

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TiNiNb, TiNiTa, TiNiZr ŞEKİL HATIRLAMALI
ALAŞIMLARININ TERMAL VE YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Samet SADAK

Yüksek Lisans Tezi

FİZİK ANABİLİM DALI
Katıhal Fizik Bilim Dalı

TEMMUZ 2023

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**TiNiNb, TiNiTa, TiNiZr ŞEKİL HATIRLAMALI
ALAŞIMLARININ TERMAL VE YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Tez Yazarı
Samet SADAK

Danışman
Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN

TEMMUZ 2023
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: **TiNiNb, TiNiTa, TiNiZr Şekil Hatırlamalı Alaşımlarının Termal ve Yapısal Özelliklerinin Karşılaştırılması**

Yazarı: Samet SADAK

İlk Teslim Tarihi: 02.06.2023

Savunma Tarihi: 04.07.2023

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: Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN Onayladım
Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi

Başkan: Doç.Dr. Yusuf ER Onayladım
Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu

Üye: Doç. Dr. Ercan ERCAN Onayladım
Bitlis Eren Üniversitesi, Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/....../2023 tarihli toplantısında tescillenmiştir.

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “**TiNiNb, TiNiTa, TiNiZr Şekil Hatırlamalı Alaşımlarının Termal ve Yapısal Özelliklerinin Karşılaştırılması**” 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.

04/07/2023

Samet SADAK

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen kişi, kurum ve kuruluşlara en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez hazırlarken bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN'e teşekkür ederim. Elektrik - Elektronik Mühendisi Akif ŞEKERCİ ve Doç.Dr. Yusuf ER 'e tez hazırlama sırasında tecrübe ve yardımlarını esirgemediklerinden dolayı ayrıca teşekkür ederim. Deneysel çalışma sırasında teknik yardımları için Fırat Üniversitesi personeli ve teknisyenlerine de minnettarım. Hayatım boyunca sevgileri, anlayışları ve motivasyonları için aileme ve arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından FF.23.03 protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

Samet SADAK

ELAZIĞ, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Metalografi	2
1.2. Biyouyumlu Metaller	3
1.3. Termal Programlama	3
2. FAZ DÖNÜŞÜMLERİ	5
2.1. Martensit-Austenit Faz Dönüşümü	6
2.2. Rombohedral Faz Dönüşümü	7
2.3. Şekil Hatırlama Mekanizması	8
2.3.1. Tek Yönlü Şekil Hatırlama Mekanizması	9
2.3.2. Çift Yönlü Şekil Hatırlama Mekanizması	10
2.4. Süper Elastiklik	11
3. TiNi ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR	13
3.1. Biyomedikal Alanda Kullanımı	13
3.2. Robotik Alanda Kullanımı	14
3.3. Haberleşme Alanında Kullanımı	15
4. MATERYAL VE METOT	16
4.1. Alaşımların Üretilmesi	16
4.2. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Ölçümleri	17
4.3. Kristal Yapı Analizi	18
4.3.1. X-Işınlari Kırınımı	18
4.3.2. Optik Mikroskop İncelemesi	19
4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu	19
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	21
5.1. DSC Ölçüm Sonuçları	21
5.2. XRD Analiz Sonuçları	23
5.3. Optik Mikroskop Sonuçları	28
5.4. SEM-EDX Analiz Sonuçları	29
5.4.1. TiNiNb (S1) Numunesine ait SEM-EDX Analiz Sonuçları	29
5.4.2. TiNiZr (S2) Numunesine ait SEM-EDX Analiz Sonuçları	33
5.4.3. TiNiTa (S3) Numunesine ait SEM-EDX Analiz Sonuçları	36
6. SONUÇLAR	40
GELECEK ÇALIŞMALAR VE ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR	42
ÖZGEÇMİŞ	45

ÖZET

TiNiNb, TiNiTa, TiNiZr Şekil Hatırlamalı Alaşımlarının Termal ve Yapısal Özelliklerinin Karşılaştırılması

Samet SADAK

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Temmuz 2023, Sayfa: xi +44

Şekil hatırlamalı alaşımlar (ŞHA), deformasyona uğradıktan sonra orijinal şeklini geri kazanma becerisine sahip olduğu için son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Bu alaşımlar arasında TiNi bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar ayrıca yüksek mukavemet, biyoyumluluk ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı akademik ve endüstriyel alanlar için geniş bir ölçekte kullanılmaktadır. Bununla birlikte diğer elementlerin TiNi alaşımlarına dahil edilmesi alaşımların termal, mekanik ve biyoyumluluk özelliklerini etkiler ve bu durum bazı kullanım alanlarında alaşımların performanslarını artırabilir. Bu tezde, Nb, Zr ve Ta kullanılarak TiNi bazlı ŞHA'ların biyoyumlu TiNiX alaşımları üretilmiştir. Bu alaşımlar termal özellikleri ve yüzey morfolojileri açısından araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Nb, Zr ve Ta'nın TiNi bazlı ŞHA'larının fonksiyonel ve biyoyumluluk özellikleri üzerindeki etkilerini olumlu yönde arttırmak bu çalışmanın amaçlarından biridir. Diğer bir deyişle biyomedikal cihazlar, aktüatörler ve sensörler gibi çeşitli uygulamalar için spesifik özelliklere sahip yeni TiNi tabanlı ŞHA'lar geliştirmek bu çalışmanın araştırma alanını oluşturmaktadır. Kısacası bu çalışmada gelişmiş deneysel teknikler kullanılarak TiNiX ŞHA'ların özelliklerine ilişkin yeni bilgilerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Maddelerin termal özellikleri, atomik boyutları ve kristal yapıları alaşım oluşturmada en önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin farklı olmasından dolayı farklı maddeler tek başlarına gösteremediği özellikleri bir araya gelince gösterebilirler. Örnek olarak TiNi alaşımının uygun koşullarda şekil hatırlama yeteneği vardır. Ti ve Ni metalleri doğada tek başlarına şekil hatırlama yetenekleri yokken bir araya gelince şekil hatırlama özelliği (ŞHÖ) gösterirler. Yapılan çalışmada biyoyumlu aynı zamanda ŞHÖ'lü olan alaşım üretme çalışmalarına katkıda bulunmak için TiNi alaşımının şekil hatırlama özelliğinin korunması, toksik özellikli Ni metali oranının azaltılması ve biyoyumlu X metallerinin eklenmesiyle araştırılmıştır. Bu şekilde toksik metal olan Ni oranının azaltılarak canlı organizmalarda alerjik etkilerin oluşması ihtimalinin minimize edilmesi, böylece elde edilen alaşımların şekil hatırlama özelliğini kaybetmeden ve biyoyumluluk özelliğini koruyarak, canlı organizmalarda kullanımının kolaylaştırılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada termal iletkenlik, termal kapasite, kristal yapıdaki benzerlik ve farklılıkların doğurabileceği sonuçlar gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şekil Hatırlamalı Alaşımlar, Termal Özellikler, Biyoyumluluk, Faz dönüşümleri.

ABSTRACT

Comparison of Thermal and Structural Properties of TiNiNb, TiNiTa, TiNiZr Shape Memory Alloys

Samet SADAK

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

July 2023, Page: xi +44

Shape memory alloys (SMA) have received a lot of attention in recent years as they have the ability to regain their original shape after deformation. Among these alloys, TiNi-based shape memory alloys are also widely used in academic and industrial fields due to their properties such as high strength, biocompatibility, and corrosion resistance. However, the inclusion of other elements in TiNi alloys affects the thermal, mechanical, and biocompatibility properties of the alloys, and this may increase the performance of the alloys in some areas of use. In this thesis, biocompatible TiNiX alloys of TiNi-based SMAs were produced using Nb, Zr, and Ta. These alloys were investigated and compared in terms of their thermal properties and surface morphologies. One of the aims of this study is to positively increase the effects of Nb, Zr, and Ta on the functional and biocompatibility properties of TiNi-based SMAs, which have been extensively studied on biocompatibility in previous studies. In other words, developing new TiNi-based SMAs with specific properties for various applications such as biomedical devices, actuators, and sensors constitute the research area of this study. In short, it is aimed to obtain new information about the properties of TiNiX SMAs by using advanced experimental techniques in this research.

Thermal properties, atomic sizes, and crystal structures of materials are the most important parameters in forming alloys. Because these parameters are different, different substances can show properties that they cannot show alone when they come together. For example, TiNi alloy has shape memory ability under suitable conditions. While Ti and Ni metals do not have shape memory abilities on their own in nature, they show shape memory effect (SME) when combined. In the study, it was investigated by preserving the shape memory effect of TiNi alloy, reducing the ratio of toxic Ni metal, and adding biocompatible X metals in order to contribute to the production of biocompatible alloys with SME. In this way, it is aimed to minimize the possibility of allergic effects in living organisms by reducing the ratio of the toxic metal Ni, thus facilitating the use of the obtained alloys in living organisms without losing their shape memory feature and preserving their biocompatibility. In this study, the results of thermal conductivity, thermal capacity, similarities, and differences in crystal structures were observed.

Keywords: Shape Memory Alloys, Thermal Properties, Biocompatibility, Phase Transitions.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Termal Programlama Aşamaları[12]	4
Şekil 2.1. ŞHA'nın DSC ile Ölçülen Faz Geçiş Sıcaklıkları	6
Şekil 2.2. R Fazı Birim Hücresi	8
Şekil 2.3. Şekil Hatırlama Mekanizması[25]	9
Şekil 2.4. Tek Yönlü Şekil Hatırlama[25]	10
Şekil 2.5. Çift Yönlü Şekil Hatırlama[25]	11
Şekil 2.6. Süper Elastiklik[25]	12
Şekil 4.1. Ark Ergitme Sistemi	17
Şekil 4.2. DSC Cihazının Genel Görünümü	18
Şekil 4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu	20
Şekil 5.1. S1, S2, S3 Numunelerine ait DSC Grafikleri	22
Şekil 5.2. S1 Numunesi DSC Grafiği(Isıl İşlem Sonrasında ve Farklı Isıtma-Soğutma Hızları)	23
Şekil 5.3. Üç Numune Ait XRD Grafiği ve Faz Bölgeleri	24
Şekil 5.4. S1 Numunesine ait XRD Faz Analizi Ölçümü	25
Şekil 5.5. S2 Numunesine ait XRD Faz Analizi Ölçümü	26
Şekil 5.6. S3 Numunesine ait XRD Faz Analizi Ölçümü	27
Şekil 5.7. TiNiNb 200X Optik Mikroskop Görüntüsü	28
Şekil 5.8. TiNiNb 100X Optik Mikroskop Görüntüsü	28
Şekil 5.9. TiNiZr 200X Optik Mikroskop Görüntüsü	28
Şekil 5.10. TiNiZr 100X Optik Mikroskop Görüntüsü	28
Şekil 5.11. TiNiTa 200X Optik Mikroskop Görüntüsü	29
Şekil 5.12. TiNiTa 100X Optik Mikroskop Görüntüsü	29
Şekil 5.13. TiNiNb SEM	30
Şekil 5.14. TiNiNb MAP	30
Şekil 5.15. TiNiNb MAP Katmanları	30
Şekil 5.16. S1 Yüzey Morfolojisindeki Çökelti	31
Şekil 5.17. S1 Yüzey EDX	32
Şekil 5.18. S1 Object-9 EDX Grafiği	32
Şekil 5.19. TiNiZr SEM	33
Şekil 5.20. TiNiZr MAP	33
Şekil 5.21. TiNiZr MAP Katmanları	33
Şekil 5.22. S2 Yüzey Morfolojisindeki Düzlemsel Büyümelere ait SEM Görüntüsü	34
Şekil 5.23. S2 Yüzey Morfolojisindeki 3 Boyutlu Dentritlerin SEM Görüntüsü	35
Şekil 5.24. S2 Object-14 EDX Grafiği	35
Şekil 5.25. TiNiTa SEM	36
Şekil 5.26. TiNiTa MAP	36
Şekil 5.27. TiNiTa MAP Katmanları	36
Şekil 5.28. S3 Yüzey Morfolojisindeki 3 Boyutlu Dentritlerin SEM Görüntüsü	37
Şekil 5.29. S3 Numunesi Çökeltisindeki Boşluğundaki 3 Boyutlu Dentritler	38
Şekil 5.30. S3 Object- 18 EDX Grafiği	38

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Atomik Yüzde Karışım Oranları(%at.)	17
Tablo 4.2. Ağırlık Karışım Oranları(%ağ.)	17
Tablo 5.1. S1 Alaşımının Kimyasal Analiz Sonuçları	31
Tablo 5.2. S2 Alaşımının Kimyasal Analiz Sonuçları	34
Tablo 5.3. S3 Alaşımının Kimyasal Analiz Sonuçları	39



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_s	: Austenit başlangıç sıcaklığı
A_f	: Austenit bitiş sıcaklığı
M_s	: Martensit başlangıç sıcaklığı
M_f	: Martensit bitiş sıcaklığı
β -Ta	: Beta Tantalyum
β -Nb	: Beta Niyobyum
B19'	: Martensit faz
B2	: Austenit faz
Ni	: Nikel
Ti	: Titanyum
Nb	: Niyobyum
Zr	: Zirkonyum
Ta	: Tantalyum
TiO	: Titanyum Oksit
Ti ₂ Ni	: Titanyum Nikel

Kısaltmalar

DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
ŞHA	: Şekil Hatırlamalı Alaşım
ŞHE	: Şekil Hatırlama Etkisi
ŞHÖ	: Şekil Hatırlama Özelliği
XRD	: X Işını Kırınımı
BCC	: Hacim Merkezli Kübik Yapı
FCC	: Yüzey Merkezli Kübik Yapı
HCP	: Hekzagonal Sıkı Paket
MAP	: Analitik Haritalama
%at.	: Atomik Yüzde Oranı
%ağ.	: Kütle Yüzde Oranı

1. GİRİŞ

Alaşımlar farklı metallerin bir araya gelerek ve metallerin tek başına sahip olmadığı özellikleri alaşımlamada gösterme yeteneklerine sahiptir. Alaşımların klasik olarak doğada tek başına bulunan bir metalin farklı metal ve/veya metallerle alaşım oluşturarak yeni özellik kazanması metal ve malzeme bilimleri alanında araştırma konusu haline gelmiştir.

Yeni bir alaşım oluşturmak için farklı metaller farklı miktarlarda karıştırılabilir. Alaşımı oluşturan metallerin element sembolleriyle ve katkı oranlarıyla bir arada ifade edebiliriz, örneğin $Ti_{50}Ni_{20}Zr_{30}$ üçlü alaşımında “%50 Ti”, “%20 Ni” ve “%30 Zr” içerdiği şeklinde bir okuma yapılabilir. Alaşımlar kendisini oluşturan metallere göre farklı, sertlik, erime noktası, kaynama noktası, korozyon direnci ve şekil hatırlama vb. özelliklerde farklılıklar gösterebilir. Alaşımlar için yaygın üretim teknikleri arasında eritme, döküm vb. yöntemler yer alır. İstenen alaşımı elde etmek amacıyla kullanılan her teknik maliyet ve verimlilik gibi konularda avantaj ve dezavantajları sunabilir. Arzu edilen alaşımlar elektriksel, termal, manyetik veya korozyona dayanıklı özellikler sergileyen ve ihtiyaç duyulan alanlara göre önem taşımaktadırlar.

Alaşımlar arasında şekil hatırlamalı alaşımlar(ŞHA) mekanik zorlanmalar sonucunda değişen ilk şeklini ısıtma ve soğutma işlemlerinden sonra orijinal şekillerine geri dönebilen farklı bir alaşım sınıfıdır. ŞHA’lar ilk olarak 1932 yılında Arne Ölander tarafından keşfedilmiştir [1]. "Şekil Hatırlaması" terimi ise ilk olarak 1941 yılında Vernon tarafından tanımlanmıştır [2]. 1960’lı Yıllarda ABD Deniz Savaş Araçları Laboratuvarında çalışan Buehler ve Wang, belirli TiNi alaşımlarının, önemli ölçüde deformasyona uğradıktan sonra ısıtıldığında orijinal şeklini geri kazanma yeteneği olduğunu gözlemlediler ve şekil hatırlama davranışı sergilediğini keşfettiler[3]. Sonraki yıllarda, ŞHA’larda şekil hatırlaması etkisini(ŞHE) yöneten mekanizmalar daha derinlemesine araştırıldı. Düzenli yapıya sahip yani kristal yapıda atom dizilimine sahip metallerin atomları kristal düzlemlerinde yer değiştirmesi mümkündür ama bir bütün olarak hacimsel şekilde yer değiştirmesi makro boyutlarda şekil değişimine neden olur. Bu şekil değişimi özelliği diğer elementler ve alaşımların şekil değiştirmesinden farklıdır [4]. Şekil hatırlaması davranışının, martensit ve austenit olmak üzere iki kristal yapı arasındaki tersinir bir faz dönüşümü ile ilişkili olduğu bilinmektedir [5].

Alaşımların ŞHÖ gösterdiğini anlamak için termal analiz yapılır, termal etki altında endotermik ve ekzotermik enerjilerin ölçümü sonucunda katı-katı fazları arasında geçiş ısı değerleri hesaplanır. Hesaplanan bu değerlerin ŞHÖ açısından programlanmak istenmesi ya da farklı senaryolara göre ŞHÖ ihtiyacı bulunması halinde farklı metal katkıları eklenerek veya termal programlama yapılarak ŞHA için

uygun bir çalışma bölgesi oluşturulabilir.

ŞHA ısıtıldığında sırasıyla austenit başlangıç (A_s) ve austenit bitiş (A_f) sıcaklık aralığında martensit dönüşüm başlar ve biter, soğutulduğunda ise sırasıyla martensit başlangıç (M_s) ve martensit bitiş (M_f) sıcaklıkları arasında ters dönüşüm gerçekleşir ve böylece ŞHA ana faza yani austenit faza geçiş yapar [6]. Yalnızca ısıtıldığında ilk haline gelen ŞHA tek yönlü ŞHÖ'ye sahiptir. Örneğin ŞHÖ taşıyan bir alaşım, tel haline getirildikten sonra bükülerek şekil verildiğinde ve sonrasında ısıtıldığında tel başlangıçtaki şekline geri dönüyorsa ama soğutulduğunda herhangi bir değişiklik olmuyorsa bu alaşım tek yönlü ŞHÖ'ye sahiptir. Bir ŞHA ısıtıldığında ilk şeklini kazanabiliyor ve soğutulduğunda ise değiştiği şekli alabiliyorsa bu tip alaşımlar çift yönlü ŞHÖ gösteriyor demektir [7].

1.1. Metalografi

Metalografi, metal ve alaşımların mikroskobik yapılarının incelenmesi ve karakterizasyonu için kullanılan bir tekniktir [8]. Metalografi, çeşitli uygulamalar ve malzeme geliştirme için gerekli olan metallerin işlenmesi, yapısı ve özellikleri arasındaki ilişkinin anlaşılmasında çok önemli bir rol oynar. Malzemenin yapısal özelliklerini anlamak, kalite kontrol yapmak, üretim sırasında oluşan hataları tanımlamak, malzeme özelliklerini geliştirmek ve performansını artırmak için kullanılır.

Metalografik inceleme, metal ve alaşımların mikroskobik yapılarını gözlemlemek için metalografik numune hazırlama adımlarını içerir. Numune hazırlama işlemleri arasında kesme, taşlama, polisaj, elektrolitik etkisizleştirme, boyama ve mikroskop altında inceleme yer alır. Bu işlemler, malzemenin mikroskobik yapısını ortaya çıkarmak için numunenin yüzeyini hazırlayarak ve oluşan yapılar hakkında bilgi elde edilmesini sağlar.

Metalografi, malzemenin mikroskobik yapısını görsel olarak gözlemlemeye ve çeşitli analiz teknikleri kullanarak bu yapıları karakterize etmeye olanak tanır. Örneğin, optik mikroskop veya SEM kullanılarak malzemenin mikro yapısal özellikleri, özellikle tane boyutu, tane şekli, faz bileşimi, tane sınırı, tane büyümesi, yüzey ve çatlaklar gibi parametreler belirlenebilir. Malzemelerin üretim, imalat ve işleme sırasında karşılaştığı sorunları tanımlamak, önlemek ve çözmek için önemlidir. Ayrıca, malzemelerin özelliklerini geliştirmek için yapısal değişiklikler yapılmasına da yardımcı olabilir. Metal ve alaşımların tasarımında ve kullanımında önemli bir araçtır ve endüstride geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.

Metal bilimi, metallerin ve alaşımların yapısal özellikleri, özellikle mikro yapı, kristal yapı, tane boyutu, faz bileşimi, tane sınırı ve diğer yapısal özellikler gibi

konuları inceler. Ayrıca, metal ve alaşımların mekanik özellikleri, yorgunluk davranışı, aşınma ve yüksek sıcaklık özellikleri gibi diğer önemli özellikleri de araştırır. Metal malzemelerin üretimi, işlenmesi ve kullanımı ile ilgili sorunların çözümüne de odaklanır. Bu amaçla, metal ve alaşımların tasarımı, işleme teknolojileri, ısıtma işlemleri, yüzey işleme teknikleri ve diğer konular da metal biliminin bir parçasıdır. Metaller endüstriyel uygulamalardan nanoteknolojiye kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Örneğin, metal ve alaşımların geliştirilmesi ve üretimi, uçak, otomobil, inşaat, elektronik ve diğer endüstrilerde önemlidir. Ayrıca, metal ve alaşımların biyomedikal alanda kullanımı da son zamanlarda hızla artmaktadır.

1.2. Biyouyumlu Metaller

Biyouyumluluk, bir materyalin veya maddenin, canlı dokular içinde veya bunlarla temas halinde toksik etki, iltihaplanma, enfeksiyon v.b. zararlı etkilere neden olmadan amaçlanan işlevini yerine getirme yeteneğini ifade eder [9]. Başka bir ifadeyle biyouyumlu malzemeler hücreler, dokular ve organlar dahil olmak üzere biyolojik ortamlarda, olumsuz reaksiyonları tetiklemeden fayda sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Malzemelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanı sıra yüzey özellikleri ve biyolojik sistemlerle etkileşimleri gibi çeşitli faktörlerden biyouyumluluk oldukça etkilenir.

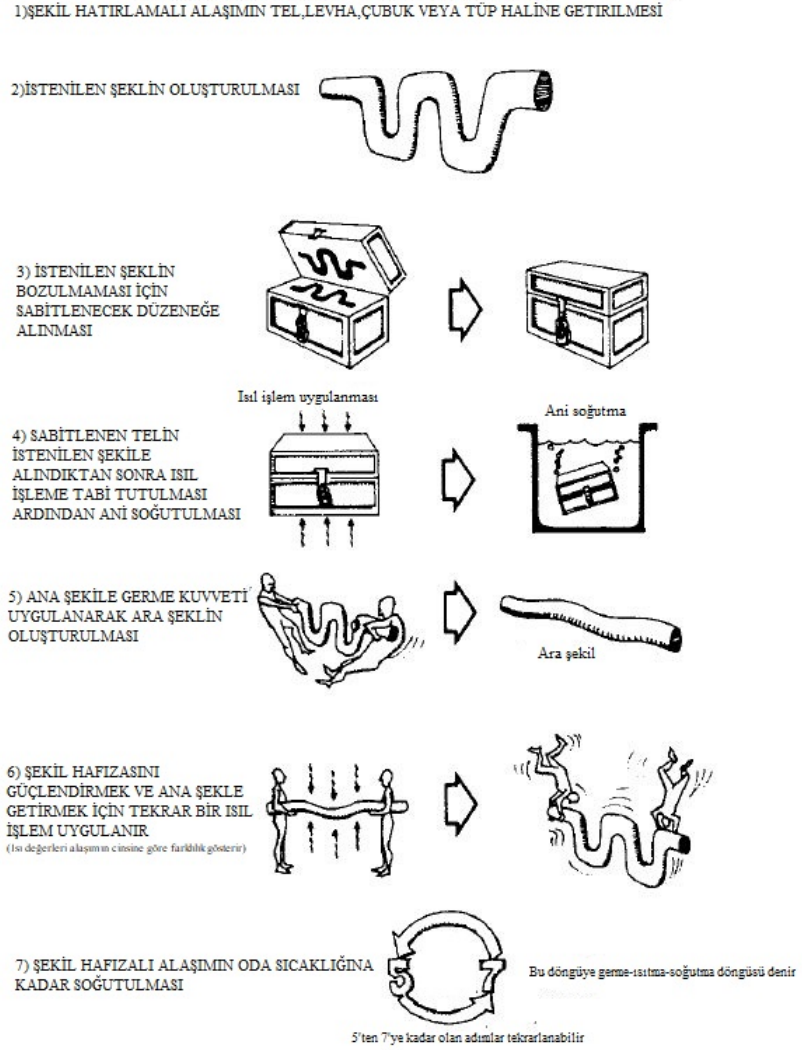
Ti ve alaşımları en yaygın kullanılan, en çok bilinen biyouyumlu metaldir. Ti'nin yüzeyinde oluşan pasif oksit tabakası korozyon direncini önemli ölçüde artırır, koruyucu bariyer görevi görür. Bu durum da Ti ve alaşımlarının dış implantlarında, ortopedik implantlarda ve kardiyovasküler cihazlarda yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır [9]. Paslanmaz çelik alaşımlarının da, mekanik dayanımları ve korozyona karşı dirençleri açısından biyouyumlulukları yüksektir. Bu sebeple tıbbi uygulamalarda, ortopedik implantlarda, cerrahi aletlerde ve kardiyovasküler cihazlarda kullanılırlar [10].

1.3. Termal Programlama

Termal olarak bir alaşımların programlanması için öncelikle bu yöntemin istenilen formda kalıcı olarak mekanik şekilde alaşıma uygulanması sağlanır. ŞHÖ için ısıtma ve ani soğutma yapılarak nihai şekile sahip alaşımların kristal yapısında bulunan atomların ilişkileri yeniden düzenlenir. ŞHA programlandıktan sonra yeni orijinal şekline sahiptir fakat deformasyonla şeklini kaybedebilir, uygun termal şartlar sağlanınca tekrar programlanmış formuna daima geri döner[11]. ŞHA'ların termal programlama aşamaları Şekil 1.1.'de gösterilmiştir[12].

Alaşımların uzama katsayıları polimerlere oranla nispeten azdır. Bununla

birlikte ŞHA'lar orijinal şekline tamamen dönebilme yetenekleri bakımından oldukça iyidir. Deforme olmuş bir ŞHA, ısıtılma işlemine karşı ilk şekline dönerek hızlı cevap verebilir[11], burada mekanik kuvvet harcanır ve ŞHA termomekanik davranış gösterme özelliğine de sahip olduğu için termal programlanması mümkün hale gelir[12].



Şekil 1.1. Termal Programlama Aşamaları[12]

2. FAZ DÖNÜŞÜMLERİ

Martensit faz dönüşümü Alman metal bilimci Adolf Martens tarafından austenit faza sahip çeliğin soğutulmasıyla bulunmuştur. Katıhal faz dönüşümü, atomik ölçekten makroskobik davranışa kadar geniş bir aralığı kapsar, malzeme davranışı ve özelliğinde temel bir rol oynar [13]. 19. yüzyıl sonlarında metal bilim adamı Roberts-Austen[14], demir-karbon alaşımları üzerinde kapsamlı araştırmalar yürüttü ve yüzey merkezli kübik (FCC) kristal yapıya sahip yüksek sıcaklıklı bir faz belirledi. Metalurji bilimine yaptığı katkılardan dolayı bu aşamaya Austenit adı verildi.

Katıhal faz dönüşümleri yayılma (difüzyonlu) ve yer değiştirme (difüzyonsuz) olarak iki şekilde meydana gelir. Yayılma ya da difüzyonlu olarak adlandırılan dönüşümlerin oluşturduğu yeni faz göreceli olarak uzun mesafelerde ve rastgele hareket eden atomların oluşturduğu dönüşümdür. Meydana gelen faz, oluşturulduğu matristen farklı bir kristal geometriye sahip olduğu için uzun menzilli yayılma gerekir. Bu tip dönüşümün oluşması için zamana ve sıcaklığa ihtiyaç vardır. Yer değiştirmeli (difüzyonsuz) dönüşümde atomlar kısa mesafede hareket ettiği ve atomlar arası komşuluk ilişkisi değişmediğinden dolayı kısa zamanda dönüşüme uğrayabilirler. Kristal yapı üzerindeki komşuluk ilişkileri değişmemesinden ve atomik geçiş olmamasından dolayı bu yer değiştiren dönüşümler genellikle zamandan bağımsız ilerler ve bu durum iki faz arasındaki arayüzün hareketini oldukça hızlandırır. Bu dönüşümler, oluşan yeni fazın sıcaklık değerine bağlı olup sıcaklık süresine bağlı olmadığı için ısı dönüşümü olarak da adlandırılırlar. Martensit dönüşümler ısı dönüşümlerinden ve yüksek sıcaklıktaki austenit bir fazın soğutulmasıyla elde edilirler[15].

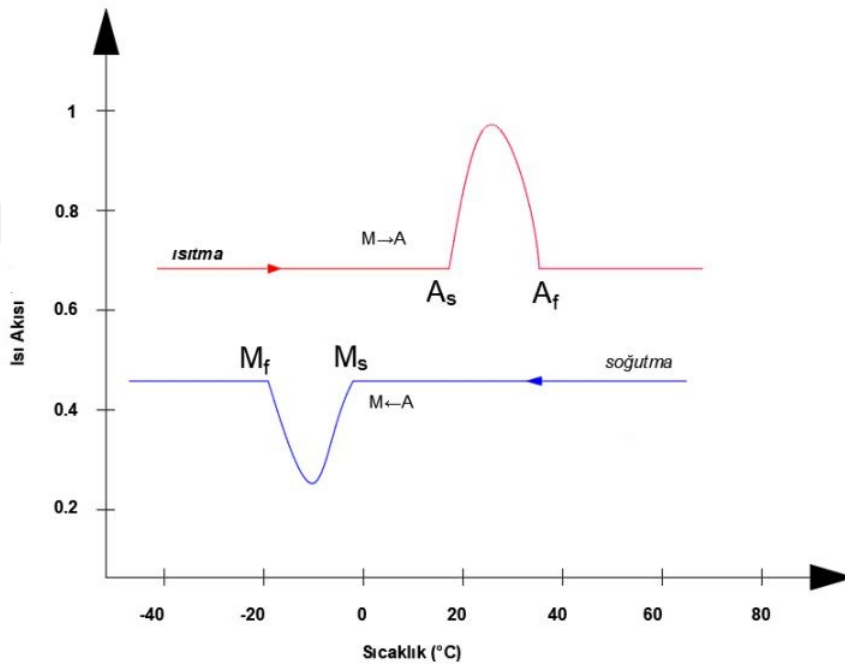
Faz dönüşüm süreçleri, alaşımların mekanik ve termal özelliklerinde önemli değişikliklere yol açar, martensit ve austenit faz arasındaki dönüşüm, malzemenin geniş elastikiyet sınırlarını ve şekil hatırlamasını sağlar. SHE malzemenin önceden belirlenmiş bir şekli yeniden kazanma yeteneği ve bu etki martensit fazdan austenit fazına geçerken dönüşüm sırasında meydana gelir[5]. Bu dönüşüm, alaşımların ısıtılmasıyla başlatılabilir ve soğutma sonucunda geri döndürülebilir.

Süperelastik etki, alaşımların büyük elastikiyet sınırlarını koruyarak önemli şekil değişikliklerine uğraması ve yükün kaldırılmasıyla orijinal şekline geri dönebilmesidir. Bu etki, austenit fazındaki alaşımların belirli bir gerilim altında martensit fazına dönüşerek büyük deformasyonlara izin vermesiyle meydana gelir. Yük kaldırıldığında, martensit yapı austenit yapıya geri döner ve malzeme orijinal şeklini geri kazanır.

SHA faz dönüşümlerinin başarılı bir şekilde gerçekleşmesi, bu alaşımların enerji tasarrufu, hareket kontrolü ve akıllı yapılar gibi alanlarda kullanılmasını sağlamaktadır. Örneğin, SHA faz dönüşüm özellikleri sayesinde, içten yanmalı motorlar, jet motorlu araçlarda yakıt veya yağ basıncını değiştirebilen malzemeler üretilerek enerji tasarrufu sağlayan bileşenler geliştirilebilir. Bu tür uygulamalar, alaşımların süperelastik özellikleri ve orijinal şekillerini geri kazanma yetenekleri sayesinde olur.

2.1. Martensit-Austenit Faz Dönüşümü

Martensit dönüşüm, austenit sıcaklık aralığından hızla soğutulduklarında belirli alaşımlarda meydana gelen bir tür katı hal faz dönüşümüdür [16]. Dönüşüm sırasında, malzemenin kristal yapısı austenitten daha sert ve daha kırılgan bir faz olan martensite dönüşür. Bu dönüşüm, düşük sıcaklıklarda tetragonal veya monoklinik bir kristal yapı sergileyen martensit oluşumuna yol açar. Austenit ise yüksek sıcaklıklarda kararlıdır ve kübik kristal bir yapıya sahiptir [17]. Martensit-Austenit faz dönüşümü bir kimyasal reaksiyon değildir, çünkü malzemenin kimyasal bileşiminde bir değişiklik olmaz, daha çok sıcaklık ve strese bağlı olarak kristal yapıda bir değişiklik olur. Dönüşümün kinetiği, alaşımın bileşimi, soğuma hızı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Dönüşüm, alaşımı M_s sıcaklık derecesinin altında bir değere soğutarak veya alaşıma stres uygulayarak indüklenebilir [18]. Dönüşümün kinetiği genelde DSC teknikleri kullanılarak tetkik edilebilir [19]. Şekil 2.1.'de bir ŞHA'nın DSC ile termal analizi yapılmıştır.



Şekil 2.1. ŞHA'nın DSC ile Ölçülen Faz Geçiş Sıcaklıkları

Martensit oluşumuna ek olarak, belirli alaşımlarda meydana gelebilecek bir başka dönüşüm türü, martensit fazdan austenit faza ters dönüşümdür. Bu ters dönüşüm, daha güçlü, daha yüksek sıcaklıktaki formdan daha zayıf, daha düşük sıcaklıktaki forma soğutulduklarında kristal yapılarında bu dönüşüme uğrayan alaşımlarda ŞHE olarak bilinir.

Martensit-Austenit faz dönüşümü, ŞHA süper esneklik ve ŞHE gibi özelliklerini açığa çıkardığı için malzeme biliminde büyük öneme sahiptir [20]. Ayrıca ŞHA'daki

Martensit-Austenit faz dönüşümünün kontrol veya manipule edilebilmesi, biyomedikal mühendisliğinden havacılık ve uzay sanayisine kadar çeşitli alanlarda kullanılmıştır.

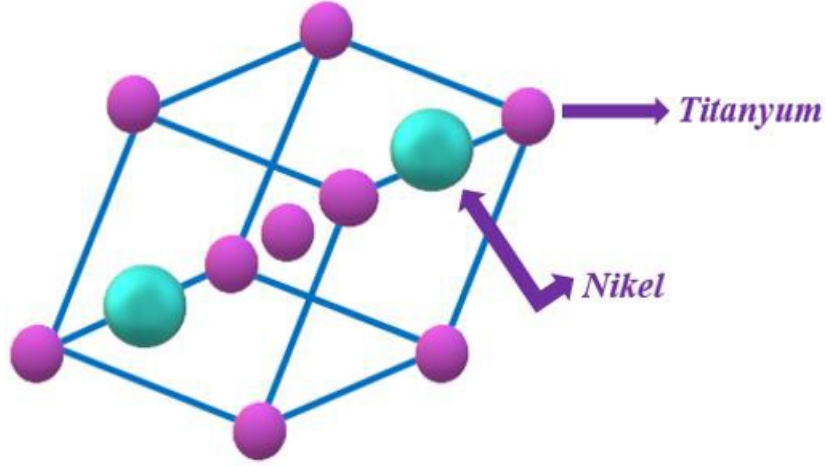
2.2. Rombohedral Faz Dönüşümü

Rombohedral faz, şekil hatırlamalı alaşımların kristal yapılarından biridir ve bu alaşımların davranış karakterlerini ve uygulama alanlarını tanımlayan önemli bir kavramdır. Rombohedral faz dönüşümü, bir malzemenin kristal yapısındaki bir fazdan diğerine, özellikle eşkenar dörtgen olmayan bir yapıdan eşkenar dörtgen bir yapıya geçiş anlamına gelir ve sıcaklık, basınç ve kimyasal bileşim gibi çeşitli faktörler tarafından indüklenebilir. Termal genleşmeden kaynaklanan atomik yer değiştirmeler veya monoklinikten eşkenar dörtgen faz dönüşümüne dahil olan atomik yer değiştirmeler, monoklinik ve eşkenar dörtgen kafes sabitlerinin benzerliğinden dolayı bu dönüşümde genellikle küçüktür. Bu sebeple, interiyonik mesafeler sıcaklıkla çok az değişiklik gösterir.

Bismut selenid(Bi_2Se_3), germanyum tellür(GeTe), lityum kobalt oksit(LiCoO_2) ve TiNi ŞHA da dahil olmak üzere çeşitli malzemelerde rombohedral faz dönüşümü gözlemlenmiştir. Bi_2Se_3 'te Rombohedral kristal yapı katmanlıdır ve her katmanın içinde altıgen bir kafes bulunur [21]. TiNi'deki rombohedral faz dönüşümü, alaşım, Martensit Başlangıç Sıcaklığı (M_s) olarak bilinen sıcaklığın altına soğutulduğunda meydana gelir. Austenit olarak tanımlanan TiNi'nin yüksek sıcaklık fazı, rombohedral martensit adı verilen düşük sıcaklık fazına dönüşür. Bu dönüşüm kristal kafes içindeki atomların yer değiştirerek üç katmanlı istifleme dizisine sahip bozuk eşkenar dörtgen oluşturmasını sağlar [5]. Rombohedral martensit, şekil hatırlamasına ve süper elastik özelliklere sahiptir, bu da onu biyomedikal cihazlar, aktüatörler gibi çeşitli alanlarda kullanıma uygundur.

Rombohedral faz dönüşümüne ek olarak, TiNi alaşımları ayrıca R-fazı dönüşümü sergiler. R-fazı, soğutma işlemi sırasında austenit ve rombohedral martensit arasında meydana gelen bir ara fazdır. Ayırt edici bir monoklinik kristal yapısı ve iki katmanlı istifleme dizisi ile ifade edilir [15]. R fazı dönüşümü, TiNi alaşımlarına ek şekil hatırlaması ve iyileştirilmiş geri kazanılabilir gerilme ve iyileştirilmiş yorulma direnci gibi mekanik özellikler kazandırır. TiNi alaşımlarındaki R-fazı dönüşümünün birim hücresi (Bkz: Şekil 2.2.) genellikle iki atom katmanına sahip bir dikdörtgenler prizması olarak tanımlanır [22]. Birim hücre içindeki spesifik atomik düzenlemeler, R-fazının kristalografik yönelimini ve mekanik davranışını belirler.

Rombohedral fazın oluşumu ve dönüşümü, alaşımın bileşimi, ısı işlem koşulları ve gerilim uygulamaları gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Bu faktörlerin kontrolü, malzemenin özelliklerinin optimize edilerek geliştirilmesi ve bazı kullanım alanlarında en uygun çözüm sunmasını sağlar. Rombohedral fazın anlaşılması ve kontrolü ŞHA işlevselliğini ve performansını geliştiren temel bir konudur.



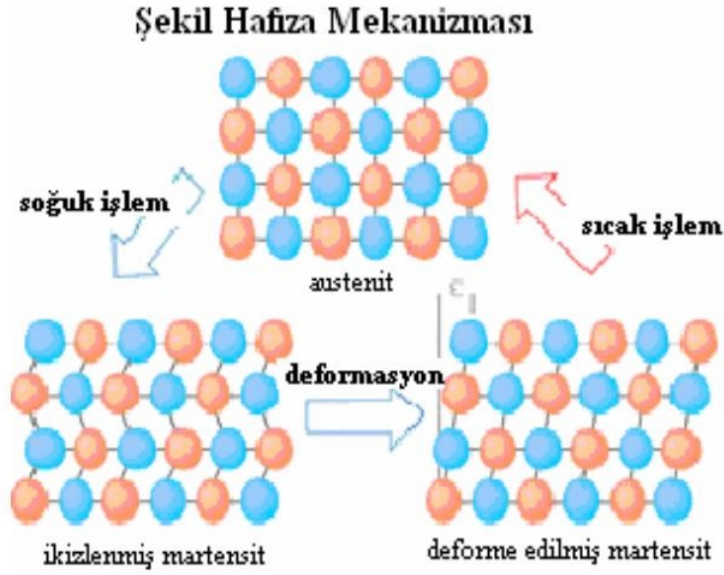
Şekil 2.2. R Fazı Birim Hücresi

2.3. Şekil Hatırlama Mekanizması

ŞHA'lar dışarıdan bir etki ile deforme olmuş bir durumdan orijinal şeklini geri kazanma özelliğine sahip, kullanışlı ve çok yönlü mühendislik malzemeleridir. Şekil hatırlama mekanizmasının temelini bu malzemelerin sıcaklık veya strese bağlı olarak iki kararlı faz arasında (martensit ve austenit) geçiş yapmalarına izin veren karakteristik yapısal atomik düzeni oluşturur. Austenit fazda malzeme daha esnektir ve kolayca farklı şekillere deforme olabilir [23]. Martensit faz daha serttir ve malzeme şekillendirildiği formu korur. Bu mekanizma üretim sürecinde meydana gelen soğutma ve deformasyon işlemlerinin bir kombinasyonu ile başlatılır, sonraki ısıtma işlemi ile malzeme austenit duruma geri dönerek orijinal şeklini geri kazanmasına neden olan bir faz dönüşümüne uğrar (Bkz: Şekil 2.3.).

Şekil hatırlama mekanizması, ŞHA'nın bileşimi sıcaklık aralığı, deformasyon ve geri kazanım sırasında uygulanan mekanik etkenler dahil olmak üzere çeşitli faktörler tarafından işletilir. ŞHA'ların şekil hatırlaması davranışı sergileme yeteneği, faz dönüşümlerinin tersinir doğasına ve malzemenin kristal yapısında tersinir bir değişikliğe uğrama kabiliyetine bağlıdır.

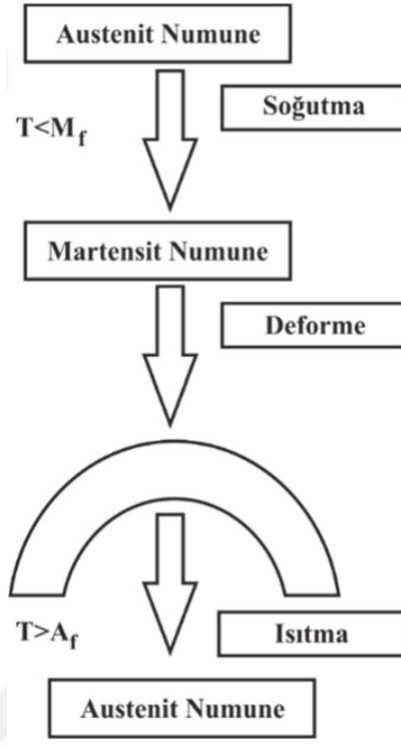
Şekil hatırlamalı mekanizma, ŞHA'da olduğu gibi şekil hatırlamalı polimerler gibi akıllı malzemelerde de bulunmaktadır [24]. Bununla birlikte şekil hatırlamalı polimerler, ŞHA'a göre çeşitli avantajlar sunar. Bu avantajlar arasında hafiflik, düşük maliyet, işleme kolaylığı, yüksek deformasyon geri kazanım oranı, geniş bellek geri kazanım sıcaklığı, büyük şekil değişkenliği gibi özellikler yer alır.



Şekil 2.3. Şekil Hatırlama Mekanizması[25]

2.3.1. Tek Yönlü Şekil Hatırlama Mekanizması

Tek yönlü şekil hatırlaması belirli ŞHA'ların sergilediği, orijinal şekillerini tek bir yönde hatırlamalarına ve geri kazanmalarına olanak tanıyan bir özelliktir. Her iki yönde (ısıtma ve soğutma üzerine) şekil geri kazanımını içeren geleneksel şekil hatırlaması davranışının aksine tek yönlü şekil hatırlaması, sadece belirli bir yönde şekil geri kazanımı sağlar. Bu tek yönlü davranış genellikle faz dönüştürme aşamasında tercih edilen bir yöntem olan asimetrik bir termomekanik işleme aracılığıyla elde edilir. Tek yönlülük ısıtma ve soğutma aşamaları sırasında yaşanan gerilimlerdeki farklılıktan dolayı soğutma fazının malzemeyi deforme olmuş şekline geri döndürmek için yeterli gerilimi üretmediği durumda oluşur [26]. Bu özellik bir defaya mahsus olmak üzere geri dönüşü olmayan bir şekil değişikliğinin gerekli olduğu çeşitli kullanım alanlarında tercih edilir (Bkz: Şekil 2.4.).

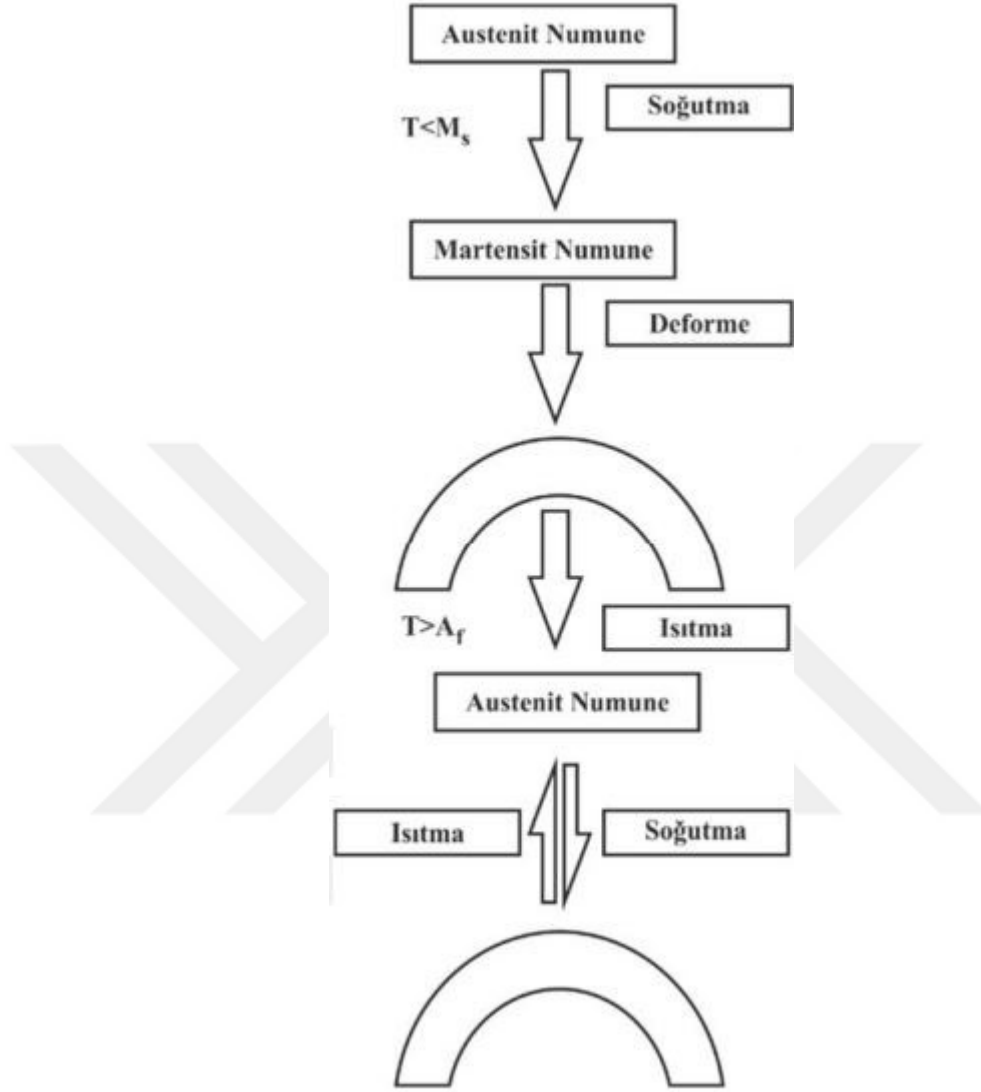


Şekil 2.4. Tek Yönlü Şekil Hatırlama[25]

2.3.2. Çift Yönlü Şekil Hatırlama Mekanizması

ŞHA'daki çift yönlü şekil hatırlama mekanizması iki şekilde gerçekleşir. Tersinir faz dönüşümleri ve Farklı kristal yapılar arasındaki etkileşim. Çift yönlü şekil hatırlaması için üzerinde en çok çalışılan ŞHA'lar austenit ve martensit fazlar arasında tersinir bir dönüşüme uğrayan TiNi alaşımlarıdır. Çift yönlü ŞHE, austenit ve martensit arasındaki tersinir faz dönüşümleri yoluyla elde gerçekleşir. Deforme olmuş ŞHA austenit başlangıç sıcaklık derecesinin (A_s) üzerinde bir değere kadar ısıtıldığında, ters dönüşüm meydana gelir ve malzeme austenit faza geri döner. Depolanan elastik enerjinin serbest bırakılması orijinal şeklin geri kazanılmasını sağlar [27]. Faz dönüşümlerinin tersine çevrilebilir doğası ŞHA'nın çift yönlü şekil hatırlaması davranışı sergileyerek tekrar tekrar şekil hatırlama döngülerinden geçmesine izin verir. (Bkz: Şekil 2.5.). Arzu edilen şeklin termal olarak programlanması, yüksek sıcaklıktaki şekilden düşük sıcaklıktaki şekle geçiş veya tam tersi, herhangi bir malzeme yorulması olmadan birçok kez gerçekleşebilir. Bununla birlikte, fazların kararlılığı ve histerisiz etkileri gibi malzeme özellikleri ve çevresel faktörler çift yönlü şekil hatırlamanın verimliliğini ve ömrünü etkileyebilir. ŞHA'lardaki çift yönlü şekil hatırlama mekanizması, kristal yapının, atomik değişimlerin ve farklı fazlar arasındaki geçişkenliğin karmaşık bir etkileşimidir. Bu mekanizmanın anlaşılması deneysel araştırmalar, teorik modelleme, X-ışını kırınımı ve SEM gibi gelişmiş teknikler sayesinde önemli ölçüde ilerlemiştir[15].

Sonuç olarak, ŞHA’larda çift yönlü şekil hatırlaması, austenit ve martensit fazları arasındaki tersinir faz dönüşümlerinden kaynaklanır.



Şekil 2.5. Çift Yönlü Şekil Hatırlama[25]

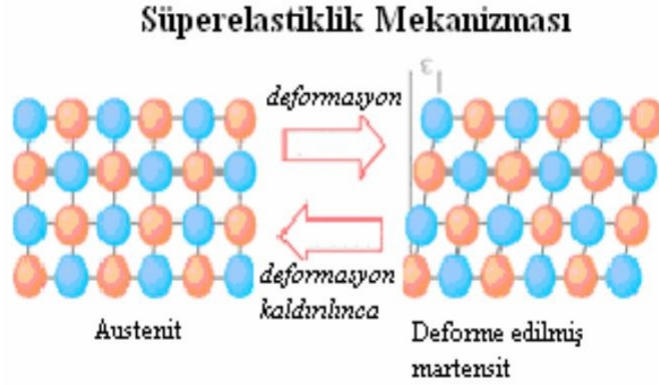
2.4. Süper Elastiklik

Süper elastiklik, ŞHA’ların büyük elastik deformasyonlara uğramalarında ve uygulanan stresin kaldırılması üzerine orijinal şekillerini geri kazanmalarında rol oynayan bir özelliktir.

Süper elastik davranış, stres kaynaklı faz dönüşümü ile martensit dönüşümünün tersinir doğası arasındaki etkileşimden kaynaklanır. ŞHA belirli bir sıcaklık aralığında dış gerilime maruz kaldığında, martensit varyantların yeniden yönlendirilmesi nedeniyle önemli ölçüde elastik deformasyona uğrar. Bu deformasyon, uygulanan stresin kaldırılmasıyla tamamen

geri kazanılabilir ve ŞHE'ne neden olur [27] (Bkz: Şekil 2.6.). Süper elastik davranışı incelemek için çekme testi ve DSC gibi deneysel araçlar kullanılır. Bu araçlar ŞHA'nın dönüşüm sıcaklıkları, stres-gerinim yanıtı ve enerji sönümleme kabiliyetleri dahil olmak üzere önemli parametrelerini ölçmek için kullanılırlar [15].

Süper elastik davranış, "psödoelastik" veya "elastik" aralık olarak bilinen, belirgin bir yüzey bölgesine sahip olabilir gerilim-uzama eğrisi ile ifade edilir. Bu aralık içinde ŞHA gerinimdeki önemli artışa rağmen neredeyse sabit bir gerilim sergiler. Bu stres yüzeyinin oluşmasına, martensit değişimin yeniden yönlendirilmesi yoluyla uygulanan stresi barındıran tersinir martensit dönüşüme sebep olur. Gerilme kaynaklı martensit dönüşüm, ŞHA'nın enerjiyi sönümlemesine ve dağıtmasına izin verir, böylece malzemenin kalıcı deformasyona veya bozulmaya uğramasını önler [28]. Bu dönüşüm standart kayma tabanlı plastik deformasyon mekanizması yerine austenit matrisi içinde martensit dönüşüm oluşumu ve yayılması yoluyla stresin yerleştirilmesidir. Sonuçta stresin kaldırılması üzerine martensit varyantları orijinal austenit faza geri dönerek deformasyon veya gerinimin tamamen iyileşmesini sağlar. Bu toparlanma akma gerilimi aşıldığında kalıcı deformasyonun meydana geldiği geleneksel elastik malzemelerin davranışına zıttır. Süper elastikiyetin artan sıcaklıkla birlikte artan dönüşüm gerilimi ile belirgin şekilde sıcaklığa bağlı olmasıdır. Ayrıca süper elastik malzemelerdeki gerinim geri kazanımı anlık değil, zamana bağlıdır ve "viskoelastisite" olarak adlandırılır.



Şekil 2.6. Süper Elastiklik[25]

3. TiNi ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR

ŞHA'lar sessiz çalışmaları, hızlı tepki verebilmeleri korozyon direncinin yüksek olması, biyouyumlu olması düşük maliyetlerde elde edilebilmesi sebebiyle bir çok alanda kullanılmaktadır.

NiTinol olarak da bilinen TiNi ŞHA'lar yüksek seviyede şekil hatırlama davranışı gösteren, yüksek elastik özelliği olan alaşımlardır. Öncelikle Ti ve Ni metal elementlerinden oluşan bu alaşımlar mekanik, termal ve biyouyumlu özelliklerinin bir arada olması nedeniyle büyük bir araştırma alanına sahiptir.

TiNi alaşımları şekil hatırlama ve süperelastik davranışlarının temeli olan austenit ve martensit fazlar arasında tersinir bir faz dönüşümüne maruz kalır. Austenit bitiş sıcaklığının (A_f) üzerindeki sıcaklıklarda, TiNi alaşımları yüzey merkezli kübik (FCC) kristal yapıya sahip, austenit fazdadır. Bu aşamada, malzeme yüksek sıcaklıktaki şeklini sergiler ve nispeten esnektir. Martensit başlangıç sıcaklığının (M_s) altına soğutulduktan sonra, difüzyonsuz bir faz dönüşümü meydana gelir ve TiNi alaşımları, dörtgen veya monoklinik bozuk bir kristal yapıdaki martensit faza geçer. Bu dönüşüm ikizlenmiş veya ikizlenmemiş martensit mikroyapılarının oluşumuyla sonuçlanan atomların yeniden yönlendirilmesi ve yeniden düzenlenmesi ile gerçekleşir [5].

3.1. Biyomedikal Alanda Kullanımı

Biyomedikal alanında malzemelerin kullanılması için öncelikle canlı organizmalarla etkileşime girmemesi gerekir. Canlı hücre veya canlı ortamda görev yapacak malzemeler biyouyumlu olmasının yanı sıra kendisine verilen görevi yerine getirebilmesi için de belirlenen senaryolara göre işlem yapabilmeli, darbelere dayanıklı kendisinden istenen çalışma sıcaklıklarında beklenen özellikleri gösterebilmelidir. Çok sayıda çalışma, TiNi ŞHA'lar önemli olumsuz reaksiyonlara veya toksisiteye neden olmadan canlı dokularla olumlu bir şekilde etkileşime girmelerine olanak tanıyan iyi bir biyouyumluluk sergilediğini doğrulamıştır [15]. Bu durum özellikle canlı dokulara yerleştirilen cansız maddeler içi cihazlarda ve malzemelerin çevresindeki biyolojik ortamla uyumlu bir şekilde bir arada bulunması gereken biyomedikal tedaviler için büyük önem taşır. Biyouyumlu şekilde biyouyumlu metallerden üretilen ŞHA'lar tıp, diş hekimliği, ortez protez gibi alanlarda kullanılmasından dolayı tedavi ve hastalık önlemede sıklıkla kullanılmaktadır. Biyomedikal amaçlı üretilen ŞHA'lar martensit dönüşüme uğrayabilen süperelastik malzemelerdir.

TiNi ŞHA'lar kemik sabitleme cihazları, spinal enstrümantasyon ve eklem replasmanları gibi ortopedik implantlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. TiNi alaşımlarının ŞHE bu implantların cerrahi işlemler sırasında istenen şekle uyum sağlamasını ve implantasyondan sonra orijinal şeklini geri kazanmasını sağlayarak

etkilenen bölgeye optimum uyum, stabilite ve destek sağlar [29]. Ayrıca, TiNi ŞHA'ların süper esnekliği, implantların stresi absorbe etmesine ve dağıtmasına izin vererek implant başarısızlığı riskini azaltır ve hasta konforunu artırır. Kardiyovasküler uygulamalarda TiNi ŞHA'lar minimal invaziv müdahaleler alanında yenilikler sağlamıştır. Bu alaşımlar kan akışını eski haline getirmek için daralmış veya tıkalı kan damarlarına yerleştirilen küçük ağ benzeri cihazlar olan stentlerin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. TiNi alaşımlarının süperelastik özelliğinden dolayı stentlerin kateterler yoluyla iletilmek üzere küçük bir çapa kadar sıkıştırılmasına ve ardından yerine yerleştirildikten sonra orijinal şekline genişletilmesine izin verir. Bu özellik travmayı en aza indirirken ve implantasyon prosedürünü basitleştirirken aynı zamanda etkili damar desteği de sağlar [30]. TiNi ŞHA'lar ayrıca ortodontik tedavilerde dişleri hizalamak ve yeniden konumlandırmak için kullanılan diş kemer tellerinde de uygulama alanı bulmaktadır. ŞHE bu kemer tellerinin dişlere yumuşak, sürekli kuvvetler uygulamasını, kontrollü diş hareketini kolaylaştırmasını ve istenen ortodontik sonuçlara ulaşmasını sağlar, ek olarak TiNi alaşımlarının biyouyumluluğu alerjik reaksiyon ve doku tahrişi riskini azaltır [31].

Tedavi amaçlı cihazlar da bu ŞHA'lardan faydalanır, örneğin işitme cihazları ve gözlükler, kullanıcının konforunu sağlamak kullanılar için biyolojik ve fizyolojik özelliklerine uyum sağlayabilir. Kemik plakaları ve vidalar gibi implantlar, belirli bir kemik yapısının şekli ve mekanik gereksinimlerine uyum sağlayabilir, iyileşme sürecini daha etkili hale getirir. TiNi alaşımları hafiflik, süperelastiklik ve gözenekli yapının düzenlenebilir mekanik özelliklerine sahip olmasıyla, yükün uygulandığı bölgelerdeki gerilimleri azaltmada önemli bir rol oynarlar[32]. Bu durum implantın kemiğe daha uyumlu hale gelmesine yardımcı olur ve böylece bitişik kemiğin çatlama riskini azaltır. Bu birleşik özellikler ve yetenekler TiNi alaşımları sert doku implantlarında kullanımında önemli bir yere sahiptir. Bu malzemelerin biyouyumlulukları ve biyolojik tepkileri taklit etme yetenekleri protezler ve yapay kaslar gibi daha karmaşık uygulamalar için uygulama alanı sağlar. Bu sayede daha doğal ve işlevsel cihazlar oluşturmak mümkün olur.

3.2. Robotik Alanda Kullanımı

TiNi ŞHA'ların robotik bilimindeki en önemli faydalarından biri, belirli bir sıcaklık değişikliğine maruz kaldıklarında önceden tanımlanmış şekillerini geri kazanmalarına izin veren şekil hatırlama etkisidir. Bu özellik şekil değiştirme yeteneklerinin gerekli olduğu robotik uygulamalarda özellikle yararlıdır [33]. TiNi ŞHA'lar hassas ve uyarlanabilir kavrama yetenekleri elde etmek için robotik ellerde ve kavrayıcılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. TiNi alaşımlarının süper esnekliği bu kavrayıcıların deforme olmasını ve kavranmakta olan nesnenin şekline uymasını sağlayarak güvenilir bir tutuş sağlar. Ek olarak ŞHE kısıkaçların ısıtıldığında orijinal şekline dönmesine izin vererek, kavranan nesnenin serbest bırakılmasını sağlar. Bu özellikler robotik sistemlerin farklı şekil ve boyutlardaki nesnelerin yer değiştirmesini veya taşınmasını sağlamak açısından oldukça avantajlıdır [34]. TiNi ŞHA'ların özgün yapıları onları uyumlu ve esnek robotik teknolojiler geliştirmek için ideal kılar. Bu alaşımlar uyumlu hareket sağlamak ve dış

kuvvetleri emmek için robotik eklemlere, aktüatörlere ve mekanizmalara entegre edilebilir. TiNi alaşımlarının süper esnekliği robotik sistemlerin darbelere ve mekanik şoklara dayanmasını sağlayarak hasar riskini azaltır ve dayanıklılıklarını artırır. Ayrıca SHE robotik bileşenlerin deformasyondan sonra orijinal şeklini geri kazanmasını sağlayarak güvenilir ve tekrarlanabilir performans sağlar [35]. TiNi ŞHA'lar ayrıca mikro robotik sistemlerin ve cihazların geliştirilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek güç ağırlık oranları ve kompakt boyutları onları küçük ölçekli robotik teknolojilerde çalıştırma ve kontrol için verimli hale getirir. TiNi ŞHA tabanlı mikro aktüatörler nesnelerin mikro ölçekte manipüle edilmesini sağlayarak hassas hareketleri gerçekleştirebilir. Bu mikro robotik sistemler vücut içi robotlarla ilaç dağıtımı, minimal invaziv cerrahi ve mikro cerrahi için de kullanılabilirler [36].

3.3. Haberleşme Alanında Kullanımı

TiNi ŞHA'ların haberleşme alanındaki en önemli avantajlarından biri sıcaklık değişimlerine yanıt olarak şekil değiştirmelerine izin veren SHE'dir. Bu etki yeniden yapılandırılabilir antenler ve reflektörler geliştirmek için kullanılmaktadır. TiNi ŞHA tabanlı antenler kendi geometrilerini anten tipinin frekansını ve polarizasyonunu ayarlamak için kullanılır bu durum yüksek sinyal kalitesine, geniş kapsama alanına ve anten filtre özelliğinin artmasına ve azaltılmış parazit ve gürültülerin minimize edilmesine neden olur[37]. TiNi ŞHA'lar aynı zamanda elektriksel iletkenlikleri olduğu için yüksek frekanslı iletişim sistemlerindeki kullanımları mümkündür. Bu alaşımlar düşük direnç ve yüksek sinyal iletim verimliliği sağlayan antenlerde, konektörlerde ve dalga kılavuzlarında iletken elemanlar olarak kullanılır. İletkenlikleri SHE ile birleştğinde ayarlanabilir ve uyarlanabilir iletişim bileşenlerinin geliştirilmesini sağlar.

TiNi ŞHA'ların haberleşme alanındaki farklı uygulama alanı mikro elektro mekanik sistemler (MEMS) cihazlarının gelişimine katkı sunmasıdır. Anahtarlar, rezonatörler ve filtreler gibi TiNi ŞHA tabanlı MEMS bileşenleri, haberleşme sistemlerinin performansını artırma potansiyelleri açısından önemli bir yere sahiptir. TiNi ŞHA'ların SHE yeniden yapılandırılabilir ve programlanabilir MEMS cihazlarının geliştirilmesini sağlayarak mekanik hareketlerin hassas kontrolünü sağlar [27].

4. MATERYAL VE METOT

TiNi bazlı ŞHA'lara; aynı atomik yüzde oranına(%at.) sahip farklı biyouyumlu metaller ($\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{20}\text{Nb}_{30}$, $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{20}\text{Ta}_{30}$, $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{20}\text{Zr}_{30}$) eklenerek oluşturulan üçlü yeni alaşımların üretimleri yapıldı. Alaşım yapılan numunelerin termodinamik parametrelerinin belirlenmesi için Diferansiyel Taramalı Kalorimetre(DSC), numunelerin kristal yapı analizleri için X-ışını kırınımı(XRD), alaşımların yüzey morfolojileri kimyasal yapı tayininin değerlendirilmesi için taramalı elektron mikroskopu(SEM-EDX) ve optik mikroskop(OM) ile görüntü analizleri yapıldı.

4.1. Alaşımların Üretilmesi

Tablo 4.1'de %at. ağırlıkları verilen bileşimler; %99,9 safıktaki nikel (Ni), %99,9 safıktaki titanyum (Ti), %99,9 safıktaki niyobyum (Nb), %99,9 safıktaki tantalyum (Ta) ve %99,9 safıktaki zirkonyum (Zr) tozları kullanılarak Tablo 4.1'deki kütlece oranları(%ağ.) Denklem 4.1. yardımıyla hazırlandı. Hassas terazide ağırlıkları ölçülerek karıştırılıp her bir alaşımın toplam ağırlığı 10 mg olacak şekilde hazırlandı. Tablo 4.2.'de her bir metale ait ağırlıklar miligram cinsinden(mg) yazılmıştır. Metal tozlarının karıştırıldıktan sonra 20 mm çapındaki kalıp içine alınıp metal tozlarının dağılmaması ve bir arada durması için 20 MPa'da sıkıştırılarak bir araya getirildi. Karışımı yapılan sıkıştırılmış metalleri alaşımlamak için oksijenden arındırılmış ve argon gazı eklenmiş ortamda ark ergitme(ark-melting) yöntemiyle eritildi. Elde edilen alaşımlardan kesit parça alınarak düz yüzeyi dışa gelecek şekilde bakalite alınıp yüzey parlatma işlemi için kademeli olarak zımparalama işlemi uygulandı. Alaşımları bakalite alma ve zımparalama işlemlerinden sonra ipek çuha ile parlatma yapıldı, bu aşamadan sonra 10 saniye süre ile $\text{HF} + \text{NOH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (1:2:5) oranlarında hazırlanan asit çözeltisi ile kimyasal olarak dağlandı. Şekil 4.1.'de ark ergitme (arc melter) ve eriyik eğirme (melt spinner) sistemleri görülmektedir.



Şekil 4.1. Ark Ergitme Sistemi

Tablo 4.1. Atomik Yüzde Karışım Oranları(%at.)

Alaşımlar	Ti (%)	Ni (%)	Nb (%)	Zr (%)	Ta (%)
S1	50	20	30	-	-
S2	50	20	-	30	-
S3	50	20	-	-	30

$$(\%at.)_x = \frac{(\%ağ.)_x}{(at. \cdot ağ.)_x} \div \frac{\sum_i (\%ağ.)_i}{(at. \cdot ağ.)_i} \times 100 \quad (4. 1)$$

Tablo 4.2. Ağırlık Karışım Oranları(%ağ.)

Alaşımlar	Ti (mg)	Ni (mg)	Nb (mg)	Zr (mg)	Ta (mg)
S1	3.76645	1.84732	5.38623	-	-
S2	3.7996	1.86211	-	4.34129	-
S3	2.66055	1.30491	-	-	6.03454

4.2. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Ölçümleri

Malzemelerin termal analizini yapmak için yani faz geçiş ısılarının, faz dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi ve farklı ısıtma seneryolarına göre malzemelerin verdiği tepkilerin araştırılması ve analizinde DSC cihazı kullanılır. DSC malzemeleri ısıtma ve/veya soğutma yaparak malzemelerin ısı enerjisini yine referans bir malzemeye göre ölçme yaparak çalışır. Şekil 4.2.'de DSC cihazı ve bağlı olduğu bilgisayar görülmektedir.



Şekil 4.2. DSC Cihazının Genel Görünümü

ŞHA'da DSC analizi yaparken malzemenin ısıtılırken endotermik reaksiyona girdiği anda ve soğutulurken ise ekzotermik reaksiyon anındaki değerlerine göre faz dönüşüm ısıları belirlenir.

Arc melter yöntemi ile üretilen numunelerden 30-100 mg aralıklarındaki ağırlıklarda küçük kesitler alınarak DSC cihazına konulmasıyla birlikte boş numune kabıda DSC ölçüm bölmesine konularak atmosferden arındırılmış şekilde oksitlenmeyide engelleyerek ölçüm başlatılır.

4.3. Kristal Yapı Analizi

Yüzey parlatma işlemleri yapılan alaşım numunelerinin kristal yapı parametrelerini ve fazlarını belirlemek için SEM-EDX ve XRD analizi yapılır. Yüzey morfolojilerinde incelenerek çökelti oluşumları dentritik yapıların oluşumu ve dentritik yapı şekilleri optik mikroskopunun yanı sıra SEM ile daha detaylı incelenmesi sağlanır.

4.3.1. X-Işınları Kırınımı

Bir malzemenin kristal yapısını incelemek için XRD yöntemi kullanılmaktadır. Farklı malzemelerin X - ışınlarının farklı yansıtmasına dayalı olarak çalışan ve daha önceden

denemiş X-ışınlarını yansıtma piklerinin veri tabanı şeklinde oluşturulmasıyla bir malzemenin XRD analizi sonucunda hangi fazda veya kristal yapıda olduğu incelenebilir. Alaşımların kristal yapı analizi, Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile CuK_α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak yapıldı. Ölçümler 20° ile 80° aralığında 2° /dak sabit tarama hızıyla oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

4.3.2. Optik Mikroskop İncelemesi

Alaşımların numuneleri yüzey parlatma işlemlerinden sonra hemen optik mikroskopta incelemeye alınarak üretilen numunenin hızlı bir şekilde yüzey incelenmesine olanak tanır. Yüzey incelenmesinin yansırta uygulanan zımparalama, yüzey parlatma ve dağlamanın doğru yapıldığını yapılmadığını kontrol etmeyi sağlar. SEM incelemesinde daha verimli çalışmak için öncelikle optik mikroskopta ön inceleme yapmak zaman ve ekonomik kayıplar önlenir.

4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu

SEM analizi malzemeler içerisinde kimyasal katkı oranları belirleme, yüzey morfolojisini yüksek çözünürlükte görüntülemesinde kullanılır. SEM içerisinde bulunan elektron tabancasıyla üretilen elektron hüzmeleriyle incelenmesi istenen malzemeye tarama yaparak saçılan elektronları geri toplayıp veriye çevirip malzeme hakkında yüzey topografyası ve morfolojileri hakkında bilgi edinmeyi sağlar.

SEM analizi yaparken numune cihaza yerleştirildikten sonra vakum işlemi başlatılır. Vakum işlemi ile ortamdaki hava bertaraf edilir çünkü hava molekülleri elektron demetlerinin akışını engeller ve yansıtır bunun için ölçme hataları olmaması için hava molekülleri vakumlanarak numunelerden uzaklaştırılır.



Şekil 4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu

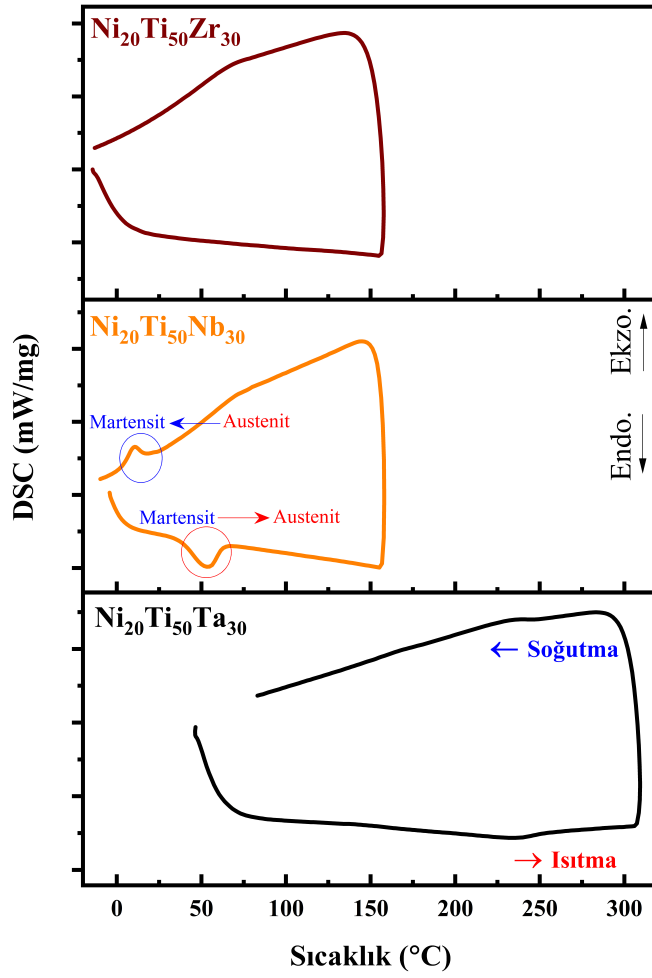
Şekil 4.3.'de taramalı elektron mikroskobu ve kontrol bilgisayarları gösterilmiştir. Hazırlanan numunelerin yüzey analizi ölçümleri JSM7001F marka SEM-EDX cihazı ile alındı. Elde edilen SEM-EDX sonuçları bulgular kısmında detaylı olarak açıklandı.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

$Ti_{50}Ni_{20}Nb_{30}$, $Ti_{50}Ni_{20}Ta_{30}$, $Ti_{50}Ni_{20}Zr_{30}$ alaşımları üretilip DSC, OM, XRD, SEM-EDX ölçüm, inceleme ve analizleri yapıldı ve sonrasında TiNi matris yapısına eklenen Ta, Zr ve Nb nin etkileri gözlemlendi, üç numunenin birbirine göre karşılaştırması yapıldı ve yorumlandı.

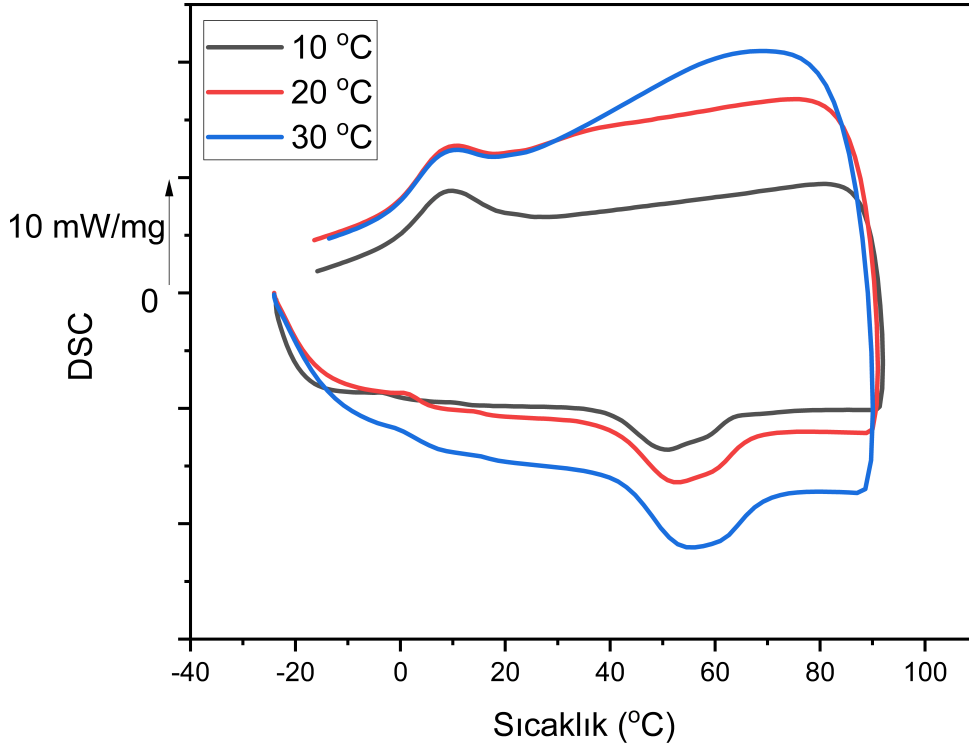
5.1. DSC Ölçüm Sonuçları

$Ti_{50}Ni_{20}Nb_{30}$ (S1), $Ti_{50}Ni_{20}Zr_{30}$ (S2), $Ti_{50}Ni_{20}Ta_{30}$ (S3) ŞHA'ların $10^{\circ}C/dk$ ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafikleri Şekil 5.1.'de verilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değerleri ise Tablo 5.1'de verilmiştir. Isıtma işlemi sırasında grafikte gözlenen endotermik pik, martensit (M) fazdan austenit (A) faza geçişi temsil etmektedir ($B19' \rightarrow B2$)[38]. Soğutma işlemi sırasında gözlemlenen ekzotermik pik ise, austenit (A) fazdan martensit (M) faza geçişi temsil etmektedir ($B2 \rightarrow B19'$). Numunelerin faz dönüşüm sıcaklıklarını temsil eden, austenit başlangıç sıcaklığı (As), austenit bitiş sıcaklığı (Af), martensit başlangıç sıcaklığı (Ms) ve martensit bitiş sıcaklığının (Mf) her alaşım için Phyris software cihazı ile belirlendi. S1, S2 ve S3 numunelerinin Şekil 5.1'de verilen grafiklerine baktığımızda S1 numunesinin ŞHA özelliğine sahip olduğu belirlendi. Fakat S2 ve S3 numunelerinde belirgin austenit ve martensit dönüşüm pik değerlerine rastlanılmadı.



Şekil 5.1. S1, S2, S3 Numunelerine ait DSC Grafikleri

Ayrıca, ısıtma işleminin etkisini kısaca gözlemlemek için S1 numunesi 850°C 'de ısıtma işlemine tabi tutuldu ve DSC cihazında $10^{\circ}\text{C}/\text{dk}$, $20^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ve $30^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma-soğutma hız aralıklarında faz geçiş değerleri S1 ısıtma işlemi gördükten sonra austenit başlangıç sıcaklığını ısıtma hızına bağlı olarak düşürdüğü görüldü, bu dönüşüm Şekil 5.2.'de gösterildi.



Şekil 5.2. S1 Numunesi DSC Grafiği (Isıl İşlem Sonrasında ve Farklı Isıtma-Soğutma Hızları)

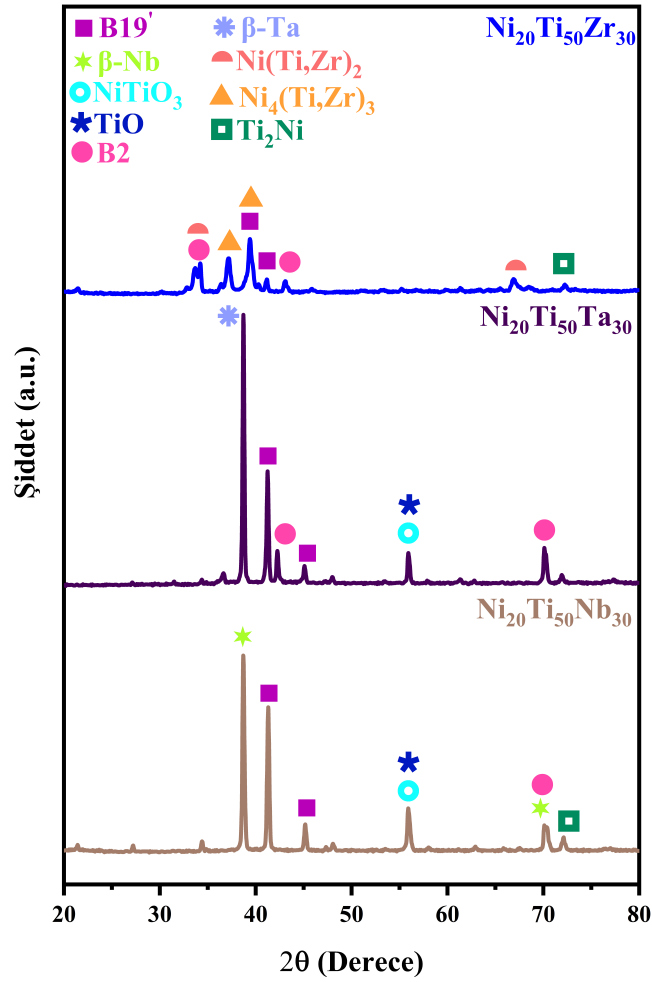
S1, S2 ve S3 numunelerinin Şekil 5.1.'de verilen grafiklerine baktıkıldığında üç numuneninde ŞHÖ 'ne sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu ŞHÖ genel olarak ŞHA'ların Şekil 5.2.'de temsilen gösterildiği gibi DSC Grafinde histerisis eğrisinin x ekseninde martensit fazda bulunan malzemenin sıcaklığı artarken y ekseninde endotermik olayın grafikte austenit faza geçme sıcaklık başlangıcından sonra alt tepe noktasına kırılıp belli bir sıcaklık değerinden sonra austenit bitiş sıcaklığına ulaşp M-A dönüşümü tamamladığını görülmektedir. Austenit fazda bulunan ŞHA'lar soğutma sırasında ise x ekseninde de görüldüğü gibi sıcaklık azalırken y ekseninde martensit faz başlama sıcaklığına kırılarak üst tepe noktasında ulaşp ekzotermik tepkime vererek daha sonra martensit bitiş sıcaklığına ulaşp A-M faz dönüşümünün tamamlandığı görüldü.

5.2. XRD Analiz Sonuçları

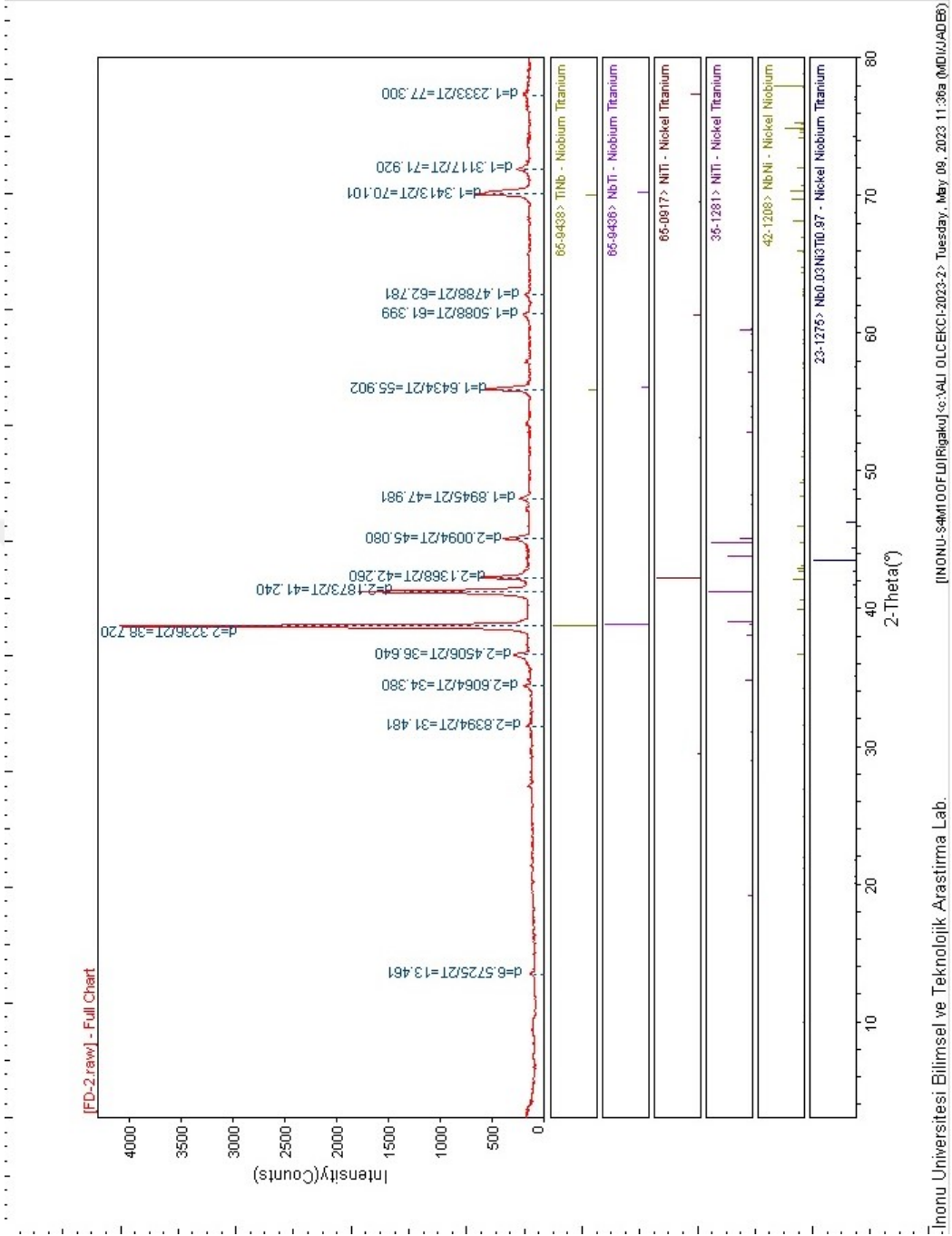
Kristal yapı analizi için numunelerin düz yüzeyleri XRD cihazının X ışınlarının doğrulduşunda olmak kaydıyla 10°'den başlayıp 80°'ye kadar(2θ) X ışını demetine maruz bırakılarak elde edilen sayısal veriler bilgisayar ortamında çizilerek Şekil 5.3.'deki grafikler elde edilmiştir.

Alaşımaların XRD desenleri Şekil 5.3.'de verildi. Gözlenen pikler literatür yardımı

kullanılarak belirlenen fazlar tespit edildi[39]–[44]. S1 şekil hatırlamalı alaşımın XRD pikleri incelendiğinde yapı içinde β -Nb (Nb zengin/rich), B19', B2, TiO, NiTiO₃ fazlarının yanı sıra Ti₂Ni çökelti fazına rastlanmıştır. Bu piklerde β -Nb fazının piki şiddetli olarak görülmektedir. Bu fazın yapı içinde genellikle dentrit yapısının bileşeni olduğu bilinmektedir. Ta elementi içeren S3 alaşımının XRD desenleri incelenirse bu alaşımda da β -Ta piki baskındır. Bu pik Ta zengin fazı olarak adlandırılır. Bundan başka alaşımda B19', B2, TiO, NiTiO₃ fazlarını piki tespit edilmiştir. S2 numunesinde ise Ni₁₁Zr fazlarına sahip olduğu Şekil 5.5.'de gösterilen XRD ölçüm sonuçlarında tespit edilmiştir.

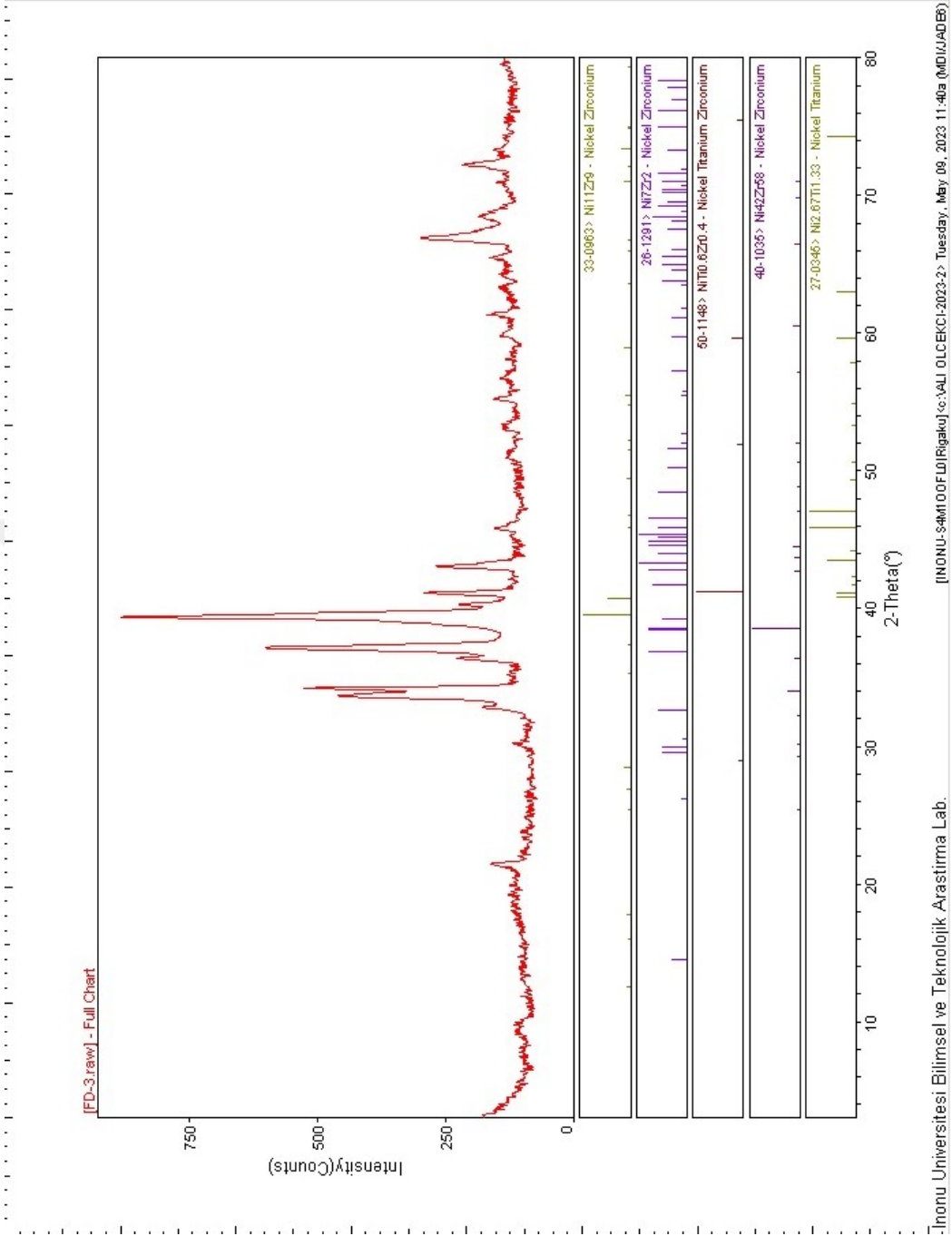


Şekil 5.3. Üç Numune Ait XRD Grafiği ve Faz Bölgeleri



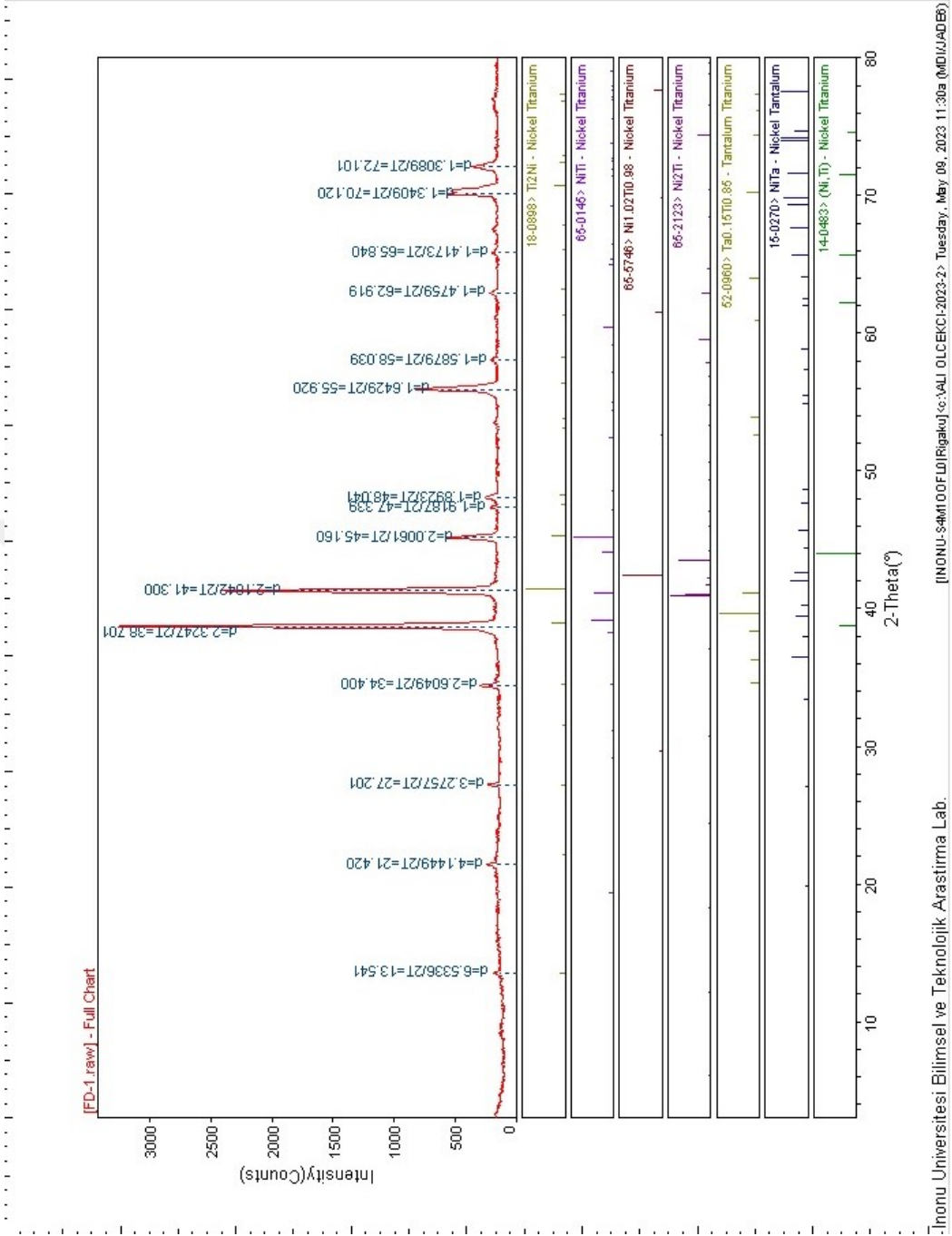
Şekil 5.4. S1 Numunesine ait XRD Faz Analizi Ölçümü

Şekil 5.4.'te S1 numunesinin faz analizi ölçüm sonuçları verilmiştir. Ölçümü yapılan S1 numunesinin faz analizi sonucunda en yüksek pik değerinde TiNb fazı görülmektedir.



Şekil 5.5. S2 Numunesine ait XRD Faz Analizi Ölçümü

Şekil 5.5.'de S2 numunesinin faz analizi ölçüm sonuçları verilmiştir. Ölçülen S2 numunesinin faz analiz sonucunda en yüksek pik değerlerinin Ni₁₁Zr₉ ve Ni₇Zr₂ fazları olduğu görülmektedir.

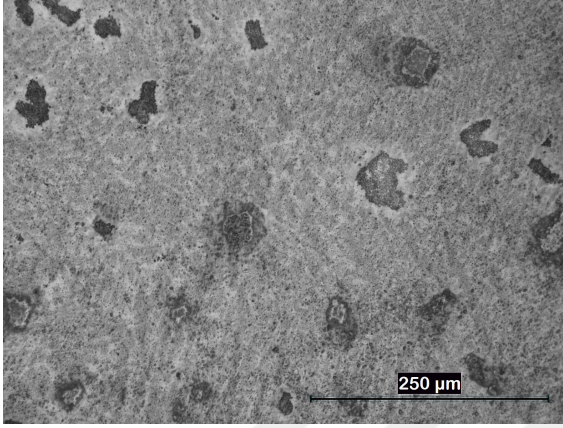


Şekil 5.6. S3 Numunesine ait XRD Faz Analizi Ölçümü

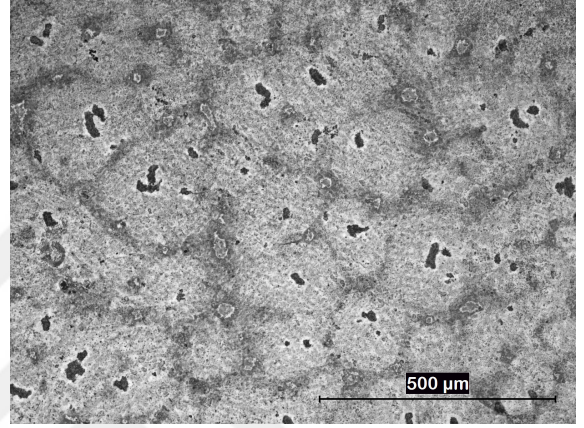
Şekil 5.6.'da S3 numunesinin faz analizi ölçüm sonuçları verilmiştir. Bu analiz sonucuna göre en yüksek pik değerinde Ti_2Ni çökelti fazı görülmüştür.

5.3. Optik Mikroskop Sonuçları

S1 Numunesinde S2 numunesine göre çökelti yapılarının daha büyük olduğu ve bu çökelti arasında mesafelerin birbirinden S2 numunesine göre çökeltilerinin birbirlerine yakınlığına oranla daha uzak olduğu, sayıca az fakat yüzey alanı olarak daha geniş çökeltilere sahip olduğu Şekil 5.7.'de görülmektedir. Dendrit yapılarını S3 numunesine göre kısa boylu ve etrafları sığ çökeltiyle çevrili tanecikli yapı içerisinde ise derin ve belirgin çökeltilere sahip olduğu Şekil 5.8.'de görülmektedir.

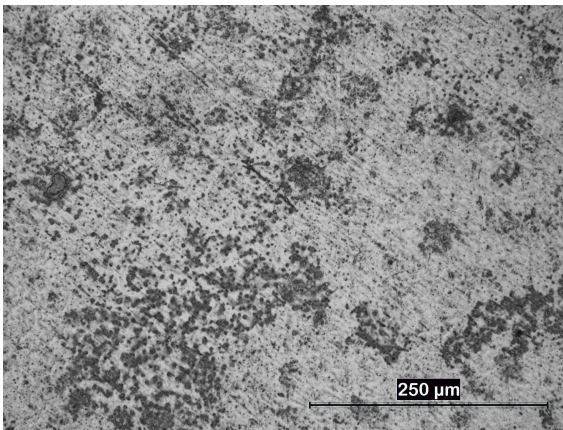


Şekil 5.7. TiNiNb 200X Optik Mikroskop Görüntüsü

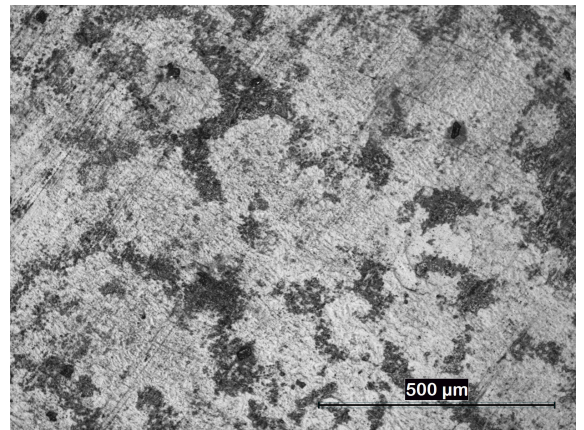


Şekil 5.8. TiNiNb 100X Optik Mikroskop Görüntüsü

S2 Numunesinde noktasal ve kısa uzunluktaki dendrit yapıları görülmektedir. Çökeltilerin dendritlere oranla S3 ve S1 numunelerine göre S2 numunesinde daha rastlanmıştır. Şekil 5.9.'da ve Şekil 5.10.'da çökelti noktalar kümeleri şeklinde birbirine yakın görülmektedir.



Şekil 5.9. TiNiZr 200X Optik Mikroskop Görüntüsü

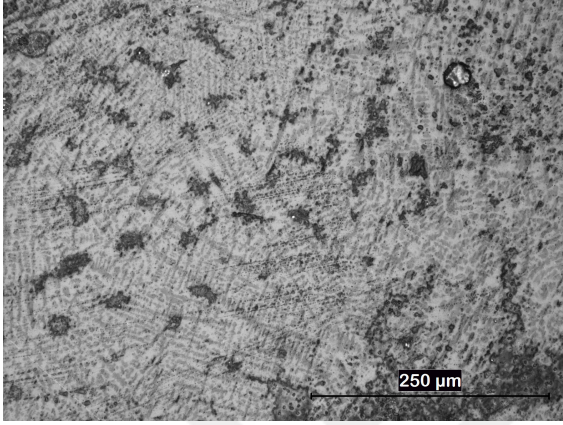


Şekil 5.10. TiNiZr 100X Optik Mikroskop Görüntüsü

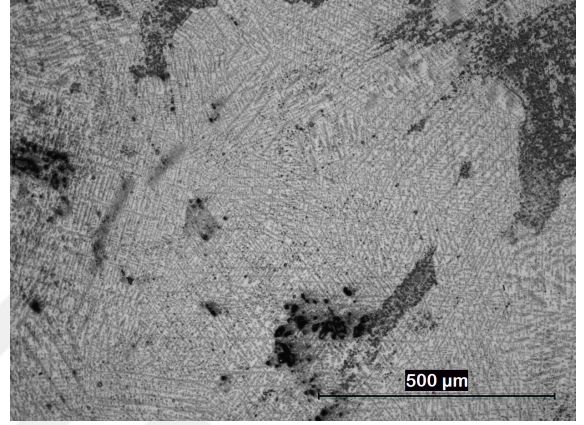
S3 numunesinin 200X ve 100X büyütme ile optik mikroskop incelemesi Şekil 5.11.'de ve Şekil 5.12.'de gösterilmiştir. Şekil 5.11.'de dendrit yapılarının olduğu ve bu dendrit

yapıların bir doğrultuda uzanarak ve dallanarak oluştuğunu söylenebilir. Bazı bölgelerde çökeltilerin oluştuğu görülmektedir.

S3 numunesine ait 100X optik büyütme Şekil 5.12.'de gösterilmiştir. Şekil 5.12.'de dentrit yapıların sadece çizgi halinde gözlenebilmekte ve detritlerin bir uzun bir yol boyunca ilerlerken birbirleriyle kesişimi görülmektedir.



Şekil 5.11. TiNiTa 200X Optik Mikroskop Görüntüsü



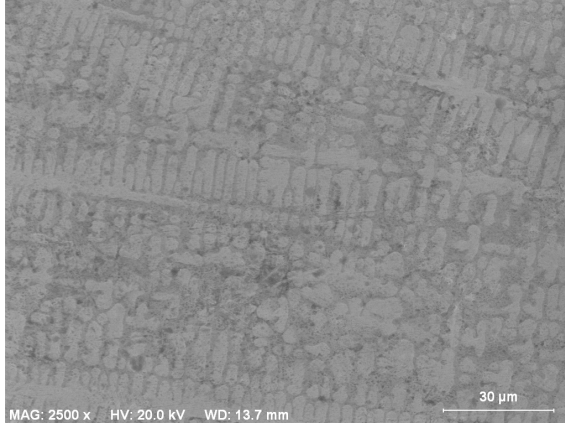
Şekil 5.12. TiNiTa 100X Optik Mikroskop Görüntüsü

5.4. SEM-EDX Analiz Sonuçları

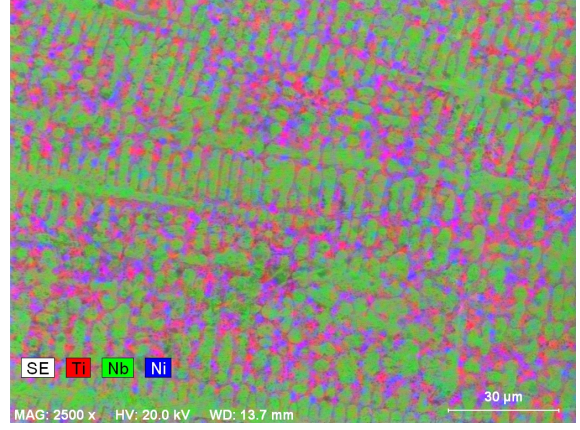
Elektron yoğunluklarını ölçmek için SEM kullanılır. Belirli bir bölgede kimyasal analiz yapabilmek için EDX ölçüm cihazı kullanılmıştır. Yüzey haritalandırma yapılarak numunelerin farklı renklerde gözlemlenip daha hızlı ve rahat analiz yapılmıştır. Her numunenin yüzey haritlandırılması, SEM görüntüleri ve EDX ölçümleri yapılmıştır.

5.4.1. TiNiNb (S1) Numunesine ait SEM-EDX Analiz Sonuçları

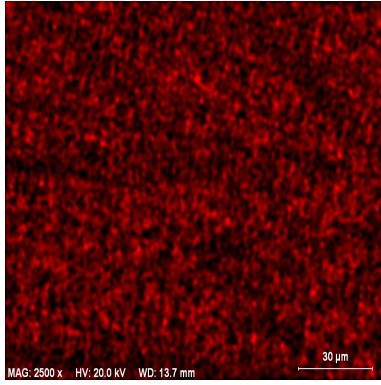
S1 Numunesinin SEM görüntüleri Şekil 5.13.'de verilmiştir. Şekil 5.13.'de dentrit yapıların varlığı görülmektedir. Detrit yapıları Şekil 5.13.'de sıralı halde ve ince bir doğrultuda devam eden dentritle dik şekilde kesişen dentrit yapılarının olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.13.'deki SEM görüntüsünün haritalanması yapılmış ve Şekil 5.14.'de gösterilmiştir.



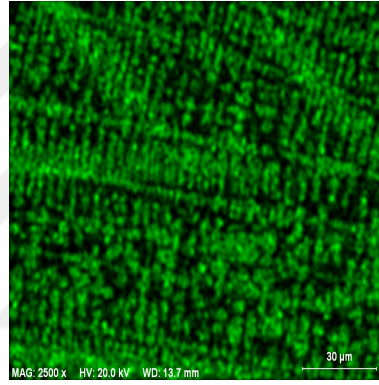
Şekil 5.13. TiNiNb SEM



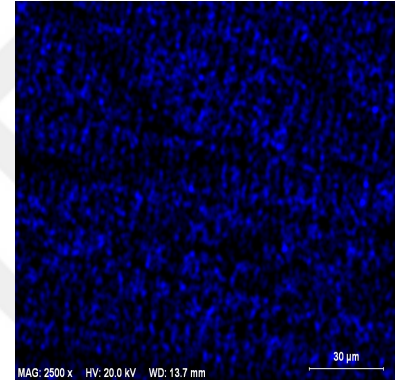
Şekil 5.14. TiNiNb MAP



(a) Ti MAP



(b) Nb MAP



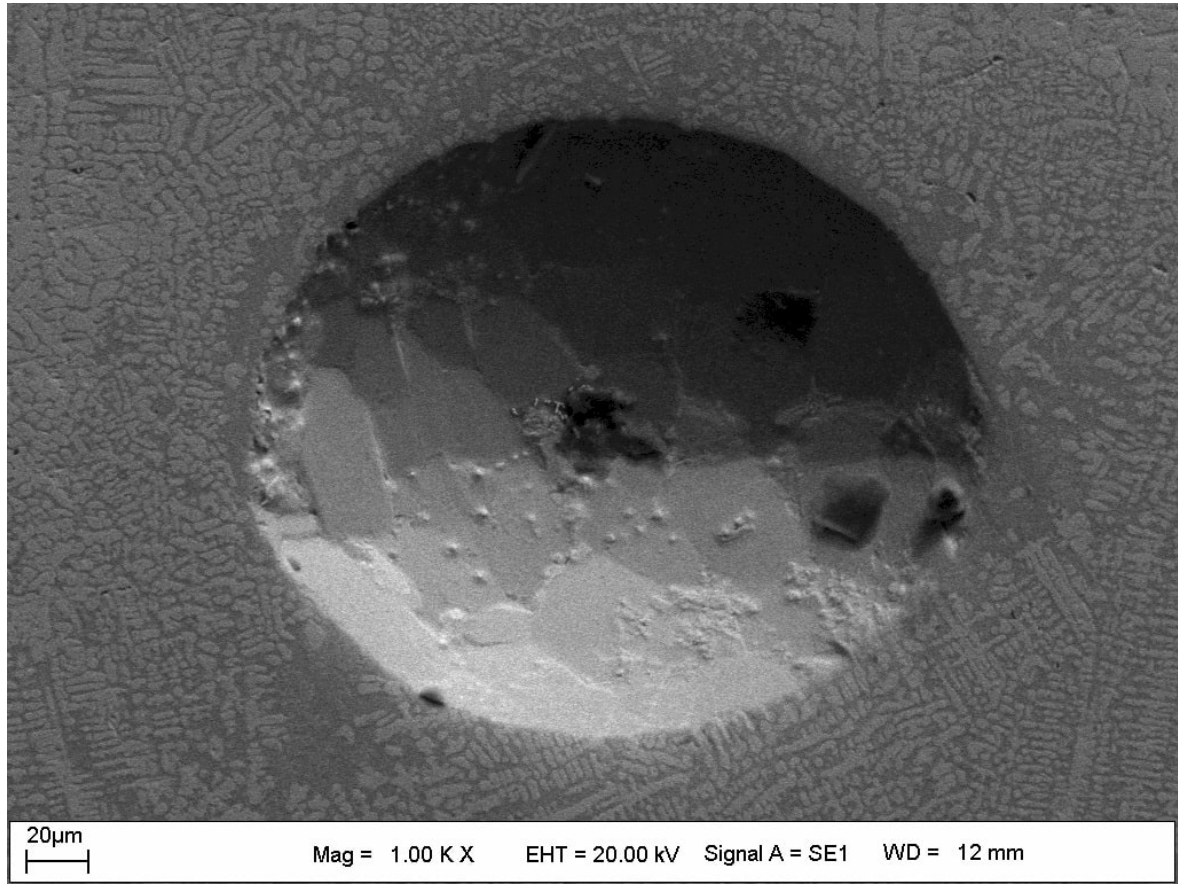
(c) Ni MAP

Şekil 5.15. TiNiNb MAP Katmanları

Nb metalinin etkileri Şekil 5.14.'de yeşil renkle gösterilen, dentritleri oluşturduğunu ve kısmen çökeltilere sebep olduğunu söylenebilir. Şekil 5.14.'e ait TiNiNb ŞHA'nı oluşturan metallerin alt katman görüntülere Şekil 5.15.'de Şekil 5.15.a Ti, Şekil 5.15.b Nb ve Şekil 5.15.c Ni renkleriyle gösterilmiştir.

S1 numune yüzeyinde meydana gelen düzgün dairesel şekle sahip çukurun oluşumu ve oluşan çukurun sınırları keskin hatlarla belirgin haldeki görüntüsü Şekil 5.16.'da verilmiştir. Şekil 5.16.'dan alınan EDX ölçüm sonucunda Şekil 5.17.'de gösterilen yaklaşık olarak 200 μm çapındaki düzgün dairesel bölgenin EDX ölçümüne göre Tablo 5.1.'de alınan değerlerle karşılaştırması yapılarak; Şekil 5.18.'in spektrumundan %at. değerleri bakımından Ti metalinin oranı Ni metaline göre oranı yaklaşık olarak iki kat olarak ölçülmüştür. Çökelti bölge içerisinde yine küçük

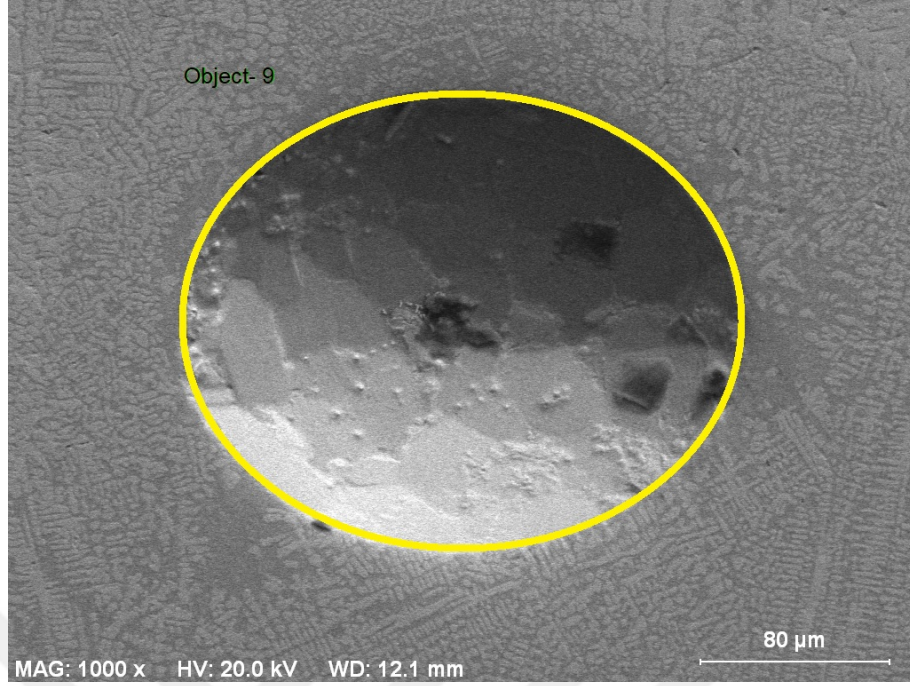
çökeltilerin oluşturduğu boşlukların meydana geldiği ve bu çökelti bölgesinde martensit faz sınırlarının belirgin olduğu Şekil 5.16.'da görülmektedir.



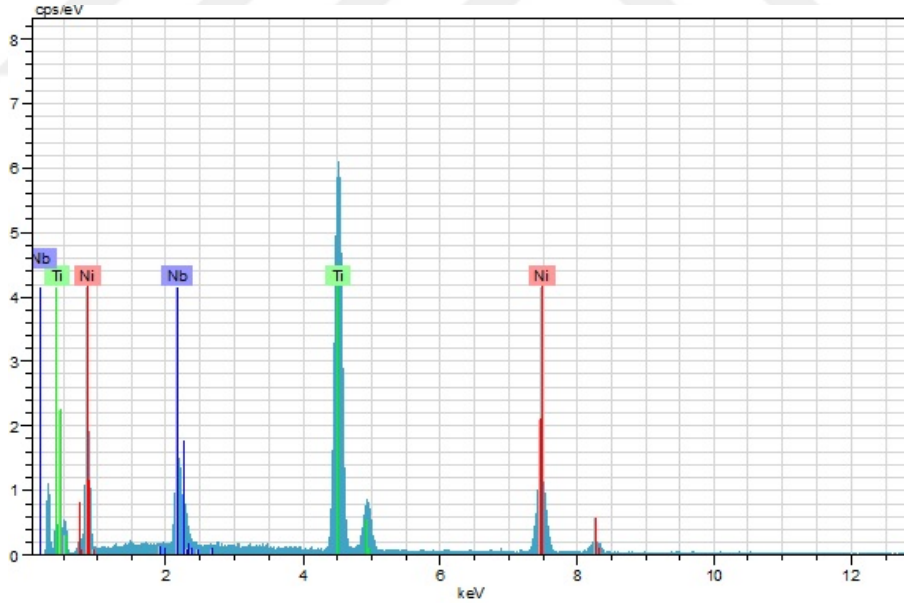
Şekil 5.16. S1 Yüzey Morfolojisindeki Çökelti

Alaşım	Object No.	Ti(%)	Ni(%)	Nb(%)	Faz
S1	6	49.96±1.2	20.23±0.6	29.81±1.8	Ti ₂ Ni
	7	61.96±1.7	32.70±1.1	5.34±0.4	
	8	36.38±0.8	4.15±0.2	59.47±3.3	
	9	59.83±1.5	31.55±1	8.62±0.6	
	10	48.96±1.2	18.85±0.6	31.19±2.0	β-Nb
	11	48.53±1.2	17.48±0.6	33.98±2.1	
	12	37.10±0.8	4.10±0.2	58.80±3.0	
	13	62.02±1.6	32.16±1.1	5.82±0.4	

Tablo 5.1. S1 Alaşımının Kimyasal Analiz Sonuçları



Şekil 5.17. S1 Yüzey EDX

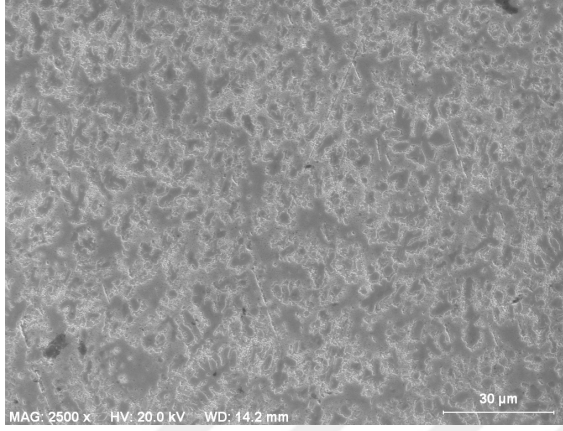


Şekil 5.18. S1 Object-9 EDX Grafiği

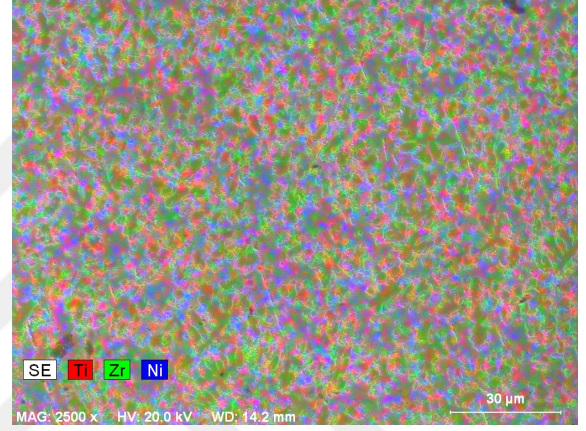
Şekil 5.18.'deki alaşımı oluşturan spektrum değerleri ve Şekil 5.4.' de yer alan XRD sonuçlarının birbirine yakın olduğu Ti_2Ni çökelti fazı ve $TiNi$ faz olduğu söylenebilir. Ayrıca Şekil 5.16.'daki çökelti bölgesinde farklı renk tonlarına sahip meydana gelen grainlerin oluşumu plakalar halinde görülmektedir.

5.4.2. TiNiZr (S2) Numunesine ait SEM-EDX Analiz Sonuçları

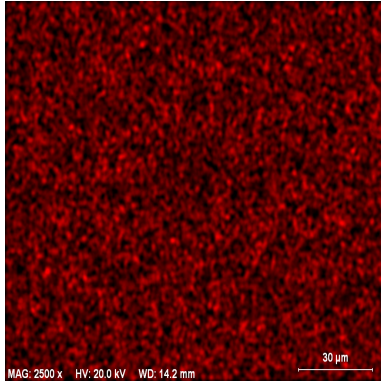
S2 Numunesinin 2500X yakınlaştırılmış SEM görüntüsü Şekil 5.19.'de verilmiştir. Zr metalinin Şekil 5.20.'de dentrit yapıların varlığı bir çizgi boyunca değil noktasal olarak bir arada kümелendiği söylenebilir. Şekil 5.20.'deki SEM görüntüsünün haritalanması yapılmış ve Şekil 5.20.'de gösterilmiştir. Şekil 5.20.'de yeşil renkte olan Zr metalinin grup halinde dağıntık olarak yer aldığı görülmektedir. Şekil 5.20.'ye ait ŞHA 'nı oluşturan metallerin alt katman görüntülere Şekil 5.21.'de Şekil 5.21.a Ti, Şekil 5.21.b Zr ve Şekil 5.21.c Ni şeklinde gösterilmiştir.



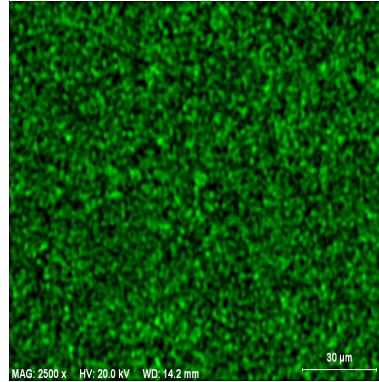
Şekil 5.19. TiNiZr SEM



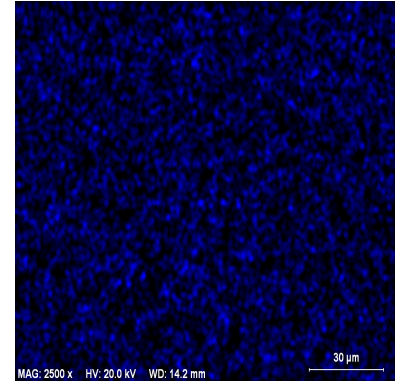
Şekil 5.20. TiNiZr MAP



(a) Ti MAP



(b) Zr MAP

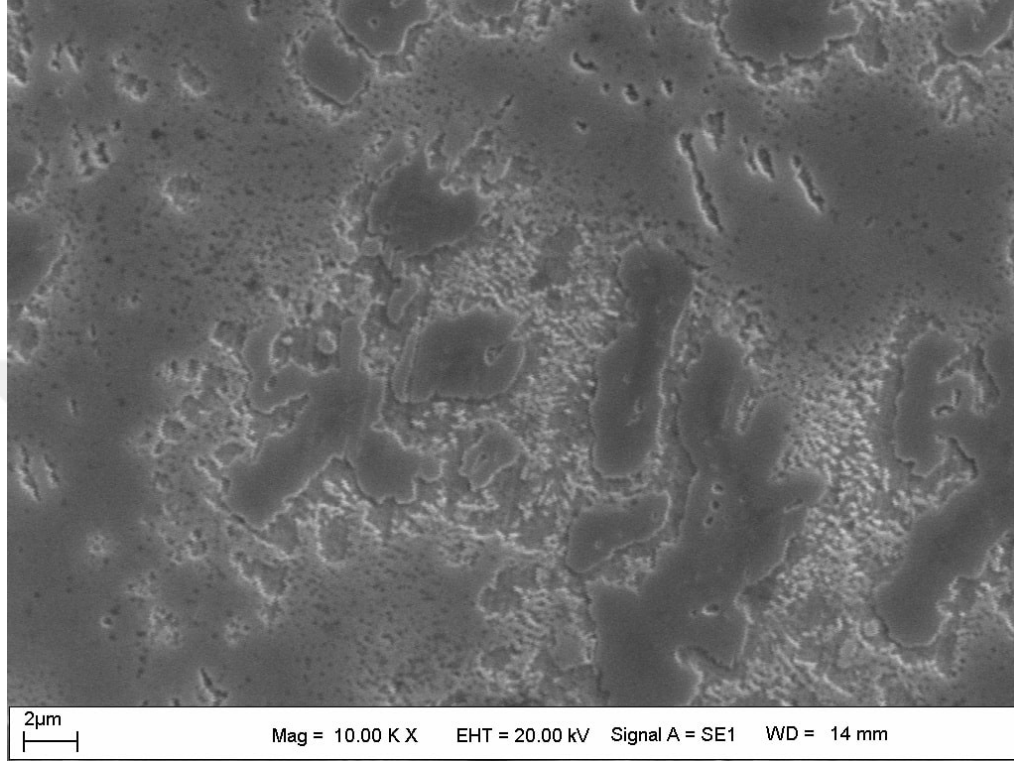


(c) Ni MAP

Şekil 5.21. TiNiZr MAP Katmanları

Şekil 5.20.'e ait TiNiZr ŞHA'nı oluşturan metallerin alt katman görüntülere Şekil 5.21.'de Şekil 5.21.a Ti, Şekil 5.21.b Zr ve Şekil 5.21.c Ni renkleriyle gösterilmiştir.

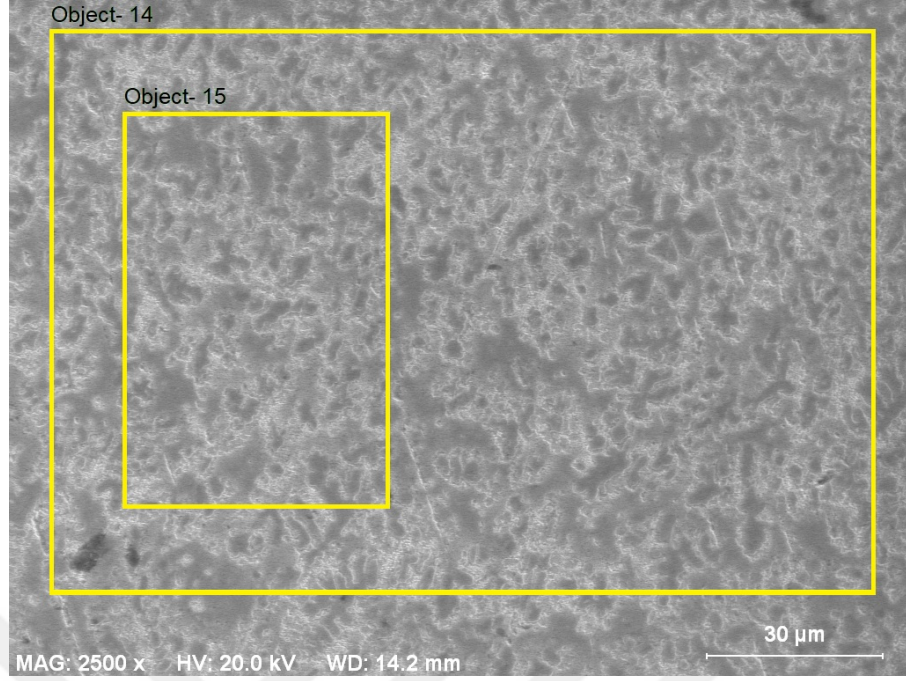
S2 numune yüzeyinin TiNi matris alaşımına Zr eklenmesiyle düzlemsel büyümlerin ve kalın yapıda dentritlerin meydana geldiği Şekil 5.22.'de görülmektedir. SEM- EDX ölçüm sonuçları Tablo 5.2.'de verilmiştir. Şekil 5.5.'deki XRD faz analizine göre Ni_{11}Zr fazının oluştuğunu tespit edildi.



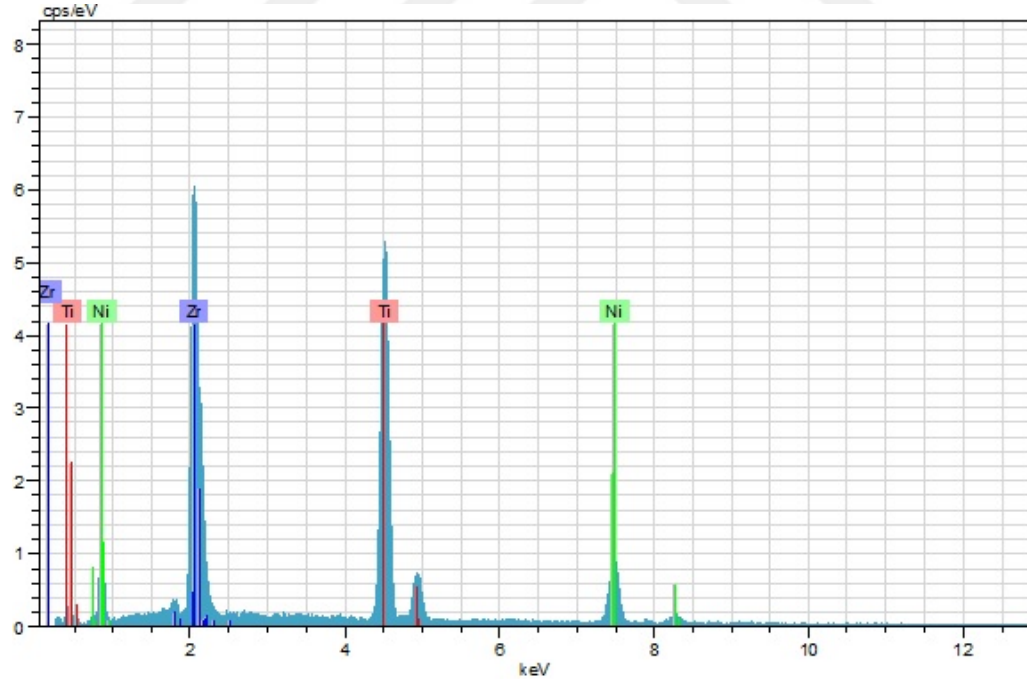
Şekil 5.22. S2 Yüzey Morfolojisindeki Düzlemsel Büyümlerin SEM Görüntüsü

Alaşım	Object No.	Ti(%)	Ni(%)	Zr(%)	Faz
S2	14	50.31±1.2	19.12±0.6	30.57±1.8	Ni_{11}Zr
	15	50.15±1.2	19.03±0.6	30.82±1.9	Ni_{11}Zr
	16	50.00±1.2	29.81±1.8	30.78±1.9	Ni_{11}Zr
	17	50.63±1.2	18.54±0.6	30.83±1.9	Ni_{11}Zr

Tablo 5.2. S2 Alaşımının Kimyasal Analiz Sonuçları



Şekil 5.23. S2 Yüzey Morfolojisindeki 3 Boyutlu Dentritlerin SEM Görüntüsü



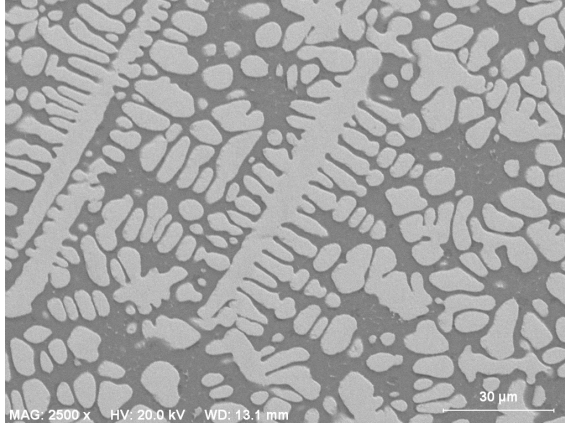
Şekil 5.24. S2 Object-14 EDX Grafiği

Şekil 5.24.'de Zr katkılı S2 numunesine ait EDX grafiğinde Ti, Ni, Zr ait ölçüm sonuçları yer almaktadır.

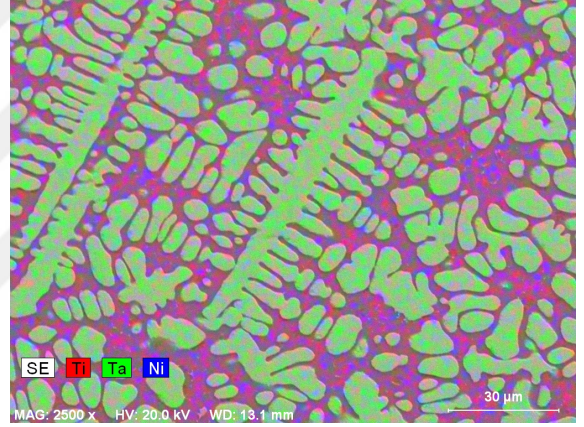
5.4.3. TiNiTa (S3) Numunesine ait SEM-EDX Analiz Sonuçları

S3 Numunesinin 2500X yakınlaştırmış SEM görüntüsü Şekil 5.25.'de verilmiştir. Ta metalinin Şekil 5.25.'de dentrit yapıları kalın çizgiler halinde başlayıp belirgin bir şekilde devam ederek yanlara doğru dallanma yaparak ve kısmen incelerken yol aldığını söyleyebiliriz, çizgisel dentritlerin yanı sıra alan bazlı büyümelerin olduğu görülmektedir. Şekil 5.25.'de SEM görüntüsünün haritalanması yapılmış ve Şekil 5.26.'da gösterilmiştir. Şekil 5.26.'da yeşil renkte olan Ta metalinin çizgisel doğrultuda ve grup halinde yer aldığı gösterilmiştir.

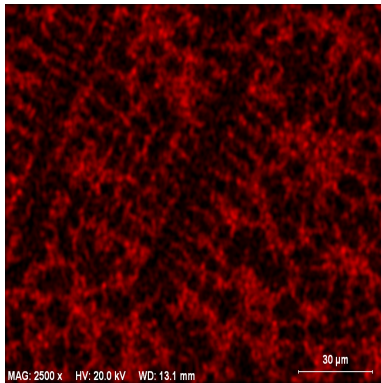
S3 numunesinin ŞHA'nın yüzey morfolojisindeki SEM görüntüsü Şekil 5.26.'da gösterilmiştir. Şekil 5.26.'da TiNi matrix yapısındaki alaşım içerisinde Ta metali eklenmesiyle oluşan yeni TiNiTa alaşımının dentritik yapılarının oluşumunda Ta'nın etkisi açıkça görüldü.



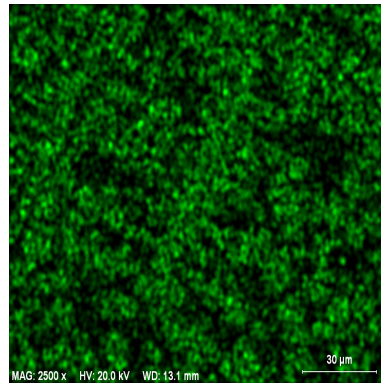
Şekil 5.25. TiNiTa SEM



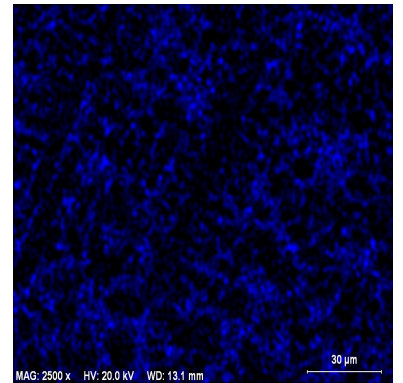
Şekil 5.26. TiNiTa MAP



(a) Ti MAP



(b) Ta MAP

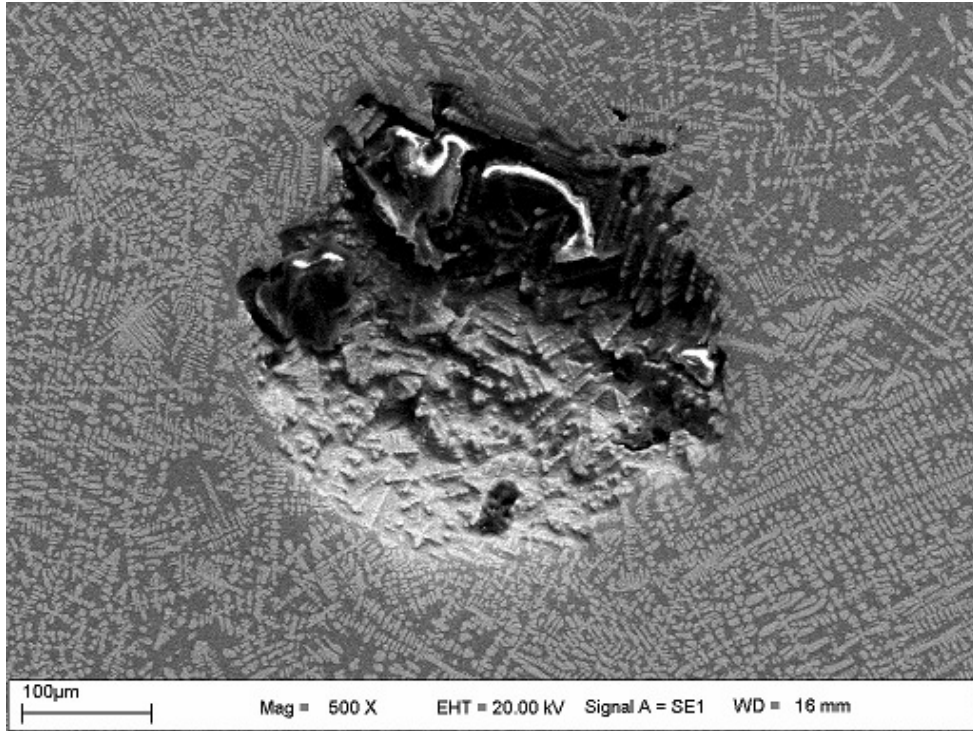


(c) Ni MAP

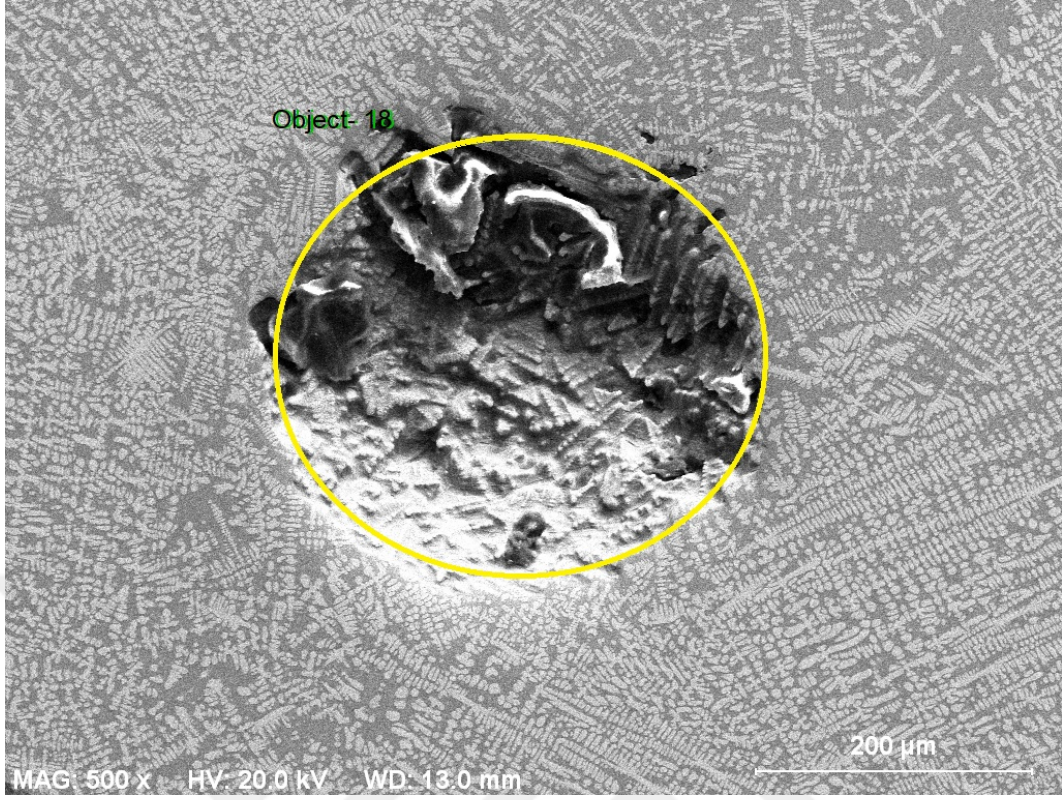
Şekil 5.27. TiNiTa MAP Katmanları

Şekil 5.26.'ya ait TiNiTa ŞHA'nı oluşturan metallerin alt katman görüntülere Şekil 5.27.'de Şekil 5.27.a Ti, Şekil 5.27.b Ta ve Şekil 5.27.c Ni renkleriyle birlikte gösterilmiştir.

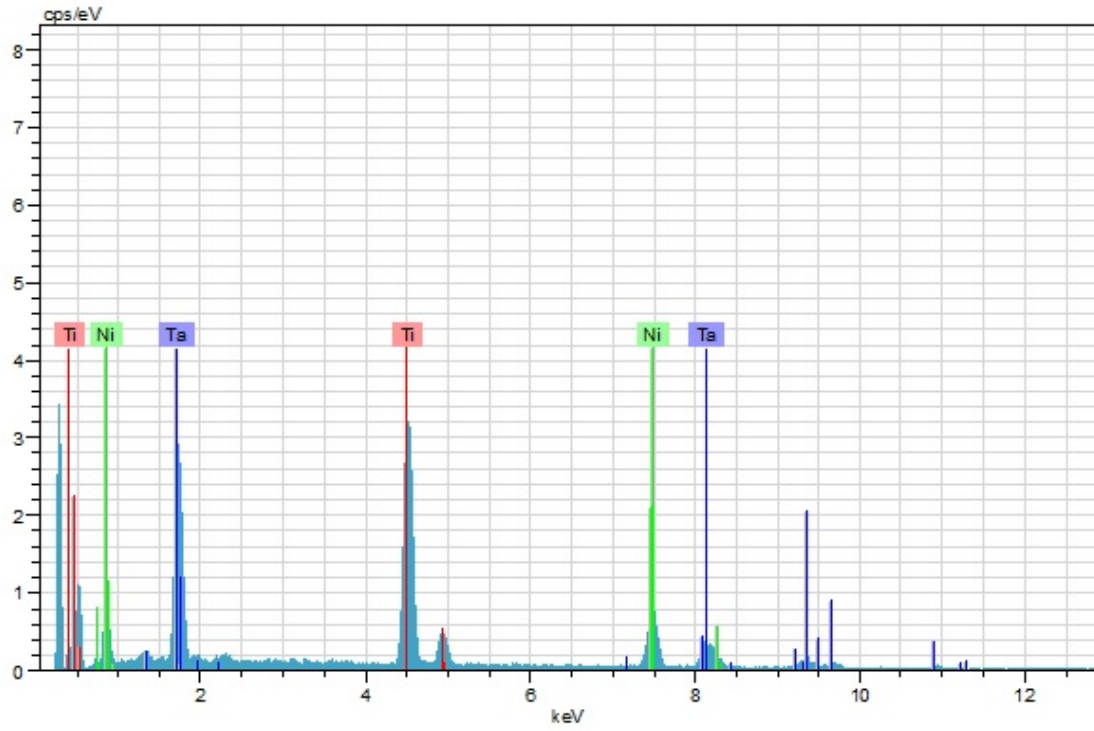
S3 numune yüzeyinin farklı noktasından alınan SEM görüntüsünde derin bir çökeltinin meydana geldiğini Şekil 5.28.'de görmekteyiz. Şekil 5.28.'den alınan EDX ölçüm sonucunda Şekil 5.29.'da gösterilen yaklaşık 400 μm çapındaki dairesel bölgenin EDX ölçümüne göre Tablo 5.3.'te alınan değerlerle yapılan analize göre; Şekil 5.30.'un spektrum değerleri Tablo 5.3.'ten alınarak %at. değerleri bakımından Ti oranı Ni 'ye oranının yaklaşık olarak iki katıdır. Şekil 5.30.'a göre ve EDX sonuçlarını uyuşması sonucunda Ti_2Ni çökelti fazının varlığı söylenebilir. Çökelti bölgesinde dentrit yapılarının çökeltinin üst yüzeyine taşması sonucu 3 boyutta gözlemlendi. TiNi matris yapısının içerisinde Ta metalinin kolaylıkla dentrit oluşturabildiği ve çökelti bölgesinden dış yüzeye doğru dentrit taşmalarının olduğu söylenebilir.



Şekil 5.28. S3 Yüzey Morfolojisindeki 3 Boyutlu Dentritlerin SEM Görüntüsü



Şekil 5.29. S3 Numunesi Çökeltisindeki Boşluğundaki 3 Boyutlu Dendritler



Şekil 5.30. S3 Object- 18 EDX Grafiği

Şekil 5.30.'un S3 numunesine ait EDX spektrum değerleri ile Şekil 5.6. XRD faz analiz ölçüm sonuçları karşılaştırılarak bu iki ölçüm sonuç değerlerinin birbiriyle tutarlılığı örtüşmüş ve Şekil 5.28.' de görüldüğü gibi Ti_2Ni çökelti fazının oluşumu gözlemlendi.

Alaşım	Object No.	Ti(%)	Ni(%)	Ta(%)	Faz
S3	1	61.23±0.6	13.11±0.3	25.66±1.1	
	2	47.61±0.5	10.49±0.2	41.9±1.7	
	3	45.15±0.7	14.29±0.3	40.57±2.3	
	4	57.38±1.3	27.66±0.8	14.96±1.4	Ti_2Ni
	5	60.53±1.5	32.37±1.0	7.1±0.8	Ti_2Ni
	18	58.08±1.3	32.11±1.0	9.81±1.0	Ti_2Ni
	19	66.80±1.7	26.04±0.9	7.17±0.8	Ti_2Ni
	20	33.75±0.4	4.27±0.1	61.98±2.5	$\beta-Ta$
	21	47.69±0.8	19.21±0.4	33.10±2	
	22	47.69±0.8	19.21±0.4	33.10±2.0	

Tablo 5.3. S3 Alaşımının Kimyasal Analiz Sonuçları

6. SONUÇLAR

TiNi alaşıımının ŞHÖ ve ŞHE'ne ek olarak ayrı ayrı eklenen Nb, Zr, Ta metalleriyle meydana getirilen sırasıyla S1, S2, S3 alaşıım numunelerinin DSC ölçümleri ile termodinamik değeri ve faz dönüşüm sıcaklıkları hesaplandı. Numunelerin kristal yapısı X-ışınları kırınımı SEM-EDX ile ölçülerek gözlemlendi. ŞHA'da temel fazlar olarak bulunan B19' ve B2 fazlarına hepsinde rastlandı. Ti_2Ni çökelti fazının S1 ve S3 numunelerinde sıklıkla meydana geldiği görüldü. S2 numunesinde ise $Ni_{11}Zr$ fazlarına sahip olduğu XRD ölçüm sonuçlarında tespit edildi.

Benzer kristal yapıya sahip olan Nb ve Ta metallerinin TiNi matris alaşıımına ayrı ayrı eklenmesiyle elde edilen numunelerin yüzey morfolojilerinde oluşturduğu dentrit yapıları ve çökelti olmasından dolayı Nb ve Ta'nın birbirine yakın sonuçlar verdiği, bununla birlikte Ta'nın daha büyük atom boyutu ve daha yüksek elektronegativitesi nedeniyle, faz dönüşüm sıcaklıkları üzerinde Nb'ye kıyasla daha büyük bir etkisi olduğu DSC ölçüm grafiklerinden de belli olmuştur. Ta'nın daha büyük atom boyutu, kristal yapıda daha fazla bozulmaya neden olması SEM görüntülerinde de Ta çökeltilerinin ve dentrit yapılarının Nb'ye göre daha fazla olmasını sağlamıştır. Zr gibi HCP kristal yapıya sahip metalin atomik boyutunun büyük olması ve Zr metalinin termal kapasitesinin yüksek olması faz dönüşüm sıcaklıklarını net bir şekilde DSC grafiğine yansıtamamasına neden olmaktadır ve faz dönüşüm sıcaklık değeri tam anlaşılamamaktadır, bu nedenle şekil hatırlama yeteneğinin zayıfladığı söylenebilir.

ŞHÖ'lü olan %50 Ti %20 Ni alaşıımının matris yapısına ek olarak %30 Nb eklenmesiyle faz dönüşüm sıcaklıklarında değişimlerin meydana geldiği görülmüştür. XRD analizi ile Ti_2Ni çökelti fazının olduğu aynı zamanda SEM-EDX görüntü ve kimyasal ölçümlerinde de açıkça tespit edilmiştir. SEM görüntülerinde dentrit oluşumları meydana geldiği, çökelmelerin çok belirgin bir halde oluşması ve çökelti bölgesinde martensit faz çizgilerinin olduğu ve farklı kontrastlardaki sınırlarının belirli olduğu grainlerin oluşumu gözlemlendi.

GELECEK ÇALIŞMALAR VE ÖNERİLER

Biyoyumlu malzeme ve ekipman üretimi için TiNi ŞHA kullanılması gereken yerlerde Ni metalinin toksik etkisinin azaltılması amacıyla karışım atomik yüzde miktarı ve kütlece ağırlık oranı düşük tutulmuş ve genel olarak alaşımın termal ve mekanik çalışma bölgelerini artırmak ve şekil hatırlama etkiside korumak amacıyla farklı metaller eklenmiş ve deneyler yapılmıştır.

Yaygın ve ekonomik bir kullanımı olan TiNi ŞHA'lar hem şekil hatırlama yeteneği hem de çalışacağı biyo ortamlarda biyobozunmalara sebebiyet vermemesi için biyoyumluluk açısından optimize edilmelir. Ti metali biyoyumlu bir metaldir. Ni metali biyoyumluluk açısından çok iyi sayılmaz. Nikel iyonlarının canlı vücudunda birikmesi, alerjik reaksiyonlara ve potansiyel toksisiteye neden olmasından dolayı biyolojik ortamlarda kullanılması uygun değildir.

Ni metalinin canlı ortamlarda kullanımını sınırlandırarak toksik etkisinin azaltılması ve TiNi alaşımlarının şekil hafıza yeteneğiyle birlikte biyoyumluluğunun artırılması için bu tezde yapılan çalışmalara benzer farklı biyoyumlu üçüncü bir metal eklenerek yeni alaşımlar oluşturulabilir.

Biyolojik ortamlarda yüksek sıcaklık değerleriyle karşılaşılması sonucunda Ni metalinin biyo ortamda kolay reaksiyona girmesini engellemek amacıyla TiNi ŞHA'nın termal kapasitesinin yerine termal iletkenliğinin artırılması için ek soğutma elemanları kullanılabilir bu sayede termal çalışma bölgesi düşük sıcaklıklarda olan yerlerde canlı organizmalarda tepkimeye neden olabilecek reaksiyon sıcaklığına ulaşamayacağı için Ni toksik etkisi azaltılmış olacaktır.

TiNi ŞHA'nın kaplama teknikleriyle dış ortamdan izole edilerek biyo ortamlarda istenen hareket kabiliyetine sahip yine ŞHÖ olan biyoyumlu metal veya farklı malzeme türü ile kaplanmış TiNi ŞHA kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Ölander, "An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 54, no. 10, pp. 3819–3833, 1932.
- [2] L. B. Vernon and H. M. Vernon, *Process of manufacturing articles of thermoplastic synthetic resins*, US Patent 2,234,993, 1941.
- [3] W. J. Buehler and F. E. Wang, "A summary of recent research on the nitinol alloys and their potential application in ocean engineering," *Ocean Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 105–120, 1968.
- [4] Ü. Kartal, "Nikel titanyum şekil bellekli alaşımlarının üretiminin incelenmesi ve uygulama alanları / Examination of the production of nickel titanium shape memory alloys," 2013.
- [5] K. Otsuka and C. M. Wayman, *Shape memory materials*. Cambridge university press, 1999.
- [6] A. Aygahoğlu, "Şekil bellekli alaşımlar," *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, no. 001, pp. 179–192,
- [7] A. Aygahoğlu, "Şekil bellekli ve uygulama alanları / Shape memory alloys and their application," 1993.
- [8] G. F. Vander Voort, *Metallography, principles and practice*. ASM international, 1999.
- [9] D. M. Brunette, P. Tengvall, M. Textor, and P. Thomsen, *Titanium in medicine: material science, surface science, engineering, biological responses and medical applications*. Springer, 2001.
- [10] X. Liu, P. K. Chu, and C. Ding, "Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 47, no. 3-4, pp. 49–121, 2004.
- [11] A. Ç. Bedeloğlu, "Şekil hafızalı alaşımlar ve tekstil malzemelerindeki uygulamaları," *Tekstil ve Mühendis*, vol. 18, no. 83, pp. 27–37, 2011.
- [12] C. Jackson, H. Wagner, and R. Wasilewski, "The alloy with a memory, 55-nitinol: its physical metallurgy, properties, and applications," *NASA, Tech. Rep.*, 1972.
- [13] D. A. Porter, K. E. Easterling, and M. Y. Sherif, *Phase transformations in metals and alloys*. CRC press, 2021.
- [14] W. C. Roberts-Austen, "X. bakerian lecture.—on the diffusion of metals," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, no. 187, pp. 383–415, 1896.
- [15] T. W. Duerig, K. Melton, and D. Stöckel, *Engineering aspects of shape memory alloys*. Butterworth-heinemann, 2013.
- [16] P. Liu, S. Sun, S. Xu, M. Cao, and K. Feng, "Influence of holding time of annealing treatment on microstructure and properties of tig welded joint for p91 heat-resistant steel tube," *Kovove Mater*, vol. 56, pp. 245–252, 2018.
- [17] R. Kim, C. Bae, and J. Kim, "Initial deformation behaviors in lean duplex stainless steel," *Metals*, vol. 10, no. 7, p. 936, 2020.
- [18] H. Karaca, B. Basaran, I. Karaman, and Y. Chumlyakov, "Stress-induced martensite to austenite phase transformation in ni2mnga magnetic shape memory alloys," *Smart materials and structures*, vol. 21, no. 4, p. 045 011, 2012.
- [19] M. Bolgár, E. Nagy, L. Daróczy, M. Benke, V. Mertinger, and D. L. Beke, "Acoustic emission during austenite→ ϵ martensitic phase transformation in twip/trip steels," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 50, pp. 3495–3501, 2019.
- [20] R. Shu, H. Gong, G. Hu, and J. Huang, "A novel intelligent fan clutch for large hybrid vehicles," *Energies*, vol. 15, no. 12, p. 4308, 2022.
- [21] P. Seifert, C. Kastl, and A. Holleitner, "Material aspects of 3d topological insulators," in *Encyclopedia of Interfacial Chemistry*, K. Wandelt, Ed., Oxford: Elsevier, 2018, pp. 491–499.
- [22] M. Aliofkhazraei, *Handbook of Mechanical Nanostructuring*, 2 Volume Set. John Wiley & Sons, 2015, vol. 1.

- [23] Y. Katuna, M. Lisnichuk, K. Saksl, et al., "The structural characterization of ni-ti-zr metallic glass," *Acta Physica Polonica A*, vol. 131, no. 4, pp. 750–752, 2017.
- [24] L. Gomidelovi, E. Poega, A. Kostov, and N. Vukovi, "Thermodynamic properties and microstructures of different shape-memory alloys," *Materiali in tehnologije*, vol. 50, no. 1, pp. 47–53, 2016.
- [25] A. Yıldız, "Ferromanyetik şekil hafızalı fepd alaşımlarında manyetik ve martensitik dönüşümler," Ph.D. dissertation, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 47-64, 2013.
- [26] Y. Xia, Y. He, F. Zhang, Y. Liu, and J. Leng, "A review of shape memory polymers and composites: mechanisms, materials, and applications," *Advanced materials*, vol. 33, no. 6, p. 2 000 713, 2021.
- [27] D. C. Lagoudas, *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. Springer, 2008.
- [28] Z. Nishiyama, *Martensitic transformation*. Elsevier, 2012.
- [29] W. J. Buehler, J. V. Gilfrich, and R. Wiley, "Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition tni," *Journal of applied physics*, vol. 34, no. 5, pp. 1475–1477, 1963.
- [30] A. A. Zadpoor and J. Malda, *Additive manufacturing of biomaterials, tissues, and organs*, 2017.
- [31] F. Gil and J. Planell, "Effect of copper addition on the superelastic behavior of ni-ti shape memory alloys for orthodontic applications," *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, vol. 48, no. 5, pp. 682–688, 1999.
- [32] B. Dikici, "Toz metalurjisi yöntemiyle nikel titanyum alaşımlarının üretimi," Ph.D. dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [33] D. Kuchin, P. Lega, A. Orlov, V. Koledov, and A. Irzhak, "The smallest and the fastest shape memory alloy actuator for micro-and nanorobotics," in *2017 international conference on manipulation, automation and robotics at small scales (MARSS)*, IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [34] W. Wang and S.-H. Ahn, "Shape memory alloy-based soft gripper with variable stiffness for compliant and effective grasping," *Soft robotics*, vol. 4, no. 4, pp. 379–389, 2017.
- [35] J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, "A review of shape memory alloy research, applications and opportunities," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 1078–1113, 2014.
- [36] A. Lendlein and S. Kelch, "Shape-memory polymers," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 41, no. 12, pp. 2034–2057, 2002.
- [37] S. J. Mazlouman, A. Mahanfar, C. Menon, and R. G. Vaughan, "Reconfigurable axial-mode helix antennas using shape memory alloys," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 4, pp. 1070–1077, 2011.
- [38] W. Tang, "Thermodynamic study of the low-temperature phase b19' and the martensitic transformation in near-equiatomic ti-ni shape memory alloys," *Metallurgical and materials transactions A*, vol. 28, pp. 537–544, 1997.
- [39] S. Abdullah, E. Balci, I. Qader, and F. Dagdelen, "Assessment of biocompatibility and physical properties of ni–ti–zr–nb shape memory alloys," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, pp. 1–6, 2022.
- [40] E. Balci and F. Dagdelen, "The comparison of tininbta and tininbv smas in terms of corrosion behavior, microhardness, thermal and structural properties," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 147, no. 20, pp. 10 943–10 949, 2022.
- [41] E. Balci and F. Dagdelen, "Thermal, structural properties and potential dynamic corrosion study of ti-27ni-21nb-2ta sma," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, vol. 46, no. 1, pp. 353–359, 2022.
- [42] E. Balci, F. Dagdelen, S. Mohammed, and E. Ercan, "Corrosion behavior and thermal cycle stability of tinita shape memory alloy," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 1–8, 2022.

- [43] F. Dagdelen, E. Balci, I. Qader, Y. Aydogdu, and S. Saydam, “Effects of substituting nb with ta on microstructure and thermal properties of novel biocompatible tininbta shape memory alloys,” *Physics of Metals and Metallography*, vol. 122, no. 14, pp. 1572–1580, 2021.
- [44] X. Zhao, J. Xu, L. Tang, and S. Gong, “High temperature oxidation behavior of nitinb intermetallic alloys,” *Intermetallics*, vol. 15, no. 8, pp. 1105–1115, 2007.



ÖZGEÇMİŞ

Samet SADAk

[REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]

██████████

[REDACTED]

██████████

1003

██████████

1103

[REDACTED]
[REDACTED]

██████████

[REDACTED]

AKADEMİK FALİYETLER

Projeler

1.

$$\vdots$$

Elde Taşınabilir Mayın Tespit Sistemi(ETMTS) Projesi-
Stajyer Mühendis TÜBİTAK BİLGEM ,
Gebze/KOCAELİ, 2012