

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**NİTİCU ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLARIN MİKROYAPI VE
TERMODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Rauf ACAR

Yüksek Lisans Tezi

FİZİK ANABİLİM DALI

Genel Fizik Anabilim Dalı

TEMMUZ 2020

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**NİTiCu ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLARIN MİKROYAPI VE
TERMODİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Tez Yazarı

Rauf ACAR

Danışman

Prof. Dr. Cengiz TATAR

TEMMUZ 2020

ELAZIĞ

T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: NiTiCu Şekil Hatırlamalı Alaşımların Mikroyapı ve Termodinamik Özelliklerinin İncelenmesi

Yazarı: Rauf ACAR

İlk Teslim Tarihi: 16/07/2020

Savunma Tarihi: 10/08/2020

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.

İmza

Danışman: Prof. Dr. Cengiz TATAR

Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi

Onayladım

Başkan: Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN

Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi

Onayladım

Üye: Doç. Dr. F. Ahmet ÇELİK

Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi

Onayladım

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

İmza

Prof. Dr. Soner ÖZGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “NiTiCu Şekil Hatırlamalı Alaşımların Mikroyapı Ve Termodinamik 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.

10/07/2020

Rauf ACAR



ÖNSÖZ

Artan teknoloji ile beraber malzemelerin üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve özelliklerinin belirgin bir şekilde belirlenmesi; malzemenin birçok değişik kullanım alanlarının doğmasında en temel noktalardan birini oluşturmaktadır. Artan malzemelerin özelliklerini belirlemek için yapılacak araştırma-geliştirme (AR-GE) çalışmalarında birikim ve tecrübeyi de beraberinde getirerek daha işlevsel, daha ekonomik ve daha güvenli sistemlerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Çağımızın çok ileri teknoloji malzemeleri sınıfında bulunan şekil hatırlamalı alaşımların, her geçen gün yeni bir işlevi ve kullanımı ortaya çıkmaktadır. Nikel-titanyum-bakır üçlüsünün şekil hatırlamalı alaşımlar konusunda yapılan bu çalışmanın, bundan sonra bu yolda yapılacak çalışmalara her zaman ışık tutacağını umut ediyorum.

Ülkem ve bilim adına yararlı çalışmalar yapmak için başladığım bu tez “**NiTiCu şekil hatırlamalı alaşımların mikroyapı ve termodinamik özelliklerinin incelenmesi**” çalışmasında beni yüreklendiren, çalışmamın her aşamasında yardımını ve engin bilgisini esirgemeyen, sistematik çalışma prensibiyle, yapıcı eleştirileri ve önerileriyle misyonu ve vizyonu çerçevesinde bilimsel bir dünya görüşüne sahip, akla ve bilime önem veren çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Cengiz TATAR’ a sonsuz teşekkür ve şükranlarımı en içten dileklerle sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında laboratuvarında gerekli imkân ve kolaylıkları sağlayan Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN hocama teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, sevgili eşim Ferza ve oğlum Emir Asaf’a göstermiş oldukları sabır ve manevi desteklerinden dolayı çok teşekkür ediyorum.

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **FF.19.01** nolu proje olarak desteklenmiştir.

Rauf ACAR

ELAZIĞ, 2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	İV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	Vii
ABSTRACT.....	Viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	İx
TABLolar LİSTESİ	Xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	Xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR.....	4
2.1. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Mikroyapısı	8
2.2. Şekil Hatırlama Etkisi	8
2.2.1. Şekil Hatırlama Etkisi ve Superelastiklik	10
2.2.2. Tek-Yönlü Şekil hatırlama	12
2.2.3. Çift-Yönlü Şekil Hatırlama.....	14
2.3. Martensitik Dönüşüm.....	15
2.3.1. Termoelastik ve Termoelastik olmayan Martensitik Dönüşüm	20
2.3.2. Atermal Martensitik Dönüşüm	21
2.3.3. İzotermal Martensitik Dönüşüm	22
2.4. Martensitik Dönüşümün Termodinamiği	23
2.5. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kullanım Alanları	25
2.5.1. Havacılık ve Uzay Uygulamaları.....	28
2.5.2. Robotik Uygulamaları	30
2.5.3. Biyomedikal Uygulamaları.....	32
2.5.4. Otomotiv Uygulamaları	35
3. MATERYAL VE METOD	37
3.1. Alaşımların Karakterizasyonu.....	37
3.1.1. Numune hazırlama İşlemleri.....	37
3.1.2. Malzemenin Zımparalanması, Parlatılması ve Dağlanması.....	40
3.1.3. Optik Mikroskop.....	41
3.1.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX İncelemesi	42
3.1.5. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)	43
3.1.6. X-ışınları Difraktometresi (XRD).....	44
3.1.7. Vickers Mikrosertlik Ölçümü	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
4.1. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Ölçüm Sonuçları.....	46
4.1.1. Alaşımların Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Ölçüm Sonuçları	46
4.2. Optik Mikroskop Ölçüm Sonuçları	49
4.2.1. Alaşımların Optik Mikroskop Ölçüm Sonuçları.....	49
4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX Ölçüm Sonuçları	53

4.3.1. Alaşımların SEM - EDX lm Sonuçları.....	54
4.4. Alaşımların X-ışını lm Sonuçları.....	59
4.5. Vickers Mikrosertlik lm Sonuçları.....	61
5. SONUÇLAR.....	62
KAYNAKLAR.....	64
ZGEMİş	



ÖZET

NiTiCu Şekil Hatırlamalı Alaşımların Mikroyapı ve Termodinamik Özelliklerinin İncelenmesi

Rauf ACAR

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Ağustos 2020, Sayfa: [XII] + 70

Bu tez çalışmasında $Ni_{50-x}Ti_{50}Cu_x$ ($x = \%wt. 14, 17, 20$) şekil hatırlamalı alaşımlar ark ergitme yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen $A1(Ni_{36}Ti_{50}Cu_{14})$, $A2(Ni_{33}Ti_{50}Cu_{17})$ ve $A3(Ni_{30}Ti_{50}Cu_{20})$ 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 A1, A2 ve A3 alaşımlarının faz dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değerleri belirlenmiştir. Yapılan DSC ölçümlerinde alaşımların hepsinde martensit ve austenit faz dönüşümleri belirgin ve keskin pikler şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, alaşımların mikroyapı ve fiziksel karakteristik özelliklerini belirleyebilmek için çalışmanın amacına yönelik olarak, numunelerin hepsi belirli standartlara getirildikten sonra alaşımların yüzeylerinde meydana gelen yapıları belirlemede optik mikroskopu kullanılmıştır. Numunelerin optik mikrograflarına bakıldığında, numunelerin yüzeyinde yoğun olmamakla birlikte bir miktar çökelti fazı mevcut olup taneler ve tane sınırları belirgin bir şekilde görülmektedir. Daha detaylı sonuçlar elde edilmek için ise, optik mikroskoptan daha yüksek çözünürlüğe ve odak derinliğine sahip olan taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ayrıca, EDX ölçümleri yapılarak da alaşımlardaki matrix fazlar belirlenmiştir. A1, A2 ve A3 şekil hatırlamalı alaşımlarda genellikle B2 (NiTi) fazı ile Ti_2Ni fazı görülmüştür.

Alaşımların kristal yapıları ve faz tayinlerinin yapılabilmesi için X-ışınları difraktometresi (XRD) ölçümleri yapılmıştır. Alaşımların XRD ölçüm sonuçlarına bakıldığında, A1 alaşımında baskın faz martensit faz iken A2 alaşımında martensit ve austenit faz eşit oranlarda A3 alaşımında ise austenit fazın baskın faz olduğu gözlemlenmiştir. Üretilen alaşımların sertlik değerlerini belirlemek amacıyla alaşımlardan alınan numunelerin Vickers mikro sertlik ölçüm değerleri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Şekil hatırlamalı alaşımlar, Faz dönüşüm sıcaklıkları, Mikroyapı, Martensit ve Austenit faz.

ABSTRACT

Investigate Of Microstructure And Thermodynamically Properties Of NiTiCu Shape Memory Alloys

Rauf ACAR

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

August 2020, Pages: [XII] + 70

In this thesis, $\text{Ni}_{50-x}\text{Ti}_{50}\text{Cu}_x$ ($x = \text{\%wt. 14, 17, 20}$) shape memory alloys were produced with arc melting method. The parts of the produced A1($\text{Ni}_{36}\text{Ti}_{50}\text{Cu}_{14}$), A2($\text{Ni}_{33}\text{Ti}_{50}\text{Cu}_{17}$) and A3($\text{Ni}_{30}\text{Ti}_{50}\text{Cu}_{20}$) shape memory alloys were cut in suitable sizes and examined by making the necessary measurements and analyses. Differential scanning calorimeter (DSC) measurements were made to determine the thermodynamic characteristics of the alloys. As a result of DSC measurements, phase transformation temperatures and enthalpy values of A1, A2 and A3 alloys were determined. It was observed in DSC measurements that martensite and austenite phase transformations were clear and in sharp peaks in all alloys. Besides, in order to determine the microstructure and physical characteristics of the alloys in accordance with the purpose of the study, an optical microscope was used to determine the structures that occurred on the surfaces of the alloys after all the samples were brought to certain standards. Taking the optical micrographs of the samples into consideration, there was some precipitate phase on the surface of the samples, although it was not so dense, and the grain and grain boundaries were clearly visible. In order to obtain results with more details, scanning electron microscope (SEM) with higher resolution and focal depth than an optical microscope was used. B2 (NiTi) phase and Ti_2Ni phase were generally observed in A1, A2 and A3 shape memory alloys.

X-ray diffractometer (XRD) measurements were made to determine crystal structures and phases of the alloys. It was observed from the XRD measurement results of the alloys that the dominant phase in A1 alloy was martensite phase while martensite and austenite phases were equal in A2 alloy and austenite phase was the dominant phase in A3 alloy. In order to determine the hardness values of the produced alloys, Vickers micro hardness measurement values of the samples taken from the alloys were obtained and the results were compared.

Keywords: Shape Memory Alloys, Phase Transformation Temperatures, Microstructure, Martensite and Austenite phase.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Şekil hatırlama mekanizmasının şematik gösterimi	4
Şekil 2.2. Şekil hatırlama olayının mekanizması	5
Şekil 2.3. SMA'nın üç boyutlu mikro yapısı: (a) austenit faz ve (b) ikizlenmiş martensit faz.	8
Şekil 2.4 Şekil hatırlama etkisinin şematik gösterimi	9
Şekil 2.5.Şekil hatırlama etkisi sırasında dönüşüm sıcaklıkları	10
Şekil 2.6. Şekil hatırlama etkisi ve süperelastikliğin meydana geldiği gerilme ve sıcaklık bölgesi	11
Şekil 2.7. Şekil hatırlamalı alaşımların hal durumu	12
Şekil 2.8. Tek→yönlü şekil hatırlama olayının gösterimi	13
Şekil 2.9. Çift↔yönlü şekil hatırlama durumunun gösterimi	14
Şekil 2.10. Austenit↔martensit yapı arasındaki sıcaklık etkenine bağlı dönüşüm (a) austenit→ martensite dönüşümü (b) martensit→austenite dönüşümü	16
Şekil 2.11. Austenitten martensite şematik olarak dönüşüm mekanizmaları	17
Şekil 2.12. (a) Austenit (kübik geometri), (b) Martensit yapı (eşkenar geometri, monoklinik)	19
Şekil 2.13. Martensit dönüşüm esnasında, martensite etki eden çizgi bozulmalarının şekli. (a) Yüzey çıkıntısı, (b) Çizgi bozulmasının kırılması	20
Şekil 2.14. Difüzyonsuz olarak gerçekleşen Martensitik dönüşümün değişimi	20
Şekil 2.15. Atermal dönüşümünde, dönüşüm yüzdesinin zamanla değişim gösterilmesi	22
Şekil 2.16. İzotermal dönüşümünde, dönüşüm yüzdesinin zamanla değişim gösterilmesi	23
Şekil 2.17. Austenit ve martensit fazların kimyasal serbest enerjisinin sıcaklıkla değişimi	24
Şekil 2.18. Boeing'in SMA yapılı değişken geometri çevronu (VGC)	28
Şekil 2.19. NASA tarafından geliştirilen SMA yapılı esnek lastik	29
Şekil 2.20. Festo BiyonikOpter - Yusufçuk uçuşu ilham alınarak üretilmiş	30
Şekil 2.21. NiTi esaslı alaşımlarının hareket yeteneklerinin kullanıldığı mikro yapıdaki robot	31
Şekil 2.22. Yapısında ŞHA'ların olduğu mikro robotun hareketleri	32
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	33
Şekil 2.24. (A) Atriyal Septal kapama cihazı ile (B) Atriyal Septal kapama cihazının kalbin içindeki yerleşimi gösterilmiştir	34
Şekil 2.25. Şekil hatırlamalı alaşım lifi olan yapay kalp destek cihazları	35
Şekil 2.26. Otomotiv alanındaki mevcut potansiyel ŞHA uygulamaları	36

Otomotiv yapımında kullanılan parça yerlerinin gösterimi;	36
Şekil 3.1. Bu çalışmada kullanılan Graseby Specac marka presleme cihazı	38
Şekil 3.2. Bu çalışmada kullanılan Protherm CWF-1200 marka kül fırını.....	39
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 şekilleri	40
Şekil 3.4. Bu çalışmada kullanılan Polisher MPS200 marka zımparalama cihazı.....	41
Şekil 3.5. Metalografik gözlemlerin yapıldığı Optik Nikon MA 200 Optik Mikrograf cihazı	42
Şekil 3.6. Bu çalışmada kullanılan SEM (LEO, EVO 40, England Cambridge) cihazı	43
Şekil 3.7. Bu çalışmada kullanılan Perkin Elmer Sapphire (DSC) ölçüm cihazı	44
Şekil 3.8. Bu çalışmada kullanılan Bruker Discover D8 (XRD) analiz sistemi	45
Şekil 4.1. A1, A2 ve A3 alaşımlarına ait DSC grafiği.....	48
Şekil 4.2. A1 Numunesinin farklı bölgelerinden 500x büyütmeyle çekilen yüzey mikrografı	50
Şekil 4.3. A2 Numunesinin farklı bölgelerinden 500x büyütmeyle çekilen yüzey mikrografı	50
Şekil 4.4. A3 Numunesinin farklı bölgelerinden 500x büyütmeyle çekilen yüzey mikrografı	51
Şekil 4.5. A1 Alaşımına ait 50x büyütmeyle yüzey mikrografı	52
Şekil 4.6. A2 Alaşımına ait 50x büyütmeyle yüzey mikrografı	52
Şekil 4.7. A3 Alaşımına ait 50x büyütmeyle yüzey mikrografı	53
Şekil 4.8. A1 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüleri	55
Şekil 4.9. A2 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüleri	56
Şekil 4.10. A3 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüler	58
Şekil 4.11. A1, A2 ve A3 alaşımlarının X-ışını desenleri	60
Şekil 4.12. Alaşımların Vickers Sertlik Ölçümleri	61

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Şekil hatırlama özelliğini gösteren bazı alaşımların yapıları ve düzen durumları tabloda gösterilmiştir	6
Tablo 2.2. Birtakım şekil hatırlamalı alaşımların bileşim oranı, martensit sıcaklığa dönüşme aralığı ve histerezisleri gösterilmiştir	7
Tablo 2.3. Martensitik dönüşüm türlerinin tipik özellikleri	18
Tablo 2.4. Potansiyel ŞHA uygulamaları	26
Tablo 2.5. Nitinol SMA'ların Özellikleri	27
Tablo 3.1 Ark ergitme yöntemiyle elde edilen şekil hatırlamalı alaşımların ağırlıkça oranlarda verilen kompozisyonları.	39
Tablo.4.1. A1, A2 ve A3 Alaşım gruplarının dönüşüm sıcaklık değerlerinin gösterimi	49

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)
M	: Martensit fazı
A	: Austenit fazı
Ni	: Nikel
Ti	: Titanyum
Cu	: Bakır
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

Dünyada teknolojinin gelişimi ve çok hızlı bir şekilde ilerlemesi insanoğlunun da günlük hayatında gereksinimlerin çeşitlendiğini ve bu yönden yeni arayışlara yöneldiği bilinmektedir. Bu yüzden yeni ürünler ve üstün özellikli malzemeler, yani akıllı malzemelerin üretilmesi, geliştirilmesi ve pazarlanması hem akademik hem de endüstriyel alanlarda giderek büyük önem kazanmaktadır. Bu önem sadece malzeme “üretimi” ile sınırlı kalmamalı, malzemeye çeşitli yenilik ve görevler eklenmeli ve uygulama alanını genişleterek fonksiyonelliğini artırabilmelidir. Bu alandaki yeniliklerle birlikte malzemelerin işlevselliği ile mekaniksel elementler geliştirilmiş ve endüstriyel otomasyon sistemlerinde kullanılabilir hale getirilmiştir. Şekil hatırlamalı alaşımlar da (SHA), bu durum sonucu ortaya çıkan yeni bir malzeme sınıfıdır ve gün geçtikçe ilgi alanı artmaktadır [1].

SHA’ların ana karakteristiği, kritik bir sıcaklığın (dönüşüm sıcaklığı) alt ve üst değerlerinde farklı iki şekil veya kristal yapıya sahip olabilmektedir. Alaşım bu kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda martensit yapıda, üzerindeki sıcaklıklarda ise austenit yapıdadır. Bu özellik mikro ve makro yapılar arasındaki faz dönüşümleriyle ilgilidir. Bu faz dönüşümü; metal ve alaşımlarının farklı özellikler sergilemesinde ana etken olup fiziksel metalurjide büyük öneme sahiptir. Difüzyonsuz bir şekilde gerçekleşen bu faz dönüşüm olayı ilk olarak Alman fizikçi metalurjist Adolph Martens tarafından demir esaslı alaşımlarda gözlemlendiği için martensitik faz dönüşümü diye de adlandırılmaktadır. Katı hal fiziğinde önemli bir yere sahip olan martensitik faz dönüşümü difüzyonsuz bir katı hal dönüşümdür. Sonraki birçok araştırma ve çalışma sonucunda martensitik dönüşüm üzerine büyük gelişmeler kat edilmiş ve demir esaslı alaşımların yanı sıra geniş çapta soy metaller, özellikle de bakır esaslı alaşımlar ve metalik özellik taşımayan bazı malzemelerde de gözlenmiştir [2, 3].

SHA günümüzde ve gelecekte akıllı malzeme sınıfında yerini almaya devam edecektir. Bu denli önemli olmalarının temel özellikleri, yüksek deformasyondan sonra dışarıdan herhangi bir müdahale olmaksızın, oluşan deformasyonu geri kazanabilmesi (süperelastisite) ve yine yüksek deformasyon oranlarından sonra malzemenin ısıtılarak eski halini alabilmesi olarak sayılabilir [4]. Numune tekrar soğutulduğunda deforme edilmeden önceki şeklini almıyorsa, bu olaya tek yönlü şekil hatırlama olayı denir. Tek yönlü şekil hatırlama olayında, çift yönlü şekil hatırlama olayı alaşımlar olayına nazaran eski şekli hatırlama kapasitesi daha yüksektir [5]. Bazı alaşımlar ise tekrarlanan ısıtma soğutma çevrimleri sonrası tekrar şekil değişimine uğrarlar. Bu olaya da çift yönlü şekil hatırlama olayı denir. Şekil hatırlamalı malzemeler mekanik, ısı, elektriksel ve kimyasal işlemler ve çevresel şartlar altında alışılmamış termomekanik ve termoelektriksel davranış sergilerler [6].

Şekil hatırlamalı alaşımlarda süperelastiklik davranışı gerilmenin neden olduğu bir martensitik dönüşümle meydana gelir. Şekil hatırlamalı alaşım dönüşümü 1938 yılında Cu-Zn alaşımında da gözlenmiş fakat üzerinde durulmadığı için ilerleyen yıllara kadar ortaya atılmamıştır. Yaklaşık on yıl sonra Kurdjumov ve Khandros (1949) tarafından geniş çapta yapılan çalışmalarla duyurulmuştur. Nitekim ŞHA'nın teknolojik alanda kullanımı ile ilgili İlk ciddi çalışmalar 1960'lı yıllarda ortaya çıkmaya başlamıştır. 1962 yılında Buehler ve arkadaşları Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) Deniz Savaş Araçları Laboratuvarında eş atomlu NiTi alaşımının şekil hatırlama etkisini keşfetmişlerdir. Bu alaşım; bileşenleri olan NiTi ve çalıştıkları laboratuvarın isminin baş harfleri NOL (Naval Ordnance Laboratuvar) kullanılarak NİTİNOL adında ticarileştirmiştir [2]. O zamandan beri bu ŞHA'lara ilişkin anlayış, ŞHA'ların anlaşılmasındaki önemli gelişmelerle birlikte büyük ölçüde artmıştır. Daha sonra NiTi alaşımlarının çeşitli malzemelerde kullanımı önemli kılan etkenin, yüksek düzeyde korozyon direnci, süper esneklik, iyi süneklik ve enerjiyi çok iyi emme yeteneğine sahip farklı mekanik özellikler nedeniyle birçok endüstriyel ve biyomedikal uygulamalarda kullanılmıştır.

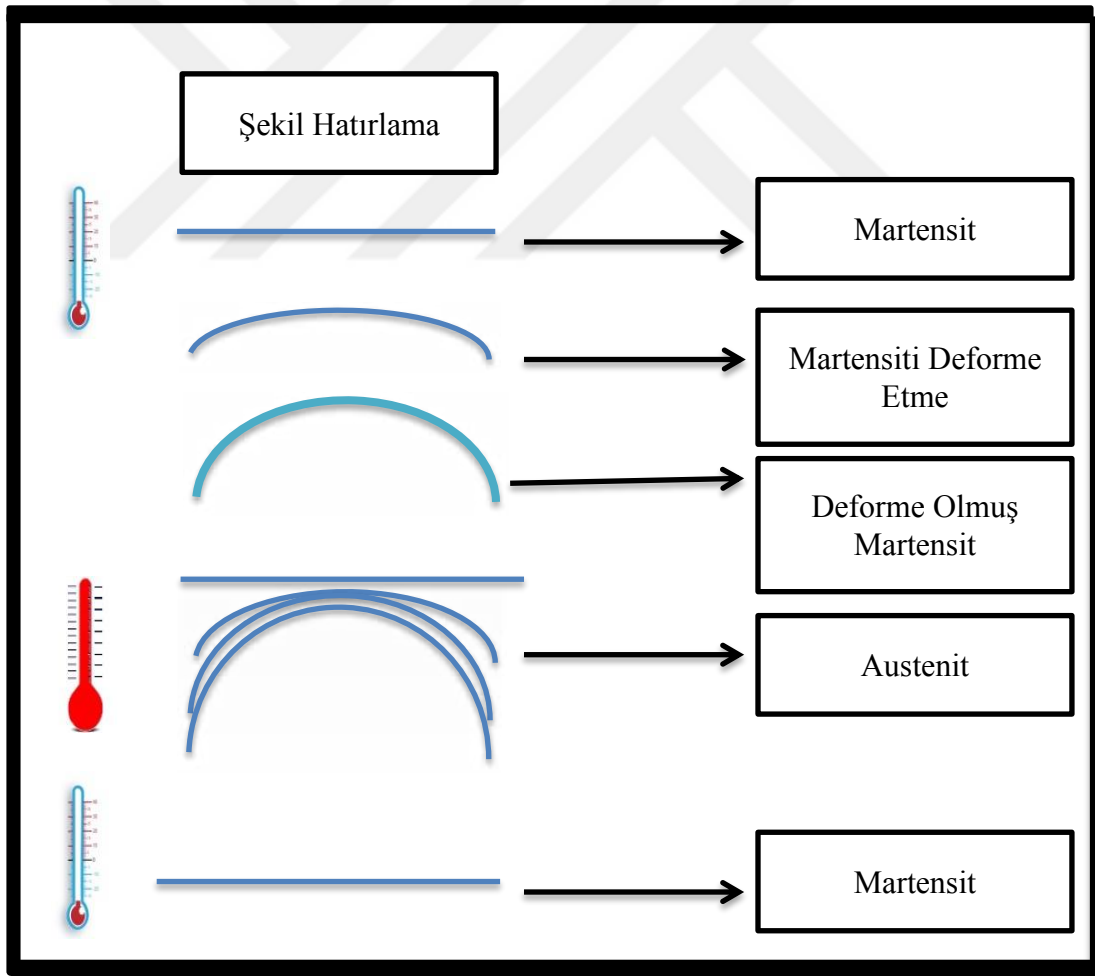
ŞHA'ların içerisinde birbirinden farklı iki faz mevcut olup bunlar, Austenit-martensit fazlardır. Düşük sıcaklıklarda martensit faz dengeli iken, yüksek sıcaklıklarda ise austenit fazın dengeli olması malzeme sıcaklık-ısı ekseninde önemli bir yer edinmiştir. Austenit $\leftrightarrow$ martensit faz dönüşümü malzemelerin yapısında meydana gelen ısı $\leftrightarrow$ enerji alışverişine dayanmaktadır. Termodinamik biliminin esaslarını oluşturan en önemli kavramlarının başında ısı ve enerji geldiğinden dolayı, termodinamiğin oluşum mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Termodinamik terimi Latince kökenli olup thermos (ısı) ve dynamic (güç, enerji) kelimelerinden türetilmiştir. 1800'lü yılların başlarından itibaren hızla gelişen dokumacılık endüstrisi ile birlikte artan güç insanları belirli bir ihtiyaca götürmüş, arz talep dengesini hızlı kurmak ve geliştirmek için insan ve hayvan gücünün yerine bu ihtiyacı karşılayacak buhar makinelerinin keşfedilmesine neden olmuştur. Nitekim sonraki yüzyılları derinden sarsacak ve insan gücünün giderek azaltılacağı keşiflerin başında İngiltere'de başlamış ve ilk buhar makineleri 1697 ve 1712 yıllarında ünlü İngiliz mühendis ve mucitler Thomas Savery ve Thomas Newcomen tarafından öncülük etmişlerdir. 1760-1780 yılları arasında İskoçyalı mühendis ve mucit James Watt'ın daha önce yapılan ve düşük verimliliğe sahip bazı makineler üzerinde çalışmaya başlamış, aynı zamanda buharın ne denli gizemli ve önemli olduğunu keşfederek bilim, sanayi ve teknoloji dünyası adına çok önemli katkılar yapmıştır [7, 8]. 19.yüzyılda Fransız fizikçi Sadi Carnot ısı makinesinin çalışma prensipleri üzerine çalışmalar yapmış, ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşme olasılığını incelemiş ve yazdığı "Reflections on the Motive Power of Heat and on the Machines Adopted to Develop this Power" adlı kitap ile termodinamik biliminin temel esaslarına değinmiştir. 19.yüzyılın ikinci yarısında ise bilimin günlük hayatta kullanılabilecek hale getirmek hedefi olan ünlü İskoçyalı fizikçi William Thomson ilk termodinamik terimini kullanmıştır[8-10].

Termodinamik terimi ilk başlarda ısı ve mekanik arasındaki enerji bağıını incelerken, günümüz dünyasında ise enerji ve enerji dönüşümlerine bağlı tüm yönlerini kapsayan geniş bir kavramı ifade etmektedir. Bu kapsamı daha iyi anlamak ve yorumlamak için doğada var olan tüm olayları enerji ve madde ekseninde değerlendirilip bu dönüşümlere bakmakta fayda vardır. Dünya üzerinde kullanılan tüm teknolojik malzemeler termodinamiğe uygun olarak çalışırlar. Termodinamik bilimi hem mühendislikte hem de günlük yaşamda çokça kullanıldığı için ayrı bir öneme sahiptir. Kullandığımız bilgisayarımızdan cep telefonunuza, arabalardan uçaklara, güç sistemlerine, metalurjiye ve malzeme mühendisliğine ve uzay araçlarına kadar her şey bu bilimin kanunlarına göre çok geniş uygulama alanlarına sahiptir[11,12].

Bu çalışmanın amacı, ark ergitme yöntemiyle üretilen NiTiCu şekil hatırlamalı alaşımların mikroyapı ve termodinamik özelliklerini incelemektir. ŞHA üzerine dünya çapında ve geniş bir alanda birden fazla çalışma bulunsa da, olayın mikroyapısı ve termodinamiği üzerine pek fazla ayrıntılı bilgi ve belge bulunmamaktadır. Bundan dolayı yapılan bu çalışma literatüre önemli katkı sağlayacaktır. Özellikle son zamanlarda çalışmaların odağı haline gelen alaşımlar üzerine çalışan araştırmacılara önemli bir bilgi hazinesi haline gelecektir.

2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR

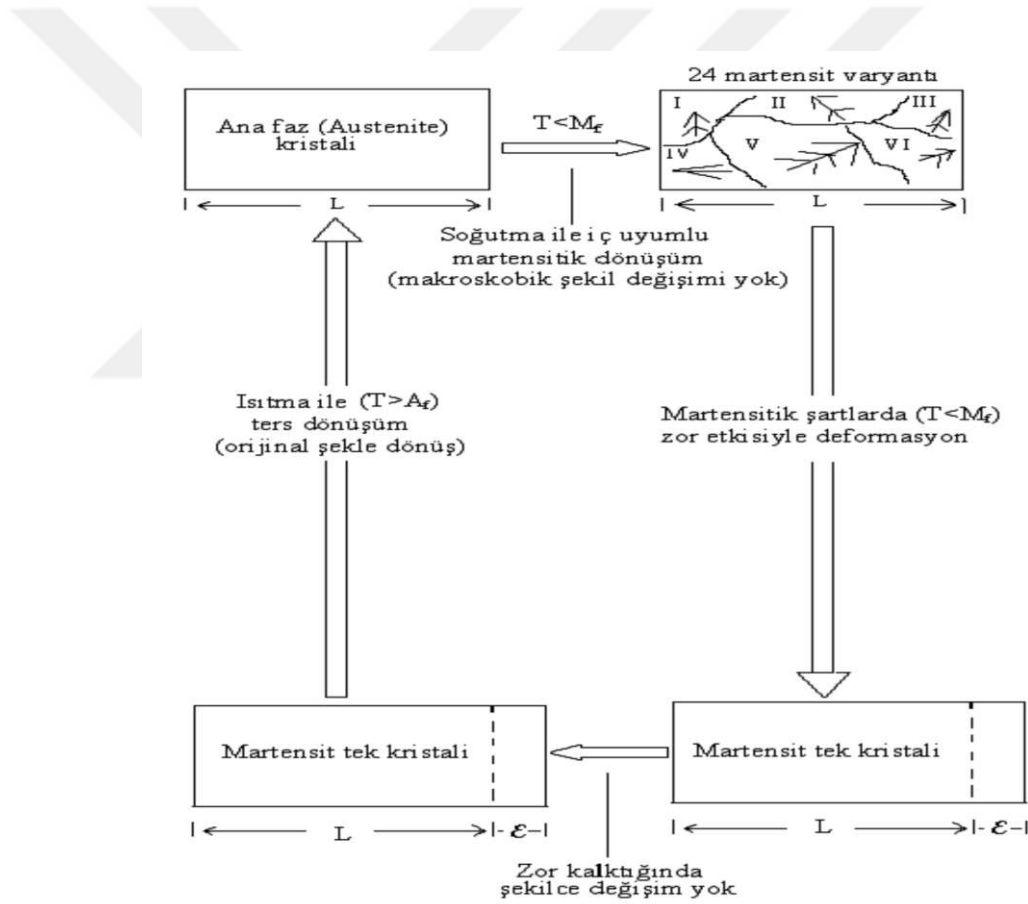
Şekil hatırlamalı alaşımlar, düşük sıcaklıktaki martensit fazında deforme edildikten sonra üzerindeki dış etki kaldırıldığında (genellikle M_f sıcaklığının altında), martensit fazdan ana faza dönüşecek şekilde A_f sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara kadar ısıtıldığında kendi orijinal şeklini hatırlaması olayına denir [5]. Başka bir ifadeyle, malzeme martensitik fazda iken yüksek bir deformasyona maruz kalmaları sonucunda değişen orijinal şekillerini, austenit dönüşüm sıcaklığının üzerine ısıtıldıklarında önceki şeklini büyük oranda geri kazanabilen alaşımlardır. Daha açık bir ifadeyle ise, ŞHA üzerine uygulanan bir kuvvet etkisiyle değişen şeklin uygulanan bir ısı etkisiyle önceki şekline ve boyutuna tekrar geri dönmesidir. Yani bu davranış malzeme önceki şeklini hatırlaması olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.1’de şekil hatırlama olayının mekanizması verilmiştir.



Şekil 2.1. Şekil hatırlama mekanizmasının şematik gösterimi [13].

Başka bir açıdan şekil hatırlamalı alaşımlar ele alınırsa, Şekil 2.2’de görüldüğü gibi M_f sıcaklığının altında mekanik olarak deforme edilirlerse, A_f sıcaklığının üzerine ısıtılana kadar deforme olmuş biçimini korurlar. Üzerinde çalışılan malzeme, belli bir sıcaklığın üzerine kadar (A_f sıcaklığı) ısıtıldığında deformasyon etkisini giderek kaybeder. Malzeme austenit haldeki orijinal şekline tekrar geri döner. Şekil hatırlama mekanizmasının oluşabilmesi için gerekli koşullar aşağıdaki şekilde sıralanmıştır [14].

- a) Martensitik dönüşüm termoelastik olmalıdır,
- b) Dönüşüm olayının gerçekleşmesi için deformasyon, dislokasyon kayması (çizgisel kusur) olmadığı ikizlenme benzeri bir sistem ile olmalıdır,
- c) ŞHA olabilmesi için ana yapısal faz kararlı olmalıdır.



Şekil 2.2. Şekil hatırlama olayının mekanizması [14].

Şekil hatırlamalı alaşımlar, gösterdikleri sıra dışı hatırlama özellikleriyle biyomühendislik, robotik, biyomedikal, tıp, havacılık, otomotiv, uzay araçları, mühendislik, otomasyon ve kontrol cihazları, enerji, kimyasal işleme, ısıtma ve havalandırma, güvenlik ve güvenlik elemanları, elektronik endüstrilerinde yeni ve yenilikçi alanlarındaki uygulamalarıyla zirvededirler. En

bilinen NiTi tabanlı alaşımlar şekil hatırlama özelliği ve aşınmaya karşı dirençli olmaları aynı zamanda ucuz olmaları nedeniyle bakır esaslı alaşımlar geniş uygulama alanlarında çeşitli sektörlerde daha iyi bir seçenek sunmaktadırlar. En yaygın bakır temelli alaşımlar, NiTiCu, CuAlNi, CuAlMn ve CuZnAl alaşımlardır. Bunlar üçlü ve dörtlü alaşımlar şeklinde olması olasıdır. Ayrıca bazı elementler yapıya dağılarak yüksek dayanım özelliğini sergilerler. Özellikle mikro taneli bakır esaslı şekil hatırlamalı alaşımlar sahip olduğu tanelerin arasındaki kırılmaya bir yol bulmuş ve bunların termomekaniksel özelliklerinde gözle görülür bir gelişme gözlenmiştir [15]. Tablo 2.1’de Şekil hatırlama olayını ortaya koyan bazı alaşımlar gösterilmiştir. Bununla birlikte, ŞHA’ların daha iyi bir performansa sahip olmak için hala çok sistematik ve yoğun bir araştırma çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

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

Kullanılan Alaşımlar	Alaşımların Kompozisyonu (atomik %)	Yapısındaki Değişimler	Sıcaklık Histerezisi (°C)	Durum
Fe-Mn-Si	14-32 Mn 1-6 Si	FCC→ HCP FCC→BCT FCC→ FCT	-100-200	Düzensiz
Au-Cd	46.5- 50Cd	B2→ 2H	~15	Düzenli
Cu-Zn	38.5-41.5Zn	B2→ 9R, rombohedral M9R	~10	Düzenli
Cu-Zn-X (X=Si, Sn, Al, Ga)	Birkaç at.%	(DO3)→ 9R (18R) B2 (L21)→M9R (M18R)	~10	Düzenli
Cu-Al-Ni	28 -29Al 3- 4.5Ni	DO3→ 2H	~35	Düzenli
Cu-Sn	-15Sn	DO3→ 2H, 18R	—	Düzenli
Cu-Au-Zn	23- 28Au 45- 47Zn	Heusler→ 18R	~6	Düzenli
Ni-Al	36 -38Al	B2→ 3R	~10	Düzenli
Ti-Ni	49 -51Ni	Monoklinik →B2 Rombohedral→ B2	20- 100 1- 2	Düzenli
In-Tl	18 -23Tl	FCC→ FCT	~4	Düzensiz
Ag-Cd	44- 49Cd	B2→ 2H	~15	Düzenli
Mn-Cu	5 -35 Cu	FCC→ FCT	—	Düzensiz

Malzemelerin üzerinde yapılan Araştırmalarda bugüne kadar birden fazla alaşımın şekil hatırlama özelliğini taşıdığını ve bu özelliğe sahip yeni malzemeler bulma ve üzerinde çalışmak için önemli girişimlerde bulunmuşlardır. Aşağıda Tablo 2.2’de bugüne ortaya çıkartılan şekil hatırlama özelliğini taşıyan alaşımların martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve sıcaklık histerezisleri gösterilmiştir. Fakat günümüze kadar çoğu alaşımın şekil hatırlama özelliği göstermesine rağmen, bunların içinden yeterince uzatıldığında kırılmayan ve şekil değişiminde uygulanacak kuvvete dayanabilen malzemeler endüstriyel olarak ilgi odağı haline gelmiştir. Bugüne kadar Ni-Ti alaşımları ve bakır(Cu) temelli alaşımlar olan NiTiCu, CuZnAl ve CuAlNi gibi malzemeler endüstride önemli bir yere sahip olan şekil hatırlamalı alaşımlardır. Şekil hatırlamalı alaşımlarda, yüksek sıcaklıkta olan austenit fazın dönüşümün uzun sürmesi sonucunda termoelastik martensit meydana gelmesi martensitik dönüşüm olarak adlandırılır. Kristal kafes içinde bulunan atomların yer değiştirmeleri dar olmasına rağmen, tümünün birden aynı hacim ve doğrultuda hareket etmesinden dolayı, atomların dönüşümü makroskobik bir şekil değişimi ile sonuçlanır. Genel olarak şekil hatırlamalı alaşımlar diğer alaşımlardan farklı özelliklere sahiptir. Bu özellikler şekil hatırlama özelliği ve süperelastiklik gibi yeni ve benzersiz, özellikleriyle karşımıza çıkmaktadır[16].

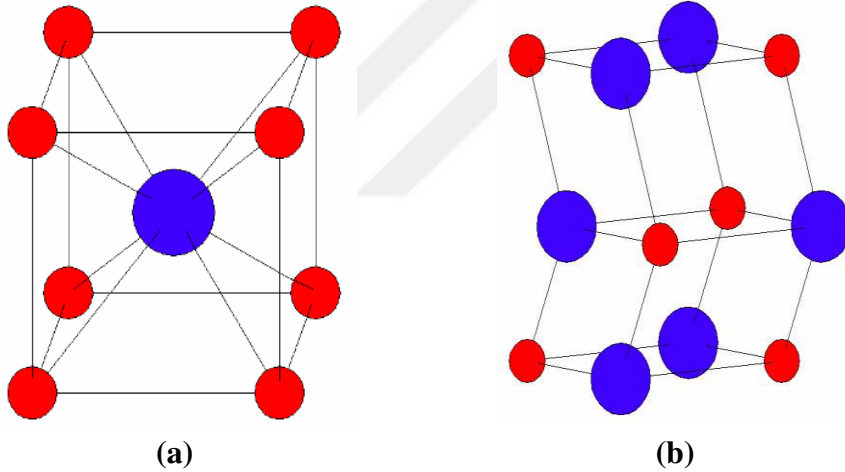
Tablo 2.2. Birtakım şekil hatırlamalı alaşımların bileşim oranı, martensit sıcaklığa dönüşme aralığı ve histerezisleri gösterilmiştir [17]

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

2.1. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Mikroyapısı

Şekil hatırlamalı alaşımlarda, atomlar yakın komşuluklarını kaybetmeden hep birlikte ortak hareket ederek faz dönüşümünü gerçekleştirirler. Bu hareketlerinin sebebi, atomların faz değişimleri sırasında daha özgün bir kristal yapıya sahip olmaktır. Fakat bu durum yaşanırken matrisin kimyasal bileşimi ise aynı kalmaktadır [18].

Şekil hatırlamalı alaşımlar içinde 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 simetriktir ve cisim merkezli kübik yapıya sahiptir. Austenit faz yüksek sıcaklıkta ve düşük zorda kararlı olup daha sert ve daha güçlü olma eğilimindedir[19]. Şekil 2.3(a) ve (b)'de olduğu gibi gösterilmiştir.



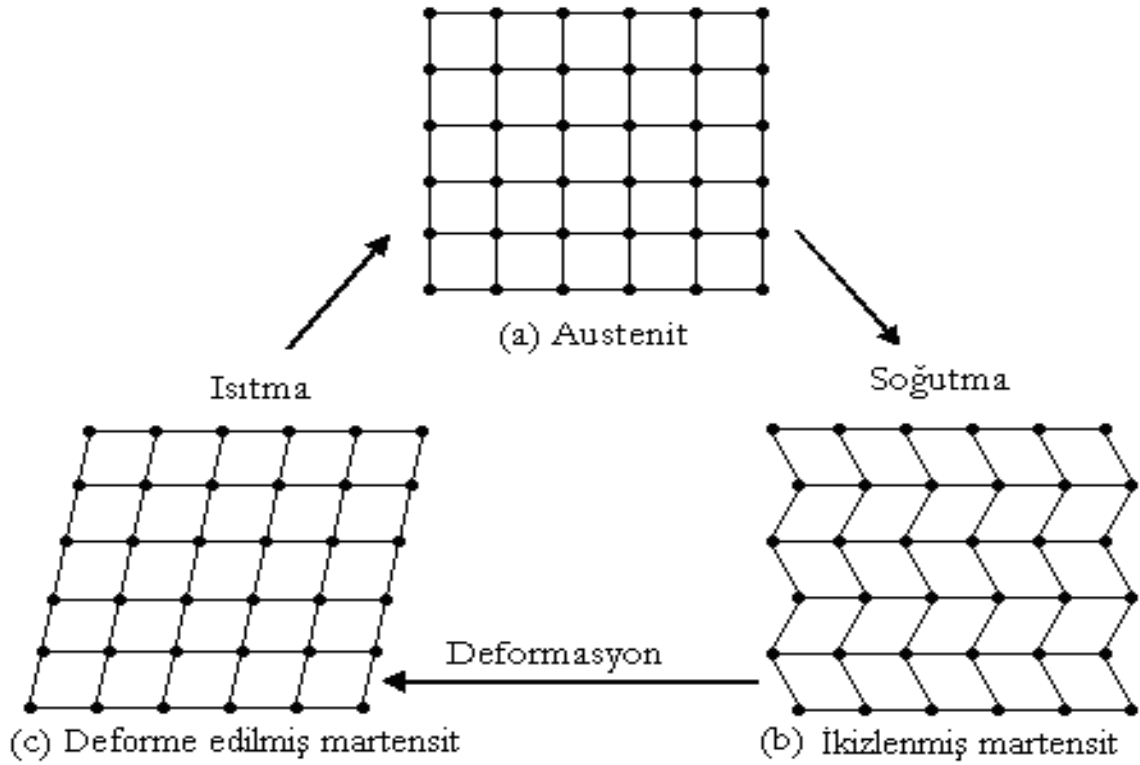
Şekil 2.3. SMA'nın üç boyutlu mikro yapısı: (a) austenit faz ve (b) ikizlenmiş martensit faz. Büyük küreler nikeli temsil eder ve küçük küreler titanyumu temsil eder [19]

2.2. Şekil Hatırlama Etkisi

Şekil hatırlama etkisi, nispeten düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa doğru ısıtıldığında alaşımın deformasyon olmadan önceki şekline geri dönmesidir. Bu ısıtma işlemi sırasında, geri dönüşümlü faz düşük sıcaklık, düşük zorlanmanın olduğu martensit fazdan, yüksek sıcaklık, yüksek zorlanmadaki austenit faza geçiş olarak gerçekleşir [1,20,21].

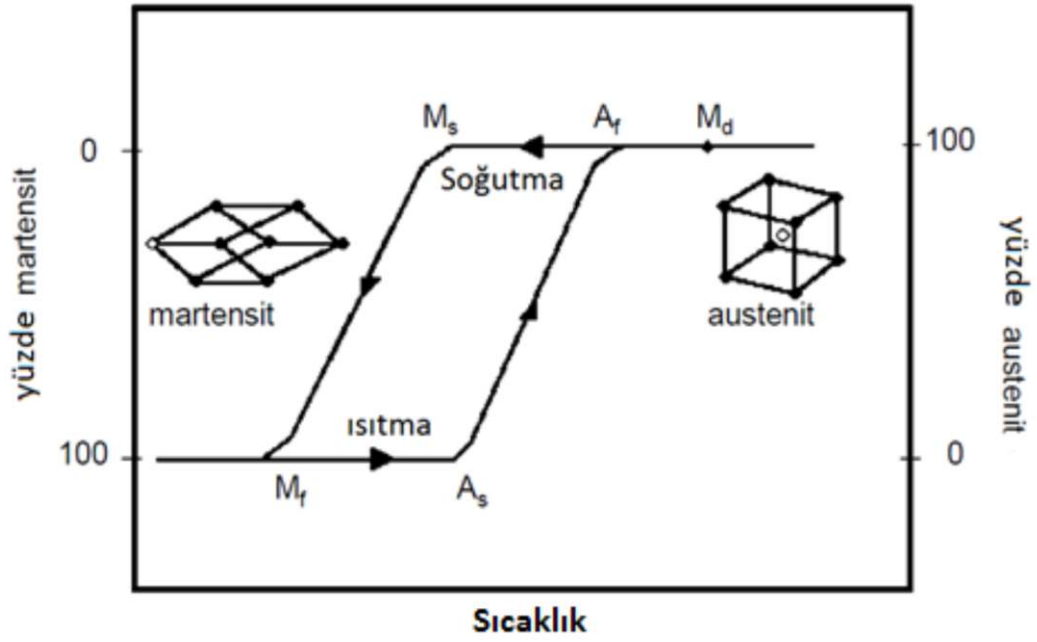
Alaşımlardaki var olan şekil hatırlama etkisinin sebebi; alaşımların termoelastik martensit dönüşüm özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bu durumun mikro mekanizması Şekil 2. 4'de gösterildiği gibidir. Austenit fazı belli bir M_s sıcaklığının altına kadar indirildiğinde martensit fazı oluşuyor. Bu olaydan sonra, dönüşüme ikizlenme ve buna benzer deformasyonlar beraberinde

oluştugu için makro şekil değişimine gidilmez. Martensit fazı, M_f sıcaklığının altında bir dış kuvvete maruz bırakıldığında ikizlenme sınırları harekete geçer ve sonra kaybolur. Deformasyona uğramış martensit, ısıtıldığında martensitten ana austenit faza döner ve böylece özgün hali tekrar elde edilmiş olur [22].



Şekil 2.4 Şekil hatırlama etkisinin şematik gösterimi [22]

Alaşım düşük sıcaklıkta martensit fazda iken ısıtılırsa, dönüşüm martensit fazdan austenit faza geçişi Şekil 2.5 şeklinde olarak gerçekleşir. Dönüşüm başladığı sıcaklık Austenit başlama A_s sıcaklığıdır. Dönüşümü tamamlandığı sıcaklık ise A_f austenit bitiş sıcaklığıdır. Ters dönüşümde ise soğutma ile M_s sıcaklığında martensit dönüşüm başlar, M_f sıcaklığında martensit dönüşüm biter. Yani martensit fazın hepsi tamamen austenit faza dönüşür [23]. Kompozisyon ve termomekaniksel işlemler bu dönüşüm sıcaklıklarını önemli ölçüde etkileyebilir [24].

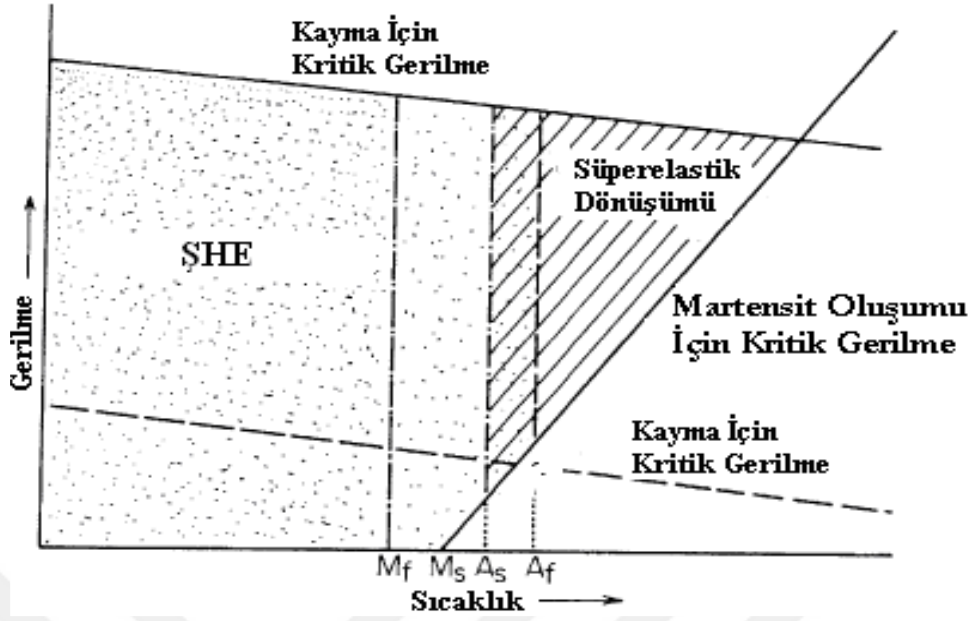


Şekil 2.5.Şekil hatırlama etkisi sırasında dönüşüm sıcaklıkları [24].

2.2.1. Şekil Hatırlama Etkisi ve Superelastiklik

Şekil hatırlama etkisinin iki çeşidi bulunur: Bunlardan birincisi tek→yönlü şekil hatırlama etkisi, diğeri çift↔ yönlü şekil hatırlama etkisidir. Eğer alaşım, sadece yüksek sıcaklık şeklini hatırlıyorsa tek yönlü şekil hatırlama olayıdır. Eğer alaşım, hem yüksek sıcaklık hem düşük sıcaklık şeklini hatırlıyorsa bu olay iki yönlü şekil hatırlama etkisidir. İki yönlü şekil hatırlama etkisi, alaşımlar, düşük sıcaklık şekli ile yüksek sıcaklık şekli arasında defalarca çevrime maruz kalabilirler [24].

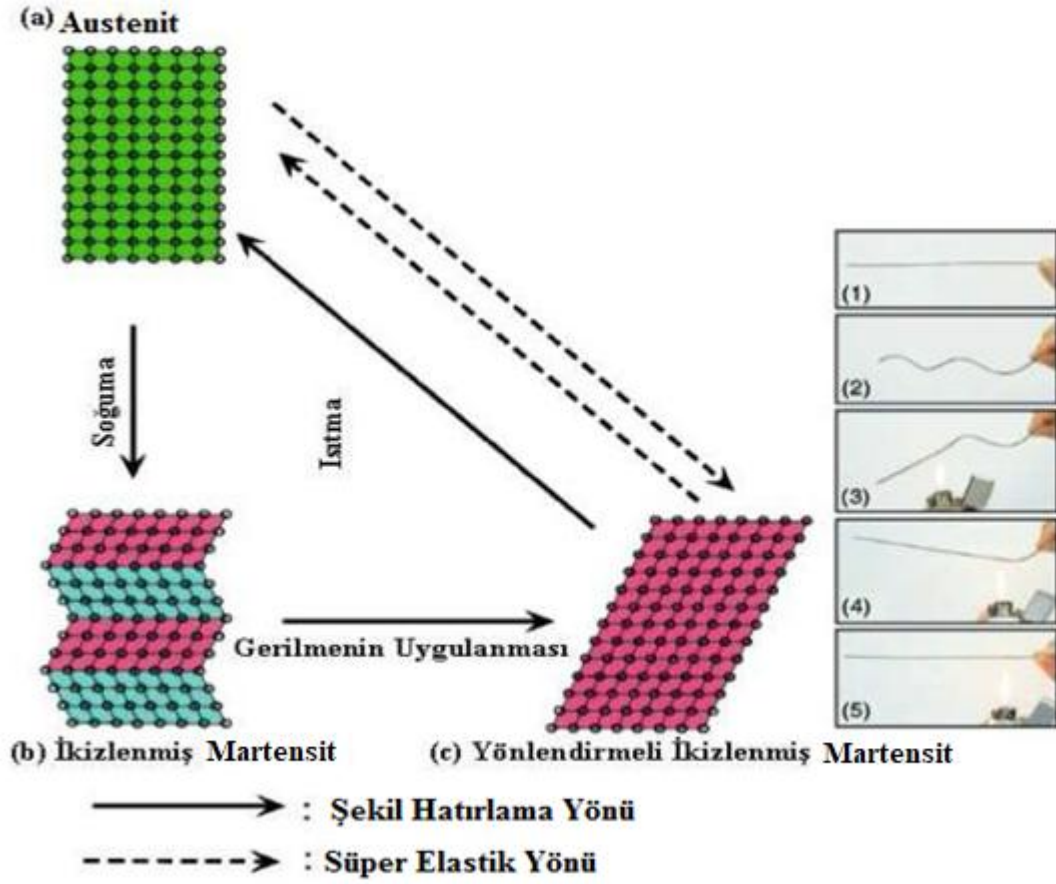
Şekil hatırlama etkisinin, deforme olmuş ikizlenmiş martensit fazı, sıcaklık etkisiyle austenit faza dönüşmesidir. Bu etki sonucu oluşan dönüşüm birinci derece faz dönüşüm etkisidir. Birinci derece faz dönüşümü, bazı kritik sıcaklıklarda meydana gelir ve fazın kimyasal kompozisyona bağlıdır. Bu spesifik şekil, difüzyonsuz faz değişimi olan şekil hatırlama etkisi olarak bilinir [24].



Şekil 2.6. Şekil hatırlama etkisi ve süperelastikliğin meydana geldiği gerilme ve sıcaklık bölgesi [25]

Üzerinde çalışılan süperelastiklik ve şekil hatırlama etkisi sıcaklığa bağlı olarak oluşabilir. Bu durum Şekil 2.6’da gösterildiği gibi, sıcaklık eksenine paralel olarak çizilen çizgiler kayma için gerekli olabilecek olası kritik gerilmeleri temsil etmektedir. Süperelastikliğin oluşabilmesi için kritik gerilme alttaki kesikli çizgiden daha düşük olmamalıdır. Çünkü kayma, zor etkili dönüşüm için gerekli olan kritik gerilmenin aşağısında gerçekleşir. Şekil 2.6’da görüldüğü gibi A_f sıcaklığı ve kayma için kritik gerilmenin üzerinde bir zor uygulanırsa, zor etkili dönüşüm meydana gelir. Buna rağmen oluşan martensit, A_f sıcaklığı üzerinde zor kaldırıldığında zaman tamamen kararsız olacağından ters dönüşüm gerçekleşir. Böylece ters dönüşüm kristalografik olarak tersinir olduğu sürece süperelastiklik elde edilir. Benzer olarak A_s sıcaklığı altında deforme edilen martensit karardır ve yük kaldırıldıktan sonra da martensit deforme edildiği gibi kalır. Uygulanan Zorun giderilmesi yalnızca ters bir dönüşümle oluşabilir. A_s ve A_f arasındaki sıcaklıkta martensit kısmen kararlı olduğundan bu bölgede hem süperelastiklik hem de şekil hatırlama etkisi bir arada bulunur[25,26].

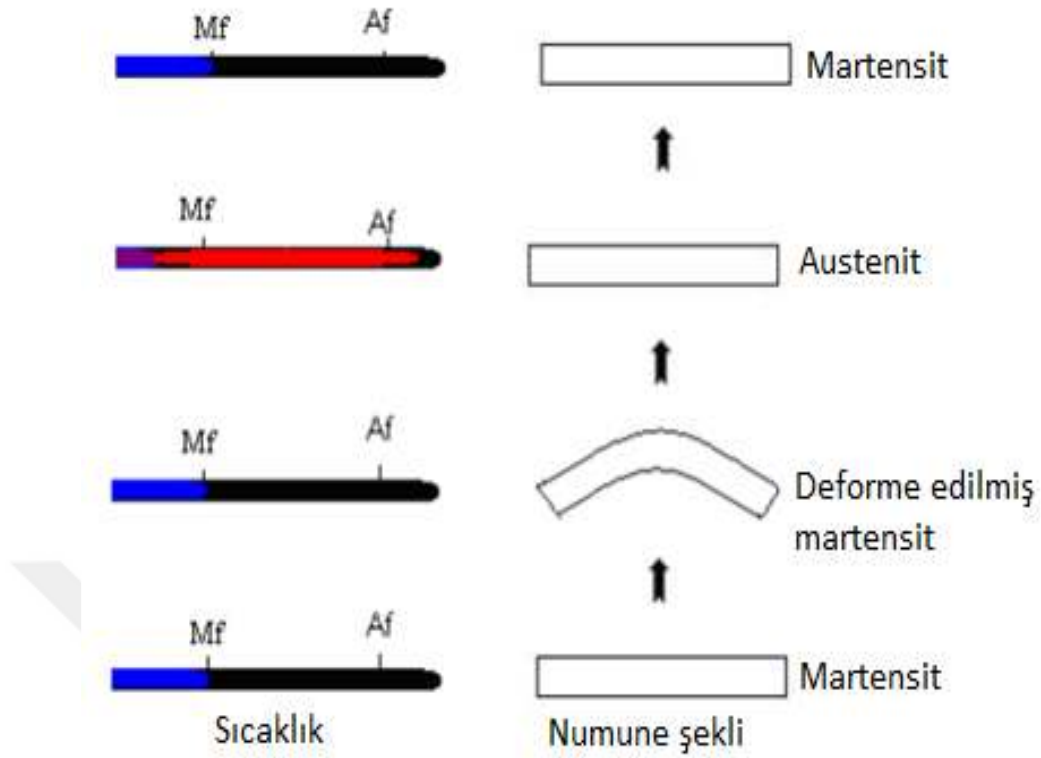
Şekil hatırlama etkisinin temeli termoelastik martensitik dönüşüme dayanmaktadır. Martensit halde numune ikizlenme ve kayma mekanizması ile deforme edilebilir. Deforme edilen numune ısıtılıp deformasyon yok edilir ve Şekil 2.7’de gösterildiği gibi eski haline döner. Ana fazda bulunan malzeme soğutulduğunda martensit dönüşümü sonucunda oluşan katmanlı yapılar birbirleriyle ikiz plakalar şeklinde düzenlenir. Şekil değişiklikleri ikiz ara yüzeylerinin hareketi sonucunda meydana geldiğinden ısıtıldığında ana faza geri dönen malzeme ilk şeklini alır. Şekil hatırlama olayı tek $\rightarrow$ yönlü ve çift $\leftrightarrow$ yönlü olmak üzere iki şekilde gerçekleşir [27,70].



Şekil 2.7. Şekil hatırlamalı alaşımların hal durumu [70]

2.2.2. Tek-Yönlü Şekil hatırlama

Martensitin bitiş (M_f) sıcaklığı altındaki sıcaklıkta deformasyona uğratılan alaşım, üzerine uygulanan kuvvetin kaldırılması sonucunda deformasyon öncesi ilk haline dönmez. Fakat austenit bitiş sıcaklığı (A_f) için kritik sıcaklığın üzerinde bir sıcaklığa çıkartıldığında alaşım deformasyon öncesi ilk şeklini kazanır. Sıcaklığı yeniden martensit bitiş sıcaklığı (M_f) değerinin altına düşürülmesi sonucunda alaşımın deformasyona uğramış haline tekrar geri dönmez (Şekil 2.8). Alaşımların bu özelliğine tek→yönlü şekil hatırlama durumu denilmektedir [28- 30].



Şekil 2.8. Tek→yönlü şekil hatırlama olayının gösterimi [31]

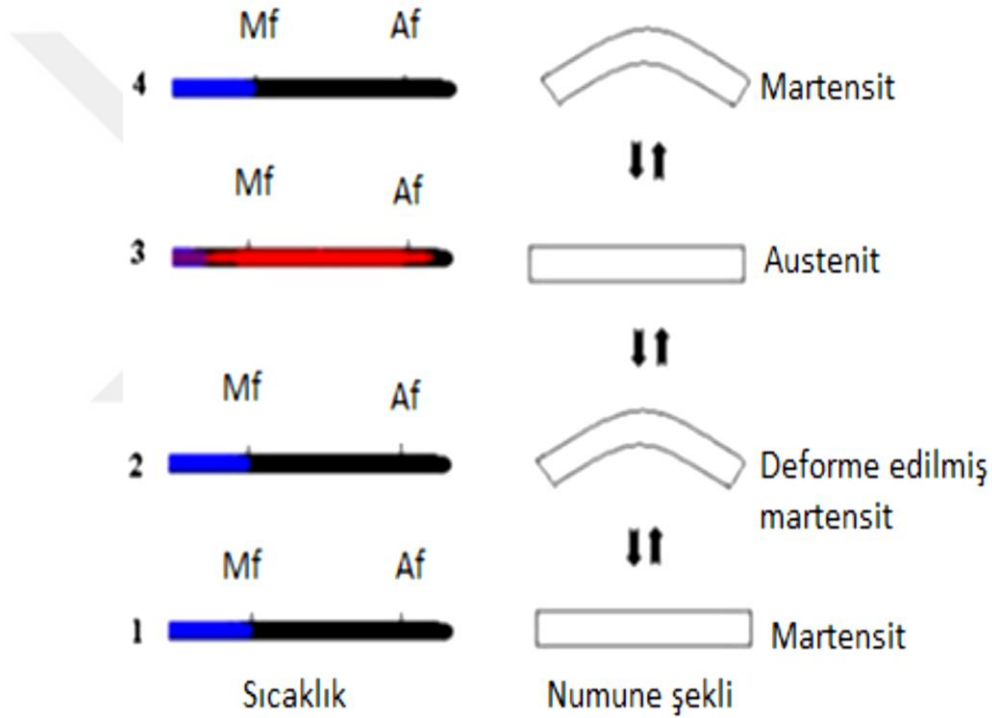
Başka bir ifadeyle tek→yönlü şekil hatırlama olayında numune martensit bitiş sıcaklığının (M_f) altındaki sıcaklıkta ($T < M_f$) deforme edilirse, numune üzerine uygulanan baskı kaldırıldığında numune deformasyon öncesi şekline geri dönemez. Isıtma sonucunda numunede kalan baskı aşamalı olarak geri döner. Sıcaklığın tekrar numunenin deforme edildiği sıcaklığa düşürülmesi üzerine, kalıbı bozulmuş numune tekrar şeklini geri kazanamaz. Tek→yönlü şekil hatırlama olayı aşağıdaki basamaklardan oluşur [32, 33]:

- $T < M_f$ de numuneyi deforme etmek,
- Numunenin şeklini kazanması için sıcaklık $T > A_f$ ye kadar ısıtmak,
- Tekrar $T < M_f$ ye kadar soğutmak,
- Sonuç: numune deforme edilmiş eski şekline geri dönemez.

Tek-yönlü şekil hatırlama durumu NiTi, TiNb, NiAl, FePt, CuZnSi, CuZnSn, FeMnC gibi birden fazla alaşım türlerinde gözlenmiştir. Tek-yönlü şekil hatırlama çeşidinin zorlanma sınırı, kendiliğinden martensit dönüşümün biçimsel baskıya bağlıdır. Çünkü alaşım kendiliğinden eski şeklini geri kazanamadığında bu sınır, deformasyon tesirli bir martensit kristalinin sadece tersi olayla ortaya çıkar [33-35].

2.2.3. Çift-Yönlü Şekil Hatırlama

Çift↔yönlü şekil hatırlamada ise, tek→yönlü şekil hatırlama olayında olduğu gibi martensit bitiş sıcaklığının (M_f) altındaki sıcaklıklarda ($T < M_f$), martensit fazdaki alaşım deformasyona uğratıldıktan sonra malzeme üzerine uygulanan kuvvetin kaldırılması sonucunda deformasyona uğramış halini korur. Sıcaklık değerinin austenit bitiş sıcaklığının (A_f) üzerindeki sıcaklıklara ($T > A_f$) çıkartılmasıyla austenit fazdaki alaşım deformasyona uğramamış ilk halini alır. Özgün halini alan numune tekrar martensit bitiş sıcaklığının ($T < M_f$) altındaki bir sıcaklık değerine düşürüldüğünde deformasyona uğramış halini kazanırsa (Şekil 2. 9) alaşımlardaki bu duruma çift↔ yönlü şekil hatırlama olayı denilmektedir[36, 37, 30].



Şekil 2.9. Çift↔yönlü şekil hatırlama durumunun gösterimi [31]

Şekil hatırlama özelliği gösteren alaşımlarda görülen martensit dönüşümler uygulanan sıcaklık ve baskı faktörüne bağlı olarak çift yönlülük (tersinirlik) sergilerler. Çift yönlü davranışı sebebiyle bu tür eşsiz alaşım sınıfı diğer alaşımlardan farklı olarak davranırlar [38].

Genel olarak Çift yönlü şekil hatırlama olayını aşamalandırırsak:

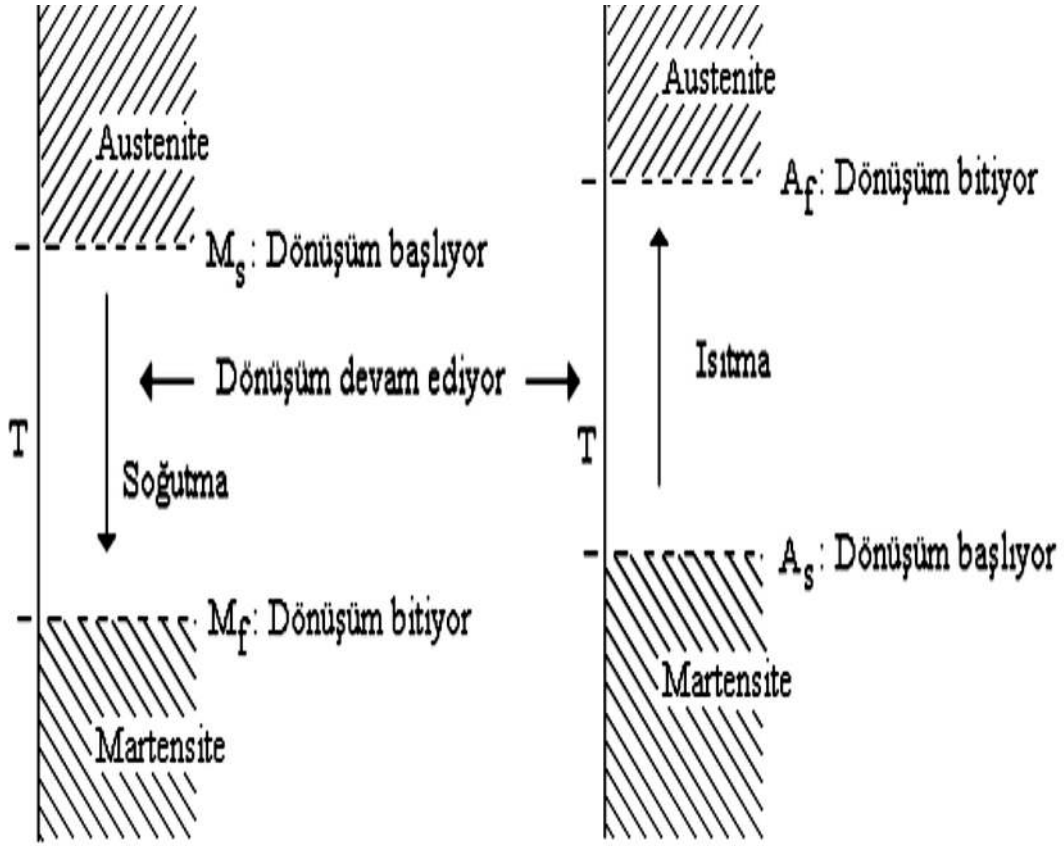
- Numune $T < M_f$ deforme edilerek uygulanan zor kaldırılarak eski halini alır.
- Deforme edilmiş numuneyi austenit sıcaklığının üzerine yani $T > A_f$ ye yükseltilerek deforme edilmemiş haline geri döner,

- Numune tekrar martensit sıcaklığının altına yani $T < M_f$ ye soğutulur.
- Sonuç: deforme edilmiş şeklini geri kazanır.

2.3. Martensitik Dönüşüm

Martensitik dönüşümler atomların birlikte hareket etmesiyle meydana geldiğinden dolayı difüzyonsuz dönüşümler olarak bilinir. Martensitik dönüşüm, yüksek sıcaklıkta olan austenit fazının ani soğutularak bir M_s sıcaklığında başlayıp, martensit bitiş sıcaklığı olan M_f de dönüşüm sonlanır. Şayet sıcaklık artırılırsa oluşan martensit, austenit başlangıç sıcaklığı olan A_s sıcaklığında austenit faza dönüşmeye başlar ve austenit bitiş sıcaklığı olan A_f de dönüşüm tamamlanıp tekrar austenit fazı elde edilir. Nitekim çoğu malzemeler soğutma ve ısıtma hızı yeterli derecede yüksek tutulduğunda difüzyonsuz dönüşüme uğrayabilirler. Çoğu metal veya metal olmayan kristaller, mineraller ve birden fazla bileşiklerde martensitik dönüşüm oluşabilir [39, 40].

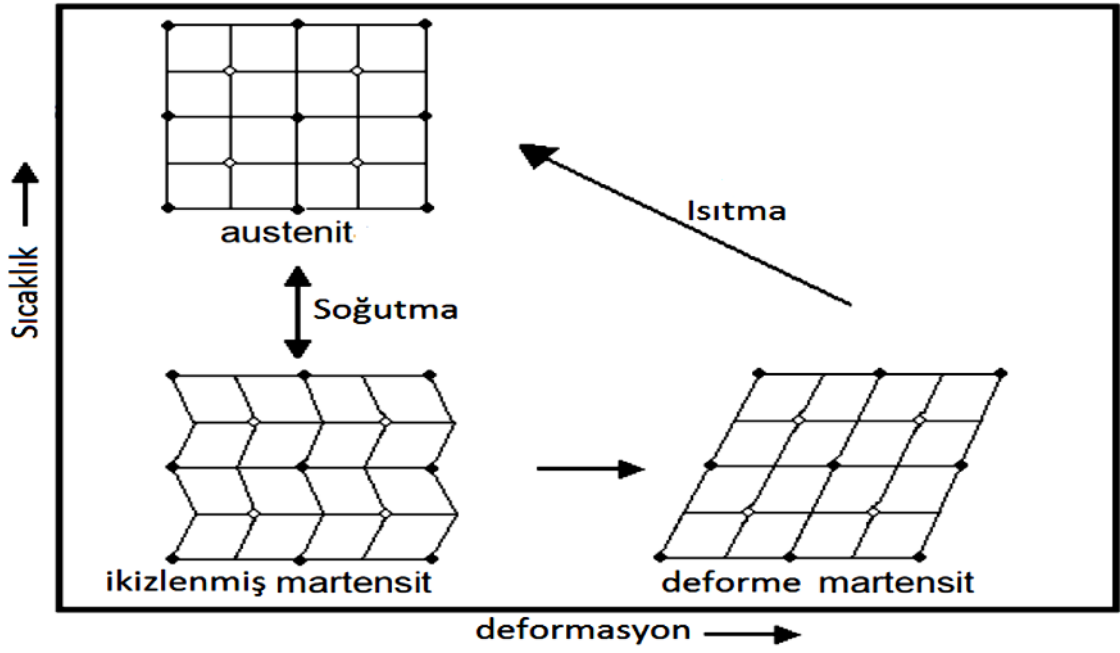
Bu durum Şekil 2.10'da gösterildiği gibi austenit-martensit fazlarının birbirlerine dönüşme durumu gösterilmiştir. ŞHA'da dönüşüm mekanizması martensitik faz dönüşümü olduğundan bu dönüşümün temel özelliklerini ve işleyişini açıklamak, ŞHA'nın sahip olduğu karakteristik özelliklerin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Martensitik faz dönüşümü, metalik, polimerik ve seramik sistemleri de içeren bir dizi malzeme sisteminde yaygın olarak görülen faz dönüşümlerinden birisidir. Bu faz dönüşümünde, austenit (ana) fazından daha düşük sıcaklıkta kararlı olan martensit (ürün) fazına difüzyonsuz gerçekleşen bir dönüşüm söz konusudur. Malzeme, daha yüksek bir kristalografik simetriye sahip fazdan (austenit) daha düşük bir simetriye sahip faza (martensit) bir dönüşüm gerçekleştirir. Martensit daha düşük simetriye sahip olduğundan dolayı, bu dönüşüm sırasında farklı yönlerde martensit yapıları oluşabilmektedir. Elde edilen her bir yapıya martensit varyantları denilmektedir [42].



Şekil 2.10. Austenit↔martensit yapı arasındaki sıcaklık etkenine bağlı dönüşüm (a) austenit→ martensite dönüşümü (b) martensit→austenite dönüşümü [41]

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. Ama daha sonraları, çelikler dışında bazı demir dışı alaşımlarda, saf metallerde, seramiklerde, minerallerde, inorganik bileşiklerde, katılaştırılmış gazlarda ve polimerlerde de martensit fazının oluştuğu tespit edilmiştir [43].

Martensitik dönüşüm birinci dereceden bir faz dönüşümü olduğundan, çekirdeklenme ve ardından büyüme ile gerçekleşmektedir. Martensit kesme tarzındaki bir mekanizmayla oluşurken, martensit etrafında büyük gerinmeler oluşur. Bu gerinmeleri azaltmak için deformasyon 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]

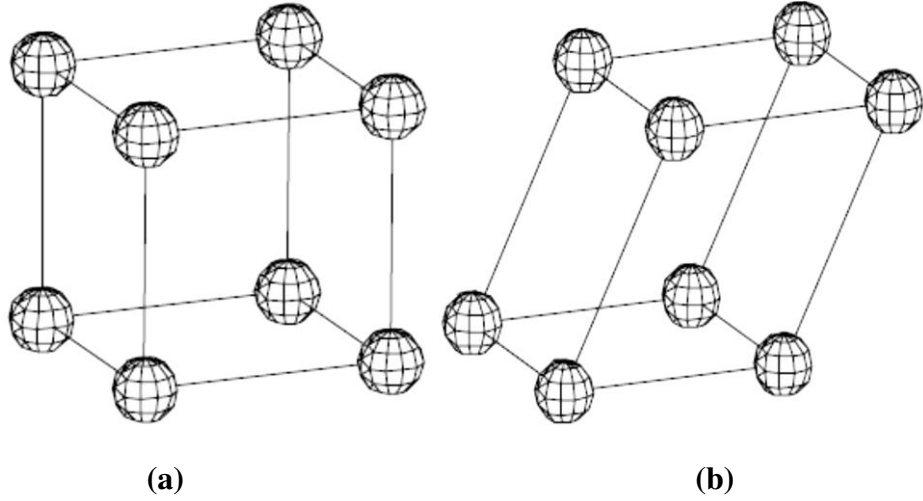
Martensitik dönüşüm termoelastik ve termoelastik olmayan dönüşümler olmak üzere ikiye ayrılır. Ayrıca termoelastik dönüşümler ise sıcaklık ve miktara bağlı izotermal veya atermal olarak gerçekleşebilir. Bu yüzden şekil hatırlamalı alaşımlar izotermal martensitik dönüşüm özelliği gösterirler [45]. Atermal dönüşüm, genellikle düşünüldüğü gibi “sıcaklıktan bağımsız” anlamı taşımamaktadır. Atermal kelimesi en iyi olarak “termal aktivasyonun olmadığı” şeklinde ifade edilebilir. Termal aktivasyonun olmadığı işlemler zamana bağlı değildir ve bu işlemlerin başlaması için bazı parametrelerin belli bir aktivasyon eşiğini aşmasını beklemeye gerek yoktur. Termal olarak aktive edilen martensitten ise literatürde izotermal martensit olarak ifade edilir. İzotermal kelimesinden “sabit sıcaklık” olarak anlaşılabilir. Aslında bu tip martensitler genellikle sürekli soğumayla elde edilir [46]. Termoelastik olmayan bir martensitik dönüşümde ise sıcaklık belli bir değerin altına indirildiğinde martensit plakası belli bir büyüklüğe kadar büyür, ondan sonra soğutma devam edilirse çok fazla büyüme söz konusu olmaz. Büyüme adımı sıcaklık düşürüldüğünde artan sürücü kuvvet ile termodinamiksel dengesini koruma eğilimindedir. Çünkü ara yüzey belirgin bir halde sabitlenir. Sabitlenen ara yüzey ısıtılınca tersinir hareket etmez. Bunun yerine ana faz, sabit durumdaki martensit plakalar arasında çekirdeklenir ve bir plakanın tümü orijinal ana fazına geri dönemez. Tablo 2.3’te martensitik dönüşümün termoelastik olan ve termoelastik olmayan çeşitleri karşılaştırılmıştır [47].

Tablo 2.3. Martensitik dönüşüm türlerinin tipik özellikleri [48]

MARTENSİT TÜRÜ	MARTENSİTİN ÇEKİRDEKLENME ETKİSİ	BÜYÜME DURUMU	KRİSTAL KUSURLARI
Termoelastik	Soğutma etkisi	Sıcaklık düşmesiyle 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 düşürüldüğü zaman izotermal martensit plakaları çekirdeklenerek oluşmaya başlar. Sıcaklık düşürülmeye devam edilirse martensit plakaları giderek artar ve M_f (martensit bitiş) sıcaklığına varıldığında martensitik dönüşüm tamamlanmış olur. Malzeme martensitik dönüşümü tamamlandıktan sonra ısıtılmaya başlanırsa A_s (austenit başlangıç) sıcaklığında oluşan martensit plakaları kaybolmaya başlar ve A_f (östenit bitiş) sıcaklığına gelindiğinde bütün martensit plakaları kaybolur ve malzeme tamamen östenit fazına geçer. A_f ile M_s arasındaki fark ise dönüşüm histeresizi 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 daha yüksek sıcaklıklarda kararlı iken martensit tam tersi durumlarda kararlıdır [51]. Bazı alaşımlarda farklı ısı işlemleri 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 ışığında martensitik dönüşümler karakteristik özellikleri şu başlıklar altında özetlenebilir.

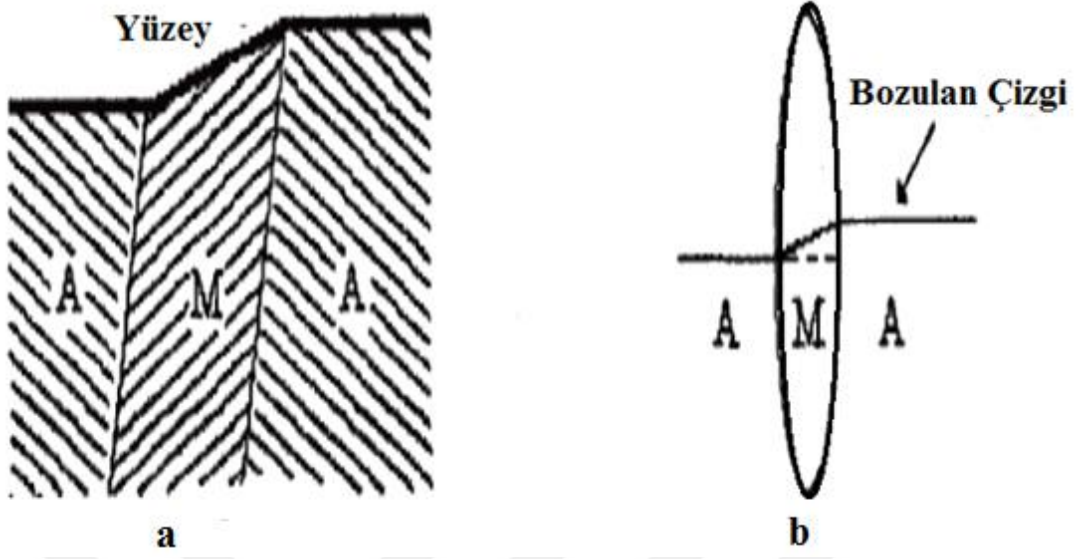
1. Martensitik faz dönüşümü, ara bir katı→katı faz dönüşümüdür.
2. Martensitik dönüşüm difüzyonsuz bir dönüşümdür. Yani kafesteki atomların, dönüşüm öncesinde ve dönüşüm sonrasında korunuyor.

3. Martensitik dönüşme, sınırlı bir şekil değişimiyle oluşuyor. Numune austenit fazda iken, yüzeyi düzeltilip parlatıldıktan sonra sıcaklığı düşürülmesi durumunda yüzeyi üzerinde oluşan martensitik fazlı bazı bölgeler çıkıntılar şeklinde gözlenir. Şekil 2.13.a ve Şekil 2.13.b’de görülen austenit-martensit yapıları arasındaki sınırda bir çizgi bozulması ortaya çıkar. Martensitik dönüşümlere eşlik eden şekil değişikliği parametresi şekil hatırlama olayında önemli bir rol oynar.

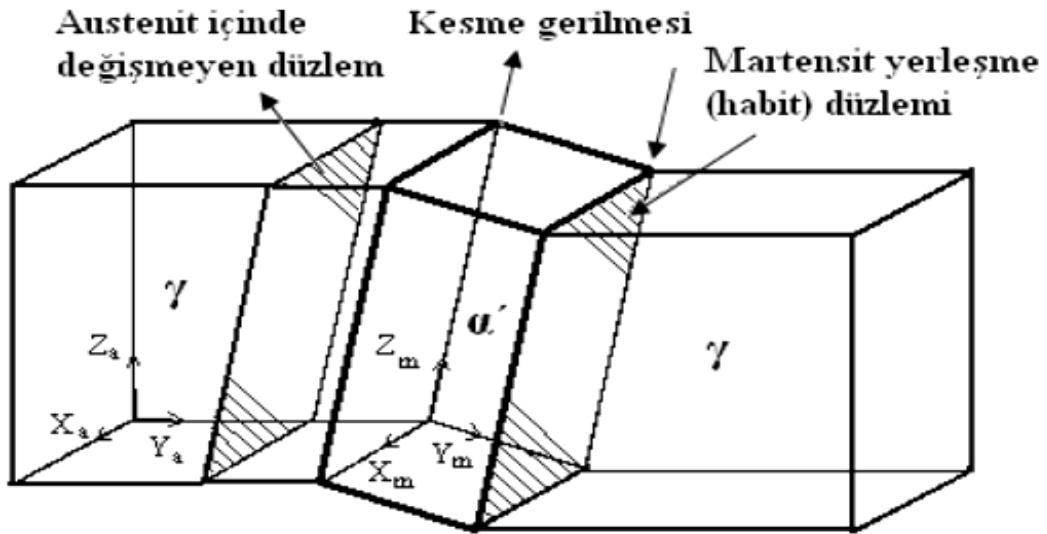
4. Martensit dönüşüm olayında çoğu zaman yapıda bir miktar dönüşmemiş austenit kaldığını görüyoruz. Bu durumun olması, austenit ile martensit arasında homojen bir ara yüzey bulunması zorunluluğunu gün yüzüne çıkarıyor. Daha açık bir ifadeyle, austenit-martensit arasında bir düzlemin dönüşüm öncesi-sonrasında değişmeden, aynı şekilde kalması gerekiyor. Ana faz ile yeni fazın benimsediği, değişmeyen bu düzleme yerleşik düzlem (habit plane) adı verilir. Şekil 2.14’te görüldüğü gibi yerleşme düzlemi değişmez olup dönüşen bölgelerde çizgiler kopmaya uğramadan devamını koruyabildiği ancak çizgiler kırılmaya uğradığı görülmüş ve bunun sonucunda da düzlem ve doğrultu aynı kalmıştır.

5. Austenit-martensitik faz yapıları arasında sınırlı bir dönme bağıntısı olması, beraberinde çeşitli örgü kusurlarının oluşumunu da sağlar.

Martensitik dönüşümlerde ara yüzeyde belli bir büyümenin olması martensit fazı oluşur. Büyüyen ara yüzey sayesinde hareketler çok kararlı ve süratlidir. Ayrıca çekirdeğin ara yüzeyi ile dönme bağlantısı arasında paralellik vardır [1, 53].



Şekil 2.13. Martensit dönüşüm esnasında, martensite etki eden çizgi bozulmalarının şekli. (a) Yüzey çıkıntısı, (b) Çizgi bozulmasının kırılması [1, 53]



Şekil 2.14. Difüzyonsuz olarak gerçekleşen Martensitik dönüşümün değişimi [40]

2.3.1. Termoelastik ve Termoelastik olmayan Martensitik Dönüşüm

Sıcaklığın etkisiyle meydana gelen martensitik dönüşümler, alaşım tiplerine göre atermal ve izotermal olarak oluşur. Martensitik dönüşümlerin izotermal ve atermal özelliği taşımaması alaşımın kimyasal bileşimine bağlı olmadığını kanıtlar. Bundan dolayı aynı numune

içerisinde her iki dönüşüm de gerçekleşebilir. Ancak meydana gelen dönüşümlerin sıcaklıkları ve dönüşüm sonrasında gözlenen yapıları tamamen birbirlerinden farklıdır. Kısaca ortaya çıkan ürün yapılarının tümü değişiktir [54].

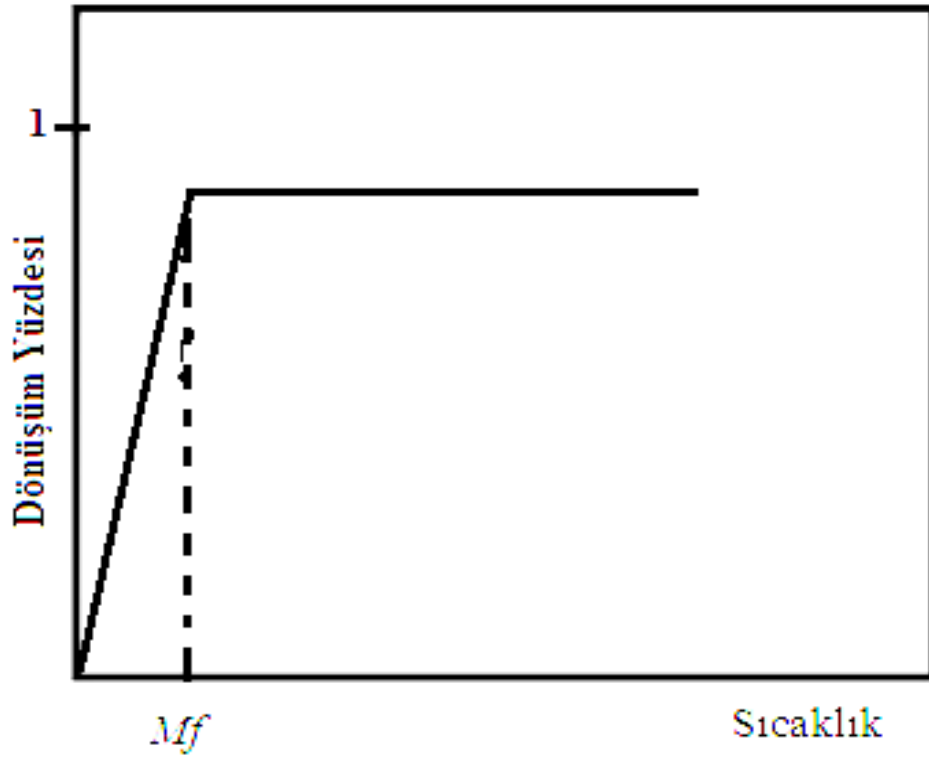
Şekil hatırlama durumu, martensitik dönüşüm gibi davranan bazı alaşım yöntemlerinde gözlenir. Termoelastik martensitik dönüşüm esnasında, martensit plakaların devamlı olarak oluşup büyümeleri için sıcaklığın düşürülmesi gerekmektedir. Aynı prosedür bu sefer sıcaklık yükseltirirse plakalar kaybolmaya başlar. Burada dönüşümün düzgün oluşabilmesi için ortamın sıcaklığının artırılıp-azaltılması veya dışarıdan kuvvet uygulanması gerekmektedir. Termoelastik alaşımların bir diğer özelliği de süperelastiklik hareketidir. Süperelastiklik deviniminde de atermal dönüşümde belirtildiği gibi bir martensitik dönüşüm olayından da bahsetmek mümkündür [55].

2.3.2. Atermal Martensitik Dönüşüm

Martensit dönüşümlerin çoğunda, reaksiyon bir M_s (martensit başlangıç) sıcaklığında başlar ve sıcaklığın düşüşüyle beraber devam eder. Soğutma durdurulduğunda reaksiyon da dururken yeniden devam ettirildiğinde dönüşüm tekrar gerçekleşir ve martensit bitiş sıcaklığına M_f (martensit bitiş) ulaşıldığında sona erer. Yani, reaksiyonun oluşumu yalnızca sıcaklığın değişimine bağlıdır. Bu tür reaksiyonlar sonucu oluşan olaya atermal martensit olarak adlandırılır. Bakır esaslı 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 güçtür. Ayrıca dönüşüm ani ve patlama reaksiyonu halinde gerçekleştiği için şekil hatırlama olayı gözlemlenmiyor.

Atermal özellik gösteren martensit dönüşümlerin genel termodinamik özellikleri şöyle açıklanabilir:

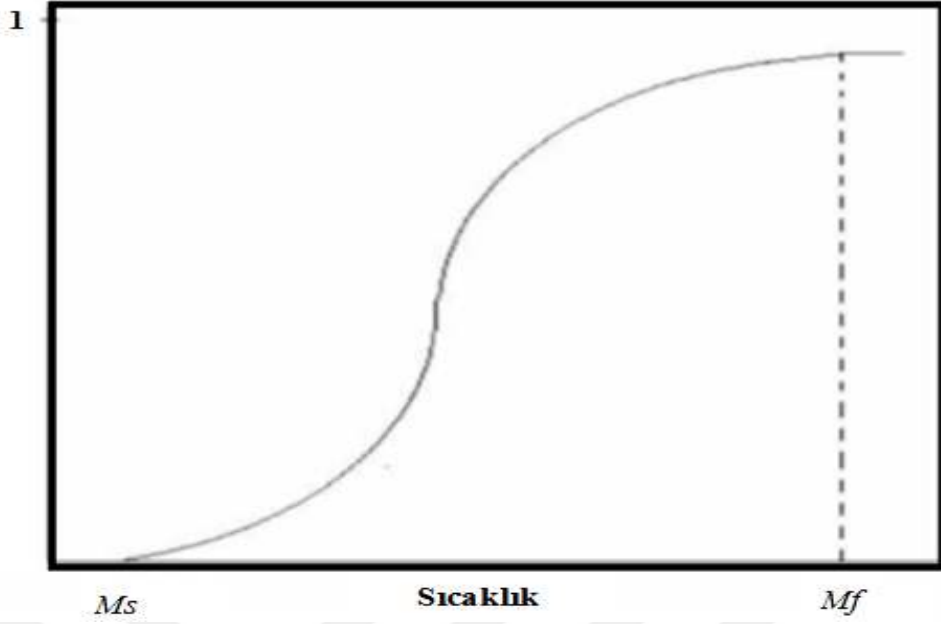
- Atermal dönüşüm miktarı zamandan bağımsızdır.
- Dönüşüm miktarı sıcaklığın fonksiyonudur.
- Var olan dönüşüm hızı sıcaklığa bağlı değildir. (Şekil 2.15.)
- Soğutma ile elde edilen ürün yüksek sıcaklıkta tekrar ana faza dönüşebilir.
- Plastik zorlanma atermal dönüşümü etkileyebilir [56,57].



Şekil 2.15. Atermal dönüşümünde, dönüşüm yüzdesinin zamanla değişim gösterilmesi [58, 59]

2.3.3. İzotermal Martensitik Dönüşüm

Bazı dönüşümlerde martensitik dönüşüm, izotermal dönüşüm gözle görülebilecek kadar yavaş olabilir. Bu tür reaksiyonlarda, çekirdeklenme zamana bağlıdır, yani oluşan çekirdeklenme sabit bir sıcaklıkta zamanla devam eder. İzotermal martensitik dönüşümlerde M_s sıcaklığının altından daha düşük sıcaklıklarda yeni martensit kafes kristalleri oluşabileceği gibi daha önceden oluşmuş olanlar da hacimsel büyüme gösterebilirler (Şekil 2.16). Bu reaksiyonlarda kritik adım çekirdeklenme olarak gösterilir. Reaksiyon oluşan çekirdeklerin büyümesinden daha çok yeni plakaların çekirdeklenmesi ile ilerlerler[60, 61].



Şekil 2.16. İzotermal dönüşümünde, dönüşüm yüzdesinin zamanla değişim gösterilmesi [58,59]

Genel anlamda atermal ve izotermal dönüşümler için şu sonuç elde edilebilir:

1. Şekil hatırlama olayı atermal martensitik dönüşümlerde gözlenmezken, izotermal martensitik dönüşümlerde ise gözlenir.
2. Atermal martensitik dönüşüm zamandan bağımsız olup sadece sıcaklığa bağlı iken, izotermal dönüşüm zamana ve sıcaklığa bağlı olarak değişir.
3. İki dönüşüm türü için genel görüş, çekirdekleşmenin kritik bir adım olduğu yönündedir.

Yani martensit başlama M_s sıcaklığında veya altında bekletilirse atermal dönüşümde yeni çekirdekleşmeye sebebiyet vermezken, izotermal dönüşümde ise martensit başlama M_s sıcaklığında bekletilirse bazı ilave işlemlerle çekirdek oluşumuna sebebiyet verir.

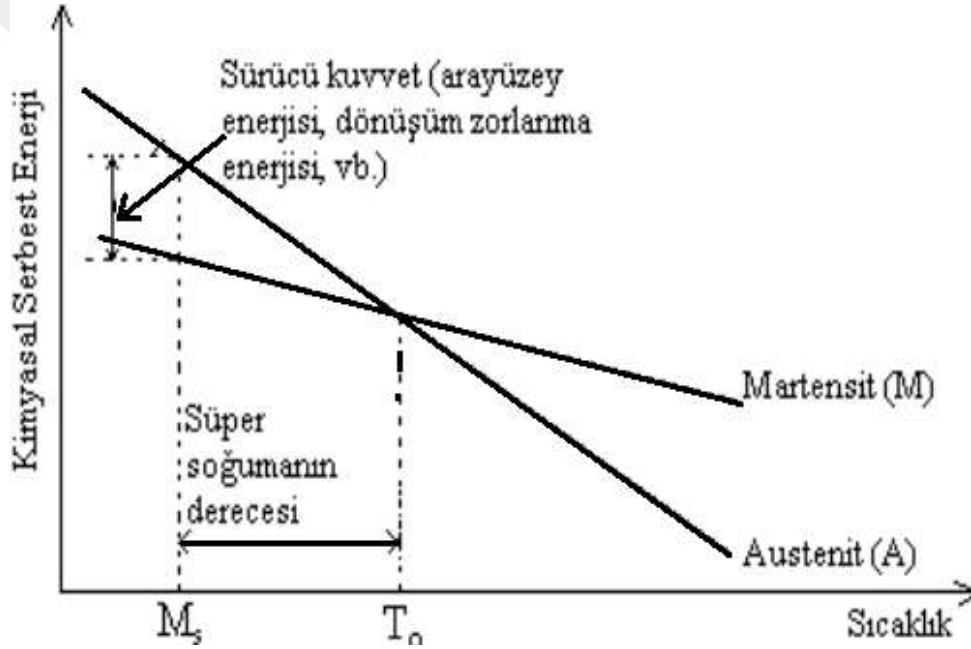
2.4. Martensitik Dönüşümün Termodinamiği

Martensitik dönüşümün temelinde Austenit-martensit faz dönüşümü mevcuttur. Bu dönüşüm, sıcaklığı yüksek austenit fazından ani soğuma etkisiyle bir M_s sıcaklığında başlayıp martensit bitiş sıcaklığı M_f de dönüştüğünü daha önce açıklanmıştı. Yani Austenit-martensit dönüşümünün esasında ısı-sıcaklık veya ısı-enerji olduğunu, bu durumu ise termodinamik ile açıklamak mümkündür.

Austenit kristal yapısı, bir T_o sıcaklığında termodinamiksel dengesini koruma eğilimindedir. Denge durumunda austenit ve martensit fazların serbest enerjileri eşittir. Kristal yapı bu denge sıcaklığından hızlıca soğutulması durumunda kritik bir (M_s) sıcaklığından sonra, austenit kristal temel yapısı içerisinde martensit yapı oluşmaya başlar. Sıcaklık farkı ($T_o - M_s$),

fazlar arasındaki kimyasal serbest enerjiyi, bu enerji de dönüşüm için gerekli olan sürücü kuvveti ortaya çıkartır (Şekil 2.17.). Bu M_s sıcaklığına martensit başlama sıcaklığı denir ve birçok farklı alaşımlar için farklı değerlere sahip olur. Denge sıcaklığının altındaki ve üstündeki sıcaklıklarda, austenit ve martensit fazlar serbest enerji ve minimum enerji kuralına göre kararlılıkları farklılık gösterir. Martensit fazın serbest enerjisi denge sıcaklığının altında olduğunda martensit faz kararlı, denge sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda ise austenit faz daha karardır [1].

Martensitik dönüşüm esasında yer alan biçimsel değışiklik austenit fazda önemli ölçüde elastik deformasyona sebep olur. Bir faz dönüşümü, iki faz arasındaki serbest enerji farkı ile meydana gelir. Bu durumda, dönüşüm ancak önemli miktarda aşırı soğuma sağlandığında, yani serbest enerji miktarındaki değışimin büyük olması durumunda gerçekleşir [1,63].



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

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

T_0 denge sıcaklığı için ileri sürülen görüş Şekil 2.17’de gösterilen, Salzbrenner ve Cohen tarafından Denklem 2.1’deki gibi, Tong ve Wayman tarafından ise Denklem 2.2’deki gibi T_0 sıcaklığı,

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

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

hesaba katmışlar [66].

Genellikle faz dönüşümleri, sabit basınç ve sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Bu bakımdan sıcaklığı sabit durumlarda entropi değişimi hesaplamak mühimdir. Nitekim basıncı sabit durumda entalpi ifadesinin türevini alırsak;

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

olur. Termodinamiğin birinci kanunundan faydalanırsak,

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

şeklinde yazılırsa;

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

bulunur. Bu durumda, basıncı sabit olduğu anda;

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

İfadesi elde edilir. Denklem sayesinde entalpi değeri (ΔH) biliniyorken, entropi değeri (ΔS) hesaplamak mümkündür. [64]. Ayrıca, entropi (S) termodinamiğin ikinci kanunu olup “rastgelelik ve düzensizlik” olarak bilinir.

Entalpi değişimini(ΔH), $\Delta H^{M \rightarrow A}$ martensit faz geçişinin değişik alaşımları için aynı anda ölçüm almışlardır. Bunun sonucunda $\Delta S^{M \rightarrow A} = \Delta H^{M \rightarrow A} / T_0$ ifadesiyle entropi değişimlerini hesaplamışlar. Bu hesaplama sonucunda ~%10'luk bir doğruluk payının var olduğunu belirtmişlerdir [65].

2.5. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kullanım Alanları

Şekil hatırlamalı alaşımlar uzay araştırmalarında, biyomedikalde, tıpta, otomotiv endüstrisinde, mikro elektromekanik gibi önemli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür malzemelerin seçilmesinin en önemli kriterlerinden birisi de malzemenin bulunduğu ortama uyumluluğun iyi sonuçlar vermesidir. Şekil hatırlamalı alaşımlar çok geniş kapasiteye ve büyük birim şekil değiştirme özelliklerine sahip olmasından dolayı bu gruba girmektedir. Bu akıllı ve yeni malzemeler bu dönemde, hareketlerindeki hızlı tepki verme özelliği ile artan ihtiyaçlar ve önemi giderek artan uygulamalarda genişçe bir alanda uygulama özelliğinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamalarda kullanmak ve uygun bir desen yapabilmek için

malzemenin yapısını, doğasını anlamak ve bu yönde hareket etmek elzemdir. Histerezis direnç, küçük taneli değişimler, süper elastik gibi etkileri yapısında barındırdığı için bu kompleks bir yapıya sahiptir [67]. Tablo 2.4'te ŞHA'ların potansiyel uygulamaları verilmiştir.

Tablo 2.4. Potansiyel ŞHA 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

Sekil hatırlamalı alaşımlar içerisinde endüstride ticari alanında oldukça önemli bir değere sahip olan iki çeşit alaşım bulunmaktadır. Bu alaşımlar NiTi alaşımları ve bakır temelli alaşımlar olmaktadır. Bu alaşımların sahip olduğu özellikleri bakımından birbirinden oldukça farklı görünmektedir. Bakır (Cu) temelli alaşımlarda % 4–5 olan şekil hatırlama ve şekil değiştirme değeri, NiTi alaşımlarda yaklaşık %8'dir. Daha fazla ısıl karalılığa sahip olan NiTi alaşımlar, aşındırmaya karşı hassas olan bakır (Cu) temelli alaşımlarla karşılaştırıldığında kusursuz bir aşındırma direncine ve oldukça güçlü bir süneklik özelliği mevcuttur. Ayrıca, bakır (Cu) temelli alaşımlar ucuz, eritilme ve geniş potansiyel dönüşüm sıcaklık aralığına (-200 °C -110 °C) sahiptirler. Bu bilgiler ışığında NiTi alaşımları ve bakır (Cu) temelli alaşımların kullanılacağı yere göre göz önünde bulundurulması gereken bazı avantaj ve dezavantajları vardır [69, 70].

Bahsedildiği gibi şekil hatırlamalı alaşımlar içinde en iyi bilinen NiTi ŞHA tipi, 1960'larda ABD Donanma Mühimmat Laboratuvarı Buhler ve Wiley tarafından geliştirilen Nitinol'dür. Nitinol alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının yaklaşık -200 °C -110 °C arasında çokça değişebilen aralıkta değerler alabilir. Bu aralıklardaki kimyasal bileşenler içinde yer alan NiTi ve bununla beraber ilave edilen diğer alaşım elementleri (bakır, alüminyum, demir vb.) bu tarz alaşımlarda görülen dönüşüm sıcaklıklarının bu denli geniş sıcaklık aralığında gerçekleşmesi önemli bir etkidir. Genel olarak NiTi alaşımı ağırlıkça yaklaşık % 55 nikel ve % 45 titanyum aralıklarından oluşur. Bu alaşım türü tıpta ve ortodontide yaygın olarak kullanıldığından, özellikleri iyi belgelenmiştir. Tablo 2.5'te hem austenit hem martensit formunda Nitinol SMA'ların özelliklerinin bir özetini sunmaktadır.

Tablo 2.5.Nitinol SMA'ların Özellikleri [19]

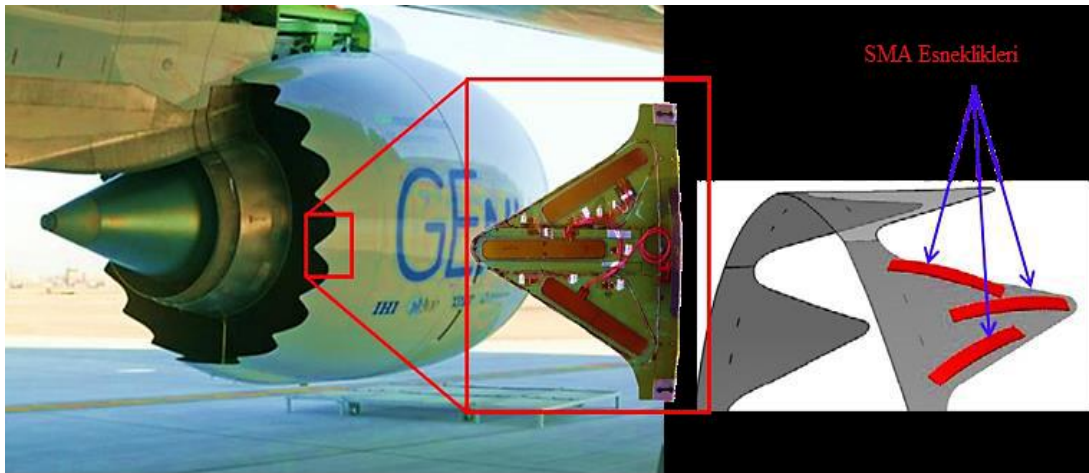
Özellik	NiTi SMA	
	Austenit	Martensit
Fiziksel Özellikler		
Erime Noktası	1240-1310°C	
Yoğunluk	6.45 g/cm³	
Termal Katsayı	0.28 W/cm°C	0.14 W/cm°C
Termal Genleşme Katsayısı	11.3 x 10 ⁻⁶ /°C	6.6 x 10 ⁻⁶ /°C
Mekanik Özellikler		
Üstün Çekme Dayanımı	895-1900 MPa	
Arızada Bozukluk	5-50% (tipik olarak 25%)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

2.5.1. Havacılık ve Uzay Uygulamaları

ŞHA'larının 1970'lerin F-14 avcı uçlarındaki hidrolik hatları için bağlamasının başarısından bu yana [71], çeşitli alanlarda giderek artan ve benzersiz özelliklerle donatılmış havacılık ve uzay uygulamalarına gün geçtikçe daha fazla ilgi duyulmaktadır. Uzay ve havacılıkta kullanılan parçalarda bulunan çeşitli özelliklerden dolayı ilgi giderek artmış olup bu özellikler: yapısal konektörler, titreşim damperleri, sızdırmazlık maddeleri, salma veya açılma mekanizmalarıdır [72].

1990'lı yıllarda, havacılık ve uzay araştırmaları, çeşitli uçuş koşullarında şekil değiştirme kabiliyetine ve sistem düzeyinde optimizasyona sahip aktif ve uyarlanabilir SMA yapılarına odaklandı. Örneğin, uçak “akıllı kanatları” için Savunma Geliştirme Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) [73], jet motorları için Akıllı Uçak ve Deniz Tahrik Sistemi Gösterme (SAMPSON) programı geliştirdiler [74].

Boeing 777-300 ER ticari uçak için bir GE90-115B jet motoru üzerine kurulmuş, değişken geometrili bir çevron (VGC) olarak bilinen SMA aktüasyonlu aktif tırtıklı bir aerodinamik cihaz geliştirmiştir. VGC cihazının kalkış sırasında gürültüyü azaltmada ve aynı zamanda uçuşun geri kalanında çevron sapmasını en aza indirerek seyir verimliliğini arttırmada çok etkili olduğu kanıtlanmıştır. VGC başarısının ardından, Calkins ve Mabe tarafından gözden geçirildiği gibi, Boeing, DARPA, NASA ve diğer ilgili araştırma kurumları tarafından yeni ŞHA tabanlı teknoloji programları başlatılmıştır [75]. Örneğin: değişken bir motor giriş kabiliyetine sahip bir uçağa temin edebilecek akıllı bir girişin; son derece sağlam, yeniden yapılandırılabilir bir rotor bıçağı ve rotor aerodinamik özelliklerini optimize eden büküm yapabilen rotor bıçağı olması gerekir. Son zamanlarda (Şekil 2.18.), VGC teknolojisine dayanan değişken geometri fan nodulu, jet motoru performansını geliştirme potansiyelini göstermiştir [76].



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

Dünya ortamında kullanılan malzemeler dünya dışındaki ay veya mars gibi yüzeylerde işe yaramıyor. Bu yüzden sürekli Ar-Ge çalışmaları yapan Avrupa Uzay Ajansı (NASA) bünyesinde bulunan Glenn Mühendisleri gezegenlerin yüzeyinde dolaşacak ekstrem şartlara dayanabilecek çığır açıcı bir tekerlek geliştirdi. Bilindiği gibi daha önce Ay'a inen araçta esnek çelik yaylı tekerlek kullanılmıştı. Fakat bu çözüm, içi hava ile doldurulmuş tekerleklere alternatif olsa da zamanla sorunlar çıkartıp eskiyorlardı. Plastik lastikler kısa sürede deformasyona uğrayıp kullanılamaz hale gelince hem hafif hem de mukavemeti yüksek metal bulma çabasına giriştiler.

NASA ekipleri yapılan Ar-Ge çalışmalarında geliştirdikleri tipik elastik malzemeler yerine, yük taşıyıcı bileşenler olarak yüksek gerilime maruz kalabilen yeni ŞHA yapılı alaşımlarının kullanımı, kalıcı hasar olmadan aşırı deformasyona dayanabilen bir lastik geliştirdiler (şekil 2.19). Radyal sertleştirme (Lastiğin iç kısmındaki bez dokusu) elemanları olarak şekil hatırlamalı alaşım kullanılması, ayrıca lastiğin yük taşıma kapasitesini de arttırılacak şekilde tasarlanmıştır. Geleneksel lastiklere eşit veya daha üstün çekiş gücü sağlayarak hem patlak arızaları hem de "az şişirilmiş" çalışma olasılığını ortadan kaldırarak araçlarda yakıt verimliliğini ve güvenliğini de artırır [78].



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

Gezegenlerin yüzeylerinde SMA yapılı yüksek performanslı, uyumlu lastikler geliştirmenin üç büyük yararı vardır. Bunlar:

1. Gezegenlerin şu anda mümkün olandan daha büyük yüzey bölgelerini keşfetmelerine izin vereceklerdir.
2. Araziye uydukları ve sert tekerlekler kadar batmadıkları için verilen kütle ve hacim için daha ağır taşıma yükleri taşıyabilirler.

3. SMA yapıları uyumlu lastikler darbelerden gelen enerjiyi orta ve yüksek hızlarda emebildiği için, mevcut Mars Rover aracının önemli ölçüde daha yüksek hızlarda hareket etmesi beklenen mürettebatlı arama araçlarında kullanılabilir [80].

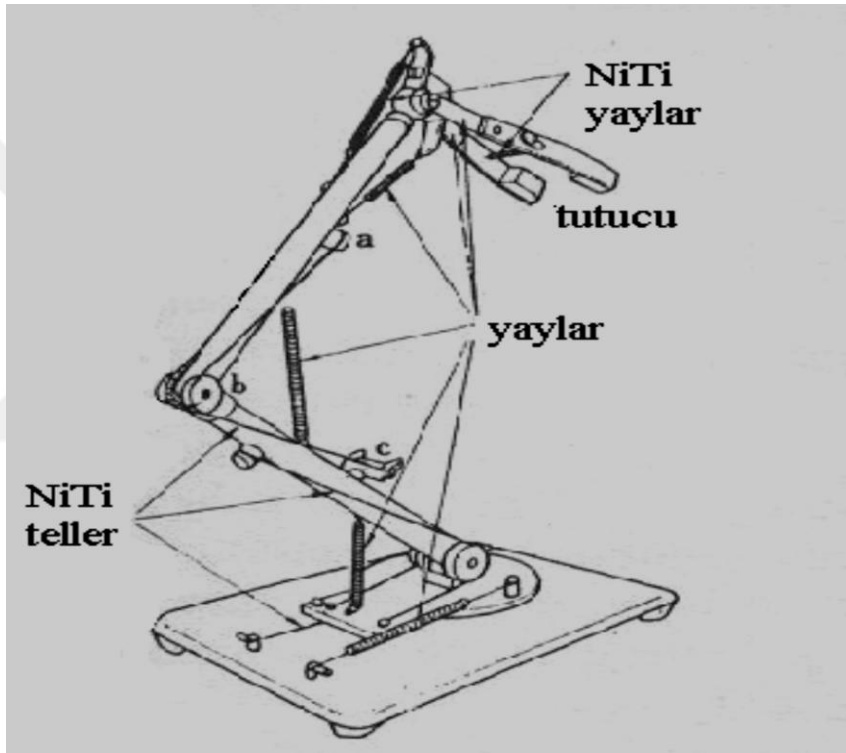
2.5.2. Robotik Uygulamaları

1980'lerden bu yana, ŞHA'lar, özellikle mikro aktüatörler veya yapay kaslar olarak, çeşitli ticari robot sistemlerinde kullanılmıştır [81-86]. Günümüzde, ŞHA yapıları robotik uygulamaların çoğu biyolojik olarak esinlenmiştir (yani biyomekanik) ve biyomedikal alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ŞHA'ların en geniş kullanım alanı olan Robotik alanla ilgili kullanılması beraberinde birçok zorluklar doğurmuştur. Bu zorlukların bazıları: donanım platformunun performansını ve minyatürleşmesini artırmak ve entegre sistemin zekasını iyileştirmek (yani küçük, daha hızlı, güvenilir ve özerk). Sıkıştırma zorlukları, düşük elektrik direnci, minyatür elektrik bağlantısı (mikro robotlar için), küçük zorlanma çıkışı, kontrol sorunları ve çok düşük verimlilik gibi birçok teknik konu mevcut ve çözülmesi gerekir. Bununla birlikte, bu modellerden bazıları uygun modelleme teknikleri, kontrol teknikleri ve geri bildirim sensörleri seçilerek ele alınmıştır. Örnek olarak, direnç geri besleme kontrolü, sınırlı hassasiyete sahip olmasına rağmen, ilave sensörlerin gerekliliğini ortadan kaldırdığından mikro robotlar için idealdir [86]. Son zamanlarda ŞHA yapıları birçok uçan robot geliştirilmiştir. Bunlardan (Şekil 2.20) Festo Grubu tarafından 63 cm kanat açıklığına sahip 44 cm uzunluğunda BionicOpter geliştirdi. Uçuş manevrası ve kararlılığı için başının bir yandan diğer tarafındaki hareketlerini kontrol etmek için dört SMA aktüatörüyle donatıldı. "BionicOpter" olarak da bilinen "yusufçuk", 13 serbestlik derecesine sahiptir, havada asılı kalabilir ve her yöne hareket edebilir [87].



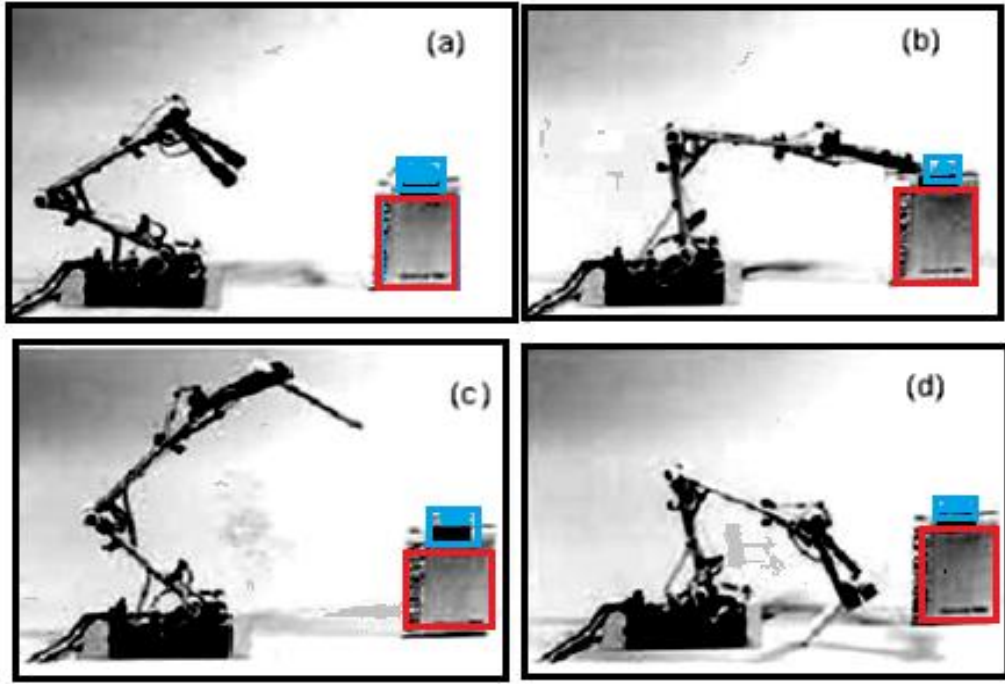
Şekil 2.20. Festo BiyonikOpter - Yusufçuk uçuşu ilham alınarak üretilmiş [87]

NiTi ve bakır esaslı Şekil hatırlamalı alaşımlar son yıllarda ticari değere sahip olmasının en önemli nedeni mükemmel davranış sergilemeleridir. Genellikle robotik malzemelerin yapısında NiTi tabanlı yay ve tel çokça kullanılarak malzemeye esneklik katar. tel ve yayların yapısında NiTi tabanlı alaşımlar kullanılarak ileriye götürülen, yüksekliği 0,16m, ağırlığı 60gr ve beş serbest dereceli modeli olan mikro robot Şekil 2.21’de verilmiştir. Kontrolü elektrik akımı ile yapılan mikro robot, yanına bırakılan bir cisme dirseklerde bulunan NiTi esaslı yaylar ve teller sayesinde yaklaşıyor ve uçlarında bulunan tutucularla NiTi yay vasıtasıyla sıkıştırma, bırakma ve kaldırma işlemlerini rahatlıkla gerçekleştirebiliyor [1].



Şekil 2.21. NiTi esaslı alaşımlarının hareket yeteneklerinin kullanıldığı mikro yapıdaki robot [1]

Yapısında NiTi ŞHA’lar kullanılarak üretilen mikro robotun davranışları belirli sınırlar çerisinde yaptığı davranışlar (hafif dolu kupaya yönelmesi, kupayı tutucu ile tutması ve yere bırakması hareketleri) Şekil 2.22’de verilmiştir.

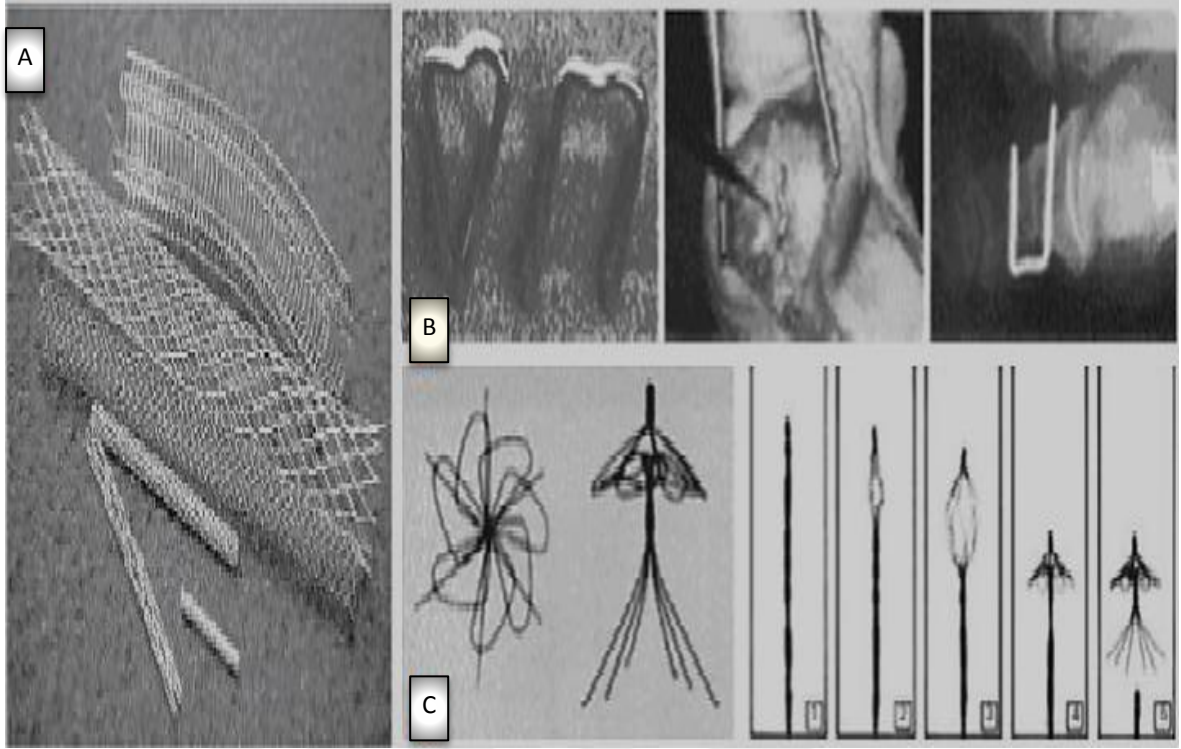


Şekil 2.22. Yapısında ŞHA'ların olduğu mikro robotun hareketleri [1]

2.5.3. Biyomedikal Uygulamaları

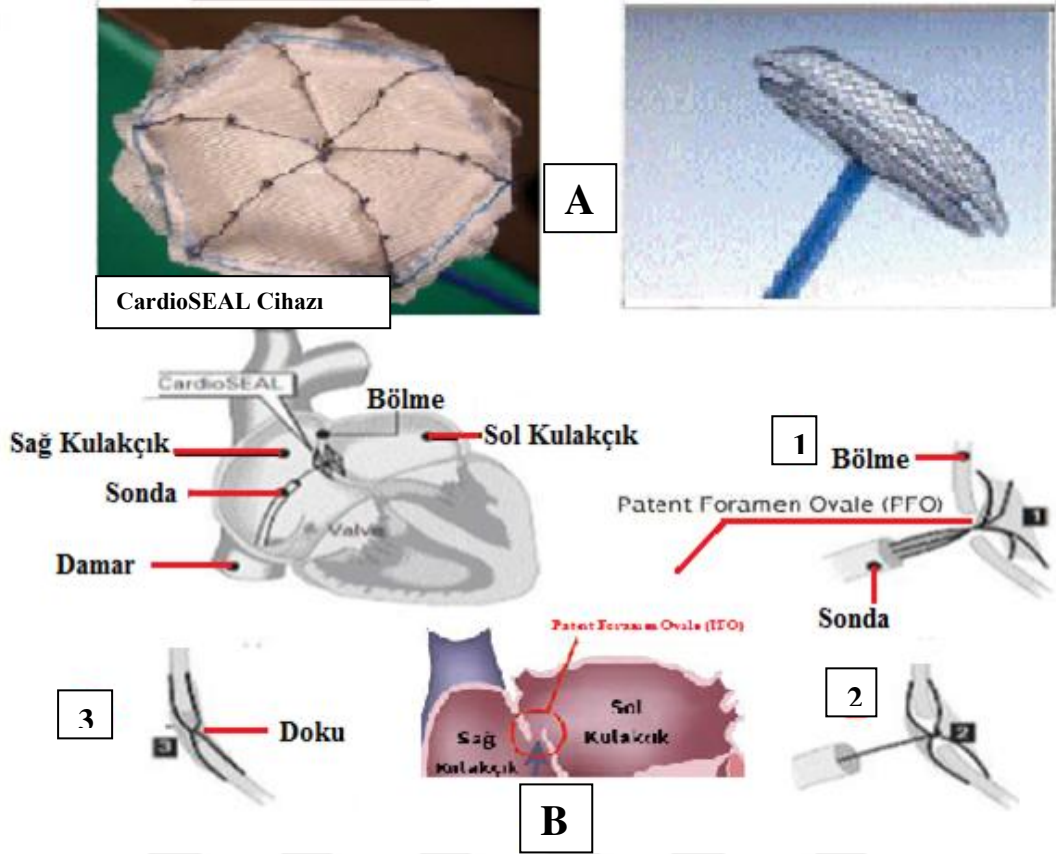
ABD Deniz Savaş Araçları Laboratuvarında çalışan Buehler ve arkadaşları yakın atomlu NiTi alaşımının şekil hatırlama durumunu keşfettiklerinden sonra Buehler ve ark. 1962'de, bu malzemenin diş hekimliğindeki implantlar için kullanılması önerildi ve 1971'de, bir NiTi alaşımından yapılan ilk süper lastik dişliler Andreasen tarafından tanıtıldı. ŞHA'lar minimal invaziv cerrahiye girdikten sonra biyomedikal alana önemli bir atılım yaptı. Biyomedikal alanda ek ticari uygulamalar, Eylül 1989'da ABD Gıda ve İlaç İdaresi (FDA) tarafından ortopedik cerrahi için Mitek cerrahi ürününün onaylanmasından sonra pazara sunuldu [88-90].

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



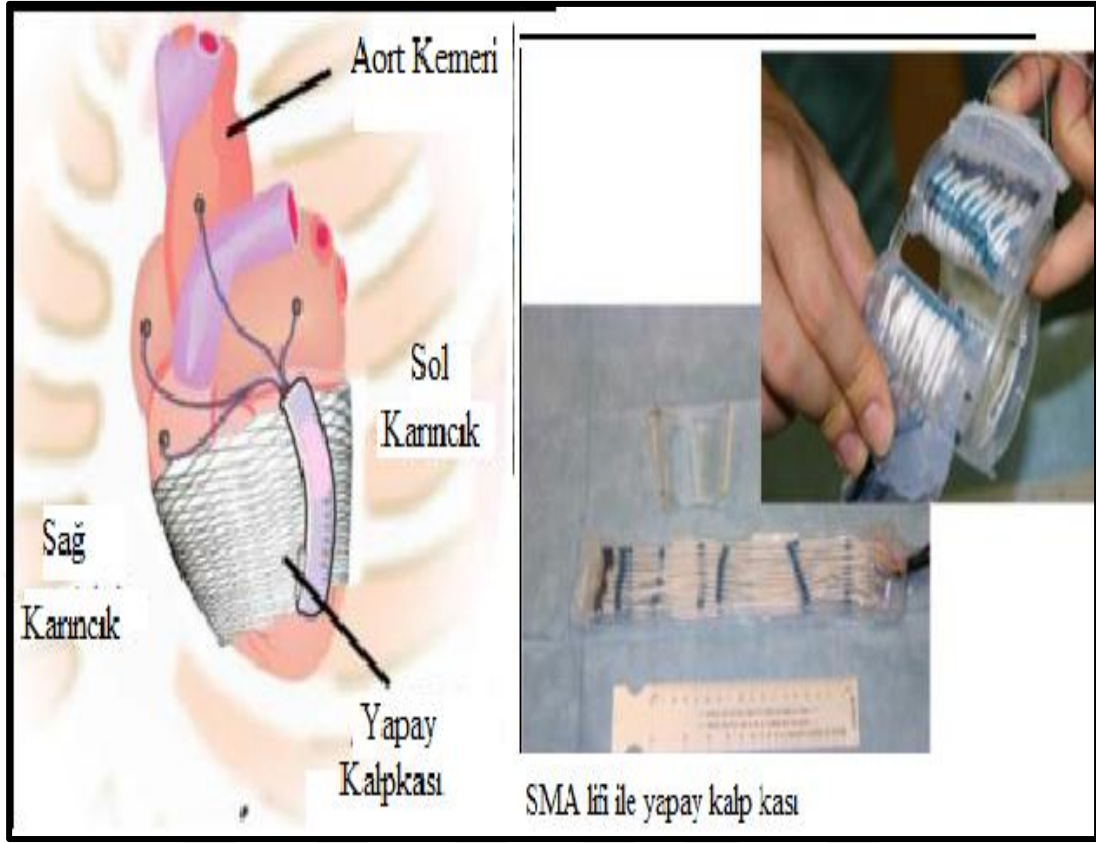
Şekil 2.23. ŞHA yapılı malzemeler; (A) Kendiliğinden genişleyen stentler. (B) Ortopedik zımba ve onun kemiğe uygulanması. (C) Kan dolaşımında dağılan pıhtıları tutan Simon Filtresi [98]

Atriyal Septal kapatma cihazı (atriyal deliğini kapamak için kullanılır). Cihaz, 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 olduğunda meydana gelen anormallik yaşam ümidini azaltabilir. Bu anormalliği düzeltecek geleneksel bir ameliyat çok tehlikelidir. Genel olarak hastanın göğsü açılır ve kulakçık deliği dikilir. Bu ameliyatın risklerinden dolayı birçok problem ortaya çıkabilir. Atriyal Septal kapama cihazı bu ameliyatın alternatifidir. Kalbin kulakçıkları arasındaki duvarda açıklık olmasına verilen isim olup bu cihaz, ŞHA yapılı tellerinden ve su geçirmez poliüretan filminden oluşur. Simon filtresinde olduğu gibi, bu cihazın yerleştirmek için ŞHA etkisi kullanılır. Geleneksel ameliyattan daha az tehlikelidir. Öncelikle cihazın bir yarısı kapalı şekilde ana toplardamardan kalbe bir sonda içinden sokulur. Sonra kulakçık deliği üzerine yerleştirilir ve açılır. Orijinal şeklini alır. Daha sonra cihazın ikinci yarısı birincide olduğu gibi yerleştirilir ve sonra her iki yarısı birleştirilir. Bu işlem deliği kapatır. Kanın bir kulakçıktan diğerine geçişini engeller. Cihazın uzun süreli bir periyotta kalbin içinde kalması sağlanabilir böylelikle kalp dokusu yenilenir. Cihazın kalp içindeki yeri, Şekil 2.24(B)'de gösterilmiştir [98].



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

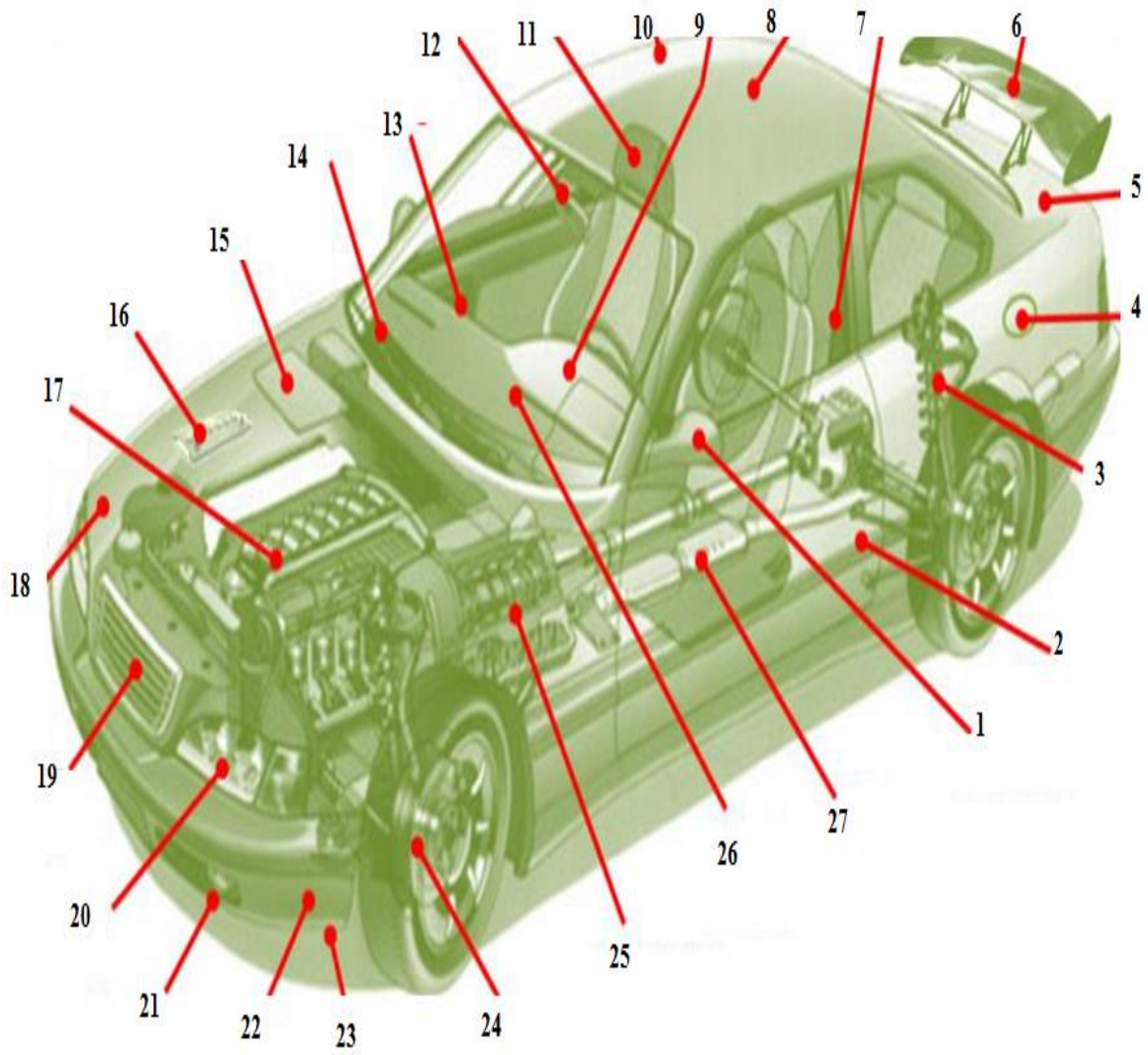
Paralel bağ yapılı bir miyokard destek cihazı olan sirkülasyonlu kovalent tipte bir ŞHA lifi, yüzeyine kan temas etmeden ventrikülün dışından doğal kasılma fonksiyonlarını destekleyebilen sistemlerinin bir nanoteknoloji yardımcısı kullanılarak, kalp krizi geçiren hastalarda ve hayat kurtarıcı bir acil durum sırasında kalp masajının ventriküler fibrilasyondan iyileşme için uygulanabileceği sonucuna vardılar. Son zamanlarda, araştırmacılar, doğuştan kalp hastalıkları olan hastalarda pulmoner dolaşıma yardımcı olmak ve Fontan dolaşımı için ŞHA liflerini kullanan bir mekanik dolaşım destek cihazı geliştirmişlerdir (Şekil 2.25) [99,100].



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

2.5.4. Otomotiv Uygulamaları

Modern araçlarda, gelişmiş performansa sahip daha güvenli ve daha konforlu araçlar için müşteri talebi nedeniyle sensör ve aktüatörler sayısı sürekli artmaktadır. Örneğin, yeni çıkan telsiz teknolojiler, otomotiv uygulamalarındaki elektromanyetik aktüatörler bir alternatif olarak SMA aktüatörleri için çok çeşitli fırsatlar sunmaktadır [101,102]. Şekil 2.26'da gösterilen Bileşenlerin çoğu zaman lineer aktüatörler (örneğin, Dikiz aynası katlaması, iklim kontrol kapakları ayarı ve kilitleme / mandallama kontrolleri) ve aktif termal aktüatörler. (örneğin Motor sıcaklık kontrolü, karbüratör ve motor yağlama ve güç aktarma kavramaları) [102,103]. Bununla birlikte, SMA geçiş kabiliyeti (aktif ve adaptif 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]

Otomotiv yapımında kullanılan parça yerlerinin gösterimi;

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 Kısımları, **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.** Patarya, **17.** Motor, **18.** Motor Kaputu, **19.** Radyatör Panjuru, **20.** Far, **21.** Sis Farı, **22.** Ön Tampom, **23.** Hava Haznesi, **24.** Fren Balata Sistemi, **25.** Şanzıman, **26.** Klima Kontrolü, **27.** Egzoz

3. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada ark ergitme yöntemiyle üretilen NiTiCu şekil hatırlamalı alaşımların mikroyapı ve termodinamik özelliklerini incelemek için çeşitli materyal ve metodlar kullanıldı. NiTiCu alaşımına Cu katkı oranına artmasıyla alaşımın faz dönüşüm sıcaklığında, termodinamik özelliklerinde, mikroyapılarında ve alaşımın mikrosertliğinde nasıl bir etkiye sahip olduğu incelendi.

3.1. Alaşımların Karakterizasyonu

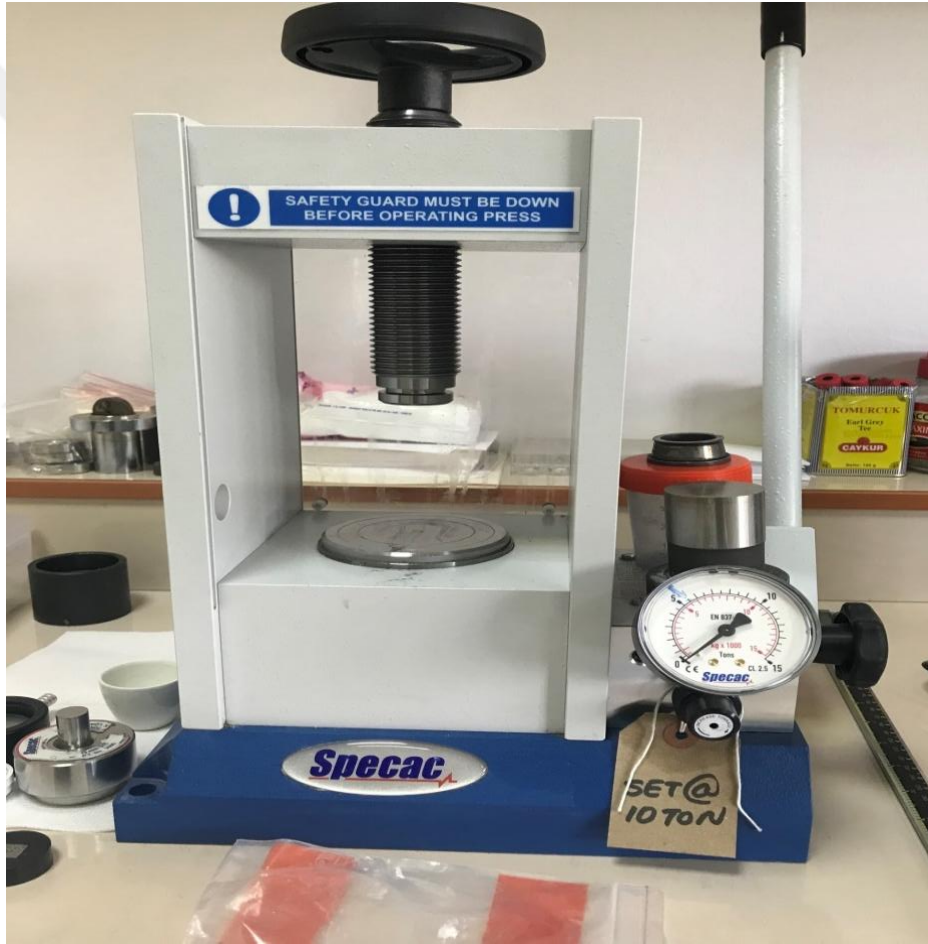
Ark ergitme yöntemi ile üretilen ve Tablo 3.1’de açık formülü verilen üç adet (A1, A2 ve A3) NiTiCu şekil hatırlamalı alaşımlarından uygun ebatlardan parçalar kesilerek bu parçaların çeşitli ölçüm ve analiz işlemleri yapılarak incelendi. Nitekim üzerinde çalışılan malzemelerin davranışlarının yeterince anlaşılıp yorumlanabilmesi için bazı özelliklerinin belirlenmesinde fayda vardır. Bundan dolayı, bu çalışmada üzerinde çalışılan alaşımların metalografik içyapıları (mikroyapıları), malzemelerin kimyasal kompozisyonu, mikroyapı faz içerikleri ve bazı termal özellikleri belirlenmiştir. Bu özelliklerin belirlenmesinde bazı teknikler kullanılmıştır.

1. Malzeme yüzeylerinde meydana gelen yapıları görüntülemek için optik mikroskopu kullanıldı.
2. Optik mikroskopu ile bazı yüzeylerde gözlenemeyen özellikler, optik mikroskoptan daha yüksek çözünürlüğe, netliğe ve odak derinliğine sahip olan SEM kullanılarak belirlendi. Ayrıca, EDX ölçümleri yapılarak da alaşımlardaki matrix fazlar belirlendi.
3. Alaşımların faz dönüşüm sıcaklıklarının ve entalpi değerlerinin belirlenmesi için diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ölçümleri yapıldı.
4. Alaşımların kristal yapıları ve faz tayinlerinin yapılabilmesi için X-ışınları difraktometresi (XRD) ölçümleri yapıldı. Ayrıca Vickers sertlik ölçümleri de alındı.

3.1.1. Numune hazırlama İşlemleri

NiTiCu şekil hatırlamalı alaşımlar için, $Ni_{50-x}Ti_{50}Cu_x$ ($x = \%wt. 14, 17, 20$) formülü baz alınarak % 99.9 saflıktaki Ni, Ti ve Cu (Alfa Aesar Marka -150 +325 mesh) tozu kullanıldı. Alaşımların homojen bir karışıma sahip olabilmesi için karıştırıldı. Elde edilen bu karışım Graseby Specac marka presleme cihazında (Şekil 3.1) 10MPa basınç altında pelet haline getirildi. Peletlenen bu numuneler ark ergitme yöntemiyle argon atmosferinde Edmund Buehler Arc Melter marka cihazda eritilerek alaşım grupları elde edilip Tablo 3.1’de verildi. Daha sonra külçe şeklinde dökülen alaşımlardan enine veya boyuna uygun boyutlarda küçük parçalar halinde

kesilen numuneler bakalite gömülerek gerekli zımparalama ve pasta ile parlatma işlemi yapıldıktan sonra yüzeysel morfoloji incelemelerinde kullanıldı. Özellikle numuneler ana parçadan kesilirken numunenin çok fazla ısınmamasına, aşırı deformasyona uğramamasına ve yüzeyin düzgün kesilmesine özen gösterildi. Kesme işlemi boyunca oluşacak ısı birikimlerini azaltmak için soğutucu sıvı eşliğinde kesildi. Elde edilen bu alaşım parçaları Protherm CWF-1200 marka kül fırınında (Şekil 3.2.) 1050 °C de 24 saat bekletilerek homojenleştirme işlemi yapıldı. Homojenleştirme sonucunda kül fırınında bulunan alaşımlar alınarak tuzlu-buzlu suya atılarak soğutuldu. Daha sonra numuneye herhangi bir kuvvet etki ettirmeden numune üzerindeki oksit tabaka yok edildi.



Şekil 3.1. Bu çalışmada kullanılan Graseby Specac marka presleme cihazı



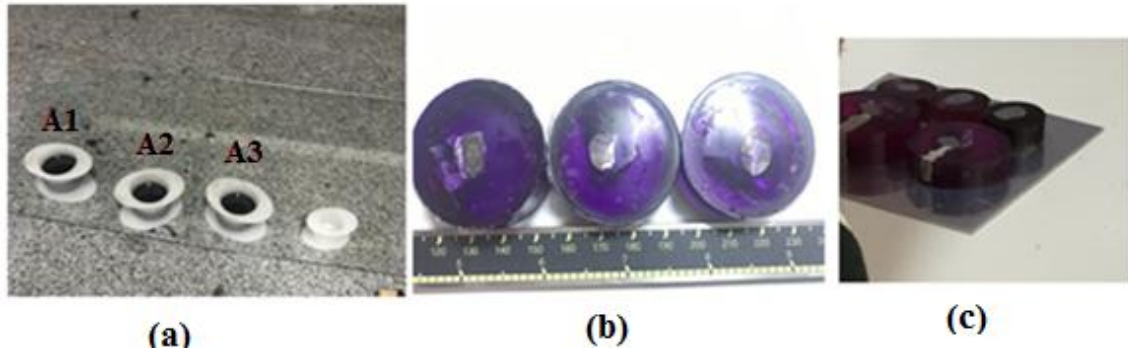
Şekil 3.2. Bu çalışmada kullanılan Protherm CWF-1200 marka kül fırını

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

Alaşımlar	Ni (%wt.)	Ti (%wt.)	Cu (%wt.)
A1 (Ni ₃₆ Ti ₅₀ Cu ₁₄)	36	50	14
A2 (Ni ₃₃ Ti ₅₀ Cu ₁₇)	33	50	17
A3 (Ni ₃₀ Ti ₅₀ Cu ₂₀)	30	50	20

3.1.2. Malzemenin Zımparalanması, Parlatılması ve Dağlanması

Numuneden kesilen parçaların ölçüm cihazlarında kullanılabilmeleri için yüzeylerinin temiz olması gerekir. Fakat kesme sırasında çoğu zaman numuneler ufak veya düz zeminde duramayacak kadar karmaşık şekilli olması durumunda bakalite alma işlemi uygulanır (Şekil 3.3). Bakalit kalıbının içine daha önce numaralandırılmış ve ters konulmuş numune üzerine, karıştırılmış reçine ve sertleştirici dökülerek bakalite alma işlemi tamamlandı. Belirli bir süre sonra reçine dondu ve numune kalıptan çıkartılarak Polisher MPS200 marka zımparalama makinesiyle (Şekil 3.4) zımparalandı. Numuneler mikroyapı ve mekanik analizler için parlatma işlemine tabi tutularak numuneler 80, 100, 120, 240, 400, 800, 1000, 1200 ve 2500 gritlik zımparalar kalından inceye doğru kullanarak ve her farklı zımpara için numuneyi 90 derece döndürerek zımparalanmıştır. Numune yüzeyindeki kesim esnasında oluşan deformeler düzeltildikten sonra numuneler kadife çuha ve elmas pasta ile parlatılmıştır. Bu işlem sonrasında numune yüzeylerinin oldukça parlak olması sebebiyle mikroskobun ışığını eşit oranda yaymaktadır. Dolayısıyla numunelerin mikroyapıları mikroskop altında yeterince ayırt edilememektedir. Bu bağlamda parlatılan numunelerin optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobunda daha net görüntü verebilmesi için yüzeylerinin dağlanması gerekmektedir. Onun için, optik mikroskop ve SEM görüntülerini daha belirgin ve daha net hale getirmek için bazı numunelerin yüzeyleri kimyasal sıvı çözeltiler kullanarak dağlanmıştır. Genellikle, dağlama işlemi için hazırlanan kimyasal sıvı çözelti alaşımın cinsine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yapılan literatür taramalarında NiTi ve türevi alaşımları için $1\text{HF}-4\text{HNO}_3-5\text{H}_2\text{O}$ kompozisyonuna sahip çözeltilerin uygun olduğu belirlenmiş, parlatılan numuneler 10ml HF-40ml HNO_3 -50ml H_2O içeren çözeltide 5-10 sn süre ile dağlanmıştır [107]. Dağlanan numunelerin yüzeyleri etil alkol ile temizlenerek kuruduktan sonra diğer karakterizasyon işlemleri için hazır hale getirildi.



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 şekilleri



Şekil 3.4. Bu çalışmada kullanılan Polisher MPS200 marka zımparalama cihazı

3.1.3. Optik Mikroskop

Alaşımın Optik ölçümlerini yapmak için, A1, A2 ve A3 alaşımlarında parçalar kesildi. Her üç numuneden kesilen parça kesim sırasında oluşan aksaklıkları ortadan kaldırmak için, Şekil 3.4’de gösterilmiş olan Polisher MPS200 zımparalama parlatma cihazını kullanmak sureti ile 200 numaralı kaba zımpara ile başlanılarak en ince zımpara olan 2500 numaralı zımpara ile zımparalama işlemi yapılmıştır. Mikroyapıların ortaya çıkartılması amacıyla elmas süspansiyonları ile yumuşak ve uzun tüylü parlatma kumaşı kullanılarak parlatılmıştır. Üretilen alaşımların yüzey morfolojilerini inceleyebilmek için optik mikroskop analizleri Şekil 3.5’de verilen Nikon MA 200 Optik Mikrograf cihazı kullanılarak yapılmıştır.



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

3.1.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX İncelemesi

Optik mikroskobu ölçümünde kullanılan numunelerin içyapıları optik mikroskop ile detaylı olarak gözlenemediğinden, optik mikroskoba göre daha yüksek çözünürlüklü ve odak derinlikli özelliğe sahip SEM ile incelenmiştir. SEM’de görüntü, voltajı hızlı elektronların malzemeye düşürülmesi, bu elektron demetinin malzeme yüzeyinde taratılması esnasında elektron-madde arasında görülen çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra katot ışınları tüpünün levhasına aktarılmasıyla görüntü oluşur. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kısa zamanda ve hassas ölçümler vermesinin yanı sıra yüzeyin üç boyutlu görüntülenmesi ve çok yönlü element analizi yapması açısından önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada, numunelerin mikroyapı analizi, alaşımlardaki elementlerin oranlarını belirlemek, yapıda oluşan fazların elementer 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 çalışılan şekil hatırlamalı alaşımlarda martensit-austenit faz dönüşüm sıcaklıklarının başlangıç-bitiş değerlerinin bilinmesi alaşım hakkında bir kaniya varabilmemiz açısından son derece önemlidir. Martensit-austenit dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan teknik DSC analizidir. Austenite-martensit faz dönüşümünü meydana getiren fiziksel etkenler alaşımın kinetik değişken üzerinde önemli bir değişime yol açar. Martensit-austenit dönüşüm için tanımlanan faz geçiş sıcaklıkları deneysel termodinamik metodlar kullanılarak bulunabilmektedir. Faz geçiş sıcaklıklarından faydalanan maddenin fiziksel özelliklerine ait bazı kinetik değişimleri de (entalpi, entropi, aktivasyon enerjisi, ergime enerjileri, özgül ısıları, kristalleşme, termal kararlılık, faz dönüşümleri gibi) teorik olarak hesaplanabilir. Yaptığımız çalışmalarda kullandığımız numunelerimizin DSC analizlerini yapabilmek için, çalışmalarımızda kullanılan üç alaşımdan da uygun boyutta parçalar kesilerek numuneler hazırlandı. Çalışma kapsamında üretilen üç alaşımdan (A1,A2,A3) martensit-austenit faz dönüşüm sıcaklıkları ile beraber, ekzotermik↔endotermik olaylarının birbirine dönüşme entalpilerinin belirlemek maksadıyla yapılan Diferansiyel Taramalı Kalorimetri analizlerinde Fırat üniversitesi Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında bulunan Perkin Elmer Sapphire diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.7). 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 -200 °C gibi düşük sıcaklıklara inebilme fırsatı doğdu.



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

3.1.6. X-ışınları Difraktometresi (XRD)

X-ışını difraktometresi, kristalin atom ve molekül halini belirleyebilmek için kullanılan bir analiz tekniğidir. X-ışını difraktometre metodu fazların kristal yapılarını belirlenmesine yarayan önemli bir yöntemdir. Kristalin yapısal gösterimi, cismin difraksiyon deseninden belirlenir. Kristal katılarda numunenin özelliğini belirleyecek olan keskin ve şiddetli pikler indislenerek örgü değişkenleri ve kristal yapıları tespit eder [108]. Bunun için, Ölçüm yapılmadan önce gerekli ısıtma işlemlere tabi tutulan üç adet numuneden (A1,A2,A3) uygun ebatlarda parçalar kesilerek ve bu parçalardan sağlıklı veriler almak için yüzeylerindeki kesime ait kirlilik ortadan kaldırıldıktan sonra numuneler kadife çuha yüzeyindeki ince tüyler sayesinde ve parlatmada kullanılan elmas pasta ile parlatıldı. Farklı termomekanik işlemlere tabi tutulmuş ve homojenize edilmiş numunelerden oluşan kristal yapı Şekil 3.8’de gösterilen Bruker Discover D8 (XRD) ile yapıldı.



Şekil 3.8. Bu çalışmada kullanılan Bruker Discover D8 (XRD) analiz sistemi

3.1.7. Vickers Mikrosertlik Ölçümü

Genel olarak malzemeler üzerinde yapılan en kapsamlı deneyin, malzemenin sertlik değerini ölçmektir. Bunun başlıca nedeni deneyin çok basit oluşu ve diğer ölçümlere kıyasla numunenin yapısını daha az bozmasıdır. Tablo 3.1 de verilen numunelerin Vickers Sertlik ölçümleri yapıldı. Vickers Sertlik ölçümü, malzemenin mikroyapısı ile mikrosertliği arasındaki bağı anlamada ve yorumlamada olağanüstü bir ölçüme sistemidir. Vickers Sertlik ölçümleri için, alaşımdaki matrix yapının (ana faz) ve ikincil fazın sertliği “AOB test sistem” marka vickers mikrosertlik cihazı ile ölçüldü. Mikrosertlik için uygulanan yük 50gr seçildi ve her bir yapıdan en az üç ölçüm alınarak aritmetik ortalamaları hesaplandı.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Genellikle ŞHA alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar çok geniş alanlara yayılmaktadır. ŞHA üzerine dünya çapında ve geniş bir alanda birden fazla çalışma bulunsa da, olayın mikroyapısı ve termodinamiği üzerine pek fazla ayrıntılı bilgi ve belgeye rastlanmamaktadır. Bu durumdan yola çıkarak, fazla deneysel çalışma bulunmayan bu alanı daha da genişleterek literatürde bu konuda az değinen çalışmayla karşılaştırma fırsatımız olacaktır. Bu nedenle yapılan bu çalışma literatüre önemli katkı sağlayacaktır.

4.1. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Ölçüm Sonuçları

NiTiCu ŞHA'nın kullanım alanları açısında faz dönüşüm sıcaklıkları ve histerizesi önemlidir. Buna göre, şekil hatırlamalı alaşımların faz dönüşüm sıcaklıklarının tayinine yönelik değişik uygulamalar mevcuttur. Bu uygulamalardan biri Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizidir. Bu yöntemle alaşımlardan alınacak uygun ebatta küçük bir numunenin ısıtılıp soğutulması sonucunda göstereceği ekzotermik ve endotermik piklerin incelenmesi ile faz dönüşüm sıcaklıklarının tespitidir. Bu nedenle, şekil hatırlamalı alaşımlarda martensit-austenit dönüşümünün başlama ve bitiş sıcaklıklarını belirlemede kullanılan karakterizasyon tekniklerin en önemlilerinden birisidir. Bu çalışmada DSC (Diferansiyel tarama kalorimetresi) analizi, A1, A2 ve A3 alaşımlarından alınan numunelere uygulanmıştır. Teorik kısımda değinildiği gibi, elde edilen alaşımlarda sıcaklığın belli bir değerin altına indirilmesi işlemi (soğutma) ile martensit faza, sıcaklığı belli bir değerin üzerine çıkartılmasıyla (ısıtma) austenit faza geçiş olduğu belirtilmişti. Eğrilerde austenit başlama (A_s), austenit bitiş (A_f), martensit başlama (M_s) ve martensit bitiş (M_f) sıcaklıkları belirlendi. Şekil eğrileri üstünde ise faz dönüşüm sıcaklıkları ile birlikte faz dönüşüm entalpileri de gösterildi. Şekillerden görülen piklerin başlama ve bitiş noktaları genelde dönüşüm sıcaklıklarını ifade etmektedir.

4.1.1. Alaşımların Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Ölçüm Sonuçları

A1, A2 ve A3 alaşımlarından elde edilen Eğrilerde austenit başlama (A_s), austenit bitiş (A_f), martensit başlama (M_s) ve martensit bitiş (M_f) sıcaklıkları belirlenmiştir. Genel anlamda alaşım ısıtılınca endotermik reaksiyon meydana gelir ve martensit faz austenit faza dönüşür. Soğutma sırasında ise egzotermik 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,

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

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

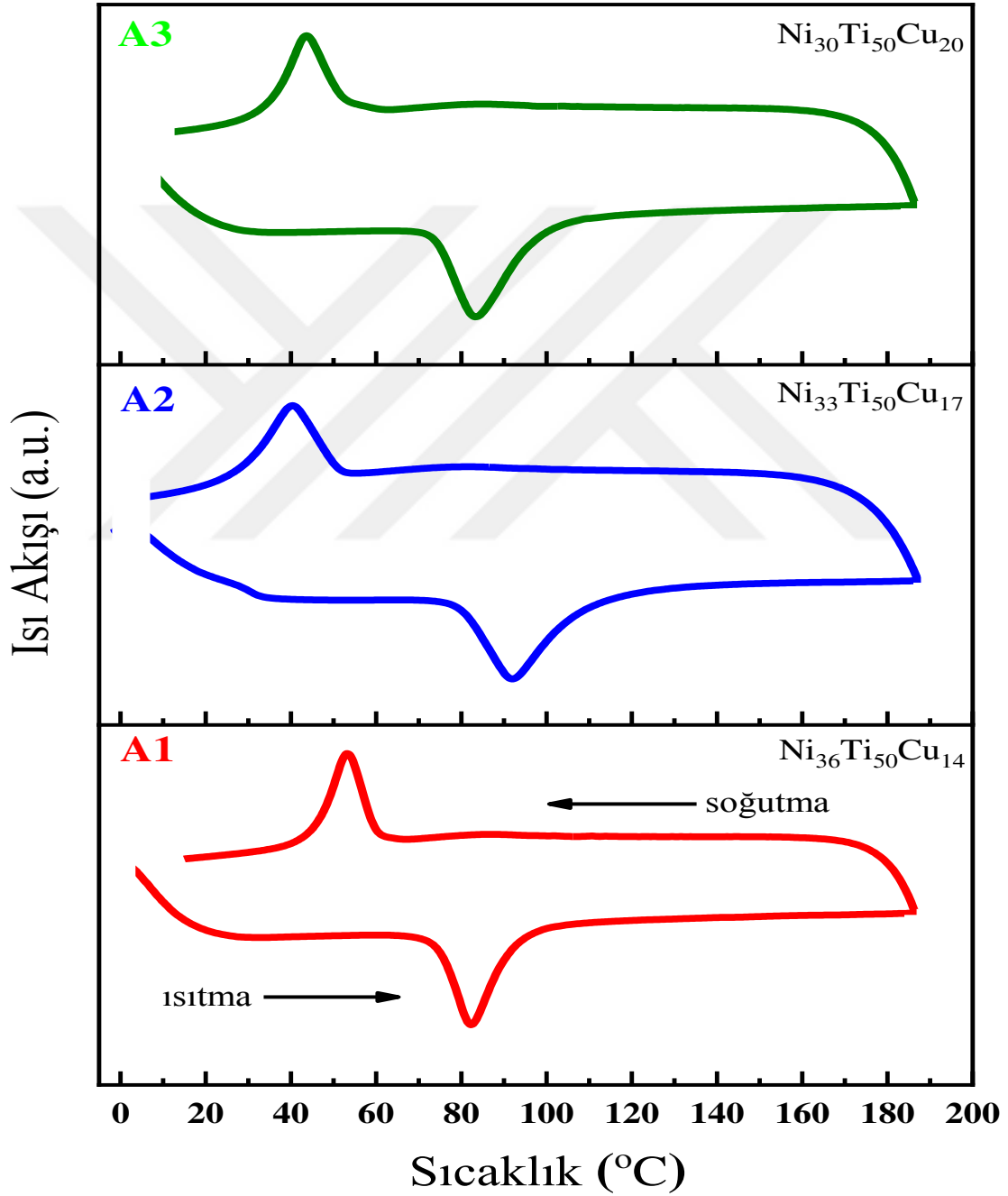
denklemleri kullanılarak denge sıcaklığını (T_0) ve entropi (ΔS) değerleri hesaplandı [64,66]. Hesaplanan A1, A2 ve A3 alaşımına ait değerleri Şekil 4.1 ve Tablo.4.1’de verilmiştir.

47.3 mg’lık A1 alaşımı için Diferansiyel Taramalı Kalorimetri ölçümleri 10°C/dk ısıtma-soğutma hızlarıyla azot gazlı ortamında yapıldı. Elde edilen veriler ışığında A1 alaşımı için Austenit başlama sıcaklığı $A_s=74,1$ °C ‘dir. Austenit bitiş sıcaklığı $A_f= 93,1$ °C, $M_s= 60,0$ °C ve $M_f=44,7$ °C” dir. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri ölçümleri sonucunda kalorimetrik değişim incelendiğinde, endotermik davranışın başladığı sıcaklığın 74,1 °C olduğu, 82,3°C’de eğrinin en başucuna ulaşıldığı, dönüşümün bittiği sıcaklığın 93,1°C’ ve entalpisinin 9,37mJ/mg. olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ters dönüşümünde ise kalorimetrik değişime bakıldığında 60,0°C sıcaklığından sonra egzotermik davranışın başladığı, 53,4°C’de en başucuna ulaşıldığı ve 44,7°C’de ise dönüşümün sona erdiğini ve alaşımın entalpi değerinin -10,5 mJ/mg olduğu tespit edilmiştir.

Üretilen 109.5 mg’lık A2 alaşımı için Diferansiyel Taramalı Kalorimetri ölçümleri 10°C/dk ısıtma-soğutma hızlarıyla azot gazlı ortamında yapılmıştır. A2 alaşımı için Austenit başlama sıcaklığı $A_s=79,2$ °C ‘dir. Austenit bitiş sıcaklığı $A_f= 110,2$ °C, $M_s= 52,0$ °C ve $M_f=28,2$ °C” dir. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri ölçümleri sonucunda kalorimetrik değişim incelendiğinde, endotermik davranışın başladığı sıcaklığın 79,2 °C olduğu, 92,0°C’de eğrinin en başucuna ulaşıldığı ve dönüşümün bittiği sıcaklığın 110,2°C ve entalpisinin 9,81 mJ/mg olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ters dönüşümünde ise kalorimetrik değişime bakıldığında egzotermik davranışın başladığı sıcaklığın 52,0°C olduğu, 40,2°C’de eğrinin en başucuna ulaşıldığı, 28,2°C’de ise dönüşümün sona erdiği ve entalpisinin -11.0 mJ/mg olduğu tespit edilmiştir.

Üretilen 66.200 mg’lık A3 alaşımı için Diferansiyel Taramalı Kalorimetri ölçümleri sonucunda 10°C/dk ısıtma-soğutma hızlarıyla azot gazlı ortamında yapılmıştır. A3 alaşımı için Austenit başlama sıcaklığı $A_s=74,4$ °C ‘dir. Austenit bitiş sıcaklığı $A_f= 98,8$ °C, $M_s= 53,0$ °C ve $M_f=35,1$ °C” dir. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri ölçümleri analizi sonucunda kalorimetrik değişim incelendiğinde, endotermik davranışın başladığı sıcaklığın 74,4 °C olduğu, 83,6°C’de

eğrinin en başucuna ulaşıldığı ve dönüşümün bittiği sıcaklığın $98,8^{\circ}\text{C}$ ' ve entalpisinin $8,20 \text{ mJ/mg}$ olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ters dönüşümünde ise kalorimetrik değişim bakıldığında egzotermik davranışın başladığı sıcaklığın $53,0^{\circ}\text{C}$ olduğu, $43,8^{\circ}\text{C}$ 'de eğrinin en başucuna ulaşıldığı ve $35,1^{\circ}\text{C}$ 'de ise dönüşümün sona erdiği ve entalpisinin $-9,67 \text{ mJ/mg}$ olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. A1, A2 ve A3 alaşımlarına ait DSC grafiği

Tablo.4.1. A1, A2 ve A3 Alaşım gruplarının dönüşüm sıcaklık değerlerinin gösterimi

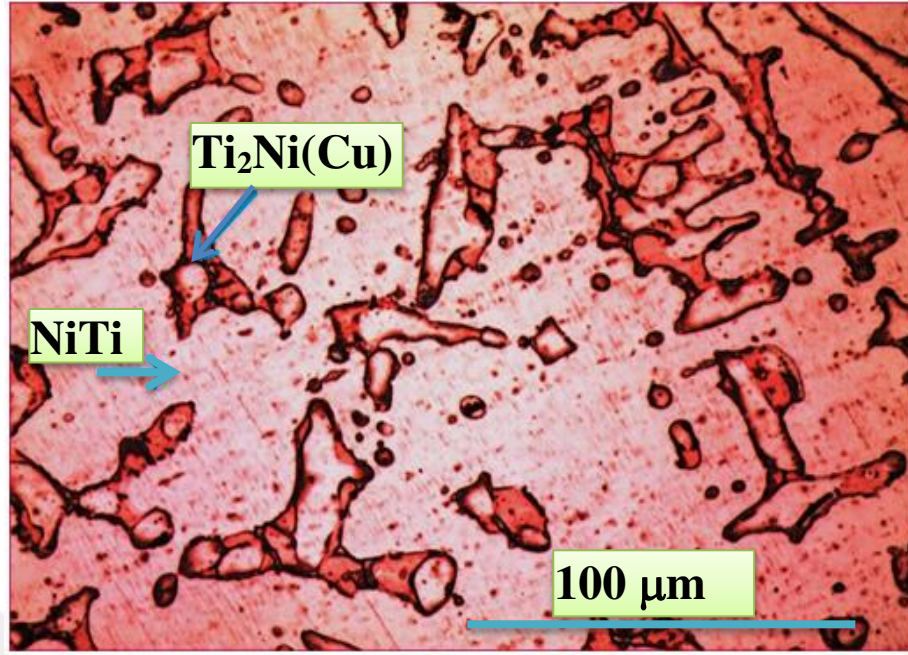
ALAŞIMLAR	A _s (°C)	A _p (°C)	A _f (°C)	M _s (°C)	M _p (°C)	M _f (°C)	ΔH_H (J/g)	ΔH_C (J/g)
A1 (Ni ₃₆ Ti ₅₀ Cu ₁₄)	74.0	82.3	93.0	60.0	53.4	44.8	-9.37	10.5
A2 (Ni ₃₃ Ti ₅₀ Cu ₁₇)	79.2	92	110.0	52.0	40.2	28.2	-9.82	11.0
A3 (Ni ₃₀ Ti ₅₀ Cu ₂₀)	74.4	83.6	100.0	53.0	43.8	35.0	-8.2	9.67

4.2. Optik Mikroskop Ölçüm Sonuçları

Tablo 3. 1’de verilen tüm A1, A2 ve A3 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 HNO₃-50ml H₂O 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 mikrografları alındı.

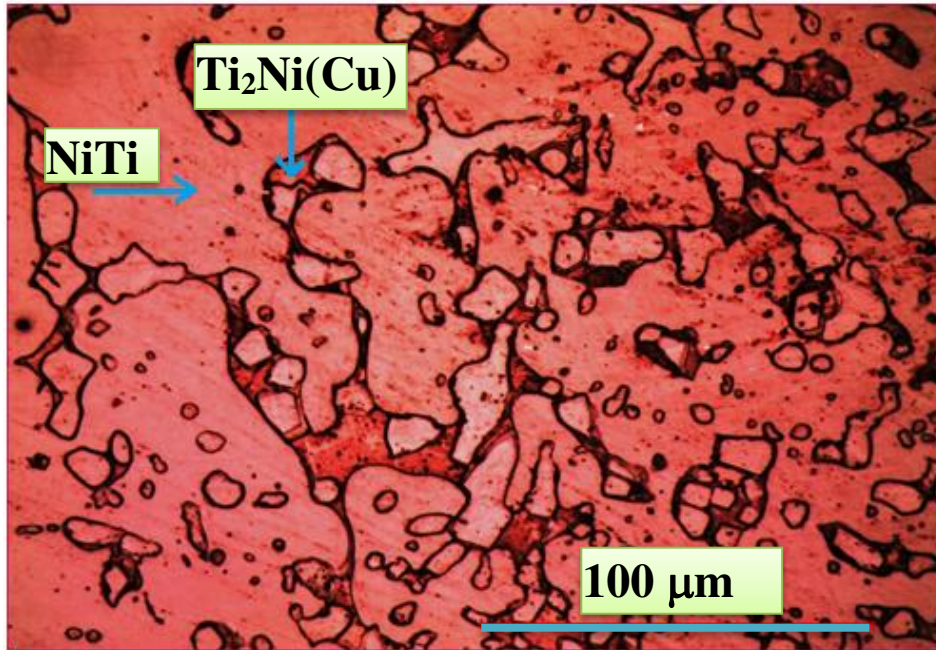
4.2.1. Alaşımların Optik Mikroskop Ölçüm Sonuçları

Üretilen şekil hatırlamalı alaşımlarının yapılarını çözümlemek için Şekil 4.2’de, A1 alaşımına ait farklı bölgelerden çekilen optik mikrografları alındı. Bu optik mikrografları gözlemlediğimizde malzemede faz dönüşümlerinin olduğu, tane içlerinde yoğun olmamakla birlikte bir miktar çökelti oluşumu mevcut olup taneler ve tane sınırları açık bir şekilde görülmektedir. Optik mikrograflarına baktığımızda numuneler içerisinde benzer fazların varlığı görülmektedir. Koyu ve açık bölgelerde yapının genelinde oluşan faz NiTi fazıdır ve az da olsa numune içine yayılmış diğer faz ise Ti₂Ni(Cu) fazıdır.



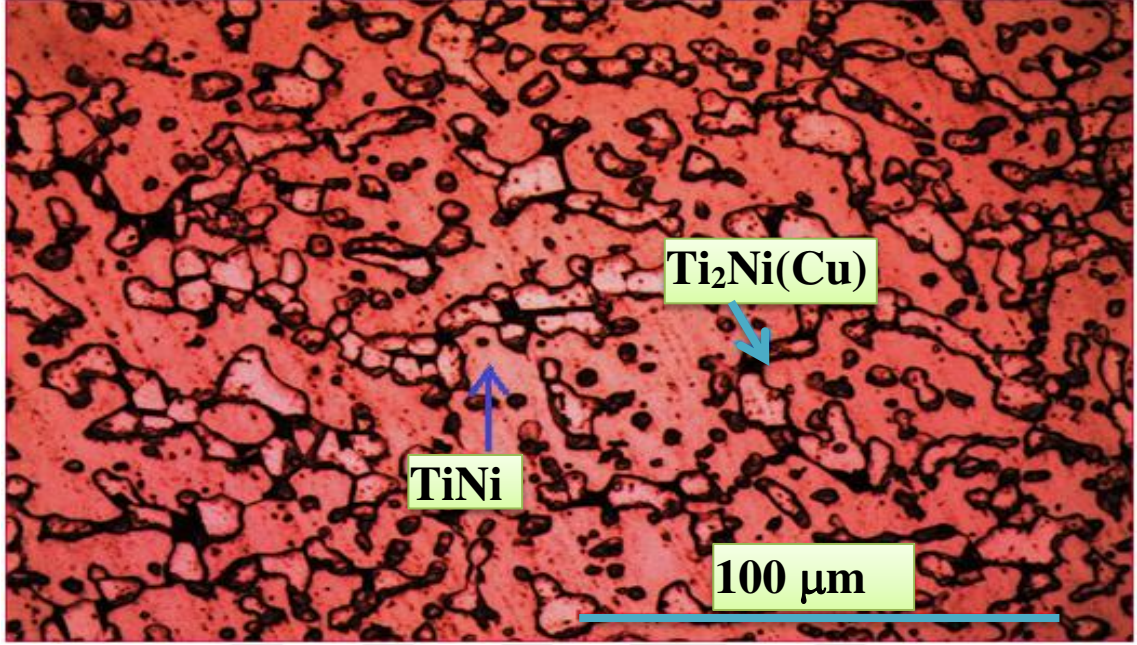
Şekil 4.2. A1 Numunesinin farklı bölgelerinden 500x büyütmeyle çekilen yüzey mikrografı

Fakat A1 alaşıma ait tane büyüklükleri farklılık göstermektedir. Diğer numunelerden olan ve farklı bölgelerden alınan A2 alaşımına ait optik mikrograflar Şekil 4.3'te verilmiştir. A2 alaşımına ait mikrografı incelediğimizde farklı tanelerde oluşan martensit plakaların olduğunu, şekli ve tane büyüklüklerinin de birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir.



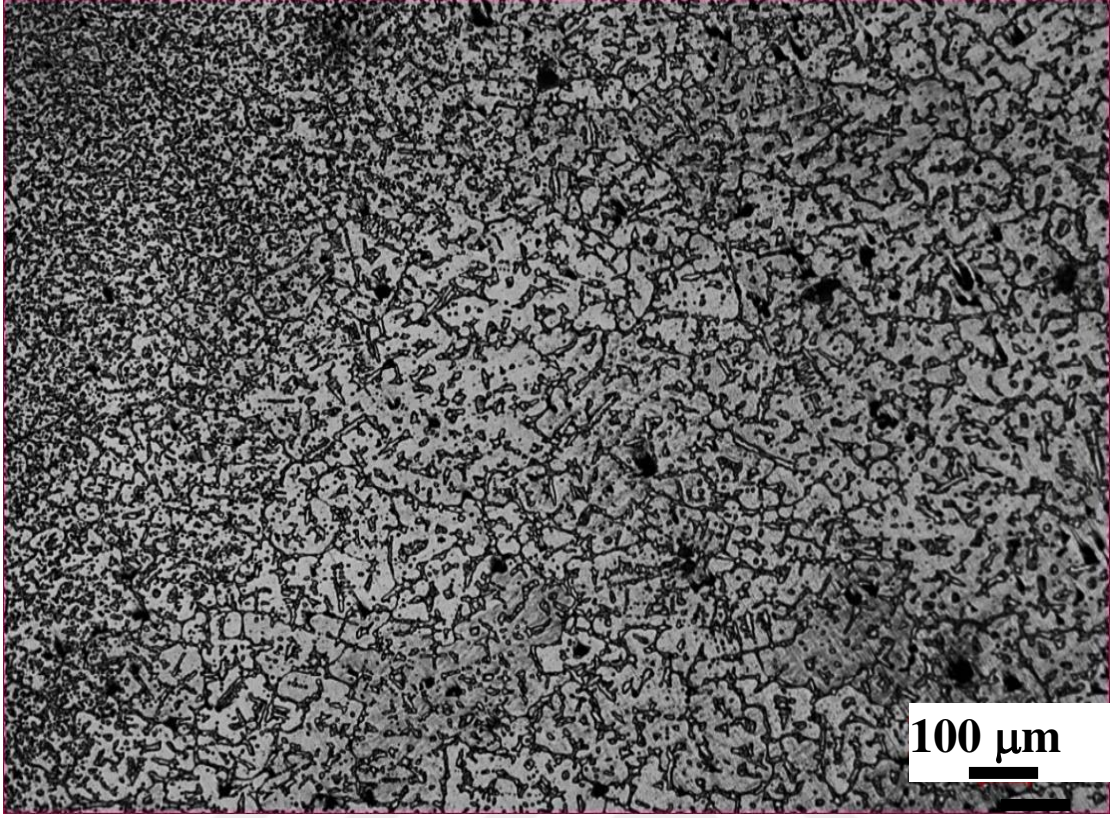
Şekil 4.3. A2 Numunesinin farklı bölgelerinden 500x büyütmeyle çekilen yüzey mikrografı

A3 alaşımının farklı b6lgelerinden alınan optik mikrografları şekil 4.4'te verilmiştir. Yine alaşım incelendiğinde, alaşımın yapısındaki taneler ve tane sınırları net bir şekilde g6r6lmektedir.

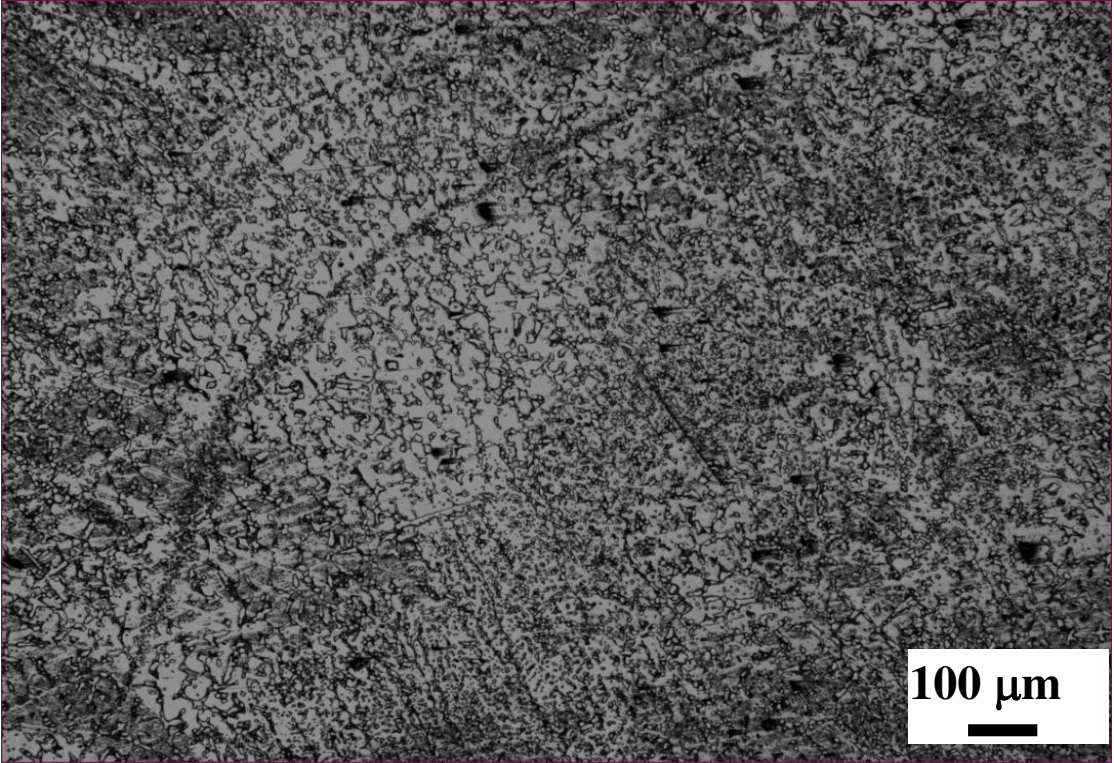


şekil 4.4. A3 Numunesinin farklı b6lgelerinden 500x b6y6tmeyle çekilen y6zey mikrografı

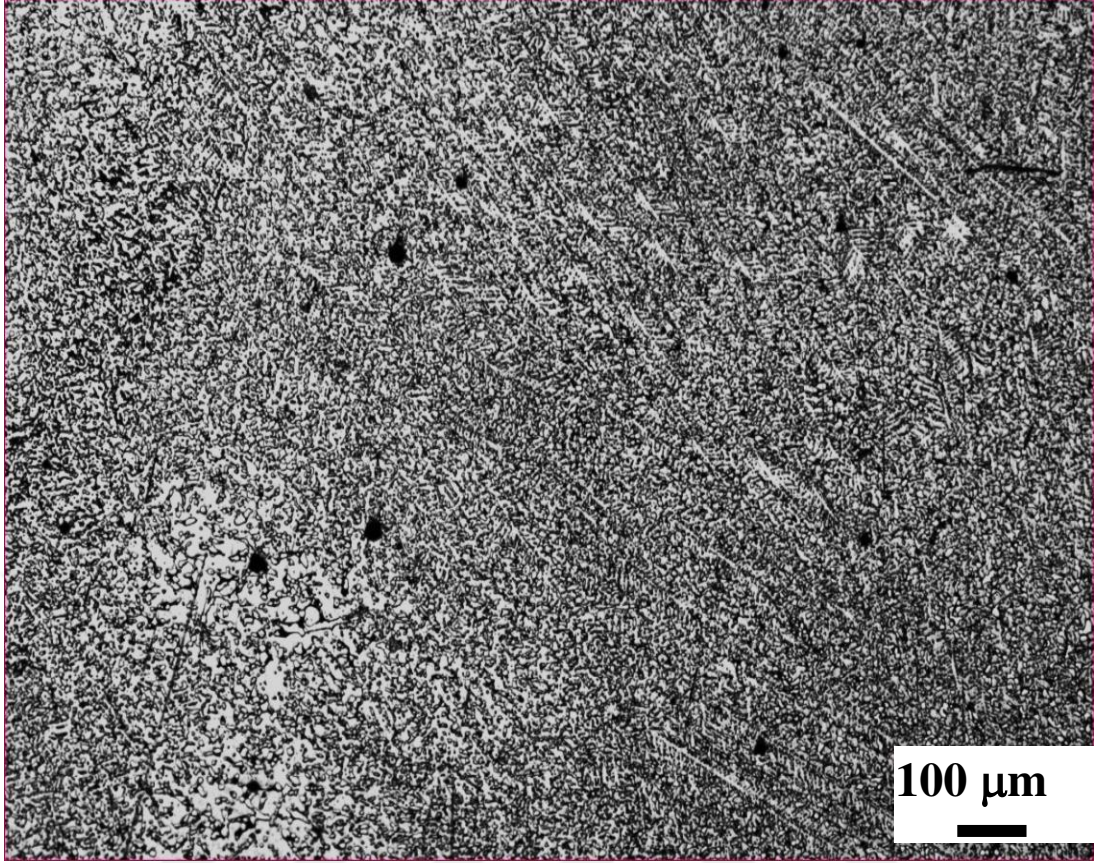
Ayrıca A1, A2, A3 alaşımına ait 50x b6y6tme ile alınan optik mikrografları şekil 4.5, şekil 4.6 ve şekil 4.7'de verilmiştir. Bu mikrograflardaki şekil hatırlamalı alaşımların mikroyapıları kıyaslandığında, ağırlıkça artan %Cu miktarıyla numunelerin mikroyapısında bakırca zengin çok k66k taneli tortulların yoğunluğunun da arttığı g6r6lmektedir. Kısaca, NiTiCu alaşımına ağırlıkça % Cu ileve oranının artmasıyla alaşımdaki austenit fazın daha baskın hale geldiği g6zlemlenmiş ve XRD 6l6mleriyle de desteklenmiştir. Nitekim 6l6 bir alaşım elementi olarak Cu ilavesi, ikili bir NiTi alaşımına kıyasla martensitik d6n6ř6m6n karakteristik sıcaklıklarının artmasına neden olur.



Şekil 4.5. A1 Alaşımına ait 50x büyütmeyle yüzey mikrografi



Şekil 4.6. A2 Alaşımına ait 50x büyütmeyle yüzey mikrografi



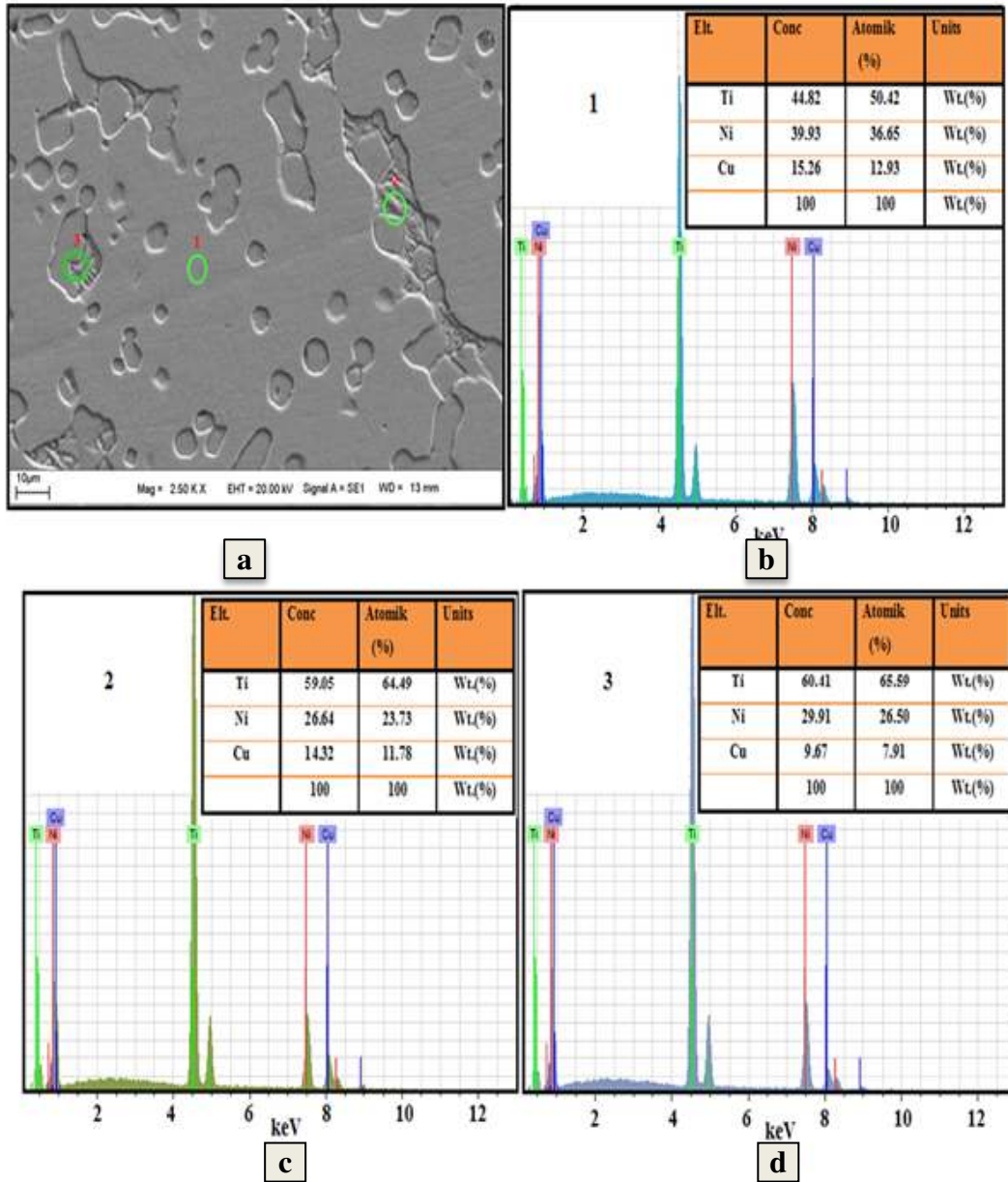
Şekil 4.7. A3 Alaşımına ait 50x büyütmeyle yüzey mikrografi

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

Tablo 3. 1’de verilen tüm numunelerden (A1,A2,A3) parçalar kesilip bakalit içine sabitlendi. Numunelere parlatma ve dağlama prosedürleri uygulandıktan sonra, numunelerin mikroyapılarının daha net ve düzgün görülebilmesi, mevcut fazlar ve bu fazların mikroyapı içerisindeki dağılımlarını belirlemek için optik mikroskoba göre daha yüksek çözünürlüklü ve odak derinlikli özelliğe sahip SEM ile incelenmiştir. Ayrıca bu gözlemlerin yapıldığı cihazın EDX bileşeni yardımıyla, kristal yapının gözlenen bölgelerinde element analizi yapıldı. Bu çalışmada, ayrı ayrı numune hazırlama sürecinde tespit edilen oranların EDX ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması halinde, istenilen değerlerle kıyaslandığında oranların yaklaşık olarak birbiriyle uyduğu söylemek mümkündür.

4.3.1. Alaşımların SEM - EDX Ölçüm Sonuçları

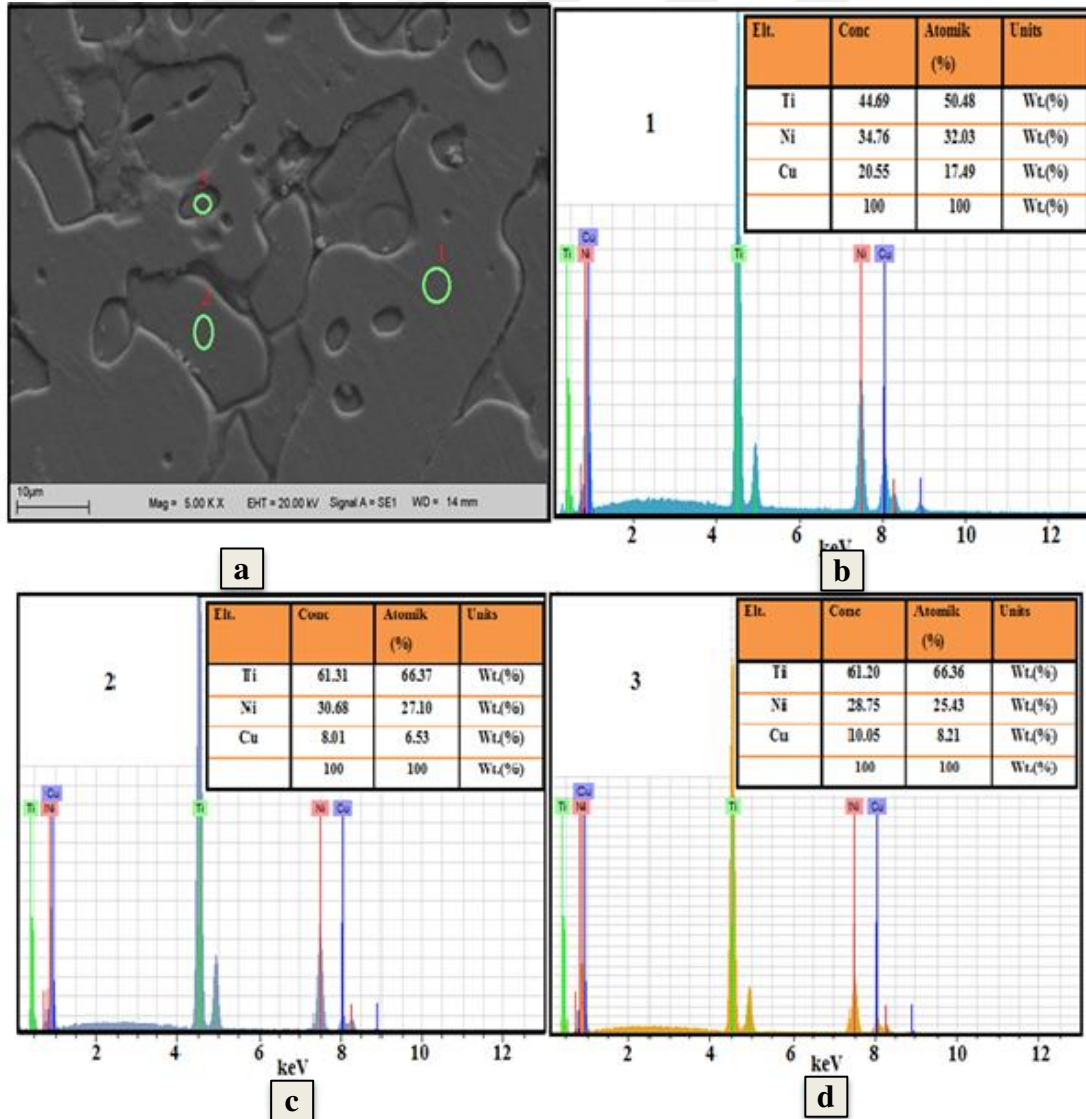
Şekil hatırlamalı alaşımlarda, iki yönlü martensit ve austenit faz geçişlerinin en iyi gözlemlendiği alaşım NiTiOL alaşımları olduğu bilinmektedir. Alaşım yüksek sıcaklıkta B2 austenit fazda kararlı bir yapıya sahiptir. Fakat alaşım homojenleştirilme sıcaklığında fırından alınıp, tuzlu+buzlu su içerisine atılarak ani soğutma işlemi yapıldığında alaşımın bir kısmı martensit faza dönüşür. Yapılan deneysel işlemlerden sonra numunelerin oda sıcaklığındaki faz durumu X-ışın difraksiyonu ile belirlenmeye çalışıldı. A1 alaşımına ait numunenin Taramalı Elektron Mikroskobunun mikroyapısı ve EDX bilgisi Şekil 4.8' de verilmiştir. Şekil 4.8 (a)'da görüldüğü gibi A1 alaşımının SEM mikroyapısında 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 Ti_2Ni fazına rastlanmıştır. Ayrıca yapı içerisinde belirtilen fazların varlığı X-ışın sonuçları ile de uyushmaktadır. Hem austenit hem martensit fazda ortak rastlanan faz Ti_2Ni fazıdır. Bu faz titanyumca zengin alaşımlarda görülür. Her iki alaşımda da titanyum miktarı atomikçe %50 nin üzerindedir. Ti_2Ni çökelti fazı çukur olan bölgeler olarak tespit edilmiştir. Hepsi şekil üzerinde gösterilemediğinde birkaç tanesi işaretlenmiştir. Çukur olan bölgeler dışındaki yerlerin B19'(NiTi) martensit faz olduğu tespit edilmiştir. Buna göre A1 alaşımda genel EDX sonucu, titanyum oranı %60, nikel oranı da %29'dur. Bu sonuca göre çukur bölgelerde Ti_2Ni fazı vardır. Isıl işlem uygulanmış A1 numunelerinde yapının daha homojen bir hale geldiği ve nikel matrisinin yanında ara yüzeylerinde bakırın yer aldığı gözlenmiştir. Ayrıca A1 alaşımında bir miktar da B2(NiTi) fazına rastlanmıştır. Şekil 4.8(b), (c) ve (d)'de A1 Alaşımına ait EDX görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.8. A1 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüleri

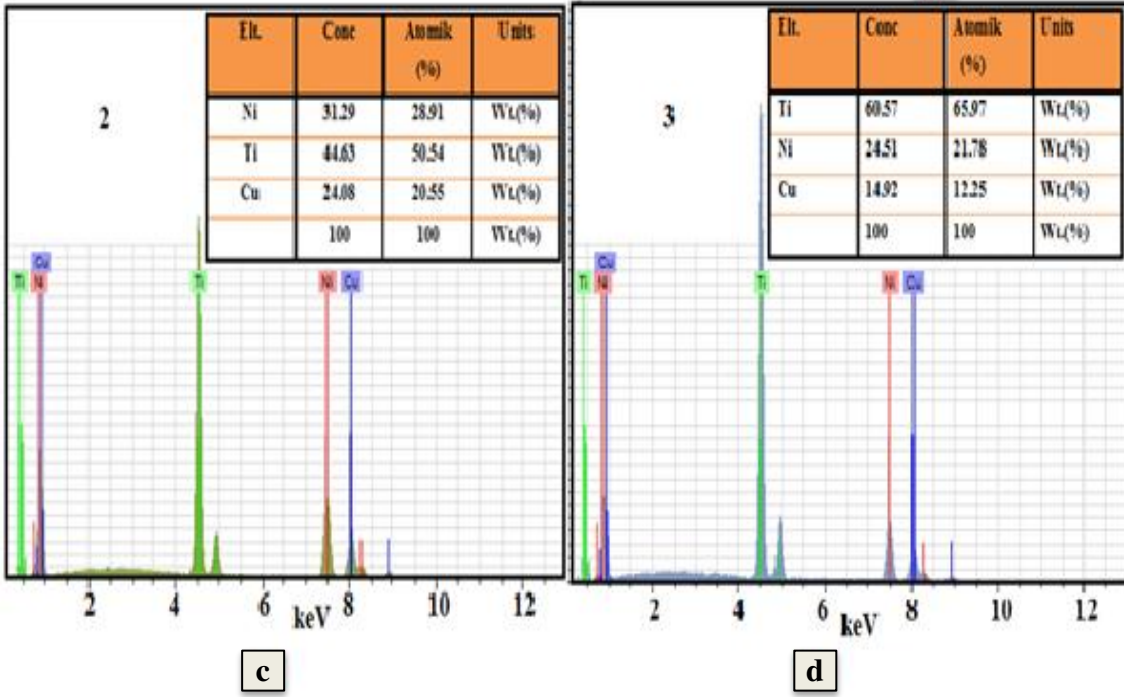
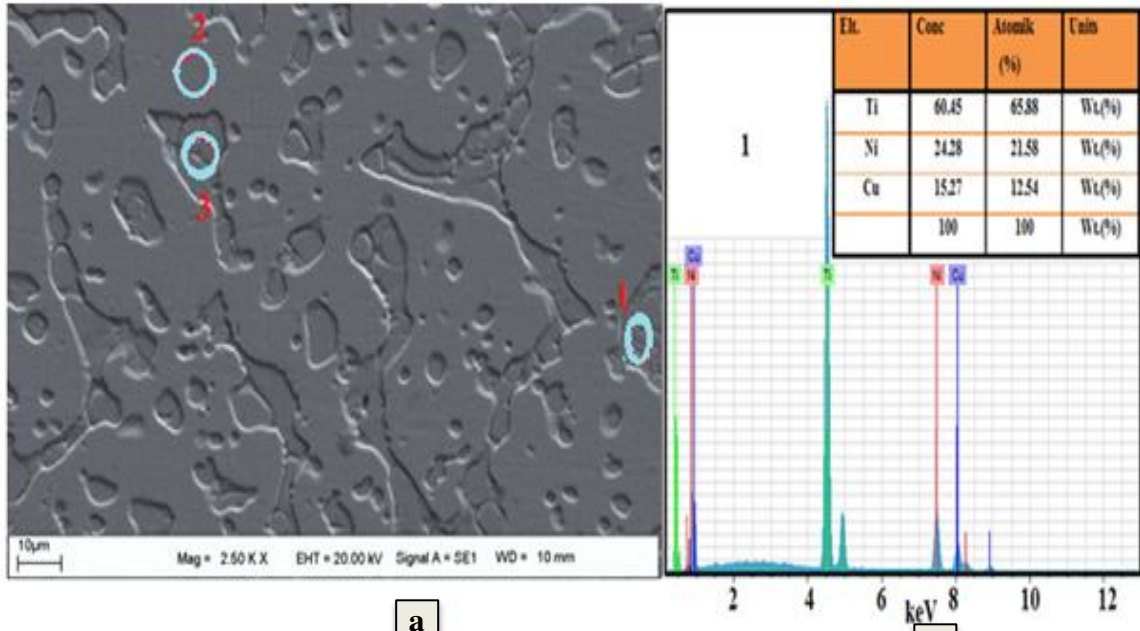
A2 alaşımına ait numunenin Taramalı Elektron Mikroskopunun mikroyapısı ve EDX verisi Şekil 4,9'da gösterilmiştir. Şekil 4,9(a)'da görüldüğü gibi A2 alaşımının SEM mikroyapısında oluşan fazları belirleyebilmek için her bir farklı faz üzerinden EDX analizi alınmıştır. 2 ve 3 bölgeleri çukur 1 bölgesi ise 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 A2 alaşımında genel EDX sonucu, titanyum oranı ~%66, nikel oranı da ~%32'dir. Bu sonuca göre çukur bölgelerde Ti_2Ni fazı vardır. Isıl işlem uygulanmış A2 numunelerinde yapının daha homojen bir hale geldiği ve nikel matrisinin yanında ara yüzeylerinde bakırın yer aldığı gözlenmiştir. Ayrıca A2 alaşımında EDX sonuçlarına göre, B2 $NiTi$ (Cu) fazına ve Ti_2Ni (Cu) 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 4,9(b), (c) ve (d)'de A2 Alaşımına ait EDX görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.9. A2 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüleri

Şekil hatırlamalı A3 malzemesinin SEM mikroyapısı ve EDX verisi Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.10 (a)'da görüldüğü gibi A3 alaşımının SEM mikroyapısında oluşan fazları belirleyebilmek için her bir farklı faz üzerinden EDX analizi alınmıştır. 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. Nitekim Her iki alaşımda da titanyum miktarı atomikçe %50'nin üzerindedir. Ti_2Ni 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 A3 alaşımda genel EDX sonucu, titanyum oranı ~%66, nikel oranı da ~%29'dir. Bu sonuca göre çukur bölgelerde Ti_2Ni fazı vardır. Isıl işlem uygulanmış A3 numunelerinde yapının daha homojen bir hale geldiği ve nikel matrisinin yanında ara yüzeylerinde bakırın yer aldığı gözlenmiştir. Ayrıca A3 alaşımında EDX sonuçlarına göre, NiTi fazına ve Ti_2Ni (Cu) fazlarına rastlanmıştır. Yakın zamanda Mehrabi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda NiTiCu ŞHA'larında bakır (Cu) derişimine bağlı olarak ikizlenmeye benzer martensit yapının varlığını tespit etmişlerdir [110]. Schuster ve arkadaşları NiTiCu ŞHA'larında ötektik matrisinde Ni, Ti içeren karakteristik çökeltiyle birlikte, bakır (Cu) derişimine bağlı olmakla beraber Ti_2Cu , Ti_2Ni ve $Ti_2(Ni, Cu)$ karmaşık bileşiklerin varlığını desteklemişlerdir [111]. Bu çalışmada A3 alaşımının EDX analizlerinde artan bakır oranına bağlı olarak matris içerisindeki bakır dağılımındaki artış kaydedilmiştir. Bu artış Cu içeren alaşımların $Ti_2(Ni, Cu)$ çökeltileridir ve malzemenin plastiklik 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 4.10(c) ve Şekil 4.10(d)'de A3 Alaşımına ait EDX görüntüleri verilmiştir.



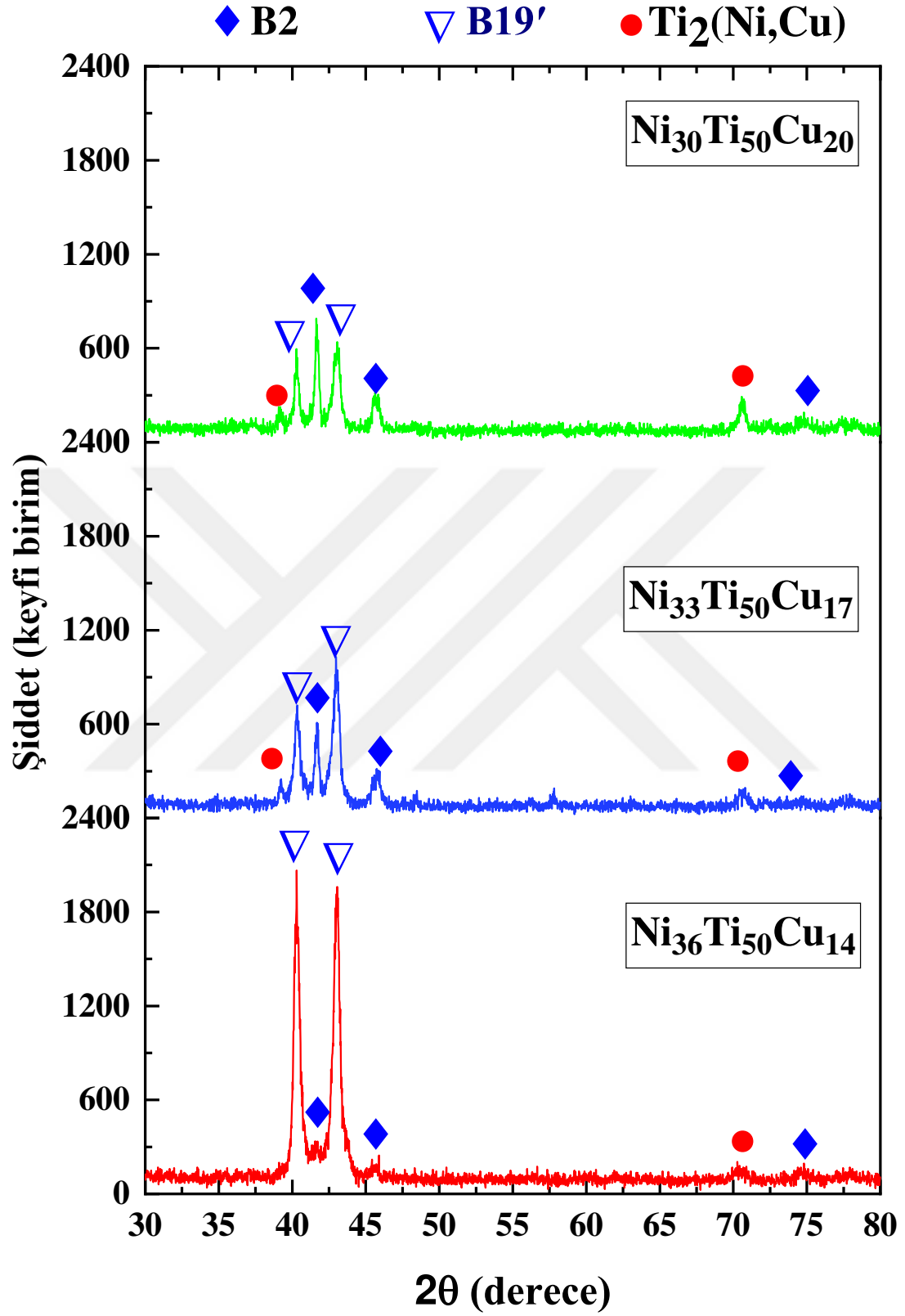
Şekil 4.10. A3 Alaşımına ait SEM-EDX görüntüler

4.4. Alaşımların X-ışını Ölçüm Sonuçları

Ark ergitme metoduyla üretilen NiTiCu alaşımlarının faz yapılarının belirlenmesi için XRD ölçümleri Bruker Discover D8 X-ray difraction (XRD) aleti yardımıyla tayini tespit edildi. Protherm CWF-1200 marka kül fırınında 1050 °C de 24 saat homojenleştirilmiş olan A1, A2 ve A3 alaşımları tuzlu-buzlu su içerisine atıldıktan sonra bu alaşımların kristal yapı özellikleri ve alaşımlardaki fazlar X-ışını difraktometre cihazı ile ölçülmüştür. X ışını ölçümü, oda sıcaklığında 30°-80° aralığında yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda alaşımların elde edilen x ışınları deseni Şekil 4.11’de verilmiştir. X ışınları ölçümlerinde elde edilen sonuçlar, literatür ve SEM-EDX ölçümleri ile karşılaştırılıp gerekli analizler ve yorumlamalar yapılarak alaşımların elde edilen kırınım pikleri indislenmiştir [113].

A1 alaşımında, 41°’de B19’ (martensit faz) fazına ait pik görülmüştür. Bu pikin literatürlerde de B19’ martensit fazına ait olduğu bilinmektedir. 45° de B2 (austenit faza) fazına ait pik ile 43.02°’de Ti₂(Ni, Cu faz) fazına ait pike rastlandı. A2 alaşımında, 41.40° ve 46.40°’de B2(austenit faz) fazına ait, 42.50° ve 43.02°’de B19’(martensit faz) fazına ait, 39.70° ve 70.60°’de Ti₂(Ni, Cu) fazına ait piklere rastlanmıştır. A3 alaşımında da 42.20°, 45.80° ve 74.90°’de B2(austenit faz) fazına ait pik, 40.02° ve 43.80°’de B19’ (martensit faz) fazına ait pik, 39.70° ve 70.80°’de Ti₂(Ni, Cu) fazına ait piklere rastlanmıştır. Üç alaşımın XRD grafikleri incelendiğinde, piklerin şiddetinin bakır (Cu) oranı arttıkça azaldığı görülmüştür. A1, A2 ve A3 alaşımlarında Martensit faz, austenit faz ve çökelti fazları olduğu tespit edilmiştir.

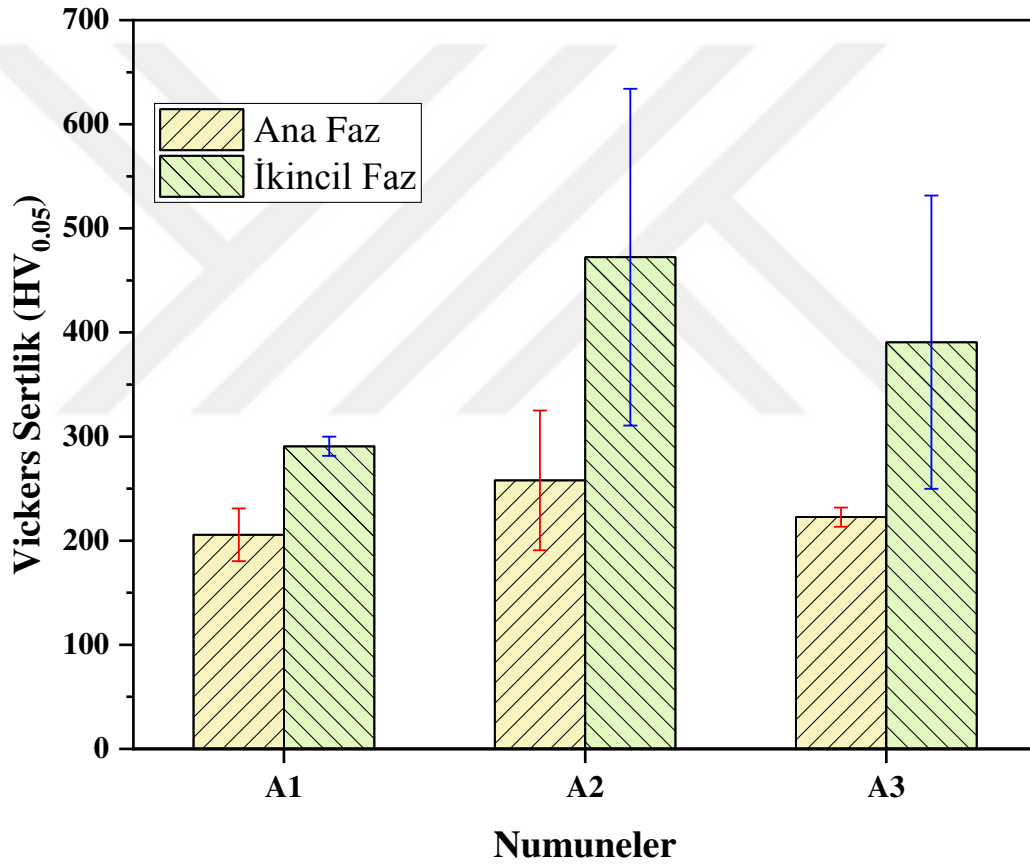
Şekil 4.11’e bakıldığında A1, A2 ve A3 alaşımlarına ait XRD grafiklerinde açıkça görüldüğü gibi, Ni ve Cu miktarlarındaki değişime bağlı olarak pik şiddetlerinde değişimler meydana gelmektedir.



Şekil 4.11. A1, A2 ve A3 alaşımlarının X-ışını desenleri

4.5. Vickers Mikrosertlik Ölçümü Sonuçları

Şekil 4.12’de alaşımların, matrix ve ikincil fazları için vickers mikrosertliği ölçümü görülmektedir. Bütün alaşımlarda, ikincil fazın ana fazdan daha sert yapıya sahip olduğu açıktır. Ayrıca, Şekil 4.12’ye bakıldığında A1, A2 ve A3 alaşımlarında, A2 alaşımının hem ana fazının hem de ikincil fazın vickers sertliği A1 ve A3 numunelerin sertliğinden daha büyük olduğu açıkça görülmektedir. Buna göre, Vickers mikrosertliğinin artması, kararsız durumdan kararlı duruma geçisin bir ölçüsü olduğu söylenebilir [114]. Bu verilere dayanarak da en kararlı yapının A2 numunesine ait olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.12. Alaşımların Vickers Sertlik Ölçümleri

5. SONUÇLAR

Bu araştırmada, üzerinde çalışılan A1, A2 ve A3 numunelerinin ağırlıkça bileşim oranları Materyal ve Metod bölümünde belirtilen Tablo 3.1 de verilmiştir. Üretilen üç alaşıma ait izlenecek yollar ve elde edilen sonuçlar, Bulgular bölümünde çok geniş ve ayrıntılı bir şekilde literatüre de dayalı olarak tartışıldı. Burada elde edilen alaşımların metalografik içyapıları, malzemelerin kimyasal kompozisyonları, içerdikleri mikroyapı fazları ve bazı ısıl özellikleri belirlenmiştir. Bu özelliklerin tayini için bazı teknikler uygulanarak deneysel çalışmalar yapıldı. Bu teknikler; malzeme yüzeyini görüntülemek için optik mikroskopu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC), X-ışınları difraktometresi (XRD) olmak üzere farklı teknikler kullanılarak deney grupları halinde yapıldı. A1, A2 ve A3 numunelerinin sertlik değerlerini bulmak amacıyla alaşımlardan elde edilen numunelerin Vickers mikro sertlik ölçüm sonucunda bazı değerler elde edilmiştir. Bulunan sonuçlar, bir bütün olarak aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- Optiklerin yüzey mikrografları ve kimyasal analizi SEM-EDX ölçümleri ile yapıldı. A1 alaşımının SEM fotoğraflarına bakıldığında, hem austenit hem martensit fazda ortak rastlanan faz Ti_2Ni fazıdır. Bu faz titanyumca zengin alaşımlarda görülür. Her iki alaşımda da titanyum miktarı atomikçe %50 nin üzerindedir ve x ışınları ölçümünde de gördüğümüz fazların varlığı görülmüştür. Ayrıca A1 alaşımında bir miktar da B2($NiTi$) fazına rastlanmıştır. SEM için yapılan metalografik incelemeler malzemelerin yüzeyinde kabartıların olduğunu göstermiştir. Bu gözlem sonuçları X-ışını analizleri ile berber değerlendirildiğinde, bu morfolojik gözlemlerin martensit-austenit yapıları olduğu anlaşılmaktadır. SEM görüntülerinde aynı zamanda makro gözenekler olduğu gibi mikro gözeneklerin de varlığı tespit edilmiştir.
- Diferansiyel tarama kalorimetresi ölçümlerinden A_s , A_f , M_s ve M_f dönüşüm sıcaklıkları belirlenmiştir. Bunun sonucunda austenit ve martensit dönüşüm sıcaklıklarında meydana gelen değişimler incelendi. Üzerinde çalışılan alaşımlarına ait DSC eğrilerinden elde edilen sonuçların genelde austenit→martensit dönüşümünün ekzotermik, martensit→austenit ters dönüşümünün ise endotermik bir reaksiyonla ortaya çıktığı görülmüştür. A1, A2 ve A3 Alaşım gruplarının dönüşüm sıcaklık değerleri Şekil 4.1 tablosunda entalpi enerjisi değerlerinin, soğutma için hesaplanan entalpi enerjisi değerlerinden çok daha büyük olduğu gözlenmiştir. Bu durum ekzotermik ve endotermik tepkimeler gerçekleşirken alınan-verilen ısınnın enerji üzerindeki etkisi hakkında bilgiler elde edilmiştir.

- XRD piklerinden $\text{Ni}_{36}\text{Ti}_{50}\text{Cu}_{14}$ alaşımındaki, ağırlıkça %14 Cu ilave edilen numunede baskın faz martensit fazdır. Cu ilave oranı ağırlıkça %17 Cu olduğunda martensit ve austenit fazı temsil eden XRD piklerinin şiddetinin bir birine yaklaştığını yani, alaşımdaki martensit ve austenit fazların baskınlığının birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Cu ilave oranının ağırlıkça %20 Cu'ye çıktığında ise, austenit faz pikinin martensit faz pikine göre şiddetinin daha fazla olduğu görölmektedir. Kısaca, NiTiCu alaşımına ağırlıkça % Cu ilave oranının artmasıyla alaşımdaki austenite fazın daha baskın hale geldiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin ise XRD pikine bakıldığında $\text{Ti}_2(\text{NiCu})$ fazının pik şiddetinin artmasıyla çökelti fazının oluşumunun artması alaşımın baskın fazının austenit faza dönüşmesini sağladığı düşünölmektedir. Ayrıca, SEM'lerin görüntülerine bakıldığında alaşımlardaki $\text{Ti}_2(\text{Ni,Cu})$ çökelti fazlarının artması düşünöcemizi desteklemektedir.
- Alaşımların, matrix ve ikincil fazları için vickers mikrosertliği ölçümü yapıldı. Bütün alaşımlarda, ikincil fazın ana fazdan daha sert yapıya sahip olduğu görölmüştür. Ayrıca A2 alaşımının hem ana fazının hem de ikincil fazının mikrosertliği diğer alaşımlardan daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu da bize A2 alaşımın mikrosertliği diğer alaşımlardan daha kararlı olduğunun bir gösterdiğidir.

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, 1998.
- [5] Olson, G.B. ve Owen, W.S. (1992). Martensite, The Materials Information Society, U.S.A, 50-200p.
- [6] Otsuka, K. ve Ren, X. (1999). Recent developments in the search of shape memory alloy, *Intermetallics*, 7, 511-528.
- [7] Nastasi, M., Mayer, J.W. (2004). 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*, Indiana 46556-5637.
- [9] Porter, D.A. and 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>; Erişim: 16 Ekim 2019.
- [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. ve 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 aluminum 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] Rahmatpure, A. (2012). Smart memory alloys, *Proc. of Int. Conf. on Advances in Mechanical Engineering* 1-3,
- [32] Tautzenberger, P. (1990). Termal Actuators; A Comparison of Shape Memory Alloys with Termoelastic Bimetals and Wax Actuators Engineering Aspects of Shape
- [33] Friend, C.M. (1986). The Effect of Applied Stres 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 Aplication 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). Thermoelastisity, Pseudoelastisity 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 transformations in metals and alloys, 1 Second Edition, Chapman-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] Sadrnezhaad, 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. <https://doi.org/10.1023/A:1012582103327>.
- [57] Breedis, J.F. & Kaufman, L. (1971). Metallurgical Transaction 2: 2359. <https://doi.org/10.1007/BF02814874>.
- [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., A273,425
- [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] Aytekin, V. (1966). Metalurji Termodinamiği. İstanbul Teknik Üniv., Berksoy Matbaası, İstanbul
- [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] Salzbrenner, R.J., and Cohen, M. (1978). On THE Yhermodynamics of Thermoelastic Martensitic Transformations. Acta Metallurgica, 27, 739-748.
- [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/#pg1>; Erişim: 17 Haziran 2019
- [79] <https://technology.grc.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-99>; Erişim: 16 Temmuz 2019
- [80] <https://www.nasa.gov/specials/wheels/>; Erişim: 18 Haziran 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/en_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 2009/0076597A1.

- [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] Houand, Li., Grumman, D.S. (1995). Transformational Super elasticity in Sputtered Titanium-Nickel Thin Films, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 3, 989-995.

- [113] Valeanu M., Lucaci , M., Crisan , A.D., Sofronie, M., Leonat, L., Kuncser, V. (2011). Martensitic transformation of $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_{20}$ alloy prepared by powder metallurgy Journal of Alloys and Compounds 509 4495–4498.
- [114] Kayalı, N., Özgen, S. ve Adıgüzel, O. (1997). The influence of ageing on martensite morphology in shape memory CuZnAl alloys, J. Phys. IV, 7(C5), 317-322



ÖZGEÇMİŞ

Rauf ACAR

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri : Yeşilli
Doğum Yılı : 1984
Uyruğu : T.C.
Adres : Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Elazığ
E-posta : rauffirat.edu@gmail.com
Yabancı Diller : İngilizce (YÖKDİL:51)

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans :Adnan Menderes Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fen Bilimleri Bölümü, 2011
Lise : Mardin Aziz Sancar Anadolu Lisesi, Mardin, 2005

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

- 1) Tatar, C., Acar, R. & Qader, I.N. (2020). Investigation of thermodynamic and microstructural characteristics of NiTiCu shape memory alloys produced by arc-melting method. *Eur. Phys. J. Plus* **135**, 311 <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00288-w>

Projeler:

- 1) Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından desteklenen **FF.19.01** numaralı Yüksek Lisans tezi projesi, 2018