49.8}\text{Mn}_{28.5}\text{Ga}_{21.7}$                 | Bridgman                                                 | bct, I4/mmm                         |
| $\text{Ni}_{48.8}\text{Mn}_{29.7}\text{Ga}_{21.5}$                 | Bridgman                                                 | 7M                                  |
| $\text{Ni}_2\text{MnGa}$                                           | Tek kristal                                              | bct                                 |
| $\text{Ni}_{50.6}\text{Mn}_{28.3}\text{Ga}_{21.1}$                 | Ark eritme                                               | 7M                                  |
| $\text{Ni}_{48.0}\text{Mn}_{30.6}\text{Ga}_{21.5}$                 | Ark eritme                                               | 5M                                  |
| $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{24}\text{Ga}_{22}\text{Co}_4\text{Cu}_4$ | İndüksiyon eritme                                        | NM                                  |
| $\text{Ni}_{45}\text{Co}_5\text{Mn}_{36.7}\text{In}_{13.3}$        | İndüksiyon eritme                                        | L2 <sub>1</sub> ve 14M              |
| $\text{Ni}_{43}\text{Co}_7\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{11}$            | İndüksiyon eritme                                        | L2 <sub>1</sub> ve 10M/6M           |
| $\text{Ni}_{45.7}\text{Co}_{4.8}\text{Mn}_{35.6}\text{In}_{13.8}$  | Bridgman                                                 | L2 <sub>1</sub>                     |
| $\text{Ni}_{45}\text{Mn}_{36.5}\text{Co}_5\text{In}_{13.5}$        | İndüksiyon eritme                                        | L2 <sub>1</sub> ve 6M               |
| $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34}\text{In}_{16}$                       | Ark eritme                                               | 10M                                 |
| $\text{Ni}_{46}\text{Co}_4\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{11}$            | Ark eritme                                               | L2 <sub>1</sub>                     |
| $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34}\text{In}_{16}$                       | PBE formülasyonunu kullanan yoğunluk fonksiyonel teorisi | -                                   |
| $\text{Ni}_{44.9}\text{Co}_{5.1}\text{Mn}_{37.5}\text{In}_{12.5}$  |                                                          | -                                   |
| $\text{Ni}_{40.9}\text{Co}_{9.1}\text{Mn}_{37.5}\text{Sn}_{12.5}$  |                                                          | -                                   |
| $\text{Ni}_{35.2}\text{Co}_{14.8}\text{Mn}_{37.5}\text{Sb}_{12.5}$ |                                                          | -                                   |
| $\text{Ni}_{45}\text{Mn}_{43}\text{CrSn}_{11}$                     | Ark eritme, tavlama                                      | Kübik ve tetragonal                 |
| $\text{Ni}_{41}\text{Co}_9\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{10}$            | Ark eritme, tavlama                                      | 6M                                  |
| $\text{Ni}_{43}\text{Co}_7\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{11}$            | Melt Spinning                                            | L2 <sub>1</sub> and L1 <sub>0</sub> |
| $\text{Ni}_{42.6}\text{Mn}_{39.6}\text{Sn}_{9.7}\text{Fe}_{8.1}$   | Melt Spinning                                            | 7M                                  |
| $\text{Ni}_{42}\text{Co}_8\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{11}$            | Ark eritme, 1170 K, 14 gün tavlama                       | L2 <sub>1</sub>                     |
| $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{12}$                       | Melt Spinning                                            | L2 <sub>1</sub>                     |
| $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34}\text{Co}_2\text{Sn}_{14}$            | Ark eritme                                               | L2 <sub>1</sub>                     |
| $\text{Ni}_{48}\text{Co}_2\text{Mn}_{38}\text{Sn}_{12}$            | Melt Spinning                                            | Östenit                             |
| $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34}\text{In}_{16}$                       | Ark eritme                                               | 10M                                 |
| $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{33.66}\text{Cr}_{0.34}\text{In}_{16}$    | Ark eritme                                               | Östenit ve ortorombik               |
| $\text{Ni}_{49.5}\text{Mn}_{25.4}\text{Ga}_{25.1}$                 | Tek kristal                                              | Östenit                             |
| $\text{Ni}_{2.19}\text{Mn}_{0.81}\text{Ga}$                        | Ark eritme                                               | Tek fazlı                           |
| $\text{Ni}_{54.8}\text{Mn}_{20.3}\text{Ga}_{24.9}$                 | Ark eritme                                               | Modüle edilmemiş (NM)               |
| $\text{Ni}_{55}\text{Mn}_{18.9}\text{Ga}_{26.1}$                   | Ark eritme                                               | 7M                                  |
| $\text{Ni}_{55.3}\text{Mn}_{18.1}\text{Ga}_{26.6}$                 | Ark eritme                                               | Östenit                             |
| $\text{Ni}_{55}\text{Mn}_{20.6}\text{Ga}_{24.4}$                   | Melt Spinning                                            | 7M                                  |
| $\text{Ni}_{55}\text{Mn}_{19.6}\text{Ga}_{25.4}$                   | Melt Spinning                                            | 7M                                  |

### 1.5. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon, öncelikle yirminci yüzyılda genellikle yuvarlak kesitli bir kütüğün uygulanan bir kuvvet ile istenen şekle sahip açıklıktan geçirilerek elde edilen malzemeler ile yarı mamül endüstrisinde önemli bir yere sahip olmuştur (Şekil 1.12). Kütüğün üzerine uygulanan kesme ve sıkıştırma, gerilmenin kütük malzemenin akış gerilimine ulaşmasına ve kalıp boyunca plastik olarak akmasına neden olur (Qamar et al., 2019). Çoğunlukla alüminyum ve bakır alaşımlarında çubuk, tel, boru ve profillerin üretiminde kullanılan bu yöntem paslanmaz çelik borular, çelik profiller ve diğer metallerdeki yarı mamul ürünlerin elde edilmesinde daha az kullanılmaktadır (Bauser, 2006:1; Qamar et al., 2019). Ekstrüzyon işlemiyle çoğunlukla 600 °C'ye kadar çalışma sıcaklıklarına sahip malzemelerle yarı mamül ürün üretilir. Genellikle 0-300 °C çalışma sıcaklıklarında Sn ve Pb alaşımları; 300-600 °C çalışma sıcaklıklarında Mg ve Al alaşımları; 600-1200 °C çalışma sıcaklıklarında Cu, Ti, Fe ve diğer yüksek sıcaklık gerektiren alaşımların ekstrüzyon ürünleri elde edilebilir (Sauer, 2006:9-58).



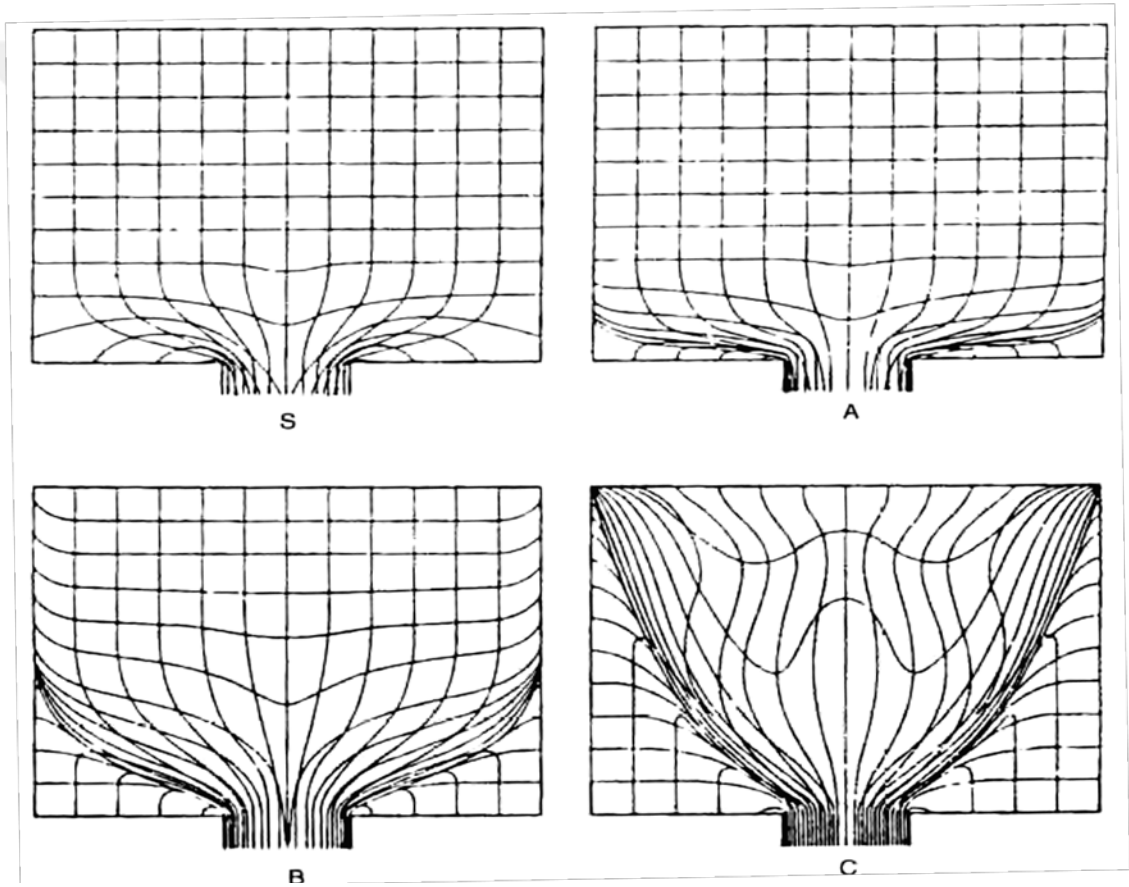
Şekil 1.12. Ekstrüzyon prosesi (Qamar et al., 2019).

Ekstrüzyon prosesleri ilk olarak soğuk ve sıcak olarak iki grupta sınıflandırılabilir. Soğuk işlemede işlenmekte olan malzeme ısıtılmaz, yani oda sıcaklığında ekstrüde edilir, sıcak işlemede ise malzeme; oda sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılarak ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilir (Siegert, 2006:59; Qamar et al., 2019). Bununla birlikte, soğuk işleme daha yüksek basınçlar anlamına gelir ve ekstrüde edilebilirliği azaltır. Ayrıca belirli ürün kusurlarına yol açabilir. Daha yüksek ekstrüde edilebilirlik ve genel kullanım kolaylığı nedeniyle, ekstrüzyon ticari olarak genellikle sıcak olarak yapılır (Qamar et al., 2019). Ekstrüzyon işlemi ile çubuk, dikişsiz boru, tel, şerit ve profiller elde edilebilir (Siegert, 2006:59). Ekstrüzyon yöntemi direkt, indirekt,

hidrostatik ve darbeli ekstrüzyon şekilde sınıflandırılabilir (Qamar et al., 2019). Direkt ekstrüzyon, endüstride en sık kullanılan ekstrüzyon işlemidir. Direkt ekstrüzyon yönteminde kalıp ile kovan hareket etmemekte ve plastik şekil değiştirme metal bloğun kalıba doğru hareketi ile sağlanmaktadır. Yöntem yağlamalı ya da yağlamasız olarak uygulanabilir. Direkt ekstrüzyonun ana uygulaması, alüminyum ürünlerin ekstrüzyonudur. Bununla birlikte, çelik, bakır, pirinç, kurşun, çinko ve tüm diğer metalik malzemeler direkt ekstrüzyon yöntemiyle deforme olabilir. Endirekt ekstrüzyon ilk olarak 1960'larda pirinç tel, yüksek mukavemetli alüminyum ve bakır alaşımlarından profillerin ekstrüzyonuyla gerçekleşmiştir (Siegert, 2006:80-100). Bu yöntemde uygulanan kuvvetin yönü ve metal akışı birbirine zıttır (Qamar et al., 2019). Deforme olan malzeme içi boş kovan ile kalıp arasına bir kütük olarak yüklenir ve kalıpla birlikte kovan içerisine itilir. Hidrostatik ekstrüzyonda kütük, hidrostatik ortam olarak da bilinen bir basınç ortamıyla çevrelenir. Bu yöntemde ekstrüzyon basıncının kaybolmamasını sağlamak için hidrostatik ortam ekstrüzyon basıncına geldiğinde kütüğün kalıba kapatılması gerektiğine ve sızdırmazlığın sağlanmasına dikkat etmek önemlidir. Bu nedenle işlem, konik bir kalıp ve kütük ucunun dikkatlice hazırlanmasını gerektirir (Siegert, 2006:59-114). Bu yöntemde kütük ve konteyner temas halinde olmadığından sürtünme yoktur. Ancak bu yöntem zor bir mekanik kurulum gerektirir. Darbeli ekstrüzyon, bir tür dolaylı işlemdir, ancak kademeli olarak artan bir işlemde ziyade bir darbe yükü (bir zımba aracılığıyla) kullanılır. Darbeli ekstrüzyon, bir tür dolaylı işlemdir ve kademeli olarak artan bir kuvvetten ziyade bir darbe yükü (bir zımba aracılığıyla) kullanılır (Qamar et al., 2019).

Literatürde direkt ekstrüzyon yöntemi için iş parçasının 4 farklı akış türü bildirilmiştir. Bunlar Şekil 1.13'te gösterildiği gibi S tipi, A tipi, B tipi ve C tipi akışlardır. S tipi akışta kütük ile kovan arasında ve kütük ile kalıbın ön yüzeyi arasında ihmal edilebilir sürtünme varsayımına dayanır. Bu varsayım teoriktir ve S tipi akış pratikte görülmez. A tipi akış, homojen özellikte kütük ve kütük ile kovan arasındaki düşük sürtünmenin yanı sıra kütük ile kalıbın ön yüzeyi arasındaki önemli sürtünme için geçerlidir. Kalıbın önünde oluşan bir ölü metal bölge ve bu bölge ile kütük arasında dar bir kesme bölgesi oluşur. Bu kesme bölgesi, birincil deformasyon bölgesini sınırlayan bir huni şekline yaklaşır. Bu huninin dışındaki kütük bölgeleri deformasyondan etkilenmez. B tipi akış, homojen özellikte kütük ve kütük ile kovan arasındaki önemli sürtünme ve kütük ile

kalıp yüzeyi arasındaki önemli sürtünme için geçerlidir. Kütük ve kovan arasındaki sürtünme, kütüğün dış tabakasının kütüğün iç kısmına göre geride tutulmasına neden olur. Ölü bölgeler, A tipinden daha fazla görülür. C tipi akışta ise koşullar B tipi ile aynı olup tek fark kütüğün homojen özellikte olmaması ve kovanın kütükten önemli ölçüde soğuk olmasından kaynaklı kütüğün dış bölgelerindeki akış geriliminin iç bölgelerine göre önemli ölçüde daha çok olduğunda meydana gelir. Dış bölgelerin daha çabuk soğuması bu akış tipine neden olur ve bu da ölü bölgelerin artarak ekstrüzyon kusurlarının oluşmasına neden olur (Siegert, 2006:69-70).



Şekil 1.13. Direkt ekstrüzyonda malzeme akış modelleri (Siegert, 2006:70).

Ekstrüzyon da bir malzemenin istenen form ve malzeme cinsine göre ekstrüzyon edilebilirliğindeki zorluklar bakımından karmaşık olabirir (Qamar et al., 2019). Bu bakımdan kalıp parametreleri ile şekillendirme kuvveti arasında bir ilişki vardır ve endüstride kalıp tasarımı yapılırken çoğu zaman kalıp imali sırasında deneme yanılma yöntemiyle en uygun sonuçlar tespit edilmeye çalışılır (Ayer, 2019). Ekstrüzyon parametrelerinin belirlenmesi ve malzemenin üretilebilirliği; enerji tüketimini, ürün

kusurlarının türü ve miktarını, üretim maliyetini ve kalıbın hizmet ömrünü doğrudan etkiler. Ekstrüzyon yapılacak olan malzemenin kesit alanı, kesit çevresi, ekstrüzyon oranı, kütük çapı, minimum kalıp kesit kalınlığı, kovan çapı (Qamar et al., 2019), kalıp açısı, kalıp giriş çapı, kalıp kanal uzunluğu gibi kalıp parametreleri ürün kalitesini etkileyen başlıca parametrelerdir (Ayer, 2019; Qamar et al., 2019). Bu parametrelerden ekstrüzyon oranı ( $V$ ) aşağıda verilerin denklem 1.2 ile hesaplanabilir.

$$V = \frac{A_0}{A_s} \quad (1.2)$$

Burada  $A_0$  kütüğün kesit alanını,  $A_s$  ekstrüzyondan elde edilen ürünün kesit alanını ifade eder (Siegert, 2006:69-70).

Bunun yanında bazı istatistiksel yöntemler yardımıyla da uygun kalıp tasarımını oluşturmayı amaçlayan çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ayer (2019), bir çalışmada kalıp giriş çapı, kalıp açısı ve kalıp kanal uzunluğu gibi parametrelerin ekstrüzyon kuvvetine olan etkisini Taguchi yöntemiyle incelemişlerdir. Bu çalışmada ekstrüzyon üzerinde en fazla etkisi olan kalıp parametresinin, kalıp giriş çapı olduğu, ekstrüzyon kuvvetinin kalıp giriş çapının düşmesiyle artış gösterdiği ve kalıp açısının artışıyla ekstrüzyon kuvvetinin azaldığı bildirilmiştir.

Ekstrüzyon işleminde üretimin kolay olması için yağlayıcılar da kullanılmaktadır. Nikel, düşük alaşımlı nikel malzemeler, NiCu ve NiFe, düşük ekstrüzyon oranları ve düşük ekstrüzyon sıcaklıkları için grafitli yağlayıcılar ile yağlanabilirken, yüksek alaşımlı malzeme kütükleri ise alaşımlı çeliklerde olduğu gibi yalnızca cam tozu kullanılarak yağlanır. En yüksek ergime noktasına sahip cam, yaklaşık 1300 °C'lik ekstrüzyon sıcaklıklarına sahip yüksek alaşımlı malzemeler için kullanılabilir. Erimiş tozdan oluşturulan cam film, yüzeyin yüksek ısı kayıplarını ve oksidasyonunu önler ve hatta oluşan oksidi çözebilir (Bauser, 2006:283).

Daha önce bahsedildiği gibi şekil hafızalı alaşımlar, plastik olarak deforme olduktan sonra harici ısıtma uyarısı veya diğer fiziksel reaksiyonlar yoluyla şekillerini tekrar tekrar hatırlayabilir (Karim et al., 2020). Polikristalin yapıya sahip şekil hafızalı malzemelerde tercih edilen bir kristalografik yönelim sağlamanın pratik bir yoluda sıcak ekstrüzyondur (Chulist et al., 2010). Literatürde yakın zamanda yapılan bir çalışmada

yüksek sıcaklık şekil hafıza özelliği gösteren Co-Ni-Ga alaşımına tane yapısının düzenlenmesi ve şekil hafıza özelliklerinin iyileştirilmesi için 900 °C’de sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Sıcak ekstrüzyon işleminin uygun ekstrüzyon sıcaklıklarında diğer şekil hafızalı alaşımlar için de gelecek vaad ettiği bildirilmiştir (Niendorf et al., 2019).

### 1.6. Şekil Hafızalı Alaşımların Başlıca Kullanım Alanları

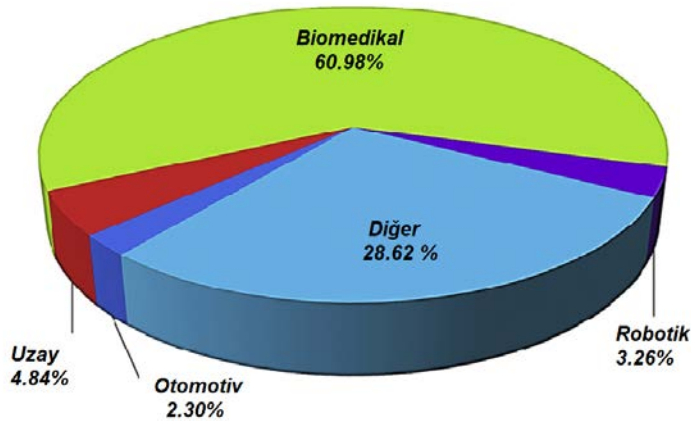
Günümüzde şekil hafızalı alaşımlar, çok farklı endüstrilerde kendilerine kullanım alanı bulmaktadır (Chowdhury ve Sehitoglu, 2017; Erdoğan, 2019; Nikolaev vd, 2020). Plastik deformasyondan sonra belirli etkiler altında ilk şekillerine geri dönebilmeleri sayesinde aktüatörler (Zhuo et al., 2020), diş telleri, mikro cerrahi aletlerinde, kemik implantlarda, havacılık endüstrisinde, konnektörlerde, hidrolik sistemlerde, manevra sistemlerinde, otomotiv endüstrisinde, fanlarda, termostatta, yüksek basınçta sızdırmazlık elemanlarında; bunların yanı sıra gözlük çerçevelerinde, antenler ve sensörler gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılabilirler (Yıldırım, 2014).

Genel olarak, termal etkiler altında şekil hafıza etkisi, biyomedikal, elektronik ve robotik uygulamalar için yararlıdır (Patel et al., 2020). Klima kanadını hareket ettirmek için kullanılan sıcaklık algılama elemanı, kahve makinesi ve günlük yaşamımızda kullandığımız birçok ürün ticarileştirilmiş örneklerdendir. Başka bir örnek olarak güneşin etkisi ile sıcaklık arttığında perdelerin kapanmasına, sıcaklık düştüğünde perdelerin açılmasına neden olan termal şekil hafıza etkisi gösteren perde mekanizmaları verilebilir (Saurabh et al., 2018). Ayrıca başka bir çalışmada Nitinol malzemeden tekstil sektörü için faydalı olacağı düşünülmüş üretilen bir gömleğin kollarının, vücut sıcaklığıyla kısalıp ve uzaması sağlanmıştır (Erdoğan, 2019).

Şekil hafızalı alaşımlar biyomedikal uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır (Patel et al., 2020). Özellikle Ni-Ti alaşımları, biyouyumlulukları sayesinde biyomedikal uygulamalarda kullanılabilen şekil hafızalı alaşımlardır. Bu malzeme iki yönlü şekil hafızası etkisine sahip olduğu için kemik implant uygulamalarında kullanılabilir. Ayrıca Nitinol telinin anjiyografi yapmak için yaygın olarak kullanılır. Ni-Ti bazlı şekil hafızalı alaşımlar ortodontik uygulamalarda da kullanılabildiği gibi daha birçok tıbbi uygulamada kullanılabilir (Saurabh et al., 2018). Tüm bu uygulamalar, düşük çalışma sıcaklıklarına sahip ortamlardır. Ancak, uçak ve uzay endüstrilerindeki

uygulamalar, rulmanlar, hareketli parçaların olduğu ortamlar çalışma sıcaklıkları yüksek yerlerdir (Patel et al., 2020) Bu bakımdan yüksek sıcaklık dönüşümü gösteren şekil hafızalı alaşımlar özellikle havacılık (Dilibal, 2016) ve otomotiv sektörü için cazip hale gelmiştir (Nespoli et al., 2017). Yüksek sıcaklıkta şekil hafızalı alaşımlar, genellikle 100 °C'nin üzerindeki yüksek dönüşüm gerektiren sıcaklıklarda hizmet verirler (Ley et al., 2019). Yüksek sıcaklık şekil hafıza özelliği gösteren Ni-Mn-Ga alaşımları, son zamanlarda çeşitli uygulamalar için çok çekici hale gelmiştir (Jetta, 2010). Ayrıca manyetik şekil hafıza özellikleri yönünden dikkat çeken bu alaşımlar sensör ve aktüatör malzemesi olarak ön plana çıkmıştır (Wang et al., 2011).

Şekil hafızalı alaşımların aerodinamik uygulamalarda da büyük önemi vardır. Örneğin helikopterlerde rotordaki farklılıklardan kaynaklanan titreşimi azaltmak için aktüatör kullanılmaktadır. Günümüzde modern, güvenli, konforlu ve akıllı sistemlere olan talep artmaktadır. Otomobillerde, motorun, süspansiyon sisteminin, şanzımanın kontrol edilmesi, yolcu için güvenlik ve konforun iyileştirilmesi için şekil hafızalı aktüatörler kullanılabilir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında, yangın, korozyon hasarı veya mekanik hasar tespitleri gibi birçok yerde şekil hafızalı alaşımlar kullanılabilir. (Saurabh et al., 2018). Ayrıca 1990-2013 yılları arasında şekil hafızalı alaşımların sektörlere göre kullanımı Şekil 1.14'te gösterildiği gibi gerçekleşmiştir (Jani et al., 2014).



Şekil 1.14. 1990-2013 yılları arası şekil hafızalı alaşımların sektörlere göre dağılımı (Jani et al., 2014).

## 2. BÖLÜM

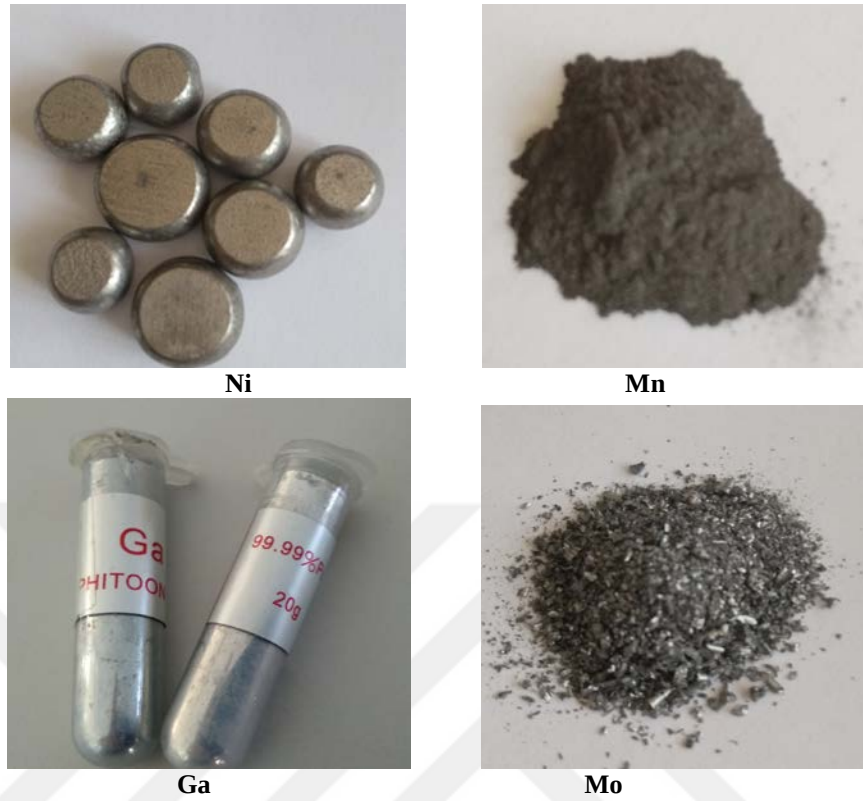
### YÖNTEM VE MATERYAL

Öncelikle elde edilmek istenen alaşım kompozisyonları üretilmek istenen malzemelerin e/a oranları hesaplanarak belirlenmiştir ve Tablo 2.1’de verilen alaşım içerikleri oluşturulmuştur. Sonrasında üretim için kullanılacak olan saf elementler temin edilerek alaşımlar vakumlu indüksiyon fırınında ergitme yöntemiyle homojen bir şekilde elde edilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen alaşımlardan numuneler alınarak ısıtılma fırınında farklı sıcaklıklarda homojenizasyon işlemine tabi tutulmuş ve buzlu suda soğutulmuşlardır. Tablo 2.2’de verilen ısıtılma yapılmış ve ham haldeki örneklerden 80-100 mg aralığında parçalar alınarak DSC analizine gönderilmiştir. Dönüşüm gözlenen ve üretimi başarılı olan alaşımlardan tel erezyon yöntemi ile silindirik örnekler alınmıştır. Ekstrüzyon işlemi ile kesilen silindirlere farklı sıcaklıklarda kesit daraltma işlemi gerçekleştirilmiştir. Alaşımların ham, ısıtılma yapılmış ve ekstrüzyona tabi tutulmuş hallerinden örnekler alınarak metalografik numuneler hazırlanmış ve aşağıda ayrıntılı olarak anlatılan materyal ve yöntemler kullanılarak incelenmiştir.

#### 2.1.Kullanılan Elementler ve Elde Edilmesi Planlanan Alaşımlar

Bu çalışmada Tablo 2.1’de verilen alaşımların üretilmesi planlanmıştır. Bunun için % 99.98 saflıkta Ni, % 99.7 saflıkta Mn ve Co, % 99.9 saflıkta Sn ve Sb, %99.9 saflıkta Ga ve Mo elementleri kullanılmıştır. Bunlardan bulk haldeki Ni ve Ga, granül haldeki Mn ve Mo elementleri Şekil 2.1.’de gösterilmiştir.

e/a oranını belirlemek için kullanılan değerlik elektron numarası Ni, Mn, Ga, Sn, Mo, Sb ve Co atomları için sırasıyla 10 ( $3d^8, 4s^2$ ), 7 ( $3d^5, 4s^2$ ), 3 ( $4s^2 4p^1$ ), 4 ( $5s^2 5p^2$ ), 6 ( $4d^5 5s^1$ ), 5 ( $5s^2 5p^3$ ) ve 9 ( $3d^7 4s^2$ ) olarak alınmıştır. Boyut etkisi açısından, atom yarıçapları Ni, Mn, Ga, Sn, Mo, Sb ve Co için sırasıyla 0.125 nm, 0.135 nm, 0.136 nm, 0.145 nm, 0.190 nm, 0.133 nm ve 0.126 nm’dir.



Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan % 99.98 saflıkta Ni, % 99.7 saflıkta Mn, %99.9 saflıkta Ga ve Mo elementleri.

Tablo 2.1. Çalışmada elde edilmesi planlanan alaşım miktarları ve e/a oranları.

|           |         |   | Ni    | Mn    | Sn    | Ga    | Sb   | Co   | Mo    | e/a  |
|-----------|---------|---|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|
| Alaşım 1  | Atomik  | % | 50,00 | 36,00 | 10,5  | 3,50  | -    | -    | -     | 8,15 |
|           | Kütlece | % | 46,00 | 31,00 | 19,2  | 3,80  | -    | -    | -     |      |
| Alaşım 2  | Atomik  | % | 50,00 | 36,00 | 12,5  | 1,5   | -    | -    | -     | 8,19 |
|           | Kütlece | % | 44,88 | 18,61 | 23,27 | 1,59  | -    | -    | -     |      |
| Alaşım 3  | Atomik  | % | 46,57 | 31,26 | -     | 6,63  | 14,5 | 1,07 | -     | 7,86 |
|           | Kütlece | % | 40,5  | 25,5  | -     | 6,95  | 26,1 | 0,95 | -     |      |
| Alaşım 4  | Atomik  | % | 55,5  | 25    | -     | 17,5  | -    | -    | 2     | 7,95 |
|           | Kütlece | % | 53,91 | 22,73 | -     | 20,19 | -    | -    | 3,175 |      |
| Alaşım 5  | Atomik  | % | 55,5  | 25    | -     | 18,5  | -    | -    | 1     | 7,92 |
|           | Kütlece | % | 54,11 | 22,82 | -     | 21,43 | -    | -    | 159   |      |
| Alaşım 6  | Atomik  | % | 55,5  | 25    | 18,5  | -     | -    | -    | 1     | 8,1  |
|           | Kütlece | % | 47,05 | 19,04 | 31,72 | -     | -    | -    | 1,39  |      |
| Alaşım 7  | Atomik  | % | 55,5  | 25    | -     | 19,5  | -    | -    | -     | 7,89 |
|           | Kütlece | % | 54,38 | 22,93 | -     | 22,70 | -    | -    | -     |      |
| Alaşım 8  | Atomik  | % | 55    | 25    | -     | 20    | -    | -    | -     | 7,85 |
|           | Kütlece | % | 53,84 | 22,91 | -     | 23,26 | -    | -    | -     |      |
| Alaşım 9  | Atomik  | % | 55    | 25    | -     | 19    | -    | -    | 1     | 7,88 |
|           | Kütlece | % | 53,60 | 22,81 | -     | 22,00 | -    | -    | 1,59  |      |
| Alaşım 10 | Atomik  | % | 55,5  | 20,5  | -     | 22    | -    | -    | 2     | 7,77 |
|           | Kütlece | % | 53,32 | 18,43 | -     | 25,11 | -    | -    | 3,14  |      |

Üretilen alaşımlar öncelikle 2, 24 ve 96 saat süreyle 950 °C’de ısıtılma fırınında bekletildikten sonra buzlu suda soğutulmuştur. Bu örneklerden DSC sonucu faz dönüşümü gözlenen numunelerin ısıtılma işlemi olmayanlarından tel erozyon yöntemiyle silindirik şeklinde örnekler alınarak 950, 1000 ve 1050 °C’de ekstrüzyon ile kesitleri daraltılmıştır. Tüm bu işlemler sonucu oluşan örnek grupları Tablo 2.2’de gösterildiği gibi isimlendirilmiştir.

Tablo 2.2. Alaşımlara uygulanan ısıtılma işlem ve ekstrüzyon verileri.

|                  | 950 °C’de Homojenizasyon Süresi (saat) |     |     |     | Ekstrüzyon Sıcaklıkları °C |      |      |
|------------------|----------------------------------------|-----|-----|-----|----------------------------|------|------|
|                  | 0                                      | 2   | 24  | 96  | 950                        | 1000 | 1050 |
| <b>Alaşım 1</b>  | 1A                                     | 1B  | -   | 1D  | -                          | -    | -    |
| <b>Alaşım 2</b>  | 2A                                     | 2B  | -   | 2D  | -                          | -    | -    |
| <b>Alaşım 3</b>  | 3A                                     | 3B  | -   | 3D  | -                          | -    | -    |
| <b>Alaşım 4</b>  | 4A                                     | 4B  | 4C  | 4D  | 4E1                        | 4E2  | 4E3  |
| <b>Alaşım 5</b>  | 5A                                     | 5B  | 5C  | 5D  | 5E1                        | 5E2  | 5E3  |
| <b>Alaşım 6</b>  | 6A                                     | 6B  | 6C  | 6D  | 6E1                        | 6E2  | 6E3  |
| <b>Alaşım 7</b>  | 7A                                     | 7B  | 7C  | 7D  | 7E1                        | 7E2  | 7E3  |
| <b>Alaşım 8</b>  | 8A                                     | 8B  | 8C  | 8D  | 8E1                        | 8E2  | 8E3  |
| <b>Alaşım 9</b>  | 9A                                     | 9B  | 9C  | 9D  | 9E1                        | 9E2  | 9E3  |
| <b>Alaşım 10</b> | 10A                                    | 10B | 10C | 10D | 10E1                       | 10E2 | 10E3 |

## 2.2. Üretim, Metalografi ve Karakterizasyon Yöntemleri

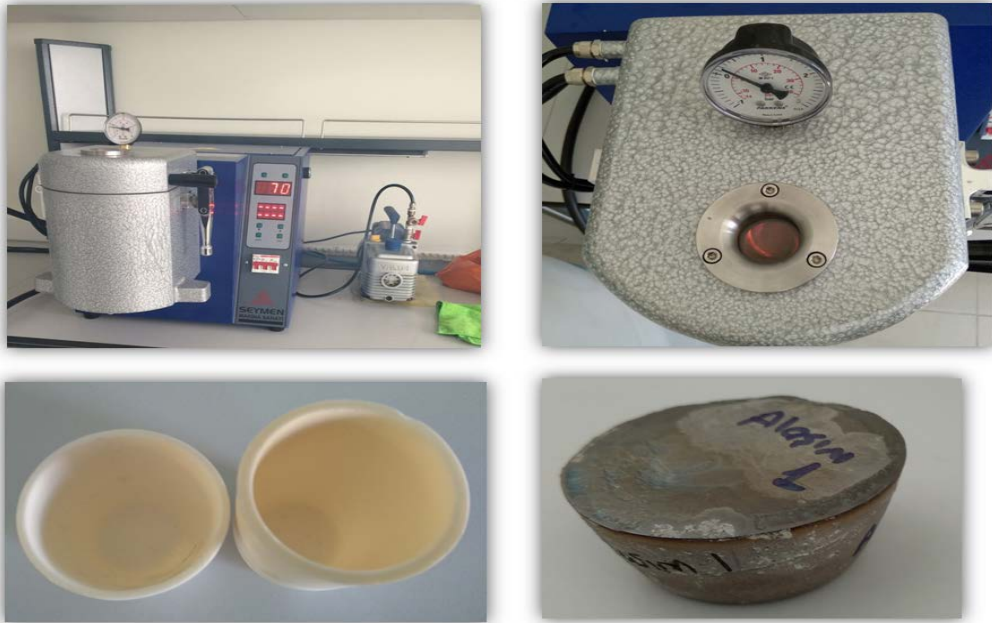
Örneklerin üretim ve karakterizasyon çalışmaları Şekil 2.2’de gösterilen sırayla gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Tablo 2.1’de gösterilen kompozisyonlardaki alaşımlar ergitilerek elde edilmiştir. Sonrasında bu alaşımlara yapılan ısıtılma işleminin etkileri gözlenmiştir. DSC analizi sonucunda dönüşüm gözlenen alaşımlara ekstrüzyon yapılarak örneklerden numuneler alınmıştır. Tablo 2.2’de gösterilen ve aşağıdaki sırayla karakterizasyon çalışması yapılan örnekler üzerinde ısıtılma işlem ve ekstrüzyon işleminin faz dönüşümü, mikroyapı ve mikrosertlik üzerine etkileri incelenmiştir.



Şekil 2.2. Deneysel çalışma aşamaları.

### 2.2.1 Vakumlu İndüksiyon Fırınında Ergitme

Alaşım lar Aksaray Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan İndüksiyonlu vakum ortamında ve Ar gazı destekli döküm düzeneği kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 2.3). Bunun için 250 ml hacme sahip %99 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren ve 1700 °C sıcaklığa dayanabilen alümina potalar kullanılmıştır. Homojen alaşımlar elde edilmesi için ergitme ve soğutma işlemi 3 kez tekrarlanmıştır.



Şekil 2.3. İndüksiyonlu vakum ortamında ve Ar gazı destekli döküm düzeneği ve elde edilen numune örneği.

### 2.2.2. Isıl İşlem

Tablo 2.1’de alaşım oranları gösterilen örneklerden numune alınarak Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendsiliği Bölüm Laboratuvarında bulunan CARBOLİTE CWF 1200 (Şekil 2.4) markalı ısıtım fırınında 950 °C’de 2, 24 ve 96 saat bekletildikten sonra buzlu suda soğutulmuşlardır. Sonrasında Tablo 2.2’de gösterilen A, B, C ve D örneklerinden 80-100 mg aralığından numuneler alınarak DSC analizi yapılmıştır.



Şekil 2.4. 1200 °C'ye kadar çıkabilen Isıl işlem fırını.

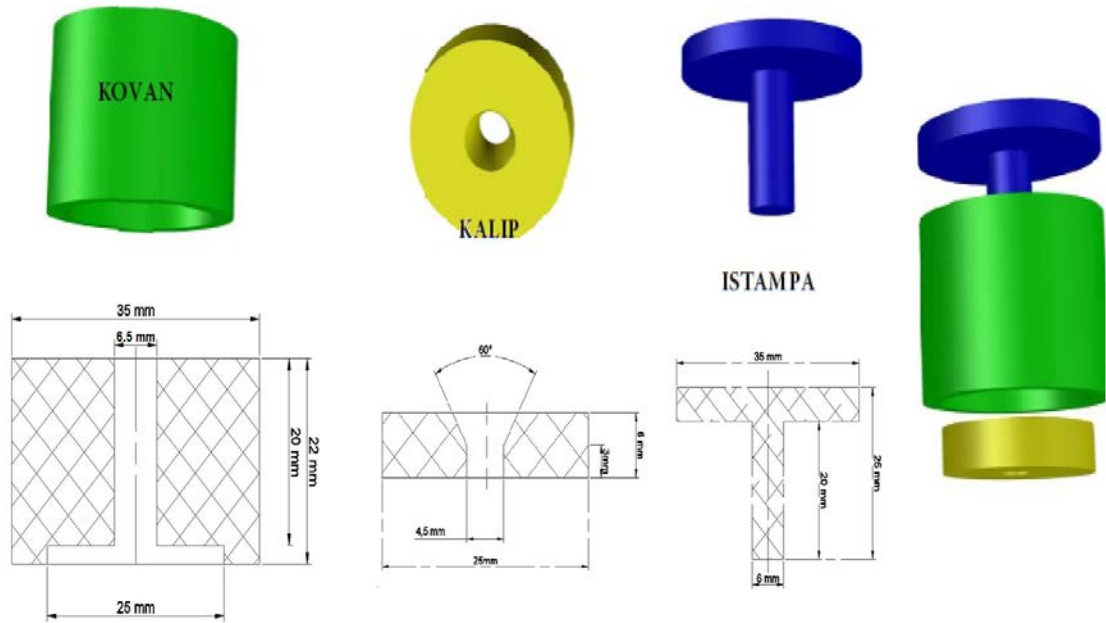
### 2.2.3. Ekstrüzyon İşlemi

NiMnGa Şekil hafıza özelliğine sahip alaşımların ekstrüzyonu konusunda pek bir çalışma bulunmayıp bu çalışmada sıcak ekstrüzyon ile numuneler elde edilmeye çalışılmıştır. Ekstrüzyon işlemlerinin yapılabilmesi için öncelikle üretimi başarılı olan örneklerden tel erozyon yöntemi ile 6 mm çapında silindirik numuneler elde edilmiştir (Şekil 2.5). Bu numunelerin kesitinin 950, 1000 ve 1050 °C sıcaklıklarda 6 mm'den 4,5mm'ye düşürülmesi hedeflenmiştir.



Şekil 2.5. Tel erozyon yöntemi ile elde edilen 6 mm çapında silindirik örnekler.

Uygulanan ekstrüzyon kuvvetinin minimum olması ve numunelerin daha kolay akması için kalıp giriş çapı iş parçasından yüksek bir değer seçilmiştir. Kalıp giriş açısı ise  $30^\circ$  olarak seçilmiştir. Numunelerin kesitleri 6 mm'den 4,5 mm'ye düşürüleceğinden ekstrüzyon oranı 1,77 olarak hesaplanmıştır. Buna göre ekstrüzyon kalıbı Şekil 2.6'daki şekilde tasarlanmıştır. Ekstrüzyon kalıbı için yüksek sıcaklıklarda dayanıklı, yüksek ısı iletkenliğe sahip, sıcak olarak cıvata ve somun imalatında kullanılan 1,2365 (32CrMoV12-28) sıcak iş takım çeliği Sağlam Metal A.Ş. firmasından yumuşatma tavlı olarak temin edilmiştir. Çelikler, tornalama işlemi ile istenen ölçülere getirilerek (Şekil 2.7)  $640^\circ\text{C}$ 'de 2 saat gerilim giderme tavlaması yapılmıştır. Sonrasında  $1040^\circ\text{C}$ 'de 40 dakika bekletilerek suda soğutma ile sertleştirme işlemi ve  $650^\circ\text{C}$ 'de 2 saat bekletilen kalıplar durgun havada soğutulularak menevişleme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak örnekler yağlayıcı kullanmadan ekstrüze edilmeye çalışılmıştır. Ancak başarılı olunamamıştır. Bu nedenle kalıp içerisine yağlayıcı görevi gören ergime derecesi  $850^\circ\text{C}$  olan  $<3$  mikron cam tozu (Şekil 2.8) ileve edilmiş ve sonra örnek ile beraber  $950$ ,  $1000$  ve  $1050^\circ\text{C}$ 'de fırında bekletilerek sonrasında ekstrüzyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6. Ekstrüzyon kalıbının şematik görünümü.



Şekil 2.7. Elde edilen ekstrüzyon kalıpları.



Şekil 2.8. Ekstrüzyon işleminde kullanılan yağlayıcılar.

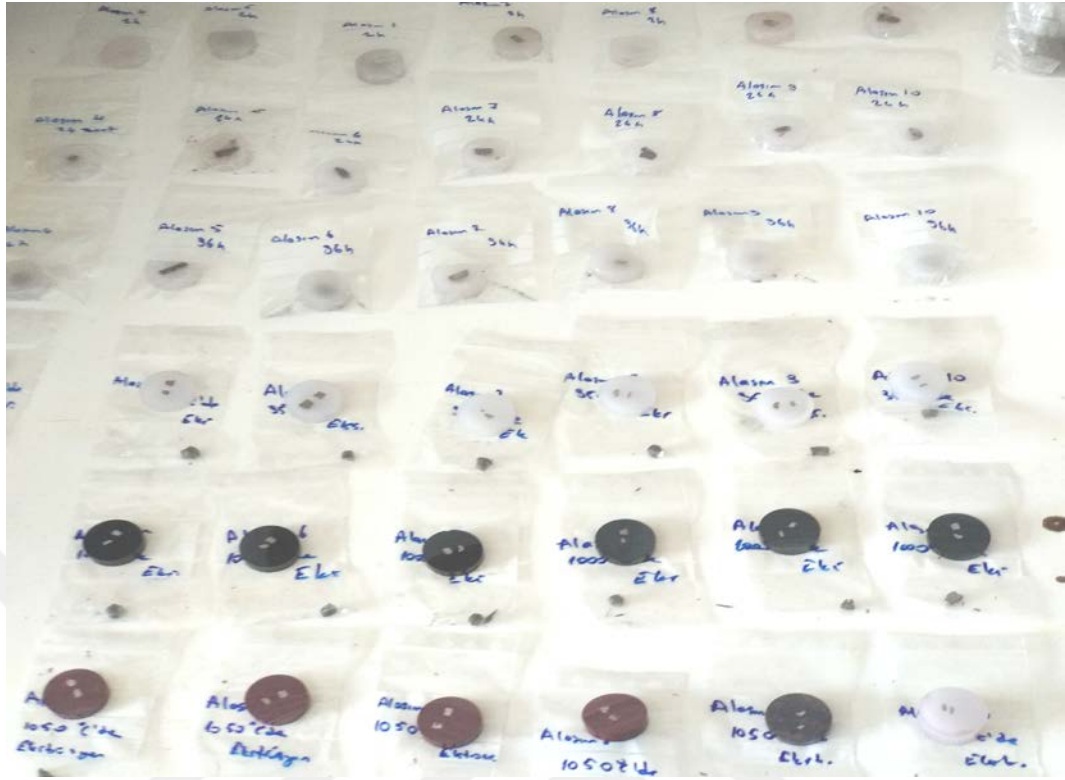
Ekstrüzyon işlemi sonrasında numuneleri kalıptan çıkarmak için grafit yağlayıcı spreys (Şekil 2.8) kullanılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler 4,5 mm çapında ve ortalama 15 mm boyutlarında Tablo 2.2’de numuneler elde edilmiştir (Şekil 2.9). Elde edilen tüm alaşımlardan 80-100 mg numuneler alınarak DSC analizine gönderilmiştir. Ayrıca örneklerden tekrar numuneler alınarak metalografik incelemelere geçilmiştir.



Şekil 2.9. Ekstrüzyon işlemi sonrası elde edilen örnekler.

#### 2.2.4. Metalografik Numune Hazırlama

Isıl işlem ve ekstrüzyon sonrası elde edilen örneklerden Optik mikroskop, SEM-EDX, XRD, mikrosertlik analizleri için hassas kesme cihazı (Metkon (Metacut 250 abrasive cutter)) ile numune alınarak Şekil 2.10'da gösterildiği şekilde bakalite alma cihazı (Metkon (Ecopress50 Mounting Press)) yardımıyla kalıplanmıştır. Bu işlemler Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan cihazlar (Şekil 2.11) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.10. Kesiti alınan ve kalıplanarak hazırlanan numuneler.



Hassas Kesme



Kalıplama



Zımpara ve parlatma

Şekil 2.11. Metalografik numune hazırlamada kullanılan cihazlar.

Kalıplanan numuneler öncelikle 120, 400, 800 ve 1200 mesh numaralı zımparalarla zımparalanmış ve yüzeyi 3 mikronluk elmas aşındırıcı ile çuhada parlatma işlemi yapılmıştır. Dağlama işlemi her bir numune için %3 lük nital çözeltisi içerisinde 5 gram  $\text{FeCl}_3$  eklenerek hazırlanan dağlayıcı ile 90 saniye süreyle dağlanmıştır.

### 2.2.5. XRD (X-Işını Difraksiyonu) Analizi

Yüzeyi düzgün olarak hazırlanan ve Tablo 2.2’de gösterilen örneklerin XRD ölçümleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (TAUM) bulunan Bruker Axs D8 Advance markalı XRD (X-Işını Difraksiyonu) cihazında gerçekleştirilmiştir. Difraktometrede süzölmüş 1,54060 Å dalga boylu Cu-K $\alpha$  ışıını kullanıldı. Alınan tüm difraktogramlar esnasında difraktometrenin 2 $\theta$  açısı için 5 ve 90° aralığında tarama hızı 2°/dakika olarak seçildi.

### 2.2.6. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Analizi

Alaşımların faz dönüşüm sıcaklıkları Ulusal Bor Araştırma Enstitüsünde (BOREN) bulunan Netzsch ( STA 443 F3 Jupiter) markalı diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı ile 20 ° C / dk ısıtma ve soğutma hızlarında belirlendi.

### 2.2.7. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), EDX (Enerji Yayılımlı X-Işını Analizi) ve MAPPING Analizi

Yüzeyleri parlatılan ve dağlanan alaşımların morfolojik yapıları ile noktasal ve bölgesel elementel içerikleri Erciyes Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde (ERNAM) bulunan ZEISS (LS-10 Life Science Scanning Electron Microscopy) markalı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz cihazı kullanılarak incelenmiştir. EDX (Enerji Yayılımlı X-Işını Analizi) ve MAPPING analizleri ise Bruker Xflash 6l10 markalı sisteme entegre edilmiş dedektör ile gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.8. Optik Mikroskop İncelemesi

Örneklerin mikroyapısal incelemeleri Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Müendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan bilgisayar destekli Nikon (MA 100) markalı mikroskop ve Clemex (image analysis system) görüntü analiz sistemi yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Nikon (MA 100) markalı mikroskop ve görüntü analiz sistemi.

### 2.2.9. Mikrosertlik Analizi

Vickers mikrosertlik ölçümleri Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Future-Tech (FM 700) markalı mikrosertlik ölçüm cihazı ile elde edilmiştir (Şekil 2.13). Testler 100 gf (0,98N) yük ile 10 s süreyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.13. Future-Tech (FM 700) markalı mikrosertlik ölçüm cihazı.

### 3. BÖLÜM

#### BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada ısıtma işlemi ve sıcak ekstrüzyonun NiMnGa alaşımlarının faz dönüşümleri, dönüşüm sıcaklıkları ve mikrosertlik değişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Her bir alaşım ayrı başlıklar altında incelenmiş olup elde edilen bulgular öncelikle ısıtma işlemli ve hemen ardından ekstrüzyon yapılmış örneklerin verileri olacak şekilde sıralanmıştır. Alaşımların sırasıyla XRD, DSC, SEM, EDX, MAPPING, Optik Mikroskop ve Mikrosertlik analizleri ile elde edilen sonuçları verilmiştir.

Bu çalışmada, incelenen on farklı NiMn alaşımının  $\gamma$ , B2 ve L2<sub>1</sub> kübik yüksek sıcaklık fazlarının kafes parametreleri, aşağıdaki denklem 3.1 yardımıyla hesaplandı.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + l^2 + k^2)}{a^2} \quad (3.1)$$

Burada a kübik kafes sabiti ve d atomik düzlemler arasındaki mesafeyi temsil eder. NM ve 5M tetragonal fazların kafes parametreleri denklem 3.2 kullanılarak hesaplandı.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.2)$$

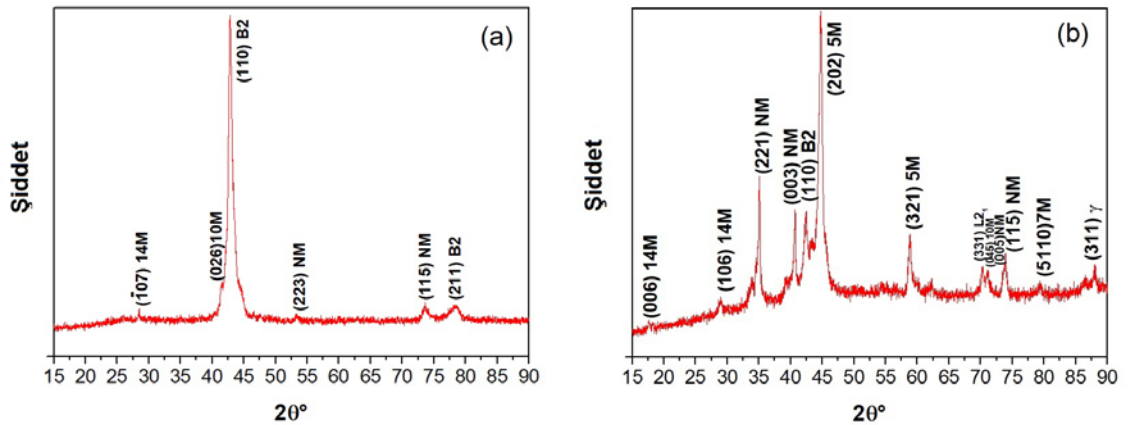
Burada a ve c tetragonal yapıya ait kafes sabitlerini temsil eder. Tüm alaşımlar incelendiğinde 7M, 10M ve 14M faz yapılarının kafes parametrelerinin hesaplanabilmesi için elde edilen pikler yeterli olmamıştır.

#### 3.1. Alaşım 1 (Ni<sub>50</sub>Mn<sub>36</sub>Sn<sub>10,5</sub>Ga<sub>3,5</sub>) Örneğinden Elde Edilen Bulgular

Alaşım 1 numunesinin işlem görmemiş (1A) ve 950 °C'de 2 saat homojenizasyon işleminden sonra buzlu suda soğutulan (1B) örneklerinin X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş şekilde Şekil 3.1'de gösterilmiştir. 1A örneğinin bu X-ışını kırınım grafiğinden B2, NM, 10M ve 14M fazları gözlenmiştir. Kübik B2 fazının kafes

parametresi (110) düzlemine ait yansıma kullanılarak 2,984 Å olarak hesaplandı. Tetragonal yapıdaki NM fazın kafes parametrelerinin (223) ve (115) düzlemlerine ait yansımalar kullanılarak  $a=7,683$  Å ve  $c=6,614$  Å olduğu belirlenmiştir. Ortorombik 10M ve monoklinik 14M fazlarının kafes parametreleri yeterli yansıma olmadığından hesaplanamamıştır.

1B numunesinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ , B2,  $L2_1$ , NM, 5M, 7M ve 14M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir. Kübik  $\gamma$  fazının kafes parametresi (311) yansıması kullanılarak 3,677 Å; kübik B2 fazının kafes parametresi (110) yansıması kullanılarak 3,010 Å ve kübik  $L2_1$  fazının kafes parametresi (331) yansıması kullanılarak 5,832 Å olarak hesaplandı. Tetragonal yapıdaki NM fazın kafes parametreleri (221) ve (003) yansımaları kullanılarak  $a=7,835$  Å ve  $c = 6,645$  Å olarak bulundu. Tetragonal yapıdaki 5M fazın kafes parametreleri (202) ve (321) yansımaları kullanılarak  $a=5,891$  Å ve  $c=5,567$  Å olarak bulundu. Tablo 3.1’de Alaşım 1 örneği için hesaplanan kafes parametreleri, Tablo 3.2’de meydana gelen bazı fazların tane boyutları özetlenmiştir. 2 saat süreyle ısıtılma işlemi uygulanmış olan örnekte (110) düzlemindeki B2 fazının tane boyutunun azaldığı ve (115) düzlemindeki NM fazının tane boyutunun ise arttığı gözlenmiştir.



Şekil 3.1. 1A (a) ve 1B (b) örneklerinin XRD sonuçları.

Tablo 3.1. Alaşım 1 örneği için hesaplanan kafes parametreleri.

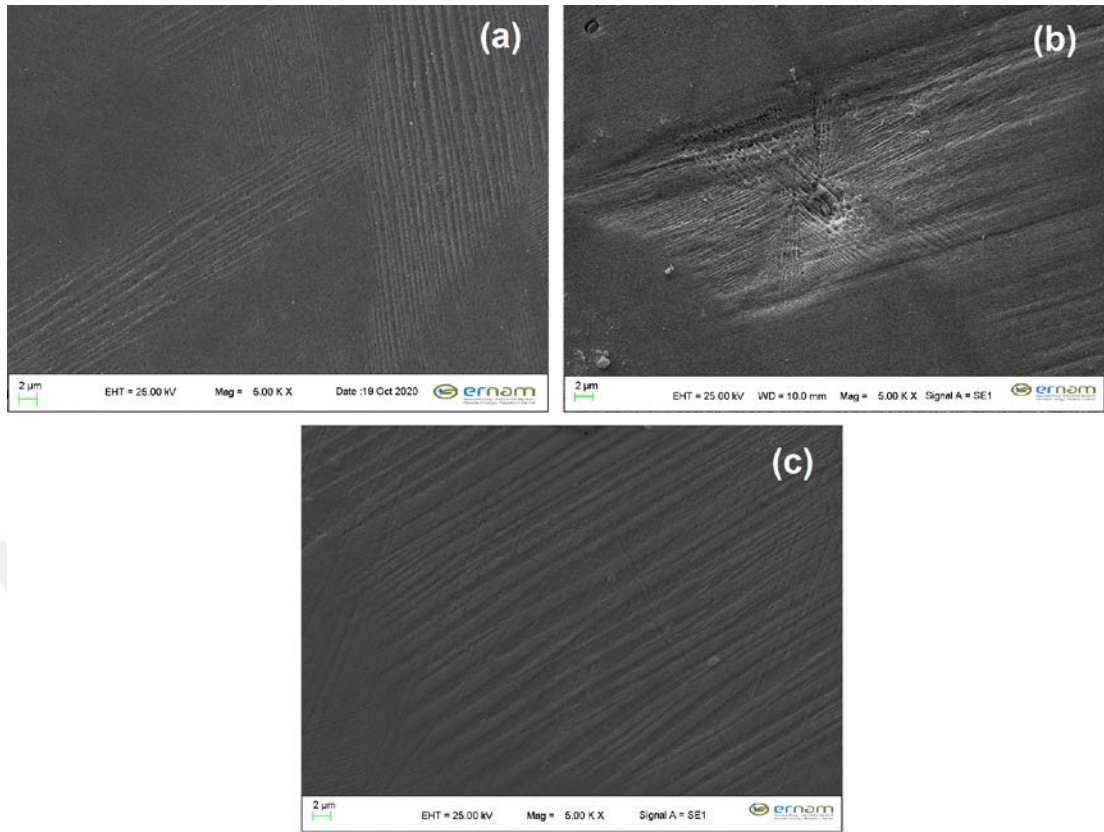
| Örnek | $\gamma$                | B2       | L2 <sub>1</sub> | NM                    |                       | 5M                    |                       |
|-------|-------------------------|----------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|       | Kafes Parametreleri (Å) |          |                 |                       |                       |                       |                       |
|       | <i>a</i>                | <i>a</i> | <i>a</i>        | <i>a<sub>NM</sub></i> | <i>c<sub>NM</sub></i> | <i>a<sub>5M</sub></i> | <i>c<sub>5M</sub></i> |
| 1A    | -                       | 2,984    | -               | 7,683                 | 6,614                 | -                     | -                     |
| 1B    | 3,677                   | 3,010    | 5,832           | 7,835                 | 6,645                 | 5,891                 | 5,567                 |

Tablo 3.2. Alaşım 1 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.

| Örnek | Tane Boyutu (nm) |         |
|-------|------------------|---------|
|       | (110)B2          | (115)NM |
| 1A    | 50,8             | 12,9    |
| 1B    | 10,7             | 20,7    |

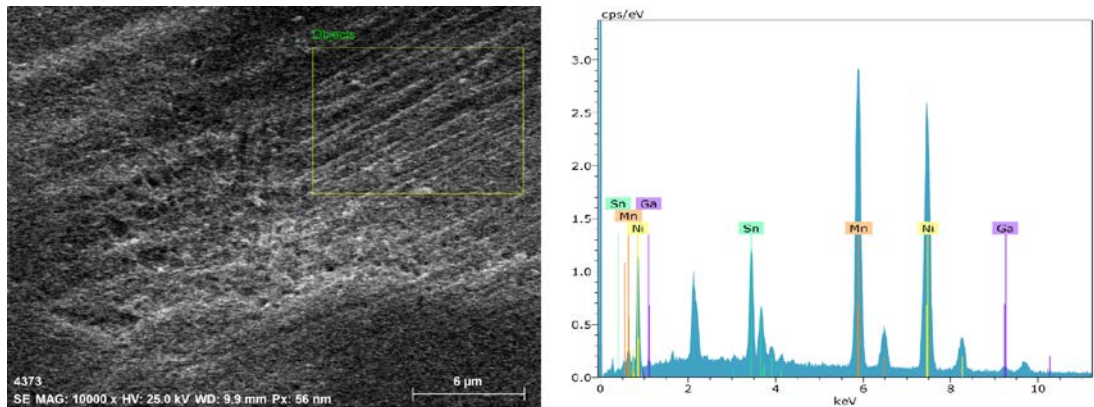
Alaşım 1'den Tablo 2.2'deki işlemler yapılarak elde edilen tüm örnekler DSC analizi yapılmış ancak ısıtma ve soğutma sırasında herhangi bir dönüşüme rastlanmamıştır. Bunun yanında bu örneklerin kırılkan olması ve yapı içerisinde çatlaklar olması sebebiyle silindir numune alınamadığından ekstrüzyon işlemi yapılamamıştır.

Şekil 3.2'de Tablo 2.2'de verilmiş olan ısıtma işlemi gerçekleştirilmiş ve buzlu suda soğutularak elde edilen 1A, 1B ve 1C örneklerinin SEM görüntüleri gösterilmiştir. 1A ve 1B örneklerinde östenit fazı yanısıra düzensiz şekilde dağılmış martenzit plakaları görülmektedir. 1C örneğinde birbiriyle uyumlu (self accommodated) martenzit oluşumlarının var olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2. 1A (a), 1B (b) ve 1C (c) örneklerinin SEM görüntüleri.

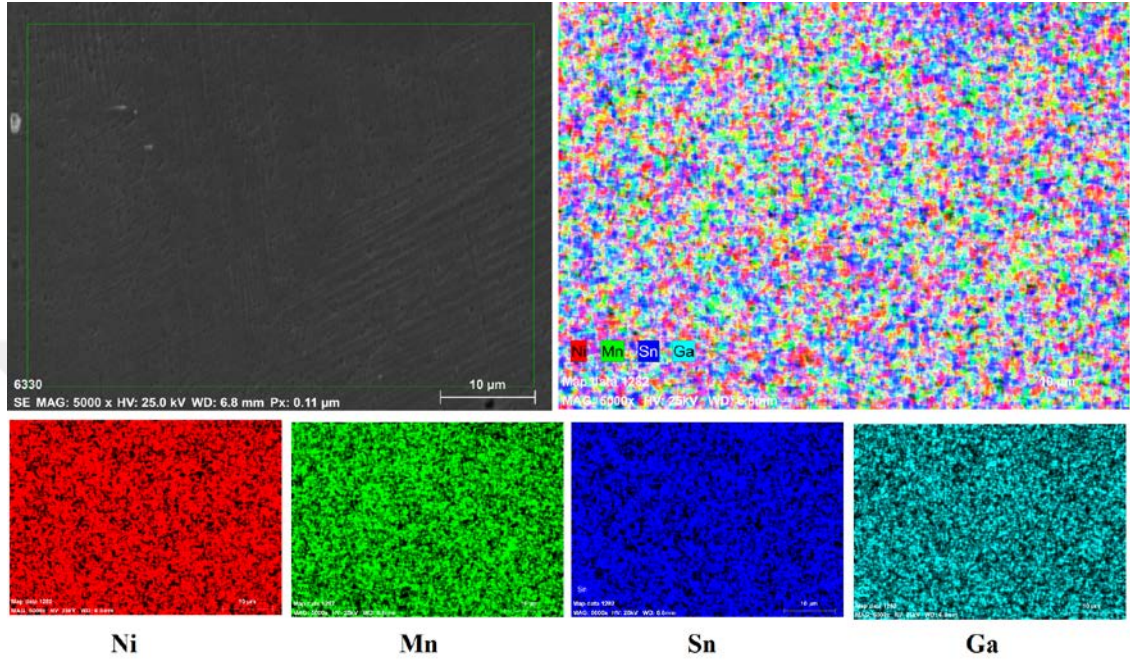
Şekil 3.3'te gösterin Alaşım 1'den alınmış olan EDX analizi sonucu faz içerisindeki kimyasal içerik incelendiğinde Ni bakımından zengin ve düşük Ga içeriğine sahip olduğu görülmektedir.



| Element | Ağırlıkça % | Atomik % |
|---------|-------------|----------|
| Ni      | 51,06       | 52,84    |
| Mn      | 34,04       | 37,63    |
| Sn      | 9,62        | 4,92     |
| Ga      | 5,28        | 4,60     |

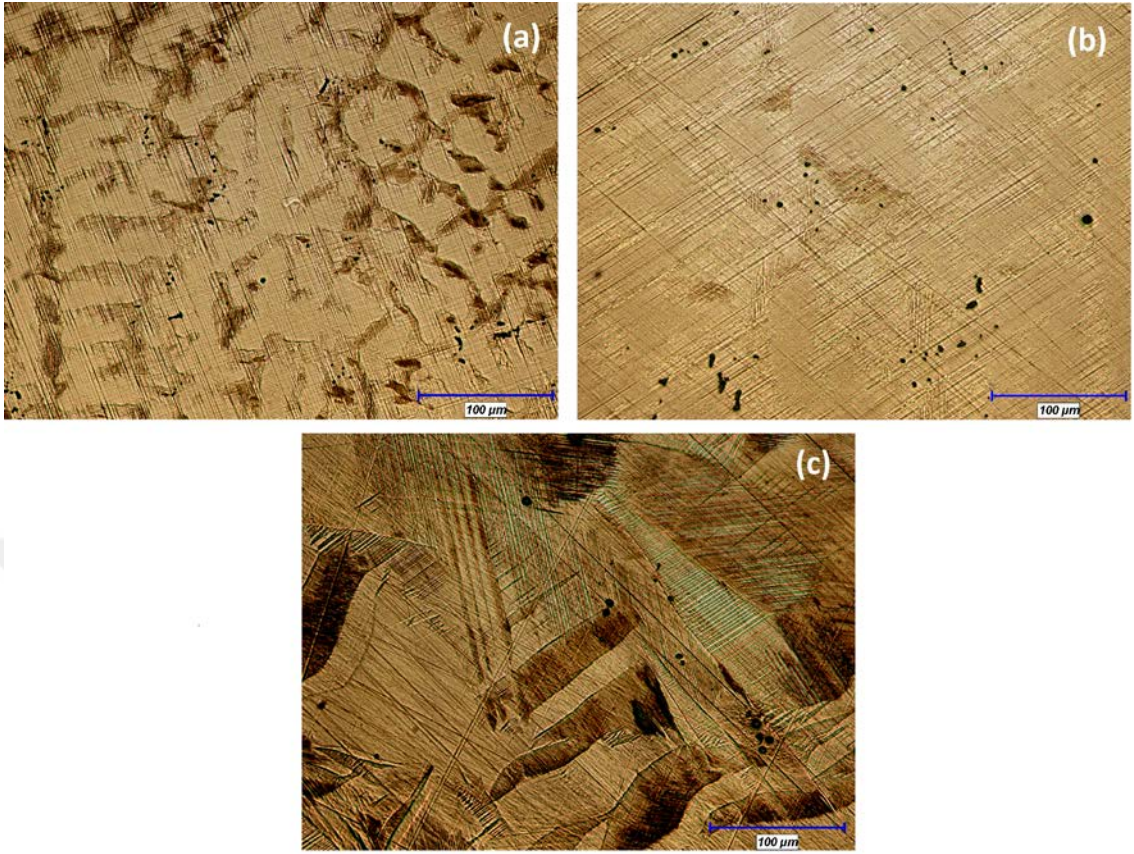
Şekil 3.3. Alaşım 1 numunesiden elde edilen EDX analizi görüntüleri.

Şekil 3.4'te Alaşım 1 örneğinden elde edilen MAPPING fotoğrafları görülmektedir. Buradan martenzit ve östenit yapı içerisinde oluşan elementel dağılımın homojen olduğu anlaşılmaktadır.



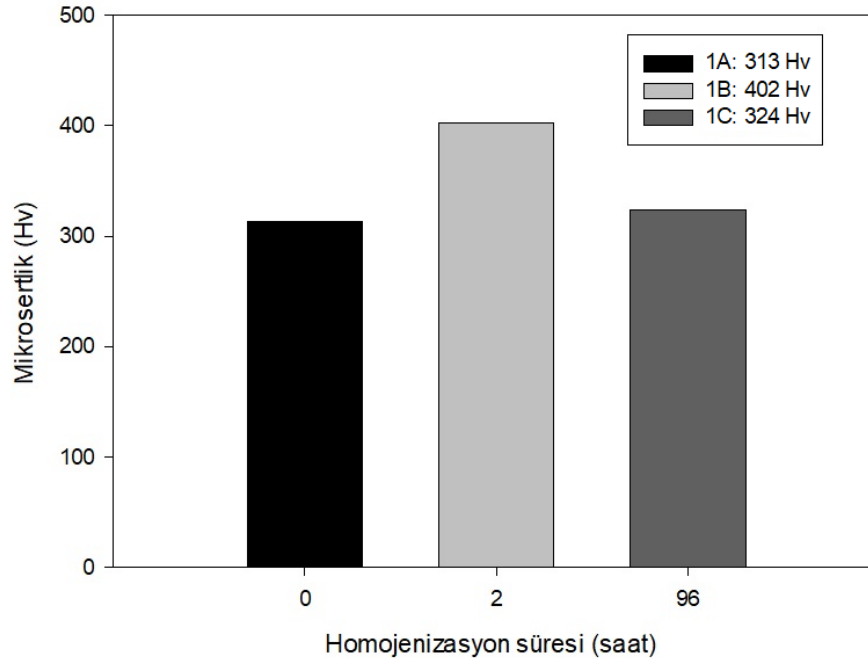
Şekil 3.4. Alaşım 1 numunesi için elde edilen MAPPING analizi fotoğrafları.

1A, 1B ve 1C örneklerinin optik mikroskop görüntüleri (Şekil 3.5) incelendiğinde 1A ve 1B örneklerinde östenit fazı yanında düzensiz ve nispeten zayıf bir martenzit dağılımı gözlenmektedir. 1C örneğinde ise martenzit yapının belirginleştiği ve farklı morfolojilerinin meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 3.5. 1A (a), 1B (b) ve 1C (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.

Bu alaşımların hojenizasyon süresine bağlı olarak mikrosertlik değişimi grafiği Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Homojenizasyon süresine bağlı olarak 1B numunesindeki mikrosertlik değeri başlangıçta artsada 96 saat süreyle homojenizasyon yapılmış olan 1C örneğinde bu değer azalmıştır. Ancak en düşük mikrosertlik değeri 1A örneğinde gözlenmiştir.



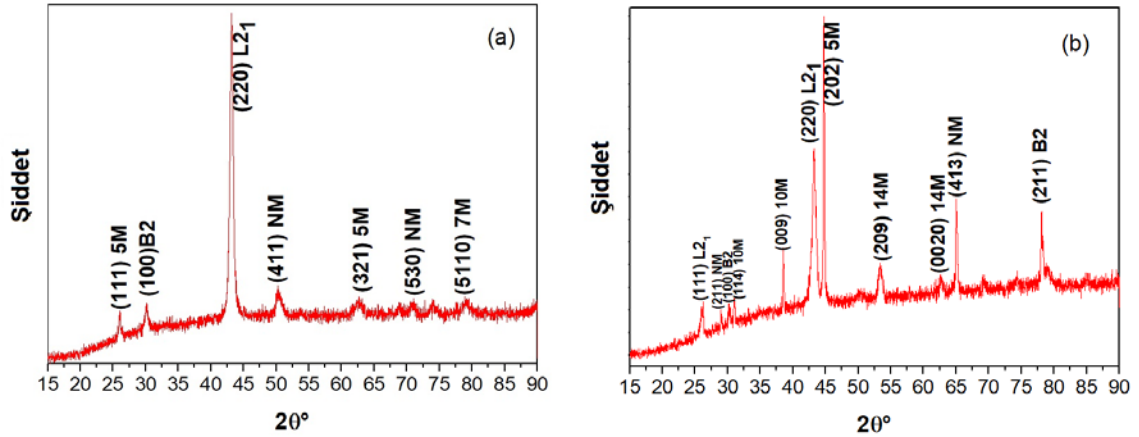
Şekil 3.6. 1A, 1B ve 1C örneklerinin mikrosertlik değerleri.

### 3.2. Alaşım 2 ( $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{36}\text{Sn}_{12,5}\text{Ga}_{1,5}$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular

Alaşım 2 numunesinin işlem görmemiş (2A) ve 950 °C’de 2 saat homojenizasyon işleminden sonra buzlu suda soğutulan (2B) örneklerin X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş şekilde Şekil 3.7’de gösterilmiştir. 2A örneğinin bu X-ışını kırınım grafiğinden B2, L2<sub>1</sub>, NM, 5M ve 7M fazlara sahip olduğu belirlenmiştir. B2 fazının kafes parametresi (100) düzlemine ait yansıma kullanılarak 2,964 Å olarak hesaplandı. L2<sub>1</sub> fazının kafes parametresi (220) düzlemine ait yansıma kullanılarak 5,922 Å olarak hesaplandı. NM fazın kafes parametrelerinin (411) ve (530) düzlemlerine ait yansımalar kullanılarak  $a=7,742$  Å ve  $c=6,819$  Å olduğu belirlenmiştir. 5M ve 7M fazlarının kafes parametreleri yeterli yansıma olmadığından hesaplanamamıştır.

2B numunesinin X-ışını difraktogramından B2, L2<sub>1</sub>, NM, 5M, 10M ve 14M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir. B2 fazının kafes parametresi (100) düzlemine ait yansıma kullanılarak 2,950 Å ve L2<sub>1</sub> fazının kafes parametresi (220) düzlemine ait yansıma kullanılarak 5,912 Å olarak hesaplandı. NM fazın kafes parametreleri (211) ve (413) düzlemlerine ait yansımalar kullanılarak  $a=7,760$  Å ve  $c=6,632$  Å olarak bulundu. 5M, 10M ve 14M fazlarının kafes parametreleri yeterli yansıma tespit edilemediğinden hesaplanamamıştır. Tablo 3.3’de Alaşım 2 örnekleri için hesaplanan kafes parametreleri

ve Tablo 3.4’de meydana gelen bazı fazların tane boyutları listelenmiştir. Isıl işlem ile beraber (100) düzlemindeki B2 ve (220) düzlemindeki L2<sub>1</sub> fazının tane boyutunun azaldığı anlaşılmıştır.



Şekil 3. 7. 2A (a) ve 2B (b) örneklerinin XRD sonuçları.

Tablo 3.3. Alaşım 2 örneği için hesaplanan kafes parametreleri.

| Örnek | B2                      | L2 <sub>1</sub> | NM                    |                       |
|-------|-------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|
|       | Kafes Parametreleri (Å) |                 |                       |                       |
|       | <i>a</i>                | <i>a</i>        | <i>a<sub>NM</sub></i> | <i>c<sub>NM</sub></i> |
| 2A    | 2,964                   | 5,922           | 7,760                 | 6,632                 |
| 2B    | 2,950                   | 5,912           | 7,588                 | 6,850                 |

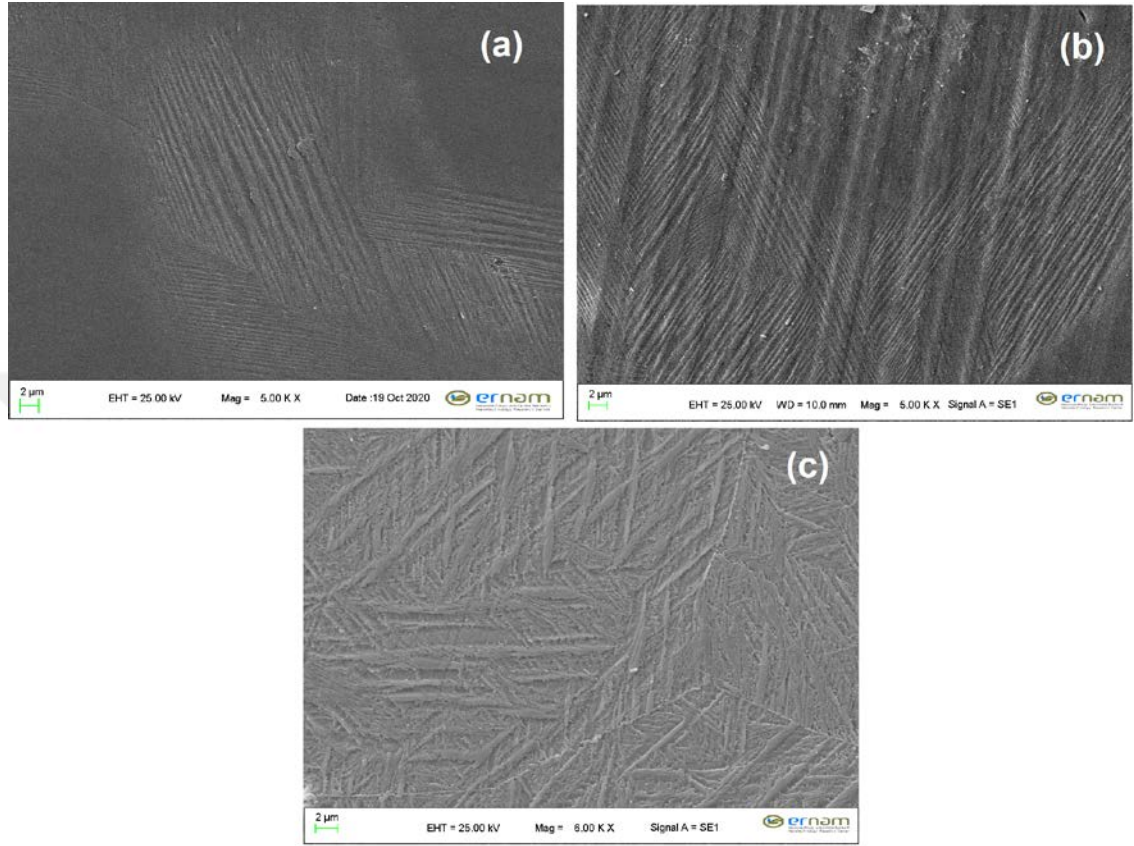
Tablo 3. 4. Alaşım 2 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.

| Örnek | Tane Boyutu (nm) |                       |
|-------|------------------|-----------------------|
|       | (100)B2          | (220) L2 <sub>1</sub> |
| 2A    | 21,4             | 44,5                  |
| 2B    | 17,1             | 17,8                  |

Alaşım 2’den Tablo 2.2’deki işlemler yapılarak elde edilen tüm örneklerle DSC analizi yapılmış, ancak ısıtma ve soğutma sırasında herhangi bir dönüşüme rastlanmamıştır. Bunun yanında bu örneklerin kırılgan olması ve yapı içerisinde çatlaklar olması sebebiyle silindirik numune alınamadığından ekstrüzyon işlemi yapılamamıştır.

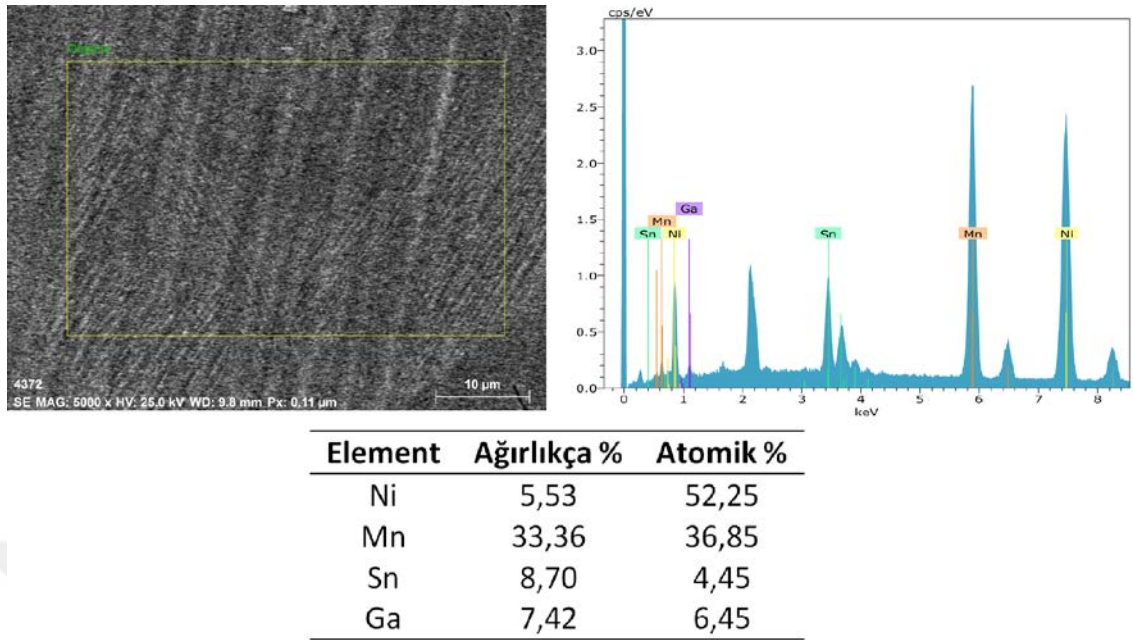
Şekil 3.8’de Tablo 2.2’deki işlemler yapılarak elde edilen 2A, 2B ve 2C örneklerinin SEM görüntüleri gösterilmiştir. 2A ve 2B örneklerinde östenit fazı yanısıra martenzit plakaları görülmektedir. 2C örneğinde ise iğnemi martenzit yapılarının meydana

geldiği ve faz yapısındaki martenzit yoğunluğunun ısıtılma işlem süresi ile arttığı görülmektedir.

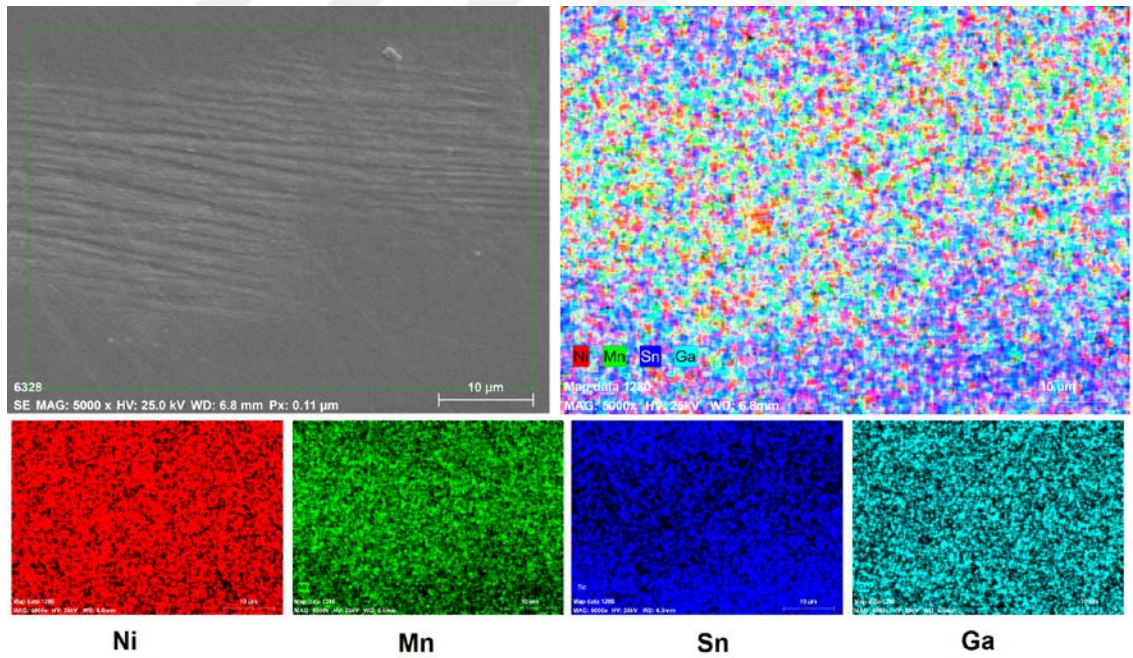


Şekil 3.8. 2A (a), 2B (b) ve 2C (c) örneklerinin SEM görüntüleri.

Şekil 3.9’da gösterilen Alaşım 2’den alınmış olan EDX analizi sonucu faz içerisindeki kimyasal içerik incelendiğinde Ni bakımından zengin ve Ga açısından ise fakir bir içeriğe sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.10’da Alaşım 2 örneğinden elde edilen MAPPING fotoğrafları incelendiğinde Ni, Mn ve Ga elementlerinin tüm yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilerken Sn elementinin ise martenzit faz içerisinde diğer elementlere kıyasla daha az olduğu görülmektedir.

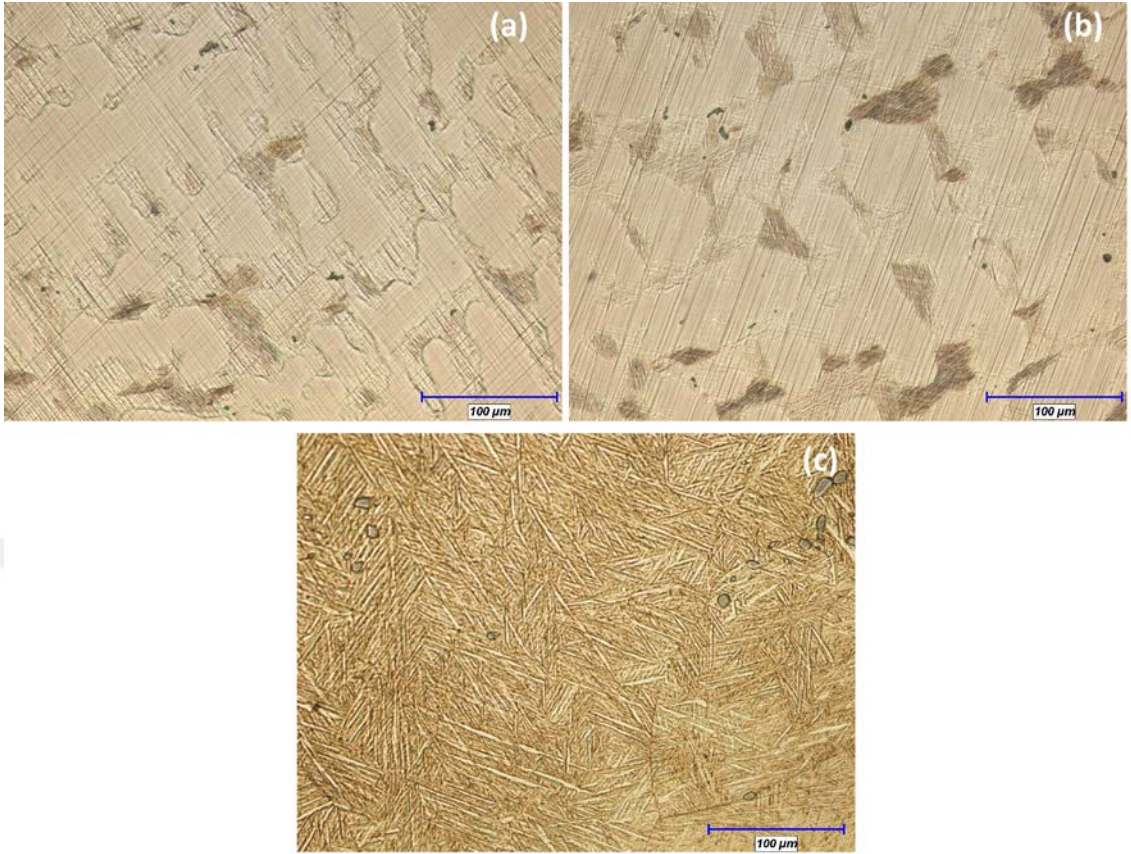


Şekil 3.9 Alaşım 2 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri.



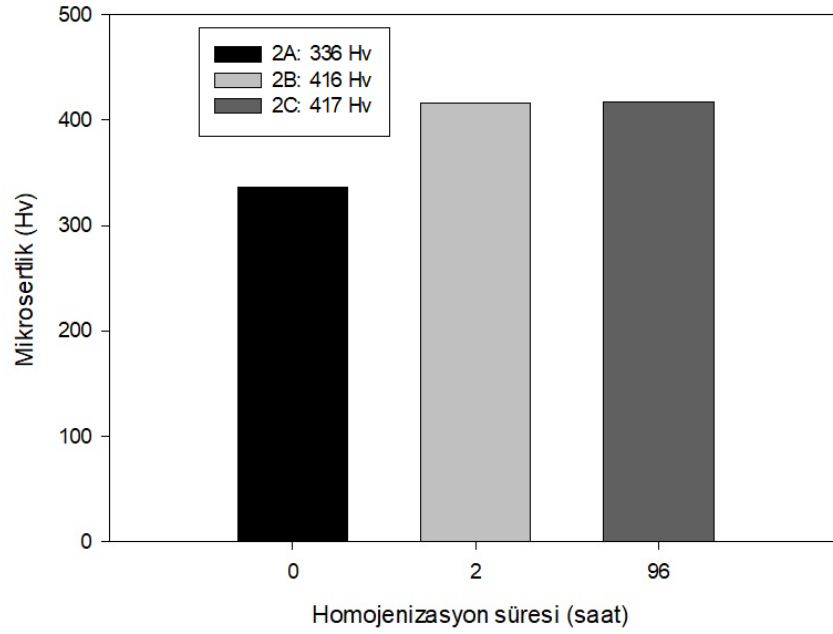
Şekil 3.10. Alaşım 2 numunesi için döküm sonrası elde edilen MAPPING analizi fotoğrafları.

2A, 2B ve 2C örneklerinin optik mikroskop görüntüleri (Şekil 3.11) incelendiğinde 2A ve 2B örneklerinde östenit fazı yanında düzensiz ve nispeten zayıf bir martenzit dağılımı gözlenmektedir. 2C örneğinde ise martenzit yapının belirginleştiği ve iğnemsî martenzit yapıların meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 3.11. 2A (a), 2B (b) ve 2C (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.

Bu alaşımların homojenizasyon süresine bağlı olarak mikrosertlik değişimi grafiği Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Homojenizasyon süresine bağlı olarak 2B numunesindeki mikrosertlik değeri başlangıçta artsada 96 saat süreyle homojenizasyon yapılmış olan 2C numunesinde bu değer azalmıştır. Hiçbir işlem yapılmamış olan 2A numunesi en düşük sertliğe sahip örnektir.

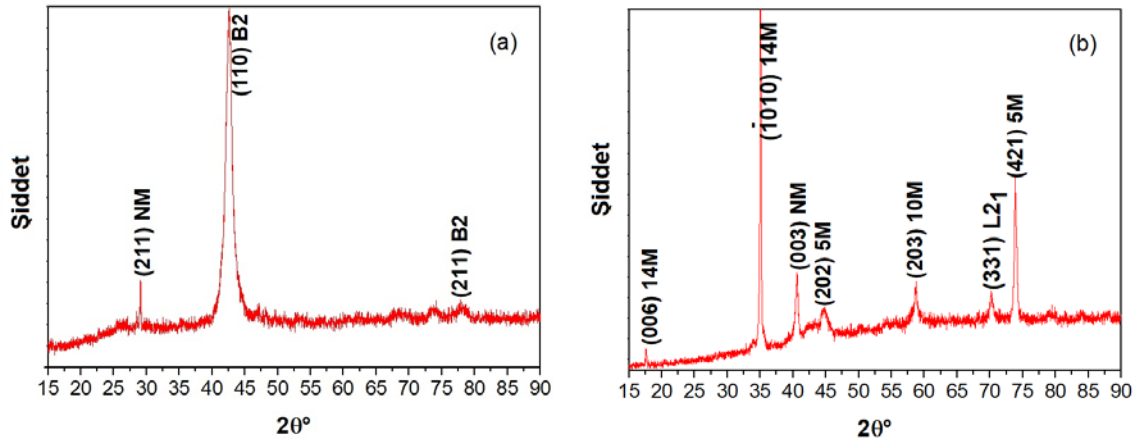


Şekil 3.12. 2A, 2B ve 2C örneklerinin mikrosertlik değerleri.

### 3.3. Alaşım 3 ( $\text{Ni}_{46,57}\text{Mn}_{31,26}\text{Ga}_{6,63}\text{Sb}_{14,5}\text{Co}_{1,07}$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular

Alaşım 3 numunesinin işlem görmemiş (3A) ve 950 °C’de 2 saat homojenizasyon işleminden sonra buzlu suda soğutulan (3B) örneklerin X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş haliyle Şekil 3.13’te gösterilmiştir. 3A örneğinin bu X-ışını kırınım grafiğinden B2 ve NM fazlara sahip olduğu belirlenmiştir. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 2,999 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.

3B numunesinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM, 5M ve 14M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (331) yansıma düzlemi kullanılarak 5,837 Å olarak hesaplandı. 5M fazının kafes parametreleri (202) ve (421) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,889\text{Å}$  ve  $c=5,599\text{Å}$  olarak bulundu. NM ve 14M fazlarının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır. Tablo 3.5’de Alaşım 3 örnekleri için hesaplanan kafes parametreleri listelenmiştir.

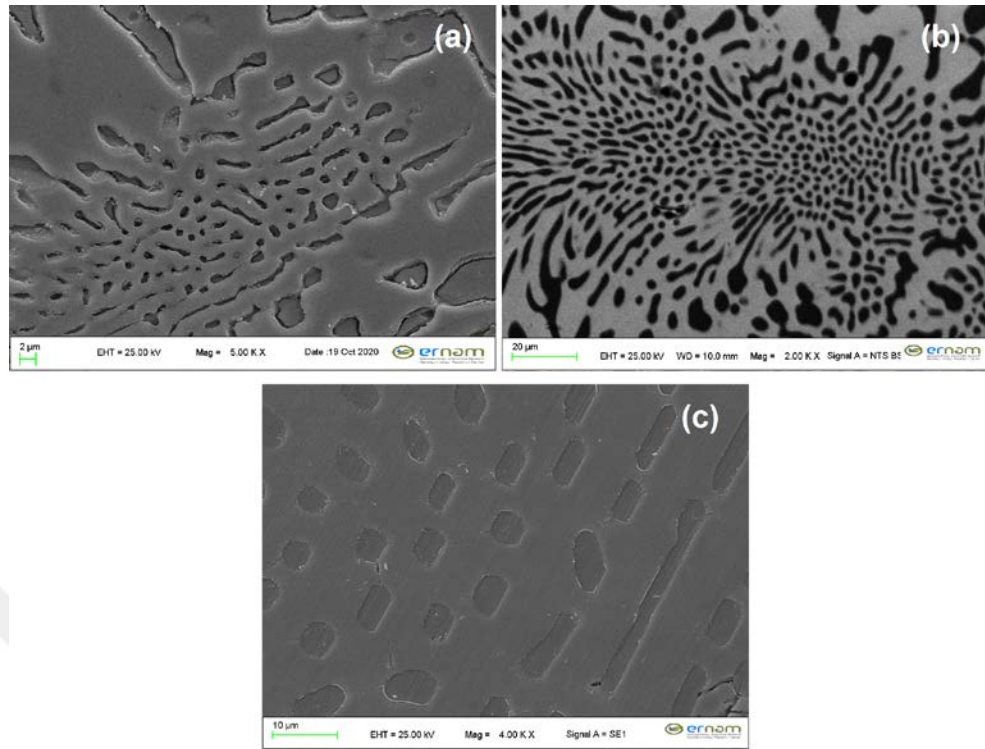


Şekil 3.13. 3A (a) ve 3B (b) örneklerinin XRD sonuçları.

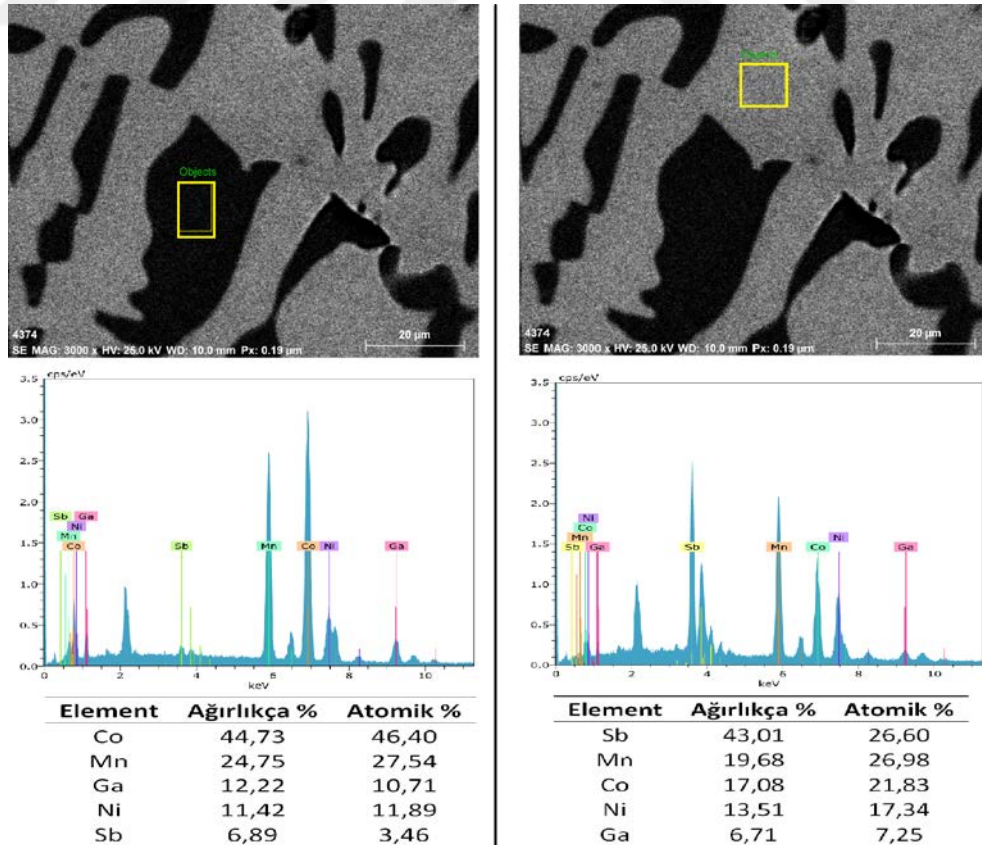
Tablo 3.5. Alaşım 3 örneği için hesaplanan kafes parametreleri.

| Örnek | B2                      | L2 <sub>1</sub> | 5M                     |                        |
|-------|-------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|
|       | Kafes Parametreleri (Å) |                 |                        |                        |
|       | <i>a</i>                | <i>a</i>        | <i>a</i> <sub>5M</sub> | <i>c</i> <sub>5M</sub> |
| 3A    | 2,999                   | -               | -                      | -                      |
| 3B    | -                       | 5,837           | 5,889                  | 5,599                  |

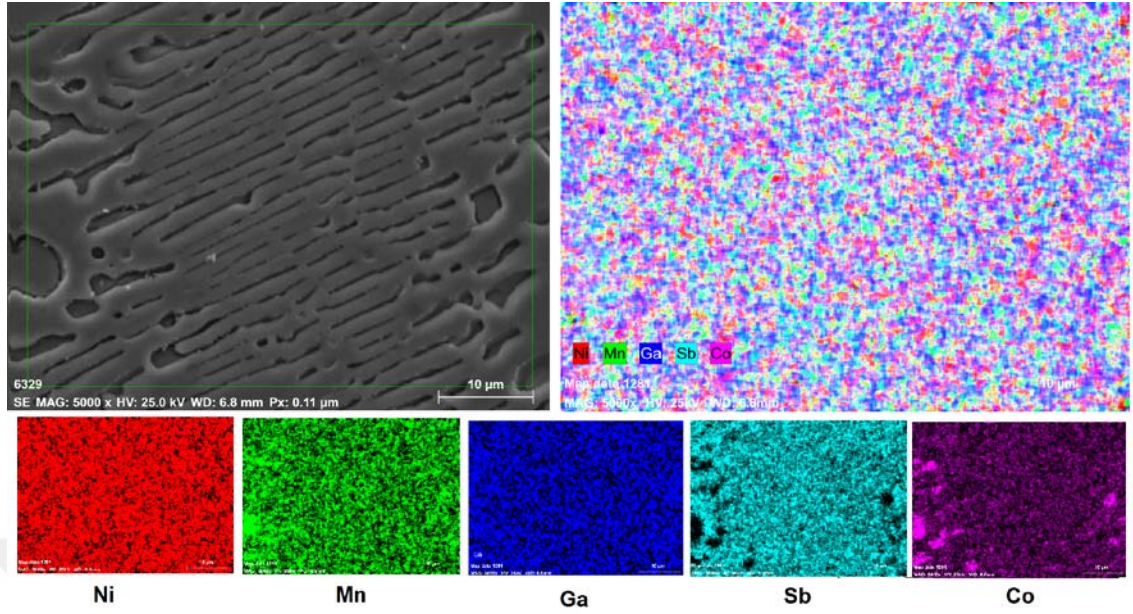
Şekil 3.14'te 3A, 3B ve 3C örneklerine ait SEM fotoğrafları görülmektedir. Her üç örnekte ana faz üzerinde dentritik katılaşma ile oluşan ikincil fazların meydana geldiği görülmektedir. Şekil 3.15'te verilen EDX analizinde bu iki fazdan alınan kimyasal analiz incelendiğinde ana fazın Sb elementi bakımından zengin, dentritik fazın ise Co elementince zengin bir faz yapısında olduğu görülmektedir. Şekil 3.16'daki MAPPING analizi fotoğrafları da bu durumu desteklemektedir. Ni, Mn ve Ga elementleri yapı içerisine nispeten homojen dağılmıştır. Şekil 3.17'de verilen optik mikroskop fotoğrafları incelendiğinde Sb elementi bakımından zengin olan ana fazda mikro ve makro düzeyde çatlakların oluştuğu görülmüştür.



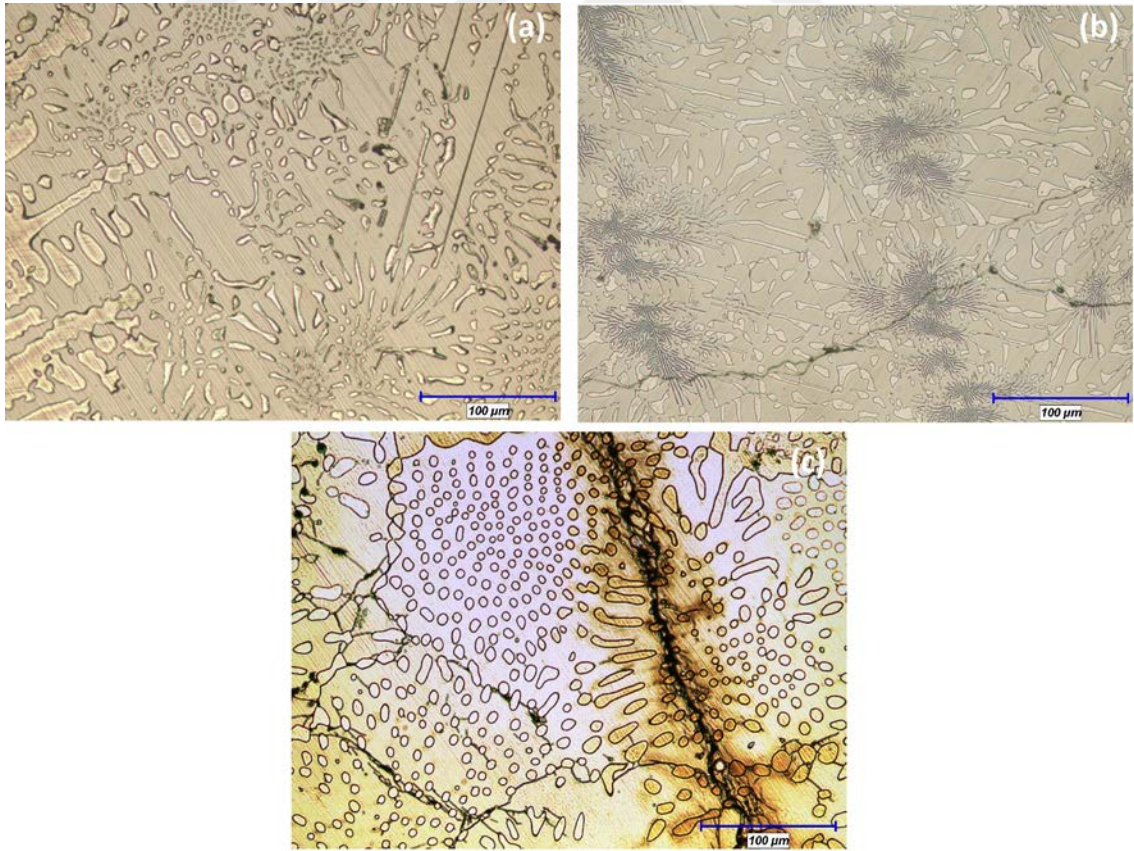
Şekil 3. 14. 3A (a), 3B (b) ve 3C (c) örneklerinin SEM görüntüleri.



Şekil 3.15. Alaşım 3 örneğinden elde edilen EDX analizi görüntüleri.

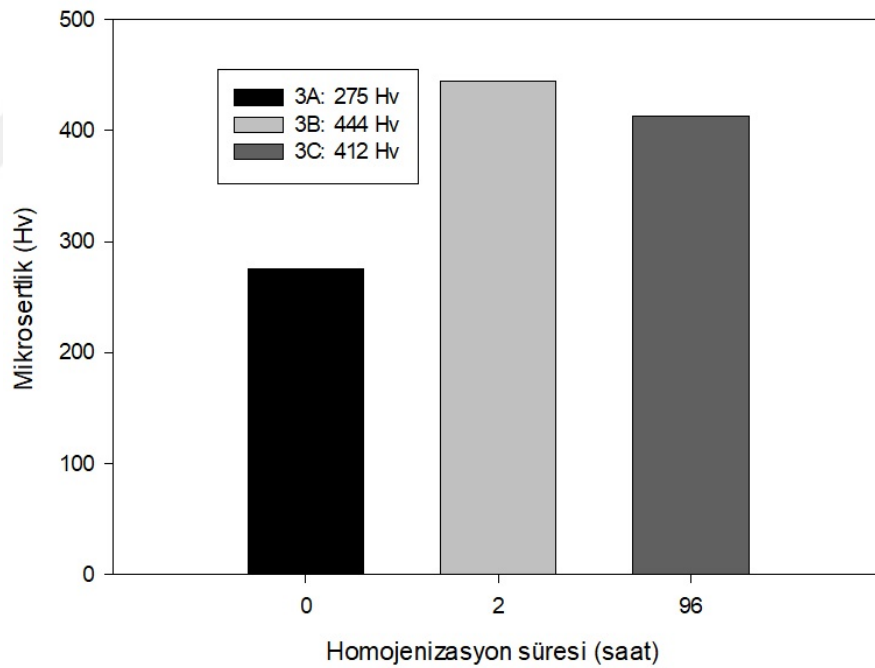


Şekil 3.16. Alaşım 3 numunesi için döküm sonrası elde edilen MAPPING analizi sonucu.



Şekil 3.17. 3A (a), 3B (b) ve 3C (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.

Bu alaşımların homojenizasyon süresine bağlı olarak mikrosertlik değişimi grafiği Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Homojenizasyon süresine bağlı olarak 3B numunesindeki mikrosertlik değeri başlangıçta artsada 96 saat süreyle homojenizasyon yapılmış olan 3C numunesinde bu değer bir miktar azalmıştır. Ancak bu değer 3A numunesine göre yüksektir. Bu durum Alaşım 1 ve 2 içinde aynıdır. Literatürde şekil hafızalı alaşımlarda meydana gelen martenzit fazın östenitten ikizlenme mekanizması ile oluştuğu dolayısıyla çeliklerin aksine martenzit fazının östenite göre daha düşük sertlik değerleri sergilediği bildirilmiştir (Kaya vd., 2016). Alaşım 1, 2 ve 3 numunelerinde her ne kadar martenzit yapılar gözlene de homojenizasyon süresi ile mikrosertlik değerlerindeki artış ve DSC analizlerinde faz dönüşüm sıcaklıklarının gözlenmemesi, şekil hafıza özelliği bakımından uygun ve yeterli martenzit fazlarının elde edilemediğini göstermektedir.



Şekil 3.18. 3A, 3B ve 3C örneklerinin mikrosertlik değerleri.

#### 3.4. Alaşım 4 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{17,5}\text{Mo}_2$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular

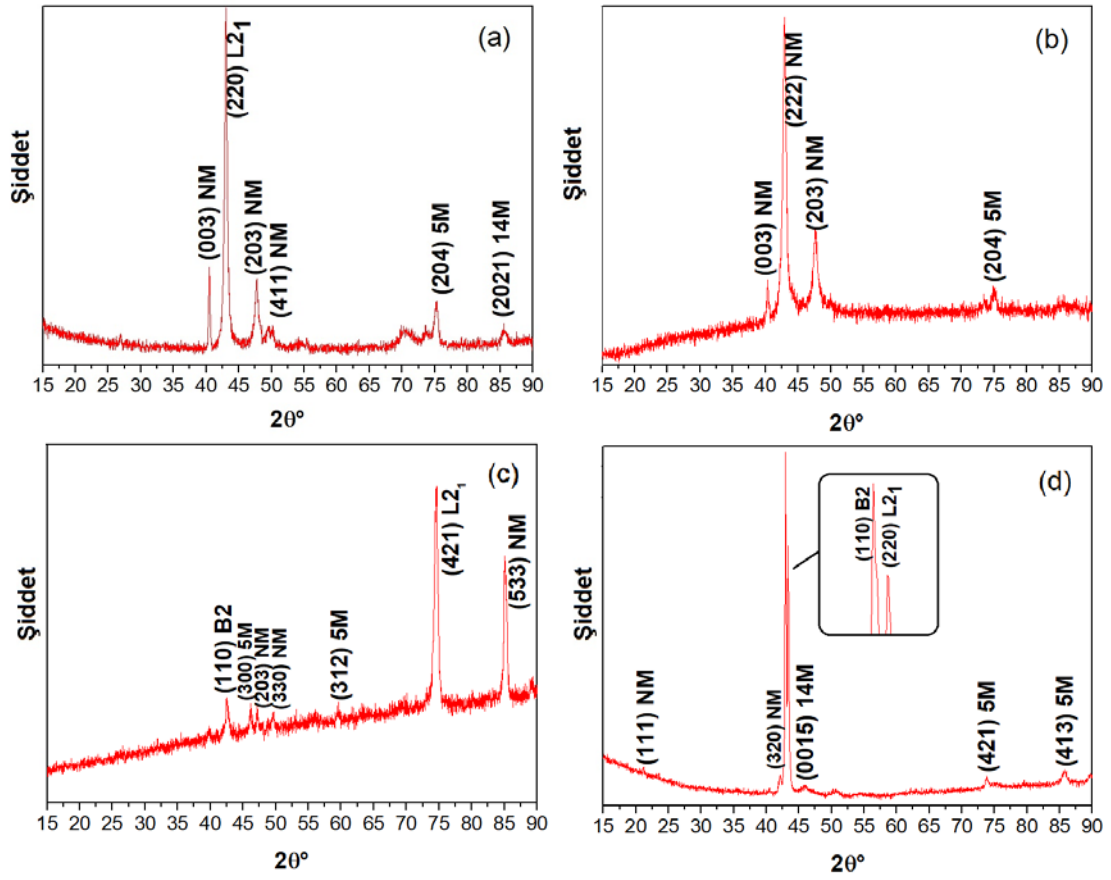
Alaşım 4 numunesinin homojenizasyon işlemine tabi tutularak buzlu suda soğutulan örneklerinin (4A, 4B, 4C, 4D) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş haliyle Şekil 3.19’da gösterilmiştir.

4A örneğinin X-ışını kırınım grafiğinden  $L2_1$ , NM, 5M ve 14M fazlarına sahip olduğu belirlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,947 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,800$  Å ve  $c=6,549$  Å olarak bulundu. 5M ve 14M fazlarının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemleri olmadığından hesaplanamamıştır.

4B numunesinin X-ışını difraktogramından NM ve 5M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir. NM fazının kafes parametreleri (222) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,763$  Å ve  $c=6,565$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemleri olmadığından hesaplanamamıştır.

4C numunesinin X-ışını difraktogramından B2,  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 3,003 Å olarak hesaplanırken,  $L2_1$  fazının kafes parametresi (421) yansıma düzlemi kullanılarak 5,825 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (330) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,792$  Å ve  $c=6,643$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (300) ve (312) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,897$  Å ve  $c=5,576$  Å olarak tespit edildi.

4D numunesinin X-ışını difraktogramından B2,  $L2_1$ , NM, 5M ve 14M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 2,979 Å olarak bulundu.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,906 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (111) ve (320) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,728$  Å ve  $c=6,600$  Å olarak tespit edildi. 5M fazının kafes parametreleri (421) ve (413) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,899$  Å ve  $c=5,545$  Å olarak bulundu. 14M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.



Şekil 3.19. 4A (a), 4B (b), 4C (c) ve 4D (d) örneklerinin XRD sonuçları.

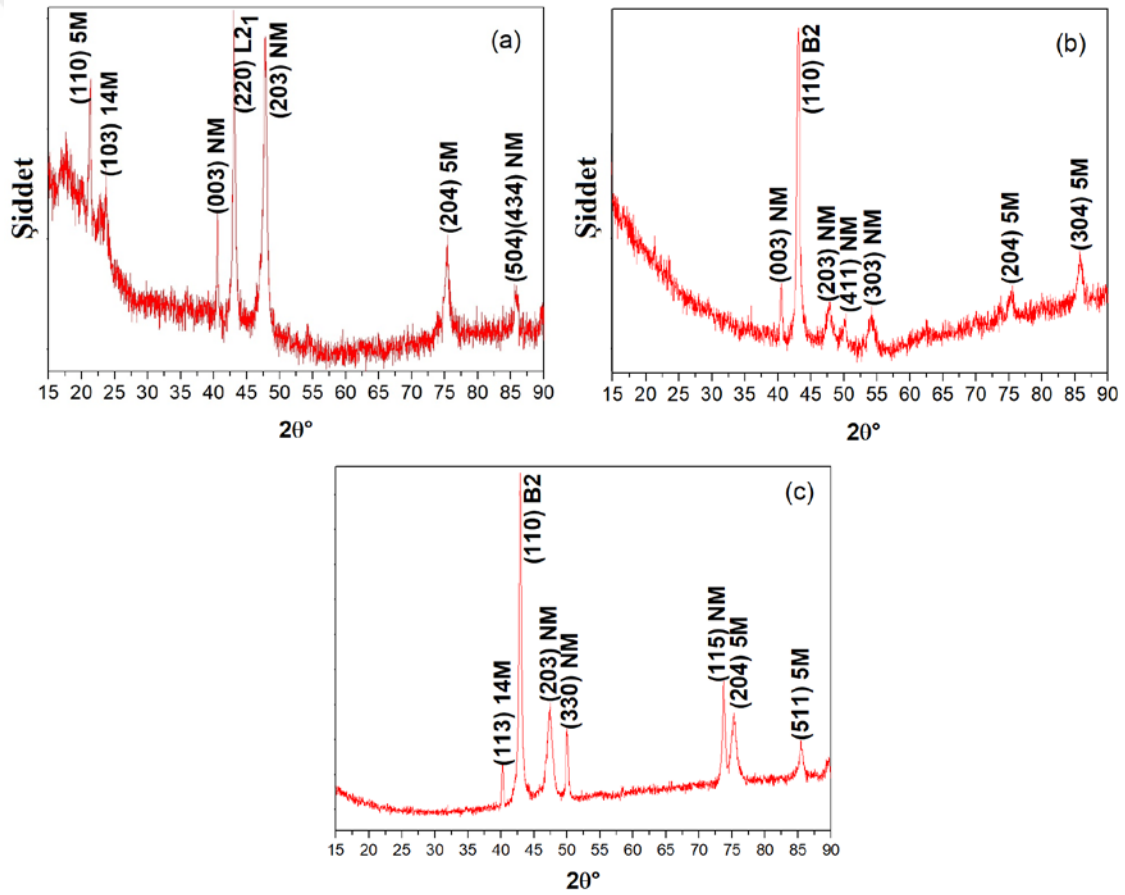
Alaşım 4 numunesinin farklı sıcaklıklarda ekstrüzyon işlemine tabi tutulan örneklerinin (4E1, 4E2, 4E3) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş şekilde Şekil 3.20’de gösterilmiştir.

4E1 numunesinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM, 5M ve 14M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak  $5,944 \text{ Å}$  olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (504) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,873 \text{ Å}$  ve  $c=6,518 \text{ Å}$  olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (110) ve (204) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,893 \text{ Å}$  ve  $c=5,585 \text{ Å}$  olarak tespit edildi. 14M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.

4E2 numunesinin X-ışını difraktogramından B2, NM ve 5M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak  $2,976 \text{ Å}$  olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,804 \text{ Å}$  ve  $c=6,554 \text{ Å}$  olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri

(204) ve (304) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,717 \text{ \AA}$  ve  $c=5,627 \text{ \AA}$  olarak hesaplanmıştır.

4E3 numunesinin X-ışını difraktogramından B2, NM, 5M ve 14M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak  $2,978 \text{ \AA}$  olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (330) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,740 \text{ \AA}$  ve  $c=6,616 \text{ \AA}$  olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (204) ve (511) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,912 \text{ \AA}$  ve  $c=5,587 \text{ \AA}$  olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.6'da Alaşım 4 örnekleri için hesaplanan kafes parametreleri, Tablo 3.7'de meydana gelen bazı fazların tane boyutları listelenmiştir.



Şekil 3.20. 4E1 (a), 4E2 (b) ve 4E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları.

Tablo 3.6. Alaşım 4 örneği için hesaplanan kafes parametreleri

| Örnek | B2                      | L2 <sub>1</sub> | NM                    |                       |            | 5M                    |                       |            |
|-------|-------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------|
|       | Kafes Parametreleri (Å) |                 |                       |                       |            |                       |                       |            |
|       | <i>a</i>                | <i>a</i>        | <i>a<sub>NM</sub></i> | <i>c<sub>NM</sub></i> | <i>c/a</i> | <i>a<sub>5M</sub></i> | <i>c<sub>5M</sub></i> | <i>c/a</i> |
| 4A    | -                       | 5,947           | 7,800                 | 6,549                 | 0,839      | -                     | -                     | -          |
| 4B    | -                       | -               | 7,763                 | 6,565                 | 0,845      | -                     | -                     | -          |
| 4C    | 3,003                   | 5,825           | 7,792                 | 6,643                 | 0,852      | 5,897                 | 5,576                 | 0,946      |
| 4D    | 2,979                   | 5,906           | 7,728                 | 6,600                 | 0,854      | 5,899                 | 5,545                 | 0,940      |
| 4E1   | -                       | 5,944           | 7,873                 | 6,518                 | 0,827      | 5,893                 | 5,585                 | 0,948      |
| 4E2   | 2,976                   | -               | 7,804                 | 6,554                 | 0,839      | 5,717                 | 5,627                 | 0,984      |
| 4E3   | 2,978                   | -               | 7,740                 | 6,161                 | 0,795      | 5,912                 | 5,587                 | 0,945      |

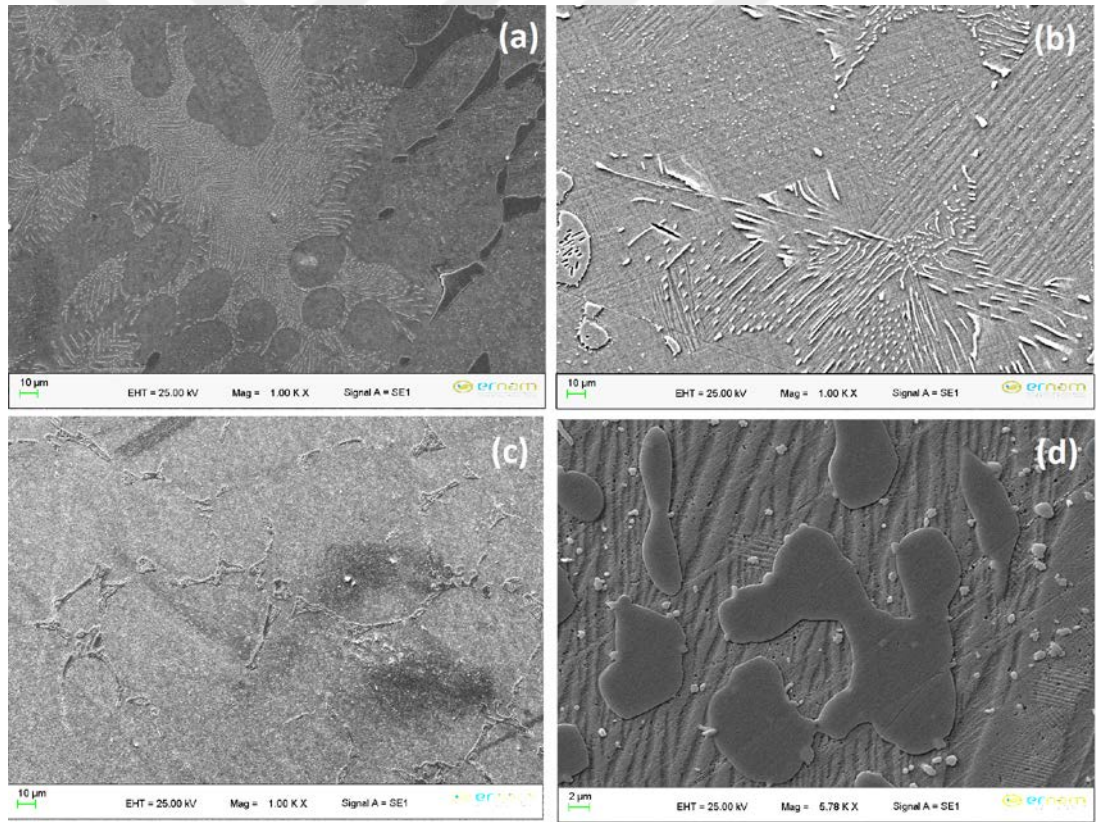
Tablo 3.7. Alaşım 4 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.

| Örnek | Tane Boyutu (nm) |                      |         |         |         |
|-------|------------------|----------------------|---------|---------|---------|
|       | (110)B2          | (220)L2 <sub>1</sub> | (203)NM | (003)NM | (204)5M |
| 4A    | -                | 33,38                | 21,23   | 41,36   | 15,10   |
| 4B    | -                | -                    | 15,08   | 35,26   | 15,07   |
| 4C    | 14,80            | -                    | 30,09   | -       | -       |
| 4D    | 23,76            | 66,83                | -       | -       | -       |
| 4E1   | -                | 66,76                | 37,73   | 66,21   | 28,01   |
| 4E2   | 47,67            | -                    | 14,15   | 41,37   | 12,25   |
| 4E3   | 54,68            | -                    | 18,84   | -       | 17,82   |

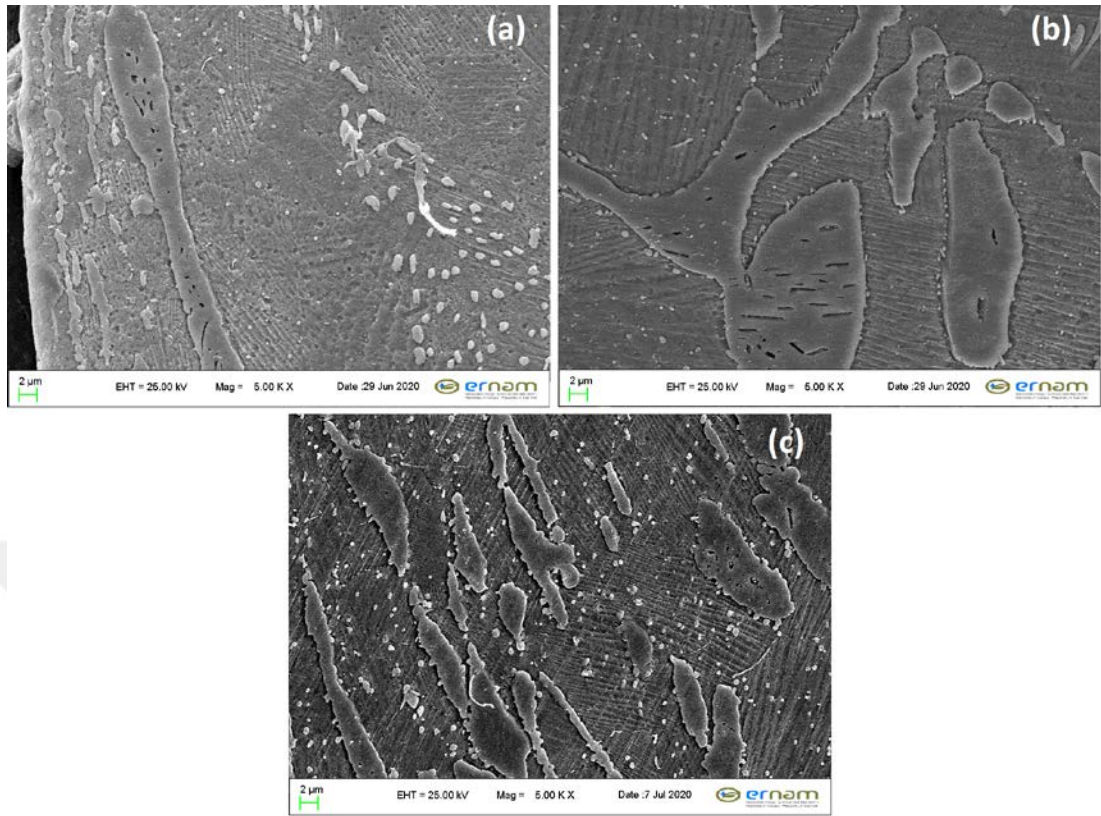
Alaşım 4'ün ısıtılma işlem ve ekstrüzyon yapılmış olan örneklerine ait DSC eğrileri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 3.21 ve 3.22'de sunulmuştur. Numuneler önce 600 °C'ye kadar ısıtıldıktan sonra 125 °C'ye soğutulmuştur. DSC sonucu elde edilen sıcaklık verileri Tablo 3.8'de özetlenmiştir. Yukarı ve aşağı yönlü eğrilerin eğimindeki güçlü ekzotermik ve endotermik değişim, dönüşüm sıcaklıklarını incelemek için kullanılmıştır. Isıl işlem yapılmış olan numunelerin dönüşüm sıcaklıkları ısıtılma işlemi örneğe göre belirgin olarak artmıştır. Alaşım 4'ün tüm örnekleri için  $A_s$  ve  $A_f$  ( $A_f - A_s$ ) arasındaki boşluk,  $M_s$  ve  $M_f$  ( $M_s - M_f$ ) arasındaki boşluktan daha geniştir, bu da dönüşüm için gerekli olan itici gücün tüm alaşım numuneleri için östenitik fazda daha büyük olduğunu göstermektedir. Bunun yanında  $A_{max}$  ve  $M_{max}$  ( $A_{max} - M_{max}$ ) arasındaki boşluk 950 °C'de (4E1) ve 1000 °C'de (4E2) ekstrüzyon yapılmış olan örneklerde belirgin bir ölçüde azalmıştır. 1050 °C'de ekstrüzyon yapılmış olan örnekte herhangi bir dönüşüm gözlenmemiştir.



Isıl işlem görmüş Alaşım 4'ün SEM görüntüleri Şekil 3.23 (a–d)'de gösterilmektedir. 4A örneğinde belirli bölgelerde martenzit morfolojileri barındıran anafaz üzerinde oluşmuş düzensiz ikincil fazlar ve çökeltiler gözlenmektedir. Şekil 3.23. b'de 2 saat homojenize edilen 4B örneğinde martensit morfolojisi, plaka şeklinde daha belirgin durumda görülmektedir. X-ışını analiz sonuçları ile buradaki morfoloji görüntüleri birleştirildiğinde belirgin martenzit plakalarının NM faza ait olduğu söylenebilir. Şekil 5c'de görüldüğü gibi 4C örneğinde tane sınırları boyunca bir miktar ikinci faz çökeltileri görülür. Şekil 3.23. d'de 96 saatlik ısıtıl işlem görmüş 4D örneğinde ikincil fazların büyüdüğü ve tane sınırlarının düzensiz hale geldiği görülmektedir. Ayrıca Şekil.3.24 (a–c)'de ekstrüzyon yapılmış olan tüm örneklerde martenzit morfolojileri gözlenirken, ekstrüzyon yönünde uzayan ikincil faz yapıları da gözlenmektedir.

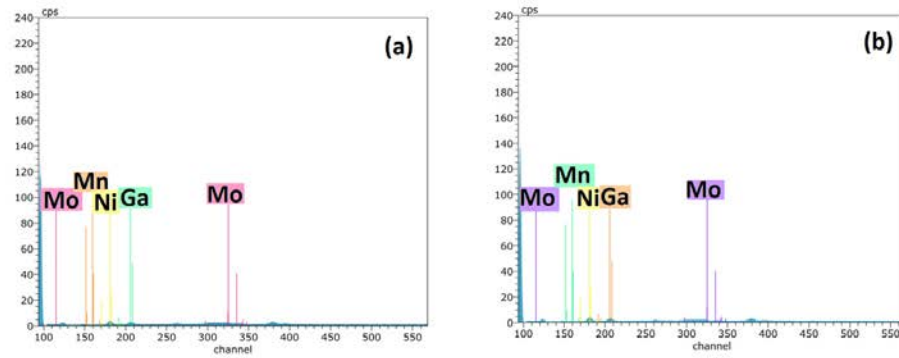
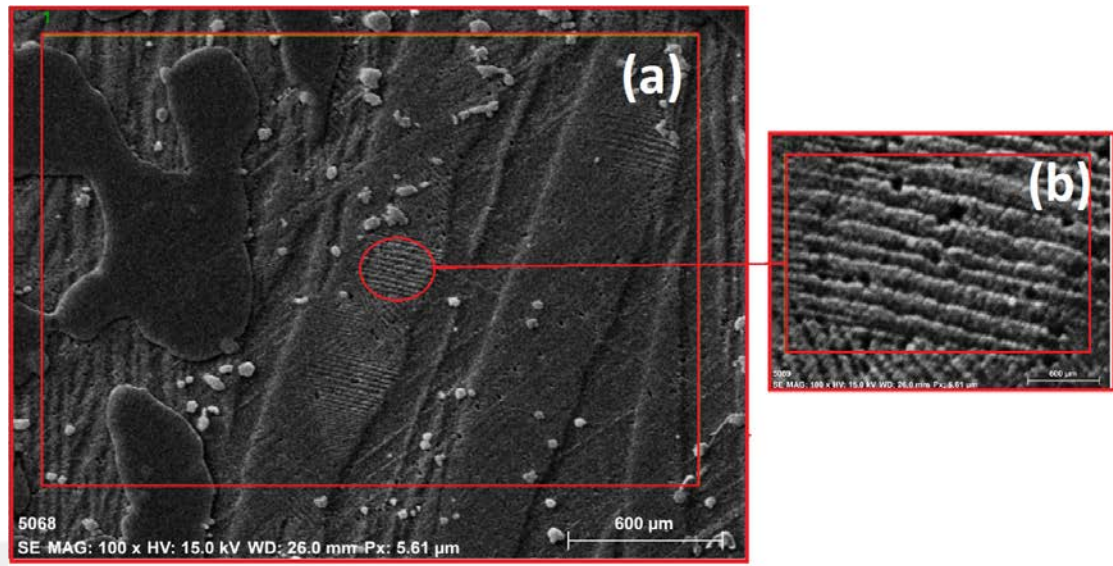


Şekil 3.23. 4A (a), 4B (b), 4C (c) ve 4D (d) örneklerinin SEM görüntüleri.



Şekil 3.24. 4E1 (a), 4E2 (a) ve 4E3 (c) örneklerinin SEM görüntüleri.

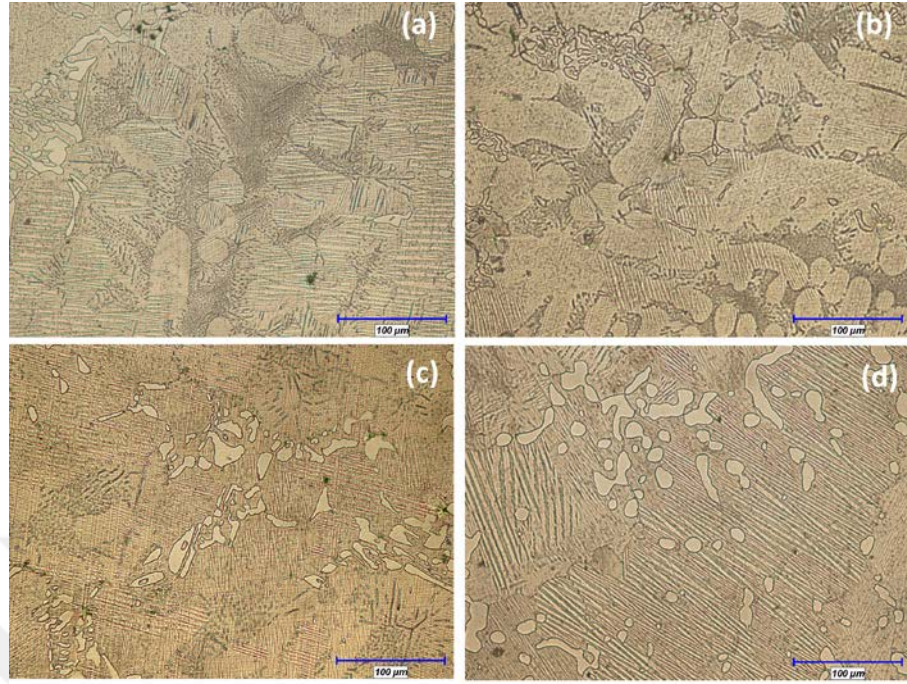
Şekil 3.25 ve 3.26’da Alaşım 4’ten elde edilen EDX ve MAPPING sonuçları sırasıyla verilmiştir. Bu sonuçlardan Alaşım 4’te meydana gelen martenzit yapısının Ni ve Ga bakımından zengin olduğu, Mo bakımından fakir olduğu anlaşılmaktadır. İkincil fazların ve çökeltilerin ise Ni ve Mo bakımından zengin olduğu görülmektedir. Ni ve Mn yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilerken, Ga elementi daha çok ana faz içerisinde ve Mo ise ikincil fazlar içerisinde yoğun olarak gözlenmektedir.



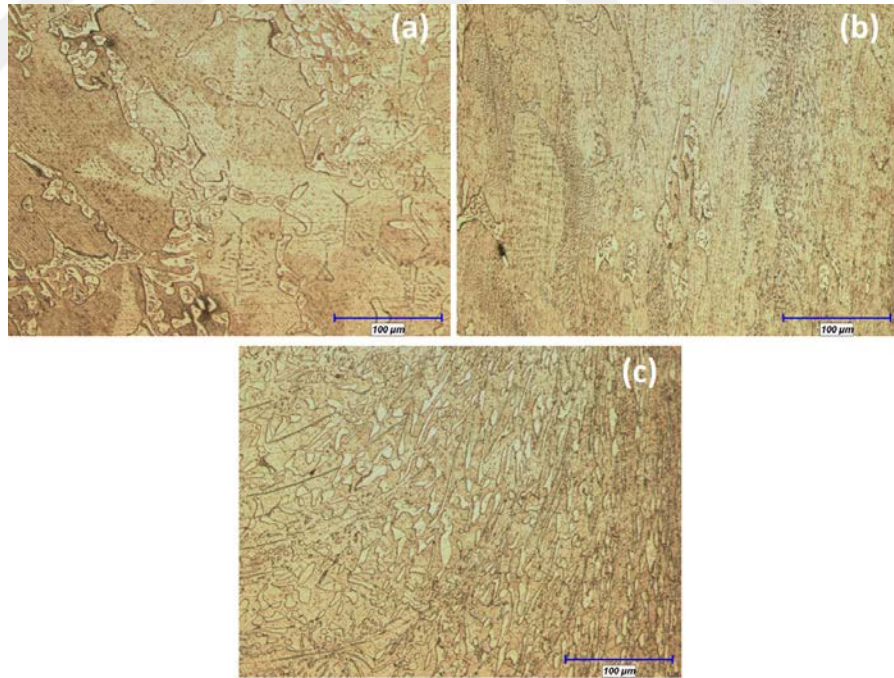
| Element | Alan (a)    |         | Alan (b)    |         |
|---------|-------------|---------|-------------|---------|
|         | Ağırlıkça % | Atomik% | Ağırlıkça % | Atomik% |
| Ni      | 48.62       | 51.18   | 47.60       | 50.07   |
| Mn      | 15.8        | 17.77   | 16.34       | 18.36   |
| Ga      | 33.65       | 29.82   | 34.55       | 30.60   |
| Mo      | 1.92        | 1.23    | 1.51        | 0.97    |

Şekil 3.25. Alaşım 4 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri.





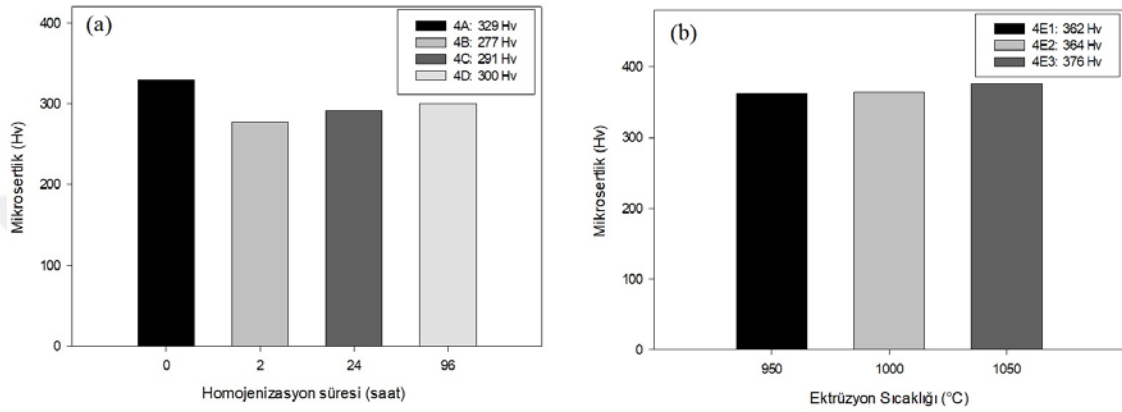
Şekil 3.27. 4A (a), 4B (b), 4C (c) ve 4D (d) optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 3.28. 4E1 (a), 4E2 (b) ve 4E3 (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.

Alaşım 4 numunesi için homojenizasyon süresi ve ekstrüzyon sıcaklığına bağlı olarak mikrosertlik değerleri grafiği Şekil 3.29’da gösterilmiştir. Isıl işlem ile mikrosertlik değerleri azalmıştır. Bunun yanında Alaşım 4’ün ekstürüzyon yapılmış olan tüm

örneklerinin mikrosertlik değerleri kayda değer şekilde artmıştır. Ekstrüzyon sonrasında örneklerde artış olmasının sebebi ekstrüzyon işleminin malzemede iç gerilmelere sebep olmasıdır. Ekstrüzyon yapılan örnekler kendi içlerinde incelendiğinde iç gerilmelerin küçük bir miktarda olsa daha yüksek olduğu işlem 1050 °C’de yapılan ekstrüzyondur.



Şekil 3.29. Alaşım 4 numunesi için ısıtıl işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış (b) örneklerin mikrosertlik değerleri.

### 3.5. Alaşım 5 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{18,5}\text{Mo}_1$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular

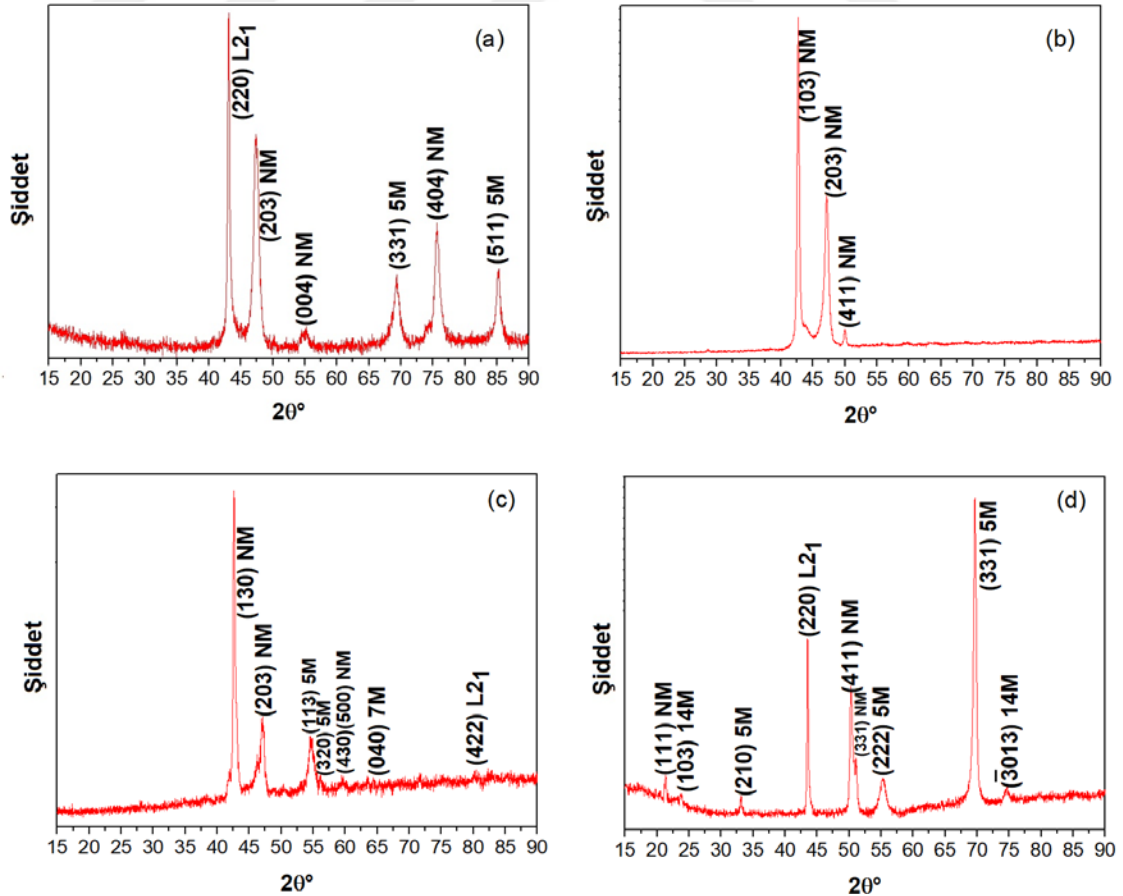
Alaşım 5 numunesinin homojenizasyon işlemine tabi tutularak buzlu suda soğutulan örneklerinin (5A, 5B, 5C, 5D) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş haliyle Şekil 3.30’da gösterilmiştir.

5A örneğinin X-ışını kırınım grafiğinden  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,932 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (404) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,724$  Å ve  $c=6,643$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (203) ve (404) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,923$  Å ve  $c=5,677$  Å olduğu görülmüştür.

5B numunesinin X-ışını difraktogramından NM fazına sahip olduğu gözlenmiştir. Bu fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,820$  Å ve  $c=6,640$  Å olarak hesaplanmıştır.

5C numunesinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM, 5M ve 7M fazlarına sahip olduğu belirlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (422) yansıma düzlemi kullanılarak 5,849 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (430) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,745$  Å ve  $c=6,672$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (113) ve (320) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,905$  Å ve  $c=5,498$  Å olarak tespit edildi. 7M fazı kafes parametrelerini hesaplamak için yeterli yansıma düzlemlerine sahip değildir.

5D numunesinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM, 5M ve 14M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,884 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (111) ve (331) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,912$  Å ve  $c=6,219$  Å olarak tespit edildi. 5M fazının kafes parametreleri (331) ve (222) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,911$  Å ve  $c=5,505$  Å olarak bulundu. 14M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.



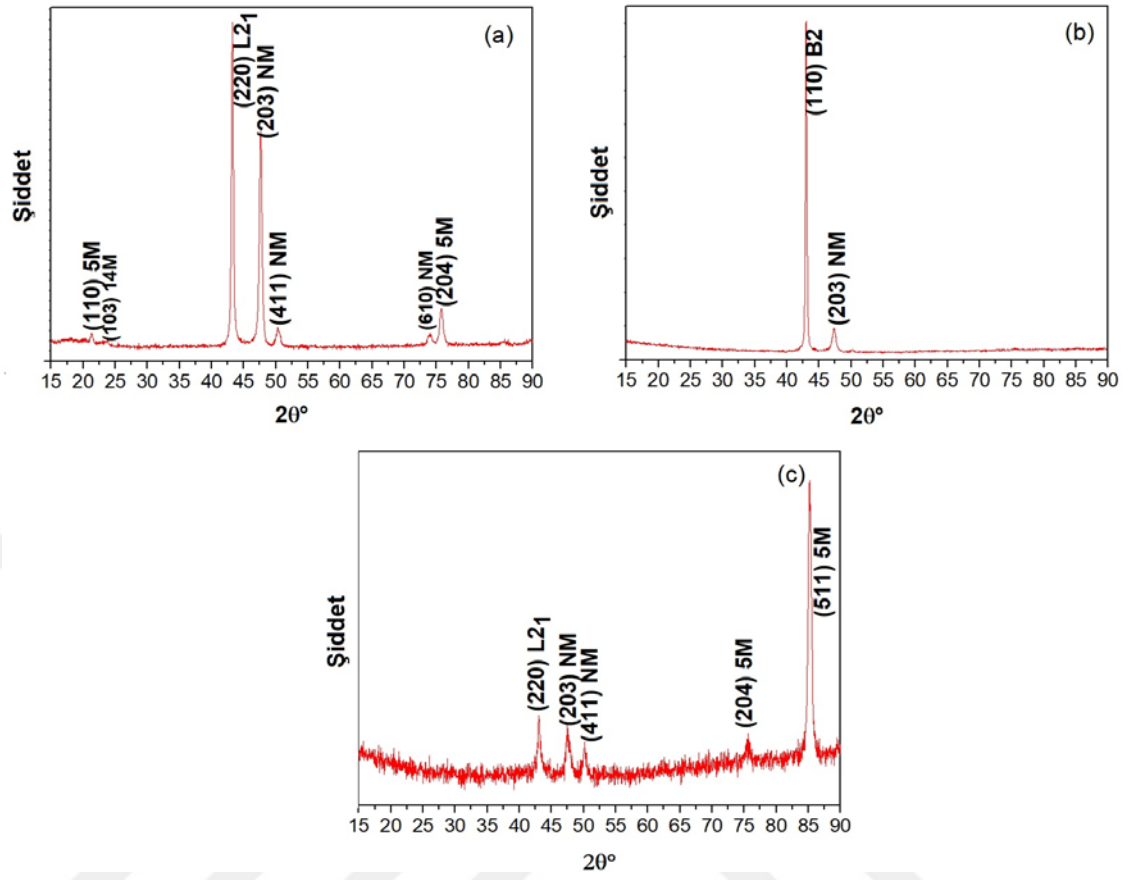
Şekil 3.30. 5A (a), 5B (b), 5C (c) ve 5D (d) örneklerinin XRD sonuçları.

Farklı sıcaklıklarda ekstrüzyon işlemine tabi tutulan Alaşım 5 örneklerinin (5E1, 5E2, 5E3) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş haliyle Şekil 3.31’de gösterilmiştir.

5E1 numunesinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM, 5M ve 14M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,916 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (610) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,790$  Å ve  $c=6,568$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (110) ve (204) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,887$  Å ve  $c=5,547$  Å olarak tespit edildi. 14M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.

5E2 numunesinin X-ışını difraktogramından B2 ve NM fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir. B2 fazının kafes parametresi (203) yansıma düzlemi kullanılarak 2,976 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (222) ve (203) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,698$  Å ve  $c=6,636$  Å olarak bulundu.

5E3 numunesinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 5,945 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,799$  Å ve  $c=6,513$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (204) ve (511) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,929$  Å ve  $c=5,558$  Å olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.9’da Alaşım 5 örnekleri için hesaplanan kafes parametreleri ve Tablo 3.10’da meydana gelen bazı fazların tane boyutları listelenmiştir.



Şekil 3.31. 5E1 (a), 5E2 (b) ve 5E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları.

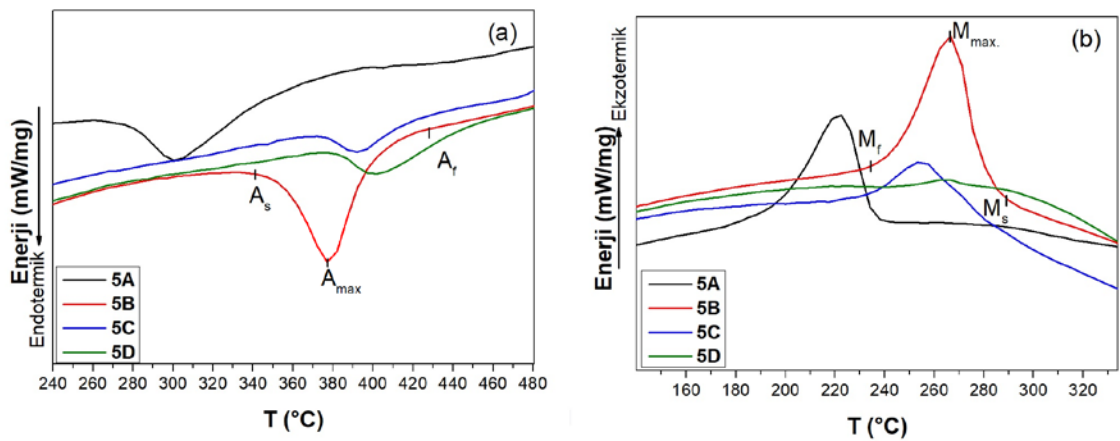
Tablo 3.9. Alaşım 5 örneği için hesaplanan kafes parametreleri.

| Örnek | B2                      | L2 <sub>1</sub> | NM                     |                        |            | 5M                     |                        |            |
|-------|-------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|------------|------------------------|------------------------|------------|
|       | Kafes Parametreleri (Å) |                 |                        |                        |            |                        |                        |            |
|       | <i>a</i>                | <i>a</i>        | <i>a</i> <sub>NM</sub> | <i>c</i> <sub>NM</sub> | <i>c/a</i> | <i>a</i> <sub>5M</sub> | <i>c</i> <sub>5M</sub> | <i>c/a</i> |
| 5A    | -                       | 5,932           | 7,724                  | 6,643                  | 0,860      | 5,923                  | 5,677                  | 0,959      |
| 5B    | -                       | 5,844           | 7,820                  | 6,640                  | 0,849      | -                      | -                      | -          |
| 5C    | -                       | 5,849           | 7,746                  | 6,672                  | 0,861      | 5,905                  | 5,498                  | 0,931      |
| 5D    | -                       | 5,884           | 7,912                  | 6,219                  | 0,786      | 5,911                  | 5,505                  | 0,931      |
| 5E1   | -                       | 5,917           | 7,790                  | 6,568                  | 0,843      | 5,887                  | 5,547                  | 0,942      |
| 5E2   | 2,976                   | -               | 7,698                  | 6,636                  | 0,862      | -                      | -                      | -          |
| 5E3   | -                       | 5,945           | 7,799                  | 6,513                  | 0,835      | 5,929                  | 5,558                  | 0,937      |

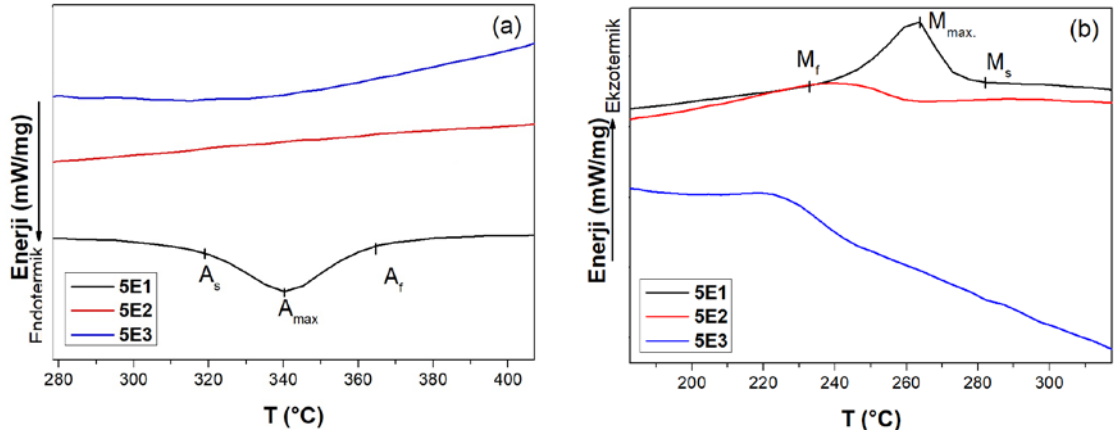
Tablo 3.10. Alaşım 5 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.

| Örnek | Tane Boyutu (nm)     |         |         |
|-------|----------------------|---------|---------|
|       | (220)L2 <sub>1</sub> | (203)NM | (411)NM |
| 5A    | 37,09                | 21,18   | -       |
| 5B    | -                    | 15,04   | 26,09   |
| 5C    | -                    | 15,04   | -       |
| 5D    | 66,87                | -       | 42,87   |
| 5E1   | 27,83                | 22,63   | 42,87   |
| 5E2   | -                    | 17,38   | -       |
| 5E3   | 41,71                | 12,12   | 21,43   |

Tablo 2.2’de belirtilen parametrelerle ısıtma işlemi ve ekstrüzyon yapılmış Alaşım 5 örneklerine ait DSC eğrileri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 3.32 ve 3.33’te sunulmuştur. DSC ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları Tablo 3.11’de özetlenmiştir. Isıtma işlemi yapılmış olan örneklerin dönüşüm sıcaklıkları ısıtma işlemi yapılmamış örneğe göre belirgin bir şekilde yükselmiştir. Alaşım 5’ün tüm örnekleri için  $A_s$  ve  $A_f$  ( $A_f - A_s$ ) arasındaki boşluk,  $M_s$  ve  $M_f$  ( $M_s - M_f$ ) arasındaki boşluktan daha geniştir, bu da dönüşüm için gerekli olan itici gücün tüm alaşım numuneleri için östenitik fazda daha büyük olduğunu göstermektedir. Bunun yanında  $A_{max}$  ve  $M_{max}$  ( $A_{max} - M_{max}$ ) arasındaki boşluk en az 950 °C’de (5E1) ekstrüzyon yapılmış olan örnekte gözlenmiştir. 1000 ve 1050 °C’de ekstrüzyon yapılmış olan örnekte belirgin bir dönüşüm gözlenmemiştir.



Şekil 3.32. 5A, 5B, 5C ve 5D örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma (b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri.



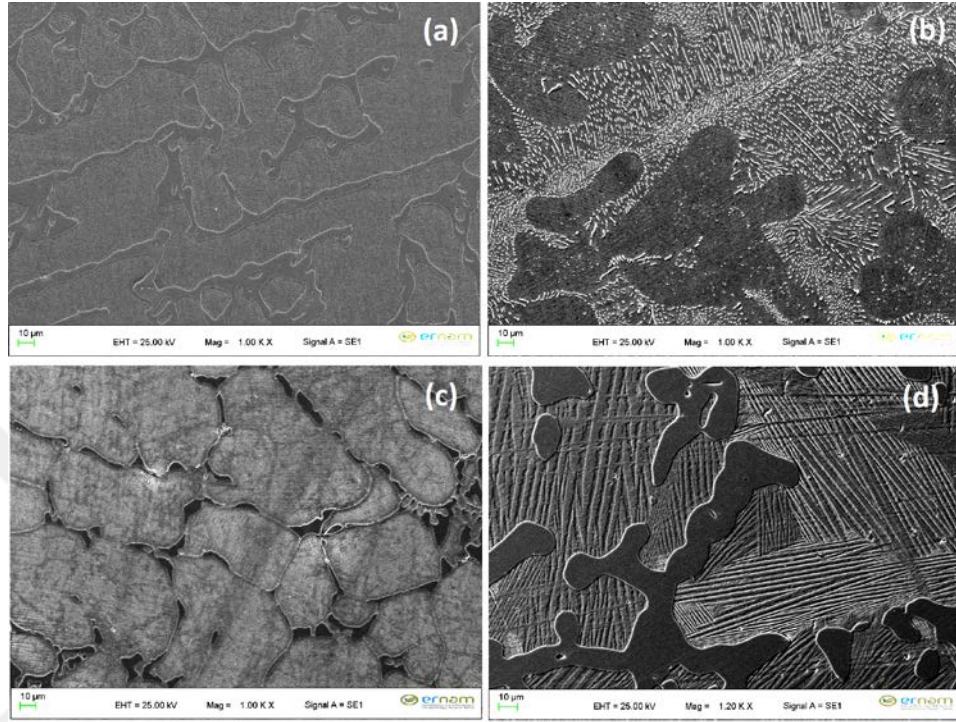
Şekil 3.33. 5E1, 5E2 ve 5E3 örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma (b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri.

Tablo 3.11. Alaşım 5 örneğinin ısıtma işlemi ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları.

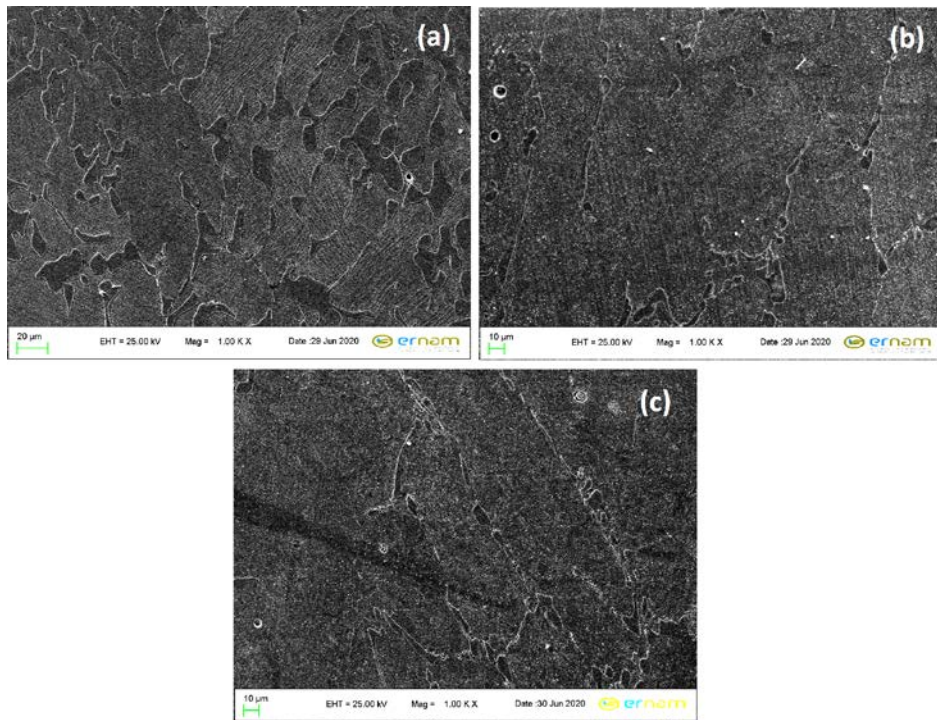
| Örnek | Faz Dönüşüm Sıcaklıkları (°C) |           |       |       |           |       |           |           |                   |
|-------|-------------------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-----------|-----------|-------------------|
|       | $A_s$                         | $A_{max}$ | $A_f$ | $M_s$ | $M_{max}$ | $M_f$ | $M_s-M_f$ | $A_f-A_s$ | $A_{max}-M_{max}$ |
| 5A    | 270,5                         | 300,4     | 345,2 | 238,1 | 222,6     | 191,2 | 46,9      | 74,7      | 77,8              |
| 5B    | 322,4                         | 377,1     | 407,1 | 290   | 266,6     | 240,9 | 49,1      | 84,7      | 110,5             |
| 5C    | 352,3                         | 387,1     | 407,0 | 271,3 | 257,6     | 236,7 | 34,6      | 54,7      | 129,5             |
| 5D    | 352,3                         | 392,1     | 426,9 | 290,1 | 280,5     | 266,6 | 23,5      | 74,6      | 111,6             |
| 5E1   | 315,3                         | 340,2     | 365,1 | 277,6 | 263,8     | 234,1 | 43,5      | 49,8      | 76,4              |
| 5E2   | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -         | -         | -                 |
| 5E3   | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -         | -         | -                 |

Alaşım 5'in ısıtma işlemli örneklerinin SEM görüntüleri Şekil 3.34 (a-d)'de gösterilmektedir. 5A ve 5C örneğinde martenzit morfolojisine sahip ana fazın tane sınırlarında oluşmuş nispeten düzenli ikincil fazlar meydana gelmiştir. Şekil 3.34. b'de 2 saat homojenize edilen 5B örneğinde martensit morfolojisi içerisinde düzensiz nokta şeklinde çökelti görülür. Şekil 3.34. d'de 96 saatlik ısıtma işlemi görmüş 5D örneğinde XRD sonuçları ile uyumlu olarak farklı martensitik oluşumların (NM, 5M, 14M) bir arada bulunduğu, bunun yanında ikincil fazların büyüdüğü ve tane sınırlarının düzensiz hale geldiği görülmektedir. Ayrıca Tablo 3.10'da 5D numunesinde (220) L21 ve (411) NM fazlarının XRD verilerinden hesaplanarak elde edilen tane boyutlarının nispeten yüksek olması SEM fotoğraflarını desteklemenin yanında homojenizasyon süresinin artmasıyla tane boyutlarının artacağına bir göstergesidir. Şekil.3.35 (a-c)'de

ekstrüzyon yapılmış olan tüm örneklerde martenzit morfolojileri gözlenirken, ekstrüzyon yönünde uzayan ikincil faz yapıları da gözlenmektedir.

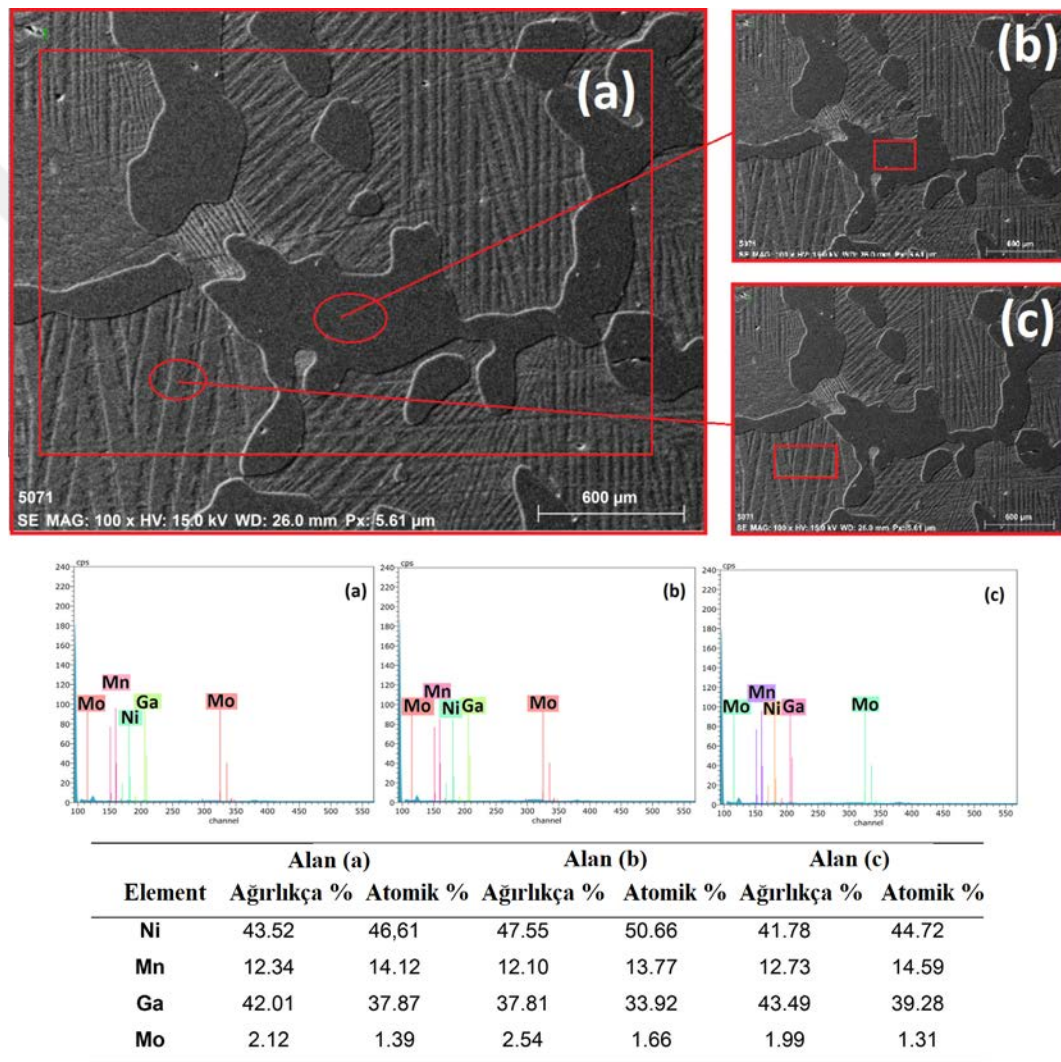


Şekil 3.34. 5A (a), 5B (b), 5C (c) ve 5D (d) örneklerinin SEM görüntüleri.

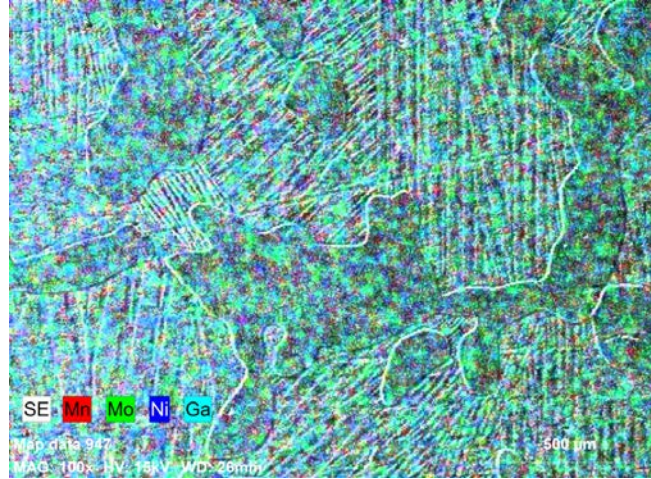


Şekil 3.35. 5E1 (a), 5E2 (b) ve 5E3 (d) örneklerinin SEM görüntüleri.

Şekil 3.36 ve 3.37’de Alaşım 5’den elde edilen EDX ve MAPPING sonuçları gösterilmiştir. Bu sonuçlardan Alaşım 5’de meydana gelen faz yapısının Ni ve Ga bakımından zengin olduğu, Mn ve Mo bakımından fakir olduğu anlaşılmaktadır. MAPPING analizi incelendiğinde tüm elementlerin yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilerken, Ga elementi daha çok martenzit faz içerisinde ve Mo ise ikincil fazlar içerisinde nispeten daha yüksek oranlarda olduğu anlaşılmaktadır.

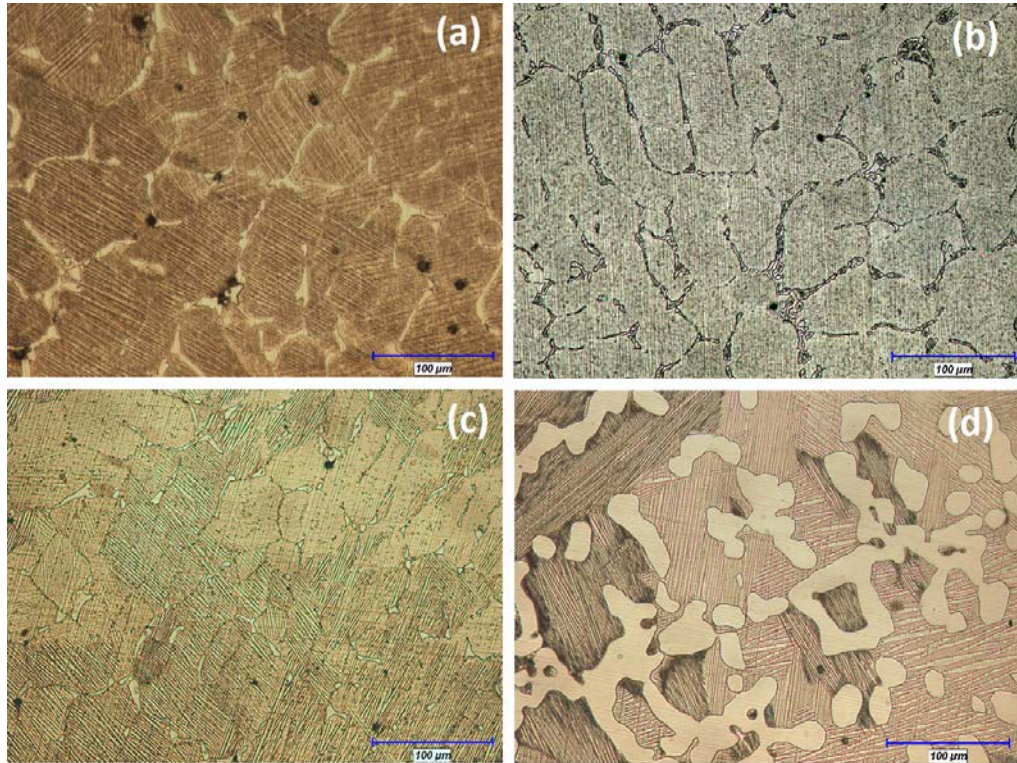


Şekil 3.36. Alaşım 5 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri.



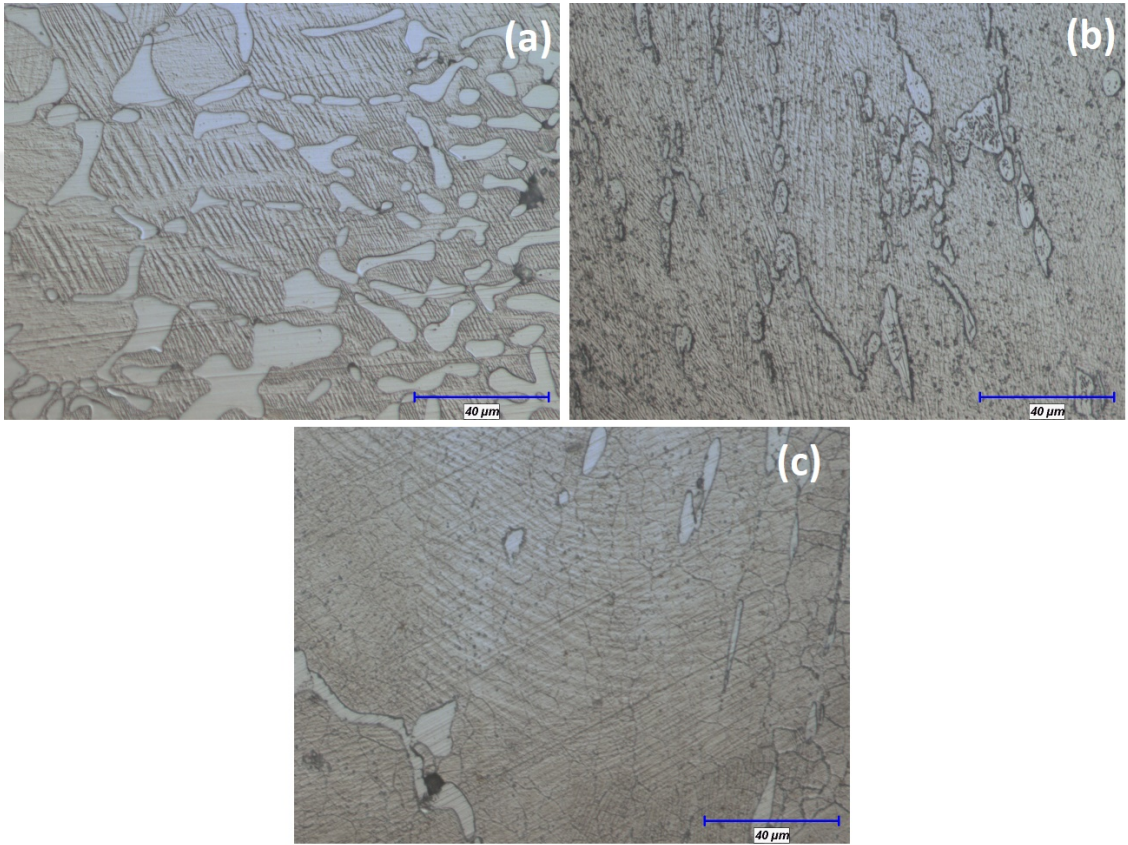
Şekil 3.37. Alaşım 5 örneğinden elde edilen MAPPING analizi sonucu.

Şekil 3.38’de optik mikroskop fotoğrafları görülen Alaşım 5 örneklerinde ısıl işlem süresindeki artış ile martenzit fazların daha belirgin hale geldiği ve ikincil faz yapılarının büyüdüğü görülmektedir. 96 saat homojenizasyon işlemine tabi tutulmuş 5D örneğinde birbiri arasında belirgin bir açı ile yönelimlenmiş ve birleriyle uyumlu (self accommodated) martenzit plakalarının yoğun bir şekilde dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır.



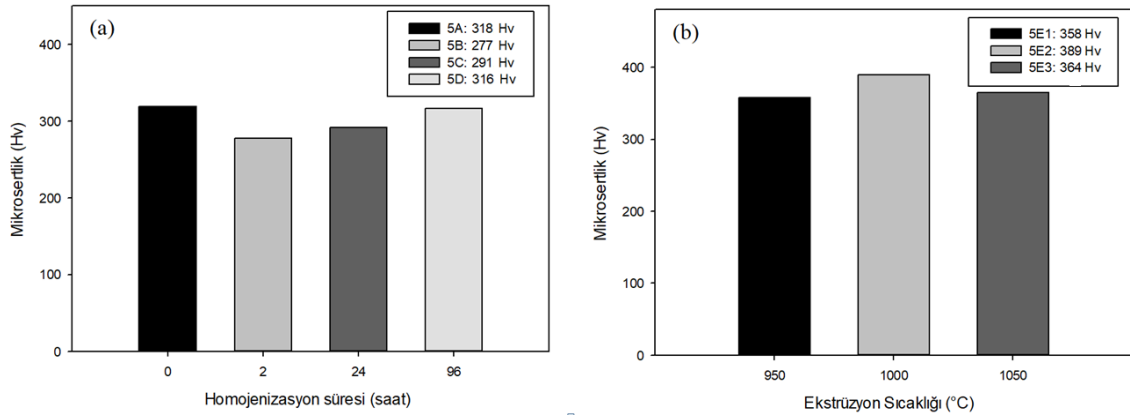
Şekil 3.38. 5A (a), 5B (b), 5C (c) ve 5D (d) optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 3.39'daki ekstrüzyon yapılmış olan örneklerde tüm yapılar da martenzitik ana fazın yanında ikincil fazlar gözlenmektedir. DSC analizleri sonucu faz dönüşümü gözlenen 5E1 örneğinde ekstrüzyon yapılan diğer iki örneğe göre daha belirgin ve daha büyük martensitik faz yapıları görülmektedir. Bu durum Tablo 3.10'da hesaplanan NM fazlarının tane boyutlarının diğer iki örneğe kıyasla en yüksek değere sahip olmasıyla desteklenmektedir.



Şekil 3.39. 5E1 (a), 5E2 (b) ve 5E3 (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.

Alaşım 5 örnekleri için homojenizasyon süresi ve ekstrüzyon sıcaklığına bağlı olarak mikrosertlik değerleri Şekil 3.40'ta gösterilmiştir. Isıl işlem süresindeki artış ile mikrosertlik değerleri azalmıştır. Bunun yanında Alaşım 5'in ekstrüzyon yapılmış olan tüm örneklerinin mikrosertlik değerleri kayda değer şekilde artmıştır. Ekstrüzyon sonrasında örneklerde artış olmasının sebebi ekstrüzyon işleminin malzemede iç gerilmelere sebep olmasıdır. Mikrosertlik değerlerine baktığımızda iç gerilmelerin daha yüksek olduğu işlemin 1000 °C'de yapılan ekstrüzyon olduğu söylenebilir.



Şekil 3.40. Alaşım 5 numunesi ısıtıl işlem (a) ve ekstrüzyon yapılmış (b) örneklerin mikrosertlik değerleri.

### 3.6. Alaşım 6 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Sn}_{18,5}\text{Mo}_1$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular

Alaşım 6 numunesinin homojenizasyon işlemine tabi tutularak buzlu suda soğutulan örneklerinin (6A, 6B, 6C, 6D) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş haliyle Şekil 3.41’de gösterilmiştir.

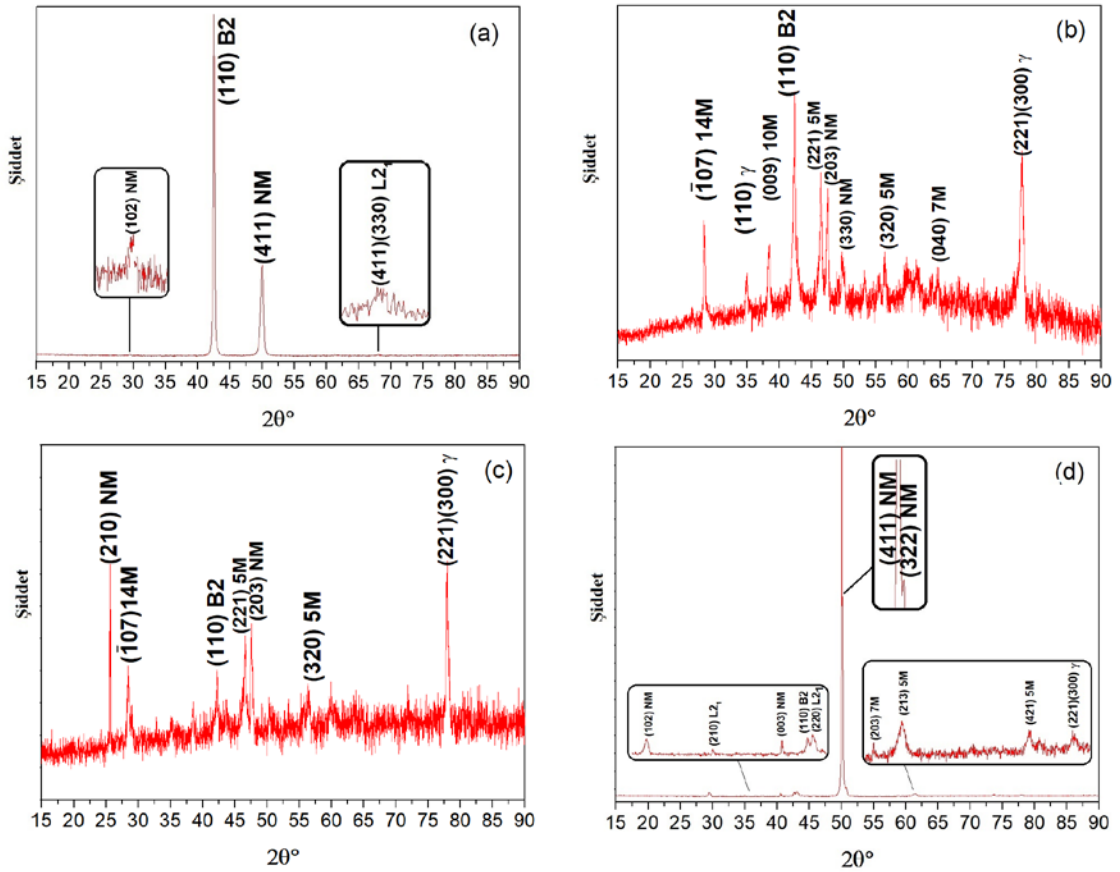
6A örneğinin X-ışını kırınım grafiğinden B2,  $L2_1$  ve NM fazlarına sahip olduğu görülmüştür. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 3,007 Å olarak hesaplandı.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (411) yansıma düzlemi kullanılarak 5,843 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (102) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,820$  Å ve  $c=6,580$  Å olarak bulundu.

6B örneğinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ , B2, NM, 5M, 7M, 10M ve 14M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $\gamma$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 3,686 Å olarak bulundu. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 3,012 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (330) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,766$  Å ve  $c=6,589$  Å olarak belirlendi. 5M fazının kafes parametreleri (221) ve (320) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,881$  Å ve  $c=5,558$  Å olarak hesaplanmıştır. 7M, 10M ve 14M fazlarının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.

6C örneğinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ , B2, NM, 5M ve 14M fazlarına sahip olduğu belirlenmiştir.  $\gamma$  fazının kafes parametresi (221) yansıma düzlemi kullanılarak 3,675 Å olarak bulundu. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 3,023

Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (210) ve (203) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,768$  Å ve  $c=6,589$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (221) ve (320) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,897$  Å ve  $c=5,448$  Å olarak tespit edildi. 14M fazı kafes parametrelerini hesaplamak için yeterli yansıma düzlemlerine sahip değildir.

6D örneğinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ , B2,  $L2_1$ , NM, 5M ve 7M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $\gamma$  fazının kafes parametresi (221) yansıma düzlemi kullanılarak 3,676 Å olarak hesaplandı. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 2,999 Å olarak bulundu.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,946 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (003) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,802$  Å ve  $c=6,675$  Å olarak tespit edildi. 5M fazının kafes parametreleri (213) ve (421) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,907$  Å ve  $c=5,501$  Å olarak bulundu. 7M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.



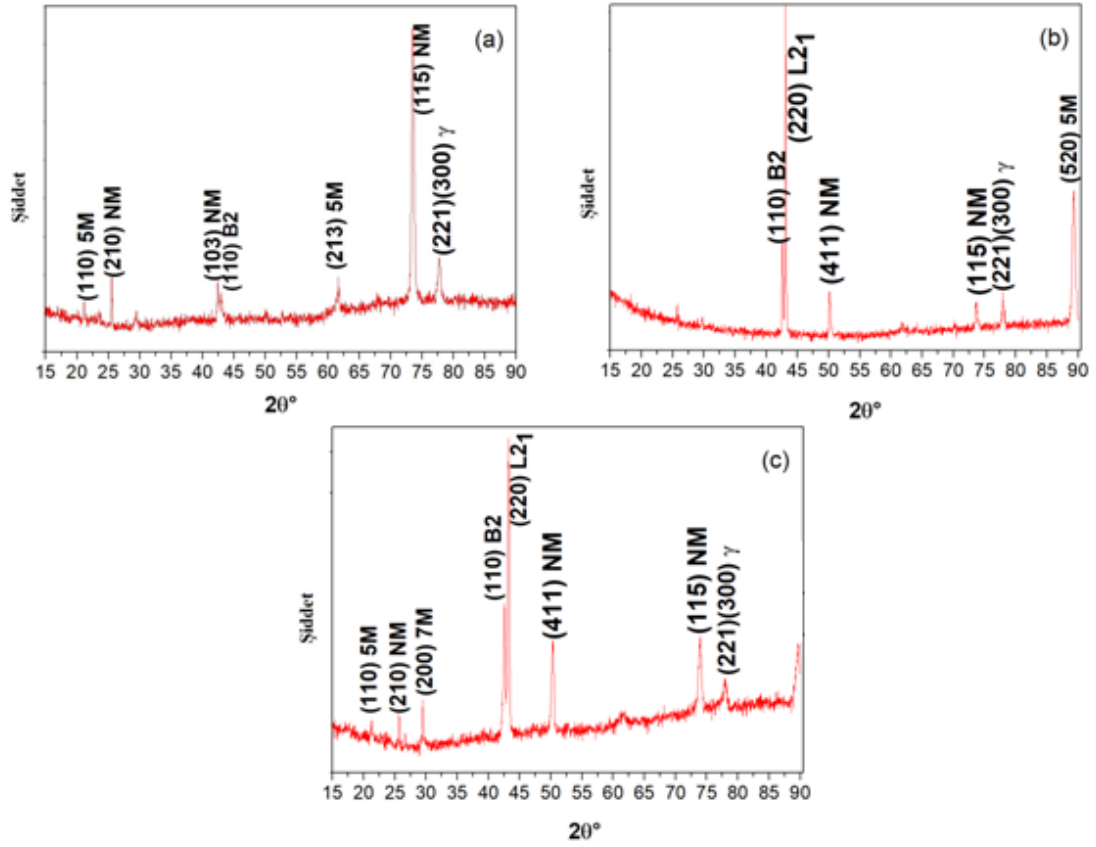
Şekil 3.41. 6A (a), 6B (b), 6C (c) ve 6D (d) örneklerinin XRD sonuçları.

Ekstrüzyon yapılmış olan Alaşım 6 örneklerinin (6E1, 6E2, 6E3) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş şekilde Şekil 3.42’de gösterilmiştir.

6E1 örneğinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ , B2, NM ve 5M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $\gamma$  fazının kafes parametresi (221) yansıma düzlemi kullanılarak 3,683 Å olarak tespit edildi. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 2,981 Å olarak bulundu. NM fazının kafes parametreleri (210) ve (115) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,803$  Å ve  $c=6,627$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (110) ve (213) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,948$  Å ve  $c=5,474$  Å olarak hesaplandı.

6E2 numunesinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ , B2, L2<sub>1</sub>, NM ve 5M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $\gamma$  fazının kafes parametresi (221) yansıma düzlemi kullanılarak 3,678 Å olarak bulundu. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 3,004 Å olarak hesaplandı. L2<sub>1</sub> fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,941 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (411) ve (115) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,806$  Å ve  $c=6,615$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.

6E3 numunesinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ , B2, L2<sub>1</sub>, NM, 5M ve 7M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $\gamma$  fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 3,675 Å olarak tespit edildi. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 3,003 Å olarak hesaplandı. L2<sub>1</sub> fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,920 Å olarak bulundu. NM fazının kafes parametreleri (210) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,757$  Å ve  $c=6,834$  Å olarak hesaplandı. 5M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır. Tablo 3.12’de Alaşım 6 örnekleri için hesaplanan kafes parametreleri ve Tablo 3.13’de meydana gelen bazı fazların tane boyutları listelenmiştir.



Şekil 3.42. 6E1 (a), 6E2 (b) ve 6E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları.

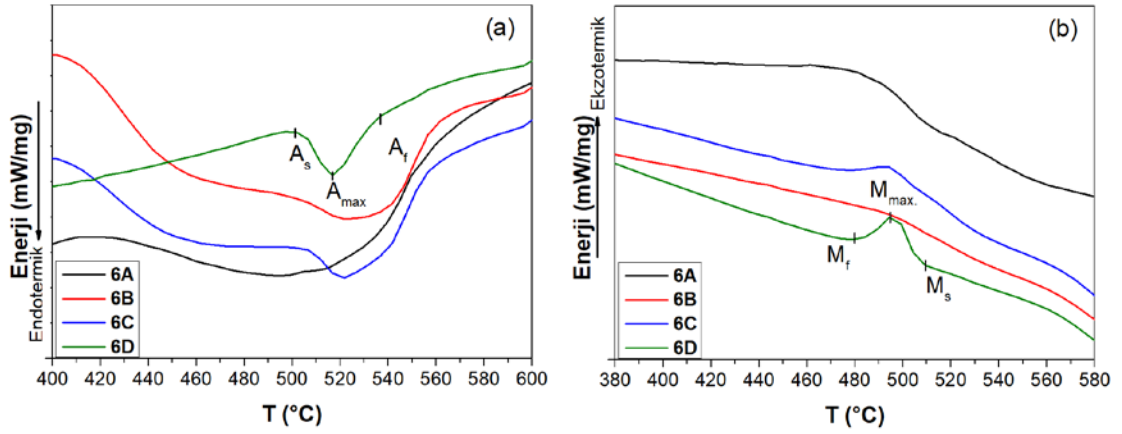
Tablo 3.12. Alaşım 6 örneği için hesaplanan kafes parametreleri.

| Örnek | $\gamma$                | B2    | L2 <sub>1</sub> | NM       |          |       | 5M       |          |       |
|-------|-------------------------|-------|-----------------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|
|       | Kafes Parametreleri (Å) |       |                 |          |          |       |          |          |       |
|       | $a$                     | $a$   | $a$             | $a_{NM}$ | $c_{NM}$ | $c/a$ | $a_{5M}$ | $c_{5M}$ | $c/a$ |
| 6A    | -                       | 3,007 | 5,843           | 7,820    | 6,580    | 0,841 | -        | -        | -     |
| 6B    | 3,686                   | 3,012 | -               | 7,766    | 6,589    | 0,848 | 5,881    | 5,558    | 0,945 |
| 6C    | 3,675                   | 3,023 | -               | 7,768    | 6,589    | 0,848 | 5,897    | 5,448    | 0,924 |
| 6D    | 3,676                   | 2,999 | 5,946           | 7,802    | 6,675    | 0,856 | 5,907    | 5,501    | 0,931 |
| 6E1   | 3,683                   | 2,981 | -               | 7,803    | 6,627    | 0,849 | 5,948    | 5,474    | 0,920 |
| 6E2   | 3,678                   | 3,004 | 5,941           | 7,806    | 6,615    | 0,847 | -        | -        | -     |
| 6E3   | 3,675                   | 3,003 | 5,920           | 7,757    | 6,834    | 0,881 | -        | -        | -     |

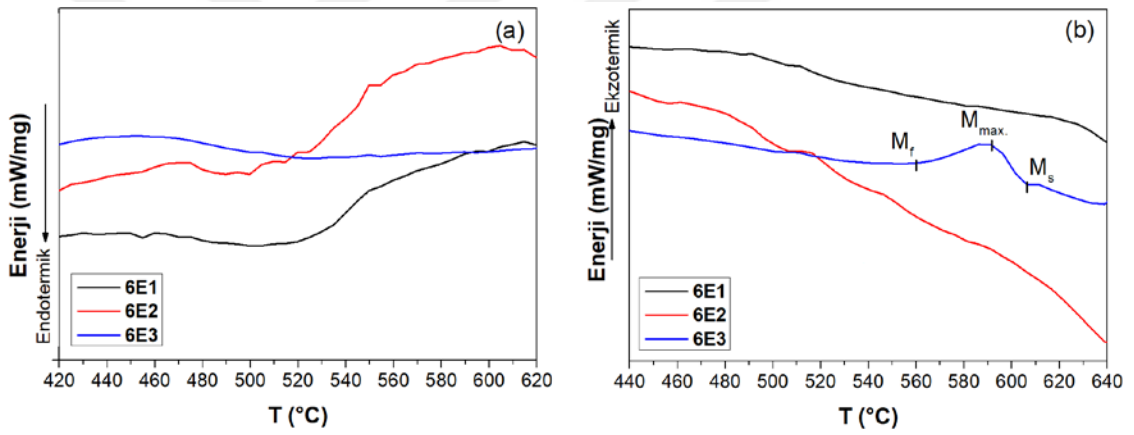
Tablo 3.13. Alaşım 6 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.

| Örnek | Tane Boyutu (nm)    |         |                      |         |
|-------|---------------------|---------|----------------------|---------|
|       | (211)(300) $\gamma$ | (110)B2 | (220)L2 <sub>1</sub> | (411)NM |
| 6A    | -                   | 41,64   | -                    | 22,85   |
| 6B    | 21,24               | 29,59   | -                    | -       |
| 6C    | 35,47               | 29,57   | -                    | -       |
| 6D    | 16,37               | 111,04  | 66,76                | 140,59  |
| 6E1   | 23,35               | 55,52   | -                    | -       |
| 6E2   | 49,92               | 55,54   | 55,64                | 68,57   |
| 6E3   | 20,47               | 66,66   | 30,36                | 28,59   |

Alaşım 6 için ısıtma işlem ve ekstrüzyon yapılmış örneklerine ait DSC eğrileri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 3.43 ve 3.44'de sunulmuştur. Isıtma ve soğutma sonucu DSC ile elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları Tablo 3.14'de özetlenmiştir. 6A, 6B, 6C ve 6D örnekleri göz önüne alındığında belirgin bir dönüşüm eğrisi yalnızca 6C ve 6D örneklerinde gözlenmektedir. 6A ve 6B örneklerinin 440-560 °C aralığında görülen ısıtma eğrileri östenitik dönüşümün bu numuneler için belirgin olmadığını göstermektedir. En belirgin dönüşüm eğrileri ise 96 saat homojenize edilmiş olan 6D örneğine aittir. 6D örneği için  $A_s$  ve  $A_f$  ( $A_f - A_s$ ) arasındaki sıcaklık farkı ile  $M_s$  ve  $M_f$  ( $M_s - M_f$ ) arasındaki sıcaklık farkı birbirine eşittir. Bu durum dönüşüm için gerekli olan sürücü kuvvetin (faz dönüşümünün gerçekleşmesi için gerekli olan enerji miktarı) aynı olduğunu gösterir. Ayrıca dönüşüm gözlenen 6D'de Tablo 3.13'de verilen (411) düzlemindeki NM fazının tane boyutunun en büyük değere sahip olduğu gözlenmektedir. Bunun yanında 6C örneğinde dönüşümler için gerekli olan sürücü kuvvet 6D örneğine göre daha fazladır. 6E1, 6E2 ve 6E3 örnekleri incelendiğinde yalnızca 1050 °C'de ekstrüzyon yapılmış olan 6E3 örneğinde soğutma sırasında oluşmuş bir martenzit dönüşüm eğrisi gözlenmiştir. Bunun dışında diğer örneklerde herhangi bir dönüşüm gözlenmemiştir.



Şekil 3.43. 6A, 6B, 6C ve 6D örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma (b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri.

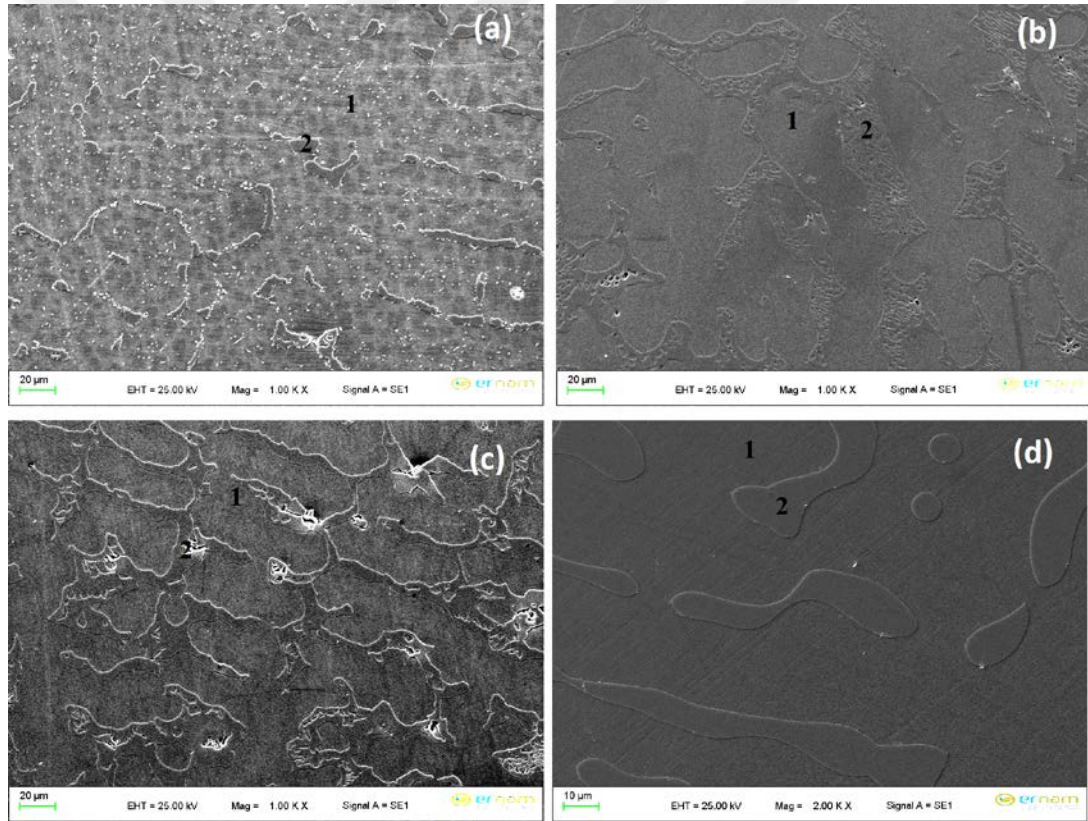


Şekil 3.44. 6E1, 6E2 ve 6E3 örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma (b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri.

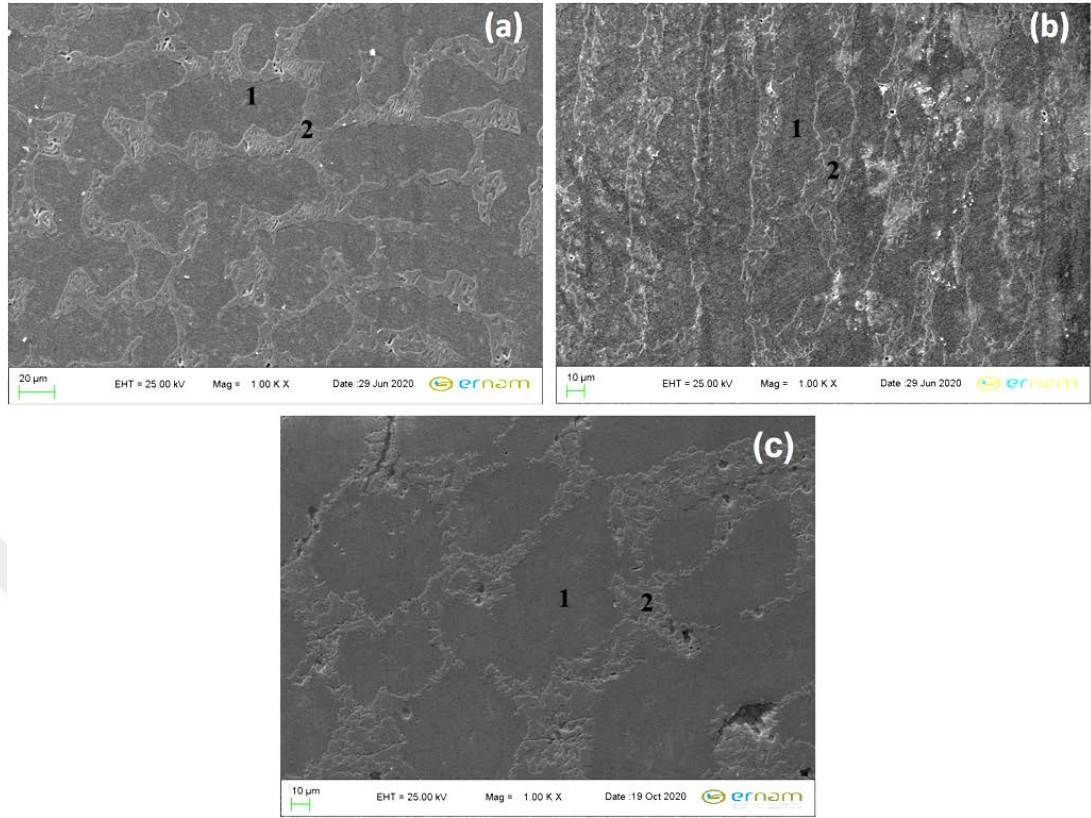
Tablo 3.14. Alaşım 6 örneğinin ısıtma işlem ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları.

| Örnek | Faz Dönüşüm Sıcaklıkları (°C) |           |       |       |           |       |             |             |                     |
|-------|-------------------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------------|-------------|---------------------|
|       | $A_s$                         | $A_{max}$ | $A_f$ | $M_s$ | $M_{max}$ | $M_f$ | $M_s - M_f$ | $A_f - A_s$ | $A_{max} - M_{max}$ |
| 6A    | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 6B    | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 6C    | 506,7                         | 521,7     | 551,6 | 514,3 | 494,3     | 474,3 | 40          | 44,9        | 27,4                |
| 6D    | 501,7                         | 516,7     | 531,7 | 509,3 | 494,3     | 479,3 | 30          | 30          | 22,4                |
| 6E1   | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 6E2   | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 6E3   | -                             | -         | -     | 606,4 | 591,2     | 556,3 | 50,1        | -           | -                   |

Alaşım 6'nın ısıı işlemli rneklerinin SEM görüntüleri şekil 3.45 (a–d)'de gösterilmektedir. Literatürle uyumlu olarak (Czaja et al., 2018) Alaşım 6 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Sn}_{18,5}\text{Mo}_1$ ) rnekleri için tüm mikroyapılarda dentritik katılaşma oluşumları gözlenmektedir. Genel olarak mikroyapılarda 2 faz oluşumu (1 ve 2 ile gösterilen) gözlenmektedir. 6A, 6B, 6C ve 6D rnekleri incelendiğinde homojenizasyon süresindeki artışın 2 ile gösterilen dentrit yapılarının büyümesine ve daha düzensiz bir hal almasına neden olduğu görülmektedir. 6E1, 6E2 ve 6E3 yapıları incelendiğinde şekil 3.46 b'de dentritik yapıların (2) ekstrüzyon yönünde oluşumları net bir şekilde görülmektedir. 1050 °C'de ekstrüzyon yapılan 6E3 örneğindeki bu yapılar (2) kabalaşmış ve daha düzensiz halde gzlmektedir.

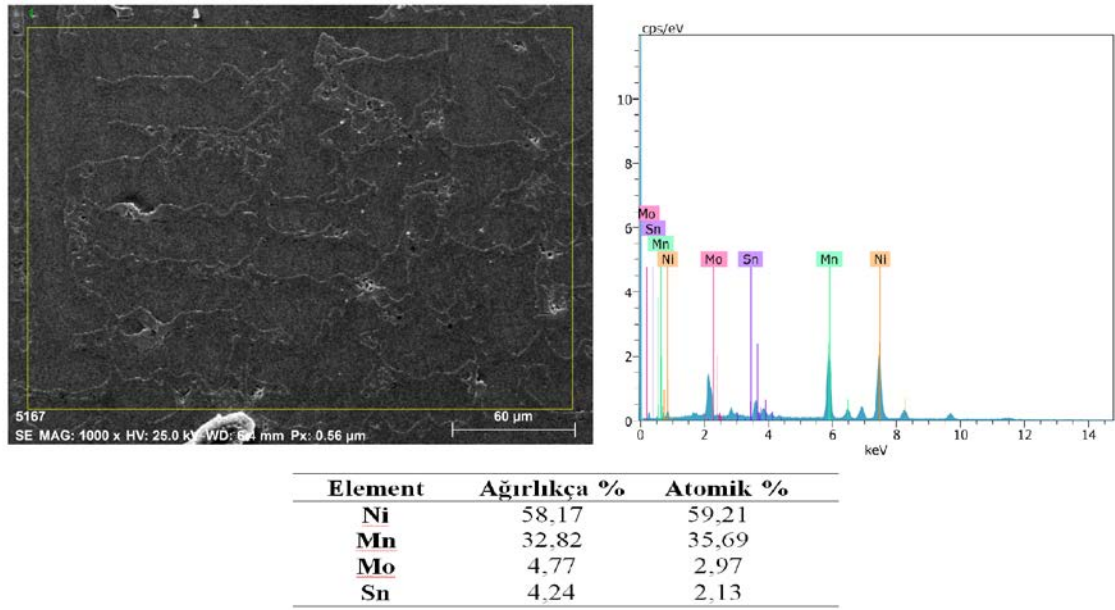


şekil 3.45. 6A (a), 6B (b), 6C (c) ve 6D (d) rneklerinin SEM görüntüleri.

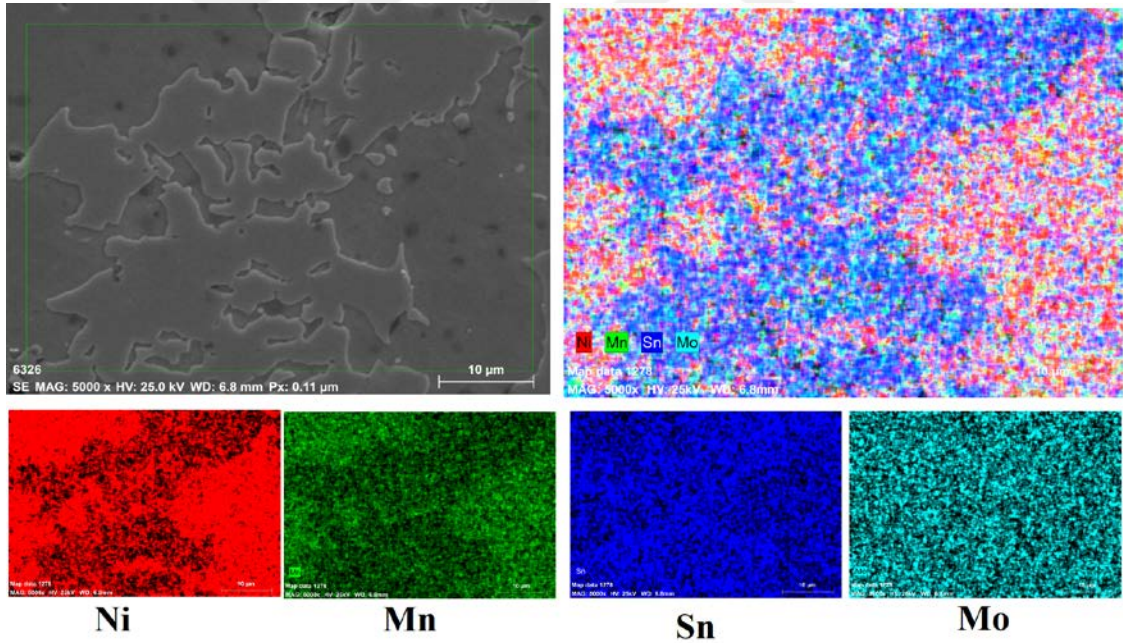


Şekil 3.46. 6E1 (a), 6E2 (b) ve 6E3 (c) örneklerinin SEM görüntüleri.

Şekil 3.47 ve 3.48’de Alaşım 6’dan elde edilen EDX ve MAPPING sonuçları gösterilmiştir. Bu sonuçlardan Alaşım 6’da meydana gelen dentritik faz yapısının (2) Sn elementi bakımından zengin olduğu, Ni ve Mn bakımından fakir olduğu anlaşılmaktadır. Mo elementi tüm morfoloji içerisinde homojen olarak gözlenmektedir. Öte yandan, interdendritik faz olan dış alan (1); daha az Sn ve daha fazla Mn ve Ni içerir.

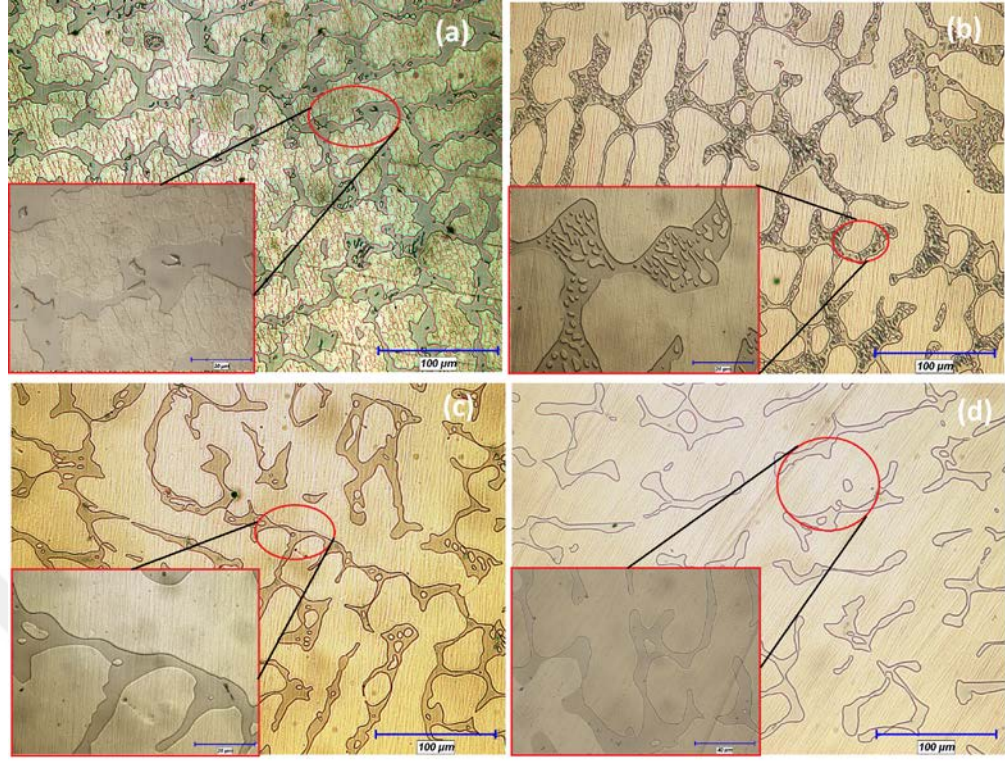


Şekil 3.47. Alaşım 6 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri.

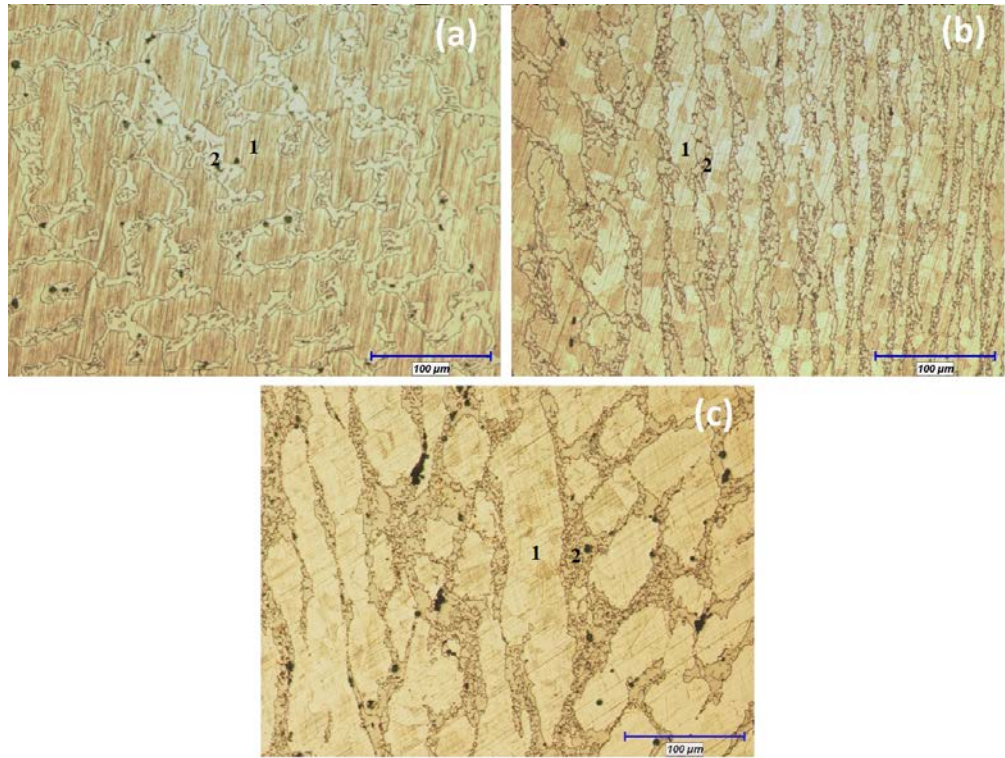


Şekil 3.48. Alaşım 6 numunesi için elde edilen MAPPING analizi sonucu.

Şekil.3.49’da optik mikroskop fotoğrafları görülen Alaşım 6 örneklerinde homojenizasyon süresindeki artış ile dentritik fazların daha düzensiz hale geldiği görülmektedir. Şekil 3.50’deki ekstrüzyon yapılmış olan örneklerde dentritik yapıların (2) interdentritik faz (1) içerisinde ekstrüzyon yönünde şekil aldıkları görülmektedir.

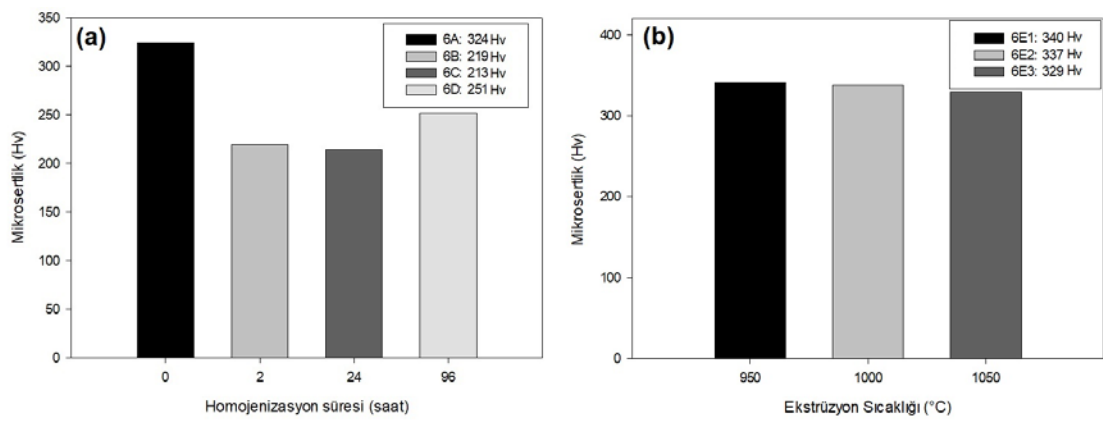


Şekil 3.49. 6A (a), 6B (b), 6C (c) ve 6D (d) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 3.50. 6E1(a), 6E2 (b) ve 6E3 (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.

Alaşım 6 örnekleri için homojenizasyon süresi ve ekstrüzyon sıcaklığına bağlı olarak mikrosertlik değerleri Şekil 3.51’de gösterilmiştir. Homojenizasyon süresine bağlı olarak mikrosertlik değerleri önce azalmış sonra 96 saat süreyle homojenize edilen 6D numunesinde bir miktar artmıştır. Bunun yanında Alaşım 6’nın ekstrüzyon yapılmış olan tüm örneklerinin mikrosertlik değerleri homojenize edilmiş olan örneklerle göre kayda değer bir şekilde yüksektir. 1050 ° C de ekstrüzyon yapılmış olan 6E3 örneğinin mikrosertlik değeri diğer ekstrüzyonlu örneklerle göre en düşüktür.



Şekil 3.51. Alaşım 6 numunesi için ısıtıl işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış (b) örneklerin mikrosertlik değerleri.

### 3.7. Alaşım 7 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{19,5}$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular

Alaşım 7’nin homojenizasyon işlemine tabi tutularak buzlu suda soğutulan örneklerinin (7A, 7B, 7C, 7D) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş haliyle Şekil 3.52’de gösterilmiştir.

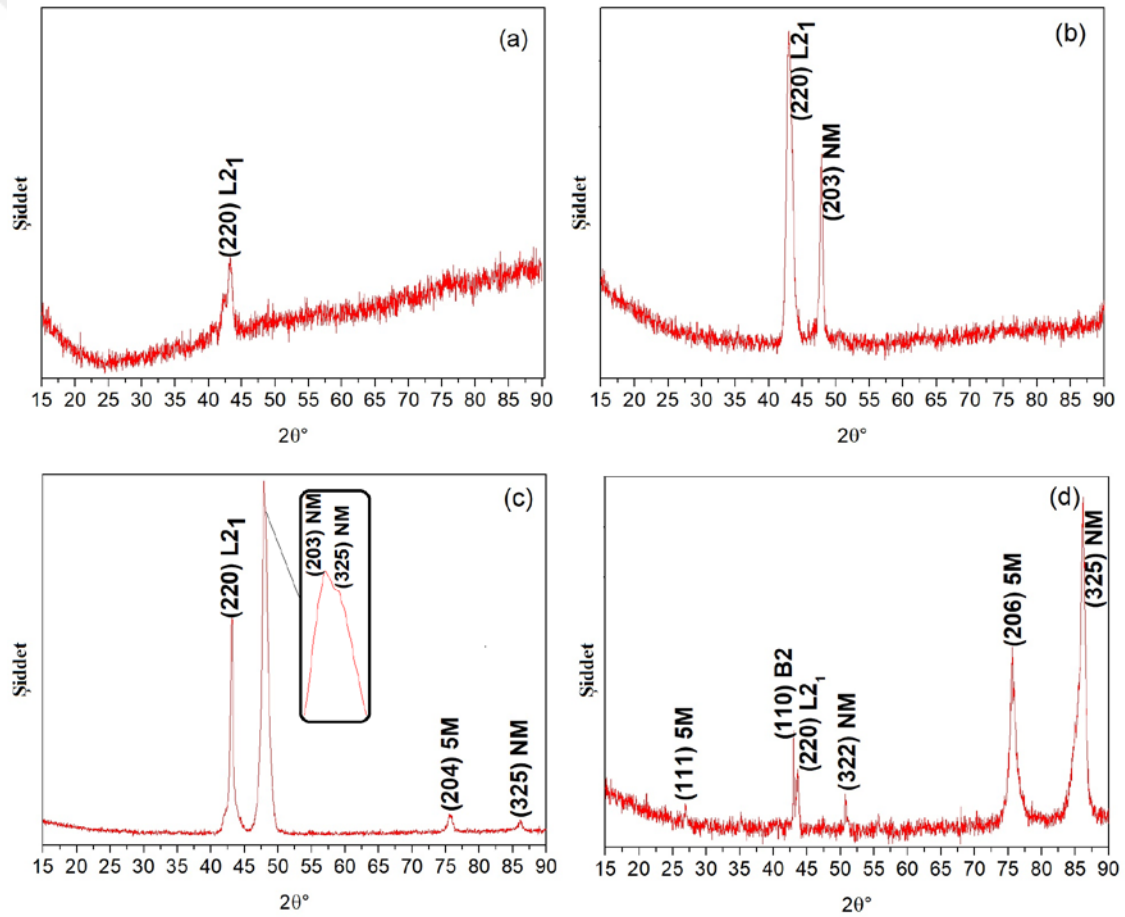
7A örneğinin X-ışını kırınım grafiğinden  $L2_1$  fazına sahip olduğu görülmüştür. Bu fazın kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,912 Å olarak hesaplandı.

7B örneğinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$  ve NM fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,949 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır

7C örneğinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu belirlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,932 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (410) ve (325) yansıma düzlemleri

kullanılarak  $a=7,776 \text{ \AA}$  ve  $c=6,620 \text{ \AA}$  olarak bulundu. 5M fazı kafes parametrelerini hesaplamak için yeterli yansıma düzlemlerine sahip değildir.

7D örneğinin X-ışını difraktogramından B2, L2<sub>1</sub>, NM ve 5M fazlarına sahip olduğu görülmüştür. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak  $2,973 \text{ \AA}$  olarak bulundu. L2<sub>1</sub> fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak  $5,867 \text{ \AA}$  olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (322) ve (325) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,721 \text{ \AA}$  ve  $c=6,636 \text{ \AA}$  olarak tespit edildi. 5M fazının kafes parametreleri (111) ve (205) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,809 \text{ \AA}$  ve  $c=5,585 \text{ \AA}$  olarak bulundu.



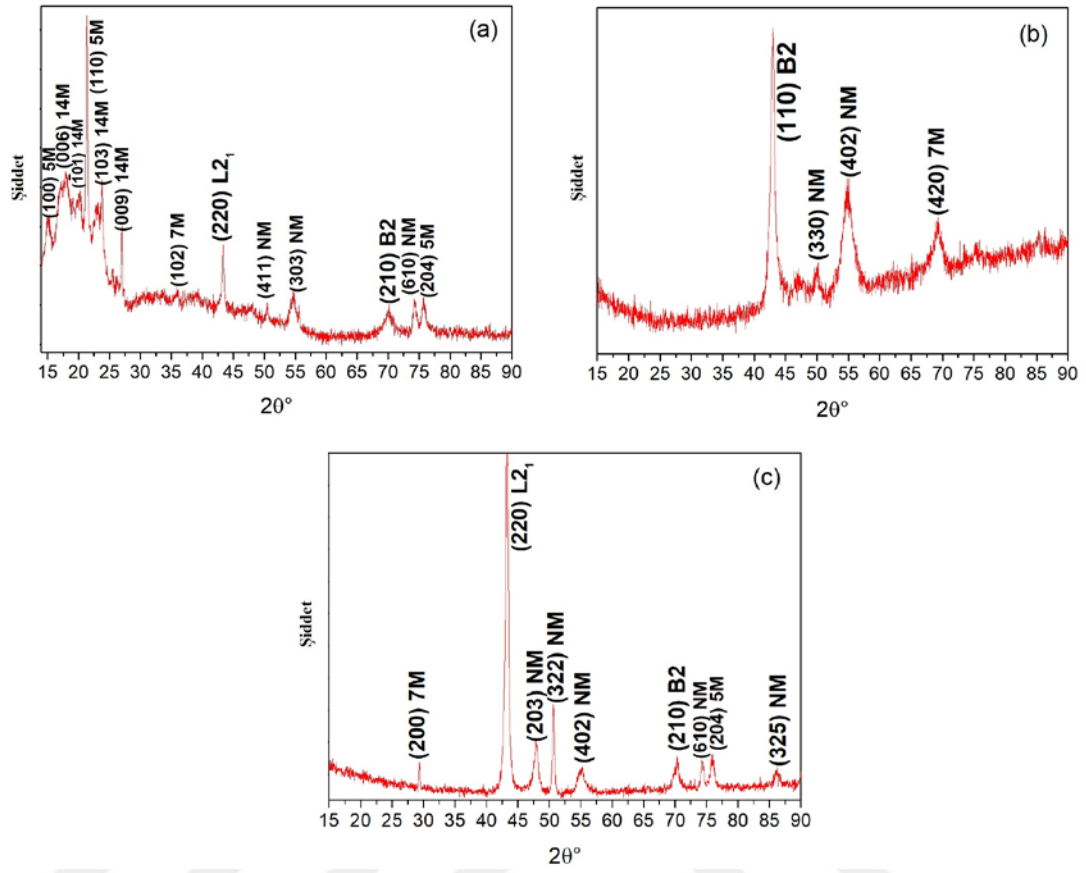
Şekil 3.52. 7A (a), 7B (b), 7C (c) ve 7D (d) örneklerinin XRD sonuçları.

Farklı sıcaklıklarda ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş Alaşım 7 örneklerinin (7E1, 7E2, 7E3) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş halde Şekil 3.53'te gösterilmiştir.

7E1 örneğinin X-ışını difraktogramından B2, L<sub>21</sub>, NM, 5M, 7M ve 14M fazlarına sahip olduğu görülmüştür. B2 fazının kafes parametresi (210) yansıma düzlemi kullanılarak 3,003 Å olarak hesaplandı. L<sub>21</sub> fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,903 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (303) ve (610) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,765$  Å ve  $c=6,629$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (100) ve (204) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,889$  Å ve  $c=5,553$  Å olarak hesaplandı. 7M ve 14M fazlarının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.

7E2 numunesinin X-ışını difraktogramından B2, NM ve 7M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 2,976 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (330) ve (402) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,742$  Å ve  $c=6,665$  Å olarak bulundu. 7M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.

7E3 numunesinin X-ışını difraktogramından B2, L<sub>21</sub>, NM, 5M ve 7M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir. B2 fazının kafes parametresi (210) yansıma düzlemi kullanılarak 2,995 Å olarak hesaplandı. L<sub>21</sub> fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,901 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (322) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,800$  Å ve  $c=6,525$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır. Tablo 3.15'de Alaşım 7 örnekleri için hesaplanan kafes parametreleri, Tablo 3.16'da oluşan bazı fazların tane boyutları verilmiştir. Homojenizasyon süresindeki artış (220) düzlemindeki L<sub>21</sub> fazının tane boyutlarının artmasına neden olmuştur. Ekstrüzyon yapılmış olan örneklerde bu fazın tane boyutu daha da büyümüştür.



Şekil 3.53. 7E1 (a), 7E2 (b) ve 7E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları.

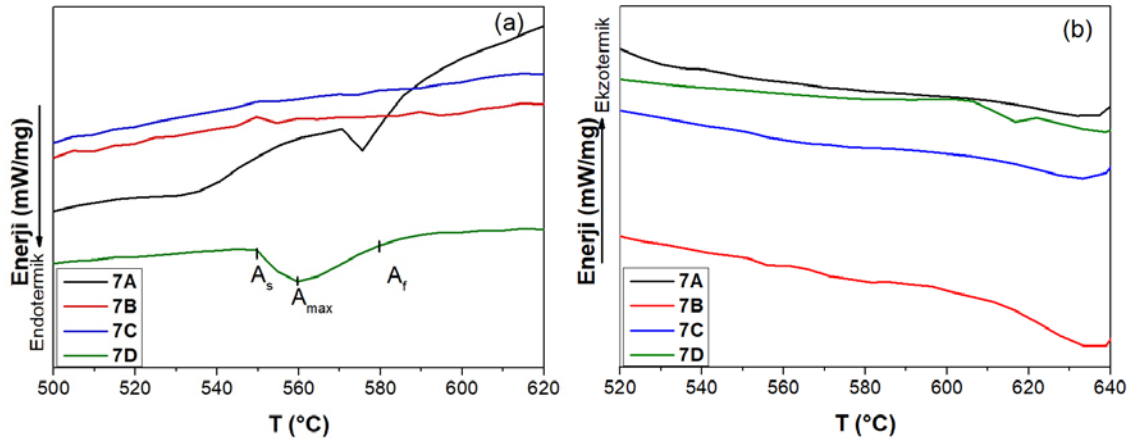
Tablo 3.15. Alaşım 7 örneği için hesaplanan kafes parametreleri.

| Örnek | B2       | L2 <sub>1</sub> | NM                    |                       |            | 5M                    |                       |            |
|-------|----------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------|
|       | <i>a</i> | <i>a</i>        | <i>a<sub>NM</sub></i> | <i>c<sub>NM</sub></i> | <i>c/a</i> | <i>a<sub>5M</sub></i> | <i>c<sub>5M</sub></i> | <i>c/a</i> |
| 7A    | -        | 5,912           | -                     | -                     | -          | -                     | -                     | -          |
| 7B    | -        | 5,949           | -                     | -                     | -          | -                     | -                     | -          |
| 7C    | -        | 5,932           | 7,776                 | 6,620                 | 0,851      | -                     | -                     | -          |
| 7D    | 2,973    | 5,867           | 7,721                 | 6,636                 | 0,859      | 5,809                 | 5,585                 | 0,961      |
| 7E1   | 3,003    | 5,903           | 7,765                 | 6,629                 | 0,854      | 5,889                 | 5,553                 | 0,943      |
| 7E2   | 2,976    | -               | 7,742                 | 6,665                 | 0,861      | -                     | -                     | -          |
| 7E3   | 2,995    | 5,901           | 7,800                 | 6,525                 | 0,837      | -                     | -                     | -          |

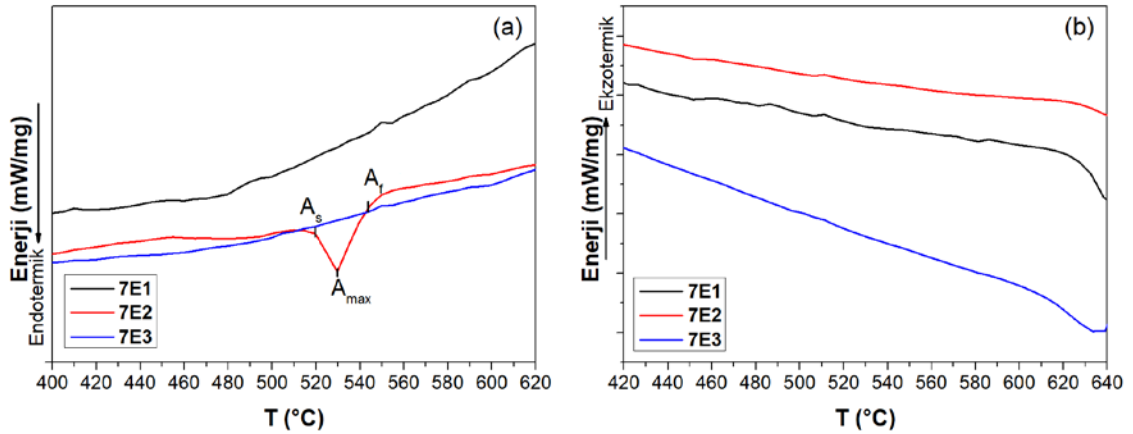
Tablo 3.16. Alaşım 7 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.

| Örnek | Tane Boyutu (nm)     |         |         |         |
|-------|----------------------|---------|---------|---------|
|       | (220)L2 <sub>1</sub> | (203)NM | (325)NM | (204)5M |
| 7A    | 15,22                | -       | -       | -       |
| 7B    | 18,54                | 34,82   | -       | -       |
| 7C    | 33,39                | 26,13   | 21,78   | 16,38   |
| 7D    | 33,45                | -       | 21,78   | -       |
| 7E1   | 41,76                | -       | -       | 16,12   |
| 7E2   | -                    | -       | -       | -       |
| 7E3   | 55,70                | 33,98   | 10,89   | 19,68   |

Isıl işlem ve ekstrüzyon yapılmış Alaşım 7 örneklerine ait DSC eğrileri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 3.54 ve 3.55'te gösterilmiştir. Isıtma ve soğutma sonucu DSC ile elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları Tablo 3.17'de özetlenmiştir. Isıl işlem yapılmış örnekler incelendiğinde yalnızca 7A ve 7D örneklerinde ısıtma sırasında bir östenit geçiş sıcaklığı gözlenirse de soğutmada bir dönüşüm gözlenmemiştir. Ekstrüzyon örnekleri incelendiğinde 7E2 örneğinde yalnızca ısıtma sırasında belirgin bir östenit geçiş sıcaklığı gözlenmiştir. Bunun dışında herhangi bir dönüşüm gözlenen örneğe rastlanmamıştır.



Şekil 3. 54. 7A, 7B, 7C ve 7D örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma (b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri.



Şekil 3.55. 7E1, 7E2 ve 7E3 örneklerinin 20 °C/dakika hızda ısıtma (a) ve soğutma (b) rejimi uygulanarak elde edilen DSC analizi eğrileri.

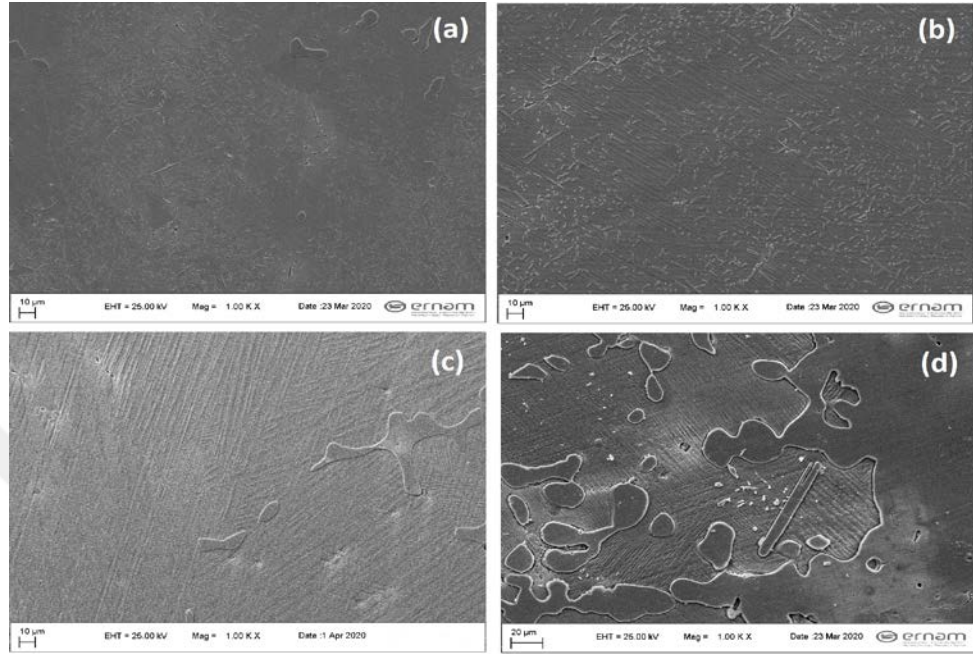
Tablo 3.17. Alaşım 7 örneğinin ısıtma işlemi ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları.

| Örnek | Faz Dönüşüm Sıcaklıkları (°C) |           |       |       |           |       |           |           |                   |
|-------|-------------------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-----------|-----------|-------------------|
|       | $A_s$                         | $A_{max}$ | $A_f$ | $M_s$ | $M_{max}$ | $M_f$ | $M_s-M_f$ | $A_f-A_s$ | $A_{max}-M_{max}$ |
| 7A    | 570,6                         | 575,6     | 585,6 | -     | -         | -     | -         | 15        | -                 |
| 7B    | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -         | -         | -                 |
| 7C    | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -         | -         | -                 |
| 7D    | 549,7                         | 559,7     | 579,6 | -     | -         | -     | -         | 29,9      | -                 |
| 7E1   | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -         | -         | -                 |
| 7E2   | 519,7                         | 529,7     | 544,7 | -     | -         | -     | -         | 25        | -                 |
| 7E3   | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -         | -         | -                 |

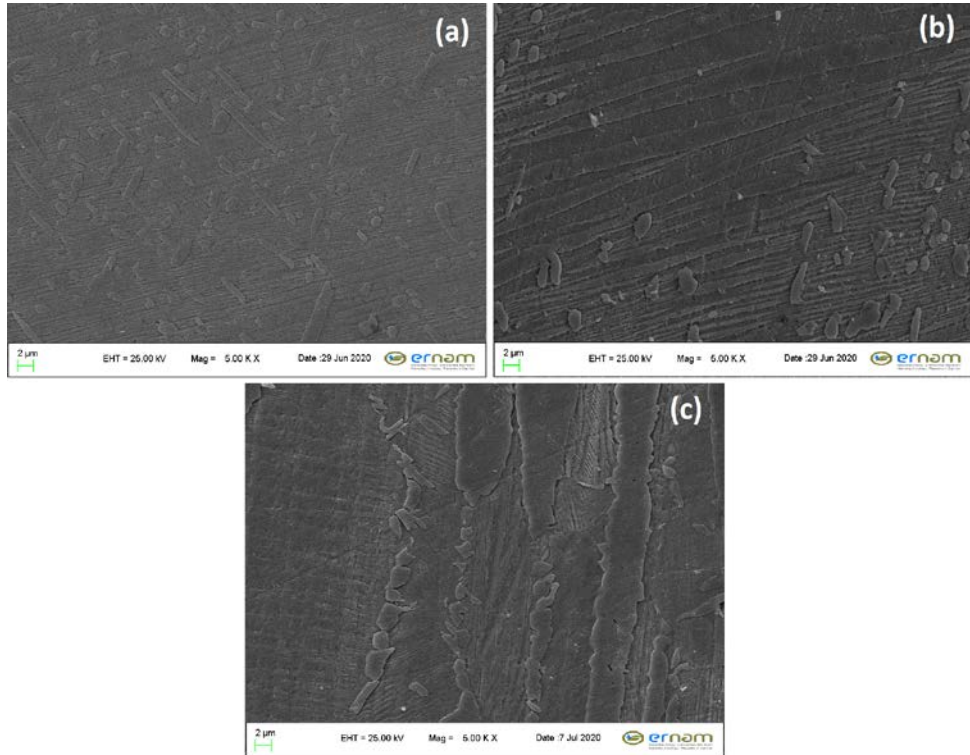
Isıl işlemlili Alaşım 7 örneklerinin SEM görüntüleri Şekil 3.56 (a–d)'da gösterilmektedir. Tüm örneklerde martenzit morfolojisine sahip faz içerisinde çökelmiş ve tane sınırlarında oluşmuş iki ayrı faz yapısı gözlenmektedir. Homojenizasyon süresindeki artış ile daha önce söz edilen numunelere benzer şekilde yapıda oluşan fazların büyüdüğü ve daha belirgin hale geldiği gözlenmektedir. Bunun yanında başlangıçta nispeten düzenli görünüme sahip olan çökeltiler ve ikincil fazlar homojenizasyon süresindeki artış ile daha düzensiz hale gelmiştir.

Ekstrüzyon işlemine tabi tutulan Alaşım 7 örneklerinin SEM fotoğrafları Şekil 3.57 (a–c)'de gösterilmiştir. Yapı içerisindeki fazların ekstrüzyon yönünde şekillerinin değiştiği açıkça görülmektedir. Isıl işlemlili örneklerde olduğu gibi bu örneklerde de çökelti ve ikincil faz yapıları gözlenmektedir. Tüm örneklerde gözlenen bu faz yapılarının Şekil 3.58 ve 3.59'da verilen EDX ve MAPPING sonuçları incelendiğinde, çökeltilerin Ni ve

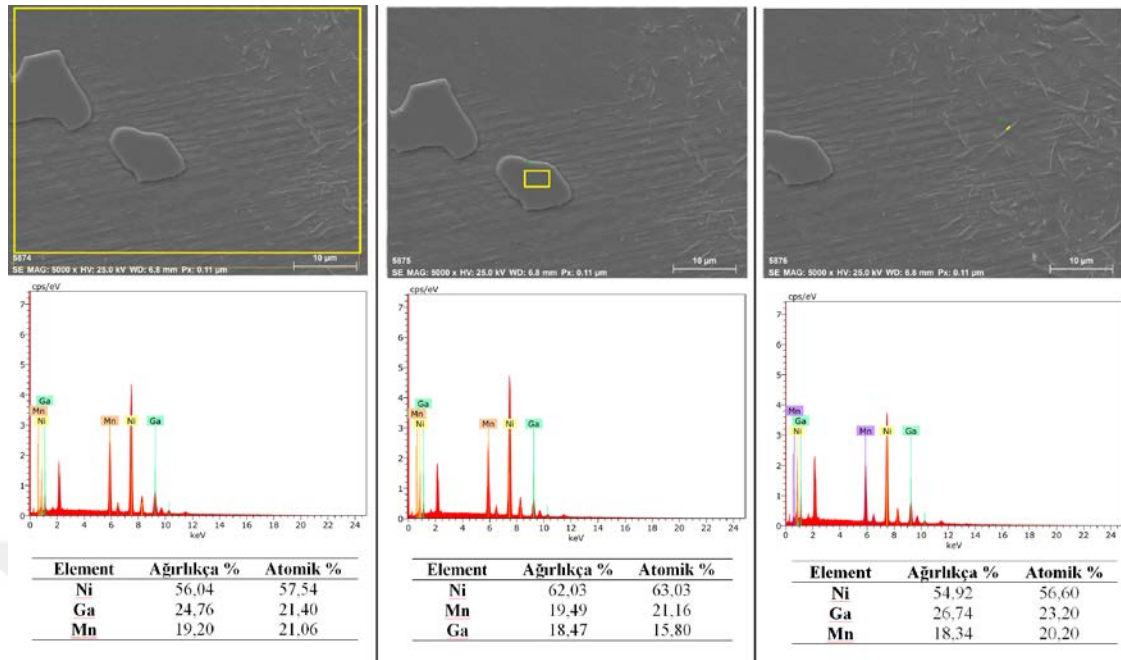
Ga bakımından zengin olduğu, ikincil olarak oluşan tanelerin ise Ni elementi bakımından daha zengin olduğu anlaşılmaktadır.



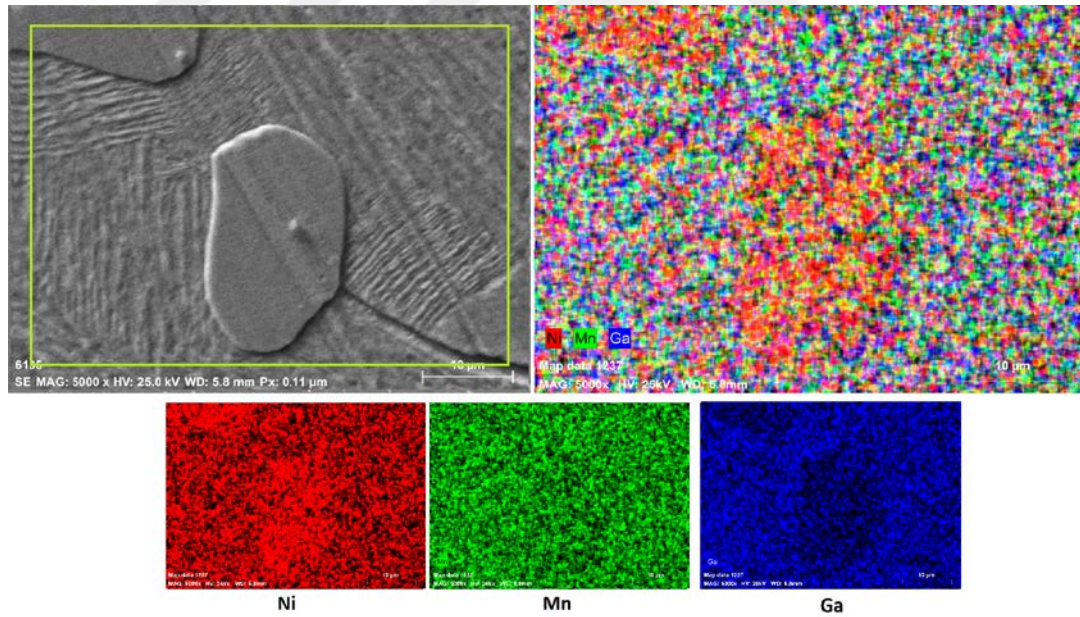
Şekil 3.56. 7A (a), 7B (b), 7C (c) ve 7D (d) örneklerinin SEM görüntüleri.



Şekil 3.57. 7E1 (a), 7E2 (b) ve 7E3 (c) örneklerinin SEM görüntüleri.



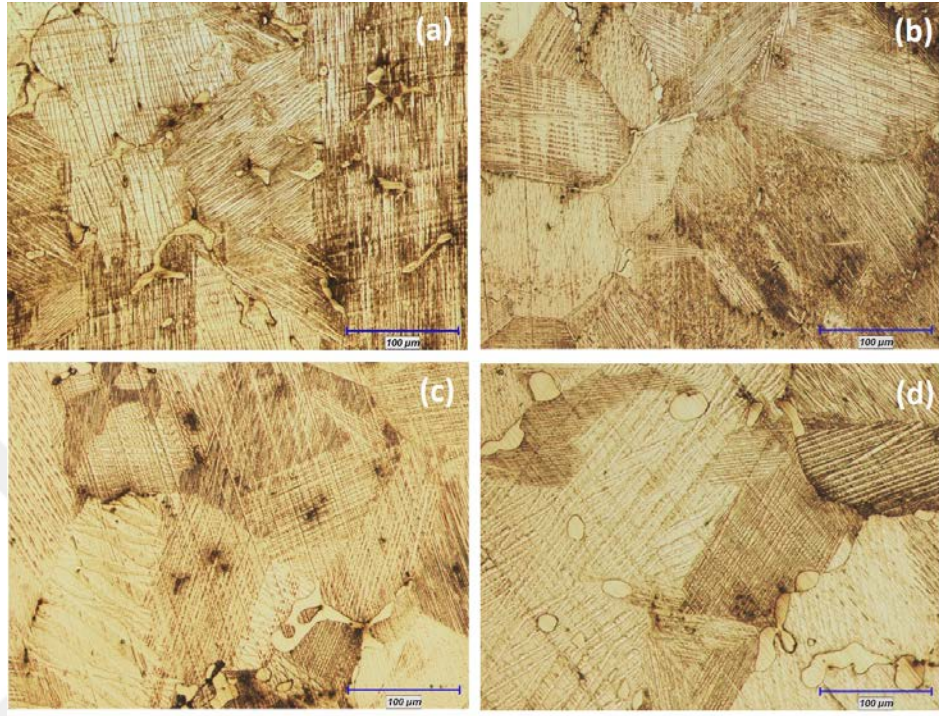
Şekil 3.58. Alaşım 7 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri.



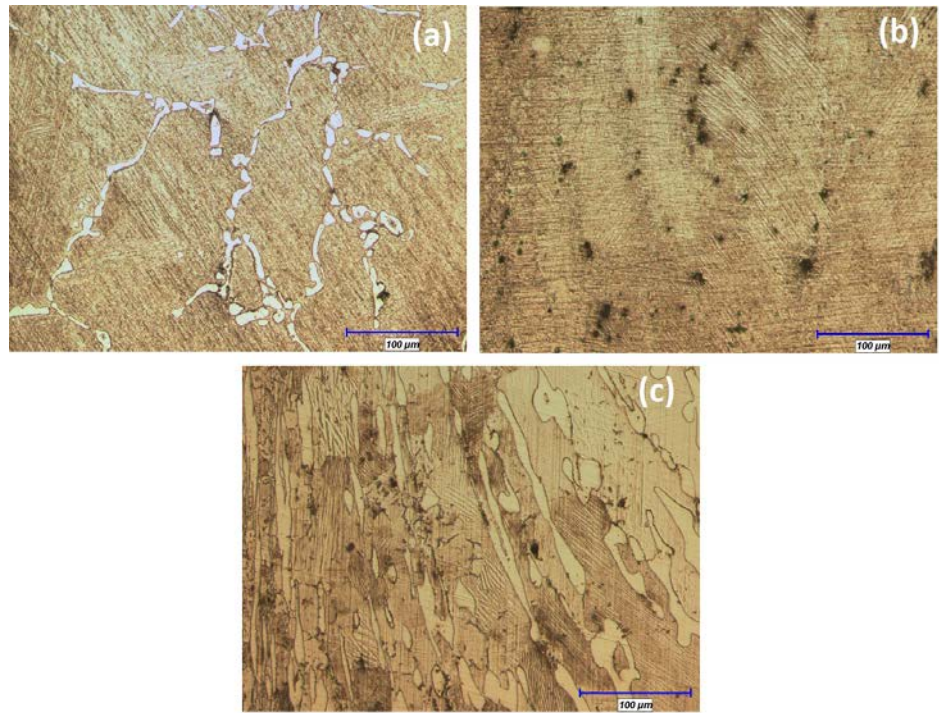
Şekil 3.59. Alaşım 7 numunesi için elde edilen MAPPING analizi sonucu.

Şekil 3.60'ta optik mikroskop fotoğrafları görülen Alaşım 7 örneklerinde ısıtıl işlem süresindeki artış ile martenzit fazların daha belirgin hale geldiği ve tane sınırlarının genişlediği açıkça görülmektedir. Her örnekte farklı martenzit morfolojilerinin elde edildiği anlaşılmaktadır. Eksterüzyon yapılmış olan örnekler incelendiğinde (Şekil 3.61)

1050 °C’de ekstrüzyon yapılmış olan 7E3 örneğinde martenzit ve ekstrüzyon yönünde şekil almış ikincil fazlar gözlenmektedir.

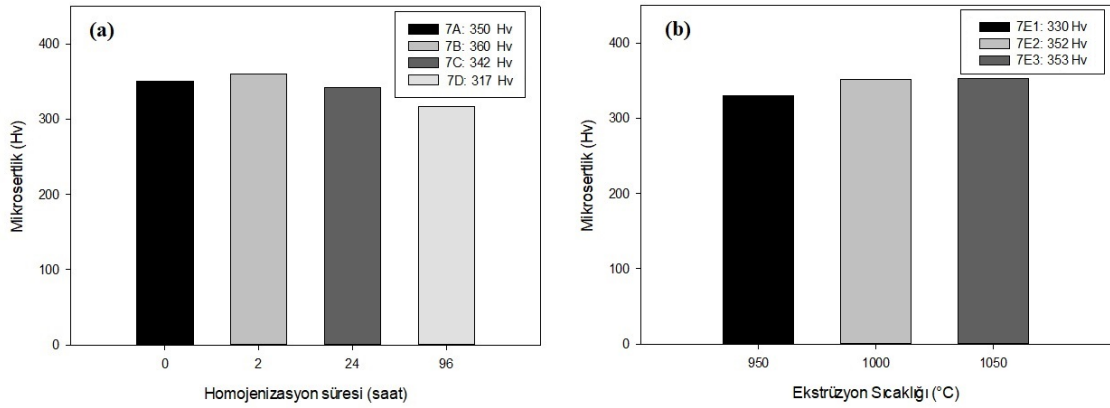


Şekil 3. 60. 7A (a), 7B (b), 7C (c) ve 7D (d) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 3.61. 7E1 (a), 7E2 (b) ve 7E3 (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.

Alaşım 7 örnekleri için homojenizasyon süresi ve ekstrüzyon sıcaklığına bağlı olarak mikrosertlik değerleri Şekil 3.62’de sunulmuştur. Homojenizasyon süresindeki artış ile beraber mikrosertlik değerleri başlangıçta bir miktar artmış olsada süre arttıkça azalma eğilimine girmiştir. Bunun yanında Alaşım 7’nin ekstrüzyon yapılmış olan tüm örneklerinin mikrosertlik değerlerinde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.



Şekil 3.62. Alaşım 7 numunesi için ısıtıl işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış (b) örneklerin mikrosertlik değerleri.

### 3.8. Alaşım 8 ( $\text{Ni}_{55}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{20}$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular

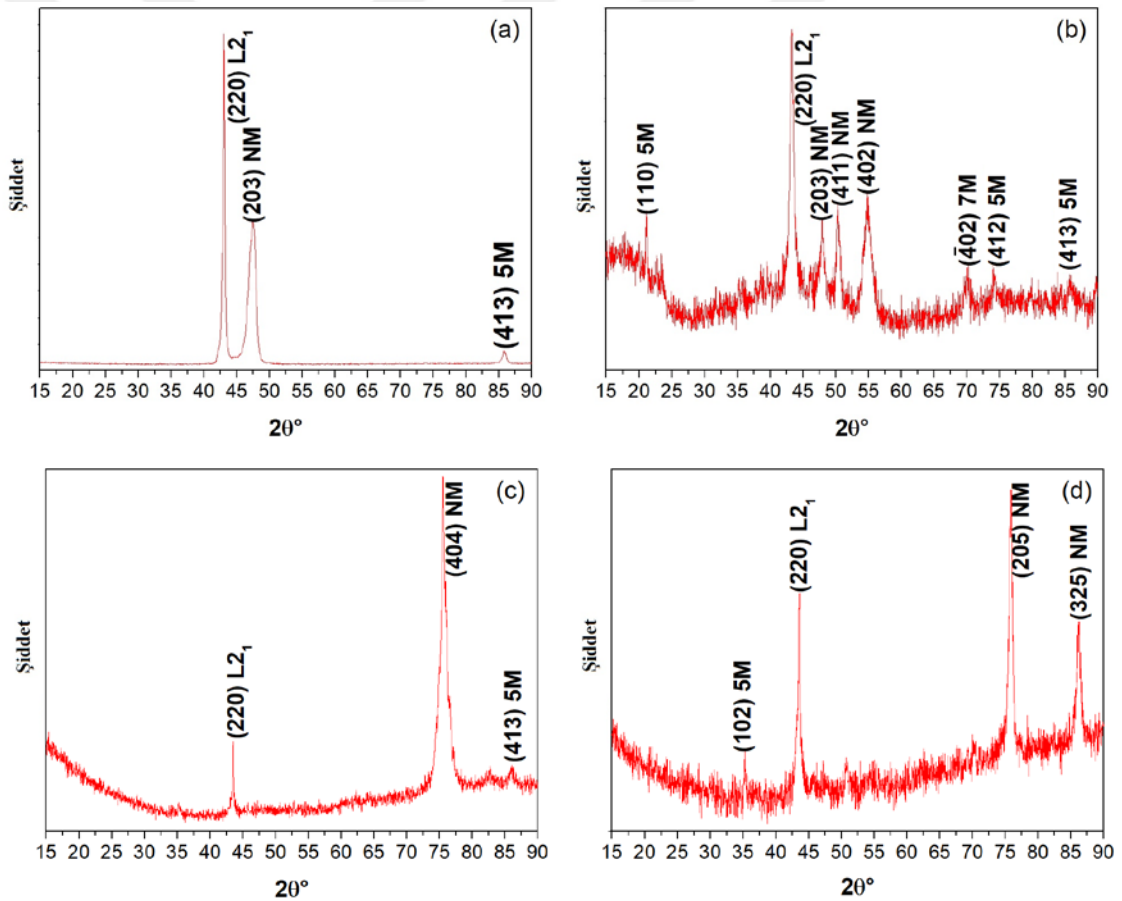
Alaşım 8’in homojenizasyon işlemine tabi tutularak buzlu suda soğutulan örneklerinin (8A, 8B, 8C, 8D) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş haliyle Şekil 3.63’te sunulmuştur.

8A örneğinin X-ışını kırınım grafiğinden  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,934 Å olarak hesaplandı. NM ve 5M fazlarının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.

8B örneğinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM, 5M ve 7M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,910 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,784$  Å ve  $c=6,522$  Å olarak belirlendi. 5M fazının kafes parametreleri (110) ve (412) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,957$  Å ve  $c=5,472$  Å olarak hesaplanmıştır. 7M fazının kafes parametreleri hesaplama için gerekli yansıma düzlemleri olmadığından elde edilememiştir.

8C örneğinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu belirlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,883 Å olarak bulundu. NM ve 5M fazları kafes parametrelerini hesaplamak için yeterli yansıma düzlemlerine sahip değildir.

8D örneğinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,873 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (205) ve (325) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,732$  Å ve  $c=6,629$  Å olarak tespit edildi. 5M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.



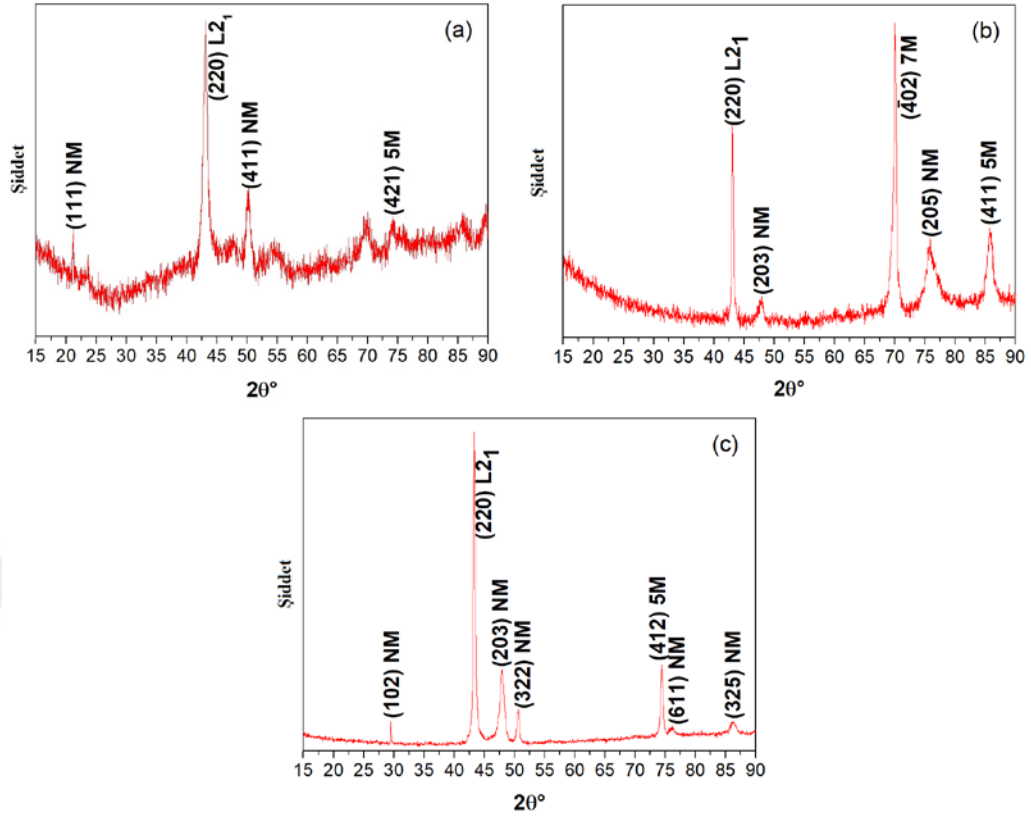
Şekil 3.63. 8A (a), 8B (b), 8C (c) ve 8D (d) örneklerinin XRD sonuçları.

Ekstrüzyon yapılmış olan Alaşım 8 örneklerinin (8E1, 8E2, 8E3) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş şekilde Şekil 3.64'te gösterilmiştir.

8E1 örneğinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,933 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (111) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,811$  Å ve  $c=6,458$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.

8E2 numunesinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM, 5M ve 7M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,941 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (205) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,263$  Å ve  $c=6,698$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametrelerinin hesaplanması için yeterli yansıma düzlemine sahip olmadığı görülmüştür.

8E3 numunesinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,909 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (322) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,806$  Å ve  $c=6,518$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır. Tablo 3.18'de Alaşım 8 örnekleri için hesaplanan kafes parametreleri, Tablo 3.19'da meydana gelen bazı fazların tane boyutları listelenmiştir.



Şekil 3.64. 8E1 (a), 8E2 (b) ve 8E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları.

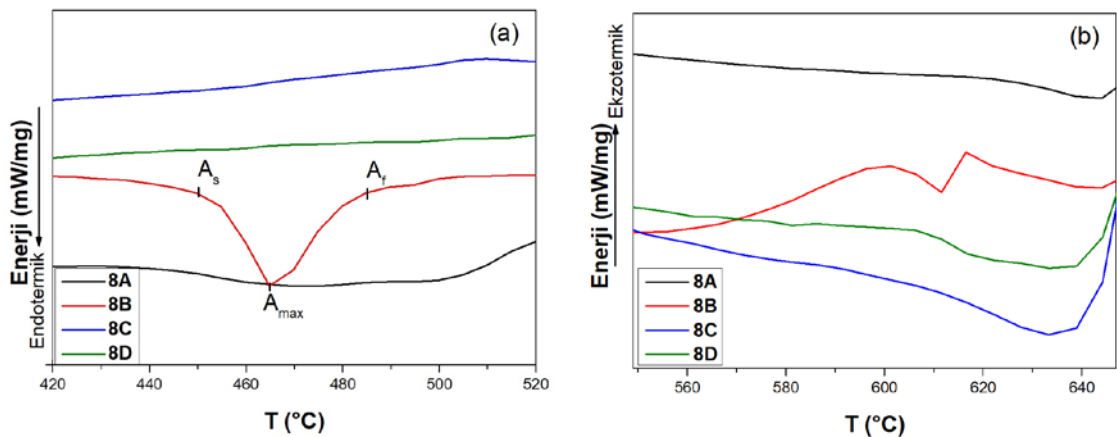
Tablo 3.18. Alaşım 8 örneği için hesaplanan kafes parametreleri.

| Örnek | L2 <sub>1</sub>         | NM                    |                       |            | 5M                    |                       |            |
|-------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------|
|       | Kafes Parametreleri (Å) |                       |                       |            |                       |                       |            |
|       | <i>a</i>                | <i>a<sub>NM</sub></i> | <i>c<sub>NM</sub></i> | <i>c/a</i> | <i>a<sub>5M</sub></i> | <i>c<sub>5M</sub></i> | <i>c/a</i> |
| 8A    | 5,934                   | -                     | -                     | -          | -                     | -                     | -          |
| 8B    | 5,910                   | 7,784                 | 6,522                 | 0,838      | 5,957                 | 5,472                 | 0,919      |
| 8C    | 5,883                   | -                     | -                     | -          | -                     | -                     | -          |
| 8D    | 5,873                   | 7,732                 | 6,629                 | 0,857      | -                     | -                     | -          |
| 8E1   | 5,933                   | 7,811                 | 6,458                 | 0,827      | -                     | -                     | -          |
| 8E2   | 5,941                   | 7,263                 | 6,698                 | 0,922      | -                     | -                     | -          |
| 8E3   | 5,909                   | 7,806                 | 6,518                 | 0,835      | -                     | -                     | -          |

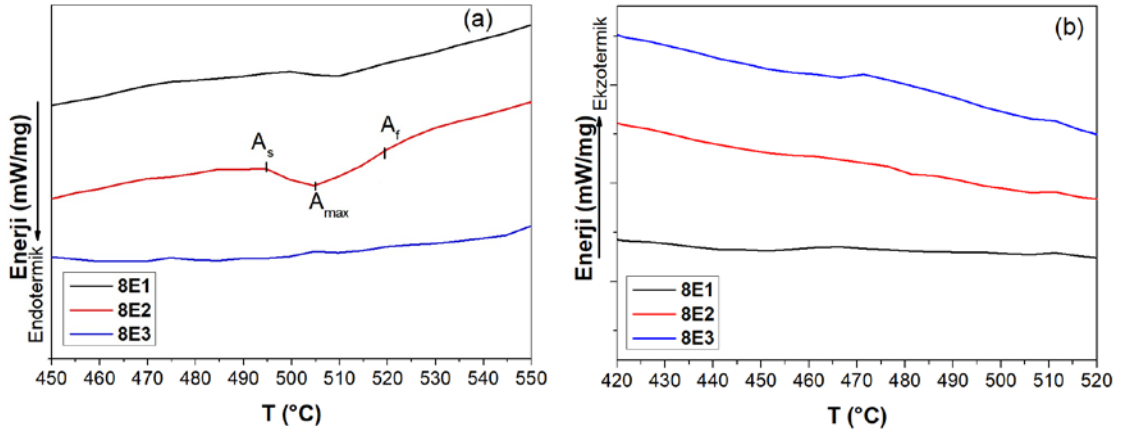
Tablo 3.19. Alaşım 8 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.

| Örnek | Tane Boyutu (nm)     |         |
|-------|----------------------|---------|
|       | (220)L2 <sub>1</sub> | (203)NM |
| 8A    | 91,28                | 46,36   |
| 8B    | 47,72                | 28,32   |
| 8C    | 83,61                | -       |
| 8D    | 41,80                | -       |
| 8E1   | 27,82                | -       |
| 8E2   | 33,39                | 12,13   |
| 8E3   | 41,76                | 42,47   |

Alaşım 8 için ısıtıl işlem ve ekstrüzyon yapılmış örnekler için DSC eğrileri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 3.65 ve 3.66'da gösterilmektedir. Ayrıca ısıtma ve soğutma sonucu DSC ile elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları Tablo 3.20'de özetlenmiştir. 8A, 8B, 8C ve 8D örnekleri incelendiğinde belirgin bir dönüşüm eğrisi yalnızca 2 saat homojenize edilerek buzlu suda soğutulan 8B'de görülmüştür. 8B örneği için Tablo 3.19 ve Şekil 3.62'ye bakılırsa (221) düzlemindeki L2<sub>1</sub> fazının tane boyutunun azaldığı ve yapıdaki NM faz miktarının arttığı gözlenmektedir. Soğutma sırasında eğride bir kırılma gözlenirse de bunun bir dönüşüm olduğunu söylemek doğru olmayacaktır. Farklı sıcaklıklarda ekstrüzyon işlemi uygulanmış olan örneklerde yalnızca 1000 °C'de işlem görmüş olan 8E2'de östenit geçiş sıcaklığı gözlenmiştir. Burada  $A_f$  ve  $A_s$  arasındaki fark ( $A_f - A_s$ ) 8B örneğine göre azalmıştır. Daha önce dönüşüm gözlenen örneklerde olduğu gibi ekstrüzyon yapılmış olan örneklerdeki durum da göz önüne alındığında ekstrüzyon işleminin dönüşüm için gerekli olan sürücü kuvveti azalttığını söylemek mümkündür.



Şekil 3.65. 8A (a), 8B (b), 8C (c) ve 8D (d) örneklerinin DSC analizi sonuçları.

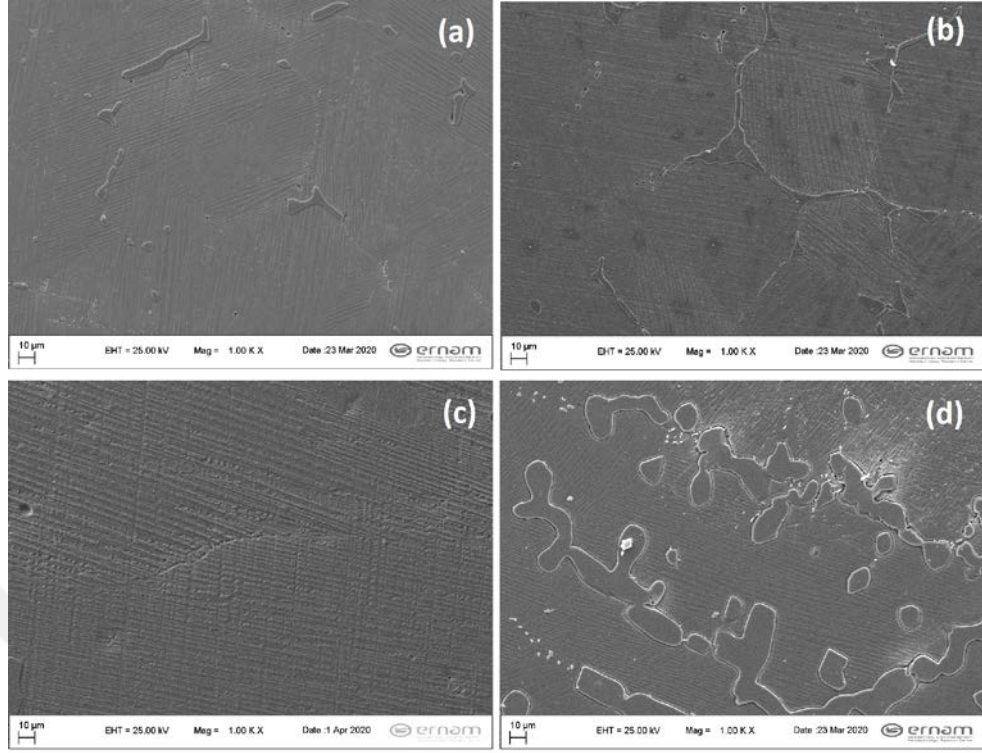


Şekil 3.66. 8E1 (a), 8E2 (b) ve 8E3 (c) örneklerinin DSC analizi sonuçları.

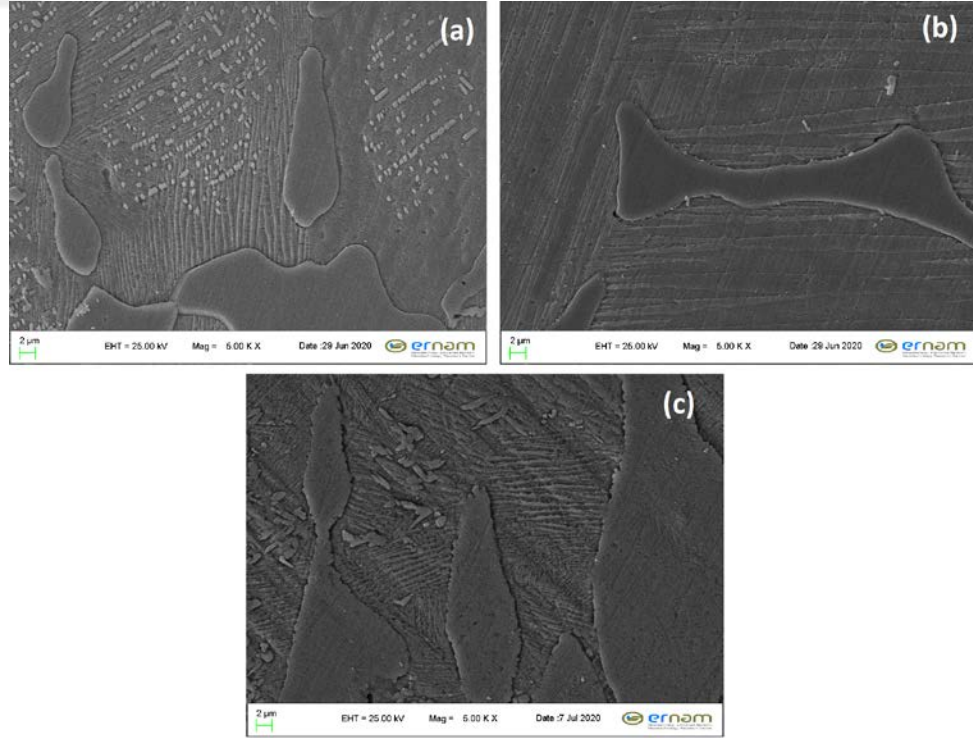
Tablo 3.20. Alaşım 8 örneğinin ısıtma işlemi ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları.

| Örnek | Faz Dönüşüm Sıcaklıkları (°C) |           |       |       |           |       |             |             |                     |
|-------|-------------------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------------|-------------|---------------------|
|       | $A_s$                         | $A_{max}$ | $A_f$ | $M_s$ | $M_{max}$ | $M_f$ | $M_s - M_f$ | $A_f - A_s$ | $A_{max} - M_{max}$ |
| 8A    | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 8B    | 444,9                         | 464,8     | 484,8 | -     | -         | -     | -           | 39,9        | -                   |
| 8C    | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 8D    | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 8E1   | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 8E2   | 494,8                         | 504,7     | 519,7 | -     | -         | -     | -           | 24,9        | -                   |
| 8E3   | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |

Isıl işlemlili örneklerden (8 (A-D)) alınan SEM görüntüleri Şekil 3.67 (a-d)'de sunulmuştur. 8A ve 8B örneklerinde martenzit morfolojisine sahip fazın tane sınırlarında oluşmuş ikincil faz yapıları meydana gelmiştir. 8C örneğinde yapı daha çok martenzit fazından oluşmuştur. 8D örneğinde ikincil fazların kabalaştığı ve nispeten düzensizleştiği görülmektedir. Ekstrüzyon yapılmış olan 8E1, 8E2 ve 8E3 örneklerinin SEM görüntüleri Şekil 3.68 (a-c)'de görülmektedir. Tüm örneklerde martenzit morfolojileri ve ekstrüzyon yönünde uzayan ikincil faz yapıları gözlenmiştir. 1000 °C'de ekstrüzyon yapılmış olan 8E2 örneğinde martenzit plakalarının ve ikincil fazın kabalaştığı anlaşılmıştır.

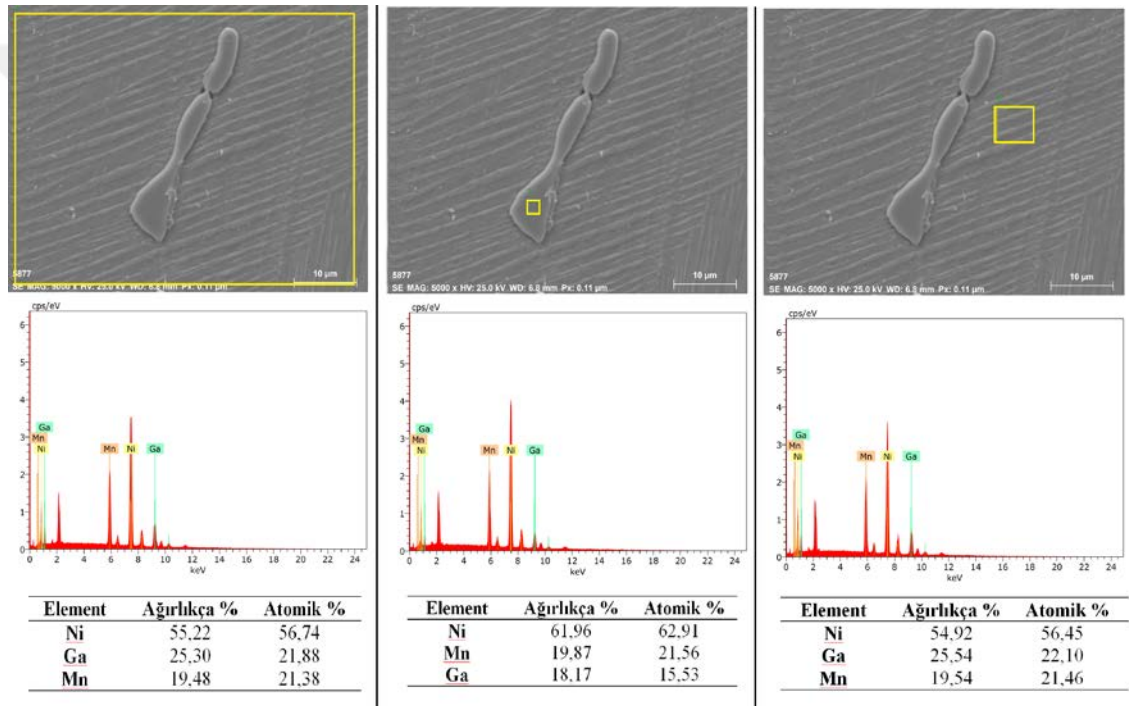


Şekil 3.67. 8A (a), 8B (b), 8C (c) ve 8D (d) örneklerinin SEM görüntüleri.

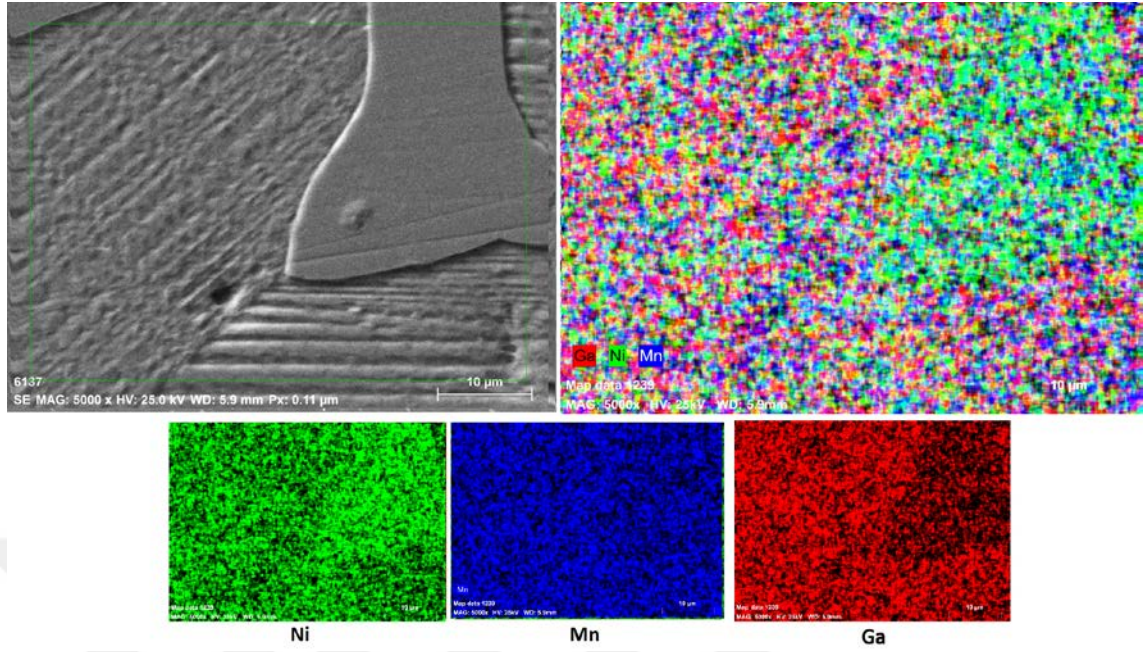


Şekil 3.68. 8E1 (a), 8E2 (b) ve 8E3 (c) örneklerinin SEM görüntüleri.

Alaşım 8'den elde edilen EDX ve MAPPING sonuçları şekil 3.69 ve 3.70'te gösterilmiştir. Buradan Alaşım 8'deki genel morfolojinin Ni bakımından zengin olduğu görülmektedir. Yapıda meydana gelen ikincil fazlar Ni bakımından oldukça zengin olmasının yanında Mn bakımından çok az bir farkla Ga'dan daha zengindir. Martenzit faz yapısında ise Ni ve Ga bakımından zengin Mn bakımından nispeten fakirdir. MAPPING analizinden tüm elementlerin yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilerken, Ni elementinin daha çok ikincil faz içerisinde yoğunluk gösterdiği anlaşılmaktadır.

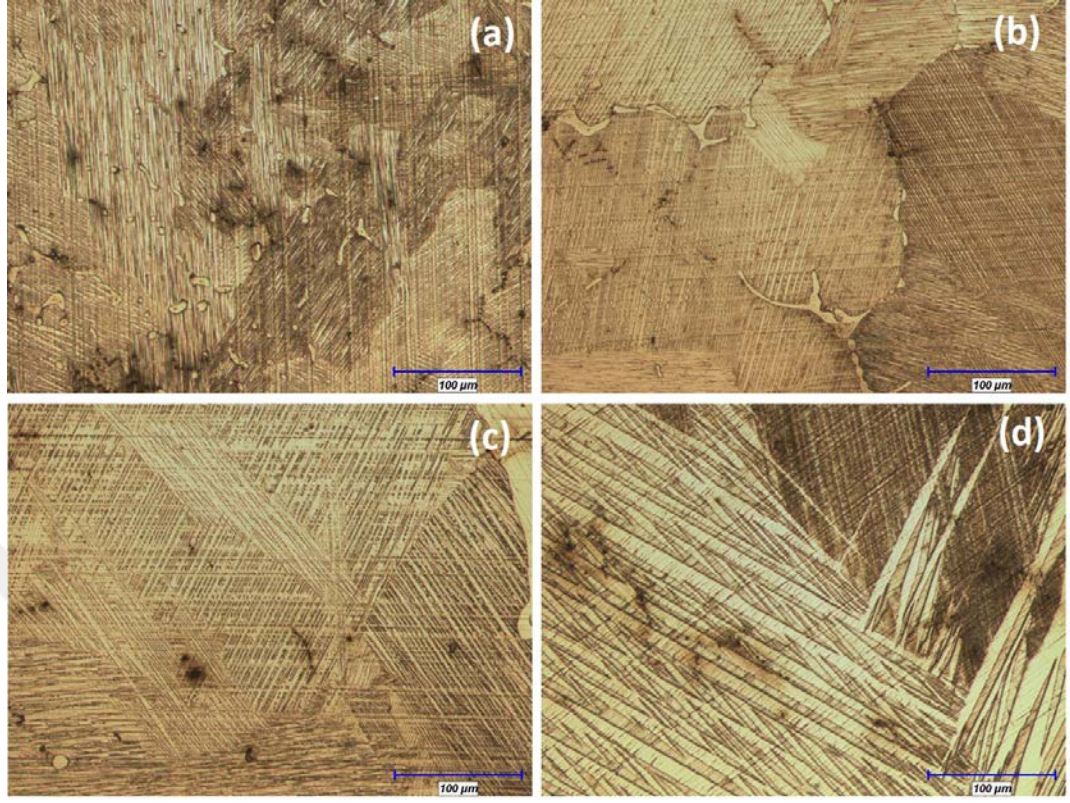


şekil 3.69. Alaşım 8 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri.

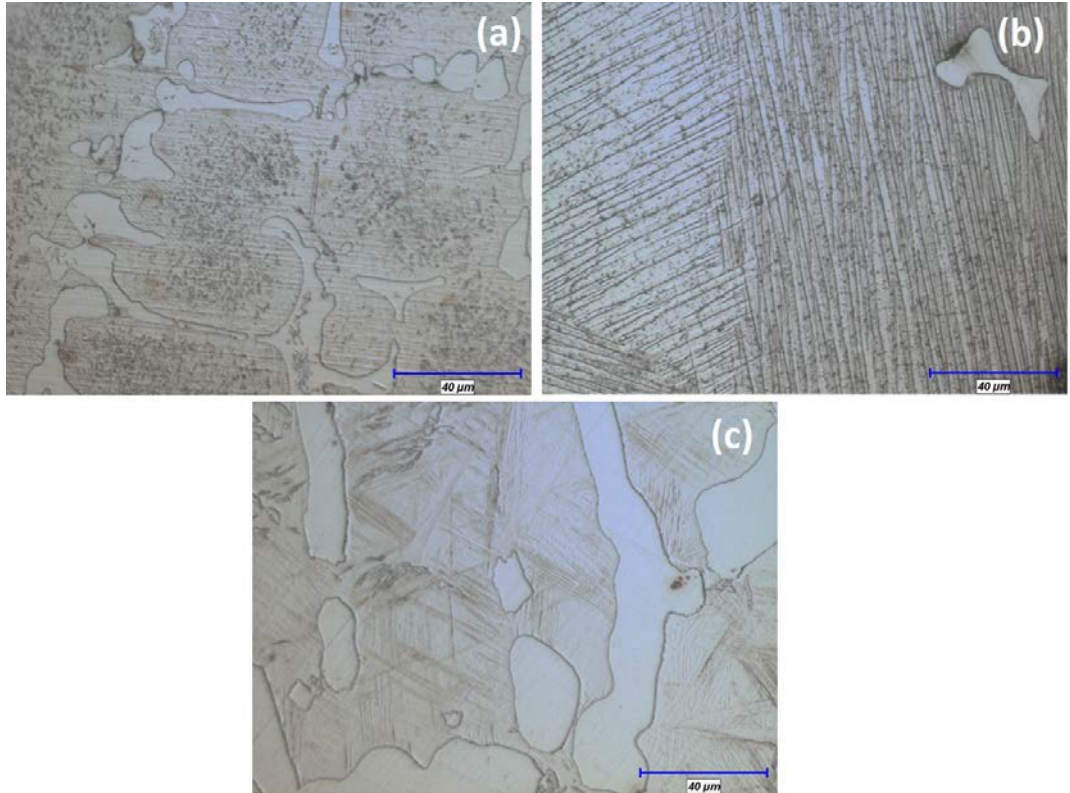


Şekil 3.70. Alaşım 8 numunesi için döküm sonrası elde edilen MAPPING analizi sonucu.

Şekil 3.71’de optik mikroskop fotoğrafları görülen Alaşım 8 örneklerinde ısıtıl işlem süresindeki artış ile martenzit fazların kabalaşarak daha belirgin hale geldiği görülmektedir. 96 saat homojenizasyon işlemine tabi tutulmuş 8D örneğinde birbiri arasında belirgin bir açı ile yönelimlenmiş ve birbirleriyle uyumlu (self accommodated) martenzit plakalarının yoğun bir şekilde dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Alaşım 8’in ekstrüzyon yapılmış olan örnekleri Şekil 3.72’de sunulmuştur. 8E2 örneğinde meydana gelen martenzit fazının diğer iki örneğe göre daha belirgin olduğu görülmektedir.

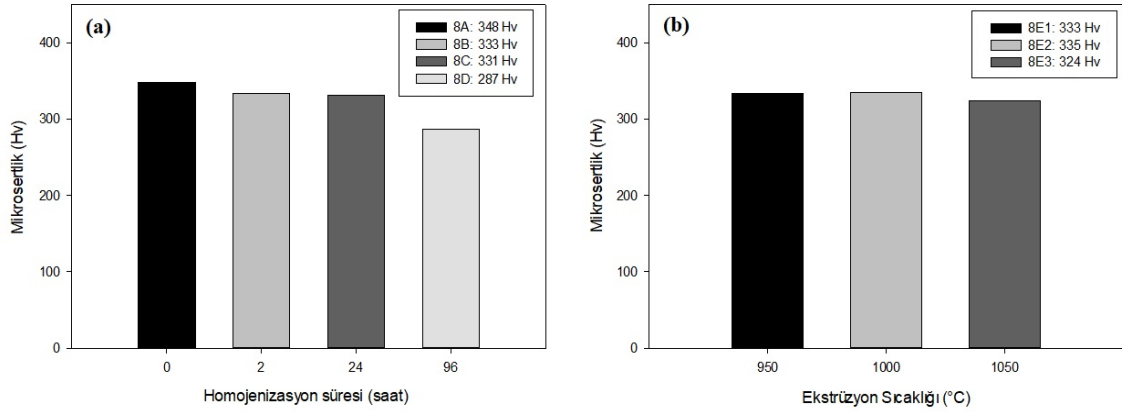


Şekil 3.71. 8A (a), 8B (b), 8C (c) ve 8D (d) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 3.72. 8E1 (a), 8E2 (b) ve 8E3 (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.

Alaşım 8 örnekleri için homojenizasyon süresi ve ekstrüzyon sıcaklığına bağlı olarak mikrosertlik değerleri Şekil 3.73'te gösterilmiştir. Homojenizasyon süresindeki artış ile mikrosertlik değerleri azalmıştır. Bunun yanında Alaşım 8'in ekstrüzyon yapılmış olan tüm örneklerinin mikrosertlik değerleri belirgin bir değişiklik göstermemiştir.



Şekil 3.73. Alaşım 8 numunesi için ısıtıl işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış (b) örneklerin mikrosertlik değerleri.

### 3.9. Alaşım 9 ( $\text{Ni}_{55}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{19}\text{Mo}_1$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular

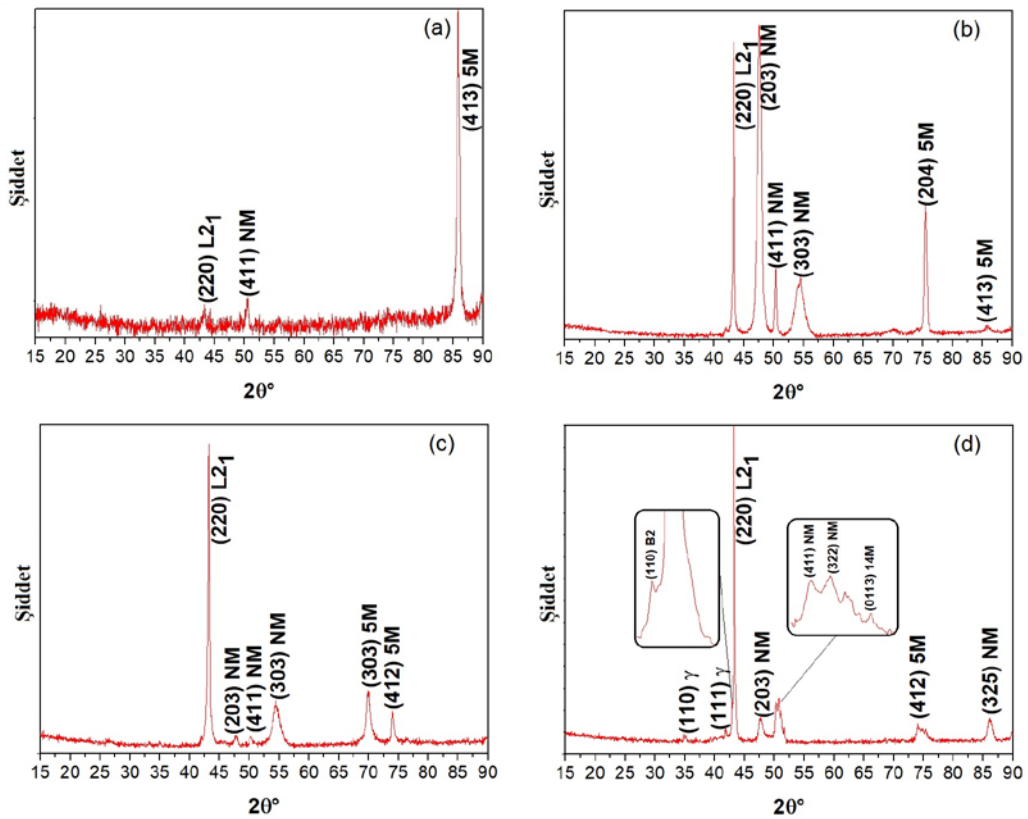
Homojenizasyon işlemine tabi tutularak buzlu suda soğutulan 9A, 9B, 9C ve 9D örneklerinin X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş haliyle Şekil 3.74'te gösterilmiştir.

9A örneğinin X-ışını kırınım grafiğinden  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,927 Å olarak hesaplandı. NM ve 5M fazlarının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.

9B örneğinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ , B2,  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $\gamma$  fazının kafes parametresi (111) yansıma düzlemi kullanılarak 3,726 Å olarak bulundu. B2 fazının kafes parametresi (111) yansıma düzlemi kullanılarak 2,945 Å olarak hesaplandı.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,912 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (330) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,777$  Å ve  $c=6,586$  Å olarak belirlendi. 5M fazının kafes parametreleri (204) ve (413) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,869$  Å ve  $c=5,584$  Å olarak hesaplanmıştır.

9C örneğinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM, 5M ve 14M fazlarına sahip olduğu belirlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,920 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,792$  Å ve  $c=6,553$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (303) ve (412) yansıma düzlemlerinden  $a=5,971$  Å ve  $c=5,471$  Å olarak tespit edildi. 14M fazı kafes parametrelerini hesaplamak için yeterli yansıma düzlemlerine sahip değildir.

9D örneğinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ , B2,  $L2_1$ , NM, 5M ve 7M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $\gamma$  fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 3,641 Å olarak hesaplandı. B2 fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemlerinden 2,982 Å olarak bulundu.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,920 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemlerinden  $a=7,785$  Å ve  $c=6,588$  Å olarak tespit edildi. 5M ve 14M fazlarının kafes parametrelerini hesaplamak için yeterli yansıma düzlemi olmadığından tespit edilememiştir.

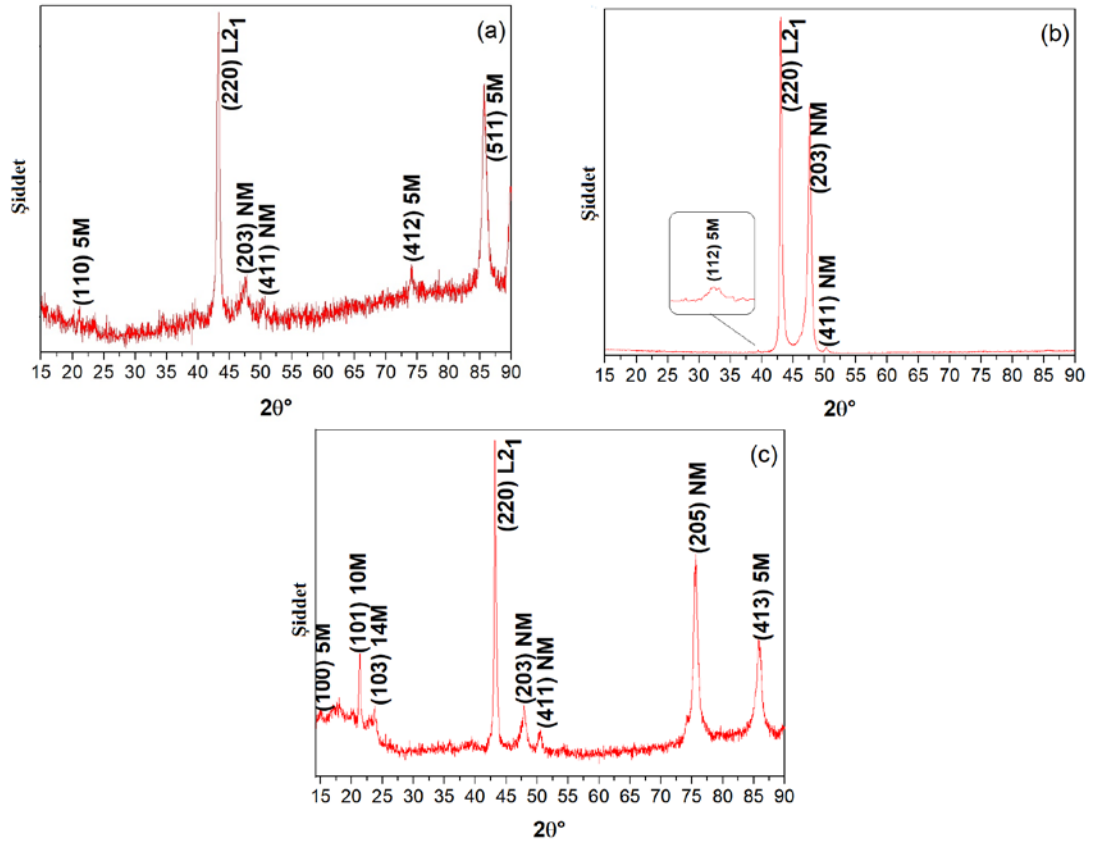


Şekil 3.74. 9A (a), 9B (b), 9C (c) ve 9D (d) örneklerinin XRD sonuçları.

Ekstrüzyon yapılmış olan Alaşım 9 örneklerinin (9E1, 9E2, 9E3) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş halde Şekil 3.75'te sunulmuştur. 9E1 örneğinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu görülmüştür  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemlerinden  $5,911 \text{ Å}$  olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemlerinden  $a=7,767 \text{ Å}$  ve  $c=6,596 \text{ Å}$  olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (110) ve (412) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,980 \text{ Å}$  ve  $c=5,432 \text{ Å}$  olarak hesaplandı.

9E2 numunesinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak  $5,941 \text{ Å}$  olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemlerinden  $a=7,773 \text{ Å}$  ve  $c=6,561 \text{ Å}$  olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (112) ve (511) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,904 \text{ Å}$  ve  $c=5,465 \text{ Å}$  olarak hesaplandı.

9E3 numunesinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM, 5M, 10M ve 14M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak  $5,941 \text{ Å}$  olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemlerinden  $a=7,761 \text{ Å}$  ve  $c=6,535 \text{ Å}$  olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (100) ve (413) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,917 \text{ Å}$  ve  $c=5,518 \text{ Å}$  olarak hesaplandı. 10M ve 14M fazlarının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır. Tablo 3.21'de Alaşım 9 örnekleri için hesaplanan kafes parametreleri, Tablo 3.22'de meydana gelen bazı fazların hesaplanan tane boyutları listelenmiştir.



Şekil 3.75. 9E1 (a), 9E2 (b) ve 9E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları.

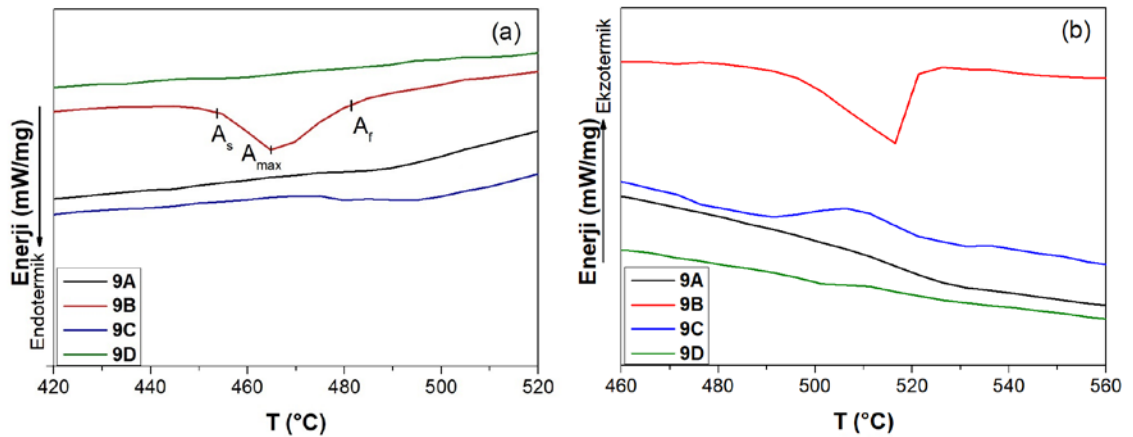
Tablo 3.21 Alaşım 9 örneği için hesaplanan kafes parametreleri.

| Örnek | $\gamma$                | B2    | L2 <sub>1</sub> | NM       |          |       | 5M       |          |       |
|-------|-------------------------|-------|-----------------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|
|       | Kafes Parametreleri (Å) |       |                 |          |          |       |          |          |       |
|       | $a$                     | $a$   | $a$             | $a_{NM}$ | $c_{NM}$ | $c/a$ | $a_{5M}$ | $c_{5M}$ | $c/a$ |
| 9A    | -                       | -     | 5,927           | -        | -        | -     | -        | -        | -     |
| 9B    | 3,726                   | 2,945 | 5,912           | 7,777    | 6,586    | 0,847 | 5,869    | 5,584    | 0,951 |
| 9C    | -                       | -     | 5,920           | 7,792    | 6,553    | 0,841 | 5,971    | 5,471    | 0,916 |
| 9D    | 3,641                   | 2,982 | 5,920           | 7,785    | 6,588    | 0,846 | -        | -        | -     |
| 9E1   | -                       | -     | 5,911           | 7,767    | 6,596    | 0,849 | 5,980    | 5,432    | 0,908 |
| 9E2   | -                       | -     | 5,941           | 7,773    | 6,561    | 0,844 | 5,904    | 5,465    | 0,926 |
| 9E3   | -                       | -     | 5,941           | 7,761    | 6,535    | 0,842 | 5,917    | 5,518    | 0,933 |

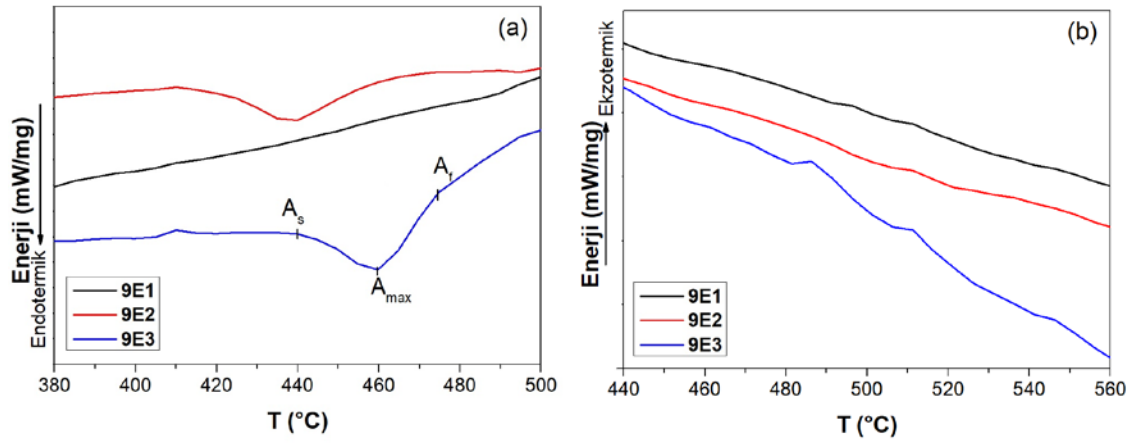
Tablo 3.22. Alaşım 9 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.

| Örnek | Tane Boyutu (nm)     |         |         |         |
|-------|----------------------|---------|---------|---------|
|       | (220)L2 <sub>1</sub> | (203)NM | (411)NM | (413)5M |
| 9A    | 13,91                | -       | 21,46   | 49,66   |
| 9B    | 66,83                | 56,63   | 49,00   | 12,42   |
| 9C    | 66,81                | 14,15   | 21,43   | -       |
| 9D    | 111,26               | 33,94   | 57,16   | -       |
| 9E1   | 55,68                | 10,60   | 14,30   | -       |
| 9E2   | 91,26                | 23,20   | 31,26   | -       |
| 9E3   | 47,70                | 33,98   | 17,16   | 24,83   |

Alaşım 9'un ısıtma işlem ve ekstrüzyon yapılmış örneklerine ait DSC eğrileri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 3.76 ve 3.77'de sunulmuştur. Tablo 3.23'de bu eğrilerde gözlenen faz dönüşüm sıcaklıkları listelenmiştir. 9A, 9B, 9C ve 9D örnekleri incelendiğinde belirgin bir dönüşüm eğrisi yalnızca 2 saat homojenize edilen 9B'de gözlenmektedir. Soğutma sırasında malzeme içerisinde meydana gelen yeni ve küçük atomik düzenlenmeler dolayısıyla eğride bir kırılma gözlenirse de bu durumun bir faz dönüşümü olduğunu söylemek doğru olmayacaktır. 9C için soğutma sırasında 490-530 °C aralığında hafif bir eğri meydana gelse de buradaki dönüşümler belirgin değildir. 9E1, 9E2 ve 9E3 örnekleri için 1000 ve 1050 °C'de ekstrüzyon yapılmış olan 9E2 ve 9E3'te ısıtma sırasında oluşmuş östenit dönüşüm eğrisi gözlenmiştir. 9E3 örneğindeki dönüşüm eğrisi daha belirgin iken soğutma sırasında belirgin bir dönüşüm eğrisi gözlenememiştir.



Şekil 3.76. 9A (a), 9B (b), 9C (c) ve 9D (d) örneklerinin DSC analizi sonuçları.

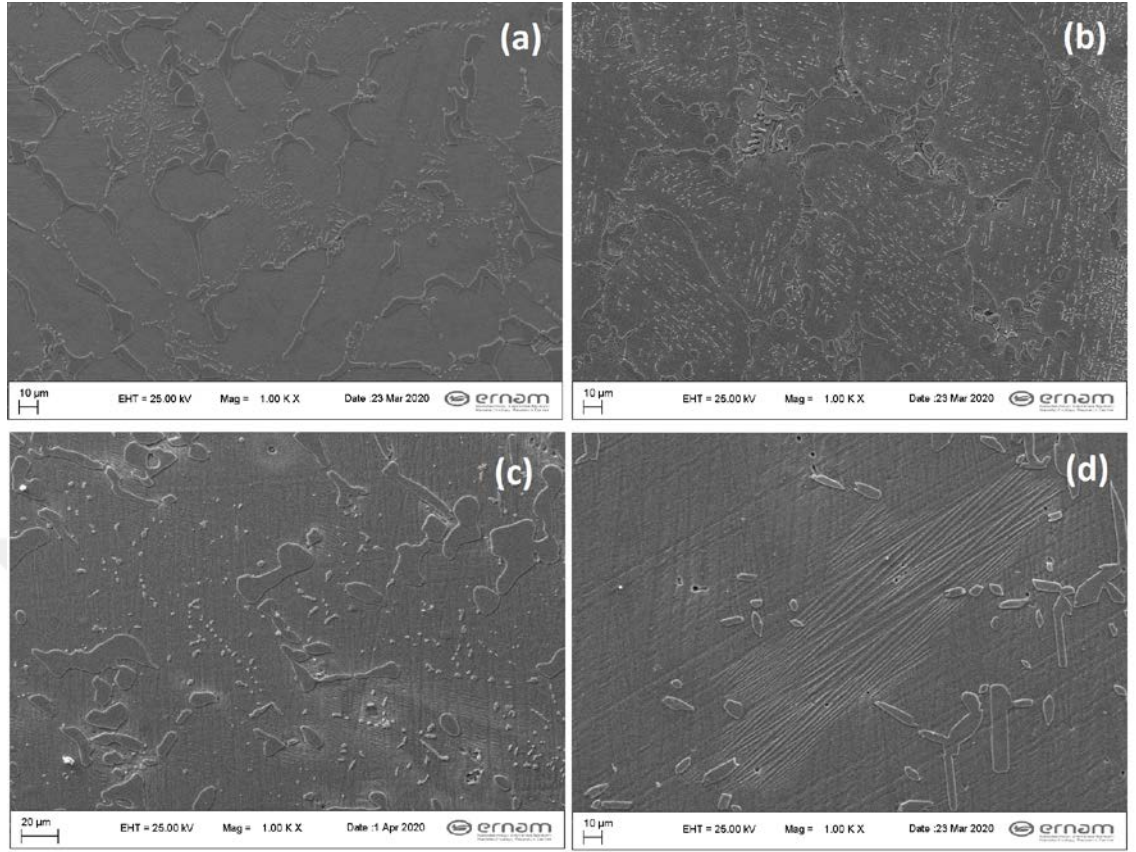


Şekil 3.77. 9E1 (a), 9E2 (b) ve 9E3 (c) örneklerinin DSC analizi sonuçları.

Tablo 3.23. Alaşım 9 örneğinin ısıtılma işlemi ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları.

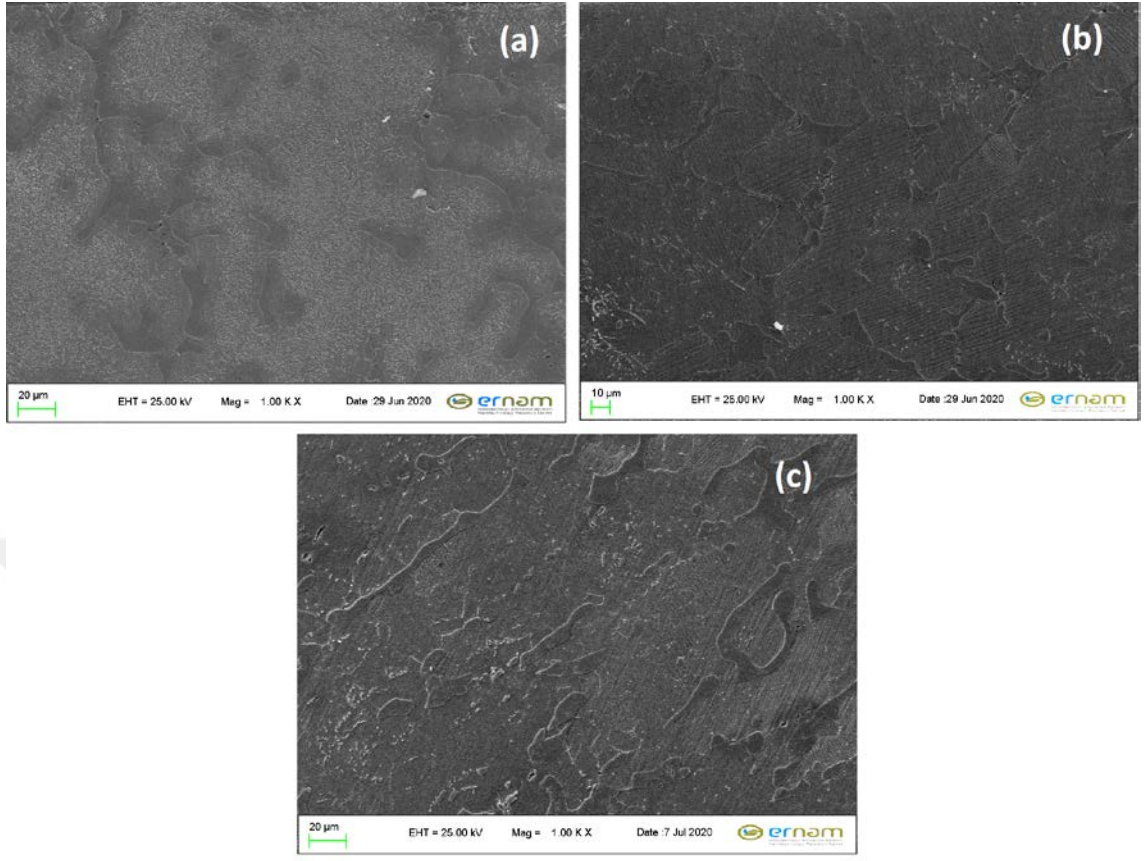
| Örnek | Faz Dönüşüm Sıcaklıkları (°C) |           |       |       |           |       |             |             |                     |
|-------|-------------------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------------|-------------|---------------------|
|       | $A_s$                         | $A_{max}$ | $A_f$ | $M_s$ | $M_{max}$ | $M_f$ | $M_s - M_f$ | $A_f - A_s$ | $A_{max} - M_{max}$ |
| 9A    | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 9B    | 454,8                         | 464,8     | 479,7 | -     | -         | -     | -           | 24,9        | -                   |
| 9C    | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 9D    |                               |           |       |       |           |       |             |             |                     |
| 9E1   | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 9E2   | 420,0                         | 439,9     | 458,8 | -     | -         | -     | -           | 38,8        | -                   |
| 9E3   | 439,8                         | 459,8     | 474,8 | -     | -         | -     | -           | 35,0        | -                   |

Alaşım 9'un ısıtılma işlemli örneklerinin SEM görüntüleri Şekil 3.78 (a-d)'de gösterilmektedir. Yapı tüm örneklerde martenzit morfolojisine sahip ana fazın içerisindeki çökelti fazları ve ikincil fazlardan meydana gelmiştir. Tane sınırlarında oluşan ikincil fazlar ısıtılma süresindeki artış ile beraber daha düzensiz hale gelerek kabalaşmıştır. Bununla beraber martenzit fazları daha belirgin hale gelmiştir.



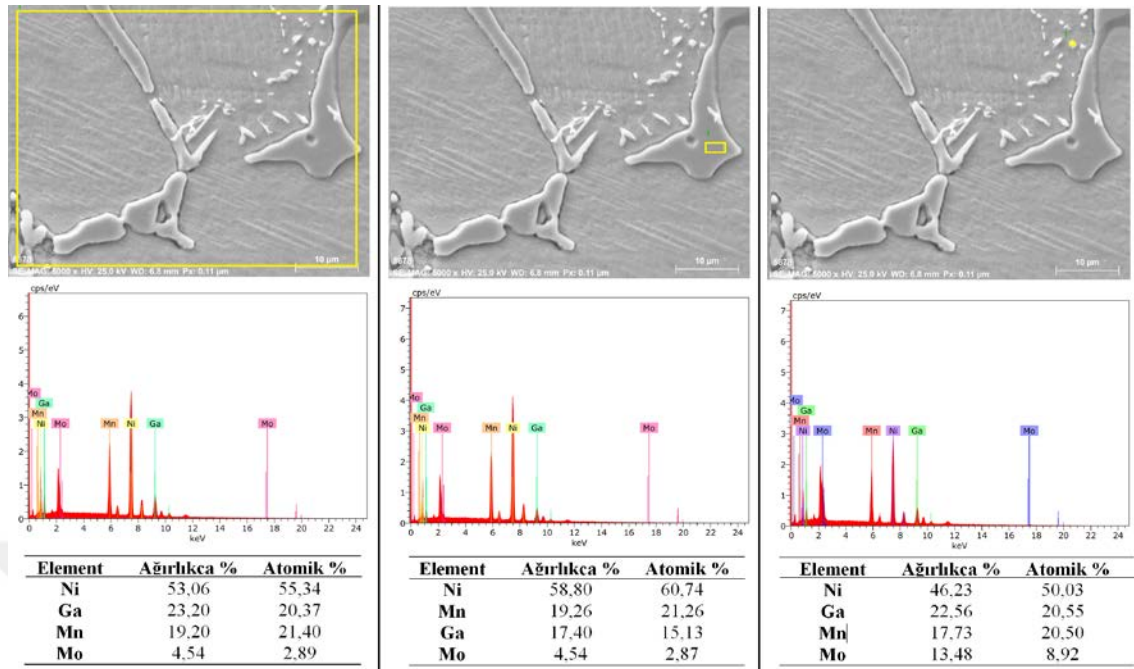
Şekil 3.78. 9A (a), 9B (b), 9C (c) ve 9D (d) örneklerinin SEM görüntüleri.

Ekstrüzyon yapılmış olan örneklerin SEM fotoğrafları Şekil 3.79’da gösterilmiştir. 950 °C’de ekstrüzyon yapılmış olan 9E1 örneğinde ana fazda çökelti fazlar yoğun olarak gözlenirken 1000 °C ve 1050 °C’de ekstrüzyon yapılmış olan 9E2 ve 9E3 örneklerinde martenzit ve ikincil fazlar yoğunluktadır.

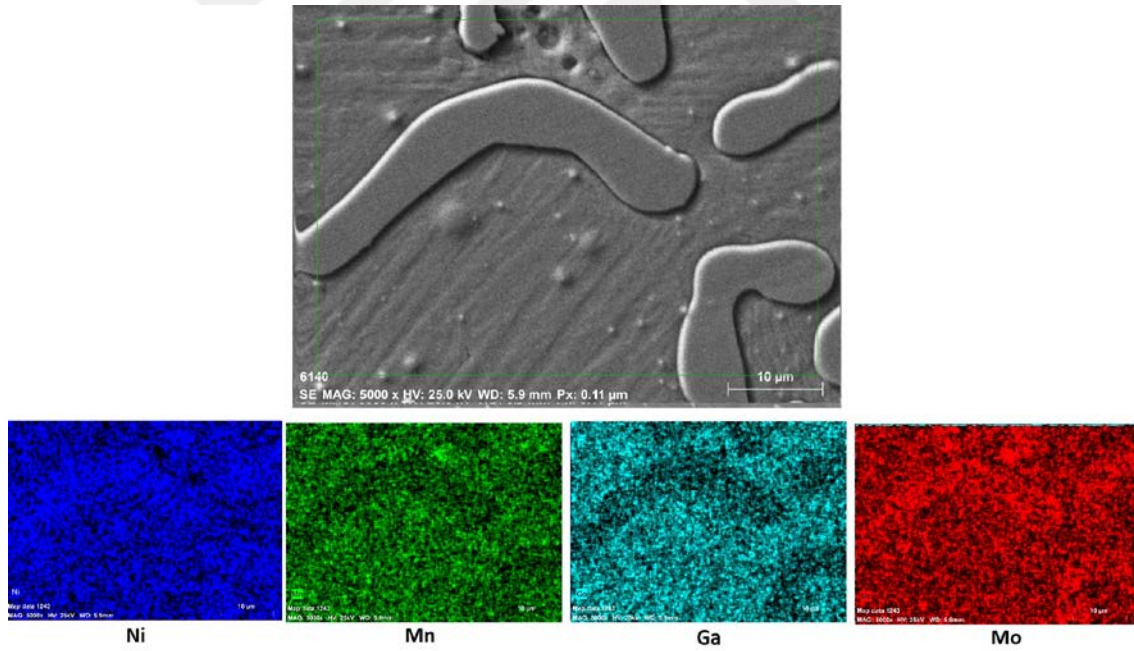


Şekil 3.79. 9E1 (a), 9E2 (b) ve 9E3 (c) örneklerinin SEM görüntüleri.

Şekil 3.80 ve 3.81’de Alaşım 9’dan elde edilen EDX ve MAPPING sonuçları gösterilmiştir. Bu sonuçlardan Alaşım 9’un genel morfolojisinde Ni, Mn ve Ga elementince zengin Mo bakımından fakir olduğu görülmektedir. İkincil ve çökelti fazları Mo bakımından ana faza göre zengindir. İkincil fazda en yoğun olarak gözlenen element Ni’dir.

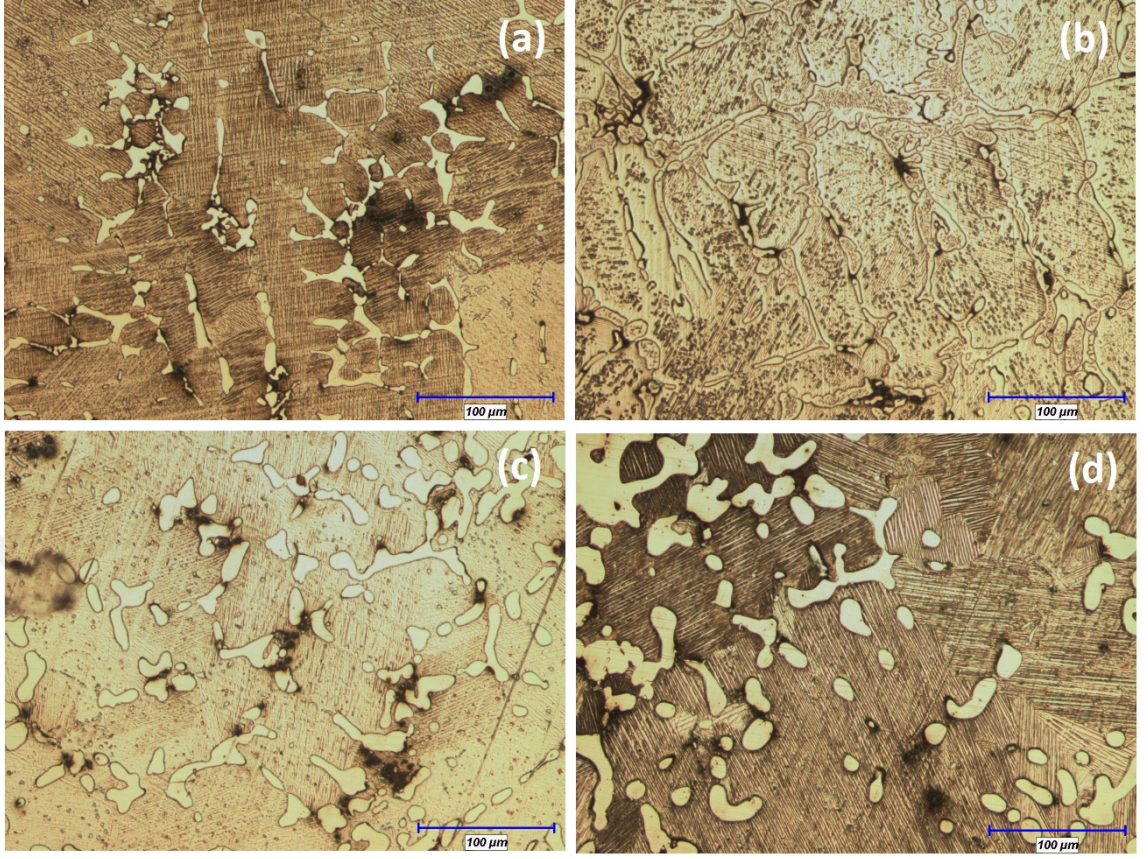


Şekil 3.80. Alaşım 9 numunesi elde edilen EDX analizi görüntüleri.



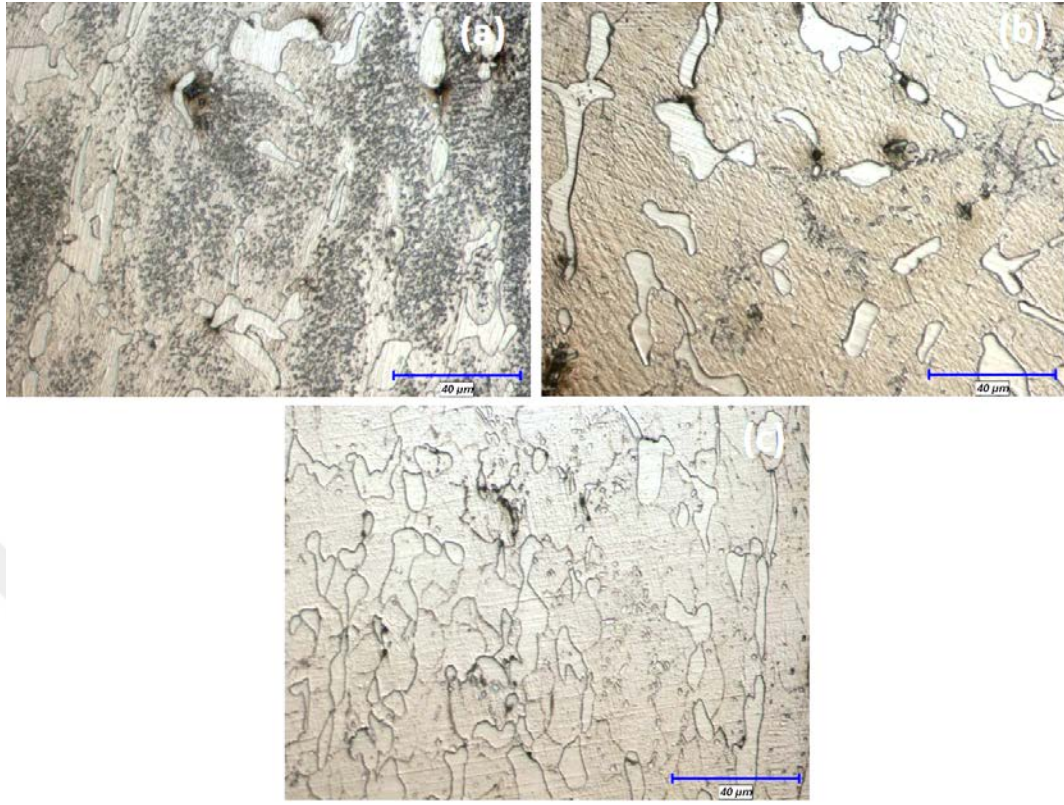
Şekil 3.81. Alaşım 9 örneği MAPPING analizi sonucu.

Alaşım 9'un ısıtılma işlemi yapılmış olan örneklerinin optik mikroskop fotoğrafları Şekil 3.82'de görülmektedir. Burada diğer tüm alaşımlara benzer bir şekilde homojenizasyon süresindeki artış ile faz yapılarının kabalaştığı söylenebilir. Bunun yanında 96 saat homojenize edilmiş 9D örneğinde martenzit faz yapıları daha düzenli olarak gözlenmesinin yanında ikincil fazlar düzensizleşmiş, çökelti yapıları ise azalmıştır.



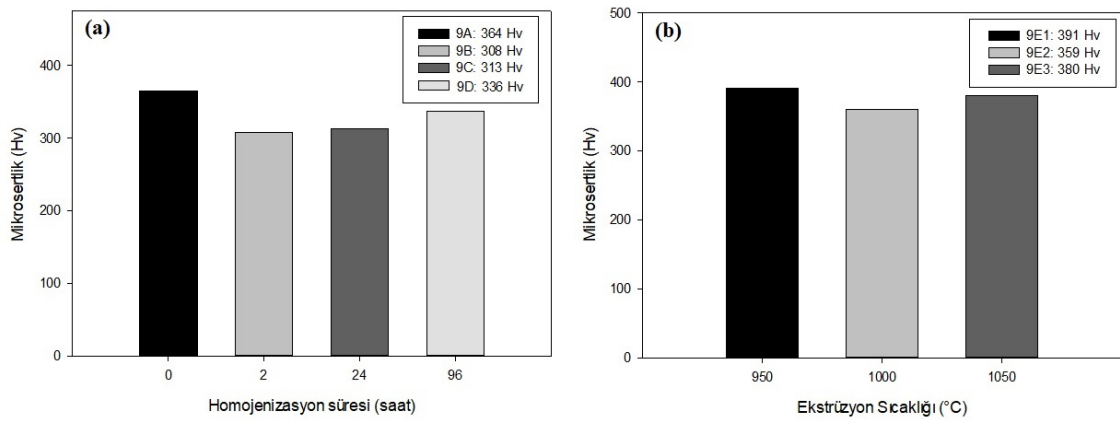
Şekil 3.82. 9A (a), 9B (b), 9C (c) ve 9D (d) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.

Alaşım 9'un ekstrüzyon yapılmış olan örneklerinin optik mikroskop fotoğrafları Şekil 3.83'te görülmektedir. Tüm örneklerde ekstrüzyon yönünde uzamış tane yapıları gözlenmektedir. 1000 ve 1050 °C'de ekstrüzyon yapılmış olan 9E2 ve 9E3 örneklerinde çökelti fazları çok az gözlenmiş olup martenzit yapılar daha belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.83. 9E1 (a), 9E2 (b) ve 9E3 (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.

Homojenizasyon süresi ve ekstrüzyon sıcaklığına bağlı olarak elde edilmiş olan alaşım 9'un mikrosertlik değerleri grafiği Şekil 3.84'te gösterilmiştir. Isıl işlem ile mikrosertlik değerleri azalmıştır. Ekstrüzyon yapılmış olan tüm örneklerin mikrosertlik değerleri kayda değer şekilde artmıştır. Mikrosertlik değerleri karşılaştırıldığında iç gerilimlerin en yüksek olduğu işlemin 950 °C'de yapılan ekstrüzyon olduğu söylenebilir.



Şekil 3.84. Alaşım 9 numunesi için ısıl işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış (b) örneklerin mikrosertlik değerleri.

### 3.10. Alaşım 10 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{20,5}\text{Ga}_{22}\text{Mo}_2$ ) Örneğinden Elde Edilen Bulgular

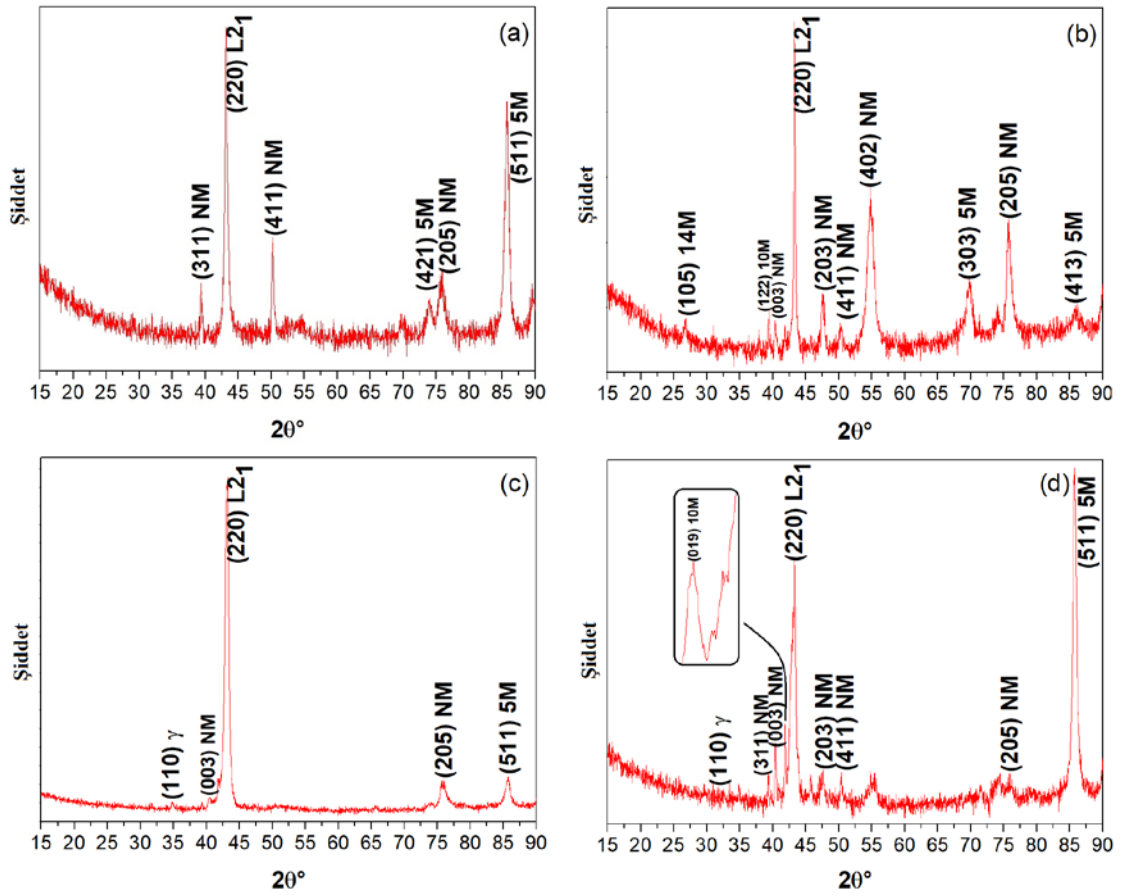
Alaşım 10 numunesinin homojenizasyon işlemine tabi tutularak buzlu suda soğutulan örneklerinin (10A, 10B, 10C, 10D) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş haliyle Şekil 3.85’de gösterilmiştir.

10A örneğinin X-ışını kırınım grafiğinden  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,930 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (411) ve (205) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,789$  Å ve  $c=6,632$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (221) ve (320) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,938$  Å ve  $c=4,892$  Å olarak hesaplanmıştır.

10B örneğinin X-ışını kırınım grafiğinden  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,911 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,786$  Å ve  $c=6,581$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (303) ve (413) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,869$  Å ve  $c=5,579$  Å olarak hesaplanmıştır.

10C örneğinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ ,  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu belirlenmiştir.  $\gamma$  fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 3,633 Å olarak bulundu.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,927 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (003) ve (205) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,248$  Å ve  $c=6,687$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (201) ve (511) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,920$  Å ve  $c=5,174$  Å olarak tespit edildi.

10D örneğinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ ,  $L2_1$ , NM, 5M ve 10M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $\gamma$  fazının kafes parametresi (110) yansıma düzlemi kullanılarak 3,638 Å olarak bulundu.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,908 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (003) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,764$  Å ve  $c=6,597$  Å olarak tespit edildi. 5M ve 10M fazlarının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.



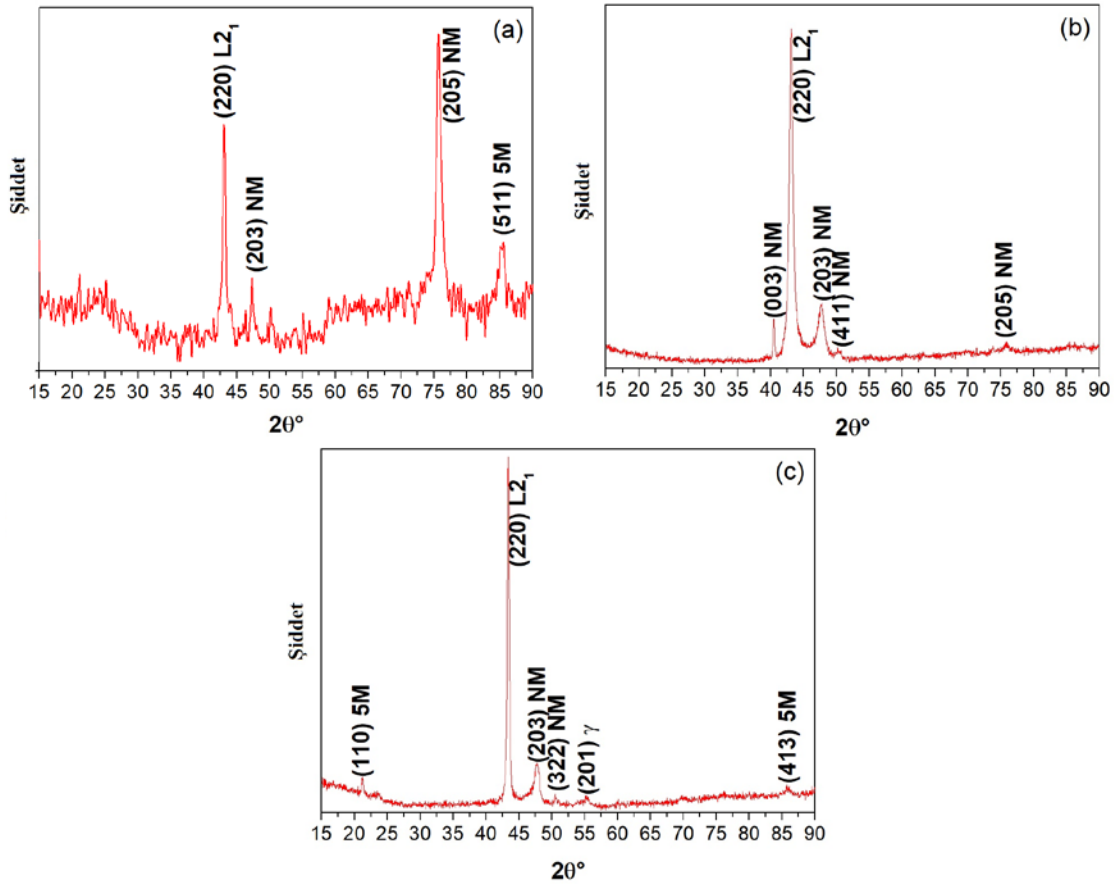
Şekil 3.85. 10A (a), 10B (b), 10C (c) ve 10D (d) örneklerinin XRD sonuçları.

Ekstrüzyon yapılmış olan Alaşım 10 örneklerinin (10E1, 10E2, 10E3) X-ışını difraksiyonu yansımaları indislenmiş haliyle Şekil 3.86'da gösterilmiştir.

10E1 örneğinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu görülmüştür.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak  $5,936 \text{ \AA}$  olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (205) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,671 \text{ \AA}$  ve  $c=6,645 \text{ \AA}$  olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri yeterli yansıma düzlemi olmadığından hesaplanamamıştır.

10E2 numunesinin X-ışını difraktogramından  $L2_1$  ve NM fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak  $5,932 \text{ \AA}$  olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (411) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,782 \text{ \AA}$  ve  $c=6,561 \text{ \AA}$  olarak bulundu.

10E3 numunesinin X-ışını difraktogramından  $\gamma$ ,  $L2_1$ , NM ve 5M fazlarına sahip olduğu gözlenmiştir.  $\gamma$  fazının kafes parametresi (210) yansıma düzlemi kullanılarak 3,714 Å olarak bulundu.  $L2_1$  fazının kafes parametresi (220) yansıma düzlemi kullanılarak 5,901 Å olarak hesaplandı. NM fazının kafes parametreleri (203) ve (322) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=7,805$  Å ve  $c=6,546$  Å olarak bulundu. 5M fazının kafes parametreleri (110) ve (413) yansıma düzlemleri kullanılarak  $a=5,913$  Å ve  $c=5,518$  Å olarak tespit edildi. Tablo 3.24’de Alaşım 10 örnekleri için hesaplanan kafes parametreleri, Tablo 3.25’de meydana gelen bazı fazların tane boyutları listelenmiştir. Homojenizasyon süresindeki artış ve ekstrüzyon sıcaklığındaki artış ile (220) düzlemindeki  $L2_1$  fazının tane boyutu artmıştır. Ancak ekstrüzyon işlemi yapılmış alaşımların (220)  $L2_1$  tane boyutu ısıtılmalı örneklerle göre daha küçüktür. NM fazların tane boyutları kıyaslandığında çok belirgin bir değişim gözlenmemiştir.



Şekil 3.86. 10E1 (a), 10E2 (b) ve 10E3 (c) örneklerinin XRD sonuçları.

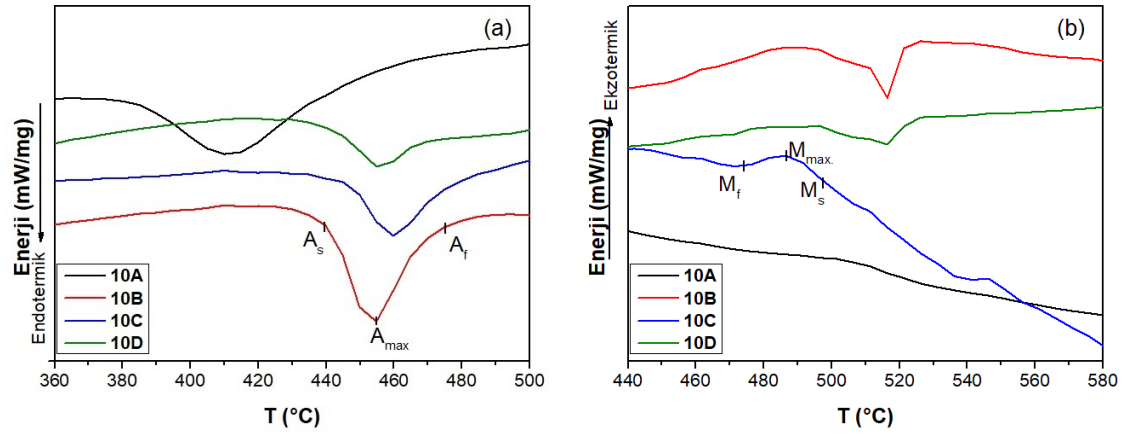
Tablo 3.24. Alaşım 10 örneği için hesaplanan kafes parametreleri.

| Örnek | $\gamma$ | L2 <sub>1</sub> | NM       |          |       | 5M       |          |       |
|-------|----------|-----------------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|
|       | $a$      | $a$             | $a_{NM}$ | $c_{NM}$ | $c/a$ | $a_{5M}$ | $c_{5M}$ | $c/a$ |
| 10A   | -        | 5,930           | 7,789    | 6,632    | 0,851 | 5,938    | 4,892    | 0,824 |
| 10B   | -        | 5,911           | 7,786    | 6,581    | 0,845 | 5,869    | 5,579    | 0,951 |
| 10C   | 3,633    | 5,927           | 7,248    | 6,687    | 0,923 | 5,920    | 5,174    | 0,874 |
| 10D   | -        | 5,908           | 7,764    | 6,597    | 0,850 | -        | -        | -     |
| 10E1  | -        | 5,936           | 7,671    | 6,645    | 0,866 | -        | -        | -     |
| 10E2  | -        | 5,932           | 7,782    | 6,561    | 0,843 | -        | -        | -     |
| 10E3  | 3,714    | 5,901           | 7,805    | 6,546    | 0,839 | 5,913    | 5,518    | 0,933 |

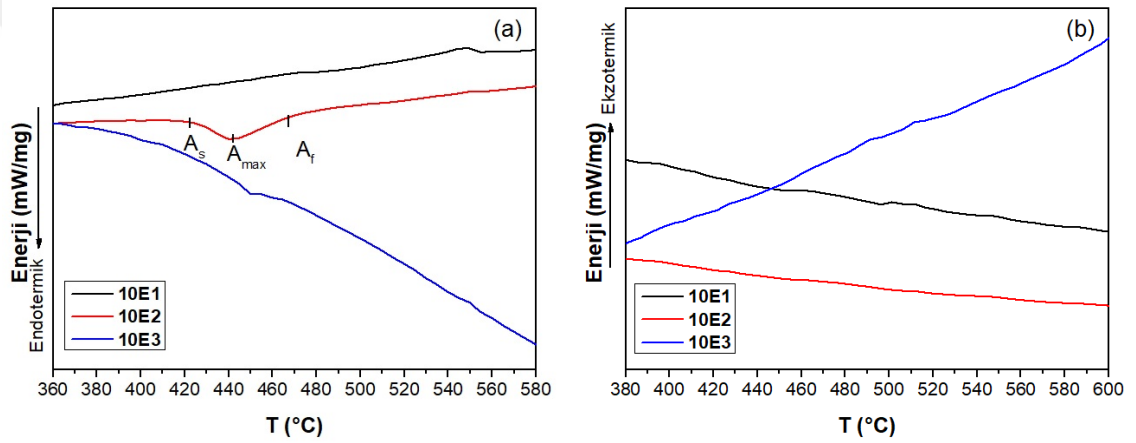
Tablo 3.25. Alaşım 10 örneklerinde meydana gelen bazı fazların tane boyutları.

| Örnek | Tane Boyutu (nm) |                      |         |         |         |         |
|-------|------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|
|       | (003)NM          | (220)L2 <sub>1</sub> | (203)NM | (411)NM | (205)NM | (511)5M |
| 10A   | -                | 55,65                | -       | 28,58   | 14,05   | 21,70   |
| 10B   | 27,58            | 41,75                | 21,21   | 17,15   | 17,91   | -       |
| 10C   | 23,64            | 68,48                | -       | -       | 16,13   | 24,80   |
| 10D   | 47,26            | 111,30               | 14,14   | 28,60   | -       | 49,61   |
| 10E1  | -                | 20,87                | 14,13   | -       | 23,03   | 5,41    |
| 10E2  | 33,10            | 33,40                | 16,98   | 10,72   | 13,44   | -       |
| 10E3  | -                | 41,77                | 21,23   | 28,62   | -       | -       |

Şekil 3.87 ve 3.88'de Alaşım 10'un ısıtma işlem ve ekstrüzyon yapılmış örneklerine ait DSC eğrileri gösterilmiştir. Elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları Tablo 3.25'de özetlenmiştir. 10 (A-C) örneklerine baktığımızda tümünde belirli bir dönüşüm gözlenmektedir. Ancak; 10A örneğinde soğutmada ve 10D örneğinde ısıtma ve soğutmada meydana gelen pikler zayıftır. Bunun yanında 10B ve 10D örneklerinde soğutmada kırılmalar meydana gelmiştir. Soğutma sırasında malzeme içerisinde meydana gelen yeni ve küçük atomik düzenlenmeler dolayısıyla eğride bir kırılma gözlenirse de bu durumun bir faz dönüşümü olduğunu söylemek doğru olmayacaktır. DSC eğrisindeki ani enerji değişiminden kaynaklanan kırılma 8 ve 9 numaralı alaşımlarda da rastlandığından, bu farklılığın karakteristik bir özellik olduğu anlaşılmaktadır.  $A_s$  ve  $A_f$  arasındaki fark ( $A_f - A_s$ ) homojenizasyon süresindeki artış ile azalmıştır. 10C örneğinde martenzit dönüşümü için gerekli olan sürücü kuvvetin östenit dönüşümü için gerekli olan sürücü kuvvet ile hemen hemen aynı olduğunu söylemek mümkündür. Ekstrüzyon yapılmış olan örnekler incelendiğinde yalnızca 1000° C'de ekstrüzyon yapılmış olan 10E2 örneğinde ısıtma sırasında östenit faz dönüşümü eğrisi gözlenmiştir. Bunun dışında herhangi bir dönüşüm gözlenmemiştir.



Şekil 3. 87. 10A (a), 10B (b), 10C (c) ve 10D (d) örneklerinin DSC analizi sonuçları.



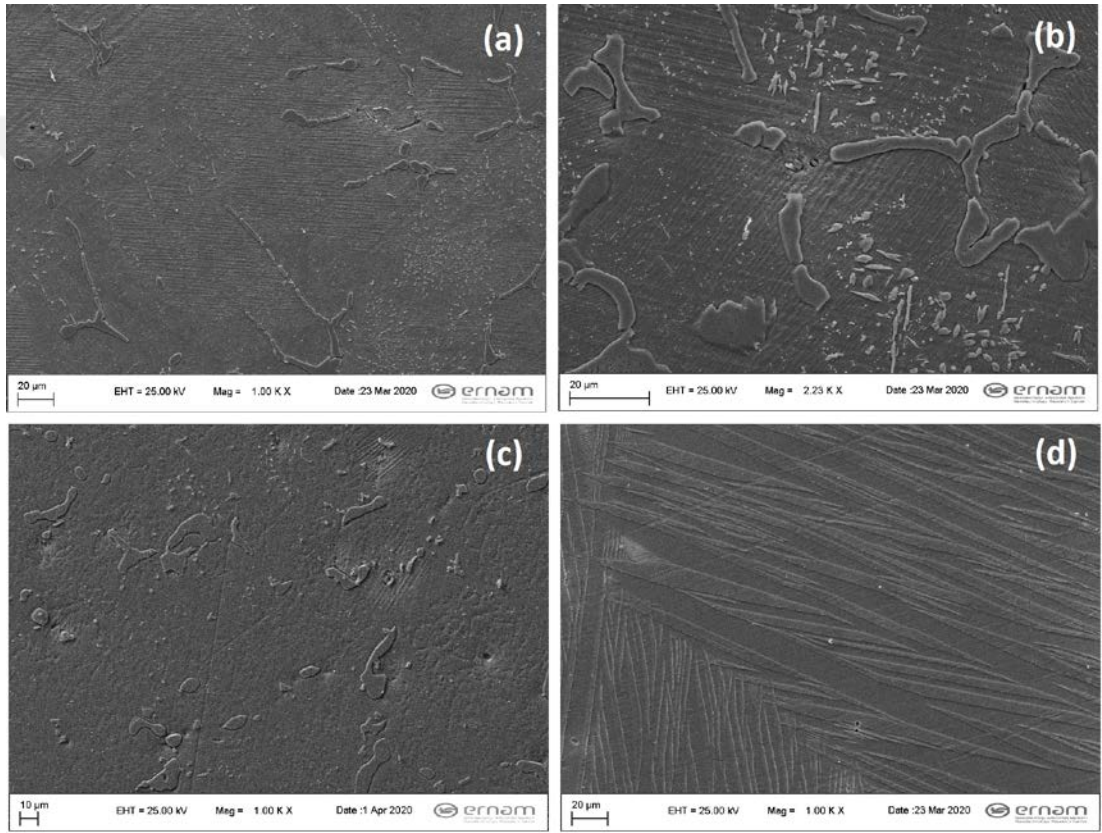
Şekil 3.88. 10E1 (a), 10E2 (b) ve 10E3 (c) örneklerinin DSC analizi sonuçları.

Tablo 3.26. Alaşım 10 örneğinin ısıtılma işlemi ve ekstrüzyon sonucu elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları.

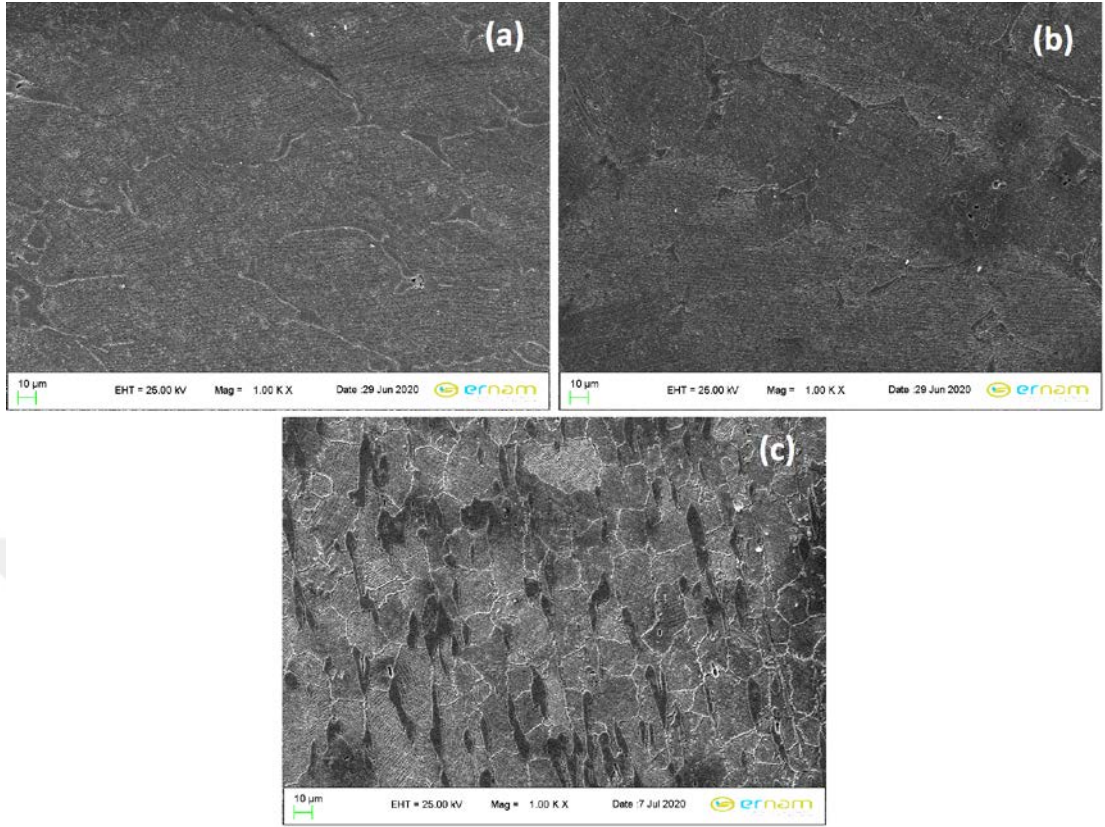
| Örnek | Faz Dönüşüm Sıcaklıkları (°C) |           |       |       |           |       |             |             |                     |
|-------|-------------------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------------|-------------|---------------------|
|       | $A_s$                         | $A_{max}$ | $A_f$ | $M_s$ | $M_{max}$ | $M_f$ | $M_s - M_f$ | $A_f - A_s$ | $A_{max} - M_{max}$ |
| 10A   | 385,2                         | 409,9     | 439,8 | -     | -         | -     | -           | 54,6        | -                   |
| 10B   | 434,9                         | 454,8     | 474,8 | -     | -         | -     | -           | 39,9        | -                   |
| 10C   | 444,8                         | 454,8     | 464,8 | 496,4 | 486,4     | 476,5 | 19,9        | 20          | 31,6                |
| 10D   | 444,8                         | 454,8     | 464,8 | -     | -         | -     | -           | 20          | -                   |
| 10E1  | -                             | -         | -     | -     | -         | -     | -           | -           | -                   |
| 10E2  | 424,9                         | 444,8     | 464,8 | -     | -         | -     | -           | 39,9        | -                   |
| 10E3  | 444,8                         | 449,8     | 454,8 | -     | -         | -     | -           | 10,0        | -                   |

Alaşım 10'un ısıtılma işlemi yapılmış örneklerinin SEM görüntüleri Şekil 3.89 (a-d)'da gösterilmektedir. Homojenizasyon süresinin artması ile tüm faz yapıları kabalaşmıştır. Bunun yanında tüm örneklerde martenzit faz içerisinde dağılmış belirli miktarlarda

çökelti fazları ve ikincil fazlar gözlenmiştir. Martenzit faz yapısı 10D örneğinde daha belirgin bir halde görülmektedir. 10C örneğinde XRD sonuçları ile uyumlu olarak daha az miktarda martenzit fazı gözlenmiştir. Ekstrüzyon işlemi yapılarak elde edilen 10E1, 10E2 ve 10E3 örneklerinin SEM fotoğrafları Şekil 3.90 (a-c)' da gösterilmiştir. Burada ekstrüzyon yönünde uzamış tane yapıları olduğu anlaşılmıştır. 1050 °C'de ekstrüzyon yapılmış olan örnekte diğerlerine kıyasla martenzit faz yanında daha düzenli ikincil faz yapıları görülmüştür.

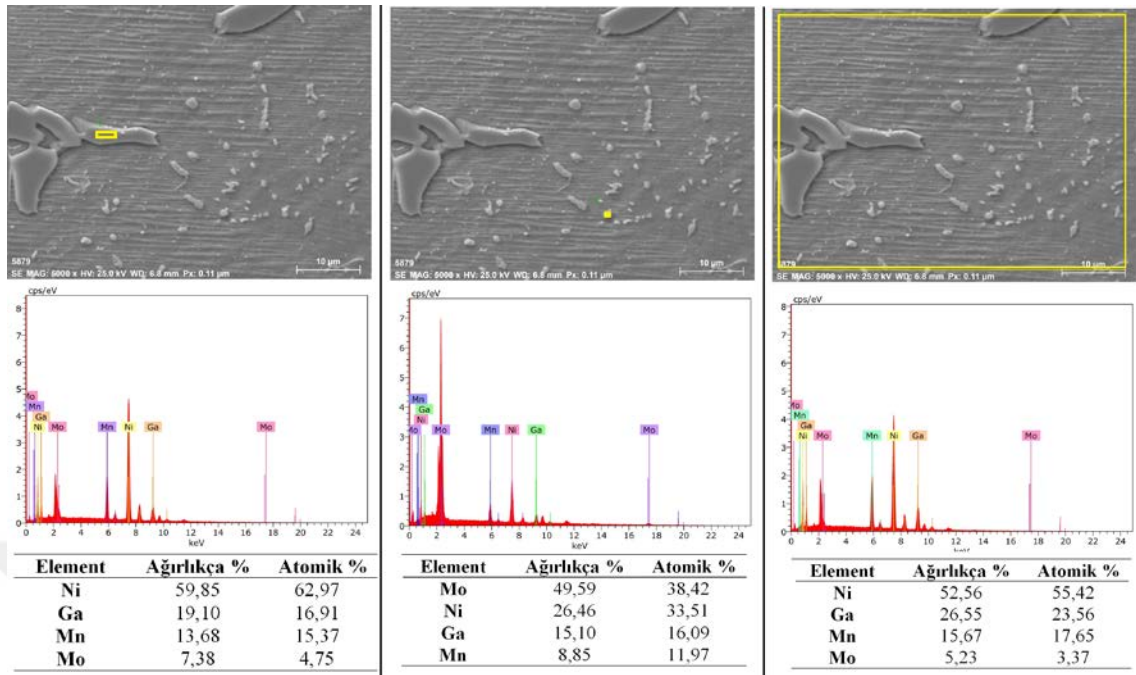


Şekil 3.89. 10A (a), 10B (b), 10C (c) ve 10D (d) örneklerinin SEM görüntüleri.

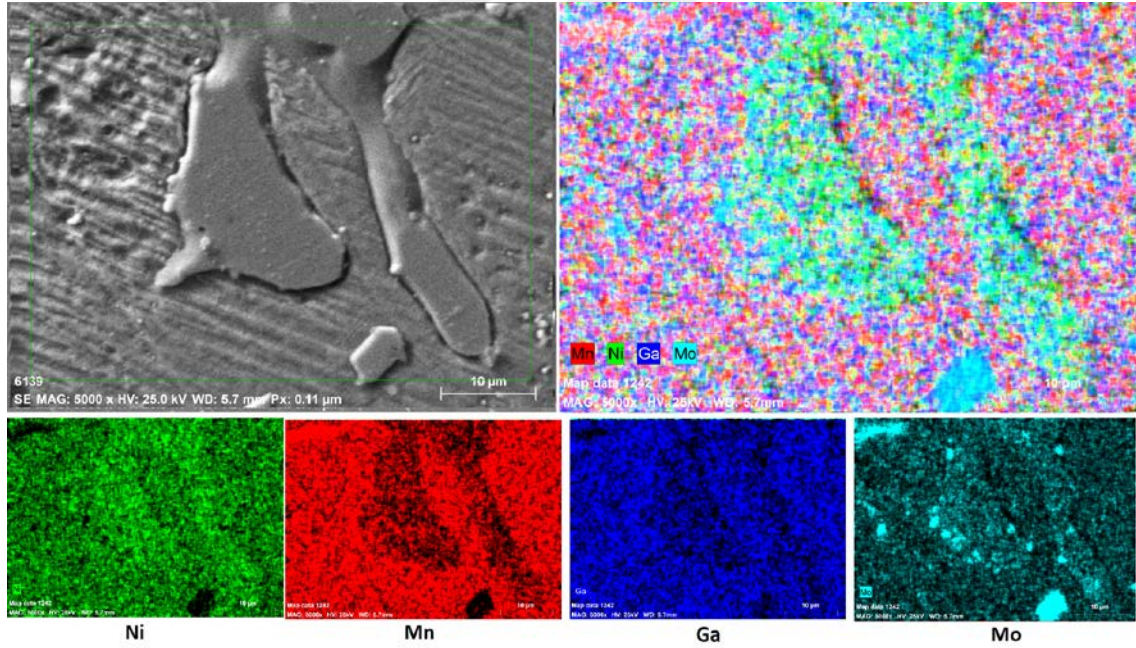


Şekil 3.90. 10E1 (a), 10E2 (b) ve 10E3 (c) örneklerinin SEM görüntüleri.

Şekil 3.91 ve 3.92’de alaşım 10’dan elde edilen EDX ve MAPPING sonuçları gösterilmiştir. Genel morfoloji Ni, Ga ve Mn bakımından zengin, Mo bakımından fakirdir. Çökelti fazları ise Mo bakımından oldukça zengindir. İkincil faz en çok Ni elementi bakımından zengin ve sonrasında sırasıyla Ga, Mn ve Mo elementleri gelmektedir.



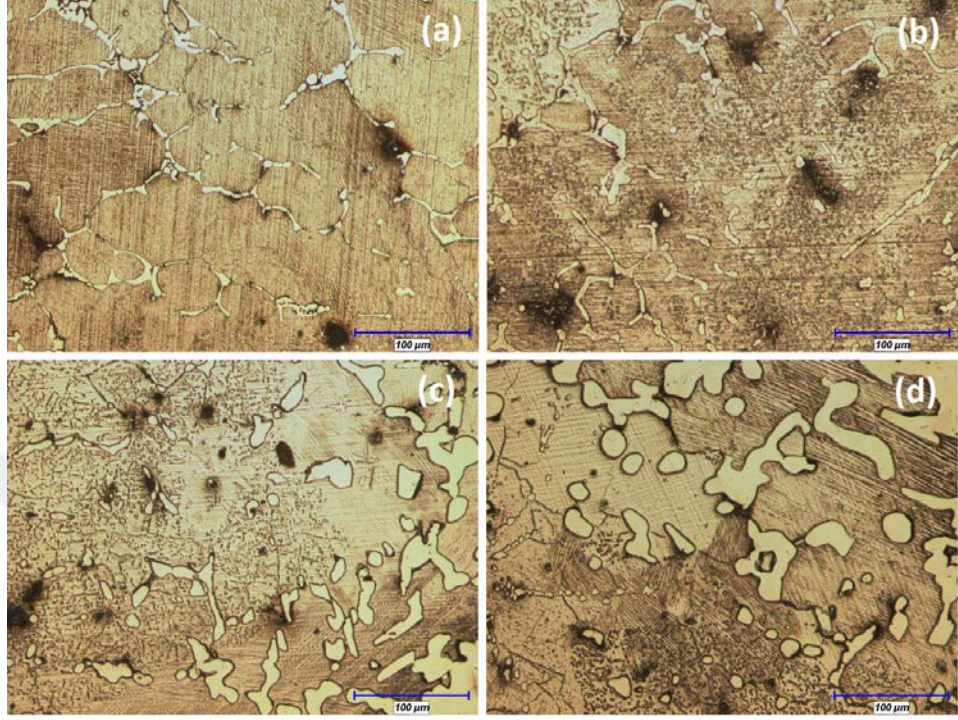
Şekil 3.91. Alaşım 10 örneğinden elde edilen EDX analizi görüntüleri.



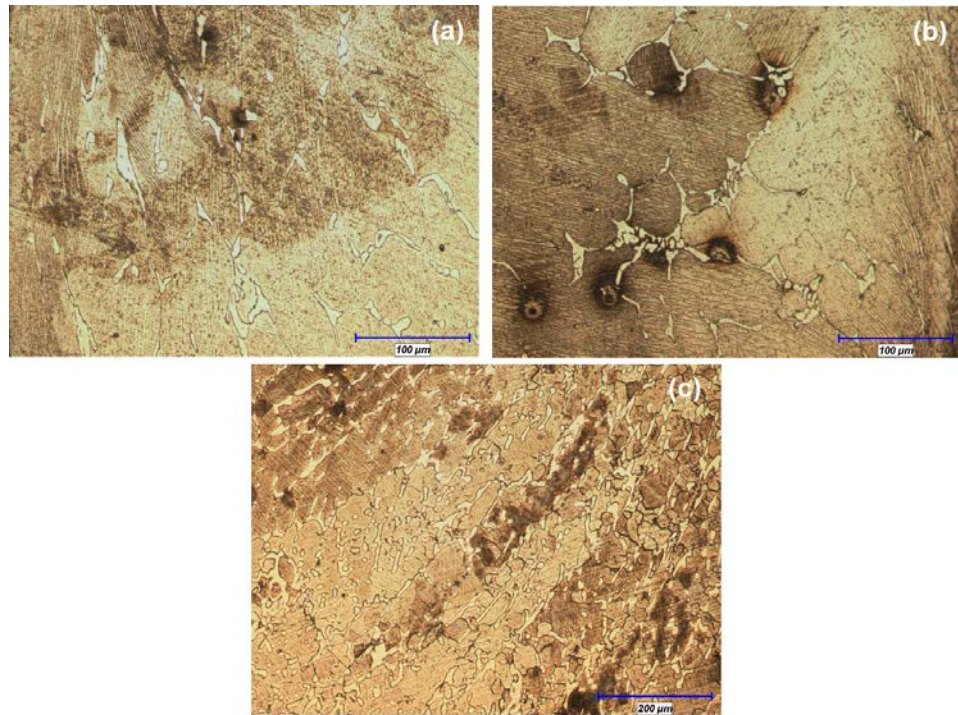
Şekil 3.92. Alaşım 10 örneği için elde edilen MAPPING analizi sonucu.

Şekil 3.93 ve 3.94'te Alaşım 10'un sırasıyla ısıtılma işlem ve ekstrüzyon yapılmış olan örneklerinin optik mikroskop fotoğrafları sunulmuştur. Homojenizasyon süresindeki artış ikincil faz yapılarının büyümesine ve düzensiz bir hal almasına neden olmuştur. Bunun yanında martenzit fazı belirginleşmiştir. Tüm örneklerde belirli oranlarda Mo bakımından zengin çökelti fazları görülmektedir. Ekstrüzyon örneklerinde ekstrüzyon

yönünde uzamış tane yapıları görülmektedir. 1050°C’de ekstrüzyon yapılmış olan 10E3 örneğinde nispeten daha düzenli tane yapıları gözlenmiştir.

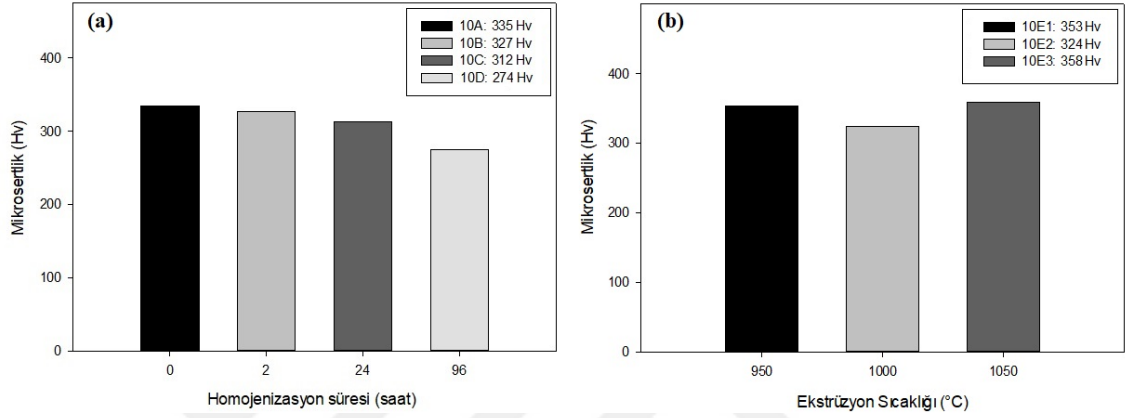


Şekil 3.93. 10A (a), 10B (b), 10C (c) ve 10D (d) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 3.94. 10E1 (a), 10E2 (b) ve 10E3 (c) örneklerinin optik mikroskop görüntüleri.

Alaşım 10 örnekleri için homojenizasyon süresi ve ekstrüzyon sıcaklığına bağlı olarak mikrosertlik değerleri Şekil 3.95'te gösterilmiştir. Homojenizasyon süresindeki artış ile mikrosertlik değerleri azalmıştır. Bunun yanında Alaşım 10'un ekstrüzyon yapılmış olan tüm örneklerinin mikrosertlik değerleri ekstrüzyon işleminin malzemede iç gerilmelere sebep olmasından ötürü bir miktar artmıştır.



Şekil 3.95. Alaşım 10 numunesi için ısıtıl işlem yapılmış (a) ve ekstrüzyon yapılmış (b) örneklerin mikrosertlik değerleri.

## 4. BÖLÜM

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yüksek sıcaklıklarda şekil hafıza özelliği sergileyen NiMnX alaşımları elde edilerek alaşım elementi, ısıtma işlem ve sıcak ekstrüzyonun etkileri araştırılmıştır. Bunun için on farklı alaşım içeriği oluşturulmuştur. Bu alaşımlar Alaşım 1 ( $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{36}\text{Sn}_{10,5}\text{Ga}_{3,5}$ ), Alaşım 2 ( $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{36}\text{Sn}_{12,5}\text{Ga}_{1,5}$ ), Alaşım 3 ( $\text{Ni}_{46,57}\text{Mn}_{31,26}\text{Ga}_{6,63}\text{Sb}_{14,5}\text{Co}_{1,07}$ ), Alaşım 4 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{17,5}\text{Mo}_2$ ), Alaşım 5 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{18,5}\text{Mo}_1$ ), Alaşım 6 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Sn}_{18,5}\text{Mo}_1$ ), Alaşım 7 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{19,5}$ ), Alaşım 8 ( $\text{Ni}_{55}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{20}$ ), Alaşım 9 ( $\text{Ni}_{55}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{19}\text{Mo}_1$ ), Alaşım 10 ( $\text{Ni}_{55,5}\text{Mn}_{20,5}\text{Ga}_{22}\text{Mo}_2$ ) şeklinde elde edilmiştir. Tüm örnekler ısıtma işlemin etkilerini gözlemlemek için farklı sürelerde homojenize edilerek buzlu suda soğutulmuştur. Sıcak ekstrüzyonun etkilerini gözlemlemek için farklı sıcaklıklarda ekstrüzyon yapılarak kesitleri daraltılmıştır. Elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Alaşım 1 ve Alaşım 2 için ısıtma işlem yapılmış olan tüm örneklerde DSC analiz sonuçlarında herhangi bir faz dönüşüm sıcaklığı gözlenememiştir. Ayrıca elde edilen örnekler son derece kırılğan bir yapıda olması sebebiyle bu örneklerde sıcak ekstrüzyon denemeleri yapılamamıştır. XRD sonuçlarından elde edilen verilere göre ısıtma işlem ile B2 fazının tane boyutu azalırken NM fazının tane boyutu artmıştır. Her ne kadar SEM ve optik mikroskop görüntülerinde XRD sonuçlarıyla da uyumlu olarak farklı morfolojilerdeki östenit ve martenzit fazları gözlenirse de şekil hafıza özelliği için uygun sonuç oluşmamıştır. Ayrıca ısıtma işlem sürelerindeki artış bu alaşımda mikrosertlik değerlerini arttırmıştır.

Alaşım 3 örneğinde Sn elementi kullanmaksızın Ga oranı arttırılmış ve yapı içerisine ilave olarak Sb ve Co elementleri eklenmiştir. Bu alaşımda Sb elementinin yoğunlukta olduğu anafazda mikro ve makroçatlakların meydana geldiği görülmüştür. Bu nedenle

bu alaşımda da yalnızca ısıtıl işlemin etkileri gözlenebilmiştir. Yapılan tüm ısıtıl işlemlerde DSC analizinden herhangi bir dönüşüm elde edilememiştir. Mikroyapı olarak Alaşım 1 ve Alaşım 2'ye göre dentiritik bir katılaşma yapısı sergileyen örneğin ısıtıl işlem sürelerindeki artış ile mikrosertlik değerleri de dikkat çekici bir şekilde artış göstermiştir.

Alaşım 4 örneğinde Ni, Mn, Ga elemenlerine ilaveten atomik olarak %2, Alaşım 5 örneğinde ise %1 oranında Mo eklenmiştir. Bu örneklerde Mo, kırılğan yapıda olan NiMn alaşımlarının işlenebilirliğini arttırmak ve çatlak oluşumlarının önüne geçmek için eklenmiştir. Her iki alaşımın döküm ve ısıtıl işlem yapılmış tüm örneklerinden alınan DSC analizi sonucunda östenit ve martenzit dönüşüm eğrileri gözlenmiştir. Alaşımların XRD analizi sonucunda elde edilen faz yapıları incelendiğinde homojenizasyon süresindeki artış ile  $L_{21}$  fazının tane boyutunun döküm haldeki örneklerle göre arttığı gözlenmektedir. Bununla beraber Alaşım 4 ve Alaşım 5 için en düşük dönüşüm eğrileri 96 saat süreyle homojenize edilerek buzlu suda soğutulan bu yapılarda gözlenmiştir. Buradan hareketle homojenizasyon süresindeki artışa paralel olarak  $L_{21}$  fazının tane boyutunun artması şekil hafıza özelliğini olumsuz yönde etkilediği söylenebilir. Buna ilaveten en yüksek dönüşüm piki gözlenen 2 saat homojenize edilmiş olan örneklerde  $L_{21}$  fazına rastlanmamıştır. Mikroyapı fotoğraflarından homojenizasyon süresindeki artış ile tane yapılarında kabalaşma ve XRD sonuçları ile uyumlu olarak farklı faz morfolojilerinde artış meydana gelmiştir. NM martenzit fazı yanında oluşan 5M, 7M, 10M ve 14M martenzit morfolojilerin artması alaşımları termoelastik şekil hafıza özelliğinden uzaklaştırmaktadır. Farklı sıcaklıklarda ekstrüzyon yapılmış olan her iki alaşımda (Alaşım 4 ve 5) 950°C'de olan örneklerden elde edilen DSC sonuçlarında östenit ve martenzit dönüşümleri gözlenmiştir. Alaşım 4 örneğinde 1000 °C'de ekstrüzyon yapıldığında da dönüşüm gözlenmiştir. Ancak Alaşım 4'ün 1050 °C ve Alaşım 5'in 1000 ve 1050 °C'de ekstrüzyon yapılmış örneklerinde herhangi bir dönüşüm gözlenmemiştir. Her iki alaşımda 950 °C'deki ekstrüzyon işleminde  $A_{max}$ - $M_{max}$  arasındaki farkın azaldığı ve termoelastik şekil hafıza özellikleri bakımından bu ekstrüzyon sıcaklığının faydalı olacağı anlaşılmaktadır. Ekstrüzyonlu örneklerin dönüşüm gözlenmeyen yapılarında NM martenzit faz miktarlarının XRD ölçümleri sonuçlarından yola çıkılarak azaldığı gözlenmiştir.

Alaşım 6 örneğinde Alaşım 5'ten farklı olarak alaşım elementinin etkisini gözlemlemek için Ga yerinde Sn elementi kullanılmıştır. Alaşım 4 ve Alaşım 5'ten farklı olarak mikroyapılarda dentiritik katılma morfolojisi gözlenmiştir. Bununla beraber DSC analizlerinden elde edilen sonuçlara göre 24 saat ve 96 saat homojenizasyon yapılarak buzlu suda soğutulan örneklerde östenit ve martenzit dönüşüm eğrileri gözlenmiştir. XRD sonuçlarına göre dönüşüm gözlenen bu örneklerde NM martenzit faz yapısının şiddeti ve tane boyutları artmıştır. Ekstrüzyon yapılmış örneklerde ise yalnızca 1050°C'de ekstrüde edilmiş olan örnekte martenzit dönüşüm eğrisi gözlenmiştir. Homojenizasyon süresindeki artış ile mikrosertlik değerleri azalırken, ekstrüzyon yapılmış olan örneklerin iç gerilmeler sebebiyle sertlikleri daha yüksek olmuştur.

Alaşım 7 ve Alaşım 8 örneklerinde yüksek Ga içerikli yapılar dördüncü bir alaşım elementi olmaksızın elde edilmiştir. Bu örneklerin DSC sonuçlarından 950 °C'de farklı sürelerde homojenizasyon yapılarak buzlu suda soğutulan yapılar incelendiğinde, Alaşım 7'nin döküm hali ve 96 saat süreyle bekletilen örneklerinde yalnızca östenit dönüşümü gözlenirken, Alaşım 8'in yalnızca 2 saat süreyle bekletilen örneğinde östenit faz geçişi görülmüştür. Soğutma sırasında ani enerji değişimlerinden kaynaklı kırılmalar gözlenmede net bir martenzit geçişi gözlenmemiştir. Ekstrüzyon yapılmış olan örneklerde her iki alaşım için de yalnızca 1000°C'de yapılmış olan işlemde östenit faz geçişi gözlenmiştir. XRD sonuçlarından ısıtma işlem ve ekstrüzyon yapılmış olan Alaşım 7 ve Alaşım 8'in tüm örneklerinde güçlü pik değerlerine sahip yüksek sıcaklık fazlarının yanında zayıf piklere sahip NM ve 5M martenzit faz morfolojilerinin bir arada bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu alaşımlarda da diğer alaşımlarda olduğu gibi homojenizasyon sürelerindeki artış fazların kabalaşmasına ve faz morfolojilerinin çeşitliliğinin artmasına yol açmıştır. Benzer şekilde mikrosertlik değerleri de homojenizasyon süresinin artmasıyla azalmış ve ekstrüzyon işlemiyle iç gerilmeler sebebiyle artmıştır.

Alaşım 9 ve Alaşım 10 örnekleri yüksek Ga içeriği yanında dördüncü element olarak sırasıyla %1 ve %2 Mo eklenerek elde edilmiştir. XRD sonuçlarında bu alaşımların tümünde L2<sub>1</sub> fazının bulunduğu ve homojenizasyon süresindeki artışın bu fazın tane boyutunu arttırdığı anlaşılmıştır. Isıtma işlem ve ekstrüzyon yapılmış örneklerde NM martenzit yapının yanında 5M martenzit yapılarında bulunduğu anlaşılmıştır. Örneklerin DSC sonuçları incelendiğinde Alaşım 9'da yalnızca 2 saat homojenize

edilen örnekte östenit dönüşümü gözlenmiştir. Alaşım 10'da 24 saat homojenize edilmiş olan örnekte östenit ve martenzit geçişi meydana gelmiştir. Bunun haricindeki yapılarda östenit geçişi gözlenirse de Alaşım 7 ve 8'de olduğu gibi soğutma sırasında ani enerji değişimlerinden kaynaklı kırılmalar görülmüştür. Örneklerin mikroyapı fotoğraflarından daha önceki örnekler gibi homojenizasyon süresindeki artışla beraber martenzit ve östenit fazlarına ait kaba morfolojilerin meydana geldiği anlaşılmıştır. Benzer şekilde ısıtma işlemi tüm örneklerin mikrosertlik değerlerinde azalmaya yol açarken ekstrüzyon işlemi bu değerlerin artmasına sebep olmuştur.

Bu çalışmada tüm alaşımlar göz önüne alındığında benzer yapıdaki alaşım elementlerinin oranlarının çok az miktarda değişmesi bile mikroyapı morfolojilerinde büyük değişiklikler olmasada östenit ve martenzit geçiş sıcaklıklarının değişimine sebep olmuştur. Bunun yanında ekstrüzyon işlemi sonucunda dönüşüm gözlenen yapılarda  $A_{max}$ - $M_{max}$  arasındaki farkın azaldığı görülmüştür. Buradan uygun koşullarda yapılan ekstrüzyon işleminin termoelastik şekil hafıza özelliklerini iyileştirdiği yorumunu yapmak yanlış olmayacaktır. Yapı içerisine çok az da olsa Mo ilave edilmesi örneklerin kırılabilirliğini azaltmış ancak, bazı alaşımlarda Mo bakımından zengin çökelti fazlarının oluşması şekil hafıza özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Tüm numuneler için en yüksek DSC pik değerleri 2 saat homojenize edilen örneklerde gözlenmiştir. Bu süre arttığında martenzit faz çeşitliliğinin artması, tanelerin kabalaşması ve yüksek sıcaklık fazlarının yapı içerisinde artması sonucunda şekil hafıza özelliği bakımından olumsuz etkilerin ortaya çıktığı anlaşılmıştır. e/a oranları bakımından tüm örnekler kıyaslanırsa bu oran "8" değerine en yakın olan örneklerde östenit ve martenzit dönüşümünün daha net bir şekilde gözlemlendiği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen NiMnX alaşımları yüksek sıcaklıkta faz dönüşümleri gösterdiklerinden yüksek sıcaklık derecelerinde çalışan makineler için potansiyel aktüatör adaylarıdır. Bu özelliklerinin dışında konvansiyonel şekil hafızalı alaşımlarla karşılaştırıldıklarında uygulanan manyetik alana karşı şekil hafıza davranışları kayda değer bir şekilde tetiklendiğinden son yıllarda çok büyük ilgi konusu olmuşlardır. Bundan sonraki çalışmalarımızda tüm örneklerle farklı ısıtma ve soğutma rejimlerinde DSC analizlerinin elde edilmesi,

çekme deneyi ile şekil hafıza oranlarının tespiti, tel haline getirilerek yeni örneklerin elde edilmesi ve manyetik özelliklerinin araştırılması ileriki çalışmalar için son derece faydalı olacaktır.



## KAYNAKÇA

- Akdoğan A., Nurveren K., 2003. Şekil hafızalı alaşımlar, **Mühendis ve Makina** 44(521):35-45.
- Auricchio F., and Sacco E., 2001. Thermo-mechanical modelling of a superelastic shape-memory wire under cyclic stretching-bending loadings. **International Journal of Solids and Structures**, 38:6123-6145.
- Ayder Ö., 2019. Kalıp parametrelerinin ekstrüzyon kuvveti üzerine etkisinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu. **Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi** 10(2): 633-640.
- Bachaga, T., Daly, R., Su, J. J., Saurina, J., Escoda, L., Legarreta, L. G., Hernando, B., Khitouni, M. 2015. Effects of Co additions on the martensitic transformation and magnetic properties of Ni-Mn-Sn shape memory alloys. **Journal of Superconductivity & Novel Magnetism**, 28(10): 3087–3092.
- Barret, C.S., Massalski, T.B., 1980. Structure of Metals. Pergamon Press, Oxford, UK, New York, 621s.
- Bauser, M., 2006. Historic Development of Extrusion, 1-7. *In: Extrusion, Second Edition* (Eds: M. Bauser, G. Sauer, K. Siegert). ASM International, Materials Park, Ohio, USA.
- Bauser, M., 2006. The Production of Extruded Semifinished Products from Metallic Materials, 195-321. *In: Extrusion, Second Edition* (Eds: M. Bauser, G. Sauer, K. Siegert). ASM International, Materials Park, Ohio, USA.
- Beaman, J. J., Lopez, L. F., Williamson, R. L. 2014. Modeling of the vacuum arc remelting process for estimation and control of the liquid pool profile. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, 136(031007):1-11.
- Belosludtseva, E. S. , Kuranova, N. N., Marchenkova, E. B., Popov, A. G. and Pushin, V. G. 2016. effect of gallium alloying on the structure, the phase composition, and

the thermoelastic martensitic transformations in ternary Ni–Mn–Ga alloys. **Technical Physics**, **61**(4):547-553.

Bernardini, D., Vestroni, F. 2003. Non-isothermal oscillations of pseudoelastic devices. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, **38**(9):1297-1313.

Buchelnikov, V. D., Vasil'ev, A. N., Koledov, V. V., Taskaev, S. V., Khovaylo, V. V. , Shavrov, V. G. 2006. Magnetic shape memory alloys: phase transitions and functional properties. **Physics-Uspekhi**, **49**(8):871.

Buchelnikov, V. D., Sokolovskiy, V. V. 2011. Magnetocaloric effect in Ni–Mn–X (X = Ga, In, Sn, Sb) heusler alloys. **The Physics of Metals and Metallography**, **112**(7): 633–665.

Buytoz, S., Harputlugil, F. N. 2018. Ni<sub>50</sub>Mn<sub>38</sub>Sn<sub>12</sub> Şekil hatırlamalı alaşımda soğutma hızının faz dönüşüm sıcaklıklarına etkisi. **Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi**, **30**(3):175-180.

Callister, W.D. Jr., Rethwisch, D. G., 2015. Malzeme Bilimi ve Mühendsiliği, Kenan Genel 8. Basımdan çeviri, Nobel Yayın,, Ankara, 968s.

Cesari, E., Font, J., Muntasell, J., Ochín, P., Pons, J., Santamarta, R. 2008. Thermal stability of high-temperature Ni–Mn–Ga alloys. **Scripta Materialia**, **58**(4):259–262.

Çakır, A., 2014. Şekil Hatırlama Özelliği Gösteren Malzemelerde Manyeto-Yapısal Faz Geçişlerinin İncelenmesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Muğla, 148s.

Çakır A., Acet M., Farle M. 2014. Kinetic arrest and exchange bias in L1<sub>0</sub> Ni–Mn–Ga. **Phys. Status Solidi B**, DOI: 10.1002/pssb.201451301, 1–6.

Chaoa, Y., Guozheng, K., Wei, R., Di, S.2019. Modelling the stress-induced multi-step martensite transformation of single crystal NiMnGa ferromagnetic shape memory alloys. **Mechanics of Materials**, **134**:204-218.

- Chowdhury, P., Sehitoglu, H., 2017. Deformation physics of shape memory alloys – Fundamentals at atomistic frontier. **Progress in Materials Science**, **88**:49–88.
- Chulist, R., Böhm, A., Lippmann, T., Skrotzki, W. Drossel, W-G., Neugebauer, R. 2010. Twinning behaviour of textured polycrystalline Ni-Mn-Ga alloy after hot extrusion. **Materials Science Forum**, **635**:195-199.
- Czaja, P., Chulist, R., Wierzbicka-Miernik, A., Brzoza, A., Fitta, M., Maziarz, W. 2019. Microstructure evolution and magnetic properties in Mn-rich Ni-(Co, Cu, Fe)-Mn-Sn Heusler base shape memory alloys. **Materials Chemistry and Physics**, **235**:121720.
- Czaja, P., Wierzbicka-Miernik, A., Rogal, Ł. 2018. Segregation and microstructure evolution in chill cast and directionally solidified Ni-Mn-Sn metamagnetic shape memory alloys. **Journal of Crystal Growth**, **492**:50–59.
- Dal, S., Demirel, B., Eskil, M., 2021. The effects of homogenization time on the crystal structure and hardness of NiMnGaMo alloy. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, **24**(2):493–502.
- Dikici, B., 2010. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Nikel Titanyum Alaşımlarının Üretimi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 86s.
- Dilibal S., 2016. Savunma ve havacılık uygulamalarında uzun süreli ısıtıl işlemin NiTi şekil bellekli alaşımların termomekanik davranışına etkisi. **Savunma Bilimleri Dergisi**, **15**(2):1-23.
- Dimitris C.L, Pavlin B.E, 2004. Modeling of transformation-induced plasticity and its effect on the behavior of porous shape memory alloys, *Mechanics of Materials*. **36**(9): 865–892.
- Dubenko, I., Khan, M., Pathak, A., K., Gautam, B., R., Stadler, S., Ali, N. 2009. Magnetocaloric effects in Ni–Mn–X based Heusler alloys with X =Ga, Sb,In. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **321**(7):754–757.

- Entel, P., Buchelnikov, V. D., Khovailo, V. V., et al. 2006. Modeling the phase diagram of magnetic shape memory heusler alloys. **J. Phys. D: Appl. Phys.** **39**:865–889.
- Entel, P., Buchelnikov, V. D., Gruner, M. E., et al. 2008. Shape memory alloys: a summary of recent achievements. **Mater. Sci. Forum** **583**:21–41.
- Eskil M. 2006. FeMnSi Alaşımlarının Mekanik ve Termal Etkiler Altında Şekil Hatırlama Özelliklerinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ, Ocak, 195 s.
- Eskil, M. 2000. Şekil Hatırlamalı CuZnAl Alaşımlarında Soğutma Hızı Etkileri ve Çökelti Kinetikleri, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 111 s.
- Erdoğan, H. B., 2019. 4D printing for biomedical applications: additive manufacturing of shape memory materials. **International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry** **3**(1):86-93.
- Feuchtwanger, J., Seif, E., Sratongond, P., Hosoda, H., Chernenko, V.A. 2018. Vibration damping of Ni-Mn-Ga/silicone composites. **Scripta Materialia**, **146**: 9–12.
- Flint, E., M., Melcher, J., Halsenka, H., 1996. The promise of smart materials for small satellites, *Acta Astronautica*, **39**:809-814.
- Gaizsch, U., Roth, S., Rellinghaus, B., Schultz, L. 2006. Adjusting the crystal structure of NiMnGa shape memory ferromagnets. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, **305**: 275–277.
- Gaizsch, U., Poştschke, M., Roth, S., Rellinghaus, B., Schultz L., 2009. A 1% magnetostrain in polycrystalline 5M Ni–Mn–Ga. **Acta Materialia**, **57**:365–370.
- Gökdemir N. 2006. Şekil Hatırlamalı Cu-%14,70Al-%4,72Ni Alaşımlarında Martensitik Dönüşümün Kristalografik ve Kinetik Özellikleri. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 66 s.

- Humbeeck, J. V. , 1999. Non-medical applications of shape memory alloys, *Materials Science and Engineering A*, **22**:134-148
- Humbeeck, J. V., 2012. Shape memory alloys with high transformation temperatures. *Materials Research Bulletin*, **47**:2966–2968.
- Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M. A., 2014. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities., *Materials and Design*, **56**:1078–1113.
- Jetta, N. 2010. Synthesis and Characterization of NiMnGa Ferromagnetic Shape Memory Alloy Thin Films. Texas A&M Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Amerika Birleşik Devletleri, 129 s.
- Jiang, C., Liu, J., Wang, J., Xu, L., Xu, H. 2005. Solid–liquid interface morphology and crystal growth of NiMnGa magnetic shape memory alloys. *Acta Materialia*, **53**:1111–1120.
- Jiang, C.B., Wang, J.M., Xu, H.B. 2005. Temperature dependence of the giant magnetostrain in a NiMnGa magnetic shape memory alloy. *Applied Physics Letters*, **86**(25): 252508 - 252508-3
- Jiang, H., Wang, C., Xu, W., Xu, X., Yang, S., Kainuma, R., Liu, X. 2017. Alloying effects of Ga on the Co-V-Si high-temperature shape memory alloys. *Materials and Design*, **116**:300–308.
- Kajiwarra, S., 1999. Characteristic features of shape memory effect and related transformation behavior in Fe-based alloys, *Materials Science and Engineering A*, **273–275**:67–88.
- Kalay, E., Nomer, A. E., Kurgun, M. A., 2018. Investigation of Ni-Mn based shape memory alloy variations transformation temperatures. *Turkish Journal of Engineering (TUJE)*, **2**(3):98-106.
- Kaletin, Y. V. Gerasimov, E. G., Terentev, P. B., Kaletin, A. Y. 2019. Martensitic transformation and magnetotransport properties of Ni<sub>47</sub>Mn<sub>42</sub>In<sub>11</sub> alloy. *Journal of Physics: Conference Series*, **1389**(012093):1-7.

- Kamal, M. and Mohammad, U. S. 2012. A Review: Chill-Block Melt Spin Technique, Theories & Applications, Bentham Science Publishers, 185s.
- Karim, A., Guan, C., Chen, B., Li, Y., Zhang, J., Zhu, L., Deng X., Hu, Y., Bi, K., Li, H., Peng, Y., Li, L. 2020. Dynamic observation of Joule heating-induced structural and domain transformation in smart shape-memory alloy. **Acta Materialia**, **186**:223-228.
- Kaya M., Çakmak Ö., Saygılı T. Y., Atlı K. C., 2016. Şekil hafızalı alaşımlarda martensitik faz dönüşümü ve şekil hafıza mekanizması, Selçuk-Teknik Dergisi, **15**(3):157-172.
- Khan R. A. A., Ghomashchi R., Xie Z., Chen L. 2018. Ferromagnetic shape memory heusler materials:synthesis, microstructure characterization and magnetostructural properties. **Materials**, **11**(988):1-34.
- Kilic, V. T., Unal, E., Demir H. V.2020. High-efficiency flow-through induction heating. **IET Power Electronics**, **13**(10):2119-2126.
- Kokh, K.A., Nenashev, B.G., Kokh, A.E., Shvedenkov, G.Y. 2005. Application of a rotating heat field in Bridgman–Stockbarger crystal growth. **Journal of Crystal Growth**, **275**(1-2):2129-2134.
- Kök, M., Aydoğdu, Y., 2013. Effect of composition on the thermal behavior of NiMnGa alloys. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, **113**:859–863.
- Kurt B., Orhan N., 2003, “Şekil Hafızalı Alaşımlarının Kaynak Edilebilirliği”, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları 4.
- Lazpita, P., Sasmaz, M., Cesari, E., Barandiaran, J.M., Gutierrez, J., Chernenko, V.A. 2016. Martensitic transformation and magnetic field induced effects in Ni<sub>42</sub>Co<sub>8</sub>Mn<sub>39</sub>Sn<sub>11</sub> metamagnetic shape memory alloy. **Acta Materialia**, **109**:170-176.

- Lemke, J.N., Coda, A. 2019. DSC and microstructure analysis of high temperature Ni-Ti-Hf, low hysteresis Ni-Ti-Cu and conventional super-elastic and shape memory Ni-Ti alloy ingots and wires. **Materials Today Communications**, **21**:100666.
- Ley, N. A., Smith, J., Wheeler, R. W., Young, M. L., 2019. Effects of thermo-mechanical processing on precipitate evolution in Ni-rich high temperature shape memory alloys. **Materialia**, **8**:100496.
- Li, Z., Yang, B., Zou, N. Zhang, Y., Esling, C., Gan, W., Zhao X., Zuo, L., 2017. Crystallographic characterization on polycrystalline Ni-Mn-Ga alloys with strong preferred orientation. **Materials**, **10** (463):doi:10.3390/ma10050463.
- Li, Z., Zou, N., Yang, B., Gan, W., Hou, L., Li, X., Zhang, Y., Esling, C., Hofmann, M., Zhao, X., Zuo, L., 2016. Effect of compressive load on the martensitic transformation from austenite to 5M martensite in a polycrystalline NiMn-Ga alloy studied by in-situ neutron diffraction. **Journal of Alloys and Compounds**, **666**:1-9.
- Li, Z., Yang, B., Zhang, Y., Esling, C., Zou, N. Zhao X., Zuo, L. 2014. Crystallographic insights into the intermartensitic transformation in Ni-Mn-Ga alloys. **Acta Materialia**, **74**:9–17.
- Liu Y., Liu Y., Humbeeck J. V., 1998. Two-way shape memory effect developed by martensite deformation in NiTi. **Acta Materialia**. **47**(1):199-209.
- Liu, J.P., Fullerton, E., Gutfleisch, O., Sellmyer, D.J., 2009. Nanoscale Magnetic Materials and Applications, Springer US, 719s.
- Marattukalam, J. J., Balla, V. K., Das, M., Bontha, S., Kalpathy, S. K., 2018. Effect of heat treatment on microstructure, corrosion, and shape memory characteristics of laser deposited NiTi alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, **744**:337-346.
- Morawiec, H., Lelątko, J., Goryczka, T., Prusik, K., Piechota, St., Stróż, D. 2010. extruded rods with <001> axial texture of polycrystalline Ni-Mn-Ga alloys, **Materials Science Forum**, **635**:189-194.

- Moya, X., Manosa, L., Planes, A. et al. 2007. Cooling and heating by adiabatic magnetization in the  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34}\text{In}_{16}$  magnetic shape memory alloy. **Physical Review B(Covering Condensed Matter and Materials Physics)**, 75:184412.
- Mullner, P., Chernenko, V.A., Kosterz, G. 2004. Large cyclic magnetic-field-induced deformation in orthorhombic (14M) Ni-Mn-Ga martensite. **Journal of Applied and Physics**, 95(3): 1531–1536.
- Murray, S.J., Marioni, M., Allen, S.M., O’Handley, R.C., Lograsso, T.A. 2000. 6% magnetic-field-induced strain by twin-boundary motion in ferromagnetic Ni-Mn-Ga. **Applied Physics Letters**, 77(6): 886–888.
- Nespoli, A., Biffi, A., Villa, E., Tuissi, A. 2017. Effect of heating/cooling rate on martensitic transformation of NiMnGa-Co high temperature ferromagnetic shape memory alloys, **Journal of Alloys and Compounds** 690:478-484.
- Niendorf, T., Lauhoff, C., Karsten, E., Gerstein, G., Liehr, A., Krooß, P., Maier, H.J. 2019. Direct microstructure design by hot extrusion – High-temperature shape memory alloys with bamboo-like microstructure. **Scripta Materialia**, 162:127-131.
- Nikolaev, V.I., Stepanov, S.I., Yakushev, P.N., Krymov, V.M., Kustov, S.B. 2020. Burst-like shape recovery and caloric effects in Ni–Fe–Ga–Co single crystalline shape memory alloys, **Intermetallics**, 119:106709.
- Otsuka, K. ve Ren, X, 1999. Recent developments in the search of shape memory alloy, **Intermetallics**, 7, 511-528.
- Özkale, B., Mushtaq, F., Fornell, J., Chatzipirpiridis, G., Martin, L.H.J., Sort, J., Müller, C. M., Pellicer, E., Nelson, B.J., Pané, S., 2016. Single step electrosynthesis of NiMnGa alloys. **Electrochimica Acta**, 204:199–205.
- Planes, A., Manosa, L. 2006. Ferromagnetic shape memory alloys. **Materials Science Forum**, 512: 145–152.

- Pons, J., Chernenko, V. A., Santamarta, R., Cesari, E. 2000. Crystal structure of martensitic phases in Ni-Mn-Ga shape memory alloys. **Acta mater**, **48**: 3027-3038.
- Patel, S. K., Swain, B., Roshan R., Sahu, N. K., Behera A. 2020. A brief review of shape memory effects and fabrication processes of NiTi shape memory alloys. **Materials Today: Proceedings**, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.539>, in Press.
- Perez-Checa, A., Feuchtwanger, J., Barandiaran, J.M., Chernenko, V.A. 2018. Ni-Mn-Ga high temperature shape memory alloys: Function stability in  $\beta$  and  $\beta + \gamma$  regions. **Journal of Alloys and Compounds** ,**741**:148-154.
- Pirge, G., Hyatt, C.V., Altıntaş, S. 2004. Characterization of NiMnGa magnetic shape memory alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, **155–156**:1266–1272.
- Prusik, K., Matyja, E., Zubko, M., Kubisztal, M., Chrobak, A. 2016. Effect of the boron addition on the structure of the Ni–Mn–Co–In alloys, **Acta Physica Polonica A** **130**(4):1023-1025.
- Qader, I. N., Kök, M., Dağdelen, F. 2019. Effect of heat treatment on thermodynamics parameters, crystal and microstructure of (Cu-Al-Ni-Hf) shape memory alloy. **Physica B: Condensed Matter**, **553**:1–5.
- Qamar, S. Z., Chekotu, J.C., Al-Maharbi, M., Alam, K., 2019. Shape Complexity in Metal Extrusion: Definitions, Classification, and Applications. **Arabian Journal for Science and Engineering**, **44**(9):7371-7384.
- Sauer G. 2006. Extruded Products, 9-58. *In*: Extrusion, Second Edition (Eds: M. Bauser, G. Sauer, K. Siegert). ASM International, Materials Park, Ohio, USA.
- Sehitoglu, H., Patriarca, L., Wu, Y. 2017. Shape memory strains and temperatures in the extreme. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, **21**(2): 113–120.

- Shen, Y., Suna, W., Wei, Z.Y., Shen, Q., Zhanga, Y.F., Liu, J. 2019 Orientation dependent elastocaloric effect in directionally solidified Ni-Mn-Sn alloys. **Scripta Materialia**, **163**:14–18.
- Shen, Y., Sun, W., Wei, Z., Li, J., Guo, J., Wang, K., Zhang, Y., Liu, J., 2020. Influence of microstructure on elastocaloric and shape memory effects in  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{32}\text{Sn}_7\text{Co}_{11}$  alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, **832**:154830.
- Siegert, K., Rod and Tube Extrusion Processes, 59-139. *In*: Extrusion, Second Edition (Eds: M. Bauser, G. Sauer, K. Siegert). ASM International, Materials Park, Ohio, USA.
- Simon, A.A., 2004. Shape Memory Response And Microstructural Evolution of a Severe Plastically Deformed High Temperature Shape Memory Alloy (NiTiHf), Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 91s.
- Sozinov, A., Likhachev, A.A., Lanska, N., Ullakko, K. 2002 Giant magnetic field induced strain in NiMnGa seven-layered martensitic phase. **Appl Physics. Letters**, **80**: 1746–1748.
- Saurabh, S. K., Chethan, K. N., Laxmikant, G., K., Anand, P., Padmaraj, N. H. 2018 Innovations and recent trends in Shape Memory Alloy: a review. **International Journal of Engineering & Technology**, **7**(4): 2172-2177.
- Sünkür E. 2016. Ekstrüzyon İşleminde Proses Parametrelerinin Etkisinin Sonlu Elemanlar İle Analizi ve Taguchi Yöntemi İle Optimizasyonu. Dicle Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır, 59 s.
- Trócheza, J.C., Camargo, J.L., Piñeres, I., Landínez Tellez D.A. 2019. Effect of Fe on thermal and electrical properties in  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ga}$  Heusler alloys. **Physica B: Condensed Matter** **558**:38–43.
- Turabi, A. S. 2015. Effects of Magnetic Field On The Shape Memory Behavior of Single and Polycrystalline Magnetic Shape Memory Alloys. Kentucky Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Doktora Tezi, Lexington, Amerika Birleşik Devletleri, 130 s.

- Ullakko, K., Huang, J.K., Kantner, C., O'Handley, R.C., Kokorin, V.V. 1996. Large magnetic-field-induced strains in Ni<sub>2</sub>MnGa single crystals. **Appl Physics. Letters**, **69**: 1966–1968.
- Upadhyay, S., Saxena, K. K. 2020. Effect of Cu and Mo addition on mechanical properties and microstructure of grey cast iron: An overview. **Materials Today: Proceedings**, **26**:2462–2470.
- Varzaneh, A. G., Kameli, P., Zahedi, V. R., Karimzadeh, F., Salamati, H. 2015. Effect of heat treatment on martensitic transformation of Ni<sub>47</sub>Mn<sub>40</sub>Sn<sub>13</sub> ferromagnetic shape memory alloy prepared by mechanical alloying. **Metals and Materials International**, **21**(4): 758-764.
- Vasilev, A. N., Buchelnikov, V. D., Takagi, T., Khovailo, V. V., Estrin, E. I. 2003. Shape memory ferromagnets. **Physics-Uspekhi**, **46**: 559–588.
- Webster P. J., Ziebeck, K. R. A. 1988. Heusler Alloys. in Alloys and Compounds of d Elements with Main Group Elements. Part 2. Landolt–Börnstein–Group III Condensed Matter. Vol. 19C, Springer Verlag, Berlin, pp. 75–79.
- Wang, Y., Salas, D., Duong, T. C., Medasani, B., Talapatra, A., Ren, Y., Chumlyakov, Y. I., Karaman, I., Arroyave, R. 2019. On the fast kinetics of B2-L2<sub>1</sub> ordering in Ni-Co-Mn-In metamagnetic shape memory alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, **781**:479-489.
- Wang, J., Jiang, C. 2008. Single-crystal growth of NiMnGa magnetic shape memory alloys. **Journal of Crystal Growth**, **310**:865–869.
- Wang, Z., Zu, X., Fu, Y. 2011. Review on the temperature memory effect in shape memory alloys. **International Journal of Smart and Nano Materials**, **2**(3):101-119.
- Wei, L., Zhang, X., Qian M., Cui, X., Geng L., Sun J., Panina, L. V., Peng H.-X. 2016. Introducing equiaxed grains and texture into Ni-Mn-Ga alloys by hot extrusion for superplasticity. **Materials and Design**, **112**:339-344.
- Xin, Y., Chai, L., Xu H. 2007. Shape memory characteristics of dual-phase Ni–Mn–Ga based high temperature shape memory alloys. **Scripta Materialia**, **57**:599–601.
- Xin, Y., Zhou, Y. 2016. Martensitic transformation and mechanical properties of NiMnGaV high-temperature shape memory alloys. **Intermetallics**, **73**:50-57.

- Yan, W., Wang, C.H., Zhang, X.P. and Mai, Y-W., 2003. Theoretical modelling of the effect of plasticity on reverse transformation in superelastic shape memory alloys, **Materials Science and Engineering A** **354**:146-157.
- Yang, S., Liu, Y., Wang, C., Liu, X. 2012. Martensite stabilization and thermal cycling stability of two-phase NiMnGa-based high-temperature shape memory alloys, **Acta Materialia**, **60**:4255–4267.
- Yang, H., Chen, Y., Bei, H., dela Cruz, C.R., Wang, Y.D., An, K. 2016. Annealing effects on the structural and magnetic properties of off-stoichiometric Fe-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloys. **Materials and Design**, **104**:327–332.
- Yıldırım S., 2014. Nanoyapıdaki Ni<sub>50</sub>Mn<sub>34-x</sub>Cu<sub>x</sub>In<sub>16</sub> (x= 1.3, 1.5) Heusler Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 90s.
- Zhu Y., Yu K, 2013. A model considering mechanical anisotropy of magnetic-field-induced superelastic strain in magnetic shape memory alloys, **Journal of Alloys and Compounds**, **550**:308–313.
- Zhuo, L., Schneider, M. M., Giri, A., Cho, K., Sohn, Y. 2017. Microstructural and crystallographic characteristics of modulated martensite, non-modulated martensite, and pre-martensitic tweed austenite in Ni-Mn-Ga alloys. **Acta Materialia**, **134**:93-103.
- Zhuo, L., Song, B., Li, R., Wei, Q., Yan, C., Shi, Y., 2020. Effect of element evaporation on the microstructure and properties of CuZnAl shape memory alloys prepared by selective laser melting. **Optics and Laser Technology**, 127-106164.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** Serkan DAL

**Uyruğu:** Türkiye (T.C)

**Doğum Tarihi ve Yeri:**

**Medeni Durum:**

**e-mail:**

**Yazışma Adresi:**

### EĞİTİM

| Derece        | Kurum                                                           | Mezuniyet Tarihi |
|---------------|-----------------------------------------------------------------|------------------|
| Yüksek Lisans | Bartın Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme<br>Müendisliği A.B.D. | 2014             |
| Lisans        | Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme<br>Müendisliği       | 2011             |
| Lise          | Fener Lisesi, Zonguldak                                         | 2006             |

### İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl        | Kurum                                                                               | Görev                       |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 2013-Halen | Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi                                              | Araştırma<br>Görevlisi      |
| 2011-2012  | ER-DUŞ Küvet Jakuzi Yapı Malzemeleri İthalat<br>İhracat Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. | Kalite Kontrol<br>Sorumlusu |

### YABANCI DİL

İngilizce

**YAYINLAR**

1. Dal, S., Demirel, B., Eşkil, M., (2021). The effects of homogenization time on the crystal structure and hardness of NiMnGaMo alloy. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **24**(2):493–502.
2. Dal, S., Sütçü M., Gök, M. S., Gençel, O., (2020). Characteristics of lightweight diatomitebased insulating fire bricks. *Journal of the Korean Ceramic Society*, **57**, pp.184–191.

