

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



**ARK ERGİTME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN NiTiCo ŞEKİL
HATIRLAMALI ALAŞIMIN, FAZ DÖNÜŞÜM
SICAKLIKLARININ, MANYETİK VE YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Murat KURT

Yüksek Lisans Tezi

FİZİK ANABİLİM DALI

Genel Fizik Bilim Dalı

NİSAN 2021

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**ARK ERGİTME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN NİTiCo ŞEKİL
HATIRLAMALI ALAŞIMIN, FAZ DÖNÜŞÜM SICAKLIKLARININ,
MANYETİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Tez Yazarı
Murat KURT

Danışman
Prof. Dr. Cengiz TATAR

NİSAN 2021
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Ark Ergitme Yöntemiyle Üretilen NiTiCo Şekil Hatırlamalı Alaşımın, Faz Dönüşüm Sıcaklıklarının, Manyetik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi

Yazarı: Murat KURT

İlk Teslim Tarihi: 15.03.2021

Savunma Tarihi: 12.04.2021

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Cengiz TATAR Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Fatih Ahmet ÇELİK Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Ark Ergitme Yöntemiyle Üretilen NiTiCo Şekil Hatırlamalı Alaşımın, Faz Dönüşüm Sıcaklıklarının, Manyetik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi ” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

12.04.2021

Murat KURT



ÖNSÖZ

Ülkem ve bilim adına yararlı çalışmalar yapmak için başladığım bu tez “**Ark Ergitme Yöntemiyle üretilen NiTiCo Şekil Hatırlamalı Alaşımın, Faz Dönüşüm Sıcaklıklarının, Manyetik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi**” çalışmasında beni yüreklendiren, çalışmamın her aşamasında yardımını ve engin bilgisini esirgemeyen, sistematik çalışma prensibi, yapıcı eleştirileri ve önerileriyle yüksek vizyonu sayesinde bilimsel bir dünya görüşüne sahip, akla ve bilime önem veren çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Cengiz TATAR’ a sonsuz teşekkür ve saygılarımı en içten dileklerle sunarım.

Deneyisel çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, laboratuvarında gerekli imkân ve kolaylıkları sağlayan Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN hocama teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **FF.18.32** numaralı proje olarak desteklenmiştir

Murat KURT
ELAZIĞ, 2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR	4
2.1. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Mikroyapısı.....	7
2.2. Şekil Hatırlama Etkisi.....	8
2.2.1. Şekil Hatırlama Etkisi ve Süperelastiklik.....	10
2.2.2. Tek Yönlü Şekil hatırlama	11
2.2.3. Çift Yönlü Şekil Hatırlama.....	12
2.3. Martensitik Dönüşüm	13
2.3.1. Termoelastik Martensitik Dönüşüm	18
2.3.2. Atermal Martensitik Dönüşüm	18
2.3.3. İzotermal Martensitik Dönüşüm.....	19
2.4. Martensitik Dönüşümün Termodinamiği.....	20
2.5. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kullanım Alanları	22
2.5.1. Havacılık ve Uzay Uygulamaları	24
2.5.2. Robotik Uygulamaları	26
2.5.3. Biyomedikal Uygulamaları	28
2.5.4. Otomotiv Uygulamaları.....	30
3. MATERYAL VE METOT	32
3.1. Alaşımların Karakterizasyonu	32
3.1.1. Numune hazırlama İşlemleri	32
3.1.2. Zımparalama, Parlatma ve Dağlama	34
3.1.3. Optik Mikroskop	36
3.1.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX İncelemesi	36
3.1.5. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC).....	37
3.1.6. X-ışınları Difraktometresi (XRD)	38
3.1.7. Vickers Mikrosertlik Ölçümü.....	39
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	40
4.1. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Ölçüm Sonuçları	40
4.1.1. Alaşımların Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Ölçüm Sonuçları	40
4.2. Optik Mikroskop Ölçüm Sonuçları	42
4.2.1. Alaşımların Optik Mikroskop Ölçüm Sonuçları	43
4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX Ölçüm Sonuçları	45
4.3.1. Alaşımların SEM- EDX Ölçüm Sonuçları	45
4.4. X-ışınları Difraktometresi (XRD) Ölçüm Sonuçları.....	49
4.5. Vickers Mikrosertlik Ölçümü Sonuçları.....	50

4.6. Manyetik Ölçümleri Sonuçları	51
5. SONUÇLAR.....	53
KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Ark Ergitme Yöntemiyle Üretilen NiTiCo Şekil Hatırlamalı Alaşımın, Faz Dönüşüm Sıcaklıklarının, Manyetik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi

Murat KURT

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Nisan 2021, Sayfa: xii + 61

Bu çalışmada $Ni_{50-x}Ti_{50}Co_x$ ($x = \%wt. 2, 4, 6$) şekil hatırlamalı alaşımlar ark ergitme yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen M1($Ni_{48}Ti_{50}Co_2$), M2($Ni_{46}Ti_{50}Co_4$) ve M3($Ni_{44}Ti_{50}Co_6$) şekil hatırlamalı alaşımlarından uygun ebatlardan parçalar kesilip gerekli ölçüm ve analiz işlemleri yapılarak incelenmiştir.

Alaşımların termodinamiksel karakteristik özelliklerini belirleyebilmek için, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ölçümleri yapılmıştır. Yapılan DSC ölçümleri sonucunda M1, M2 ve M3 alaşımlarının entalpi değerleri ve faz dönüşüm sıcaklıkları belirlenmiştir. Yapılan DSC ölçümlerinde alaşımların hepsinde martensit ve austenit faz dönüşümlerinin belirgin ve keskin pikler şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, alaşımların mikro yapı ve fiziksel karakteristik özelliklerini belirleyebilmek için çalışmanın amacına yönelik olarak numunelerin tamamı belirli standartlara getirildikten sonra alaşımların yüzeylerinde meydana gelen yapıları belirlemede optik mikroskopu kullanılmıştır. Numunelerin optik fotoğrafları incelenerek numunelerin yüzeyinde yoğun olmamakla birlikte bir miktar çökelti fazına rastlanmıştır. Taneler ve tane sınırları belirgin bir şekilde gözlenmiştir. Ayrıntılı sonuçlar elde etmek için optik mikroskoptan daha ayrıntılı, yüksek çözünürlüğe ve odak derinliğine sahip olan taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. EDX ölçümleri yapılarak alaşımlardaki matris fazlar belirlenmiştir. M1, M2 ve M3 şekil hatırlamalı alaşımlarda B2 (NiTi) fazı, B19'(NiTi) fazı ile Ti2(NiCo) fazı görülmüştür.

Malzemelerin kristal yapılarının ve faz belirlemelerinin yapılabilmesi için X-ışınları difraktometresi (XRD) ölçümleri yapılmıştır. Malzemelerin XRD ölçüm sonuçlarına bakıldığında, M1 alaşımında baskın faz martensit faz iken M2 alaşımında martensit ve austenit faz eşit oranlarda M3 alaşımında ise austenit fazın baskın faz olduğu gözlemlenmiştir. Üretilen alaşımların sertliklerini belirlemek için alaşımlardan alınan numunelerin Vickers mikro sertlik ölçüm değerleri belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üretilen alaşımların manyetik alana karşı gösterdikleri tepkiler incelenmiştir. Kobalt miktarın artması alaşımların manyetizasyon özelliğini artırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Şekil hatırlamalı alaşımlar, faz dönüşüm sıcaklıkları, mikroyapı, martensit ve austenit faz, manyetik özellikler.

ABSTRACT

Investigation of Phase Transformation Temperatures, Magnetic and Structure properties of NiTiCo Shape Memory Alloy Produced by Arc melting method

Murat KURT

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

April 2021, Pages: xii + 61

In this study, $\text{Ni}_{50-x}\text{Ti}_{50}\text{Co}_x$ ($x = 2, 4, 6$) shape memory alloys were produced by arc melting method. Parts of the produced M1 ($\text{Ni}_{48}\text{Ti}_{50}\text{Co}_2$), M2 ($\text{Ni}_{46}\text{Ti}_{50}\text{Co}_4$) and M3 ($\text{Ni}_{44}\text{Ti}_{50}\text{Co}_6$) shape memory alloys were cut from suitable sizes and examined by performing the necessary measurement and analysis procedures.

Differential scanning calorimetry (DSC) measurements have been made to determine the thermodynamic characteristics of alloys. As a result of DSC measurements, enthalpy values and phase transformation temperatures of M1, M2 and M3 alloys were determined. In DSC measurements, it was observed that martensite and austenite phase transformations in all of the alloys were in the form of distinct and sharp peaks. In addition, in order to determine the microstructure and physical characteristics of the alloys, for the purpose of the study, after all the samples were brought to certain standards, optical microscopy was used to determine the structures formed on the surfaces of the alloys. By examining the optical photographs of the samples, some non-dense precipitation phase was found on the surface of the samples. Grains and grain boundaries were clearly observed. Scanning electron microscopy (SEM), which is more detailed than the optical microscope, has high resolution and focus depth, is was used to obtain detailed results. The matrix phases in the alloys were determined by making EDX measurements. B2 (NiTi) phase, B19' (NiTi) phase and Ti2 (NiCo) phase were observed in M1, M2 and M3 shape memory alloys.

X-ray diffractometry (XRD) measurements were made to determine the crystal structures and phase states of the materials. When the XRD measurement results of the materials were examined, it was observed that the predominant phase in the M1 alloy was martensite phase, while the martensite and austenite phase in the M2 alloy were equally proportions and the austenite phase was the predominant phase in the M3. In order to determine the hardness of the produced alloys, the Vickers micro hardness measurement values of the samples taken from the alloys were by determining and the results obtained were compared. The reactions of the produced alloys against the magnetic field were examined. It has been observed that increasing the amount of cobalt increases the magnetization properties of the alloys.

Keywords: Shape memory alloys, Phase transformation temperatures, Microstructure, Martensite and Austenite phase, Magnetic properties.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Şekil hatırlama olayının şematik gösterimi.	4
Şekil 2.2. Şekil hatırlama olayının oluşum basamakları.....	5
Şekil 2.3. SMA'nın üç boyutlu mikro yapısı: (a) austenit faz ve (b) ikizlenmiş martensit faz. Büyük kürelerin Nikel elementini, küçük kürelerin titanyum elementini temsil edecek şekilde gösterimi [19].....	8
Şekil 2.4. Şekil hatırlama etkisinin mikro düzeyde şematik gösterimi	9
Şekil 2.5. Şekil hatırlama olayı sırasında dönüşüm sıcaklıkları	9
Şekil 2.6. Şekil hatırlama ve süperelastiklik etkisinin meydana geldiği gerilme ve sıcaklık alanları.....	10
Şekil 2.7. Şekil hatırlamalı alaşımların hal durumu	11
Şekil 2.8. Tek yönlü şekil hafıza olayı şematik gösterimi	12
Şekil 2.9. Çift yönlü şekil hatırlama olayının şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.10. Austenit martensit yapı arasındaki sıcaklığa bağlı dönüşüm, (a) austenit martensit dönüşüm (b) martensit austenit dönüşüm	14
Şekil 2.11. Austenitten martensite şematik olarak dönüşüm mekanizmaları	15
Şekil 2.12. (a) Austenit (kübik geometri), (b) Martensit yapı (eşkenar geometri, monoklinik)	16
Şekil 2.13. Martensitik dönüşüme etki eden yüzey kabartısının ve bozulma çizgisinin kırılmasının şematik gösterimi. (a) Yüzey kabartısı, (b) Bozulma çizgisinin kırılması.....	17
Şekil 2.14. Difüzyonsuz martensitik dönüşüm olayına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişimin şematik gösterimi	18
Şekil 2.15. Atermal dönüşüm için dönüşüm yüzdesinin zamanla değişimi.....	19
Şekil 2.16. İzotermal dönüşüm için dönüşüm yüzdesinin zamanla değişimi	20
Şekil 2.17. Austenit ve martensit fazların kimyasal serbest enerjisinin sıcaklıkla değişimi.....	21
Şekil 2.18. Boeing'in SMA yapıları değişken geometri cevronu (VGC).....	25
Şekil 2.19. NASA tarafından geliştirilen SMA yapıları esnek lastik.....	26
Şekil 2.20. Yusufçuk böceğinin uçuşu ilham alınarak Festo Biyonik Opter üretilmiş.	27
Şekil 2.21. NiTi alaşımlarının şekil hatırlama özelliği ile hareket edebilen mikro robot	28
Şekil 2.22. Şekil hatırlamalı alaşımların kullanıldığı mikro robotun hareketleri.....	28
Şekil 2.23. ŞHA yapıları malzemeler; (a) Kendiliğinden genişleyen stentler. (b) Ortopedik zımba ve onun kemiğe uygulanması. (c) Kan dolaşımında dağılan pıhtıları tutan Simon Filtresi [98].	29
Şekil 2.24. (A) Atriyal Septal kapama cihazı ile (B) Atriyal Septal kapama cihazının kalbin içindeki yerleşimi gösterilmiştir	30
Şekil 2.25. Şekil hatırlamalı alaşım lifi olan yapay kalp destek cihazları	30
Şekil 2.26. Otomotiv alanındaki mevcut potansiyel ŞHA uygulamaları	31

Şekil 3.1. Bu çalışmada kullanılan Graseby Specac marka presleme cihazı.	33
Şekil 3.2. Bu çalışmada kullanılan Protherm CWF-1200 marka kül fırını.	34
Şekil 3.3. (a) Birinci aşama bakalite alma işlemi, (b) ikinci aşama, kalıptan çıkartılan donmuş bakalit içindeki numune, (c) son aşaması ise bakalit içindeki numunelerin zımparalanmış ve temizlenmiş halleri.	34
Şekil 3.4. Bu çalışmada kullanılan Polisher MPS200 marka zımparalama cihazı.	35
Şekil 3.5. Metalografik gözlemlerin yapıldığı Optik Nikon MA 200 Optik Fotoğraf cihazı.	36
Şekil 3.6. Bu çalışmada kullanılan SEM (LEO, EVO 40, England Cambridge) cihazı.	37
Şekil 3.7. Bu çalışmada kullanılan Perkin Elmer Sapphire (DSC) ölçüm cihazı	38
Şekil 3.8. Bu çalışmada kullanılan Bruker Discover D8 X-ray diffraction (XRD) analiz sistemi.	39
Şekil 4.1. M1, M2 ve M3 alaşımlarına ait DSC grafiği.	41
Şekil 4.2. M1 Numunesinin farklı bölgelerinden 500x büyütmeyle çekilen yüzey fotoğrafı.	43
Şekil 4.3. M2 Numunesinin farklı bölgelerinden 500x büyütmeyle çekilen yüzey fotoğrafı.	44
Şekil 4.4. M3 Numunesinin farklı bölgelerinden 500x büyütmeyle çekilen yüzey fotoğrafı.	44
Şekil 4.5. M1 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüleri.	46
Şekil 4.6. M2 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüleri.	47
Şekil 4.7. M3 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüleri.	48
Şekil 4.8. M1, M2 ve M3 alaşımlarının X-ışını desenleri.	49
Şekil 4.9. Alaşımların Vickers Sertlik ölçümleri.	51
Şekil 4.10. $Ni_{50-x}Ti_{50}Co_x$ ($x=2,4,6$) şekil hatırlamalı alaşımların manyetizasyon eğrileri.	52

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Şekil hatırlama özelliğini gösteren bazı alaşımların yapıları ve düzen durumları	6
Tablo 2.2. Bazı şekil hatırlamalı alaşımların malzeme yapıları, martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve histerezisleri	7
Tablo 2.3. Martensitik dönüşüm tiplerinin genel özellikleri	16
Tablo 2.4. Potansiyel şekil hatırlamalı alaşım uygulamaları.....	23
Tablo 2.5. Nitinol SMA'ların Özellikleri	24
Tablo 3.1 Ark ergitme yöntemiyle elde edilen şekil hatırlamalı alaşımların ağırlıkça oranlarda verilen kompozisyonları.	33
Tablo 4.1. M1, M2 ve M3 Alaşım gruplarının dönüşüm sıcaklık değerleri	41

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_s	: Austenit başlama sıcaklığı (Austenit start)
A_f	: Austenit bitiş sıcaklığı (Austenit finish)
M_f	: Martensit bitiş sıcaklığı (Martensit finish)
M_s	: Martensit başlama sıcaklığı (Martensit start)
R_s	: Rombohedral başlama sıcaklığı (Rombohedral start)
R_f	: Rombohedral bitiş sıcaklığı (Rombohedral finish)
T_0	: Martensit-austenit denge sıcaklığı
ΔG	: Gibbs serbest enerjisi değişimi
ΔH	: Entalpi değişimi
ΔS	: Entropi değişimi

Kısaltmalar

DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (Differential Scanning Calorimetry)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
EDX	: Enerji Dağıtıcı X-Işın Spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
XRD	: X-ışın difraksiyonu (X-ray Diffraction)
ŞHA	: Şekil Hatırlamalı Alaşımlar
ŞHE	: Şekil Hatırlama Etkisi

1. GİRİŞ

Günümüzde büyük bir hızla gelişen teknolojik gelişmeler açısından akıllı malzemelerin elde edilmesi ve geliştirilmesi hem akademik hem de endüstriyel alanlarda giderek önem kazanmaktadır. Bu önem sadece malzemenin üretimi ile sınırlı kalmamalıdır. Malzemeye çeşitli yenilikler ve fonksiyonlar katabilmeli ve malzemenin kullanım alanını genişleterek malzemenin kullanılabilirliğini artırabilmelidir. Bu yeniliklerle malzemelerin kullanılabilirliği gelişmiş mekanik sistemlerde artmıştır. Şekil hatırlamalı alaşımlar da (SHA) bu durum sonucu ortaya çıkan yeni bir malzeme kategorisindedir ve zamanla ilgi alanı genişlemiştir [1].

SHA'ların temel özelliği, alaşımın belirli bir sıcaklığın (dönüşüm sıcaklığı) altında ve üstündeki sıcaklıklarda farklı iki şekil ya da kristal yapıya sahip olabilmeleridir. Alaşım bu sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda martensit fazda, üzerindeki sıcaklıklarda ise austenit fazdadır. Bu durumu mikro yapısındaki dolayısıyla makro yapısındaki faz dönüşümleriyle ilgilidir. Bu faz dönüşümü, metal ve alaşımlarının farklı özellikler göstermesinin sebebi olarak düşünülür. Metal biliminde büyük öneme sahiptir. Martensitik faz dönüşümü difüzyonsuz olup Katıhâl fiziğinde önemli bir yere sahiptir. Difüzyonsuz olarak gerçekleşen bu faz dönüşüm olayı ilk olarak Alman fizikçi metal bilimci Adolph Martens tarafından demir bazlı alaşımlarda gözlemlendiğinden martensitik faz dönüşümü olarak ifade edilmiştir. Sonraki birçok araştırma ve çalışma sonucunda martensitik dönüşümde çok fazla gelişmeler olmuştur. Demir bazlı alaşımların dışında bu özellik soy metaller, özellikle de bakır bazlı alaşımlar ve metalik özellik taşımayan bazı malzemelerde de gözlenmiştir [2, 3].

SHA'lar bugün de gelecekte de akıllı malzeme sınıfında yerini almaya devam edecektir. Bu derece önemli olmalarının ana nedenleri özgün özellikleri, yüksek deformasyondan sonra dışarıdan hiçbir müdahale yapılmadan oluşan bozulmayı geri kazanabilmesi (süperelastilike) ve yine yüksek bozulma oranlarından sonra malzemenin ısıtılarak eski halini alabilmesi gösterilebilir [4]. Yapılan alaşım tekrar soğutulduğunda bozulmaya uğramadan önceki şeklini almıyorsa bu olaya “tek yönlü şekil hatırlama olayı” denir. Tek yönlü şekil hatırlama olayında malzemenin eski şeklini hatırlama kapasitesi çift yönlü şekil hatırlama olayına oranla daha yüksektir [5]. Bazı alaşımlar ise tekrarlanan ısıtma ve soğutma çevrimleri sonrası tekrar şekil değişimine uğrarlar. Bu olaya da “çift yönlü şekil hatırlama olayı” denir. Şekil hatırlamalı alaşımlar elektriksel ve kimyasal işlemler, mekanik, termodinamik ve çevresel şartlar altında alışılmışların dışında termomekanik ve termoelektriksel davranış sergilerler [6].

Alaşımlardaki şekil hatırlama olayı değişik zamanlarda üzerinde çalışma imkânı sağlanan önemli bir alan haline gelmiştir. İlk defa 1932 yılında Altın-Kadmiyum (Au-Cd) alaşımları üzerine yapılan bir çalışma sırasında Chang ve Read tarafından gözlemlenmiştir. Aynı dönemde Au-Cd alaşımının süperelastiklik özelliği İsveçli Fizikçi Gustav Arne Ölander keşfedilmiştir.

Süperelastiklik davranışı gerilmenin neden olduğu bir martensitik dönüşüm sonucu oluşur. Şekil hatırlamalı alaşım dönüşümü 1938 yılında Cu-Zn alaşımında da gözlenmiş fakat üzerinde durulmadığı için ilerleyen yıllara kadar bundan bahsedilmemiştir. Yaklaşık on yıl sonra Kurdjumov ve Khandros (1949) tarafından yapılan çalışmalarla gündeme getirilmiştir. ŞHA'nın teknolojik alanda kullanımı ile ilgili ilk sayılabilecek çalışmalar 1960'lı yıllarda başlamıştır. 1962 yılında eş atomlu NiTi alaşımının şekil hatırlama etkisi Buehler ve arkadaşları tarafından Amerika Birleşik Devletleri'nde Deniz Savaş Araçları Laboratuvarında keşfedilmiştir. Bu alaşım, bileşenleri olan NiTi ve çalıştıkları laboratuvarın isminin baş harfleri NOL (Naval Ordnance Laboratuvar) kullanılarak NİTİNOL olarak tescillenmiştir [2]. O zamandan beri bu ŞHA'lara ilişkin anlayış, ŞHA'ların anlaşılmasındaki önemli gelişmelerle büyük ölçüde artmıştır. Daha sonra NiTi alaşımlarının çeşitli malzemelerde kullanılmasının nedeni olarak bu alaşımların yüksek düzeyde korozyon direncine sahip olması, süper esneklik kapasitesi ve enerjiyi çok iyi soğurma yeteneğine sahip olması gösterilebilir. NiTi alaşımları farklı mekanik özellikleri nedeniyle biyomedikal ve endüstriyel uygulamalarda da kullanılmıştır.

ŞHA'ların içerisinde birbirinden farklı iki faz bulunur. Bunlar, austenit ve martensit fazlardır. Martensit faz düşük sıcaklıklarda dengeli iken, austenit faz yüksek sıcaklıklarda dengelidir. Bu da sıcaklığın malzeme için önemli olduğunu gösterir. Malzemelerin yapısında meydana gelen ısı veya enerji değişimi ile austenit ve martensit faz dönüşümü gerçekleşmektedir. Enerji veya ısı, fiziğin alt dalı olan termodinamik ile ilişkilidir. Bu nedenle olayın iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için termodinamik bilgisi gerekmektedir. Termodinamik kelimesi Latince sözcükler olan thermos (ısı) ve dynamic (güç, enerji) sözcüklerinin birleştirilmesi ile türetilmiştir. XVII. yüzyılın sonlarından itibaren tekstil endüstrisinin hızlı gelişimiyle enerji ihtiyacı artırmıştır. Kas gücüyle bu ihtiyaç karşılanamadığından buhar makineleri keşfedilmiştir. İlk buhar makineleri sanayileşmenin başladığı İngiltere'de 1697 ve 1712 yıllarında Thomas Savery ve Thomas Newcomen tarafından yapılmıştır. Yavaş ve düşük verimliliğe sahip bu makineler üzerine 1765-1766 yıllarında İskoçyalı mühendis James Watt'ın çalışmaları ve buhar gücünün o zamana kadar bilinmeyen özelliklerini keşfetmesi bilim ve sanayi alanında çok önemli gelişmelerin meydana gelmesini sağlamıştır [7, 8]. Fransız fizikçi Sadi Carnot 1824 yılında ısı makinelerinin çalışma prensipleri üzerine çalışmalar yapmış ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşme olasılığını incelemiştir. Yazdığı "*Reflections on the Motive Power of Heat and on the Machines Adopted to Develop this Power*" isimli kitap ile termodinamik biliminin temellerini atmıştır. İskoçyalı fizikçi William Thomson (Lord Kelvin) 1849 yılında bilimi günlük hayatta kullanabilecek hale getirmek için yaptığı bir yayında ilk kez termodinamik ifadesini kullanmıştır [8, 10].

Termodinamik ilk başlarda ısı enerjisi ile mekanik enerji arasındaki ilişkiyi incelerken, günümüzde enerji ve enerji dönüşümlerinin tamamını içine alan bir bilim dalıdır. Doğadaki tüm olayların enerji ve madde eksenindeki dönüşümlerine bakarak bu kavramı daha iyi anlayabiliriz.

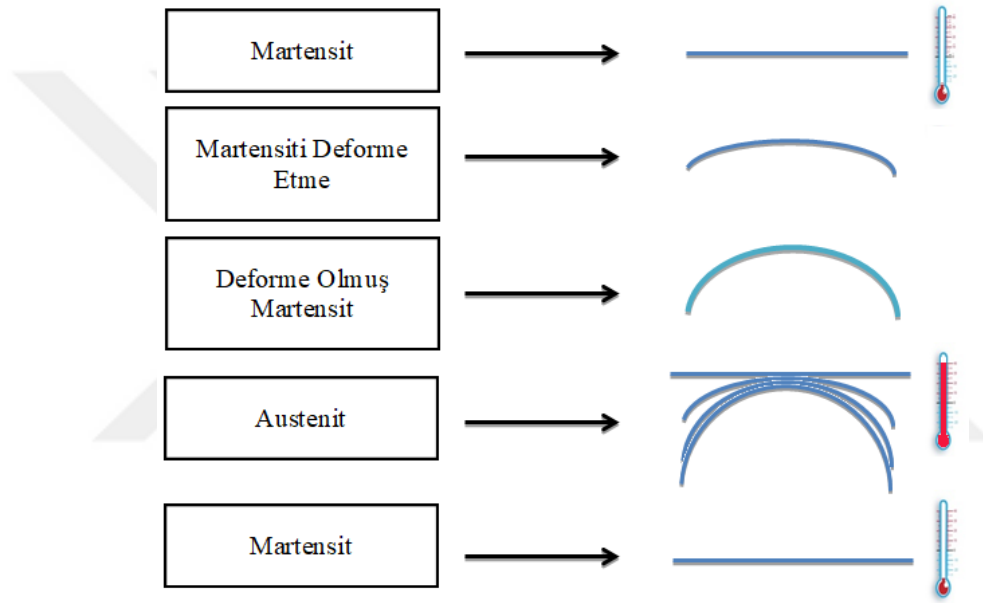
Dünya üzerinde kullanılan tüm teknolojik malzemeler termodinamik prensiplerine göre çalışır. Termodinamik bilimi mühendislik alanlarında olduğu gibi, kullandığımız bilgisayarımızda, cep telefonlarında, arabalarda, uçaklarda, güç üretim sistemlerinde, metalürjide ve uzay araçlarında kullanılmaktadır [11,12].

Bu çalışmanın amacı, ark ergitme yöntemiyle üretilen NiTiCo şekil hatırlamalı alaşımların mikro yapısını, termodinamik özelliklerini ve manyetik özelliklerini incelemektir. ŞHA üzerine geniş alanda çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Fakat olayın mikro yapısı, termodinamiği ve manyetik özellikleri bakımından detaylı bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle yapılan bu çalışma bilimsel kaynaklara katkı sağlayacaktır.



2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR

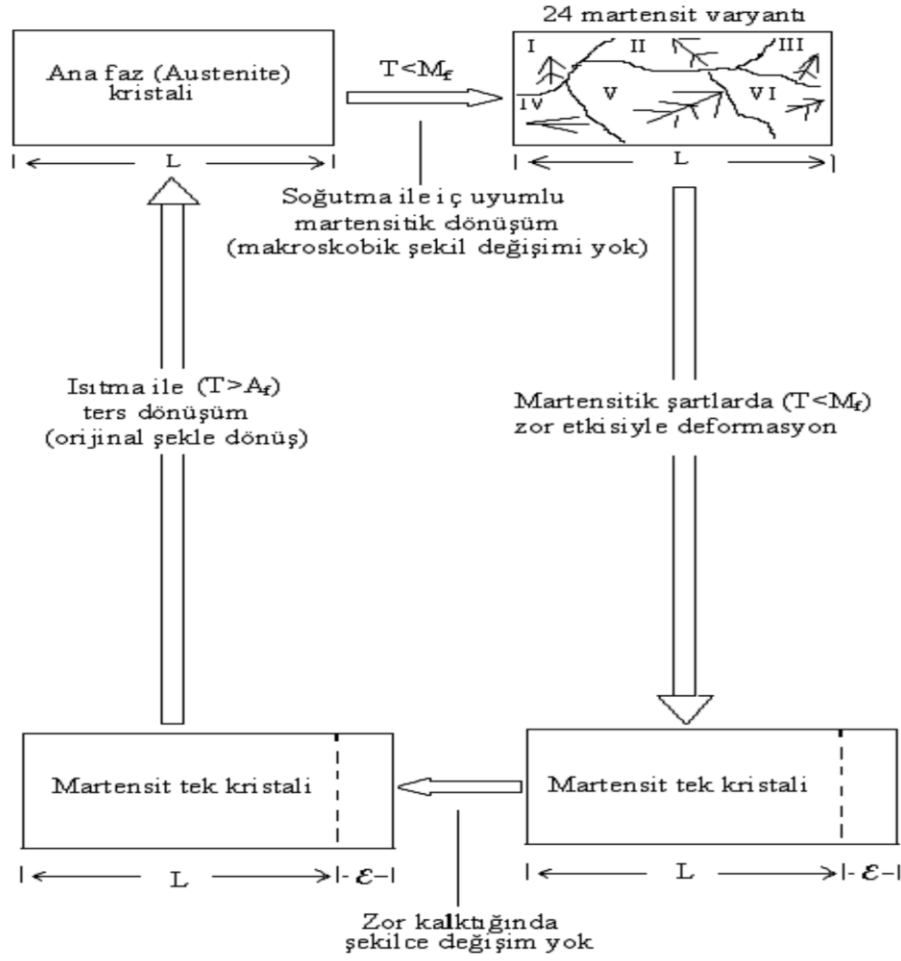
Şekil hatırlama, düşük sıcaklıktaki martensit fazında şekil değişikliğine uğratıldıktan sonra üzerindeki dış etki kaldırıldığında (M_f sıcaklığından düşük sıcaklıklarda), martensit fazdan ana faza dönüşecek şekilde A_f sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara çıkıncaya kadar malzemeye ısı verildiğinde malzemenin kendi orijinal şeklini hatırlaması olayına denir [5]. Başka bir ifadeyle, malzeme martensitik fazdayken değişen kendilerine özgü şekillerini, austenit dönüşüm sıcaklığının üzerine kadar çıkarıldıklarında şeklini büyük oranda geri kazanabilen alaşımlardır. Şekil hatırlama olayının çalışma prensibi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Şekil hatırlama olayının şematik gösterimi [13].

Şekil hatırlamalı alaşımları başka bir açıdan ele alırsak, şekil 2.2’de görüldüğü gibi M_f sıcaklığının altında alaşımın şekli bozulursa, A_f sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılana kadar bozulan şekillerini korurlar. A_f sıcaklığının üzerine çıkıncaya kadar alaşıma ısı verildiğinde malzeme deformasyon etkisini kaybederek austenit sıcaklığındaki orijinal şekline geri döner. Şekil hatırma olayının gerçekleşme şartları maddeler halinde maddeler halinde sıralanmıştır [14].

- Martensitik dönüşümün termoelastik olması,
- Dönüşüm olayının gerçekleşmesi için deformasyon, çizgisel kusur olmadığı ikizlenme benzeri bir olay ile gerçekleşmesi,
- Ana yapısal fazın düzenli olması gerekmektedir.



Şekil 2.2. Şekil hatırlama olayının oluşum basamakları [14].

Bu alaşımlar, şekil hatırlama özellikleri ile günümüzde biyomedikal, tıp, robotik uygulamalar, mühendislik, havacılık, otomasyon ve kontrol cihazları, otomotiv, uzay araçları, enerji, güvenlik ve güvenlik elemanları, ısıtma ve havalandırma, kimyasal işleme, elektronik endüstrilerinde yenilikçi alanlarındaki uygulamalarıyla sık olarak kullanılmaktadır. Daha iyi şekil hatırlama ve korozyon direncine sahip olan NiTi alaşımları yerine ucuzlukları nedeniyle bakır bazlı alaşımlar çeşitli uygulamalarda daha yaygın kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan bakır bazlı alaşımlar, NiTiCu, CuAlMn, NiAlCu ve CuZnAl alaşımlardır. Bunlar üçlü alaşımlar şeklinde kullanılabildiği gibi manganez içeren dördü alaşımlar şeklinde de kullanılabilmektedir. Ayrıca ince taneli yapı elde etmek için alaşıma bor, seryum, kobalt, demir, titanyum, vanadyum ve zirkonyum gibi elementler karıştırılır. Taneler arası kırılmayı önlemek amacı ile ince taneli bakır bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar ve bunların mekanik özellikleri üzerindeki çalışmalara büyük önem verilmektedir [15]. Şekil hatırlama özelliğini gösteren bazı alaşımlar Tablo 2.1’de gösterilmiştir. Bununla beraber, ŞHA’ların daha iyi bir performansa sahip olmaları için hâlâ çok yoğun ve sistematik bir araştırma çalışmasına gereksinim duyulmaktadır.

Tablo 2.1. Şekil hatırlama özelliğini gösteren bazı alaşımların yapıları ve düzen durumları [14].

Alaşım	Kompozisyon (Atomik %)	Yapı Değişimi	Sıcaklık Histerezisi (°C)	Düzen Durumu
Fe-Mn-Si	14-32 Mn 1-6 Si	FCC→HCP FCC→BCT FCC→FCT	-100 -200	Düzensiz
Cu-Zn	38.5-41.5Zn	B2→9R, rombohedral M9R	-10	Düzenli
Au-Cd	46.5- 50Cd	B2 → 2H	-15	Düzenli
Cu-Al-Ni	28 -29Al 3- 4.5Ni	DO3→ 2H	-35	Düzenli
Cu-Zn-X (X=Si, Sn, Al, Ga)	Birkaç at. %	(DO3)→ 9R (18R) B2 (L21)→M9R (M18R)	-10	Düzenli
Ni-Al	36 -38Al	B2→ 3R	-10	Düzenli
Cu-Au-Zn	23- 28Au 45- 47Zn	Heusler→ 18R	-6	Düzenli
Ti-Ni	49 -51Ni	B2→ Monoklinik B2→ <i>Rombohedral</i>	20- 100 1- 2	Düzenli
Ag-Cd	44- 49Cd	B2→ 2H	-15	Düzenli
Cu-Sn	-15Sn	DO3→ 2H, 18R	—	Düzenli
In-Tl	18 -23Tl	FCC→ FCT	-4	Düzensiz
Mn-Cu	5 -35 Cu	FCC→ FCT	—	Düzensiz

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda birçok alaşımın şekil hatırlama etkisine sahip olduğu bilinmektedir. Şekil hatırlama özelliğine sahip yeni malzemeler bulmak için yapılan çalışmalar artmaktadır. Bugüne kadar bulunmuş şekil hatırlama özelliğine sahip bazı alaşımların martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve sıcaklık histerezisleri Tablo 2.2’de gösterilmiştir. Fakat şimdiye kadar değişik birçok alaşım şekil hatırlama etkisi özelliği göstermesine rağmen, endüstriyel olarak sadece şekil değişimlerinde kullanılabilecek kadar kuvvet oluşturabilen ve yeterince uzayabilen alaşımlar daha ilgi çekici olmuştur. Bugünlerde NiTi, NiTiCu, CuZnAl ve CuAlNi gibi alaşımlar endüstride önemi yeri olan şekil hatırlamalı alaşımlardır. Şekil hatırlamalı alaşımlarda martensitik dönüşüm, yüksek sıcaklıktaki uzun süren austenistik fazın dönüşümü sonucunda termoelastik martensitik meydana gelmesidir. Atomların yer değiştirme miktarı çok küçük olmasına karşın, alaşımdaki tüm atomların hacimsel olarak aynı doğrultuda hareket etmesi dönüşüm sonucunda makroskobik bir şekil değişikliği gerçekleştirir. Sonuç olarak, şekil hatırlamalı alaşımlarda diğer metal ve metal alaşımlardan daha farklı özelliklere sahip olan şekil hafıza etkisi ve süperelastilike gibi özellikler görülür [16].

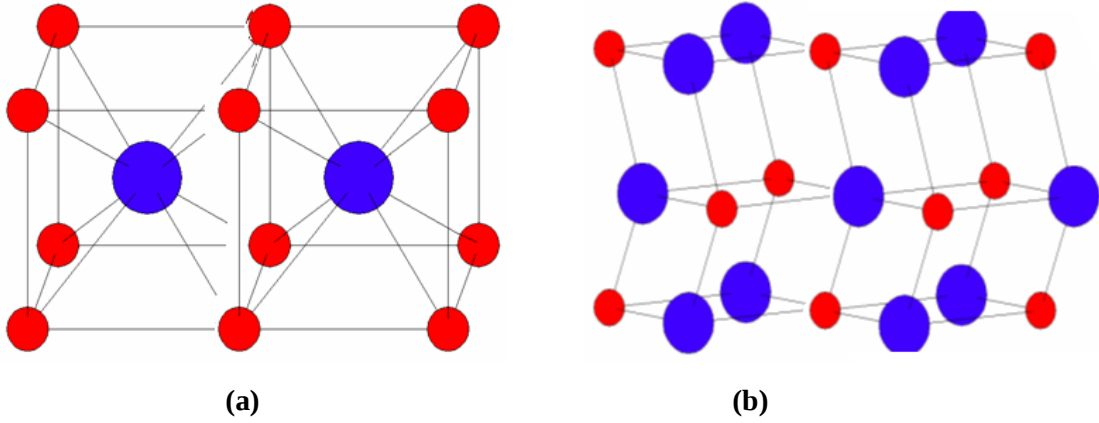
Tablo 2.2. Bazı şekil hatırlamalı alaşımların malzeme yapıları, martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve histerezisleri [17].

Alaşım	Bileşim Oranı (at.)	Martensitik Dönüşüm Sıcaklığı M_s (°C)	Histerezis A_f-M_s
Ag-Cd	%44 / 49 Cd	-190 ile -50 arası	~ 15
Au-Cd	%46,5 / 50,0 Cd	30 ile 100 arası	~ 15
Bakır Esash			
Cu-Zn	%37,8 / 40,6 Zn	-180 ile -10 arası	~ 10
Cu-Au-Zn	%23~28 Au, %45~47 Zn	-140 ile 100 arası	~ 35
Cu-Al-Ni	%14 Al, %3,5 Ni (ağ.)	-150 ile 200 arası	~ 35
Cu-Sn	~ %15 Sn	-120 ile 30 arası	~ 10
Cu-Mn	%5 / 35 Cu	-250 ile 180 arası	~ 25
Nikel Esash			
Ni-Ti	%49-51 Ni	-50 ile 100 arası	~ 30
Ni-Al	%36-38 Al	-180 ile 100 arası	~ 10
Demir Esash			
Fe-Mn-Si	%32 Mn, %6 Si	-200 ile 150 arası	~100
Fe-Pt	%25 Pt	~ -130	~ 4
Fe-Pd	%30 Pd	~ -100	Fe-Pd

2.1. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Mikroyapısı

Şekil hatırlamalı alaşımlarda, alaşımdaki atomlar yakın komşuluklarını değiştirmeden hep birlikte hareket ederek faz dönüşümünü gerçekleştirirler. Bu hareketlerinin sebebi, atomların faz değişimleri esnasında kendilerine özgün bir kristal yapıya sahip olma istekleridir. Bu durum gerçekleşirken alaşımların kimyasal yapısı aynı kalır. Şekil hatırlama etkisi fiziksel bir olaydır [18].

Şekil hatırlamalı alaşımlarda birbirinden farklı iki faz mevcuttur. Bunlar: austenit- martensit fazlardır. Martensit fazı iki düzenli yapıya sahiptir; ikizlenmiş martensit faz ve ikizlenmemiş(deforme) olmuş martensit faz. Martensit faz, eşkenar dörtgen bir geometri sergiler düşük sıcaklıkta ve yüksek zorda daha karardır. Aynı zamanda daha yumuşak ve sünek olma eğilimindedir. Austenit faz ise oldukça simetrik ve yapı merkezli bir kübik geometri sergiler. Austenit faz yüksek sıcaklıkta ve düşük zorda kararlı olup daha sert ve daha güçlü olma eğilimindedir [19]. Şekil 2.3 (a) ve şekil 2.3 (b) de olduğu gibi gösterilmiştir.

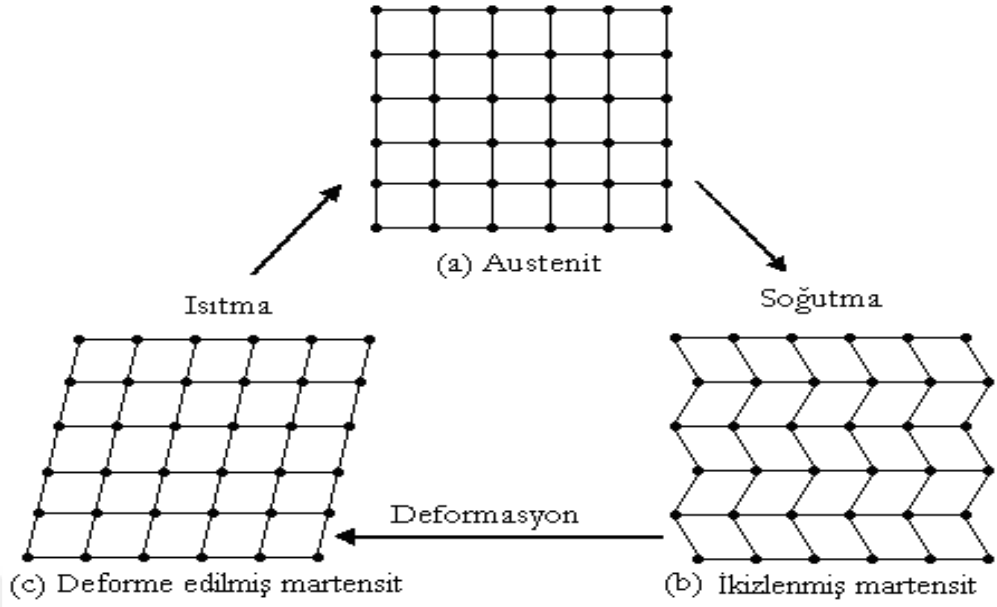


Şekil 2.3. SMA'nın üç boyutlu mikro yapısı: (a) austenit faz ve (b) ikizlenmiş martensit faz. Büyük kürelerin Nikel elementini, küçük kürelerin titanyum elementini temsil edecek şekilde gösterimi [19].

2.2. Şekil Hatırlama Etkisi

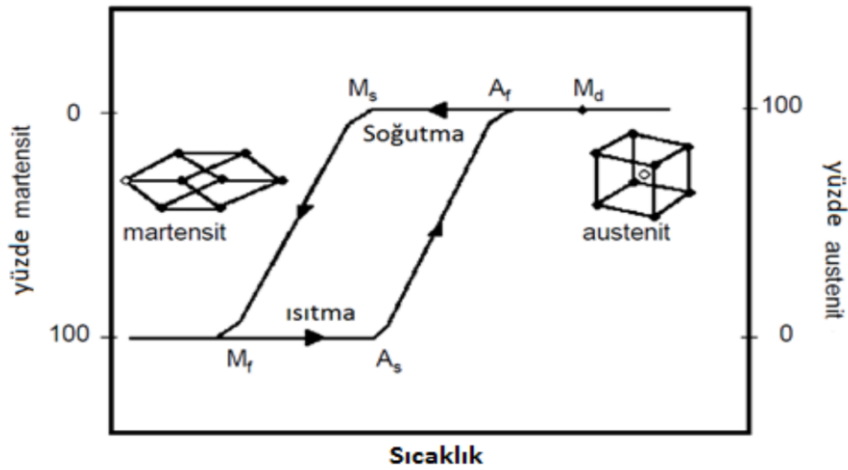
Şekil hatırlama etkisi, alaşımın daha çok düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa doğru ısıtıldığında şekil değişikliğine uğramadan önceki durumuna geri dönmesidir. Isıl işlem esnasında, düşük sıcaklıklarda düşük zorlanmanın olduğu martensit fazdan, yüksek sıcaklıkta, yüksek zorlanmanın olduğu austenit faza geçişi olarak kendini gösterir [1,20,21].

Bu tür alaşımların şekil hatırlama etkisi termoelastik martensit dönüşüm özelliği göstermelerinden dolayı gerçekleşir. Bu durumun mikro boyutta gerçekleşme olayı şematik olarak Şekil 2. 4'de gösterildiği gibidir. Düzenli austenit fazı M_s sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar soğutulduğunda martensit faz dönüşümü gerçekleşir. Bu durumda, dönüşüme ikizlenme ve benzeri deformasyonlar birlikte oluşturdukları için mikro düzeyde şekil değişimi gerçekleşmez. Martensit, M_f sıcaklığının altında bir dış zorlamaya uğradığında ikizlenme sınırları hareket ederek kaybolur. Şekli değişmiş olan alaşıma ısı verildiğinde sıcaklık etkisiyle martensit fazdan ana austenit faza ters dönüşüm olayı gerçekleşir ve böylece alaşım orijinal şekline dönmüş olur [22].



Şekil 2.4. Şekil hatırlama etkisinin mikro düzeyde şematik gösterimi [22].

Küçük sıcaklıkta martensit fazda olan alaşıma ısı verildiğinde, martensit fazdan austenit faza geçişi şekil 2.5'te gösterildiği şekilde gerçekleşir. Dönüşüm başladığı sıcaklığa Austenit başlama A_s sıcaklığı dönüşümü tamamlandığı sıcaklık ise A_f Austenit bitiş sıcaklığı olarak tanımlanır. Ters dönüşümde ise ısı alma işlemi ile M_s sıcaklığında martensit dönüşüm başlar M_f sıcaklığında martensit dönüşüm biter. Yani martensit faz bütünüyle austenit faza dönüşür [23]. Alaşımda kullanılan elementlerin karışım oranları ve termomekaniksel işlemler dönüşüm sıcaklıklarını önemli ölçüde etkileyebilir. [24]

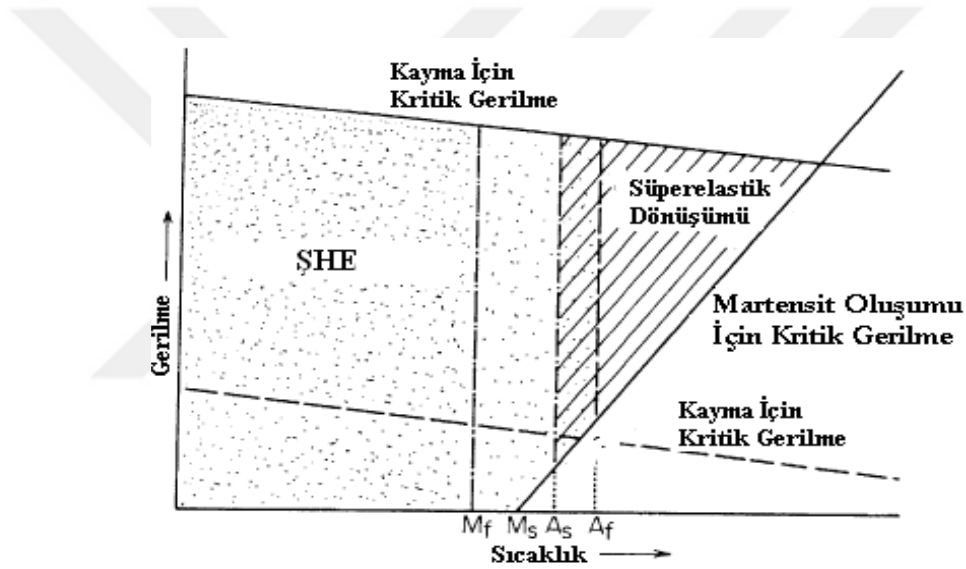


Şekil 2.5. Şekil hatırlama olayı sırasında dönüşüm sıcaklıkları [24].

2.2.1. Şekil Hatırlama Etkisi ve Süperelastiklik

Şekil hatırlama etkisi tek yönlü ve çift yönlü şekil hatırlama olarak ikiye ayrılır. Alaşım, sadece yüksek sıcaklıklarda şeklini hatırlıya biliyorsa tek yönlü şekil hatırlama hem yüksek sıcaklıklarda hem de düşük sıcaklıklarda şeklini hatırlıya biliyorsa çift yönlü şekil hatırlama olarak tanımlanır. Çift yönlü şekil hatırlama etkisine sahip alaşımlar düşük sıcaklık şekilleri ile yüksek sıcaklık şekilleri arasında defalarca dönüşüm gerçekleştirebilir [24].

Şekil hatırlama etkisinin deforme olmuş ikizlenmiş martensit faz olarak adlandırılan fazı sıcaklık etkisiyle austenit faza dönüşmesidir. Birinci derece faz dönüşümü olarak adlandırılan bu faz bazı kritik sıcaklıklarda meydana gelir ve alaşımın elementlerinin karışan oranına bağlıdır. Bu spesifik şekil, difüzyonsuz faz değişimi olan şekil hatırlama etkisi olarak bilinir [24].

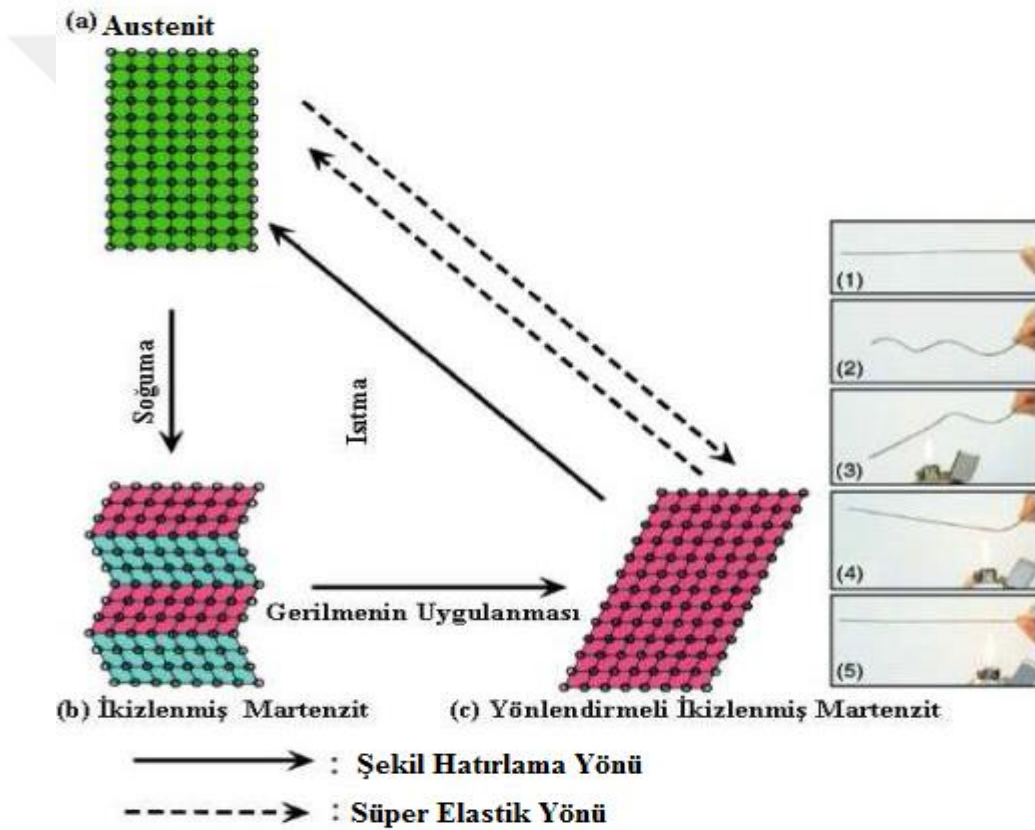


Şekil 2.6. Şekil hatırlama ve süperelastiklik etkisinin meydana geldiği gerilme ve sıcaklık alanları [25].

Hazırlanmış bir alaşımda şekil hatırlama hem süperelastiklik hem de şekil hatırlama etki sıcaklığa bağlı olarak oluşabilir. Bu durum şekil 2.6'da gösterildiği gibi açıklanabilir. Şekilde yatay eksenine yaklaşık olarak paralel çizilen çizgiler kayma için gerekli olan olası kritik gerilmeleri göstermektedir. Şayet kayma için kritik gerilme kesikli olarak gösterilen çizgideki gibi çok düşük olursa süperelastiklikten bahsedilemez. Zira kayma, zor-etkili dönüşüm için gerekli olan kritik gerilmenin altında gerçekleşmiştir. Şekil 2.6'da belirtildiği gibi Af sıcaklığı ve kayma için kritik gerilmenin üzerinde bir zor uygulanırsa, zor-etkili dönüşüm oluşur. Fakat oluşan martensit, Af sıcaklığı üzerinde uygulanan zorlama kaldırıldığı zaman tamamen kararsız olacağından ters dönüşüm olayı gerçekleşir. Böylece ters dönüşüm kristalografik olarak tersinir olduğundan süperelastiklik elde edilir. Benzer şekilde austenit sıcaklığın altında deforme edilmiş martensit faz kararlıdır. Alaşım üzerindeki yük kaldırıldıktan sonra alaşım martensit fazdaki deforme olduğu

şekilde kalır. Zor sadece ters bir dönüşümle giderilebilir. A_s ve A_f arasındaki sıcaklıkta martensit faz kısmen kararlıdır. Bu bölgede hem süperelastiklik hem de ŞHE birlikte gerçekleşir [25,26].

Şekil hatırlama etkisi temelde termoelastik martensitik faz dönüşüme dayanır. Martensit fazdaki alaşım ikizlenme ve kayma mekanizması ile şekil değiştirebilir. Şekil değiştirmiş alaşıma ısı verilerek şekli eski haline getirilebilir. Şekil 2.7’de bu değişim şematik olarak gösterilmiştir. Ana fazdaki alaşımdan ısı alınırsa yani alaşımın sıcaklığı azaltılırsa martensit dönüşüm sırasında oluşan katmanlı yapı birbiriyle ikiz plakalar şeklinde dizilir. Şekil değişikliği ikiz ara yüzeylerin hareketleri sonucunda meydana geldiğinden sıcaklık artırıldığında ana faza dönüşen malzeme ilk şekline döner [27,70].

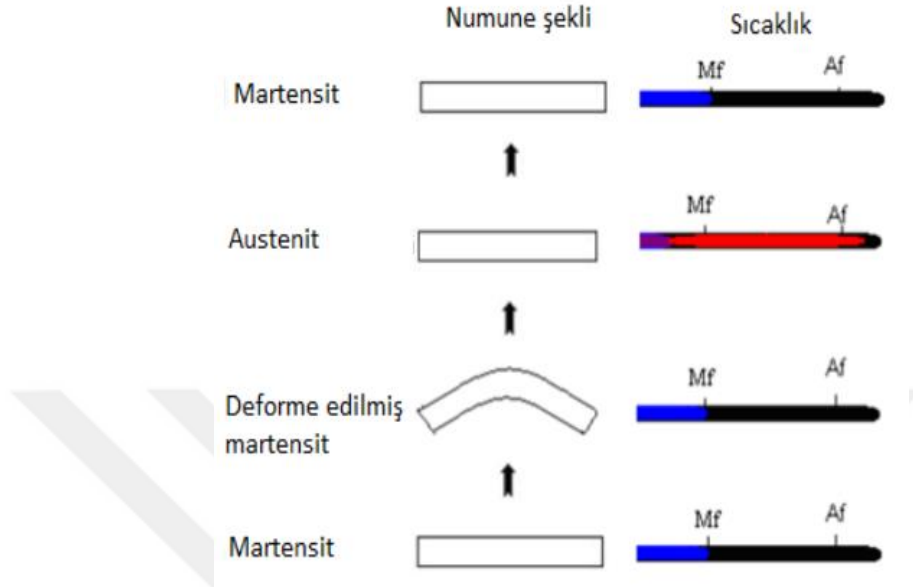


Şekil 2.7. Şekil hatırlamalı alaşımların hal durumu [70].

2.2.2. Tek Yönlü Şekil hatırlama

Martensit bitiş sıcaklığının (M_f) altındaki sıcaklıklarda şekil değişimine zorlanan alaşım uygulanan kuvvet kaldırıldıktan sonra eski şekline dönebilir. Kritik sıcaklık olarak belirtilen austenit bitiş sıcaklığının (A_f) üstündeki sıcaklık değerinde alaşım deformasyona uğramadan önceki şeklini geri kazanır. Sıcaklık yeniden martensit bitiş (M_f) sıcaklık değerinin altına indirildiğinde

alaşım deforme olmuş şekline dönemez (Şekil 2.8). Alaşımlardaki bu özellik tek yönlü şekil hatırlama olayı olarak adlandırılır [28- 30].



Şekil 2.8. Tek yönlü şekil hafıza olayı şematik gösterimi [31].

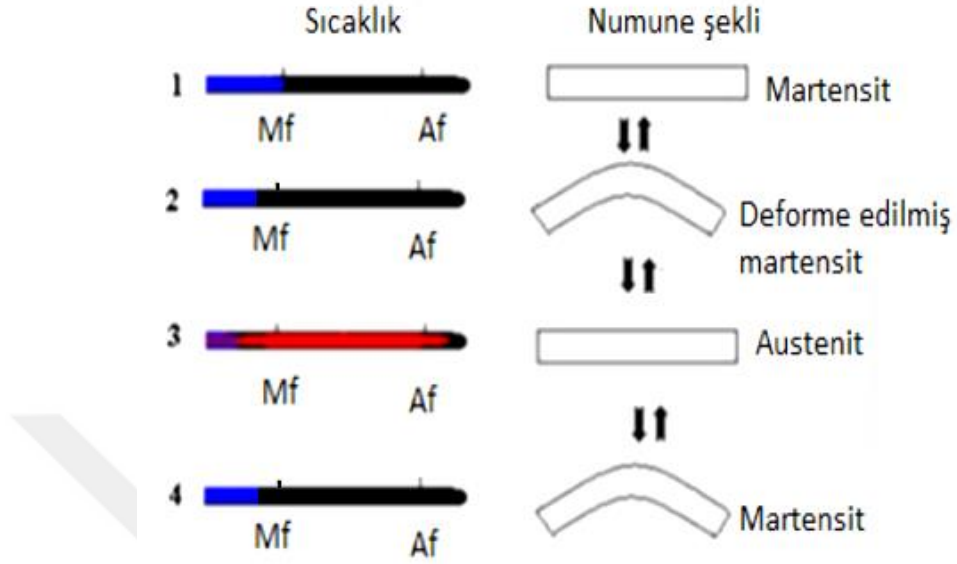
Bir başka deyişle tek yönlü şekil hatırlama olayında alaşım martensitin tamamlanma sıcaklığının altında ($T < M_f$) şekli bozulursa alaşım üzerine uygulanan kuvvet kaldırıldığında alaşım deformasyon öncesi şekline geri dönemez [32]. Isı verme işlemi sırasında alaşım üzerinde oluşan kuvvet kademeli olarak geri döner. Sıcaklık yeniden alaşımın şekil değiştirdiği sıcaklığa düşürüldüğünde numune deforme edilmiş şekline geri dönemez.

Tek yönlü şekil hatırlama olayı NiTi, TiNb, NiAl, FePt, CuZnSi, CuZnSn, FeMnC gibi birçok alaşım sistemlerinde gözlenmiştir. Bu şekil hatırlama türünün zorlanma limiti, kendiliğinden martensit dönüşümün şekilsel zorlanmasına bağlıdır. Çünkü alaşım kendiliğinden eski şeklini geri kazanamadığında bu sınır, deformasyon etkili bir martensit kristalinin sadece terslenmesiyle gerçekleşir [33-35].

2.2.3. Çift Yönlü Şekil Hatırlama

Çift yönlü şekil hatırlama olayın da tek yönlü şekil hatırlama olayında olduğu gibi martensit bitiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda ($T < M_f$), martensit fazdaki alaşım şekil değişikliğine uğratıldıktan sonra uygulanan kuvvet kaldırıldığında değiştirilmiş şeklini korur. Alaşımının sıcaklığı austenit bitiş sıcaklığından büyük sıcaklıklara ($T > A_f$) çıkarıldığında austenit fazdaki alaşım şekil değişikliğine uğramadan önceki şeklini geri kazanır. Deformasyona uğramadan önceki orijinal şeklini alan numuneden ısı alınarak martensit bitiş sıcaklığının ($T < M_f$) altında bir sıcaklık

değerine indirildiğinde alaşım deforme olmuş şekline tekrar dönüyorsa (Şekil 2. 9) alaşımdaki bu özelliğe çift yönlü şekil hatırlama olayı denir [36 - 38].

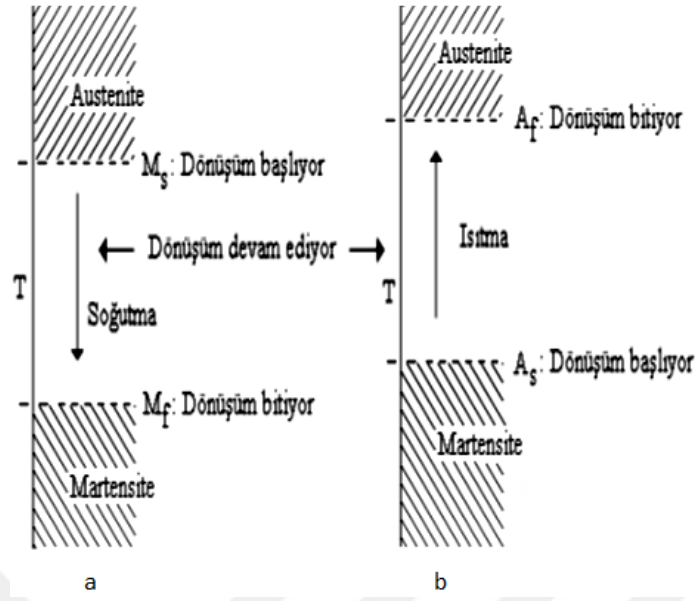


Şekil 2.9. Çift yönlü şekil hatırlama olayının şematik gösterimi [31].

2.3. Martensitik Dönüşüm

Martensitik dönüşüm komşu atomların hep birlikte hareketlerinden dolayı meydana geldiğinden difüzyonsuz dönüşümdür. Martensitik dönüşüm, yüksek sıcaklık austenit fazdaki alaşımın aniden soğutulması sonucu M_s sıcaklığında başlar ve martensit bitiş sıcaklığında M_f de faz dönüşümü tamamlanır. Alaşımın sıcaklığı artırılırsa oluşan martensit, austenit başlangıç sıcaklığı olan A_s sıcaklığında austenit faza dönüşmeye başlar. Austenit bitiş sıcaklığı olan A_f sıcaklığında dönüşüm tamamlanıp yeniden austenit fazı oluşur. Bütün malzemeler genel olarak ısı verme veya ısı alma hızı yeteri kadar yüksek olduğunda difüzyonsuz dönüşüm gerçekleştirebilirler. Birçok metal veya metal olmayan kristallerde, minerallerde ve bileşiklerde martensitik dönüşüm oluşabilir [39, 40].

Şekil 2.10'da austenit-martensit fazlarının birbirlerine dönüşme durumu gösterilmiştir.



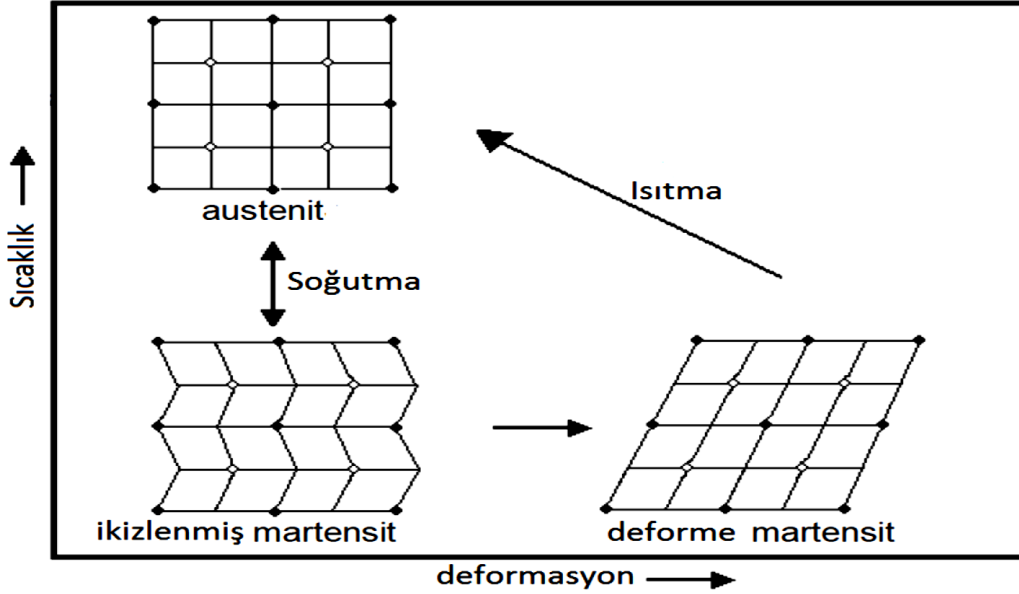
Şekil 2.10. Austenit martensit yapı arasındaki sıcaklığa bağlı dönüşüm, (a) austenit martensit dönüşüm (b) martensit austenit dönüşüm [41].

Şekil hatırlamalı alaşımlarda dönüşüm olayı martensitik faz dönüşümü olduğundan bu dönüşümün işleyişini ve ana özelliklerini açıklamak şekil hatırlamalı alaşımların sahip olduğu karakteristik özelliklerin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Martensitik faz dönüşümü, seramik ve polimerik metalik sistemleri de içeren bir dizi malzeme sisteminde en çok görülen faz dönüşümlerinden biridir. Bu faz dönüşümünde, austenit (ana) fazından daha düşük sıcaklıkta kararlı olan martensit (ürün) fazına difüzyonsuz gerçekleşen bir dönüşüm olayı vardır. Malzeme, yüksek bir kristalografik simetriye sahip olan austenit fazdan daha düşük bir simetriye sahip olan martensit faza dönüşüm gerçekleştirir. Martensit faz daha düşük bir simetriye sahip olduğundan bu dönüşüm sırasında farklı yönlerde martensit yapılar oluşabilir. Bu şekilde oluşan her bir yapı martensit varyantlar olarak ifade edilir [42].

Martensit ismini 1800'lü yılların sonlarında yaşamış Alman bilim adamı Adolf Martens'ten almaktadır. Bu terim, orijinal olarak su verilmiş çeliklerdeki sert bileşeni tanımlamak için kullanılmıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarda çelikler dışında bazı demir dışındaki alaşımlarda, inorganik bileşiklerde, saf metallerde, seramiklerde, minerallerde, katılaştırılmış gazlarda ve polimerlerde de martensit fazının oluştuğu gözlenmiştir [43].

Martensitik faz dönüşümü birinci dereceden bir faz dönüşümüdür. Çekirdeklenme ve ardından büyüme ile gerçekleşir. Martensit faz kesme tarzındaki bir çalışma prensibi ile oluşurken, martensit faz etrafında büyük gerilmeler oluşur. Bu gerilmeleri azaltmak için şekil değişimi iki farklı şekilde olmaktadır. Bunlar Şekil 2.11'de gösterildiği gibi dislokasyon kayması veya

ikizlenmedir. Kaymada atomlar bir veya birden fazla atomik boşlukta hareket ederken, ikizlenmede bir atomik boşluğun belli bir kısmı olarak hareket eder [44].



Şekil 2.11. Austenitten martensite şematik olarak dönüşüm mekanizmaları [24].

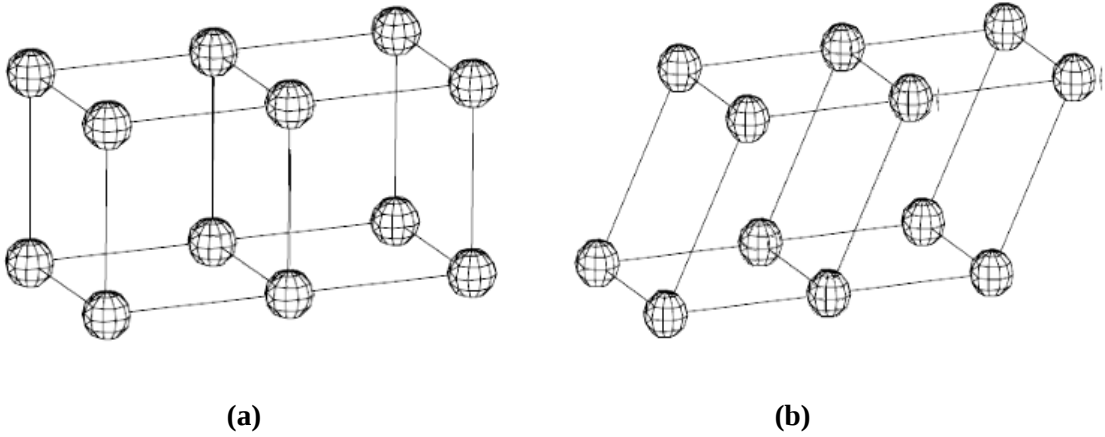
Martensitik faz dönüşüm termoelastik ve termoelastik olmayan olmak üzere ikiye ayrılır. Termoelastik martensitik faz dönüşümleri izotermal veya atermal olarak gerçekleşebilir. Bu nedenle şekil hatırlamalı alaşımlar izotermal martensitik faz dönüşüm özelliği gösterirler [45]. “Atermal” dönüşüm kelime olarak “sıcaklıktan bağımsız” anlamı taşımamaktadır. “Atermal” kelimesinin anlamı bu olaya en yakın “termal aktivasyonun olmadığı” şeklinde ifade edilebilir. Termal aktivasyonun olmadığı işlemler zamana bağlı değildir ve bu işlemlerin başlaması için bazı kritik değerlerin belli bir aktivasyon eşiğini geçmesini beklemeye gerek yoktur. Termal olarak aktive edilen martensitten ise kaynaklar izotermal martensit ifadesini kullanır. “İzotermal” kelimesi “sabit sıcaklık” olarak düşünülebilir. Aslında bu tip martensitler genellikle sürekli soğumayla elde edilir [46]. Termoelastik olmayan bir martensitik dönüşümde bir martensit plakası soğutma sırasında belli bir büyüklüğe kadar genişler, daha sonra yapılacak soğutma işleminde daha fazla büyüme gerçekleşmez. Büyüme olayı, ısı alma işlemi sırasında artan kuvvet ile termodinamik dengede kalma yönelimindedir. Çünkü ara yüzey gözle görülür şekilde sabitlenir. Sabitlenen ara yüzey ısı işlemi sırasında hareket etmez. Bu nedenle ana faz, sabitlenmiş martensit plakalar arasında çekirdeklenir. Bir plakanın tamamı orijinal ana faz evresine dönemez. Tablo 2.3’de termoelastik olan ve olmayan martensitik dönüşümlerin tipleri karşılaştırılmıştır [47].

Tablo 2.3. Martensitik dönüşüm tiplerinin genel özellikleri [48].

TİP	ÇEKİRDEKLENME	BÜYÜME	KRİSTAL KUSURLARI
Termoelastik	Soğutma etkisi	Sıcaklık düşüşüyle orantılı	Dönüşüm etkili
Termoelastik olmayan	Soğutmanın ani etkisi	Ani ve hızlı, soğutma hızından bağımsız	Dönüşüm etkili ve Plastik deformasyonla

İzotermal martensit oluşumunda sıcaklık M_s (martensit başlangıç) sıcaklığına düşürüldüğünde izotermal martensit plakaları çekirdeklenme ile oluşmaya başlar. Sıcaklık düşürülmeye devam edilirse martensit plakaları giderek artar ve M_f (martensit bitiş) sıcaklığına ulaşıldığında martensitik dönüşüm tamamlanmış olur. Malzeme martensitik dönüşümü tamamlandıktan sonra ısıtmaya başlanırsa A_s (austenit başlangıç) sıcaklığında oluşan martensit plakaları kaybolmaya başlar ve A_f (austenit bitiş) sıcaklığına gelindiğinde bütün martensit plakaları kaybolur ve malzeme tamamen austenit fazına geçer. A_f ile M_s arasındaki fark ise dönüşüm histerezisi olarak adlandırılmaktadır. Atermal martensit oluşumunda ise termal aktivasyon yoktur ve martensit yapısı ani bir patlama ile gerçekleşir. Oluşan martensitin hepsi M_s sıcaklığında oluşur [49].

Austenit- martensit fazların geometrik yapıları ve kararlı olma durumları ise; austenitin kristal yapısı kübiktir. Martensit ise monoklinik yapıya sahiptir (Şekil 2.12) [50]. Martensit-austenit dönüşümü zor etkili ve termal etkili olabilir. Austenit daha düşük zorlarda ve yüksek sıcaklıklarda kararlı iken martensit tam tersi durumlarda kararlıdır [51]. Bazı alaşımlarda farklı ısı işlemler sonucu düşük sıcaklıkta monoklinik yapıdan başka rombohedral, tetragonal ve ortorombik yapılarda oluşabilir [52].

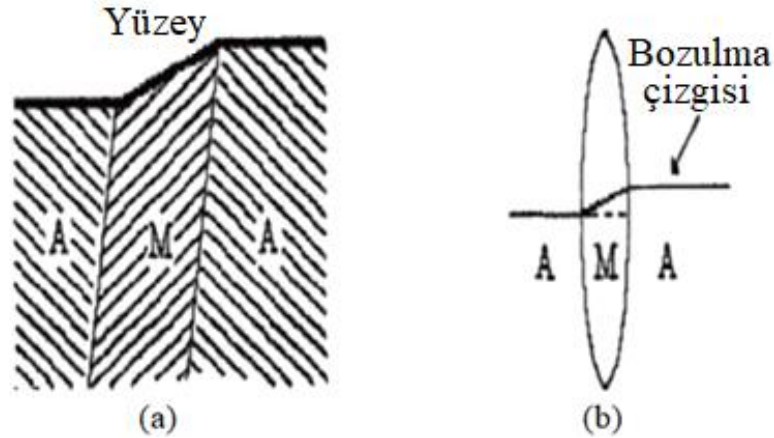


Şekil 2.12. (a) Austenit (kübik geometri), (b) Martensit yapı (eşkenar geometri, monoklinik) [50].

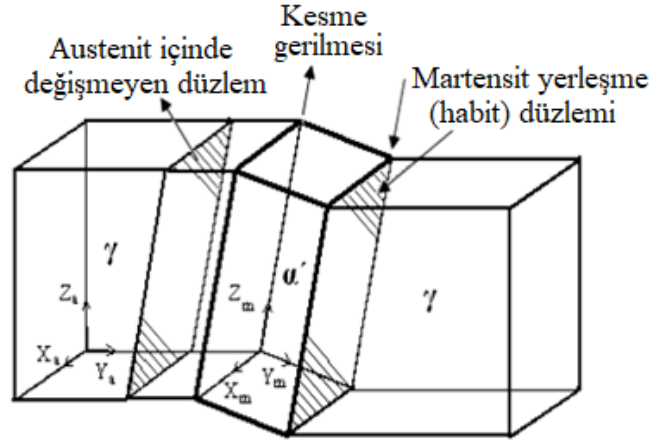
Yapılan değerlendirmeler sonucunda martensitik dönüşümlerin karakteristik özellikleri řu başlıklar altında toplanabilir.

1. Martensitik faz, ara bir katı çözeltidir.
2. Faz dönüşümü difüzyonsuzdur. Kristaldeki atomların dönüşüm öncesi ve dönüşüm sonrası komşulukları korunur.
3. Dönüşümde şekil değişikliği sınırlıdır. Austenit fazdaki numunenin yüzeyi pürüzsüzleştirilip parlatıldıktan sonra numunenin sıcaklığı azaltılırsa yüzey üzerinde oluşan martensitik fazda olan bölgelerde kabartılar gözlenir. şekil 2.13.a ve şekil 2.13.b’de görüldüğü üzere austenit yapı ile martensit yapı arasındaki sınırdaki bozulma çizgisi oluşur. Martensitik dönüşümlerle birlikte oluşan şekil değişiklikleri şekil hatırlama olayının temelini oluşturur.
4. Martensitik dönüşümde deforme olmayan austenit faz ile martensit fazı ayıran düzleme yerleşme düzlemi (habit plane) denir. şekil 2.14’te görüldüğü gibi yerleşme düzlemi değişmez bir düzlemdir ve bu düzlem üzerindeki doğrultular bozulmamıştır.
5. Austenit faz ile martensitik faz evreleri arasında sınırlı bir döngü bağıntısı vardır. Dönüşüm sırasında kristal yapıda örgü kusurları oluşur.

Martensitik dönüşümler ara yüzeyin büyümesiyle oluşur. Ara yüzeyin büyümesi esnasındaki hareketler çok hızlı ve düzenlidir. Çekirdek ara yüzey yapısı ve dönme bağıntıları arasında paralellik vardır [1, 53].



Şekil 2.13. Martensitik dönüşüme etki eden yüzey kabartısının ve bozulma çizgisinin kırılmasının şematik gösterimi. (a) Yüzey kabartısı, (b) Bozulma çizgisinin kırılması [1, 53].



Şekil 2.14. Difüzyonsuz martensitik dönüşüm olayına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişimin şematik gösterimi [40].

2.3.1. Termoelastik Martensitik Dönüşüm

Isıl işlemden dolayı gerçekleşen martensitik faz dönüşümleri alaşımın yapısına göre atermal ve izotermal olmak üzere iki şekilde gerçekleşir. Martensitik dönüşümlerin izotermal veya atermal olması malzemenin kimyasal bileşimiyle ilişkili değildir. Bu nedenle izotermal ve atermal dönüşümlerin ikisi de aynı numune içerisinde gerçekleşebilir. Bu iki tip için meydana gelen dönüşümlerin faz dönüşüm sıcaklıkları ve faz dönüşümü sonrasındaki martensit yapıları farklıdır [54].

Şekil hatırlama olayı, martensitik dönüşüm özelliği gösteren bazı alaşımlarda da gözlenir. Termoelastik martensitik dönüşüm sırasında sıcaklık düşürüldükçe martensit plakalar oluşur ve sürekli olarak büyürler. Aynı şekilde eğer sıcaklık yükseltirirse bu plakalar küçülüp kaybolmaya başlar. Burada dönüşümün gerçekleşebilmesi için malzemenin sıcaklığının değiştirilmesi veya dışarıdan kuvvet uygulanması gerekmektedir. Termoelastik alaşımların bir diğer özelliği de süperelastiklik hareketidir. Süperelastiklik hareketinde de atermal dönüşümde olduğu gibi bir martensitik dönüşüm olayından bahsedilebilir [55].

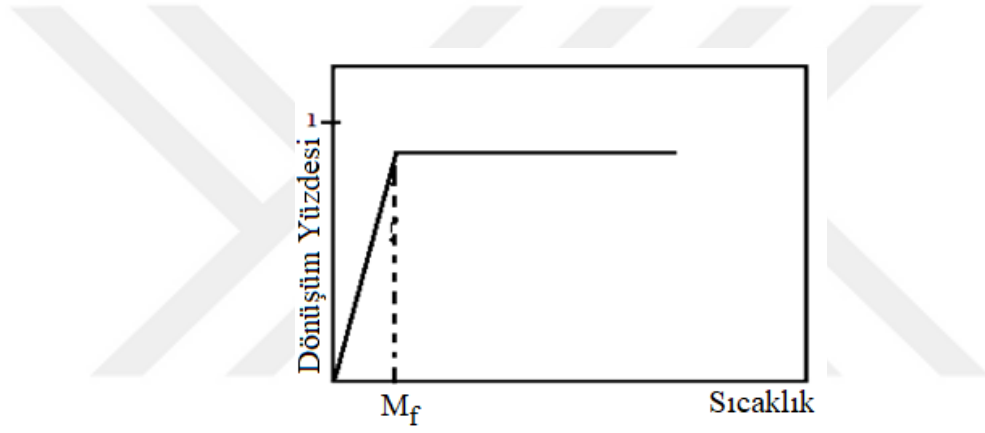
2.3.2. Atermal Martensitik Dönüşüm

Martensit dönüşümlerin çoğunda, şekil değişikliği bir M_s (martensit başlangıç) sıcaklığında başlar ve sıcaklığın düşürülmesi ile beraber devam eder. Soğutma durdurulduğunda şekil değişikliği de durur. Sıcaklık düşüşü yeniden sağlandığında dönüşüm tekrar gerçekleşir ve kritik bitiş sıcaklığı olan M_f (martensit bitiş) sıcaklığına ulaşıldığında sona erer. Yani, reaksiyonun oluşumu yalnızca sıcaklığın değişimine bağlıdır. Sıcaklık değişimi sonucu olan bu reaksiyonlar atermal martensit olarak adlandırılır. Bakır ve kobalt katkılı alaşımlarında görülen martensitler

genelde atermal olarak gerçekleşir. Bu tür dönüşümler, yüksek dönüşüm hızına sahip olduğu için martensit kristallerin büyüme sürecini gözlemek son derece karmaşık ve zordur. Dönüşüm çok hızlı yani patlama reaksiyonu şeklinde gerçekleştiği için şekil hatırlama olayı gözlemlenemez.

Atermal özellik gösteren martensit dönüşümlerin genel termodinamik özellikleri şu şekilde açıklanabilir:

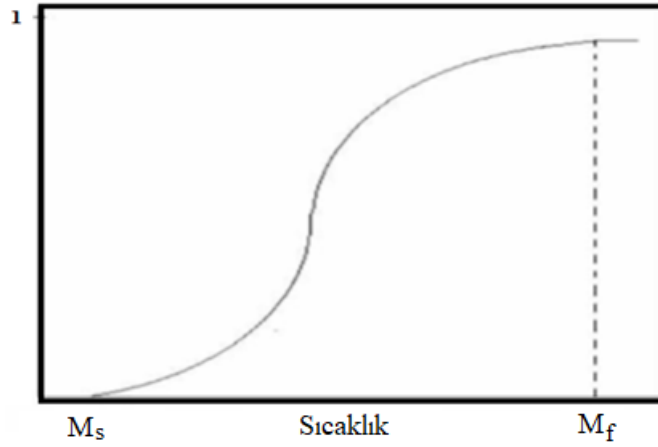
- Atermal dönüşüm zamandan bağımsızdır.
- Dönüşüm sıcaklıkla orantılıdır.
- Dönüşüm hızı sıcaklığa bağlı değildir. (Şekil 2.15.)
- Sıcaklık düşürülerek elde edilen ürün yüksek sıcaklıkta tekrar ana faza dönüşebilir.
- Zorlanma atermal dönüşümü etkileyebilir [56,57].



Şekil 2.15. Atermal dönüşüm için dönüşüm yüzdesinin zamanla değişimi [58, 59].

2.3.3. İzotermal Martensitik Dönüşüm

Bazı dönüşümlerde izotermal dönüşüm gözle görülebilecek kadar yavaş olabilir. Bu tür tepkimelerde çekirdeklenme zamana bağlıdır. Oluşan çekirdeklenme sabit bir sıcaklıkta zamanla devam eder. İzotermal martensitik dönüşümlerde M_s sıcaklığından daha küçük sıcaklıklarda yeni martensit kristaller oluşabileceği gibi daha önce oluşan kristaller hacimce büyüme de gösterebilir (şekil 2.16). Bu tepkimelerde kritik adım çekirdeklenme olarak gösterilir. Tepkimenin sürekliliği oluşan çekirdeklerin büyümesinden daha çok yeni plakaların çekirdeklenmesi ile ilerler [60, 61].



Şekil 2.16. İzotermal dönüşüm için dönüşüm yüzdesinin zamanla değişimi [58, 59].

Genel olarak atermal ve izotermal dönüşümler için elde edilebilecek sonuçlar:

1. Şekil hatırlama olayı izotermal martensitik dönüşümlerde gözlenirken atermal martensitik dönüşümlerde gözlenmez.
2. İzotermal dönüşüm sıcaklığa ve zamana bağlı olarak değişirken atermal martensitik dönüşüm zamana bağlı olmayıp sadece sıcaklığa bağlıdır.
3. İki dönüşüm için de ortak görüş çekirdeklenmenin kritik bir adım olduğu yönündedir. Numune martensit başlama (M_s) sıcaklığında veya bu sıcaklığın altında bekletilirse atermal dönüşümde yeni çekirdeklenme oluşmazken, izotermal dönüşümde ise numune martensit başlama (M_s) sıcaklığında bekletilirse bazı ilave işlemlerle yeni çekirdeklenmeler gözlenebilir.

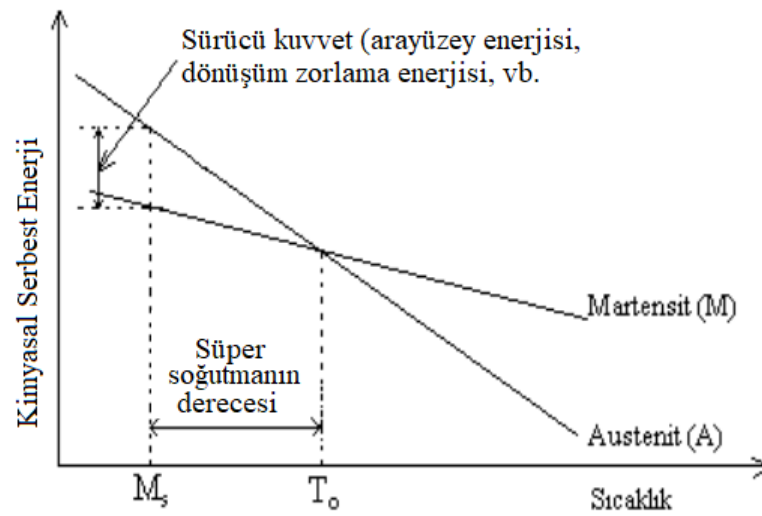
2.4. Martensitik Dönüşümün Termodinamiği

Martensitik dönüşümün ana nedeni austenit-martensit faz dönüşümüdür. Bu dönüşümün yüksek sıcaklık austenit fazındaki numunenin ani soğuma etkisiyle M_s sıcaklığında başladığı ve martensit bitiş sıcaklığında dönüşümü tamamladığı daha önce açıklanmıştı. Austenit-martensit dönüşümünün temelinde ısı-sıcaklık veya ısı-enerji olguları vardır bu durumunun açıklaması ancak termodinamik ile mümkündür.

Austenit kristalize yapı, belirli bir T_0 sıcaklığında termodinamik olarak denge konumundadır. Denge konumunda austenit ve martensit fazın serbest enerjileri eşittir. Kristalize yapıdan denge sıcaklığında iken hızlı bir şekilde ısı alınırsa kritik M_s sıcaklığından sonra austenit kristalize yapı içerisinde martensit yapı oluşmaya başlar. Sıcaklık farkı ($T_0 - M_s$), faz dönüşümlerinde kimyasal serbest enerjinin oluşmasını sağlar. Bu enerji de şekil 2.17. görüldüğü gibi dönüşüm için gerekli olan zorlayıcı kuvveti oluşturur. Dönüşümün başladığı bu sıcaklığa martensit başlama sıcaklığı M_s

denir. Bu sıcaklık değeri farklı alaşımlar için farklı değerler alır. Denge sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda fazlar arasındaki serbest enerji farkı sıfırdan büyüktür. Minimum enerji kuralına göre martensit fazın serbest enerjisi küçük olduğundan martensit faz austenit fazdan daha karardır. Austenit faz da denge sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda daha karardır [1].

Martensitik dönüşüm sırasında gözlenen şekilsel değişiklik austenit fazda büyük miktarda elastik deformasyona sebep olur. Faz dönüşümleri fazlar arasındaki serbest enerji farkından dolayı oluşur. Bu durumda, dönüşüm ancak büyük ölçüde aşırı soğuma sağlandığında, yani serbest enerji miktarındaki değişimin büyük olmasından dolayı gerçekleşir [62, 63].



Şekil 2.17. Austenit ve martensit fazların kimyasal serbest enerjisinin sıcaklıkla değişimi [1].

Martensit fazın kimyasal serbest enerjisinin austenit fazdan martensit faza dönüşümüne neden olması için austenit fazın kimyasal serbest enerjisinden daha az olması gereklidir. Eğer iki fazın arasındaki kimyasal serbest enerji farkı, kimyasal olmayan serbest enerjiden (örneğin; dönüşüm zorlanma enerjisi ve ara yüzey enerjisi) fazla değilse dönüşüm gerçekleşmez [1].

Şekil 2.17’de T_0 denge sıcaklığı için ileri sürülen görüş Denklem 1’de Salzbrenner ve Cohen tarafından gibi, Denklem 2’de Tong ve Wayman tarafından ise hesaplanmıştır. T_0 denge sıcaklığı,

$$T_0 = \frac{1}{2}(M_s + A_s) \quad (2.1)$$

$$T_0 = \frac{1}{2}(M_s + A_f) \quad (2.2)$$

olarak kabul edilmiştir [66].

Faz dönüşümleri, sabit basınç altında (1 atm. basınçta) ve sabit sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Bu nedenle sabit sıcaklıkta entropi değişiminin hesaplanması önemlidir. Bu durumda sabit basınçta entalpi ifadesinin türevi;

$$\Delta H = \Delta E + P.\Delta V \quad (2.3)$$

şeklindedir.

Termodinamiğin birinci yasasından faydalanılarak,

$$\Delta E = \Delta Q - P.\Delta V \quad (2.4)$$

şeklinde yazılırsa;

$$\Delta H = \Delta Q \quad (2.5)$$

olarak bulunur. Bu durumda, sabit basınçta;

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{\Delta H}{T} \quad (2.6)$$

olur. Bu denklem yardımı ile entalpi (ΔH) değişimi biliniyorsa, entropi (ΔS) değişimi hesaplanabilir [64]. Ayrıca, entropi (S) termodinamiğin ikinci kanunu olup “rastgelelik ve düzensizlik” olarak bilinir.

Entalpi değişimi $\Delta H^{M \rightarrow A}$ (M martensit fazı ve A austenit fazı gösterir) martensitik geçişin farklı alaşımları için aynı zamanda ölçülmüş ve bu değerlerden

$$\Delta S^{M \rightarrow A} = \frac{\Delta H^{M \rightarrow A}}{T_0} \quad (2.7)$$

bağıntısıyla entropi değişimleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerin yaklaşık %10'luk bir doğruluğa sahip olduğu belirtilmiştir [65,66].

2.5. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kullanım Alanları

Şekil hatırlamalı malzemeler tıpta, biyomedikal uygulamalarda, otomotiv endüstrisinde, uzay araştırmalarında, mikro elektromekanik gibi önemli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip malzemelerin seçilmesinin en önemli nedenlerinden birisi malzemenin ortamla olan uyumluluğun daha iyi sonuçlar vermesidir. Şekil hatırlamalı alaşımlar fazla iş yoğunluğu kapasitesi ve büyük ölçülerde şekil değiştirme özelliklerine sahip olmasından dolayı bu gruba girmektedir. Bu tür malzemeler tepki hareketlerindeki hızları ve ihtiyaçlar doğrultusunda önemi az olan uygulamalarda geniş eyleme geçirme özelliğinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamalarda kullanılmak amacı ile uygun bir tasarım yapabilmek için bu malzemenin doğasını anlamak ve tahmin etmek önemlidir. Histerezis, direnç ve mikro yapıdaki değişimler, süper elastik gibi etkileri bünyesinde taşıyan bu malzemeler bu suretle karmaşık bir yapıya sahiptir [67]. Tablo 2.4'te ŞHA'ların potansiyel uygulamaları verilmiştir.

Tablo 2.4. Potansiyel şekil hatırlamalı alaşım uygulamaları [68].

Gruplandırma	Potansiyel uygulamalar
ŞHA tendonlar, teller ve silindirler	Uçak uçuş yüzeylerinin uyarlanabilir kontrolü ve çalıştırılması
Gömülü ŞHA telleri	Şekil uyarlamalı kompozit malzemeler
ŞHA aktüatörleri	İletim hattı sarkma kontrolü ve havadan geçen elektrik hatlarından buz alınması.
ŞHA enerji emiciler ve tendonlar	Depreme dayanıklı yapı ve köprüler, köprü ve yapısal onarımlar
ŞHA damperleri	Motor bağlantıları, yapısal destekler
ŞHA teller, kanatlar, bacaklar, aktüatörler, vb.	Mobil mikro robotlar, robot kolları ve tutucuları
ŞHA telleri, kompozitler vb.	Protez, yapay kaslar

Şekil hatırlamalı NiTi alaşımları ve bakır katkılı alaşımlar endüstride ticari değere sahip ve en çok kullanılan alaşımlardır. Bu alaşımlar gösterdikleri özelliklere göre birbirinden büyük ölçüde farklıdır. NiTi alaşımlarında şekil hatırlama olayı %8 civarında iken bakır katkılı alaşımlarda bu oran %4–5 civarındadır. NiTi alaşımları daha yüksek ısı kararlılığına sahiptir. NiTi alaşımları bakır bazlı alaşımlara kıyasla aşınmaya karşı fazla dirençli ve çok daha fazla sünekliliğe sahiptir. Buna karşın bakır bazlı alaşımlar daha ucuzdur. Eritilmeleri daha kolaydır ve laboratuvar alanı dışında daha geniş bir potansiyel dönüşüm sıcaklık aralığına sahiptirler. Bu bilgilere dayanarak NiTi ve bakır bazlı alaşımların kullanılacağı yerlere göre avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmaktadır [69, 70].

Şekil hatırlamalı alaşımlar içerisinde en çok bilinen NiTi alaşımı 1960'lı yıllarda ABD Donanma Mühimmat Laboratuvarında Buhler ve Wiley tarafından geliştirilen NİTİNOL'dür. Bu alaşım ağırlıkça yaklaşık %55 nikel ve %45 titanyumdan oluşur. Bu alaşım türü tıpta ve diş yapısı düzeltmelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tablo 2.5 austenit ve martensit formunda Nitinol SMA'ların özelliklerinin bir özetini verilmiştir.

Tablo 2.5. Nitinol SMA'ların Özellikleri [19].

Özellik	NiTi SMA	
	Austenit	Martensit
Fiziksel Özellikler		
Erime Noktası	1240-1310°C	
Özkütlesi	6.45 g/cm³	
Termal Katsayı	0.28 W/cm°C	0.14 W/cm°C
Termal Genleşme Katsayısı	11.3 x 10 ⁻⁶ /°C	6.6 x 10 ⁻⁶ /°C
Mekanik Özellikler		
Çekme Dayanımı	895-1900 MPa	
Arızada Bozukluk	5-50% (tipik olarak 25%)	
Sıcak şekillendirilebilirlik	Oldukça iyi	
Soğuk şekillendirilebilirlik	Hızlı çalışmadan dolayı zor sertleşmesi	
Şekillendirilebilirdik	Zor, aşındırıcı teknikler tercih edilir	
Kaynaklanabilirdik	Oldukça iyi	
Kimyasal özellikler		
Korozyon Performansı	Mükemmel (paslanmaz çeliğe benzer)	

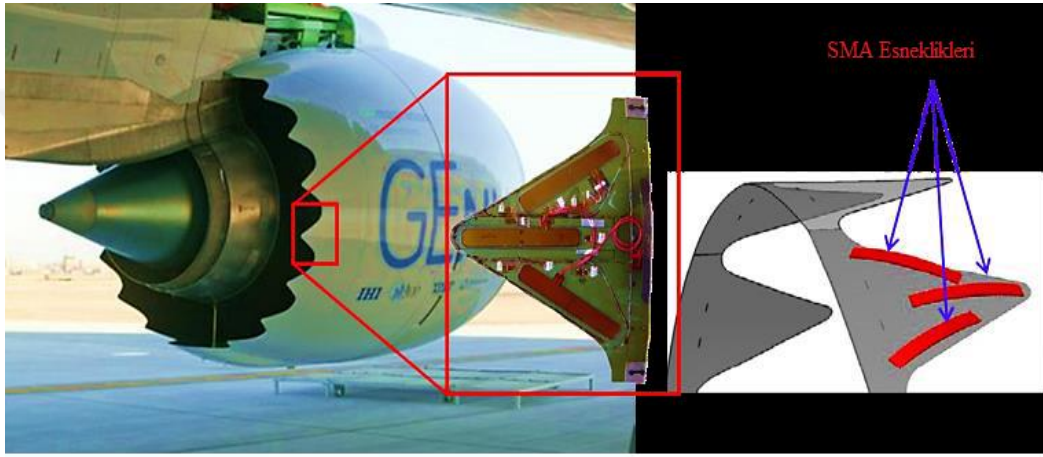
2.5.1. Havacılık ve Uzay Uygulamaları

1970'lerde F-14 avcı uçlarındaki hidrolik hatlar için kullanılan ŞHA başarısından sonra [71], uzay ve havacılıkta kullanılan gerekli parçalarda istenilen çeşitli özelliklerden dolayı ŞHA'lara ilgi giderek artmıştır. ŞHA'nın salma veya açılma özellikleri yapısal konektörler, sızdırmazlık maddeleri, titreşim damperleri gibi parçaların yapımında kullanılmıştır [72].

1990'dan sonra havacılık ve uzay araştırmaları, birçok uçuş koşullarında şekil değiştirme özelliğine ve sistem düzeyinde optimizasyona sahip aktif ve şartlara uyarlanabilir SMA yapıları için çalışmalar hızlandırıldı. Bu çalışmalar için Savunma Geliştirme Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) uçak "akıllı kanatları" için [73], jet motorları için Akıllı Uçak ve Deniz Tahrik Sistemi Gösterme (SAMPSON) programı geliştirdiler [74].

Değişken geometri bir cevron (VGC) olarak bilinen SMA aktüasyonlu aktif tırtıklı aerodinamik bir cihaz Boeing 777-300 ER ticari uçaklar için bir GE90-115B jet motoru üzerine

kurulmuş ve geliştirmiştir. VGC cihazının amacı cevron sapmasını minimize ederek yolculuk verimliliğini artırmak ve kalkış sırasında gürültüyü azaltmaktır. VGC başarısının ardından sonra Boeing, DARPA, NASA ve diğer ilgili araştırma kurumları tarafından yeni ŞHA tabanlı teknoloji programları başlatılmıştır [75]. Örnek olarak değişken bir motor giriş yeteneğine sahip bir uçağa tasarlanacak akıllı bir giriş; ekstrem şartlara dayanabilecek kadar sağlam yeniden yapılandırılabilir bir rotor bıçağı ve rotor aerodinamik özelliklerini destekleyen büküm yapabilen rotor bıçağı. Son zamanlarda şekil 2.18.'de VGC teknolojisine dayanan değişken geometri fan nodülü, jet motoru kapasitesini artırmıştır [76].



Şekil 2.18. Boeing'in SMA yapılı değişken geometri cevronu (VGC) [77].

Dünya şartlarına kullanılan malzemeler dünya dışındaki ortamlarda, ay veya Mars gibi yüzeylerde işe yaramamaktadır. Bu nedenle sürekli araştırma geliştirme çalışmaları yapan Avrupa Uzay Ajansı (ESA) bünyesinde bulunan Glenn Mühendisleri gezegenlerin yüzeyinde dolaşacak zorlu şartlara dayanabilecek teknolojiye rehberlik edecek bir tekerlek geliştirdi. Bilindiği üzere daha önce Ay'a inen araçta esnek çelik yaylı tekerlekler kullanılmıştı. Bu çözüm yöntemi içi hava ile doldurulmuş tekerleklere farklı bir seçenek gibi görünse de zamanla deforme olup farklı sorunlar çıkarıyorlardı. Plastik tekerlekler kısa sürede aşınmadan dolayı deformasyona uğrayıp kullanılamaz hale gelince malzeme olarak hem hafif hem de dayanıklılığı fazla metaller bulma çabasına giriştiler.

NASA ekipleri yapılan Ar-Ge çalışmalarında geliştirdikleri tipik elastik malzemeler yerine, yük taşıyıcı bileşenler olarak yüksek gerilime dayanabilen yeni ŞHA yapılı alaşımlarının kullanımı, kalıcı hasar olmadan aşırı deformasyona dayanabilen bir tekerlek geliştirdiler. Şekil 2.19.'da tekerleğin iç kısmındaki bez doku elemanları olarak şekil hatırlamalı alaşım kullanılması lastiğin yük taşıma kapasitesini arttırılacak şekilde tasarlanmıştır. Geleneksel lastik tekerleklere eşit veya

daha üstün çekiş gücü sağlayarak hem patlak arızaları hem de "az şişirilmiş" çalışma olasılığını ortadan kaldırarak araçlarda yakıt verimliliğini ve güvenliğini de artırdı [78].



Şekil 2.19. NASA tarafından geliştirilen SMA yapıları esnek lastik [79].

Gezegenlerin yüzeylerinde SMA yapıları yüksek performanslı, uyumlu tekerlekler geliştirmenin faydaları şu şekilde sıralanabilir:

1. Gezegenlerin şu anda mümkün olandan daha büyük yüzey bölgelerinin keşfedilmesi.
2. Araziye şartlarına uyumları ve diğer tekerlekler kadar batmadıkları için daha ağır yükleri taşıyabilmesi.
3. SMA yapıları uyumlu tekerlekler darbelerden gelen enerjiyi orta ve yüksek hızlarda soğurdukları için aracın önemli ölçüde daha yüksek hızlarda hareket etmesi [80].

2.5.2. Robotik Uygulamaları

1980'lerden sonra ŞHA'lar, özellikle yapay kaslar veya mikro aktüatörler olarak, çeşitli ticari robotik sistemlerinde kullanılmıştır [81-86]. ŞHA yapıları robotik uygulamaların çoğu günümüzde biyomekanik ve biyomedikal teknolojilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Robotik kullanım alanlarında malzeme ile ilgili donanım platformunun performansını ve minyatürleşmesini artırmak ve küçük, daha hızlı, güvenilir ve kendine özgü yapılar oluşturma çalışmaları hızlanmıştır. Mikro robotlar için sıkıştırma zorlukları, akıma karşı gösterilen küçük direnç, minyatür elektrik panel bağlantısı, küçük zorlanma çıkışı, kontrol sorunları ve çok düşük verimlilik gibi birçok teknik problemler vardır ve çözülmesi gerekir. Bunun yanında bu modellerden bazıları uygun modelleme teknikleri, kontrol teknikleri ve geri bildirim sensörleri seçilerek ele alınmıştır. Örneğin direnç geri

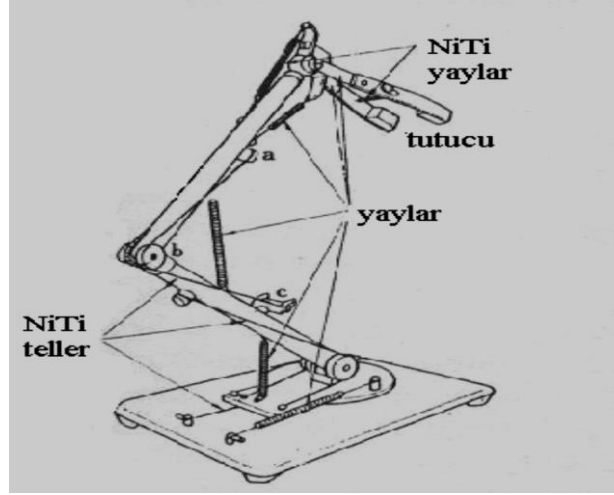
besleme kontrolü, sınırlı hassasiyete sahip olmasına karşın ilave sensörlerin gerekliliğini ortadan kaldırdığı için mikro robotlar için ideal malzemelerdir [86].

ŞHA yapılı birçok uçan robot geliştirilmiştir. Son zamanlarda Şekil 2.20’de Festo Grubu tarafından 63 cm kanat genişliğine ve 44 cm uzunluğuna sahip BionicOpter geliştirdi. Uçuş manevrasını ve başının hareketlerini kontrol etmek için dört SMA aktüatörüyle donatıldı. “BionicOpter” olarak da bilinen robotik yusufçuk 13 serbestlik derecesine sahiptir, havada asılı kalabilir ve her yöne hareket edebilir [87].



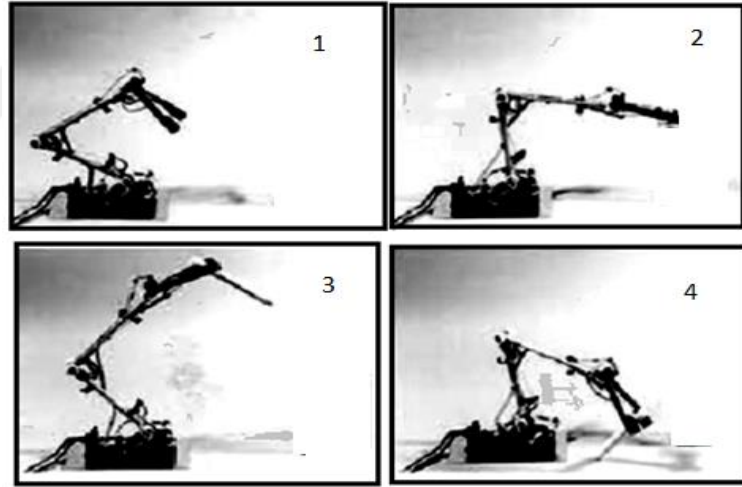
Şekil 2.20. Yusufçuk böceğinin uçuşu ilham alınarak Festo Biyonik Opter üretilmiş [87].

NiTi şekil hatırlamalı alaşımlarının ticari değerinin fazla olmasının en önemli nedenlerinden biri malzemeye esneklik katmasıdır. Bu nedenle robotik malzemelerin yapısında NiTi bazlı yay ve tel kullanılmasını artırmıştır. Şekil 2.21’de gösterilen mikro robot NiTi alaşımından yapılmış tel ve yaylar kullanılarak geliştirilmiştir. Elektrik akımının değişimi ile kontrol edilen bu mikro robot, karşısındaki bir cisme dönme noktalarında bulunan yaylar ve NiTi alaşımdan yapılmış teller sayesinde yaklaşabilmekte ve tutucu kısmında bulunan NiTi yay yardımıyla kavrama, bırakma ve kaldırma gibi eylemleri gerçekleştirebilmektedir [1].



Şekil 2.21. NiTi alaşımlarının şekil hatırlama özelliği ile hareket edebilen mikro robot [1].

NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşım kullanılarak yapılan mikro robotun hareket sınırları içerisinde yaptığı uygulamalar Şekil 2.22’de gösterilmektedir.

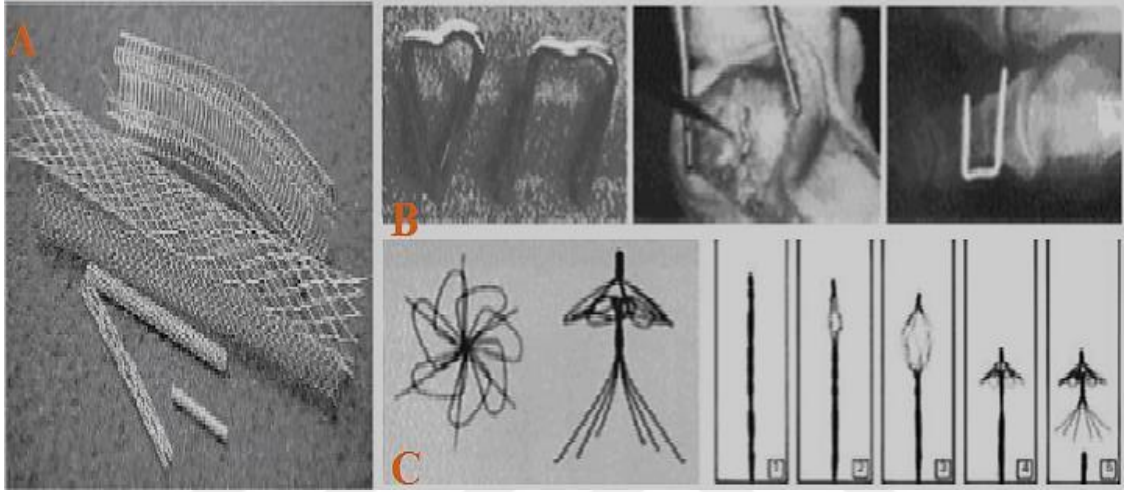


Şekil 2.22. Şekil hatırlamalı alaşımların kullanıldığı mikro robotun hareketleri [1].

2.5.3. Biyomedikal Uygulamaları

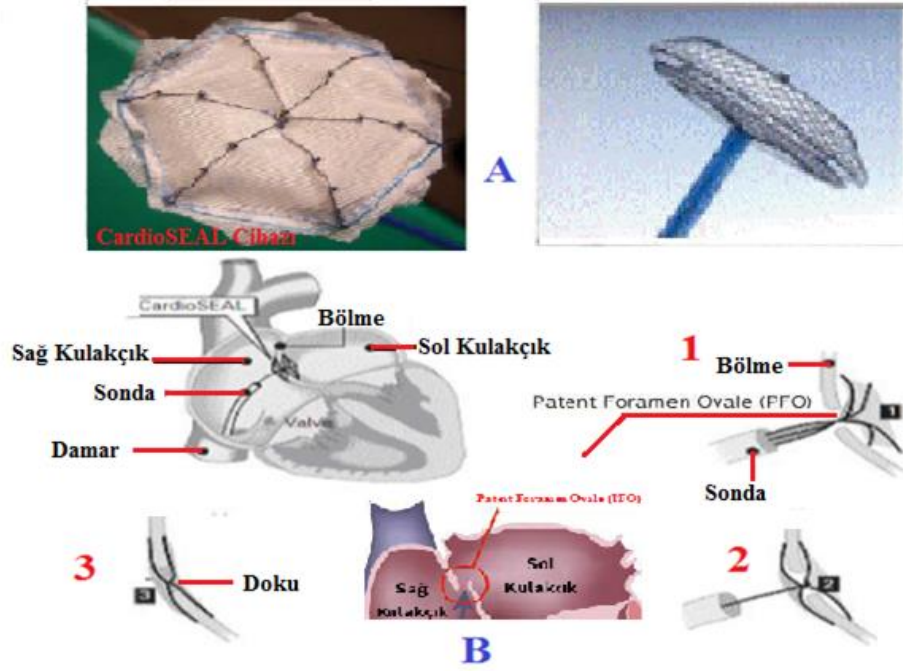
Amerika Birleşik Devletleri’nde Deniz Savaş Araçları Laboratuvarında Buehler ve arkadaşları NiTi alaşımının şekil hatırlama özelliğini keşfetmelerinden sonra bu malzemenin diş hekimliğindeki implantların yapısında kullanılması önerildi. 1971’de, bir NiTi alaşımından yapılan ilk süper elastik dişliler Andreassen tarafından tanıtıldı. ŞHA’lar minimal invaziv cerrahiye girdikten sonra biyomedikal alanda önemli bir çıkış yaptı. Biyomedikal alanda ek ticari uygulamalar, Eylül 1989’da ABD Gıda ve İlaç İdaresi (FDA) tarafından ortopedik cerrahi için Mitek cerrahi ürününün onaylanmasından sonra kullanım alanlarında artışlar oldu [88-90].

Mikro cerrahi uygulamaları ve tıbbi tedaviler için doğru konumlandırma ve işlevsellik elde etmek için küçük ölçekte hassas ve güvenilir aletlere duyulan ihtiyaç ŞHA'lara bu alanda daha uygulama için önemli fırsatlar sağladı. Şekil 2.23'te belirtilen bazı ŞHA yapılı tıbbi donanım ve bu donanımların cihazlarında bulunan: kardiyoloji (Atriyal Septal kapatma cihazı), nöroloji ve girişimsel radyoloji, ortopedide tendonu kemiğe tutturmak için tutturucular, endodonti, stentler, tıbbi cımbız, dikişler; implantlar, gözlük çerçeveleri ve kılavuz tellerdir [91-97].



Şekil 2.23. ŞHA yapılı malzemeler; (a) Kendiliğinden genişleyen stentler. (b) Ortopedik zımba ve onun kemiğe uygulanması. (c) Kan dolaşımında dağılan pıhtıları tutan Simon Filtresi [98].

Atriyal deliğini kapamak için kullanılan Atriyal Septal kapatma cihazı şekil 2.24(A)'da gösterilmiştir. Atriyal deliği, kalbin, üst kısmının sağ ve sol kulakçığa bölen yüzeyin üstündeki iki bölümü arasında yer alır. Bu deliğin açık olmasından dolayı gözlenen anormallik hastanın yaşama şansını azaltabilir. Bu anormalliği düzeltmek için geleneksel olarak hastanın göğsü açılır ve kulakçık deliği dikilir. Bu ameliyatın risklerinden dolayı birçok problem ortaya çıkabilir. Atriyal Septal kapama cihazı bu ameliyatın başka bir seçeneğidir. ŞHA yapılı tellerinden ve su geçirmez poliüretan filminden oluşan bu cihaz adını kalbin kulakçıkları arasındaki duvarda açıklık olmasına verilen isimden almıştır. Simon filtresinde olduğu gibi parçayı yerleştirmek için parçanın ŞHA etkisi kullanılır. Geleneksel ameliyattan daha az tehlikelidir. Cihazın kalp içindeki yeri, şekil 2.24(B)'de gösterilmiştir [98].



Şekil 2.24. (A) Atriyal Septal kapama cihazı ile (B) Atriyal Septal kapama cihazının kalbin içindeki yerleşimi gösterilmiştir [98].

Şekil 2.25'te doğuştan kalp hastalıkları olan hastalarda kan dolaşımına yardımcı olmak için ŞHA liflerini kullanan bir mekanik dolaşım destek cihazı geliştirmişlerdir [99,100].

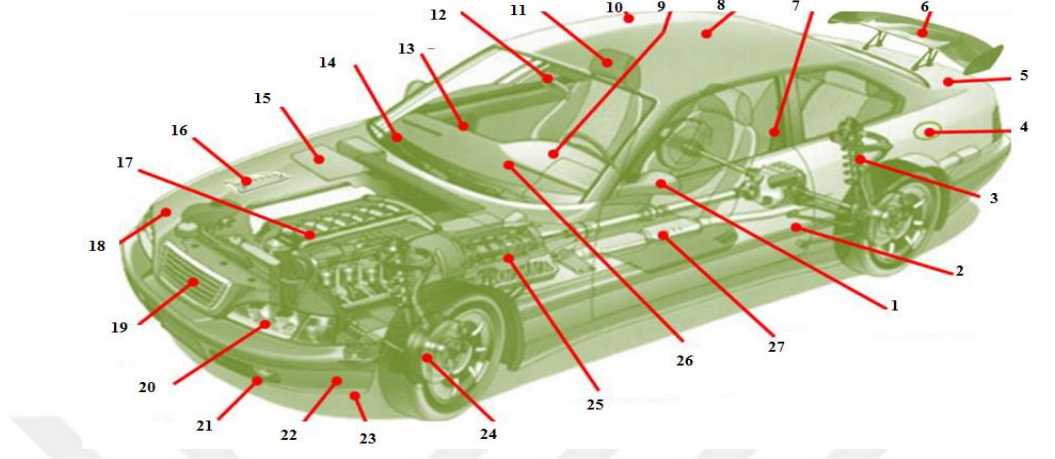


Şekil 2.25. Şekil hatırlamalı alaşım lifi olan yapay kalp destek cihazları [100].

2.5.4. Otomotiv Uygulamaları

Yeni nesil araçlarda, gelişmiş performansa sahip daha güvenli ve daha fazla konfor için müşteri talebi nedeniyle sensör ve aktüatör sayısı sürekli artmaktadır. Bu da SMA aktüatörleri için çok çeşitli fırsatlar sunmaktadır [101,102]. Şekil 2.26'da gösterilen bileşenlerin çoğu zaman lineer ve aktif termal aktüatörlerdir [102,103]. Bununla birlikte, SMA geçiş kabiliyeti (aktif ve pasif

yapılar) nedeniyle, ticari otomotiv uygulamaları ayrıca aerodinamik ve şekillendirme uygulamaları gibi diğer alanlara da yayılmaktadır.



Şekil 2.26. Otomotiv alanındaki mevcut potansiyel ŞHA uygulamaları [104-106].

1. Kapanabilir Yan Ayna, 2. Kapı, 3. Süspansiyon, 4. Dizel-Benzin Yakıt Deposu, 5. Çizme, 6. Hız Kesici Kanat, 7. Emniyet Kemer, 8. Araba Üst Kısım, 9. Gösterge Paneli, 10. Yapısal Pano Parçaları, 11. Yapısal Koltuk Parçaları, 12. Dikiz Aynası, 13. Hava Yastıkları, 14. Ön Silecekler, 15. Motor Kontrol Ünitesi, 16. Batarya, 17. Motor, 18. Motor Kaputu, 19. Radyatör Panjuru, 20. Far, 21. Sis Farı, 22. Ön Tampon, 23. Hava Haznesi, 24. Fren Balata Sistemi, 25. Şanzıman, 26. Klima Kontrolü, 27. Egzoz.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Alaşımların Karakterizasyonu

Ark ergitme yöntemi ile üretilen ve Tablo 3.1’de açık formülü verilen üç adet (M1, M2 ve M3) NiTiCo şekil hatırlamalı alaşımlarından uygun boyutlarda parçalar kesilerek bu parçalarla çeşitli ölçüm ve analiz işlemleri yapılarak parçalar incelendi. Bu çalışmada üretilen alaşımların metalografik mikro yapıları, malzemelerin kimyasal kompozisyonları, içerdikleri mikroyapı fazları, bazı termik ve manyetik özellikleri belirlenmiştir. Bu özelliklerin belirlenmesinde aşağıdaki teknikler kullanılmıştır.

1. Hazırlanan numunelerin yüzeyindeki yapıları gözleyebilmek amacı ile optik mikroskopu kullanıldı.
2. Optik mikroskopu ile gözlenemeyen alaşım yüzeydeki yapısal özellikler, optik mikroskoptan daha yüksek çözünürlüğe ve odak derinliğine sahip olan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile belirlendi. EDX ölçümleri yapılarak alaşımlardaki matrix fazlar belirlendi.
3. Numunelerin faz dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değerleri Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) ölçümleri ile belirlendi.
4. Alaşımların kristal yapıları X-ışınları Difraktometresi (XRD) ile incelendi. Faz durumlarının belirlenebilmesi için ölçümleri yapıldı.
5. Numunelerin Vickers sertlik ölçümleri alındı.
6. Manyetik özelliklerinin belirlenmesi için ölçümler yapıldı.

3.1.1. Numune hazırlama işlemleri

NiTiCo şekil hatırlamalı alaşımlar için, $\text{Ni}_{50-x}\text{Ti}_{50}\text{Co}_x$ ($x = \text{\%wt. 2, 4, 6}$) formülü baz alınarak %99,9 saflıktaki Ni, Ti ve Co tozu kullanıldı. Alaşımların homojen bir karışıma sahip olabilmesi için manyetik etkiler minimuma indirilerek uzun süre karıştırıldı. Elde edilen bu karışım şekil 3.1’deki Graseby Specac marka presleme cihazında 10 MPa basınç altında preslenerek tabletler haline getirildi.

Tablo 3.1 Ark ergitme yöntemiyle elde edilen şekil hatırlamalı alaşımların ağırlıkça oranlarda verilen kompozisyonları.

Alaşımlar	Ni (%wt.)	Ti (%wt.)	Co (%wt.)
M1 (Ni ₄₈ Ti ₅₀ Co ₂)	48	50	2
M2 (Ni ₄₆ Ti ₅₀ Co ₄)	46	50	4
M3 (Ni ₄₄ Ti ₅₀ Co ₆)	44	50	6

Yüzdelik dilimleri tablo 3.1’de verilen bu numuneler ark ergitme yöntemiyle argon atmosferinde Edmund Buehler Arc Melter marka cihazda eritildi ve numuneler oluşturuldu.



Şekil 3.1. Bu çalışmada kullanılan Graseby Specac marka presleme cihazı.

Küçük külçeler şeklinde dökülen alaşımlar enine veya boyuna olarak uygun boyutlarda küçük parçalar halinde kesilerek bakalite gömüldü. Zımparalama ve pasta ile parlatma işlemi yapıldıktan sonra yüzeyi pürüzsüzleştirilen numune yüzeysel morfoloji incelemelerinde kullanıldı. Numunelerin kesilme işlemi sırasında çok fazla ısınmamasına, aşırı deforme olmamasına ve yüzeyin düzgün kesilmesine özen gösterildi. Kesme işlemi sırasında sürtünmeden dolayı oluşacak ısı transferini azaltmak için soğutucu sıvı kullanıldı. Elde edilen bu alaşım parçaları şekil 3.2.’deki Protherm CWF-1200 marka kül fırınında 1100 °C de 24 saat bekletilerek homojenleştirme işlemi

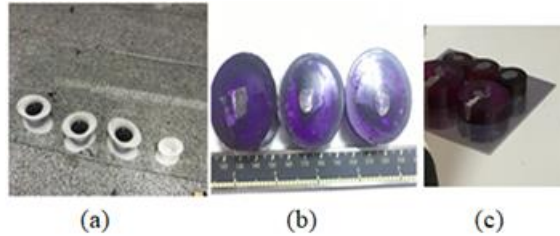
yapıldı. Homojenleştirme sonucunda kül fırınında bulunan alaşımlar alınarak tuzlu-buzlu suya atılarak ani soğutma işlemi yapıldı. Daha sonra numuneye büyük kuvvetler uygulanmadan numune üzerindeki oksit tabaka kaldırıldı.



Şekil 3.2. Bu çalışmada kullanılan Protherm CWF-1200 marka kül fırını.

3.1.2. Zımparalama, Parlatma ve Dağlama

Hazırlanan numunelerin ölçüm cihazlarında kullanılabilmeleri için yüzeylerinin temiz ve parlak olması gerekir. Kesme sırasında numuneler ufak veya düz zeminde duramayacak kadar karışık şekilli olmasından dolayı şekil 3.3'teki gibi numuneler bakalit kalıplara alındı.



Şekil 3.3. (a) Birinci aşama bakalite alma işlemi, (b) ikinci aşama, kalıptan çıkartılan donmuş bakalit içindeki numune, (c) son aşaması ise bakalit içindeki numunelerin zımparalanmış ve temizlenmiş halleri.

Bakalit kalıbının içine numaralandırılmış ve ters konulmuş numune üzerine karıştırılmış reçine ve sertleştirici dökülerek bakalite alma işlemi tamamlandı. 24 saat beklendikten sonra reçine katılaştı ve numune kalıptan çıkartılarak şekil 3.4'te gösterilen Polisher MPS200 marka zımparalama makinesiyle zımparalandı.



Şekil 3.4. Bu çalışmada kullanılan Polisher MPS200 marka zımparalama cihazı.

Numunelere mikroyapı ve mekanik analizler için parlatma işlemine uygulandı. Numuneler 80, 100, 120, 240, 400, 800, 1000, 1200, 2500 ve 5000 gritlik zımparalar ile kalından inceye doğru zımparalandı. Farklı zımparalar için numune platforma sürekli paralel tutularak zımparalanırken sürtünmeden dolayı açığa çıkan ısı enerjisinin soğurulması için su kullanıldı. Hazırlanan alaşım üzerindeki pürüzler ve kirler temizlendikten sonra numuneler kadife çuha ve elmas pasta ile parlatıldı. Bu işlem sonunda numunelerin yüzeyleri oldukça yansıtıcı özellik kazandı. Parlak yüzey mikroskobun ışığını eşit oranda dağıtamaz bu nedenle numunelerin mikro yapıları mikroskop altında ayrıntılı incelenemez. Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobunda daha net görüntü gözlenebilmesi için parlatılan numunelerin yüzeylerinin dağlanması gerekmektedir. Optik mikroskop ve SEM görüntülerini daha belirgin ve daha net hale getirmek için numunelerin yüzeyleri hazırlanan kimyasal sıvı çözeltileri kullanarak dağlandı. Dağlama işlemi için hazırlanan kimyasal sıvı çözelti alaşımın cinsine göre farklılık gösterdiğinden yapılan kaynak araştırmalarında NiTi ve türevi alaşımları için HNO_3 -HF- H_2O ve HNO_3 -HF- CH_3OOH bileşimine sahip çözeltilerin uygun olduğu belirlendi. Parlatılan numuneler 10ml HF-40ml HNO_3 -50ml H_2O ve 40ml HNO_3 -40ml HF-20ml CH_3OOH içeren çözeltide 5-10 sn. süre ile dağlandı [107]. Dağlanan numunelerin yüzeyleri etil alkol ile temizlenerek kuruduktan sonra diğer karakterizasyon işlemleri için hazır hale getirildi.

3.1.3. Optik Mikroskop

Mikro yapıların ortaya çıkartılması amacıyla elmas süspansiyonları ile yumuşak ve uzun tüylü parlatma kumaşı kullanılarak parlatılmış numunelerin yüzey morfolojilerini inceleyebilmek için optik mikroskop analizleri Şekil 3.5’de verilen Nikon MA 200 Optik Fotoğraf cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.5. Metalografik gözlemlerin yapıldığı Optik Nikon MA 200 Optik Fotoğraf cihazı.

3.1.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX İncelemesi

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılan elektronların numune üzerine odaklanarak bombardıman edilmesi, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron-madde arasında oluşan çeşitli etkileşimler sonucunda meydana gelen uyarıların uygun sensör alıcılar tarafından toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra katot ışınları tüpünün ekranına aktarılması sonucunda elde edilir. Optik mikroskobu ölçümünde kullanılan numunelerin içyapıları optik mikroskop ile detaylı olarak gözlenemediğinden numuneler optik mikroskoptan çok daha yüksek çözünürlüğe ve odak derinliğine sahip taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kısa zamanda ve hassas ölçümler vermesinin yanı sıra yüzeyin üç boyutlu görüntülenmesi ve element analizi yapması amacı ile kullanılmaktadır. Bu çalışmada, numunelerin mikroyapı analizi, alaşımlardaki elementlerin oranlarını belirlemek, yapıda oluşan fazların element içeriklerini tespit edebilmek için şekil 3.6’da gösterilen (SEM) (LEO, EVO 40, England Cambridge) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) (Bruker, 125 eV, Minden Almanya) cihazı kullanılarak yapıldı.



Şekil 3.6. Bu çalışmada kullanılan SEM (LEO, EVO 40, England Cambridge) cihazı.

3.1.5. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)

Üzerinde çalıştığımız şekil hatırlamalı alaşımlarda martensit-austenit faz dönüşüm sıcaklıklarının başlangıç-bitiş değerlerinin bilinmesi alaşım hakkında bir görüşe varabilmemiz için son derece önemlidir. DSC analizi martensit-austenit dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesinde kullanılan bir tekniktir. Austenit-martensit faz dönüşümünü gerçekleştiren fiziksel faktörler alaşımın kullanılabilirliği açısından önemlidir. Martensit-austenit dönüşüm için belirlenen kritik faz sıcaklıkları deneysel ve termodinamik yöntemler kullanılarak bulunabilmektedir. Faz dönüşüm sıcaklıklarından yararlanarak maddenin fiziksel özelliklerine ait bazı kinetik değişimlerini de (entalpi, entropi, aktivasyon enerjisi, ergime enerjileri, özgül ısıları, kristalleşme, termal kararlılık, faz dönüşümleri gibi) teorik olarak hesaplamak mümkündür.

Yaptığımız çalışmalarda kullandığımız numunelerimizin DSC analizlerini yapabilmek için, çalışmalarımızda kullanılan üç alaşımdan da uygun boyutta parçalar kesilerek numuneler hazırlandı. Çalışma kapsamında üretilen üç alaşımdan (M1, M2, M3) martensit-austenit faz dönüşüm sıcaklıkları ve ekzotermik, endotermik dönüşüm entalpilerinin tespit edilmesi amacıyla yapılan DSC analizlerinde Fırat üniversitesi Katihâl Fiziği Araştırma Laboratuvarında bulunan Şekil 3.7’de gösterilen Perkin Elmer Sapphire diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz (-150°C) - (600°C) sıcaklık aralığında analiz yapabilmektedir. Üzerinde çalışacağımız alaşımlardan DSC analizlerinde kullanılan numune miktarları yaklaşık 40-110 mg arasında olacak şekilde ayarlandı, ısıtma ve soğutma hızı 10°C/dk. olarak belirlendi. Soğutma sırasında sıvı azot kullanılarak sıcaklık -200 °C gibi düşük sıcaklıklara indirildi.



Şekil 3.7. Bu çalışmada kullanılan Perkin Elmer Sapphire (DSC) ölçüm cihazı

3.1.6. X-ışınları Difraktometresi (XRD)

X-ışını difraktometresi, kristalin atomik ve moleküler yapısını incelemek için kullanılan metottur. Kristalize yapının tespiti cismin difraksiyon deseninden belirlenir. X-ışını difraksiyon yöntemi kristalize yapının ve fazların belirlenmesine yardımcı olan bir tekniktir. Kristal yapıdaki numunenin özelliğini belirleyecek olan keskin ve şiddetli pikleri çözümleyerek örgü değişkenlerini ve kristal yapısını tespit eder [108]. Bunu için ölçüm yapılamadan önce gerekli ısı işlemlere tabi tutulan üç adet numuneden (M1, M2, M3) uygun ebatlarda parçalar kesilerek ve bu parçalardan sağlıklı veriler almak için yüzeylerindeki pürüzler ve kirlilik temizlendikten sonra numuneler kadife çuha ve elmas pasta ile parlatılıp farklı ısı işlemler uygulanmış ve homojenize edilmiş numunelerin kristal yapıları şekil 3.8’de gösterilen Bruker Discover D8 X-ray diffraction (XRD) cihazı ile incelendi.



Şekil 3.8. Bu çalışmada kullanılan Bruker Discover D8 X-ray diffraction (XRD) analiz sistemi.

3.1.7. Vickers Mikrosertlik Ölçümü

Vickers sertlik ölçümleri için, alaşımdaki matrix yapının (ana faz) ve ikincil fazın sertliği “AOB test sistem” marka vickers mikrosertlik cihazı ile ölçüldü. Tablo 3.1 de verilen numunelerin Vickers sertlik ölçümleri yapıldı. Vickers sertlik ölçümü, mikro yapının mikro sertliği nasıl etkilediğini anlamada ve yorumlamada kullanılan bir ölçme yöntemidir. Mikrosertlik için uygulanan yük 50gr seçilerek her bir yapıdan en az üç ölçüm alınarak aritmetik ortalamaları hesaplandı.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Ölçüm Sonuçları

NiTiCo ŞHA'nın kullanım alanları açısından faz dönüşüm sıcaklıkları ve histerizesi önemlidir. Şekil hatırlamalı alaşımların faz dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için farklı uygulamalar bulunmaktadır. Bu uygulamalardan biri Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizidir. Bu yöntemde, alaşımlardan alınacak uygun ebatta küçük bir numunenin ısıtılıp soğutulması sonucunda göstereceği piklerin incelenmesi ile faz dönüşüm sıcaklıkları belirlenir. Bu nedenle, şekil hatırlamalı alaşımlarda martensit-austenit dönüşümünün başlama ve bitiş sıcaklıklarını belirlemede kullanılır. Bu çalışmada DSC (Diferansiyel tarama kalorimetresi) analizi, M1, M2 ve M3 alaşımlarından alınan numunelere uygulanmıştır. Teorik kısımda bahsedildiği gibi oluşturulan numunelere ısı alma işlemi ile martensit faza ve ısı verme işlemi ile de austenit faza geçiş olduğu belirtilmişti. Eğrilerde A_s , A_f , R_s , R_f , M_s ve M_f dönüşüm sıcaklıkları belirtilmiştir. Eğriler üzerinde ise faz dönüşüm sıcaklıkları ile birlikte faz dönüşüm entalpileri de gösterilmiştir.

4.1.1. Alaşımların Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Ölçüm Sonuçları

M1, M2 ve M3 alaşımlarının DSC ölçüm sonuçlarından elde edilen eğrilerde A_s , A_f , R_s , R_f , M_s ve M_f dönüşüm sıcaklıkları belirlenmiştir. Genel anlamda alaşım ısıtma sırasında endotermik reaksiyon meydana gelir ve martensit faz austenit faza dönüşür. Soğutma sırasında ise ekzotermik faz dönüşümü meydana gelerek austenit faz martensit faza dönüşür. Bu dönüşüm sıcaklıkları alaşımların içeriğindeki elementlere ve bu elementlerin % ağırlık oranına göre değişim gösterir.

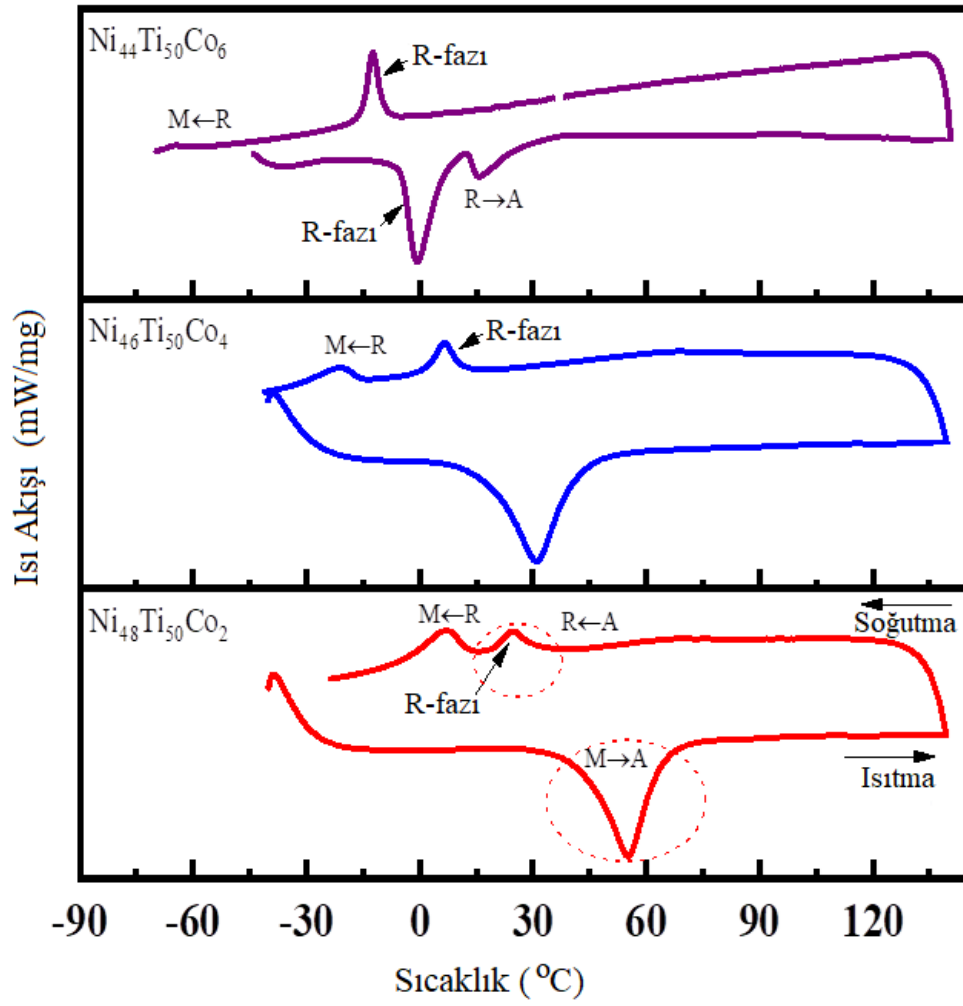
Dönüşüm sıcaklıkları ise:

T_0 denge sıcaklığı,

$$T_0 = \frac{1}{2} (M_s + A_f) \quad (4.1)$$

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{\Delta H}{T} \quad (4.2)$$

denklemleri kullanılarak denge sıcaklığını (T_0) ve entropi (ΔS) değerleri hesaplandı [64,66]. Hesaplanan M1, M2 ve M3 alaşımına ait değerleri Tablo.4.1 ve şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. M1, M2 ve M3 alaşımlarına ait DSC grafiği.

Tablo 4.1. M1, M2 ve M3 Alaşım gruplarının dönüşüm sıcaklık değerleri.

Alaşımlar	A_s (°C)	A_p (°C)	A_f (°C)	R_s (°C)	R_p (°C)	R_f (°C)	M_s (°C)	M_p (°C)	M_f (°C)	ΔH_H (J/g)	$\Delta H_c(R_{fazı})$ (J/g)	ΔH_c (J/g)
M1	42.0	55.3	65.0	31.3	24.8	19.2	12.2	7.2	-5.3	13.3	-1.9	-5.1
M2	17.8	30.1	42.6	10.9	6.6	1.6	-15.0	-20.1	-32.0	12.6	-3.73	-5.2
M3	9.1	15.6	35.6	-8.4	-12.5	-16.2	-61.6	-65.0	-69.6	4.8	-3.1	-1.1

43.4 mg'lık M1 alaşımı için DSC ölçümleri 10°C/dk. ısıtma ve soğutma hızlarıyla azot gazı atmosferinde yapıldı. Elde edilen verilere göre M1 alaşımı için Austenit başlama sıcaklığı $A_s = 42$ °C'dir. Austenit bitiş sıcaklığı $A_f = 65$ °C'dir. DSC analizi sonucunda elde edilen kalorimetrik değişim eğrileri incelendiğinde, 42 °C sıcaklığında endotermik davranışın başladığı, 55,3 °C'de tepe noktasına ulaşıldığı ve 65°C'de dönüşümün tamamlandığı ve entalpisinin 13,3 mJ/mg. olduğu belirlenmiştir. Olayın geri dönüşümünde ise kalorimetrik değişim grafiği incelendiğinde $R_s =$

31,3°C sıcaklığında ekzotermik davranışın başladığı, $R_p = 24,8^\circ\text{C}$ 'de tepe noktasına ulaşıldığı ve $R_f = 19,2^\circ\text{C}$ 'de ise dönüşümün tamamlandığı ve entalpisinin -1,9 mJ/mg olduğu tespit edilmiştir. Geri dönüşüm devam ederken kalorimetrik değişim grafiği incelendiğinde $M_s = 12,2^\circ\text{C}$ sıcaklığında ekzotermik davranışın başladığı, $M_p = 7,2^\circ\text{C}$ 'de tepe noktasına ulaşıldığı ve $M_f = -5,3^\circ\text{C}$ 'de ise dönüşümün tamamlandığı ve entalpisinin -5,1 mJ/mg olduğu tespit edilmiştir.

62,4 mg'lık M2 alaşımı için DSC ölçümleri $10^\circ\text{C}/\text{dk}$. ısıtma ve soğutma hızlarıyla azot gazı atmosferinde yapıldı. Elde edilen verilere göre M2 alaşımı için Austenit başlama sıcaklığı $A_s=17,8^\circ\text{C}$ 'dir. Austenit bitiş sıcaklığı $A_f= 42,6^\circ\text{C}$, martensit başlama sıcaklığı $M_s=-15^\circ\text{C}$ 'dir. DSC analizi sonucu kalorimetrik değişim grafiği incelendiğinde, $17,8^\circ\text{C}$ sıcaklığında endotermik davranışın başladığı, $31,1^\circ\text{C}$ 'de tepe noktasına ulaşıldığı ve $42,6^\circ\text{C}$ 'de dönüşümün tamamlandığı ve entalpisinin 12,6 mJ/mg. olduğu tespit edilmiştir. Olayın geri dönüşümünde ise kalorimetrik değişim grafiği incelendiğinde $R_s = 10,9^\circ\text{C}$ sıcaklığında ekzotermik davranışın başladığı, $R_p = 6,6^\circ\text{C}$ 'de tepe noktasına ulaşıldığı ve $R_f = 1,6^\circ\text{C}$ 'de ise dönüşümün tamamlandığı ve entalpisinin -3,73 mJ/mg olduğu tespit edilmiştir. Geri dönüşüm devam ederken kalorimetrik değişim incelendiğinde $M_s = -15^\circ\text{C}$ sıcaklığında ekzotermik davranışın başladığı, $M_p = -20,1^\circ\text{C}$ 'de tepe noktasına ulaşıldığı ve $M_f = -32^\circ\text{C}$ 'de ise dönüşümün tamamlandığı ve entalpisinin -5,2 mJ/mg olduğu tespit edilmiştir.

74.4 mg'lık M3 alaşımı için DSC ölçümleri $10^\circ\text{C}/\text{dk}$. ısıtma ve soğutma hızlarıyla azot gazı atmosferinde yapıldı. Elde edilen verilere göre M3 alaşımı için Austenit başlama sıcaklığı $A_s= 9,1^\circ\text{C}$ 'dir. Austenit bitiş sıcaklığı $A_f= 35,6^\circ\text{C}$, martensit başlama sıcaklığı $M_s= 12,2^\circ\text{C}$ 'dir. DSC analizi sonucu kalorimetrik değişim incelendiğinde, $9,1^\circ\text{C}$ sıcaklığında endotermik davranışın başladığı, $15,6^\circ\text{C}$ 'de tepe noktasına ulaşıldığı ve $35,6^\circ\text{C}$ 'de dönüşümün tamamlandığı ve entalpisinin 4,8 mJ/mg. olduğu tespit edilmiştir. Döngünün geri dönüşümünde ise kalorimetrik değişim incelendiğinde $R_s= -4,4^\circ\text{C}$ sıcaklığında ekzotermik davranışın başladığı, $R_p = -12,5^\circ\text{C}$ 'de tepe noktasına ulaşıldığı ve $R_f = -16,2^\circ\text{C}$ 'de ise dönüşümün tamamlandığı ve entalpisinin -3,1 mJ/mg olduğu tespit edilmiştir. Geri dönüşüm devam ederken kalorimetrik değişim incelendiğinde $M_s = -61,6^\circ\text{C}$ sıcaklığında ekzotermik davranışın başladığı, $M_p = -65^\circ\text{C}$ 'de tepe noktasına ulaşıldığı ve $M_f = -69,6^\circ\text{C}$ 'de ise dönüşümün tamamlandığı ve entalpisinin -1,1 mJ/mg olduğu tespit edilmiştir.

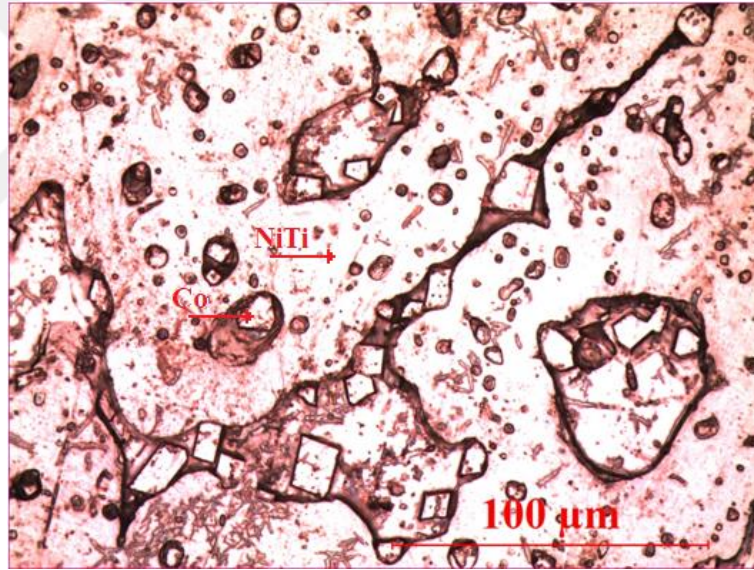
4.2. Optik Mikroskop Ölçüm Sonuçları

Tablo 3.1'de verilen tüm M1, M2 ve M3 numunelerden parçalar kesilip bakalit içine sabitlendi. Bakalit içindeki bu numuneler zımparalanıp parlatıldıktan sonra optik mikroskopla yüzey fotoğrafları çekildi. Çekilen bu fotoğrafların içinde, tane sınırları ile austenit-martensit faz görünümlerinin daha belirgin hale gelebilmesi için mikroyapı içerisindeki numuneler dağlama çözeltisi ile dağlandı. 10ml HF-40ml HNO_3 -50ml H_2O içeren çözeltide 5-10 sn. süre ile dağlandı.

Numuneler dağlama çözeltisinde bir müddet bekletildi. Her bir numunenin yapısı optik mikroskopta 100, 200 ve 500 büyütme ile gözlemlendi ve yüzeyde oluşan yapıların aşağıdaki şekilde optik fotoğrafları alındı.

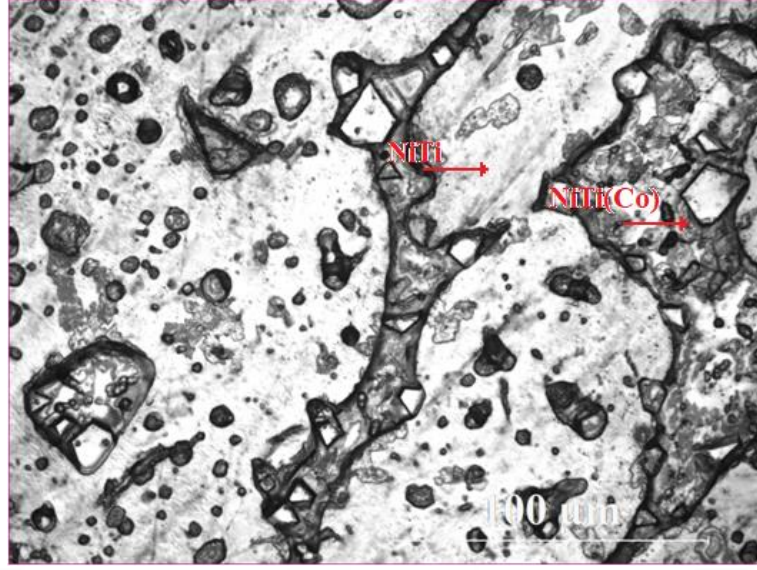
4.2.1. Alaşımın Optik Mikroskop Ölçüm Sonuçları

Şekil hatırlatmalı malzemelerin yapılarını analiz etmek için Şekil 4.2’de, M1 alaşımına ait farklı bölgelerden çekilen optik fotoğrafları alındı. Bu optik fotoğraflar incelendiğinde numunelerde faz dönüşümlerinin olduğu, tane içlerinde yoğun olmamakla birlikte bir miktar çökelti oluşumunun mevcut taneleri olduğu ve tane sınırları açık bir şekilde görülmektedir. Optik fotoğraflara baktığımızda numuneler içerisinde benzer fazların olduğu görülmektedir. Koyu ve açık bölgelerde yapının genelinde oluşan faz NiTi fazıdır ve az da olsa numune içine yayılmış diğer faz ise Ti_2Ni (Co) fazıdır.



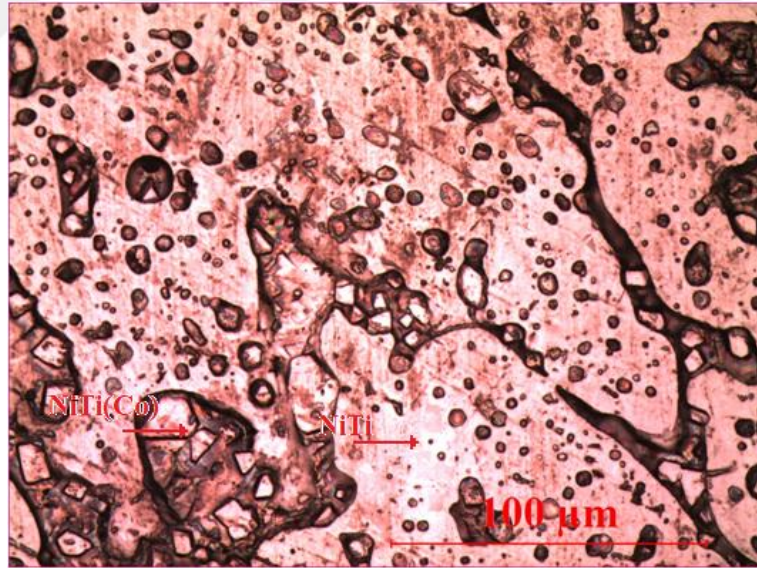
Şekil 4.2. M1 Numunesinin farklı bölgelerinden 500x büyütmeyle çekilen yüzey fotoğrafı.

Fakat bu alaşıma ait tane büyüklükleri farklılık göstermektedir. Farklı bölgelerden alınan M2 alaşımına ait optik fotoğraflar şekil 4.3’te verilmiştir. Farklı tanelerde oluşan martensit plakaların şekli ve tane büyüklüklerinin de birbirlerinden farklı olduğu optik fotoğrafta görülmektedir.



Şekil 4.3. M2 Numunesinin farklı bölgelerinden 500x büyütmeyle çekilen yüzey fotoğrafı.

M3 alaşımının farklı bölgelerinden alınan optik fotoğrafları şekil 4.4'te verilmiştir. Yine alaşım incelendiğinde, alaşımın yapısındaki taneler ve tane sınırları net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.4. M3 Numunesinin farklı bölgelerinden 500x büyütmeyle çekilen yüzey fotoğrafı.

Bu fotoğraflardaki şekil hatırlatmalı alaşımların mikro yapıları karşılaştırıldığında, ağırlıkça artan % Co miktarıyla malzeme mikro yapısında kobaltça zengin çok küçük taneli çökeltilerin yoğunluğunun da arttığı açıkça görülmektedir. Sonuç olarak NiTiCo alaşımına ağırlıkça % Co ilave oranının artmasıyla alaşımdaki austenit fazın daha baskın hale geldiği gözlemlenmiş ve XRD

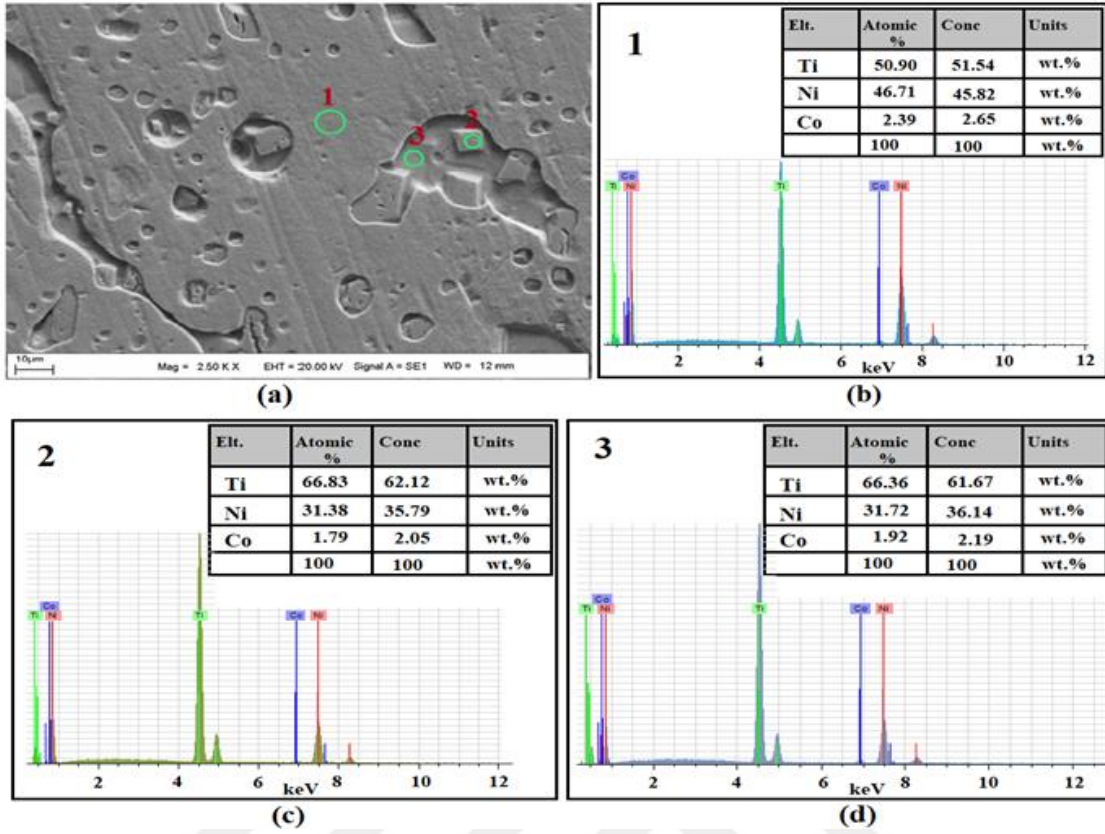
ölçümleriyle de desteklenmiştir. Nitekim Üçlü bir alaşım elementi olarak Co ilavesi, ikili bir NiTi alaşımına kıyasla martensitik dönüşümün karakteristik sıcaklıklarının artmasına neden olur.

4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX Ölçüm Sonuçları

Tablo 3.1’de verilen tüm numunelerden (M1, M2, M3) parçalar kesilip bakalit içine sabitlendi. Numunelere parlatma ve dağlama prosedürleri uygulandıktan sonra, numunelerin mikro yapılarının daha net ve düzgün görülebilmesi, mevcut fazlar ve bu fazların mikro yapı içerisindeki dağılımlarını belirlemek için optik mikroskoptan daha yüksek çözünürlüğe ve odak derinliğine sahip olan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Ayrıca bu gözlemlerin yapıldığı cihazın EDX bileşeni yardımıyla, kristal yapının gözlenen bölgelerinde element analizi yapıldı. Bu çalışmada, ayrı ayrı numune hazırlanırken belirlenen oranların EDX ölçüm sonuçlarıyla kıyaslanması durumunda, istenilen oranların yaklaşık olarak elde edildiği söylenebilir.

4.3.1. Alaşımların SEM- EDX Ölçüm Sonuçları

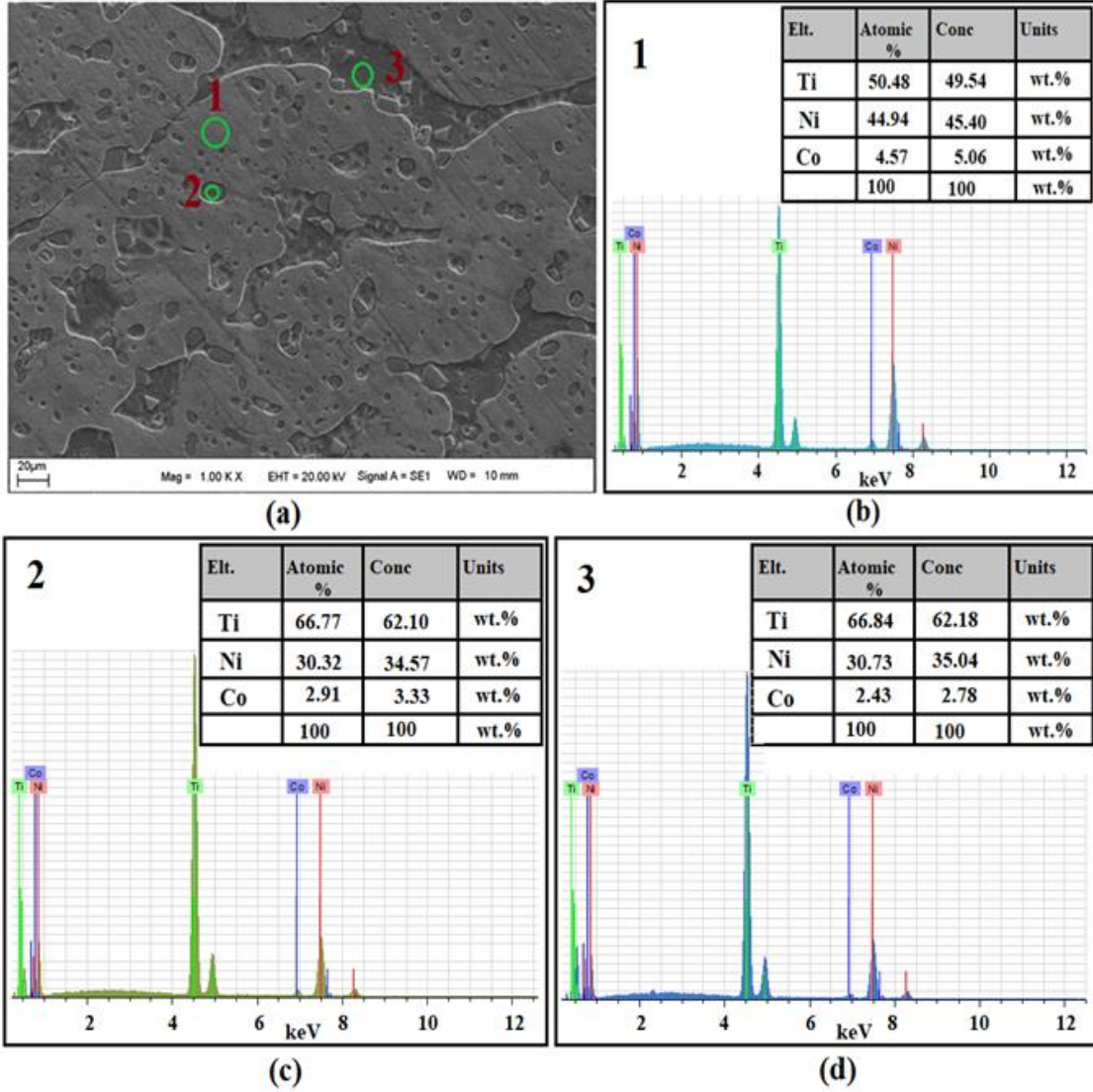
Şekil hatırlamalı alaşımlarda, iki yönlü martensit ve austenit faz geçişlerinin en iyi gözlemlendiği alaşım NiTiNOL alaşımları olduğu bilinmektedir. Alaşım yüksek sıcaklıkta austenit fazda kararlı bir yapıya sahiptir. Alaşım homojenleştirilme sıcaklığında fırından alınıp tuzlu buzlu su içerisine atılarak ani soğutma işlemi yapıldığında alaşımın bir kısmı martensit faza dönüşür. Numunelerin oda sıcaklığındaki faz durumu yapılan deneysel işlemlerden sonra X-ışın difraksiyonu ile belirlenmeye çalışıldı. M1 alaşımının şekil hatırlatmalı malzemenin SEM mikro yapısı ve EDX verisi Şekil 4.5’ de verilmiştir. Şekil 4.5 (a)’da görüldüğü gibi M1 alaşımının SEM mikro yapısında oluşan fazları belirleyebilmek için her bir farklı faz üzerinden EDX analizi alınmıştır. SEM fotoğrafları incelendiğinde x-ışınları ve EDX ölçümlerinden, az miktarda B19’(NiTi) fazına ve Ti₂Ni fazına rastlanmıştır. Ayrıca yapı içerisinde belirtilen fazların varlığı X-ışın sonuçları ile de uyumaktadır. Hem austenit hem martensit fazda ortak rastlanan faz Ti₂Ni fazıdır. Bu faz titanyumca zengin alaşımlarda görülür. Her iki alaşımda da titanyum miktarı atomikçe %50’nin üzerindedir. Ti₂Ni çökelti fazı çukur olan bölgeler olarak tespit edilmiştir. Hepsisi şekil üzerinde gösterilemediğinde birkaç tanesi işaretlenmiştir. Çukur olan bölgeler dışındaki yerlerin B19’(NiTi) martensit faz olduğu tespit edilmiştir. Buna göre M1 alaşımda genel EDX sonucu, titanyum oranı %67, nikel oranı da %31’dur. Bu sonuca göre çukur bölgelerde Ti₂Ni fazı vardır. Isıl işlem uygulanmış M1 numunelerinde yapının daha homojen bir hale geldiği ve nikel matrisinin yanında ara yüzeylerinde kobaltın yer aldığı gözlenmiştir. Ayrıca M1 alaşımında bir miktar da B2(NiTi) fazına rastlanmıştır. Şekil 4.5(b), (c) ve (d)’de M1 Alaşımına ait EDX görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.5. M1 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüleri

M2 alaşımına ait şekil hatırlamalı malzemenin SEM mikro yapısı ve EDX verisi Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6 (a)'da görüldüğü gibi M2 alaşımının SEM mikro yapısında oluşan fazları belirleyebilmek için her bir farklı faz üzerinden EDX analizi alınmıştır. 2 ve 3 bölgeleri çukur 1 bölgesi ise düz olarak incelenmiştir. Tüm çukur ve düz bölgeler şekil üzerinde gösterilemediğinde sadece üç bölge işaretlenmiştir. SEM fotoğrafları incelendiğinde x-ışınları ve EDX ölçümlerinden, B19'(NiTi) fazına ve Ti_2Ni fazına rastlanmıştır. Hem austenit hem martensit fazda ortak rastlanan faz Ti_2Ni fazıdır. Bu faz titanyumca zengin alaşımlarda görülür. Her iki alaşımda da titanyum miktarı ağırlıkça %50'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Ti_2Ni çökelti fazı çukur olan bölgeler olarak tespit edilmiştir. Çukur olan bölgeler dışındaki yerlerin B19'(NiTi) martensit faz olduğunu tespit edilmiştir. Buna göre M2 alaşımda genel EDX sonucu, titanyum oranı ~%66, nikel oranı da ~%32'dir. Bu sonuca göre çukur bölgelerde Ti_2Ni fazı vardır. Isıl işlem uygulanmış M2 numunelerinde yapının daha homojen bir hale geldiği ve nikel matrisinin yanında ara yüzeylerinde bakırın yer aldığı gözlenmiştir. Ayrıca M2 alaşımında EDX sonuçlarına göre, B2 NiTi (Co) fazına ve Ti_2Ni (Co) fazlarına rastlanmıştır. Genel anlamda Bir bölgede titanyumca zengin faz Ti_2Ni oluştuğu zaman yakın bölgelerde atomik denge bozulur. Yani Ti_2Ni fazının yakın bölgelerinde titanyumun atomik oranı azalır. Böylece titanyumun az olduğu bölgelerde çeşitli oranda fazlar ortaya çıkar (Ni_3Ti ve Ni_4Ti_3 gibi.) [109]. Çalışmaların devamında Bütün EDX sonuçları

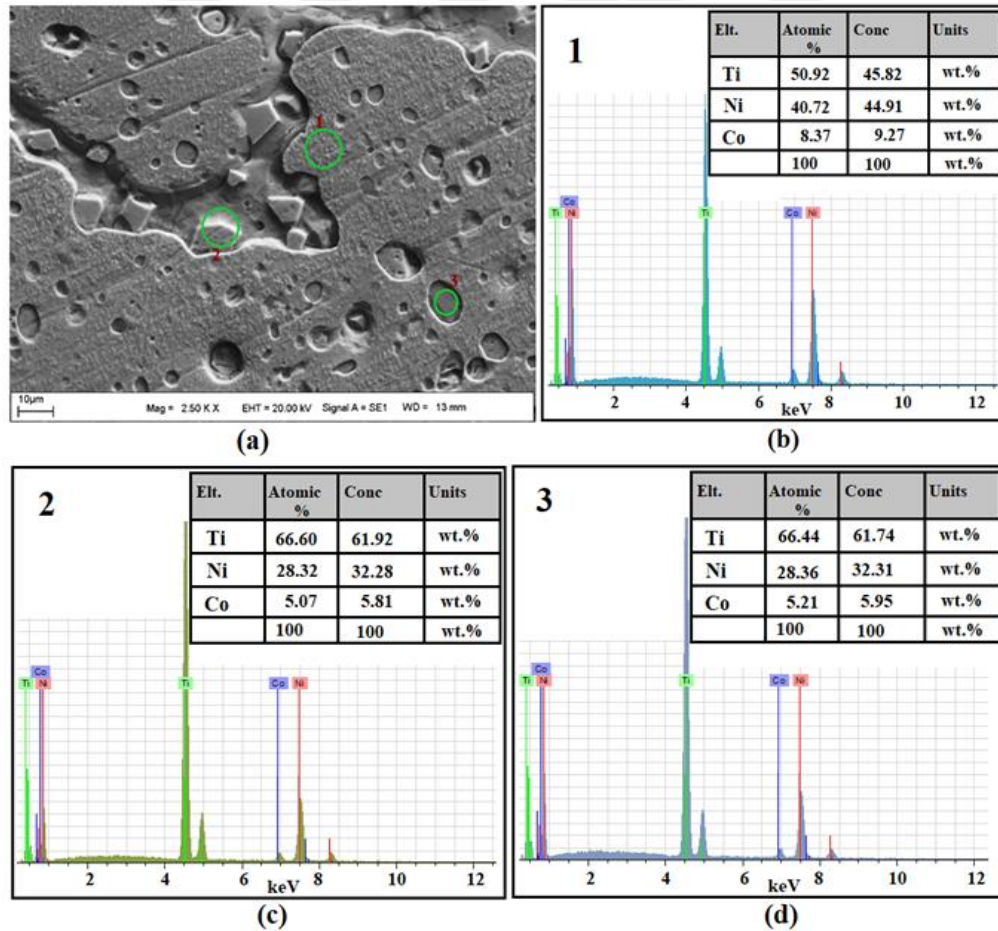
incelendiğinde, yapının genelinin nikelce zengin NiTi fazından oluştuğu görülmektedir. Nitekim bu fazların varlığı X-ışınları sonuçları ile de uyum içerisinde olduğu görülüyor. Şekil 4.6 (b), (c) ve (d)'de M2 Alaşımına ait EDX görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.6. M2 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüleri

Şekil hatırlatmalı M3 malzemesinin SEM mikro yapısı ve EDX verisi Şekil 4.7'da verilmiştir. Şekil 4.7 (a)'da görüldüğü gibi M3 alaşımının SEM mikro yapısında oluşan fazları belirleyebilmek için her bir farklı faz üzerinden EDX analizi alınmıştır. SEM fotoğrafları incelendiğinde x-ışınları ve EDX ölçümlerinden, B19'(NiTi) fazına ve Ti₂Ni fazına rastlanmıştır. Hem austenit hem martensit fazda ortak rastlanan faz Ti₂Ni fazıdır. Bu faz titanyumca zengin alaşımlarda görülür. Nitekim Her iki alaşımda da titanyum miktarı atomikçe %50'nin üzerindedir. Ti₂Ni çökelti fazı çukur olan bölgeler olarak tespit edilmiştir. Hepsi şekil üzerinde

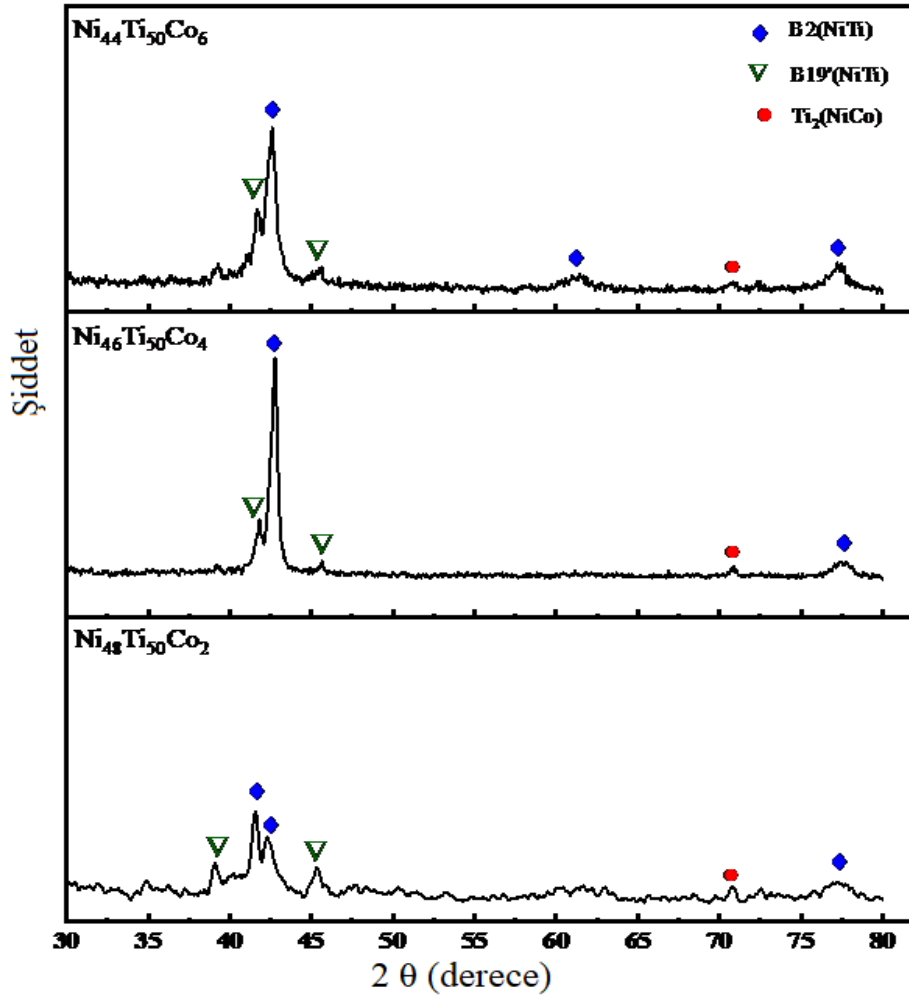
gösterilemediğinde üç bölge işaretlenmiştir. Çukur olan bölgeler dışındaki yerlerin B19'(NiTi) martensit faz ve B2(NiTi) austenit fazın varlığı tespit edilmiştir. Buna göre M3 alaşımında genel EDX sonucu, titanyum oranı ~%66, nikel oranı da ~%29'dır. Bu sonuca göre çukur bölgelerde Ti_2Ni fazı vardır. Isıl işlem uygulanmış M3 numunelerinde yapının daha homojen bir hale geldiği ve nikel matrisinin yanında ara yüzeylerinde bakırın yer aldığı gözlenmiştir. Ayrıca M3 alaşımında EDX sonuçlarına göre, NiTi fazına ve Ti_2Ni (Co) fazlarına rastlanmıştır. Yakın zamanlarda yapılan çalışmalarda NiTiCo alaşımlarında Co konsantrasyonuna bağlı olarak yer yer ikizlemeye benzer martensit yapının oluştuğunu belirtmişlerdir [110]. Schuster ve arkadaşları NiTiCo alaşımlarında ötektik matriste Ti, Ni, içeren karakteristik çöktürlerle birlikte, Co miktarına bağlı olarak Ti_2Co , Ti_2Ni ve $Ti_2(NiCo)$ kompleks bileşiklerin oluştuğu desteklemiştir [111]. Bu çalışmada M3 alaşımının EDX analizlerinde artan kobalt oranına bağlı olarak matris içerisindeki bakır dağılımındaki artış kaydedilmiştir. Bu artış Co içeren alaşımların $Ti_2(NiCo)$ çöktürleridir ve malzemenin elastiklik özelliğini ve işlenebilirliğini azalttığı gibi mekanik gerilmesini ve sertliğini de arttırmaktadırlar [112]. Nitekim bu fazların varlığı X-ışınları sonuçları ile de uyum içerisinde olduğu görülüyor. Şekil 4.7 (c) ve şekil 4.10(d)'de M3 Alaşımına ait EDX görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.7. M3 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüler.

4.4. X-ışınları Difraktometresi (XRD) Ölçüm Sonuçları

Alaşımın iç yapılarında oluşan faz dönüşümleri şekil hatırlama özelliği kazanmasını sağlamaktadır. Alaşımın istenilen özelliği kazanıp kazanmadığını tespit edebilmek için kullanılabilecek deneysel yöntemlerden biri de XRD ölçümleri ile numunede bulunan fazların belirlenmesidir. 1100 °C de 24 saat homojenleştirilmiş olan M1, M2 ve M3 numunelerinin kristal yapı özellikleri ve bu numunelerdeki fazlar X-ışını difraktometre cihazı ile ölçülmüştür. X ışınlarının ölçümü, oda sıcaklığında 30° ile 80° aralığında yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucu elde edilen X ışınları desenleri şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. M1, M2 ve M3 alaşımlarının X-ışını desenleri.

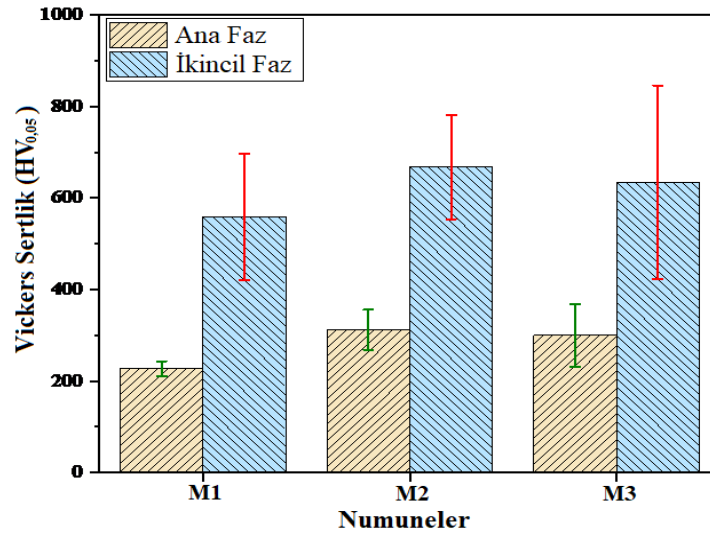
X-ışınları sonuçları SEM-EDX ölçümlerinden yararlanılarak değerlendirilmiş ve elde edilen kırınım pikleri belirlenmiştir [113-114]. M1 numunesinde 40,5 derecede en keskin pik görülmektedir. Bu pikin B2 NiTi martensit fazına ait olduğu bilinmektedir ve 43,20° 77,50° civarında B2(NiTi austenit) faza ait pik ile 71,00°’de Ti₂(NiCo) fazına ait pike rastlanmıştır. M2

numunesinde, 71°'de Ti₂(NiCo) fazına, 41.50°, 45.50° B19' NiTi martensit fazına ve 42.80° ve 77.80° de B2(NiTi austenit) fazına rastlanmıştır. M3 numunesinde de keskin pikin 43.80° olduğu aynı zamanda 61.20° ve 77.20° de B2 NiTi (Co) fazının piki olduğu tespit edilmiştir. 41.40°, 45.20° de B19' NiTi martensit fazına ve 71.00°'de Ti₂Ni (Ni, Co) fazına rastlanmıştır. Üç alaşımanın XRD grafikleri incelendiğinde, piklerin şiddetinin kobalt (Co) oranı arttıkça arttığını göstermektedir. Bütün alaşımlarda karışık fazlara rastlanmıştır. Martensit faz, austenit faz ve çökelti fazları tespit edilmiştir.

Şekil 4.8'e bakıldığında XRD piklerinden Ni₄₈Ti₅₀Co₂ alaşımındaki, ağırlıkça %2 Co ilave edilen M1 numunesinde baskın faz martensit fazdır. Co ilave oranı ağırlıkça %4 Co olduğunda martensit ve austenit fazı temsil eden XRD piklerinin şiddetinin birbirine yaklaştığını yani alaşımdaki martensit ve austenit fazların baskınlığının birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Co ilave oranının ağırlıkça %6 Co'a çıktığında ise, austenit faz pikinin martensit faz pikine göre şiddetinin daha fazla olduğu görülmektedir. Kısaca, NiTiCo alaşımına ağırlıkça % Co ilave oranının artmasıyla alaşımdaki austenit fazın daha baskın hale geldiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak XRD pikleri incelendiğinde Ti₂(NiCo) fazının pik şiddetinin artmasıyla çökelti fazının oluşumunun artması alaşımanın baskın fazının austenit faza dönüşmesini sağladığı düşünülmektedir. SEM'lerin görüntülerine incelendiğinde numunelerdeki Ti₂(NiCo) çökelti fazlarının artması düşüncemizi desteklemektedir. M1, M2 ve M3 alaşımlarına ait XRD grafiklerinde açıkça görüldüğü gibi, pik şiddetindeki değişimler Ni ve Co miktarlarındaki değişime bağlı olarak meydana gelmektedir.

4.5. Vickers Mikrosertlik Ölçümü Sonuçları

Numunelerin ana faz ve ikincil faz için Vickers mikrosertliği ölçümü şekil 4.9'da gösterilmektedir.

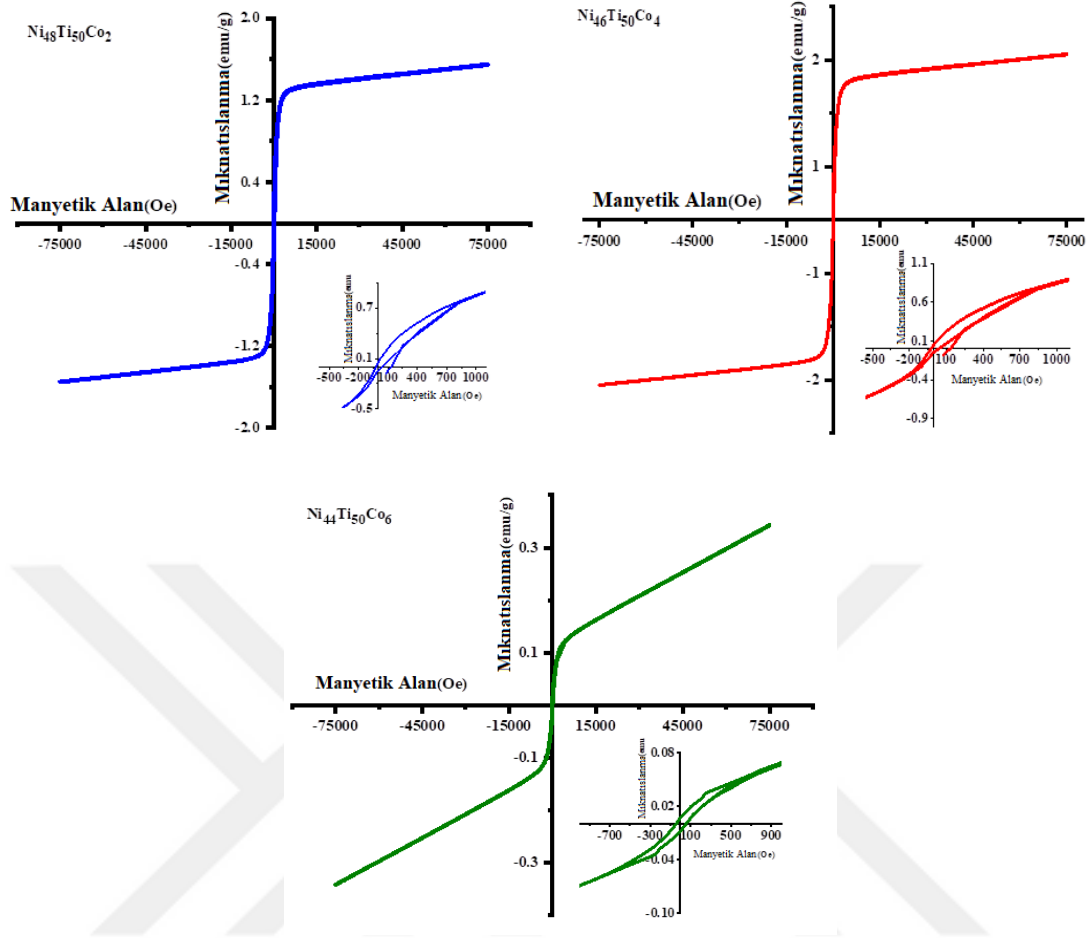


Şekil 4.9. Alaşımların Vickers Sertlik ölçümleri

Şekilde görüldüğü gibi hazırlanan numunelerin ikincil fazı ana fazdan daha sert yapıya sahip olduğu görülmektedir. M1, M2 ve M3 alaşımlarında, M2 alaşımının hem ana fazının hem de ikincil fazının Vickers sertliği M1 ve M3 numunelerin Vickers sertliğinden daha büyük çıkmıştır.

4.6. Manyetik Ölçümleri Sonuçları

Ni₅₀-xTi₅₀Cox (x=2,4,6) Şekil hatırlamalı alaşımların oda sıcaklığında alınan manyetizasyon ölçümleri şekil 4.10.'da verilmiştir. Bu ölçümler, -8T- +8T aralığında uygulanan dış manyetik alana karşı alaşımlarda kütle başına düşen manyetik moment değerlerini verir. NiTiCo alaşımında, Ni ve Co elementi ferromanyetik özellik gösterirken, Ti elementi paramanyetik özellik gösterir. Bu nedenle NiTiCo alaşımında manyetikliğin önemli katkısı Ni ve Co elementlerinden gelir. Nikel elementi yerine artan Kobalt oranına göre değişen manyetizasyon eğrilerinde atomikçe %2 ve %4 oranında Kobalt içeren alaşımlarda saturasyon gözlenirken, %6 oranı da Kobalt içeren alaşımda doyum (saturasyon) görülmemiştir. Bütün alaşımların koerzivite değeri çok küçük olduğu için zayıf manyetik özellik gösterdiği söylenebilir [112].



Şekil 4.10. $\text{Ni}_{50-x}\text{Ti}_{50}\text{Co}_x$ ($x=2,4,6$) şekil hatırlamalı alaşımların manyetizasyon eğrileri

NiTiCo alaşımlarının manyetizasyon eğrilerinden Kobalt oranı arttıkça manyetik moment değerlerinin arttığı görülmüştür. Elementlerin manyetik moment değeri, Bohr manyetonu (μ_B) değerine bağlıdır. NiTiCo alaşım içindeki Nikel ve Kobalt elementlerinin manyetiklik derecesi Bohr manyetonu cinsinden şöyledir: $\text{Ni} \rightarrow 0.6 \mu_B$, $\text{Co} \rightarrow 1.7 \mu_B$ dir, bu nedenle alaşım içinde kobalt elementinin miktarının artmasıyla manyetik moment değerlerinin artması beklenen bir sonuçtur.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada M1, M2 ve M3 numunelerinin ağırlıkça bileşim oranları MATERYAL ve METOD bölümündeki Tablo 3.1 de verilmiştir. Hazırlanan üç alaşıma ait izlenecek yöntemler ve elde edilen sonuçlar BULGULAR bölümünde geniş ve ayrıntılı bir şekilde kaynaklar göz önüne alınarak tartışıldı. Bu çalışmada, mikro yapı, faz dönüşüm sıcaklıkları ve manyetizasyon gibi özellikleri araştırmak için NiTi şekil hafızalı alaşımına farklı oranlarda kobalt eklenmiştir. Alaşımların yapımı için yüksek atmosferik kontrollü ark eritme kullanılmıştır. Hazırlanan alaşımların metalografik içyapıları, malzemelerin kimyasal kompozisyonları, içerdikleri mikroyapı fazları ve bazı termal özellikleri belirlenmiştir. Bu özelliklerin tayini için farklı teknikler uygulanarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu teknikler; malzeme yüzeyini görüntülemek için optik mikroskopu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC), X-ışınları difraktometresi (XRD) olmak üzere deney grupları halinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- DSC alaşım ölçümlerinin sonuçları, alaşımlara kobalt eklenmesindeki artışa bağlı olarak faz dönüşüm sıcaklığının önemli bir düşüş gösterdiğini göstermiştir. Alaşımdaki kobalt miktarının artması ile dönüşüm sıcaklıklarında, emilen ve salınan enerjilerde belirgin bir değişiklik oldu. Gibbs serbest enerjisinin düzenli olarak arttığı, elastik enerjinin ise düzensiz olarak değiştiği görüldü. DSC eğrilerindeki ters faz dönüşümü, önce austenitten R fazına ve sonra R fazından martensit fazına olmak üzere iki aşamalı bir dönüşüme sahip olduğunu gösterdi. Çok küçük miktarlarda kobalt ilaveli NiTiCo şekil hafızalı alaşım, teknolojik alanlarda ve diğer alanlarda isteğe bağlı olarak istenen herhangi bir düşük sıcaklıkta kullanılabilir.
- Diferansiyel tarama kalorimetresi ölçümlerinden A_s , A_f , M_s ve M_f dönüşüm sıcaklıkları belirlenmiştir. Bunun sonucunda austenit ve martensitik dönüşüm sıcaklıklarında meydana gelen faz değişimleri incelenmiştir. Üzerinde çalışılan numunelere ait DSC eğrilerinden elde edilen sonuçların genelde austenit→martensit dönüşümünün ekzotermik, martensit→austenit ters dönüşümünün ise endotermik bir reaksiyonla gerçekleştiği görülmüştür. Isıtma için hesaplanan entalpi enerjisinin soğutma için hesaplanan entalpi enerjisi değerlerinden çok daha büyük olduğu gözlenmiştir. Bu durum ekzotermik ve endotermik tepkimeler gerçekleşirken alınan-verilen ısının enerji üzerindeki etkisi hakkında bilgiler verilmiştir.
- SEM-EDX analizi, NiTi'nin genellikle baskın (matris) faz, Ti_2Ni 'nin ise ikincil faz olduğunu ortaya koymuştur. NiTi fazının maksimum yoğunluğa sahip olduğu XRD sonuçlarıyla da desteklenmiştir. SEM-EDX analizlerinde gözlenmeyen B19 fazının varlığı XRD desenlerinde belirlendi. XRD sonuçları ayrıca uygun alaşımlamanın yapıldığını ve

alaşımların homojen olduğunu göstermiştir. DSC sonuçlarında R fazı tespit edilmiştir; ancak R fazının oluşmasını sağlayan Ti_3Ni_4 XRD ve EDX sonuçlarında tespit edilmemiştir. Kobalt, Ti_3Ni_4 'te içinde çözünebilir ve bu nedenle R fazını etkileyebilir.

- Vickers mikrosertlik testi, Ti_2Ni 'nin (ikincil faz) $NiTi$ fazından (matris) daha sert olduğunu ve Nikel ve Kobaltın birleşmesiyle alaşımın sertliğinin arttığını göstermiştir.
- Alaşımlar düzgün manyetik özellikler göstermiştir. Manyetizasyon eğrileri, artan kobalt miktarı ile manyetik momentin arttığını göstermiştir. Bu da elementlerin manyetik moment değerlerinin Bohr manyeton (μ_B) değerine bağlı olduğu göstermiştir. Bohr manyetonu cinsinden Nikel ve Kobalt elementlerinin manyetizasyon değeri artış şeklindedir ($Ni \rightarrow 0.6 \mu_B$, $Co \rightarrow 1.7 \mu_B$). Bu nedenle alaşımdaki Kobalt miktarının artmasıyla manyetik moment değerlerinin artması beklenen bir sonuçtur.



KAYNAKLAR

- [1] Funakubo, H., (1987). Shape Memory Alloys, J.B. Kennedy, Gordon and Breach Science Publishers, London.
- [2] 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: 1078-113.
- [3] Otsuka, K., Ren, X., (2005). Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys, *Progress in materials science* 50, 511–678.
- [4] Wayman, C.M., Otsuka, K., (1998). Shape Memory Materials, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom,
- [5] Olson, G.B., Owen, W.S., 1992, Martensite, The Materials Information Society, U.S.A, 50-200p.
- [6] Otsuka, K., Ren, X., (1999). Recent developments in the search of shape memory alloy, *Intermetallics*, 7, 511-528.
- [7] Nastasi, M., Mayer, J.W., Thermodynamics and kinetics of phase transformations induced by ion irradiation, *Materials science report*.
- [8] Joseph M., (2016). Powers, Lecture notes on thermodynamics, Department of aerospace and mechanical engineering, University of notre dame notre dame, Indiana 46556-5637.
- [9] Porter, D.A., Easterling, K.E., (1992). Phase transformations in metals and alloys, *Second Edition, Chapman & Hall, T.J. Press (Padstow) Ltd., UK*. 107-117.
- [10] Planck, M., (1917). Treatise on thermodynamics, *Fifth edition, Dover publications, INC, Berlin*, 132,
- [11] John Denker, <https://www.av8n.com/physics/thermo-laws.pdf>.
- [12] Aydın, S., (2014). Metalurji ve malzeme mühendisleri için termodinamik, *İstanbul: Literatür yayınları*, 78.
- [13] Flint, E., M., Melcher, J., Halsenka, H., (1996). The promise of smart materials for small satellites. *Acta Astronautica*, 39, 809-814.
- [14] Eskil, M., (2006). Fe-Mn-Si Alaşımlarının Mekanik ve Termal Etkiler Altında Şekil Hatırlama Özelliklerini İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [15] Saranlı, G., Karabay, Y.Z., Tarhan, E., Bor, G., (1997). Cu-Zn-Al Şekil Bellekli Alaşımların Üretim Karakterizasyonu. 9th International Metallurgy and Materials Congress, 11-15.06.1997, İstanbul, 1293-1298.
- [16] Hodgson, D.E., (2002). “Shape Memory Applications”, Inc., Wu, M.H., Memory Technologies, and Biermann R.J., Harrison Alloys, Inc.
- [17] Batra, A. (1999). Shape Memory Alloys An Introduction, *Seminar Report*, Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Technology, Bombay.
- [18] Duerig T.W., Melton K.N., Stockel D., Wayman C.M., (1990) *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*. Essex, Great Britain, *Butterworth-Heinmann Ltd*.

- [19] Laura Isabel Barbero B., (2004). Cyclic Behavior of Superelastic Nickel-Titanium and Nickel-Titanium-Chromium Shape Memory Alloys, *Master of Science in Civil Engineering*, Georgia Institute of Technology.
- [20] Vaidyanathan, R., (2002). Shape-Memory Alloys, in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Wiley InterScience, *John Wiley and Sons Inc.*, New York.
- [21] Schetky L.M., (1990). Shape Memory Alloy Applications in Space Systems”, in Engineering Aspects of Shape-Memory Alloys, edited by Duerig, T. W., Melton, K. N., Stöckel, D. and Wayman, C. M., *Butterworth-Heinemann*, London. pp.170-178.
- [22] Yang, C.C., Nakae, H., (2000). Foaming characteristics control during production of aluminium alloy foam, *Journal of Alloys and Compounds*, 313, 188-191.
- [23] Buehler W. J. and Wang F. E., (1967). “A Summary of Recent Research on the Nitinol Alloys and their Potential Application in Ocean Engineering”, *Ocean Eng.* 1, pp.105-120.
- [24] Vinu Bala K., (2004). Design, Fabrication And Testing Of A Shape Memory Alloy Based Cryogenic Thermal Conduction Switch, master thesis, University of Central Florida
- [25] Wu, D., Crone, Wendy C. and Perepezko J., (2002). Mechanical Behavior of Nanostructured Melt Spun NiTi Shape Memory Alloy, Society for Experimental Mechanics, 2002 SEM Annual Conference Proceedings, Milwaukee, WI
- [26] Otsuka, K., Ren, X., (2005). Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys, *Progress in Materials Science*, 50, 511–678.
- [27] Shimizu, K., Tadaki, T., (1984). Shape Memory Alloys, Edited By Funakubo, H., Gordon and Breach Science Publishers, pp.1.
- [28] Otsuka, K., Ren, X., (2005). Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys, *Progress in materials science* 50, 511–678.
- [29] Otsuka, K., Saxena, A., Deng, J., and Ren, X. 2011, Mechanism of the shape memory effect in martensitic alloys: an assessment, *Philosophical Magazine*, 91, 36, 4514–4535,
- [30] Otsuka, K., Wayman, C.M., (1998). Shape memory materials, Cambridge university press, 213p.
- [31] Rahimatpure, A., (2012). Smart memory alloys, *Proc. of Int. Conf. on Advances in Mechanical Engineering* 1-3,
- [32] Tautzenberger, P., (1990). Thermal Actuators; A Comparison of Shape Memory Alloys with Thermoelastic Bimetals and Wax Actuators Engineering Aspects of Shape
- [33] Friend, C.M., (1986). The Effect of Applied Stress on the Reversible Strain in CuZnAl Shape Memory Alloys. *Scripta Metall.*, 20, 995-100
- [34] Honna, T., (1986). The Mechanism of the All-Round Shape Memory Effects. Shape Memory Alloys” 86, Proceeding of the International Symposium on Shape Memory Alloys, China Academic Publishers, 83-88.
- [35] Tautzenberger, P., (1989). Properties and Application of Shape Memory Actuators. The Martensitic Transformation in Science and Technology. DGM Informations Gesellschaft, Verlag, Germany, 213-222

- [36] Daniel, J., Fernandes, Rafael V., Peres, Alvaro M., Mendes, and Carlos N., (2011). Elias Understanding the shape-memory alloys used in orthodontics, *International scholarly research network*, 1-6.
- [37] Otsuka, K., Saxena, A., Deng, J., and Ren, X., (2011). Mechanism of the shape memory effect in martensitic alloys: an assessment, *Philosophical Magazine*, 91, 36, 4514–4535.
- [38] Delaey, L., Krishan, R.V., Tas, H., Warlimont, H., (1974). Thermoelasticity, Pseudoelasticity and the Memory Efekt Associated with Martensitic Transformations. Part 1, *Journal of Materials Science*, 9, 1521- 1535.
- [39] Kayalı, N., (1993). Cu-Zn-Al alaşımlarında matensit stabilizasyonu ve yaşlandırma etkileri, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 101.
- [40] Porter, D.A., Easterling, K.E., (1992). Phase transformaitons in metals and alloys, 1 Second Edition, hapman-Hall, T.J. Pres (Padstow) Ltd., UK.
- [41] Aydoğdu, A., (1995). “Şekil hatırlamalı CuAlNi alaşımlarındaki martensitik dönüşümler üzerinde termal yaşlandırma etkileri”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ 5-8.
- [42] Buehler, W.J, Gilfrich. J.V, and Wiley R.C., (1963). Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. *Journal of Applied Physics*, 34, 1475–1477.
- [43] Bhadeshia, H. K. D. H., and Wayman, C. M., (2014). Phase Transformations: Nondiffusive. In: Laughlin, D.E., and Hono, K. (Eds.), *Physical Metallurgy: (Fifth Edition)*. Netherlands: Elsevier.
- [44] Otsuka, K., and Wayman, C.M. (Eds.) (1998). *Shape Memory Materials*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- [45] Otsuka, K., Wayman, CM., (1998). *Shape memory materials*, Cambridge; Cambridge University Press.
- [46] Laughlin, D.E., Jones, N.J., Schwartz, A.J., and Massalski, T.B. (2008). Thermally activated martensite: Its relationship to nonthermally activated (athermal) martensite. In: *Proceedings of the international conference on martensitic transformations*. Santa Fe, NM USA, June 29–July 5.
- [47] Eskil, M., (2000). Şekil hatırlamalı CuZnAl alaşımlarında soğutma hızı etkileri ve çökelti kinetikleri, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 97.
- [48] Eskil, M., (2006). Fe-Mn-Si Alaşımlarının Mekanik ve Termal Etkiler Altında Şekil Hatırlama Özelliklerini İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Fizik Anabilim Dalı,
- [49] Kaya, M., Çakmak, Ö., Saygılı, T.Y. ve Atlı, K.C., (2016). Şekil hafızalı alaşımlarda martensitik faz dönüşümü ve şekil hafıza mekanizması. *Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Teknik-Online Dergi*, 15(3), 157-172.
- [50] Schiller, E.H., (2002). Heat Engine Driven by Shape Memory Alloys: Prototyping and Design, Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for a degree of Master of Science in Mechanical Engineering, 72.

- [51] Fugazza, D., (2003). Shape memory alloy devices in earthquake engineering, mechanical properties, constitutive modeling and numerical simulations, Master Thesis, Rose School, European School Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, 141p.
- [52] Sadrnezhad, S. K., Arami, H., Keivan, H., and Khalifezadeh, R., (2006). Powder metallurgical fabrication and characterization of nanostructured porous NiTi shape-memory alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 21: 727–735.
- [53] Ortin, J., Planes, A., (1989). Thermodynamics of Thermoelastic Martensitic Transformations, *Acta Metal.*, 37, 5, 1433-1441.
- [54] Işık, A., (2007). FePd Ferromagnetik Şekil Hatırlamalı Alaşımının Kristalografisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı.
- [55] Bloor, D., Brook, R.J., Flemings, M.C., Mahajan, S. and Cahn, R.W., (1994). *The Encyclopedia of Advanced Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 2439-2441.
- [56] Durlu, T.N., (2001). *Journal of Materials Science* 36: 5665
- [57] Breedis, J.F., Kaufman, L., (1971). *Metallurgical Transaction* 2: 2359
- [58] T. Kakeshita, K. Kuriowa, K. Shimizu, T. Ikeda, A. Yamagishi and M. Date, *Mater.*, (1993). Effect of Magnetic Fields on Athermal and Isothermal Martensitic Transformations in Fe–Ni–Mn Alloys *JIM*, 34, 415.
- [59] C., M., (1964). Wayman *Introduction to the Crystallography of Martensitic Transformations*, The Macmillan Company, New York.
- [60] Nishiyama, Z., (1978). *Martensit Transformations*, Academic Press, London.
- [61] Borgenstam, A., (1999). Some remarks on the nucleation and growth of martensite *Master. Sci. Eng.*, M273, 425-429
- [62] S. Kajiwar, (1992). Mechanism of Isothermal Martensitic Transformation *Master. Trans. JIM*, 33, 1027
- [63] Aygahoğlu, A., (1996). Şekil Bellekli Alaşımlar ve Uygulama Alanları, Yüksek Lisans Tezi Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [64] Tatar C., Acar R., Qader İ. N., (2020). Investigation of thermodynamic and microstructural characteristics of NiTiCu shape memory alloys produced by arc-melting method, *European Physical Journal Plus*, 135, 1-11
- [65] Prado, M.O., Decorte, P.M., Lovey, F., (1995). Martensitic Transformation in Cu-Mn-Al Alloys. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 33, 6, 877-883
- [66] Tatar C., Yildirim Z., (2017). Phase transformation kinetics and microstructure of NiTi shape memory alloy: effect of hydrostatic pressure, *Bulletin of Materials Science*, 40(4), 799-803
- [67] Sivakumar, S., Kumar, K., Rao, L., Rao, M., (2005). “A Review of the Constitutive Models for Shape Memory Alloys”, *International Conference on Smart Materials Structures and Systems*, Bangalore, India
- [68] Bogue, R., (2009). Shape-memory materials: a review of technology and applications. *Assembly Automation*, 29(3), 214-219.
- [69] Hodgson, D.E., (2002). “Shape Memory Applications”, Inc., Wu, M.H., Memory Technologies, and Biermann R.J., Harrison Alloys, Inc.

- [70] Otsuka, K., Kakeshita, T., (2002). "Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments", MRS Bulletin
- [71] Melton, K. N., (1999). General applications of shape memory alloys and smart materials. In K. Otsuka & C. M. Wayman (Eds.), *Shape memory materials* (pp. 220-239): Cambridge University Press
- [72] Cleveland, M. A., (2008). US Patent 7367738B2., Carpenter, B., & Lyons, J. EO-1 technology validation report: Lightweight flexible solar array experiment. *NASA/GSFC. Last updated: August, 8.*
- [73] Kudva, J. N., (2004). Overview of the DARPA smart wing project. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15(4), 261-267.
- [74] Pitt, D., Dunne, J., White, E., & Garcia, E., (2001). *SAMPSON smart inlet SMA powered adaptive lip design and static test*. Paper presented at the 42nd AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Seattle, WA, USA.
- [75] Calkins, F. T., & Mabe, J. H., (2010). Shape memory alloy based morphing aerostructures. *Journal of Mechanical Design*, 132, 111012.
- [76] Mohd Jani, J., (2016). Design optimisation of shape memory alloy linear actuator applications, Doctor of Philosophy (PhD), Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, RMIT University.
- [77] Oehler, S. D., Hartl, D. J., Lopez, R., Malak, R. J., & Lagoudas, D. C., (2012). Design optimization and uncertainty analysis of SMA morphing structures. *Smart Materials and Structures*, 21(9), 094016.
- [78] <https://www.nasa.gov/specials/wheels/>, 17/06/2019
- [79] <https://technology.grc.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-99>, 17/06/2019
- [80] <https://www.nasa.gov/specials/wheels/>, 17/06/2019
- [81] Caldwell, D. G., & Taylor, P. M., (1988). *Artificial muscles as robotic actuators*. Paper presented at the IFAC Robot control conference (Syroc 88), Karlsruhe, Germany.
- [82] Fujita, H., (1989). *Studies of micro actuators in Japan*. Paper presented at the IEEE International Conference on Robotic Automation, Institute of Industrial Science, Tokyo University
- [83] Honma, D., Miwa, Y., & Iguchi., (1985). Micro Robots and Micro Mechanisms Using Shape Memory Alloy to Robotic Actuators. *Robotic Systems*, 2(1), 3-25.
- [84] Kuribayashi, K., (1986). A New Actuator of a Joint Mechanism Using TiNi Alloy Wire. *The International Journal of Robotics Research*, 4, 47-58.
- [85] Furuya, Y., & Shimada, H., (1991). Shape memory actuators for robotic applications. *Materials & Design*, 12(1), 21-28.
- [86] Sreekumar, M., Nagarajan, T., Singaperumal, M., Zoppi, M., & Molfino, R., (2007). Critical review of current trends in shape memory alloy actuators for intelligent robots. *Industrial Robot: An International Journal*, 34(4), 285-294.
- [87] Festo., (2013). BionicOpter Inspired by dragonfly flight. Retrieved from http://www.festo.com/cms/_corp/13165.htm

- [88] Andreasen, G. F., & Hilleman, T. B., (1971). An evaluation of 55 cobalt substituted Nitinol wire for use in orthodontics. *The Journal of the American Dental Association*, 82(6), 1373-1375.
- [89] Kauffman, G., & Mayo, I., (1997). The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications. *The Chemical Educator*, 2(2), 1-21.
- [90] Song, C., (2010). History and current situation of shape memory alloys devices for minimally invasive surgery. *Open Medical Devices Journal*, 2(1), 24-31.
- [91] Morgan, N. B., (2004). Medical shape memory alloy applications- the market and its products. *Materials Science and Engineering: A*, 378(1-2), 16-23
- [92] Machado, L. G., & Savi, M. A., (2003). Medical applications of shape memory alloys. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 36, 683-691
- [93] Oh, S.-R., Chang, S.-W., Lee, Y., Gu, Y., Son, W.-J., Lee, W., Lim, S.M., (2010). A comparison of nickel-titanium rotary instruments manufactured using different methods and cross-sectional areas: ability to resist cyclic fatigue. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 109(4), 622-628.
- [94] Dahlgren, J. M. & Gelbart, D., (2009). US Patent 2009/0076597M1.
- [95] Pfeifer, R. Müller, C. W., Hurschler, C., Kaierle, S., Wesling, V., & Haferkamp, H., (2013). Adaptable Orthopedic Shape Memory Implants. *Procedia CIRP*, 5(0), 253-258
- [96] Zider, R. B. & Krumme, J. F., (1988). US Patents 4772112
- [97] Lim, G., Park, K., Sugihara, M., Minami, K., & Esashi, M., (1996). Future of active catheters. *Sensors and Actuators A: Physical*, 56(1-2), 113-121.
- [98] Machado, L., Savi, M., (2003). Medical applications of shape memory alloys, *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 683-691s
- [99] Yamada, A., Shiraishi, Y., Sugai, T. K., Miura, H., Shiga, T., Hashem, M. O., Homma, D., (2013). Preliminary Design of the Mechanical Circulation Assist Device for Fontan Circulation using Shape Memory Alloy Fibers. In M. Long (Ed.), *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering May 26-31, Beijing, China* (Vol. 39, pp. 119-121): Springer Berlin Heidelberg.
- [100] Shiraishi, Y., Yambe, T., Saijo, Y., Sato, F., Tanaka, A., Yoshizawa, M., Homma, D., (2007). *Morphological Approach for the Functional Improvement of an Artificial Myocardial Assist Device using Shape Memory Alloy Fibres*. Paper presented at the 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society,
- [101] Butera, F., Coda, A., Vergani, G., (2007). Shape memory actuators for automotive applications. *Nanotec IT newsletter*, 12-16. Retrieved from nanotec IT
- [102] Stoeckel, D., (1990). Shape memory actuators for automotive applications. *Materials & Design*, 11(6), 302-307.
- [103] Stoeckel, D., Tinschert, F., (1991). *Temperature Compensation with Thermovisible Rate Springs in Automatic Transmissions* (910805). Retrieved from.
- [104] Butera, F., (2008). Shape memory actuators for automotive applications. *Advanced Materials and Processes*, 166(3), 37.

- [105] Johnson, R. W., Evans, J. L., Jacobsen, P., Thompson, J. R., Christopher, M., (2004). The changing automotive environment: high-temperature electronics. *Electronics Packaging Manufacturing, IEEE Transactions on*, 27(3), 164-176.
- [106] Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A., (2014). Shape memory alloys in automotive applications. *Applied Mechanics and Materials*, 663, 248-253.
- [107] N.G. Jones, D., Dye., (2003). Influence of applied stress on the transformation behaviour and martensite evolution of a TiNiCu shape memory alloy. *Intermetallics* 32 239 249.
- [108] Cullity B. D., (1966). “X-ışınları Difraksiyonu”, Çeviri Editörü Ali Sümer, *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası*, Gümüşsuyu, 83-85.
- [109] Chu, C.L., Chung, C.Y., Lin, P.H., Wang, S.D., (2004). Fabrication of porous NiTi shape memory alloy for hard tissue implants by combustion synthesis, *Materials Science and Engineering, A* 366, 114-119.
- [110] Mehrabi, K., Bruncko, M., Kneissl, A.C., (2012). Microstructure, mechanical and functional properties of NiTi-based shape memory ribbons, *Journal of Alloys and Compounds* 526, 45– 52
- [111] Priyadarshini, B.G., Aich, S., Chakraborty, M., (2011). *Metal. Mater. Trans. A* 42, 3248–3290.
- [112] Tatar, C., Kurt, M., (2020), Phase transformation temperatures and physical characteristics of NiTiCo shape memory alloys produced by arc melting method, *The European Physical Journal Plus*, 135(9), 1-12
- [113] Houand, Li., Grumman, D.S., (1995). Transformational Super elasticity in Sputtered Titanium-Nickel Thin Films, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 3, 989-995.
- [114] Valeanu M., Lucaci, M., Crisan, A.D., Sofronie, M., Leonat, L., Kuncser, V., (2011). Martensitic transformation of Ti₅₀Ni₃₀Cu₂₀ alloy prepared by powder metallurgy *Journal of Alloys and Compounds* 509 4495–4498.

ÖZGEÇMİŞ

Murat KURT

KİŞİSEL BİLGİLER

Category	Value
Category 1	Value 1
Category 2	Value 2
Category 3	Value 3
Category 4	Value 4
Category 5	Value 5
Category 6	Value 6
Category 7	Value 7

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Tatar, C., Kurt, M., (2020). Phase transformation temperatures and physical characteristics of NiTiCo shape memory alloys produced by arc melting method, The European Physical Journal Plus, 135(9), 1-12

Projeler:

1. Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAB) tarafından desteklenen **FF.18.32** numaralı Yüksek Lisans tezi projesi, 2018