

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**NiMnSnTa FERROMANYETİK ŞEKİL
HATIRLAMALI ALAŞIMLARIN ÜRETİLMESİ VE
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Gülşen EMİR

Yüksek Lisans Tezi

FİZİK ANABİLİM DALI

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

OCAK 2021

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**NI₄M₂NSn₂TA FERROMANYETİK ŞEKİL ALAŞIMLARIN HATIRLAMALI
FİZİKSEL ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Tez Yazarı
Gülşen EMİR

Danışman
Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN

OCAK 2021
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: NiMnSnTa Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımların
Üretilmesi Ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması

Yazarı: Gülşen EMİR

İlk Teslim Tarihi: 01.12.2020

Savunma Tarihi: 07.01.2021

TEZ ONAYI

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

İmza

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

Başkan: Doç. Dr. Fatih Ahmet ÇELİK Onayladım
Bitlis Eren Üniversitesi Fen- Edebiyat Fakültesi

Üye: Prof. Dr. Mediha KÖK Onayladım
Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi

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

İmza

Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “NiMnSnTa Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımların Üretilmesi Ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması” 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.

07.01.2021

Gülşen EMİR



ÖNSÖZ

Şekil hatırlamalı alaşımlar günümüzde oldukça ilgi görmekte ve birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu alana katkı sağlamak amacıyla tez çalışmamda NiMnSnTa Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımların Üretilmesi ve Fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Ni (Nikel) elementini azaltıp aynı oranda Ta (Tantalyum) elementi eklenerek ürettiğimiz numunelerin fiziksel özelliklerini DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre), X-Işını analizi ve yüzey morfolojisi incelemesi yapılmıştır. Alaşımlarda azalan Ni elementi oranında artan Ta elementi miktarına göre faz dönüşüm sıcaklıklarının önemli oranda azaldığı belirlendi.

Bu tez çalışmasını gerçekleştirmemi sağlayan ve tez çalışmalarım esnasına gösterdiği büyük ilgi ve yardımlarından dolayı danışmanım Sayın Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN'e, çalışmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek gelişmeye katkı sağlayan hocamlarım Sayın Prof. Dr. Mediha KÖK ve Sayın Dr. Ercan ERCAN'a, tez çalışmalarım boyunca her konuda yardımcı olan ve çalışmalarımın destek olan hocam Sayın Doç. Dr. Özlem EMİR ÇOBAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak yüksek lisans eğitimim boyunca manevi desteklerini esirgemeyen eşim Kürşat EMİR ve oğlum Mustafa Efe EMİR'e teşekkür ederim.

Gülşen EMİR
ELAZIĞ, 2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR	4
2.1. Martensit Dönüşüm	4
2.2. Termoelastik Martensit Dönüşümler	7
2.3. Martensit Dönüşüm Dinamiği	9
2.4. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Genel Karakteristikleri	10
2.4.1. Şekil Hatırlama Etkisi	10
2.5. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kullanım Alanları	15
3. MANYETİK MALZEME	17
3.1. Manyetik Dipoller	17
3.2. Manyetizma Türleri	17
3.2.1. Diyamanyetizma.....	19
3.2.2. Paramanyetizma	19
3.2.3. Ferromanyetizma.....	20
3.2.4. Antiferromanyetizma	21
3.2.5. Ferrimanyetizma.....	21
3.3. Sıcaklığın Miknatıslanmaya Etkisi	22
4. HEUSLER ALAŞIMLARI	24
4.1. Heusler Alaşımların Yapısal Özellikleri	24
5. MATERYAL VE METOT.....	26
5.1. Numune Hazırlama.....	26
5.2. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Ölçümleri	27
5.3. X-Işını Analizi (XRD).....	28
5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)-EDX Analizi.....	29
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
6.1. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Ölçüm Sonuçları	30
6.2. X-Işını Analizi (XRD) Analizleri	33
6.3. SEM Ölçümleri (SEM/EDX Sonuçları)	34
7. SONUÇLAR.....	43
ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ.....	

ÖZET

NiMnSnTa Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımların Üretilmesi Ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması

Gülşen EMİR

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı
Ocak 2021, Sayfa: xi + 48

Bu çalışmada, alaşım oranı sırasıyla Ta0, Ta1 ve Ta3 kodları verilen Ni-39Mn-11Sn, Ni-39Mn-11Sn-1Ta ve Ni-39Mn-11Sn-3Ta (atomikçe yüzdeli) Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımların üretilmesi ve fiziksel özelliklerin incelenmesi yapılmıştır.

Alaşımların faz dönüşüm sıcaklıkları, termodinamik parametreleri ve aktivasyon enerjisini belirlemek için diferansiyel taramalı kalorimetresi (DSC), martensit faz halindeki kristal yapı tayini için X-ışını analizi cihazı (XRD), yüzey morfolojisi incelenmesinde optik mikroskop ve SEM kullanılmıştır.

DeneySEL çalışmalar sonucunda alaşımlarda azalan Nikel (Ni) elementi oranında artan Tantalum (Ta) elementi miktarına göre faz dönüşüm sıcaklıklarının daha düşük sıcaklıklarda olduğu gözlemlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDX) ölçümlerinde hazırlanan alaşımların homojen bir kimyasal dağılım gösterdiği ve Ni elementinin azaltılarak Ta eklenen alaşımların bazı bölgelerinde β -Ta yapıları oluşturarak martensit plakalara katkı sağladığı görülmüştür. Alaşımların yüzeylerinden alınan EDX analizi ile malzemenin üretilen oranlarla uyumlu olduğu tespit edildi. Oda sıcaklığında X-ışınları alınan alaşımların martensitik mikro yapıya sahip olduğu belirlenmiştir.

Bu ölçümler sonucunda, NiMnSnTa alaşımlarında elementlerin oranlarının termodinamik özellikleri ve mikro yapı da önemli derecede etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlar, NiMnSnTa alaşımları, dönüşüm sıcaklıkları, Heusler alaşımları

ABSTRACT

Production And Investigation of Physical Properties of NiMnSnTa Ferromagnetic Shape Memory Alloys

Gülşen EMİR

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics
January 2021, Pages: xi + 48

In this study, Ni-39Mn-11Sn, Ni-39Mn-11Sn-1Ta and Ni-39Mn-11Sn-3Ta (percentage by atomic) ferromagnetic shape remembrance alloys, whose alloy ratios were given Ta0, Ta1 and Ta3 codes, respectively, were produced and their physical properties were examined.

Differential scanning calorimetric (DSC) was used to determine phase transformation temperatures, thermodynamic parameters and activation energy of alloys, X-ray analysis device (XRD) for martensite phase crystal structure determination, optical microscope and SEM for surface morphology investigation.

As a result of experimental studies, it has been observed that phase transformation temperatures occur at lower temperatures compared to the amount of Tantalum (Ta) element that increases in the ratio of the element Nickel (Ni) in the alloys. In scanning electron microscopy (SEM-EDX) measurements, it was observed that the prepared alloys showed a homogeneous chemical distribution and contributed to the martensite plates by forming β -Ta structures in some parts of the alloys added by reducing the Ni element. With the EDX analysis taken from the surfaces of the alloys, it was determined that the material was compatible with the produced ratios. It was determined that the alloys receiving X-rays at room temperature have a martensitic microstructure.

As a result of these measurements, it has been determined that the proportions of the elements in NiMnSnTa alloys have a significant effect on the thermodynamic properties and microstructure.

Keywords: Ferromagnetic shape memory alloys, NiMnSnTa alloys, transformation temperatures, Heusler alloys

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. NiTi şekil hatırlamalı alaşımın martensit ve austenit fazın kristal yapısı [19]	4
Şekil 2.2. (a)–(c). Şekil hatırlama etkisi ve süperelastiklik mekanizmalarının şekilleri, devamlı çizgiler şekil hatırlama yolunu ve kesikli çizgiler süperelastiklik yolunu göstermektedir. (d) Şekil hatırlama etkisini gösteren bir seri fotoğraf:(1) Ti-Ni kablosunun fazda düz hali; (2) kablonun martensit faza deforme edilmesi (3)-(5) kablonun A_s (bu sıcaklık dönüşümün tamamlanmasına kadar devam eder) üzerindeki sıcaklığa ısıtılması ile orijinal şekline dönmesi. (İç grafik) bir Cu-Al-Ni Tek kristalinin A_s sıcaklığının üstünde gerilme-gerinim süperelastiklik eğrisi. Kısım β_1 yönlendirilmiş fazı göstermekte; β_1 martensit fazı göstermekte [7]	5
Şekil 2.3. Sıcaklık etkisi ile oluşan austenit-martensit faz dönüşümünün şematik gösterimi [18]	6
Şekil 2.4. Martensit dönüşümün doğrultu ve düzlemlerdeki değişimin gösterimi [18]	7
Şekil 2.5. Paslanmaz çelikde oluşan plastik deformasyon ve SHE gösteren Nikel-Titanyum alaşımı [19] ...	8
Şekil 2.6. FeNi termoelastik olmayan ve AuCd termoelastik martensit sıcaklık histerisizinin karşılaştırılması eğrileri [24]	9
Şekil 2.7. Austenit (A, ana) ve martensit (M, ürün) fazların kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklıkla ilişkisi [25]	10
Şekil 2.8. Şekil hatırlamalı alaşımların farklı fazları [11]	11
Şekil 2.9. Şekil hatırlama etkisi gösteren yapı [32]	12
Şekil 2.10. Şekil hatırlama olayının oluşma şekli [28]	13
Şekil 2.11. Şekil hatırlamalı alaşımlarda tek yönlü şekil değiştirme [29]	14
Şekil 2.12. Şekil hatırlamalı alaşımlarda çift yönlü şekil değiştirme [29]	14
Şekil 2.13. NiTi alaşımının Ortodonti uygulaması [34]	15
Şekil 2.14. Damarlardaki tıkanma problemlerinin çözümünde kullanılan şekil hatırlamalı alaşımdan üretilmiş stentler [35]	15
Şekil 3.1. Manyetik davranış çeşitleri [35]	17
Şekil 3.2. Manyetik dipollerin yönü [37]	18
Şekil 3.4. Uygulanılan manyetik alana bağlı Paramanyetik malzemede bulunan manyetik momentlerin değişimi [36]	19
Şekil 3.4. Ferromanyetik malzemede bulunan uygulanılan manyetik alana bağlı olarak manyetik momentlerin değişimi [36]	20
Şekil 3.5. Ferromanyetik malzemenin (M-H) grafiği [41]	21
Şekil 3.7. Ferrimanyetik malzemenin manyetik moment dizilimleri [36]	22
Şekil 3.9. Sıcaklığın doyma mıknatıslığı üzerine etkisi [14]	22
Şekil 4.1. Heusler alaşımlarını meydana getiren elementlerin temel dizilimleri [40]	24
Şekil 4.2. Tam Heusler alaşımının birim hücresi [48]	25

Şekil 4.3. Yarı-Heusler alaşımın yapısı (C1 _b birim hücresi) [40].....	25
Şekil 5.1. Ark yöntemi ile eritme sistemi (Arc- Melter).....	27
Şekil 5.2. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ölçüm sistemi	27
Şekil 5.3. X-ışını kırınım (XRD) analizi yapılan sistem.....	28
Şekil 6.1. Numunelerin 20°C/dk ısıtma soğutma hızı ile alınan DSC sonucu	30
Şekil 6.2. Numunelerin 20°C/dk ısıtma soğutma hızı ile alınan DSC ölçümlerinin entalpi bölgelerinin belirlenmesi.....	31
Şekil 6.3. Numunelerin artan Tantalum (at.%) miktarına göre değişen A _s ve M _s dönüşüm sıcaklıkları	32
Şekil 6.4. Ta0, Ta1 ve Ta3 numunelerin X-ışını difraksiyon pikleri	33
Şekil 6.5. Ta0 alaşımının farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri a)x100 b)x250	34
Şekil 6.6. Ta0 alaşımının x250 büyütmede alınan kimyasal haritası.....	35
Şekil 6.7. Ta0 alaşımının tüm yüzeyden alınan EDX spektrumu	36
Şekil 6.8. Ta1 alaşımının farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri a) x250 b) x500	37
Şekil 6.9. Ta1 alaşımının x500 büyütmede alınan kimyasal haritası.....	37
Şekil 6.10. Ta1 alaşımının tüm yüzeyden alınan EDX spektrumu	38
Şekil 6.11. Ta1 alaşımının x500 büyütme fotoğrafında daire içerisinde belirtilen bölgeden alınan EDX spektrumu	39
Şekil 6.12. Ta3 alaşımının farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri a)x100 b)x500	40
Şekil 6.13. Ta3 alaşımının x100 büyütmede alınan kimyasal haritası.....	41
Şekil 6.14. Ta3 alaşımının tüm yüzeyden alınan EDX spektrumu	41
Şekil 6.14. Ta3 alaşımının x100 büyütme fotoğrafında daire içerisinde belirtilen bölgeden alınan EDX spektrumu	42

TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1. Numunelerin ağırlıkça (% ağ.), atomikçe (% at.) ve atom başına düşen elektron konsantrasyonları	26
Tablo 6.1. Numunelerin dönüşüm sıcaklıkları ve entalpileri	31
Tablo 6.2. Ta0 (Ni ₅₀ Mn ₃₉ Sn ₁₁) alaşımının tüm yüzeyden alınan ağırlıkça (% ağ.) ve atomikçe (% at.) EDX sonuçları.....	36
Tablo 6.3. Ta1 (Ni ₄₉ Mn ₃₉ Sn ₁₁ Ta ₁) alaşımının tüm yüzeyden alınan ağırlıkça (% ağ.) ve atomikçe (% at.) EDX sonuçları	38
Tablo 6.4. Ta1(Ni ₄₉ Mn ₃₉ Sn ₁₁ Ta ₁) alaşımının x500 büyütme fotoğrafında daire içerisinde belirtilen bölgeden alınan ağırlıkça (% ağ.) ve atomikçe (% at.) EDX sonuçları.....	39
Tablo 6.5. Ta3 (Ni ₄₇ Mn ₃₉ Sn ₁₁ Ta ₃) alaşımının tüm yüzeyden alınan ağırlıkça (% ağ.) ve atomikçe (% at.) EDX sonuçları	42
Tablo 6.6. Ta3 (Ni ₄₇ Mn ₃₉ Sn ₁₁ Ta ₃) alaşımının x100 büyütme fotoğrafında daire içerisinde belirtilen bölgeden alınan ağırlıkça (% ağ.) ve atomikçe (% at.) EDX sonuçları.....	42

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_f	: Austenit bitiş sıcaklığı
A_s	: Austenit başlama sıcaklığı
A_p	: Maksimum austenit sıcaklığı
B	: İç manyetik alan
C	: Curie sabiti
$^{\circ}C$: Celsius (sıcaklık birimi)
Cl_b	: hacim-merkezli kübik yapı
e/a	: Elektron konsantrasyonu
K	: Kelvin (sıcaklık birimi)
$L2_1$: Hacim-merkezli kübik yapı
M	: Mıknatıslanma
M_f	: Martensit bitiş sıcaklığı
M_s	: Martensit başlama sıcaklığı
M_p	: Maksimum martensit sıcaklığı
Mn	: Mangan
Ni	: Nikel
H	: Dış manyetik alan
T	: Sıcaklık
T_0	: Uygun düşük sıcaklık
T_C	: Curie sıcaklığı
T_N	: Neel sıcaklığı
T_m	: Martensit dönüşüm sıcaklığı
Sn	: Kalay
Ta	: Tantanyum
Ti	: Titanyum
XYZ	: Yarı Heusler alaşım dizilimi
X_2YZ	: Tam Heusler alaşım dizilimi
μ	: Manyetik geçirgenlik
$\Delta H_{(A-M)}$: Austenit'ten martensit'e geçiş entalpisi
$\Delta H_{(M-A)}$: Martensit'ten austenit'e geçiş entalpisi

Kısaltmalar

DSC	: Diferansiyel tarama kalorimetresi
FŞHA	: Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşım
HMK	: Hacim-merkezli kübik
SEM/EDX	: Taramalı elektron mikroskobu
ŞHA	: Şekil hatırlamalı alaşım
ŞHE	: Şekil hatırlama etkisi
ŞHÖ	: Şekil hatırlama özelliği
YSSHB	: Yüksek sıcaklıklı şekil hatırlama bölgesi
XRD	: X-ışını difraksiyonu

1. GİRİŞ

Şekil hatırlamalı alaşımlar (ŞHA), akıllı malzemeler olarak bilinir. ŞHA'ların ana karakteristikleri, kritik sıcaklığın üstünde ve altında farklı kristal yapıya veya şekle sahip olmalarıdır. Şekil hatırlama özelliğine (ŞHÖ) sahip materyallerin martensit fazda olduklarında deforme edilir daha sonra austenit faz sıcaklığına kadar ısıtılırsa austenit fazda iken sahip olduğu ilk şeklini veya görünümünü hatırlaması olayına verilen addır [1].

Malzeme biliminde uygun ısıl işlem ile gerçek yapısını, şeklini veya boyutunu geri hatırlayabilme özelliğine sahip metalik malzemeler, ŞHA'lar olarak isimlendirilir. Düşük sıcaklıklarda deforme edilebilen bu ürünlere bakarak, daha yüksek, büyük sıcaklıklarda deformasyon öncesi şekillerine yapılarına dönebilmektedirler. Bu ürünler sadece ısıtma durumunda eski şekline dönmesine "tek yönlü şekil hatırlamaya sahip malzemeler" olarak isimlendirilirken, yeniden soğutma durumunda ise "iki yönlü şekil hatırlamalı malzemeler" olarak isimlendirilir [2]. Şekil hatırlamalı alaşımlar (ŞHA) genellikle termoelastik martensitik yapı gösteren malzemelerdir. Bu yapıdaki ŞHA, dönüşüm sıcaklığının altında ikizlenme ve kayma mekanizmalarıyla deforme edilebilir. Ana faza ya da austenit faza dönüşüm için ısıtma yapıldığında ikizlenmiş olan kristal yapı eski haline döner, dolayısıyla deformasyon ortadan kaldırılabilir [3].

İlk kez Şekil hatırlamalı dönüşüm AuCd alaşımlarında 1932 yılında Chang ve Read tarafından keşfedilmiş, 1938'de de bu yapısal dönüşüm pirinç malzemedeki olduğu keşfedilmiştir. Daha sonrasında 1962'de Buehler ve arkadaşları, Nikel Titanyum (Ni-%50Ti) alaşımlarda şekil hatırlama etkisini (ŞHE) belirlemiştir [4]. Burada çalışılan bu alaşıma NiTiNOL (Nikel-Titanyum Naval Ordnance laboratuvarı) olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmalardan sonra hem ticari kullanımlarına hem de metalurjik araştırmalarına hız kazandırılmıştır [3].

Teknolojinin gelişmesiyle Cu ve Ni esaslı alaşımların üretimlerinin gelişmesi, alaşımların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmiş, endüstriyel alanda daha kullanışlı hale getirmiştir. Son yıllarda ileri teknoloji sınıfına girmiştir [5]. Şekil hatırlamalı alaşımlar (ŞHA) tıp alanında yani ortodontik diş tellerinde, endodontik uygulamalarda kullanılan aletlerde, damar tıkanıklıklarının ameliyatsız tedavisinde kullanılan stentlerde, ortopedik bağlantı elemanlarında; robot teknolojisi, uzay araçları, elektrik bağlantıları ve ince film uygulamaları gibi çok geniş uygulama alanları edinmiştir [6]. Şekil hatırlamalı alaşımlar, yangın alarmları gibi farklı sahalarda da kullanılmaya geçilmiştir. Ayrıca şekil hatırlamalı alaşımların, şekil değiştirme sırasındaki yüksek güçleri Japon Şekil Bellekli Alaşımlar Birliği tarafından kayaların parçalanmasında kullanılmıştır, alaşımın hafifliği ise NASA'nın uzay araştırmalarında ağır makinelerin yerine şekil bellekli alaşımları tercih edilmiştir. 1994 yılında Mars gezegenine gönderilen Pathfinder mobil robotun üstündeki güneş panellerinin kapak hareketinin oluşması için şekil hatırlamalı alaşımlar kullanılmıştır [7].

Dünyadaki teknolojik gelişmeler bakımından, yeni ürünlerin bulunması ve geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır [8]. Bu gelişmeler sadece ürün üretmeye yönelik olmamalı, bunun yanı sıra malzemelere yeni ve başka işlevler katabilmeli ve ürünün kullanım alanını genişleterek özelliğini artırabilmelidir [9]. Bu alandaki yeniliklerle birlikte ürünlerin fonksiyonelliği, mekanikte kullanılan elementlerde ve geliştirilmiş mekaniksel sistemlerde kullanılabilir. Şekil hatırlamalı alaşımlar da bu fikirlerin ürünüdür [10]. Şekil hatırlamalı alaşımların benzersiz özelliklerini kullanarak daha otomatik ve önceden düşünülmemiş kadar iyi kapasitede makineler yapmak mümkündür. Çalıştırıcı, medikal araçlarda ve akıllı yapıların uygulamalarında yoğun olarak kullanılan şekil hatırlamalı alaşımlara son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Şekil hatırlamalı alaşımlar, martensit dönüşümden dolayı özel bir sıcaklığa ısıtıldığında deforme olmuş halden eski, orijinal hale dönmesinden dolayı tıbbi ve mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Endüstride en fazla kullanılan Şekil hatırlamalı NiTi (Nikel-Titanyum) alaşımları ve Bakır (Cu) esaslı, Fe esaslı ve NiMnSn alaşımlar önemli ticari değere sahip alaşımlardır [11].

Araştırmalarda bugüne kadar birçok alaşımda şekil hatırlama etkisinin var olduğu bilinmektedir [12]. ŞHE bulunan yeni ürünler üretmek için önemli çabalar harcanmaktadır. Ama bugüne dek çok değişik alaşım elementleri ŞHE göstermesine rağmen, bunlardan yeterince ve gerektiği kadar uzayabilen, şekil değişimlerinde kullanılacak kuvvet yaratabilen malzemeler endüstriyel olarak daha ilgi çekici olarak kullanılmıştır [13]. ŞHA da, yüksek sıcaklıktaki austenit (ana) fazın uzun zaman alan dönüşümü sonucunda termoelastik martensitin oluşması martensitik dönüşüm olarak isimlendirilir. Atomların yer değiştirme miktarı çok büyük olmamasına rağmen hepsinin birden hacimsel olarak aynı doğrultuda yer değiştirmesinden dolayı, dönüşüm sonucunda çok küçük boyutta şekil değişimi gerçekleşir. Sonuç olarak ŞHA normal metal ve alaşımlardan değişik özelliklere sahip, ŞHE ve süperelastisite gibi üstün özellikleri ortaya çıkar [14].

Son yıllarda, şekil hatırlama özelliği ile Ferromanyetik davranışı aynı anda sergileyen yeni bir akıllı malzeme olan Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlar (FŞHA) cazip hale gelmiştir. Bu malzemelerin birçoğu Heusler alaşım özelliği de göstermektedir [8]. Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlar ilk kez Webster tarafından keşfedildikten sonra geniş bir şekilde çalışılmıştır [14]. İlk defa manyetik şekil hatırlama etkisi ise 1996 yılında Ullakko tarafından çalışılmıştır. Paramanyetik olan geleneksel ŞHA'nın şekil hatırlama etkisi, uygulanan sıcaklıkla veya zorla ya da her ikisi ile değişir [15]. Fakat bu etki, FŞHA sadece sıcaklıkla ve zorla değil bunun yanında alaşıma uygulanan manyetik alanla da değiştiği gözlemlenmiştir. Bu yüzden bu alaşımlar, akıllı malzemeler arasında büyük bir ilgi görmüştür. FŞHA, eş zamanlı olarak şekil hatırlama etkisi ve manyetiklik gösteren akıllı malzemelerdir [16]. Uygulanan manyetik alan, sıcaklığa göre daha çabuk artırılıp azaltılabildiği için bu alaşımlar hızlı aktüatör olarak da isimlendirilebilirler. Manyetik şekil hatırlamalı alaşımlarda manyetik alan uygulanmasından kaynaklı alaşımların ana mekanizmasında şekil değişikliği oluşmaktadır [17].

Bu çalışmanın amacı, teknolojik öneminden dolayı Ferromanyetik şekil hatırlama özelliği gösteren üç farklı oranda $\text{Ni}_{(50-x)}\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{11}\text{Ta}_x$ ($x=0,1,3$ % atomikçe) alaşımı hazırlayıp bu alaşımın değişen Ta elementinin oranına bağlı olarak faz dönüşüm sıcaklıklarının, bazı termodinamik parametrelerinin ve yapısal analizinin nasıl etkilendiğini belirlemektir.

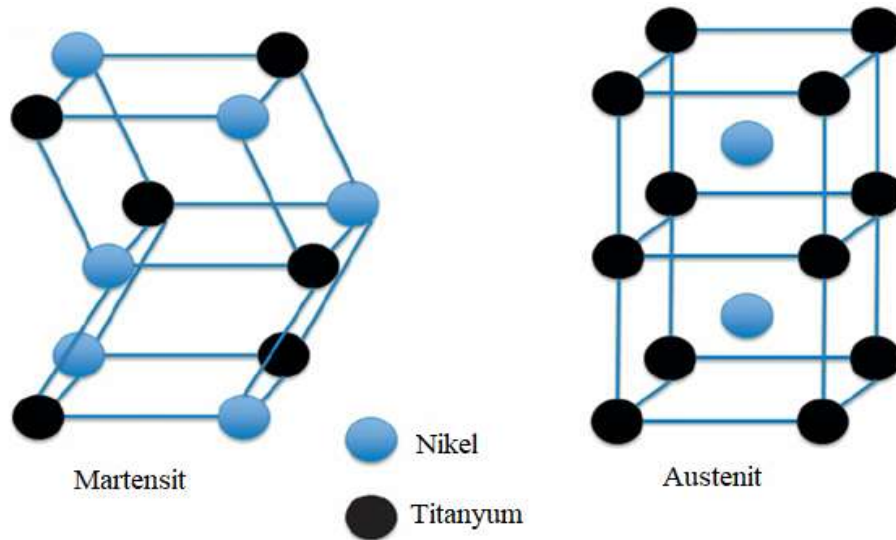


2. ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR

ŞHA'lar, akıllı malzemeler olarak bilinen ve uygun ısı veya mekanik işlemlere maruz bırakıldığında, önceki şekline veya boyutuna geri dönebilme yeteneğine sahip malzemelerdir [5]. Şekil hatırlamalı (bellekli, hafızalı) alaşımların temel karakteristik özellikleri, alaşıma giren elementlerin oranlarına bağlı olarak değişen kritik bir dönüşüm sıcaklığının üzerinde ve altında farklı iki şekle ya da kristal yapıya sahip olabilmeleridir. ŞHA'ların sıcaklık ya da zor (kuvvet) etkisiyle faz değişimine uğramaları ve buna bağlı olarak şekil değiştirmeleri, bu alaşımlara çok farklı avantajlar kazandırır [18].

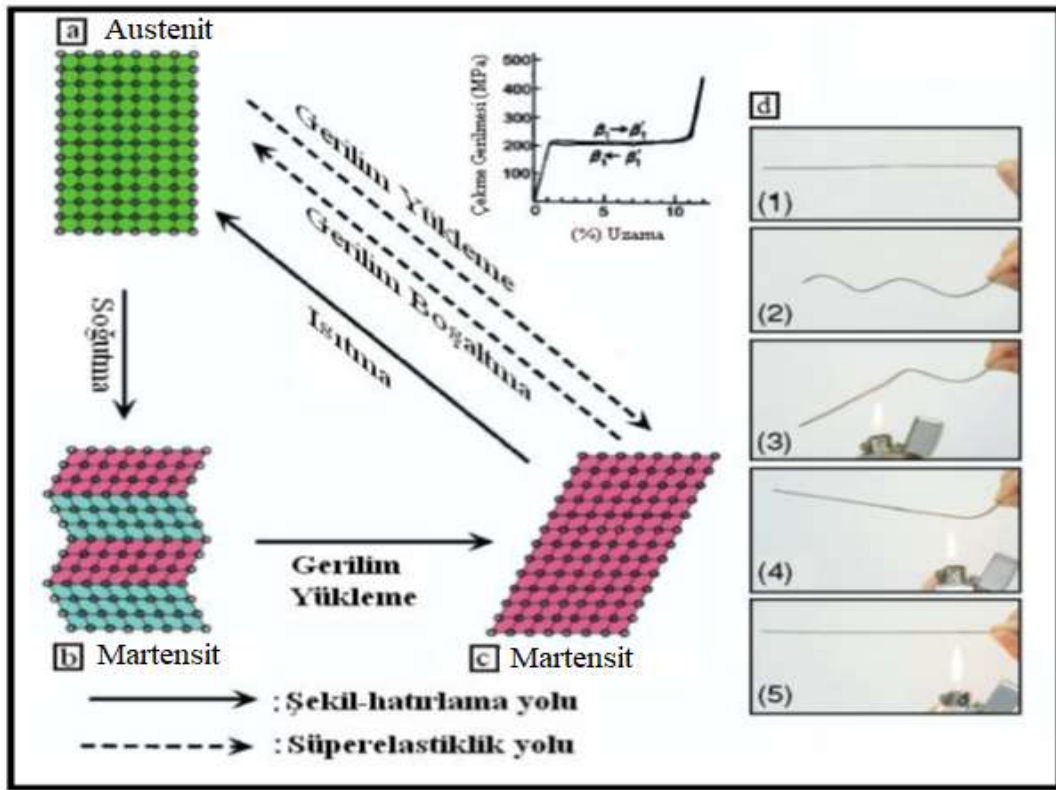
2.1. Martensit Dönüşüm

Martensit faz dönüşümleri demir (Fe) esaslı alaşımlarda 1864 yılında Sorby tarafından bulunmuştur. Ayrıca 1866 yılında Tschernoff ve 1878 yılında Martens tarafından da gözlenmiştir. Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi, 1895 yılında Osmond; ürün fazı martensit, yüksek sıcaklık fazı austenit faz olarak isimlendirmiş ve bu olaya da martensit faz dönüşümü olarak ifade etmiştir. Bu katı katı faz dönüşümü; metal ve alaşımlarda, austenit fazda (ana faz) iken sıcaklıkla kuvvet (zor) etkisinin ayrı ayrı veya aynı anda uygulanmasıyla meydana gelir [17]. Martensit dönüşüm olayı bir kristal yapıdan başka bir kristal yapıya dönüşümü olmasına rağmen, dönüşüm öncesi faz olan austenit fazdaki atomların komşulukları, dönüşüm sonrası da martensit fazda komşulukları değişmediği görülmüştür. Metal ve alaşımlarda birinci derecede yapısal değişim olur ve bu dönüşüme difüzyonsuz dönüşüm denir. Difüzyonsuz martensit faz dönüşümleri; pek çok alaşım, metal ve bileşiklerde gözlenmektedir [19].



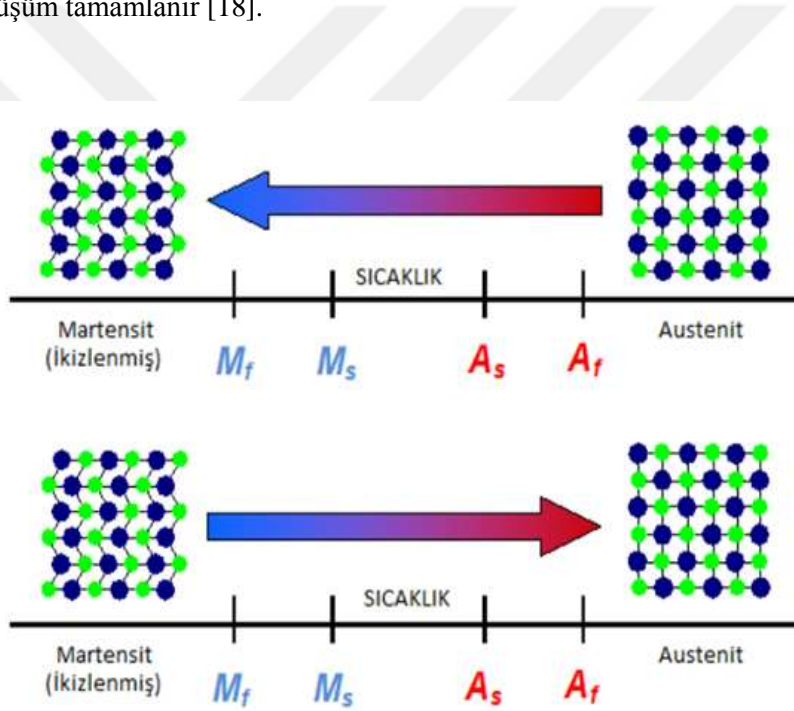
Şekil 2.1. NiTi şekil hatırlamalı alaşımının martensit ve austenit fazının kristal yapısı [19]

Austenit-martensit faz dönüşümü Şekil 2.2.a ve Şekil 2.2.b'de olduğu gibi makaslama mekanizması ile tanımlanan difüzyonsuz dönüşüm ile oluşur. Austenit faz (ana faz, yüksek sıcaklık fazı: bazı istisnalar dışında kübik), Şekil 2.2.a da görüldüğü gibi M_s diye nitelendirilen (bu sıcaklık soğuma ile birlikte martensit (ürün) fazın oluşmaya başladığı sıcaklıktır) kritik sıcaklığa kadar soğutulduğunda, yapı Şekil 2.2.b'de görüldüğü gibi martensit'e dönüşür (düşük faz sıcaklığı ile düşük dönüşüm). Austenit faz, martensit fazdan daha büyük simetriye sahip olduğu için, aynı yapıda farklı yönelmelere sahip çoklu martensit yapıları Şekil 2.2.b'de pembe ve mavi renklerde gösterildiği gibi oluşabilmektedir [20]. Bunlar martensit'in değişkenleri (alanları) denilmektedir. Aslında, Şekil 2.2.b'de gösterildiği gibi martensit'lerin etrafında elastik gerilmeyi düzenlemek için iki veya dört değişkenli yapılar genel olarak yan yana meydana gelir. Buna da kendiliğinden uyum olarak isimlendirilir. Birbirine komşu iki varyans her biri diğerine ikiz ilişkisiyle ve deformasyon altındaki stresle (kuvvetle) birlikte katkı sağlamaktadır [7].



Şekil 2.2. (a)–(c). Şekil hatırlama etkisi ve süperelastiklik mekanizmalarının şekilleri, devamlı çizgiler şekil hatırlama yolunu ve kesikli çizgiler süperelastiklik yolunu göstermektedir. (d) Şekil hatırlama etkisini gösteren bir seri fotoğraf:(1) Ti-Ni kablosunun fazda düz hali; (2) kablonun martensit faza deforme edilmesi (3)-(5) kablonun A_s (bu sıcaklık dönüşümün tamamlanmasına kadar devam eder) üzerindeki sıcaklığa ısıtılması ile orijinal şekline dönmesi. (İç grafik) bir Cu-Al-Ni Tek kristalinin A_s sıcaklığının üstünde gerilme-gerinim süperelastiklik eğrisi. Kısım β_1 yönelmiş fazı göstermekte; β_1' martensit fazı göstermekte [7]

Martensit faz dönüşümü, difüzyonsuz faz dönüşümüdür. Difüzyonsuz faz dönüşümleri genellikle; yüksek sıcaklıkta belirli kristal yapıya sahip alaşımların sıcaklık veya basınç etkisiyle ya da her ikisinin de birlikte uygulanmasıyla düşük sıcaklıkta farklı kristal yapıya dönüşmesi olayıdır [21]. Difüzyonsuz martensit faz dönüşümünde, dönüşüm öncesinde de atomik komşulukların yeri dönüşüm sonrasında da aynı kalır. Kısacası dönüşümün öncesindeki ve sonrasındaki bölgelerin (alanların) yalnızca kristal yapılarında değişim olur, kimyasal yapılarında değişim oluşmaz. Şekil 2.3’de olduğu gibi martensit faz dönüşümü alaşımın yüksek sıcaklıklarında austenit fazından soğutulmasıyla M_s (Martensit başlama, Martensit start) sıcaklığında başlar ve M_f (martensit bitiş, finish) sıcaklığında dönüşümü tamamlar [12]. Alaşım martensit fazda olduğunda sıcaklık tekrardan artırılırsa, alaşım A_s (Austenit başlama, Austenit start) sıcaklığında austenit faza geri dönüşmeye başlar ve A_f (Austenit bitiş, Austenit finish) sıcaklığında yapının tamamı austenit yapıya geri dönerek dönüşüm tamamlanır [18].



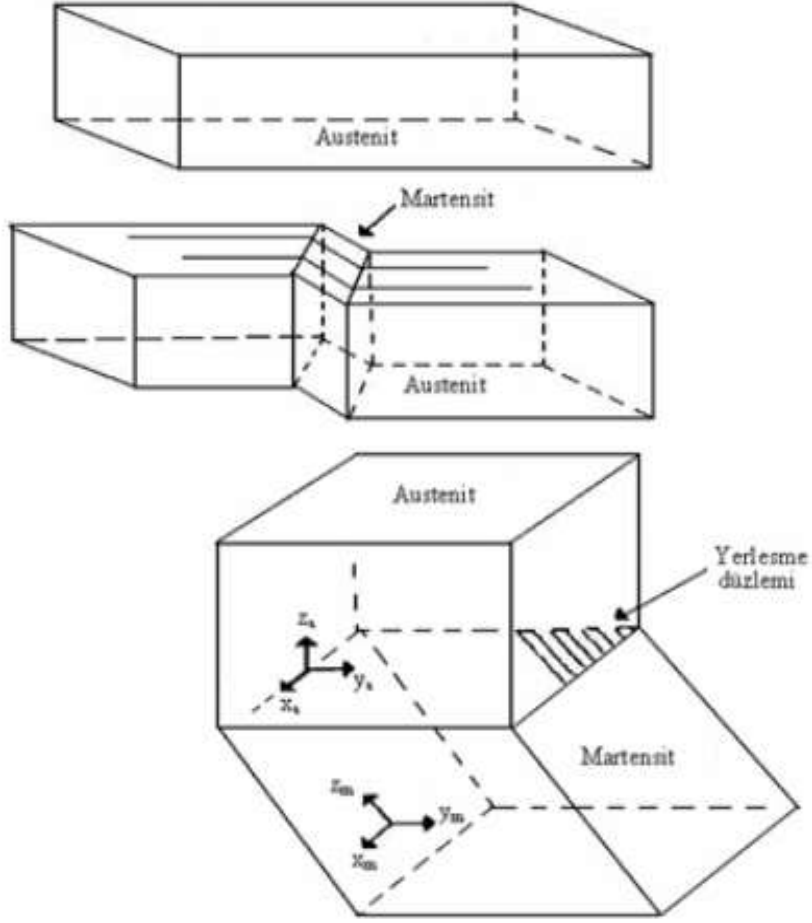
Şekil 2.3. Sıcaklık etkisi ile oluşan austenit-martensit faz dönüşümünün şematik gösterimi [18]

Martensit faz dönüşümünün genel özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

1. Martensit faz, ara katı çözeltilisidir.
2. Difüzyonsuz dönüşümlüdür, yani atomların atomik komşulukları dönüşüm öncesindeki ve sonrasındaki komşulukları aynı kalır.
3. Dönüşüm, sınırlı şekil değişikliğiyle olur.
4. Martensit faz dönüşümünde bozulmamış olarak kalan ve austenit fazla martensit fazı ayıran düzleme yerleşme (habit, alışkanlık) düzlemi denir. Yerleşme düzlemi;

değişmez düzlemdir. Bu düzlem üzerindeki doğrultular bozulmadan kalır (Şekil 2.4'deki gibi).

5. Austenit (ana) fazla martensit (ürün) faz kafesleri arasında sınırlı dönme bağıntısı oluşur.
6. Dönüşüm sırasında kristal örgü hataları oluşmaktadır [22].



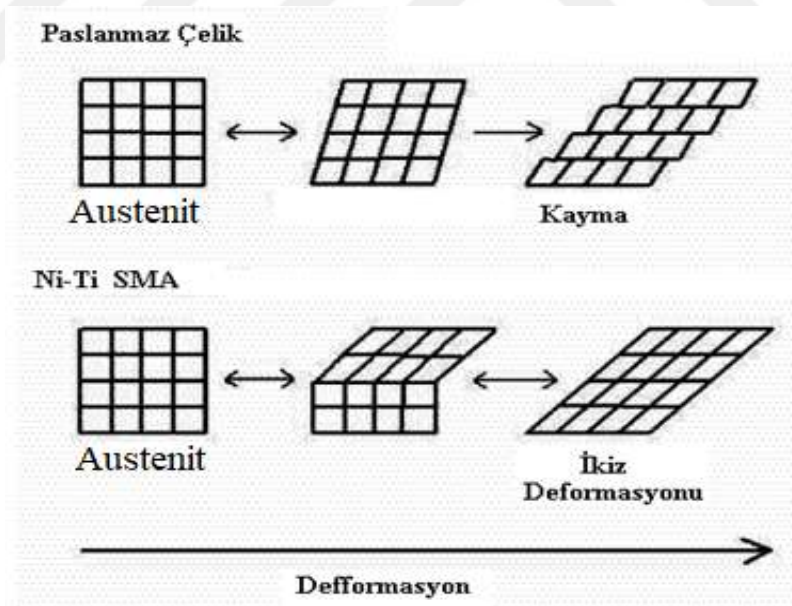
Şekil 2.4. Martensit dönüşümünün doğrultu ve düzlemlerdeki değişimin gösterimi [18]

2.2. Termoelastik Martensit Dönüşümler

Martensit faz dönüşümleri termoelastik ve termoelastik olmayan dönüşümler olmak üzere ikiye ayrılır. Bu iki faz dönüşümünün farkı, dönüşüm histerezisinden kaynaklanmaktadır [12]. Termoelastik martensit dönüşümlerinde; histerezis dar ve dönüşüm yüzdesi yüksektir. Termoelastik olmayan dönüşümlerinde ise, histerezis geniş ve dönüşüm yüzdesi küçüktür. Termoelastik olmayan martensit dönüşümünde, soğutma esnasında meydana gelen bir martensit plaka belirli büyüklüğe kadar gelir ama soğutmaya devam edildiği halde plakalarda büyüme

gerçekleşmez. Sabitlenen ara yüzey ısıtma esnasında geri dönmez. Bunun yerine austenit faz, sabitlenmiş martensit plakalar aralarında çekirdeklenir. Burada oluşan plakalar bütünüyle eski austenit faza geri dönemezler [23]. Termoelastik olmayan faz dönüşümleri, soğutma işlemi esnasında ani patlama reaksiyonuyla atermal olarak austenit faz içerisinde yayılarak gerçekleşir. Termoelastik olmayan dönüşüm ile oluşan martensit yapı sıcaklığın düşmesiyle büyüyemez, ama yeni martensit bölgeler oluşur. Termoelastik dönüşüm sırasında gerçekleşen martensit yapılarında devamlılık göstererek sıcaklığın düşmesiyle büyürler. Termoelastik faz dönüşümleri şekil hatırlama olayı gösterir ve düzenli yüksek sıcaklık fazından, tersinir bir termoelastik dönüşümle düşük sıcaklık fazına bir geçiş gösterirler [24].

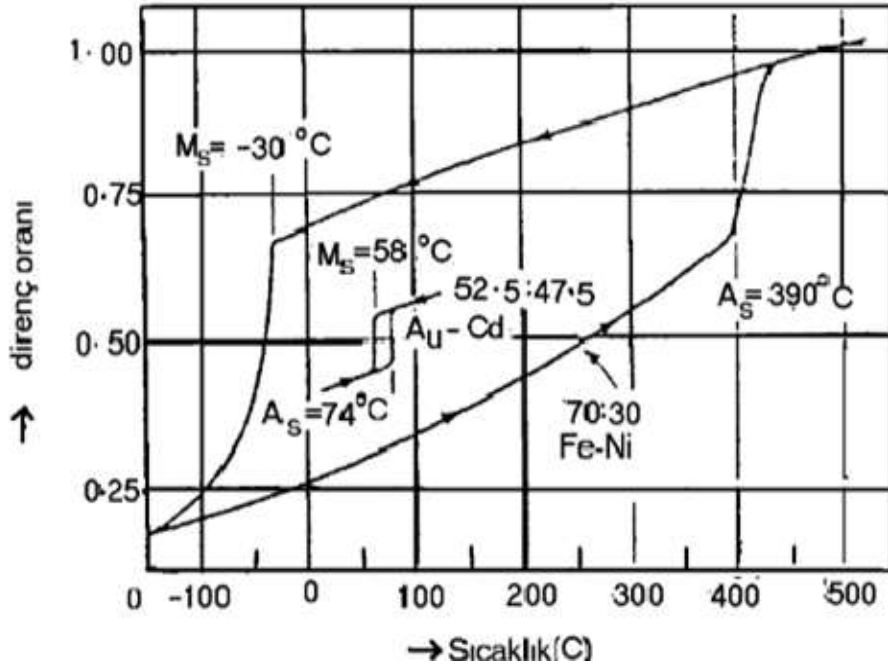
Termoelastik martensit faz dönüşümünde austenit ve martensit fazları arasında yerleşme düzlemi oluşur. Bu dönüşüm, yerleşim düzleminin hareketiyle aynı kimyasal bileşim ve austenit fazdaki atomik düzeni korur ve atomların uyumlu hareketiyle ilerler [9]. Ek olarak, kristal yapılarıdaki değişimin yanında yerleşim düzleminde bir kesme ile deformasyona neden olurlar. Şekil 2.5’de görüldüğü gibi termoelastik martensit (ürün) faz dönüşümünde plastik şekil bozukluğu ikiz oluşum mekanizması ile meydana gelir iken, şekil hatırlama özelliği olmayan alaşımlar da kayma mekanizması ile meydana gelir [25].



Şekil 2.5. Paslanmaz çelikte oluşan plastik deformasyon ve SHE gösteren Nikel-Titanyum alaşımı [19]

Termoelastik dönüşümde dönüşüm histerizesi Austenit bitiş - Martensit başlama (A_f-M_s) küçük, termoelastik olmayan dönüşümler de geniş bir dönüşüm histerisi görülür [26]. Dönüşüm histerizesi büyük olduğu yerlere, dönüşümün gerçekleşmesi için şart olan serbest enerji değişimi ve yanında etki eden kuvveti de artmaktadır. Örneğin; Fe-Ni termoelastik olmayan alaşımdır ve

martensit dönüşüm de yaklaşık olarak 400 °C kadar geniş dönüşüm histerize aralığı gözlemlenirken, Au-Cd alaşımı, termoelastik dönüşüm özelliği gösterir. Bu alaşımda dönüşüm histerize aralığı yaklaşık 15 °C dir ve daha dardır [15]. Martensit dönüşümler termal etkilidir. Bu termal etkiler, atermal ve izotermal olarak iki grupta incelenebilir. İzotermal martensit dönüşüm özelliğine sahip şekil hatırlamalı alaşımlar, aynı zamanda şekil hatırlama özelliğinin olabilmesi için austenit fazında düzenli olması gerekir [27]. Ayrıca dönüşümün oluşabilmesi için deformasyon veya dislokasyon kaymasının olmaması gerekir ve bunun yanında ikizlenme benzeri bir mekanizmayla ortaya çıkmalıdır. Şekil 2.6'deki gibi FeNi yani termoelastik olmayan ve AuCd yani termoelastik martensit sıcaklık histerisizinin karşılaştırılması görülmektedir [28].

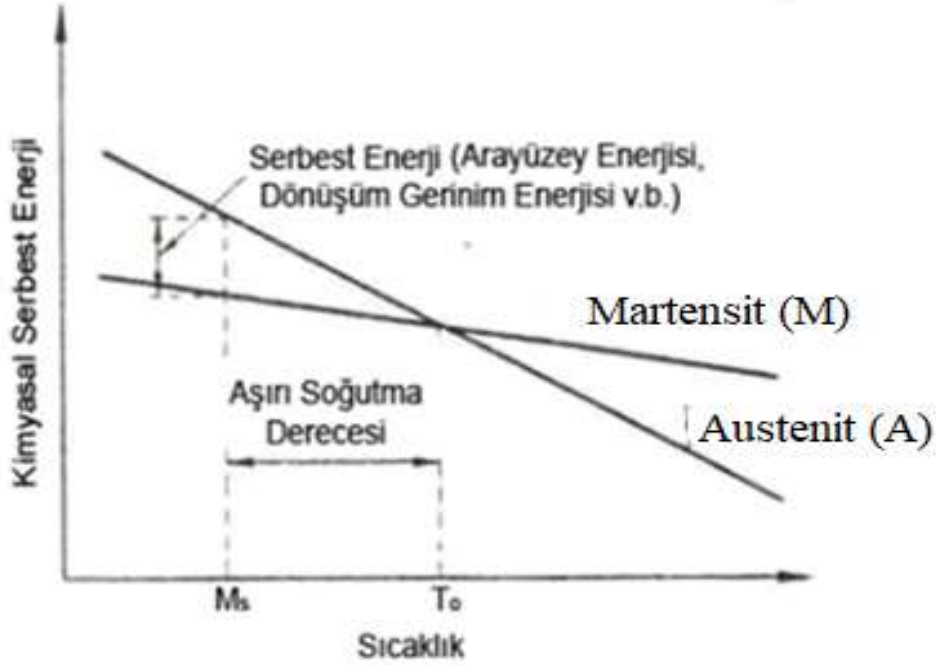


Şekil 2.6. FeNi termoelastik olmayan ve AuCd termoelastik martensit sıcaklık histerisizinin karşılaştırılması eğrileri [24]

2.3. Martensit Dönüşüm Dinamiği

Austenit-martensit dönüşümünü meydana getiren durumda martensit (ürün) fazı kimyasal serbest enerjisi austenit (ana) fazının kimyasal enerjisinden düşük olmalıdır [27]. Buna karşın, dönüşüm kimyasal olmayan aşırı serbest enerjiyi (dönüşüm gerinim enerjisi ve ara yüzey enerjisi) gerektirir [15]. Eğer her iki fazın arasındaki kimyasal serbest enerjilerin farkı gerekli olan kimyasal olmayan serbest enerjilerin farkından küçükse, dönüşüm başlamaz. Başka bir deyişle, serbest enerji gereklidir. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi, eğer numune uygun düşük sıcaklığa aniden soğutulursa, $M_s = T_0$ eşitlik sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta martensit ve austenit fazının kimyasal serbest

enerjileri eşit olduğundan dönüşüm olmaz. Tersinir dönüşüm için ayrıca serbest enerjiye ihtiyaç yoktur; numune uygun yüksek sıcaklığa ani ısıtılmalıdır [29].



Şekil 2.7. Austenit (A, ana) ve martensit (M, ürün) fazların kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklıkla ilişkisi [25]

2.4. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Genel Karakteristikleri

2.4.1. Şekil Hatırlama Etkisi

Şekil hatırlamalı alaşımlar (ŞHA), belirli bir sıcaklığa kadar ısıtıldıklarında, belirgin olarak şekil değişimi gösterirler [30]. Bu alaşımlar kendilerine özgü bir sıcaklığa geldiğinde şeklini ve boyutunu hatırlayarak eski hallerine geri dönerler. Bu davranışından ötürü, bu tip malzemelere akıllı malzemeler olarak isimlendirilirler [27]. Genellikle bu tür malzemeler, yeteri kadar düşük sıcaklıklara getirildiğinde deforme edilir, sonra daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında deformasyondan önceki şekillerin hatırlayarak geri dönerler. [31]. Şekil hatırlamalı alaşımlar, Şekil 2.8. da görüldüğü gibi iki faza sahip olurlar. Bunlardan biri düşük sıcaklık fazı; Martensit fazıdır ve ismini Alman metalograf Adolf Martens'ten almıştır; diğeri ise yüksek sıcaklık fazı; Austenit fazıdır ve ismini İngiliz metalurjist William Chander Austen' den almıştır [11].

Austenit

Yüksek Sıcaklık Fazı
Kübik Kristal Yapı

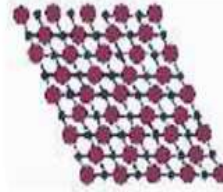


Martensit

Düşük Sıcaklık Fazı
Monoklinik Kristal Yapı



İkizlenmeli Martensit



Deforme Olmuş Martensit

Şekil 2.8. Şekil hatırlamalı alaşımların farklı fazları [11]

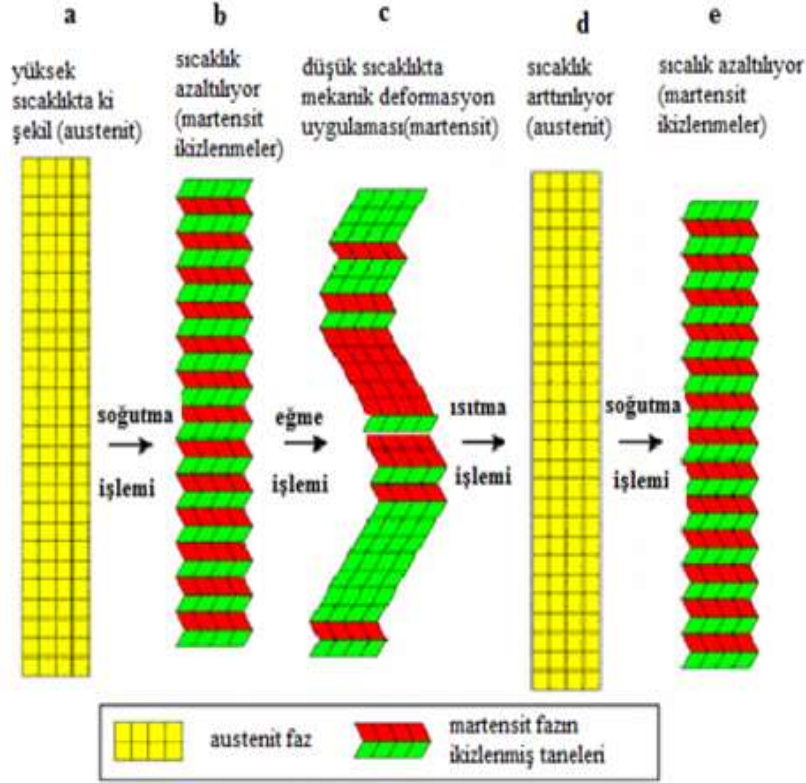
Martensit → Austenit, Austenit → Martensit meydana gelen faz dönüşümlerinin dört geçiş sıcaklığı aşağıdaki gibi isimlendirilir:

1. Austenit bitiş (finish) (A_f),
2. Austenit başlangıç (start) (A_s),
3. Martensit bitiş (finish) (M_f),
4. Martensit başlangıç (start) (M_s), dir [11].

Sıcaklık sıralaması $M_f < M_s < A_s < A_f$ şeklinde yapılır ve $M_s < T < A_f$ sıcaklık aralığında herhangi bir faz farkı görülmemekle beraber $M_f < T < A_f$ sıcaklığında martensit ve austenit fazı birlikte olduğu bilinmektedir [11].

Malzemenin düşük sıcaklıklarda şekli belirli oranda deforme edilip yüksek sıcaklıklarda ilk şekline dönmesine şekil hatırlama olayı denir [31]. Şekil 2.9. de gösterildiği gibi, şekil hatırlama etkisinde, alaşımlar termoelastik dönüşüm gösterirler [27]. Termoelastik dönüşümde, mikro yapıda ilk halini hatırlar, kristal yapı ve yönelimleriyle önceki halini alırlar. Bu dönüşüm, sıcaklık düştükçe martensit plakalar oluşur ve büyür. Meydana gelen plakalar, soğutma işlemi devam ederse birbirlerine veya tane sınırına ulaşıncaya kadar büyümeye devam eder. Sıcaklık yükseldikçe ara yüzeyin (yerleşim düzlemi) geri hareket oluşturup martensit oluşumlar büzülerek küçülür ve austenit faza dönüşür. Martensit dönüşümler, şekil hatırlama olayı gözlenmezse soğutma esnasında meydana gelen martensit plakaların büyüme oranı sınırlı kalır. Oluşan martensit plakalar, yapı içerisinde sabitlenip kalır. Malzeme ısıtıldığında bile meydana gelen martensit plakalar austenit

faza geçemezler. Dönüşüm yüzdesi yüksek olursa şekil hatırlama gözlenebilir. Sonuç olarak, bu malzemeler termoelastik dönüşüm gösterirse şekil hatırlama etkisi göstermezler [22].

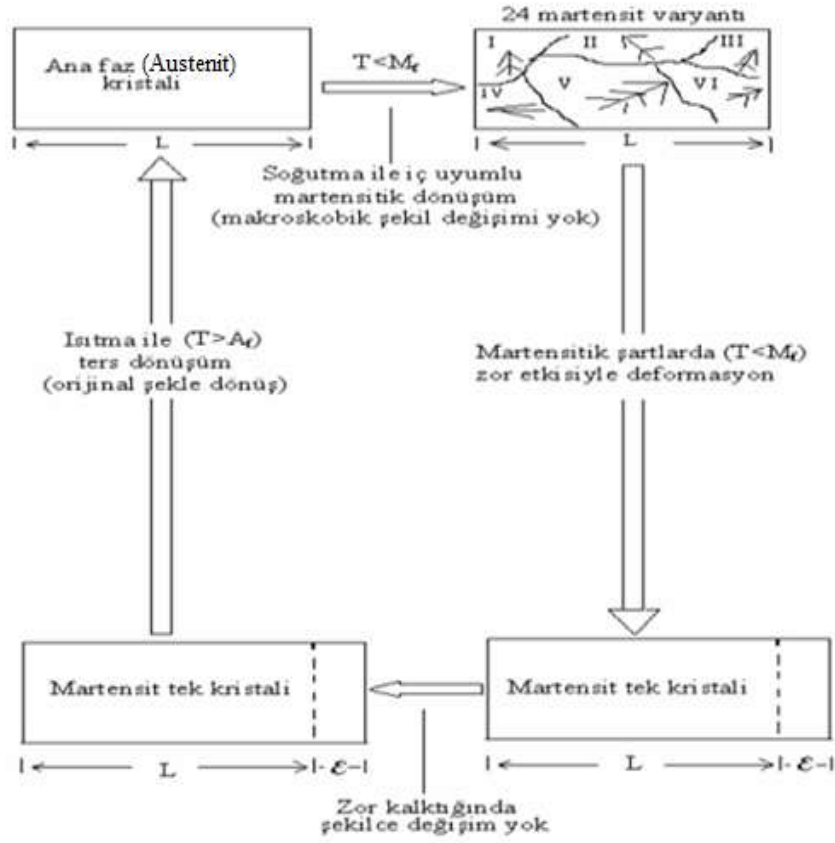


Şekil 2.9. Şekil hatırlama etkisi gösteren yapı [32]

Şekil hatırlamalı alaşımlar Şekil 2.10. de görüldüğü gibi M_f (Martensit bitiş, finish) sıcaklığının altında mekanik olarak deforme edilirlse, A_f (Austenit bitiş, finish) sıcaklığının üzerine kadar ısıtılana kadar deforme olmuş şeklini korur. A_f sıcaklığını geçene kadar ısıtılırsa deformasyon etkisini kaybeder. Malzeme, austenit faz halindeki ilk şekline geri döner [28].

Şekil hatırlama olayının meydana gelebilmesi için aşağıdaki şartlar gereklidir [28].

- Termoelastik martensit dönüşümlerin olması gerekir.
- Deformasyon oluşumu, dislokasyon kayması ile değil ikizlenme benzeri mekanizmaların oluşması ile olması gerekir.
- Austenit fazın düzenli olması gereklidir.

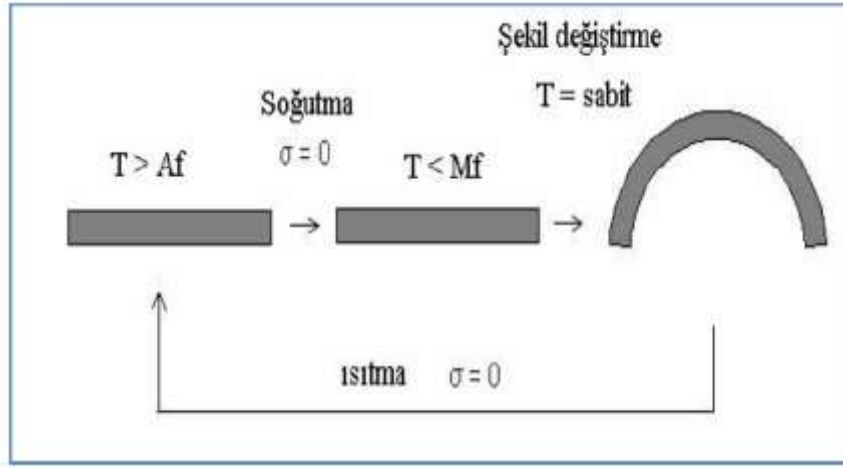


Şekil 2.10. Şekil hatırlama olayının oluşma şekli [28]

Tek yönlü şekil hatırlama etkisi ve iki (çift) yönlü şekil hatırlama etkisi olarak şekil hatırlamalı alaşımları ikiye ayırılır.

a) Tek Yönlü Şekil Hatırlama

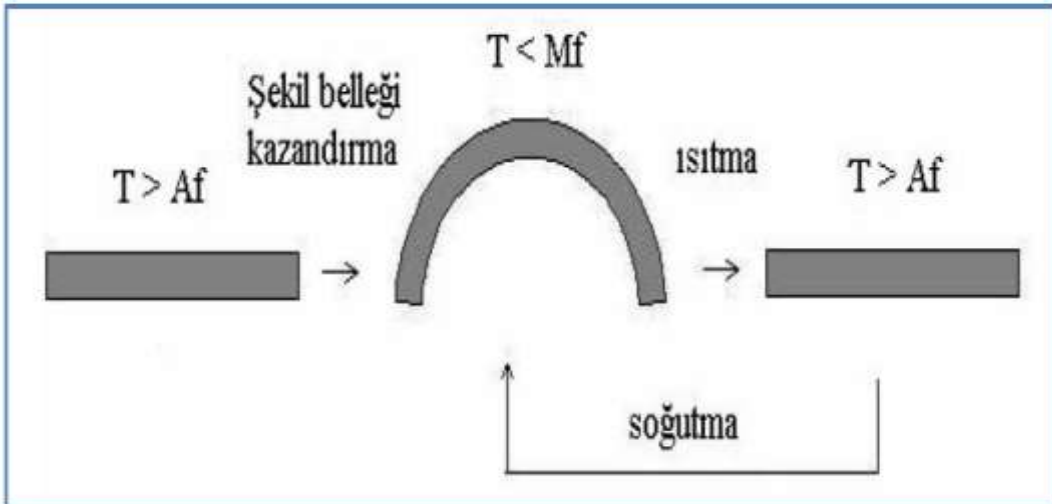
Şekil hatırlamalı alaşımı A_s (austenit başlama, start) sıcaklığına düştüğü zaman alaşım nispeten yumuşaktır ve bu yapı eğilerek veya gerilerek yeni şeklini, geçiş sıcaklığının üzerine kadar kapsayabilir [15]. Geçiş sıcaklığından sonra malzeme ilk şekline geri döner. Şekil 2.11.'de görüldüğü gibi tek yönlü geri dönüşüm olduğunda, yüksek sıcaklıktan soğutmak makroskobik şekil değişikliklerine neden olmaz. Buradaki yapı, ikizlenmiş martensit yapıdan restore edilmiştir [29].



Şekil 2.11. Şekil hatırlamalı alaşımlarda tek yönlü şekil değiştirme [29]

b) Çift Yönlü Şekil Hatırlama

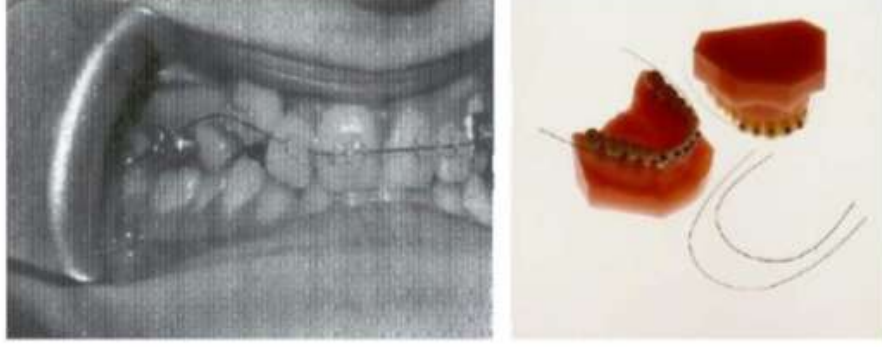
Şekil hatırlama özelliğini görülebilmesi için deformasyonun dislokasyon kayması (çizgisel kusur) ile oluşmaması ve ikizlenme benzeri mekanizmaların oluşması gerekmektedir. Martensit eş değerlikleri arasında ikizlenmeden meydana gelen ilişki, martensit plakaları arasındaki sınırların düşük enerjili ve hareketli olmasını sağlar [33]. Numune, gerilme işlemine tabii tutulduğunda plakaların rahatça kayması, varyantların gerilimine göre geri dönüşüne imkân verir. Bu ikiz sınırları hareketlidir ve bunların sayesinde bütün varyantlar gerilime uygun şekilde yönlendirilmiş varyantlara dönüşür. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi, çift yönlü şekil hatırlama etkisi, alaşımın düşük ya da yüksek sıcaklıktaki şekillerini dışarıdan gelebilecek gerilmeye gerek kalmadan hatırlamasına denir [29].



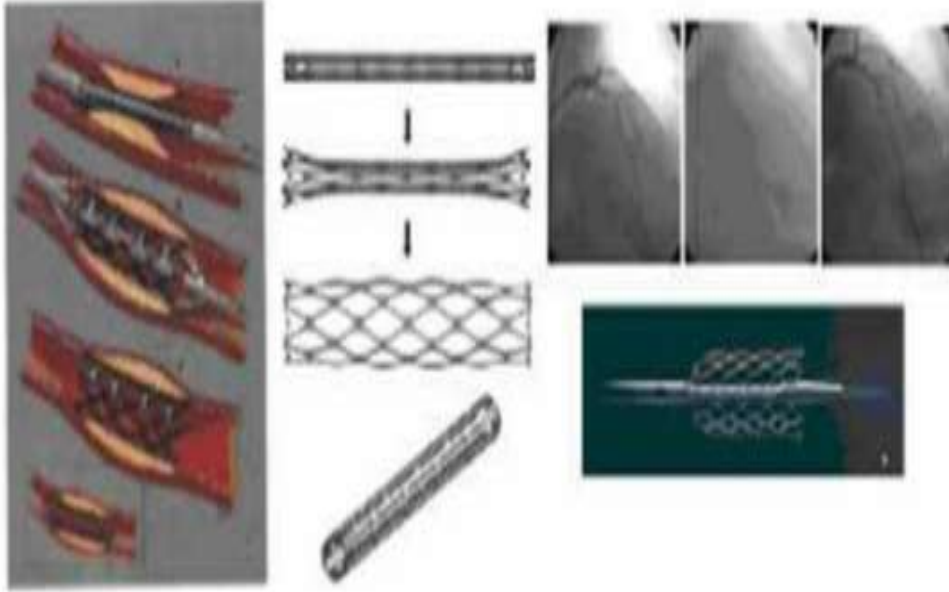
Şekil 2.12. Şekil hatırlamalı alaşımlarda çift yönlü şekil değiştirme [29]

2.5. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kullanım Alanları

Akıllı malzemeler olarak kabul edilen Şekil Hatırlamalı Alaşımlar (ŞHA); uzay araştırmalarında, tıpta, otomotiv endüstrisi gibi çeşitli alanlarda farklı uygulamalarda kullanılmak üzere çalışmalar yapılmaktadır [10]. Bu malzemelerin seçimindeki en önemli faktörlerden birisi ise malzemenin ortamla olan uyumluluğun iyi sonuçlar vermesidir [13].



Şekil 2.13. NiTi alaşımının Ortodonti uygulaması [34]



Şekil 2.14. Damarlardaki tıkanma problemlerinin çözümünde kullanılan şekil hatırlamalı alaşımdan üretilmiş stentler [35]

Şekil hatırlamalı alaşımlar tıp alanının (ortopedik bağlantı elemanları, damar tıkanıklıklarının tedavisinde kullanılan stentler ortodontik diş tellerinde, endodontik uygulamalarda kullanılan aletler) yanında elektrik bağlantılarında, hareketlendirici teknolojisinde, sönümleme elemanlarında, mikro-elektro-mekanik sistemlerinde, uzay araçları, ince film uygulamaları gibi birden fazla uygulama alanları vardır. Şekil 2.13 de görüldüğü gibi biyomedikal uygulamalarında

şekil hatırlamalı alaşımlar kullanılmıştır [21]. Ortodontik diş telleri, çarpık dişleri dış kuvvet uygulayarak uygun aralığa yerleştirmekte kullanılır ve bir süre sonra diş yapısı düzelir. Şekil 2.14 de görüldüğü gibi biyomedikal alandaki farklı bir kullanım örneği verilmiştir ve kalp damar tıkanıklıklarının ameliyatsız tedavisinde kullanılan stentler gösterilmiştir [35].



3. MANYETİK MALZEME

Maddeler; manyetik alana tepkilerine göre diyamanyetik, paramanyetik, ferromanyetik, antiferromanyetik ve ferrimanyetik olarak sınıflandırılırlar.

3.1. Manyetik Dipoller

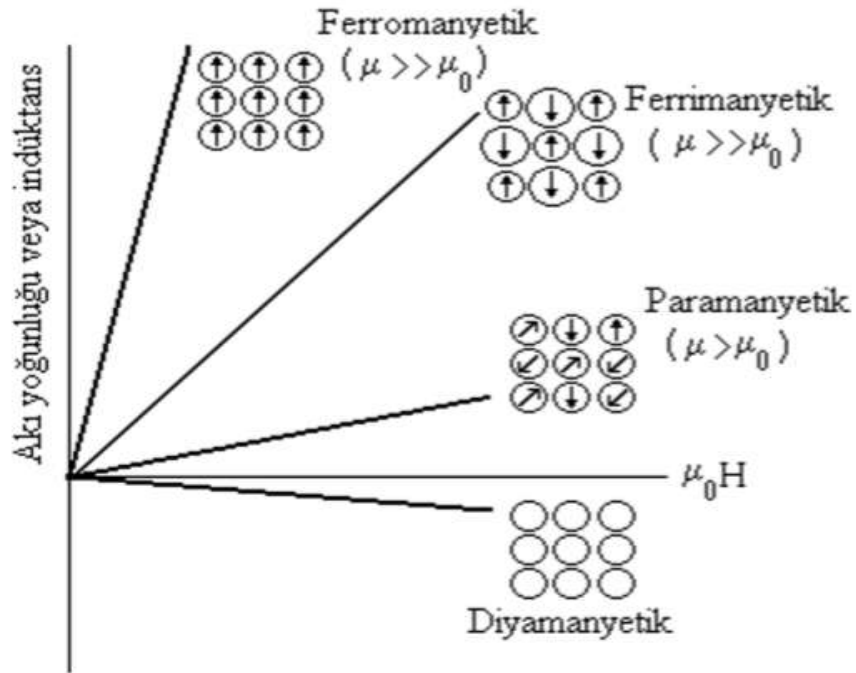
Atom içindeki her elektron, iki tane manyetik momente sahiptir. Manyetik moment, manyetik alanın şiddetini ifade eder ve bu momentler; elektronların, çekirdeğin etrafında yörünge hareketi yapması ve kendi eksenleri etrafında dönmelerinden kaynaklanır [36].

Serbest bir elektronun manyetik momenti üç nedenden oluşabilir. Bunlar:

- Elektronların sahip oldukları spinden,
- Elektronların çekirdek etrafındaki yörüngesinin açısal momentumundan ve
- Bir dış manyetik alanda kazandıkları yörünge momentinden kaynaklanır [11].

3.2. Manyetizma Türleri

Malzemelere bir manyetik alan uygulandığında birçok davranış sergileyebilir. Şekil 3.1. de diamanyetik, paramanyetik, ferrimanyetik ve ferromanyetik malzemelerin manyetik davranışları verilmiştir [36].



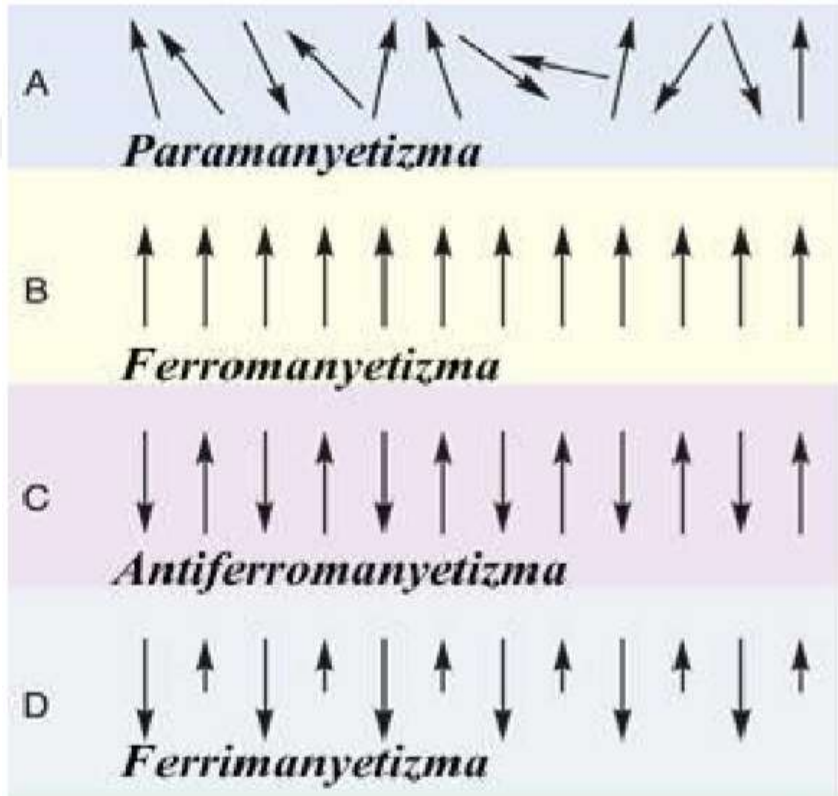
Şekil 3.1. Manyetik davranış çeşitleri [35]

Manyetizma maddenin atom ve kristal yapısına bağlı olarak değişir. Her manyetik özelliğin büyüklükleri ve sıcaklığa bağlılıkları farklıdır.

Manyetizmanın bazı türleri vardır ve aşağıdaki gibidir [11];

- ❖ Diamanyetizma
- ❖ Paramanyetizma
- ❖ Ferromanyetizma
- ❖ Antiferromanyetizma
- ❖ Ferrimanyetizma

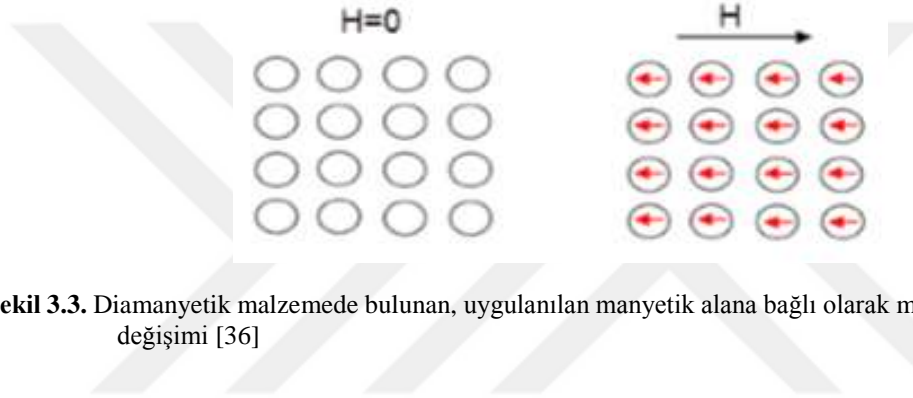
şekil 3.2. de bazı manyetik türlerinin manyetik dipolün yönü verilmektedir. Burada; Paramanyetizma da manyetik dipoller rastgele yönelim sergilemektedir. Ferromanyetizma da manyetik dipoller paralel ve düzenli bir dizilim göstermektedir. Antiferromanyetizma da manyetik dipoller birbirlerine paralel ve zıt yönelim sergilerler [37]. Ferrimanyetizma da ise manyetik dipoller zıt yönde, farklı büyüklükte ve birbirlerine paraleldirler [11].



şekil 3.2. Manyetik dipollerin yönü [37]

3.2.1. Diyamanyetizma

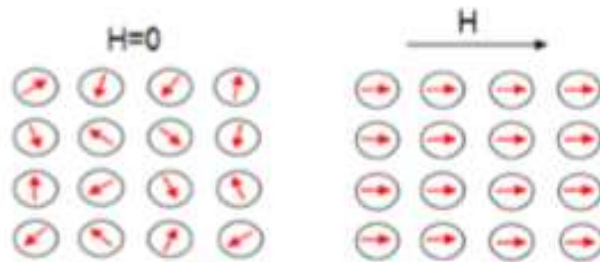
Malzeme üzerine bir manyetik alan uygulandığında, yörüngedeki elektronların manyetik momenti etkilenmektedir ve malzemenin bütün atomları için bir manyetik moment çifti oluşturmaktadır [38]. Oluşan bu moment çiftleri manyetik alana karşı koyarak manyetikliğin sıfırdan daha az olmasına sebep olur. Bu davranış diyamanyetizma olarak isimlendirilir ve yaklaşık 0,01 geçirgenlik sağlar. Bu sebeple, diyamanyetik davranış, manyetik malzemeler veya cihazlar için önemli değildir [36]. Kurşun, bakır, bizmut, gümüş, antimon gibi metaller, yarı metallerin tümü ve organik maddelerin çoğu diyamanyetik özellik gösterirler [39]. Diamanyetik malzemelerde, uygulanan manyetik alana bağlı olarak manyetik momentler değişimi Şekil 3.3. de verilmektedir.



Şekil 3.3. Diamanyetik malzemede bulunan, uygulanan manyetik alana bağlı olarak manyetik momentlerin değişimi [36]

3.2.2. Paramanyetizma

Çift olmayan elektronlara sahip olan paramanyetik malzemelerde; manyetik momenti, atomların elektron dönüşünden meydana gelir. Manyetik alan uygulandığında, kutup çiftleri alanla aynı hizaya gelir ve pozitif bir manyetikleşmeye sebep olur [20]. Kutup çiftlerini hizaya getirmek için oldukça büyük bir manyetik alana ihtiyaç vardır. Paramanyetizma olarak isimlendirilen bu etki yalnızca yüksek sıcaklıklarda geçerlidir. Paramanyetik özellik gösteren bu malzemelerin geçirgenliği 0,01' den daha azdır [36]. Paramanyetik malzemede, uygulanan manyetik alana bağlı manyetik momentlerin değişimi Şekil 3.4.'deki gibidir.

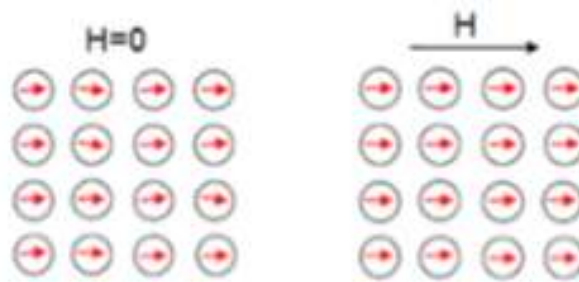


Şekil 3. 1. Uygulanılan manyetik alana bağlı Paramanyetik malzemede bulunan manyetik momentlerin değişimi [36]

3.2.3. Ferromanyetizma

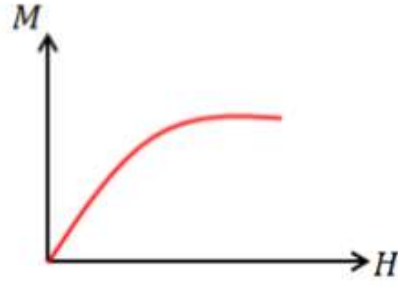
- Nikel, demir, kobalt ve goddinyum gibi elementler, manyetik maddedir. Bu malzemelere de Ferromanyetik madde denilmektedir [37].
- Genellikle mıknatısların yapımında Ferromanyetik maddeler kullanılırlar [37].
- Zayıf manyetik alan içerisinde bile birbirlerine paralel şekle yönelmeye uğraşan atomik manyetik dipollere sahiptirler [30].
- Manyetik dipoller bir seferinde dahi paralel hale geldikten sonra dış alan ortamdaki kaldırılrsa bile madde mıknatıslanmış olarak kalırlar [30].
- Bu dizilim sürekli ve komşu manyetik momentler arasında meydana gelen kuvvetli etkileşimden kaynaklanır [30].
- Manyetik alan altında Ferromanyetik malzemeler, alan yönünde ve şiddetli şekilde mıknatıslanırlar [37].
- Termik etkilere rağmen bu malzemelerin manyetik momentleri, dış manyetik alanla üst üste gelirler [8].
- Eğer maddenin sıcaklığı, Curie sıcaklığından daha yukarıya çıkarılırsa bu üst üste gelme durumu bozulur ve madde Ferromanyetik yapıdan paramanyetik yapıya geçer [8].
- Ferromanyetizma atom ve iyonların kendine özgü bir özellik değildir ve bu durum komşu atom ve iyonların yapısal kurgu içinde etkileşim biçimlerinden oluşur [11].

Şekil 3.5.'de uygulanan manyetik alana bağlı olarak Ferromanyetik malzemede bulunan manyetik momentlerin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Ferromanyetik malzemede bulunan uygulanan manyetik alana bağlı olarak manyetik momentlerin değişimi [36]

Ferromanyetik malzemeler, mıknatıslık özelliğini Curie sıcaklığının (T_c) altında kalıcı olarak sergilerken, paramanyetik özelliği Curie sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda sergilerler [6]. Bu malzemelerin, manyetik alınganlıkları pozitif ve büyüktür. Şekil 3.6.'de Ferromanyetik bir malzemenin dış manyetik alana bağlı olarak mıknatıslanmasının değişimi verilmektedir [40].

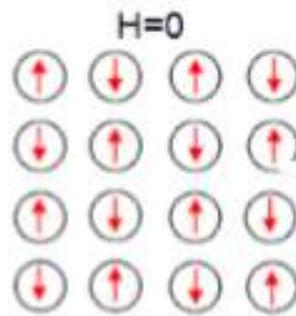


Şekil 3.5. Ferromanyetik malzemenin (M-H) grafiği [41]

3.2.4. Antiferromanyetizma

Antiferromanyetizmanın kuramı ilk kez Neel tarafından ifade edilmiştir. Bu malzemeler bir manyetik alan içerisine bırakıldıklarında manyetik alanın yönüne zıt olanların manyetik momentleri küçülür. Bu sayede net bir manyetik moment oluşur ve antiferromanyetik malzemeler mıknatıslanmış olur. Antiferromanyetik malzemeler belli bir sıcaklığın üzerinde bu özelliklerini kaybeder ve paramanyetik özellik göstermeye başlar. Bu sıcaklık, Neel sıcaklığı (T_N) olarak ifade edilir. Bu malzemelerde Neel sıcaklığı (T_N) altında manyetik momentleri antiparalel olur. T_N sıcaklığında, manyetik alınganlık maksimum değerinde olur [42].

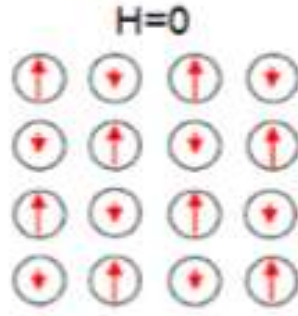
Ferromanyetizma ile antiferromanyetizma arasındaki fark, komşu kutup çiftleri arasındaki etkileşmelerinden kaynaklanır. Komşu kutup çiftleri biri diğerini güçlendirir veya zıtlar [36]. Şekil 3.7.'de Antiferromanyetik malzemede bulunan manyetik momentlerin dizilimi verilmektedir.



Şekil 3.6. Antiferromanyetik malzemenin manyetik momentlerinin dizilimi [36]

3.2.5. Ferrimanyetizma

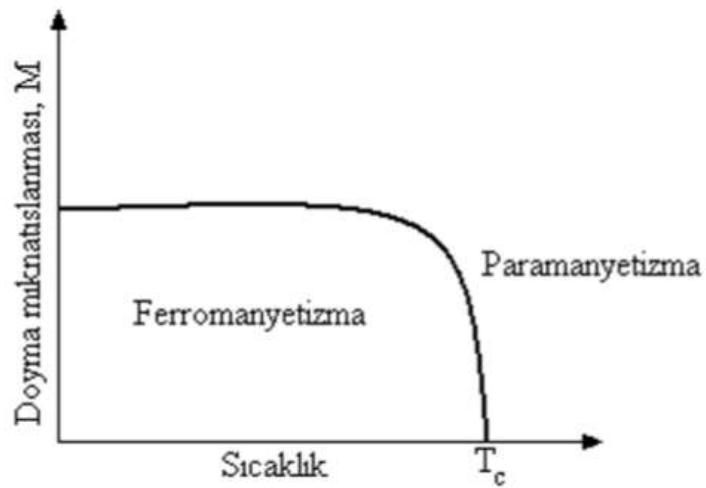
Ferrimanyetik malzemeler de manyetik moment; farklı büyüklükte, zıt yönde ve paraleldir (Şekil 3.8.'deki gibi). Bileşke manyetik moment ise, zıt yöndeki momentlerin farkına eşit olur. Bu malzemeler, ferromanyetik malzemelerde olduğu gibi Curie sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda paramanyetik olurlar [42].



Şekil 3.7. Ferrimanyetik malzemenin manyetik moment dizilimleri [36]

3.3. Sıcaklığın Mıknatıslanmaya Etkisi

0 K (mutlak sıfır, $-273,15^0$ C) üstündeki herhangi bir sıcaklıkta, termal enerji, Ferromanyetik bir malzemenin manyetik momentlerinin mükemmel paralel dizilişini bozar. Şekil 3.9.'de görüldüğü gibi, Ferromanyetik malzemelerde manyetik momentlerin dizilmesine sebep olan değişim enerjisi, termal enerjinin dizilmeyi rastgele hale getiren etkisini dengelemektedir. Buna göre, sıcaklık artıçça Ferromanyetik bir malzeme de, manyetik özellik tamamen yok olur. Bu sıcaklıkta Curie sıcaklığı olarak ifade edilir [43]. Ferromanyetik malzemeler Curie sıcaklığına (T_c) ulaştığı zaman kendiliğinden mıknatıslık özelliği kaybolur ve madde paramanyetik duruma geçer. Curie sıcaklığının altındaki sıcaklıklar da ise manyetik momentler paralel dizildiklerinden dolayı malzeme ferromanyetiktir. Curie sıcaklığının üstünde ise dipoller gelişi güzel yöneldikleri için bu maddeler paramanyetik olmaktadır [39].

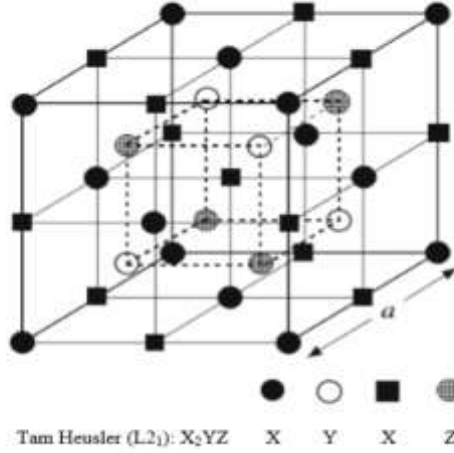


Şekil 3.2. Sıcaklığın doyma mıknatıslığı üzerine etkisi [14]

Ferromanyetik olan malzeme, Curie sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa soğutulursa, malzeme tekrar mıknatıslanır ve Ferromanyetik duruma gelir. Örneğin; Fe, Co ve Ni' in Curie sıcakları sırasıyla 770, 1123 ve 358 °C dir. Antiferromanyetizma da, bu davranışa karşılık gelen sıcaklığa Neel sıcaklığı olarak ifade edilir. Bu sıcaklığın altındaki sıcaklıkta, malzeme antiferromanyetik veya paramanyetiktir [39].

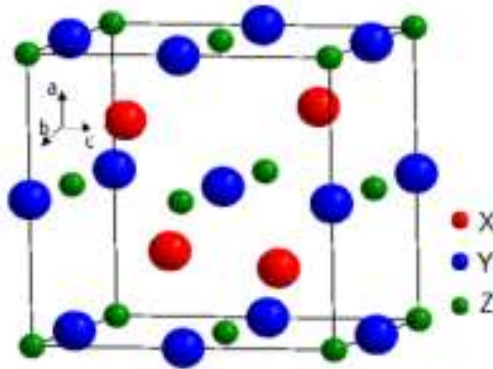


Şekil 4.2. de görüldüğü gibi tam Heusler alaşımları (X_2YZ) kübik $L2_1$ yapısında kristalleşir. X_2YZ (X: Cu, Co, Ni, ...; Y: Mn, Ti, Zr, ...; Z: Al, Ge, Sn, Ga, ...) tipindeki bu alaşımlar üçlü intermetalik alaşımlar olarak ifade edilir [48].



Şekil 4.1. Tam Heusler alaşımlarının birim hücresi [48]

Yarı Heusler alaşımları, XYZ tipindeki Heusler alaşımlarıdır ve $C1_b$ kristal yapısında bulunurlar (Şekil 4.3.'deki gibi). Birçok Heusler tipi alaşım ferromanyetik özellik gösterir ve alaşımı oluşturan elementler bir araya gelerek alaşımı oluşturduktan sonra ferromanyetik özelliklerinin değiştirilebilir olması, Heusler alaşımlar üzerine yapılan çalışmaların son zamanlarda artmasına sebep olmuştur [40].



Şekil 4.2. Yarı-Heusler alaşımlarının yapısı ($C1_b$ birim hücresi) [40]

NiMn bazlı Heusler alaşımları, ferromanyetik manyeto-yapısal dönüşümü austenitten zayıf manyetik martensite dönüşme fazları arasındaki mıknatıslanma farkı (ΔM) gözlemlenir. Bu büyük mıknatıslanma farkının bir sonucu olarak faz dönüşümü ve manyetik şekil hatırlama etkisi gösterebilirler [2].

5. MATERYAL VE METOT

5.1. Numune Hazırlama

Bu çalışmada, % 99,9 saflıkta Ni, % 99,9 saflıkta Mn, % 99,9 saflıkta Sn ve % 99,9 saflıkta Ta (Merk marka -325 merch) toz elementleri, Tablo 5.1' de belirtilen atomikçe (% at) ve ağırlıkça (% wt) yüzde oranlarında karıştırıldı. Hazırlanan numunelerin elektron konsantrasyonları Denklem 5.1. yardımıyla hesaplandı. Karıştırılan toz elementler ~ 15 MPa basınç altında preslenerek 13mm çapında peletler haline getirildi. Pelet haline getirilen $Ni_{(50-x)}Mn_{39}Sn_{11}Ta_x$ ($x=0,1,3$ % atomikçe) malzemeleri ark-ergitme yöntemi ile eritilerek alaşımlar üretildi. Bu çalışmada kullanılan Arc Melter eritme sistemi Şekil 5.1' de görüldüğü gibidir. Numuneler homojenleştirilmek için 900 °C de 12 saat bekletilip tuzlu- buzlu suda ani soğutuldu.

$$e/a = \frac{(\%atNi \times 10) + (\%atMn \times 7) + (\%atSn \times 4) + (\%atTa \times 3)}{100} \quad (5.1.)$$

Tablo 5.1. Numunelerin ağırlıkça (% ağı.), atomikçe (% at.) ve atom başına düşen elektron konsantrasyonları

Numune adı	Ağırlıkça (%ağ)				Atomikçe (%at)				e/a (elektron/atom)
	Ni	Mn	Sn	Ta	Ni	Mn	Sn	Ta	
Ta0	46,0	33,6	20,5	0	50	39	11	-	6,39
Ta1	44,2	32,9	20,1	2,8	49	39	11	1	6,34
Ta3	40,9	31,7	19,3	8,0	47	39	11	3	6,24



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

5.2. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Ölçümleri

Maddelerin faz dönüşüm sıcaklığını belirlemede Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı kullanılır. DSC ile maddenin ısıtılması ve soğutulmasıyla, maddenin aldığı veya verdiği ısı miktarının değişim noktalarının belirlenmesi yoluyla faz dönüşüm sıcaklıkları tespit edilebilir.



Şekil 5.2. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ölçüm sistemi

Tüm numunelerin yaklaşık olarak oda sıcaklığı ile 260 °C arasında, ısıtma ve soğutma hızı ise 20 °C/dk. olacak biçimde Şekil 5.2.' de görülen Perkin Elmer Sapphire Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ölçümleri alındı.

5.3. X-Işını Analizi (XRD)

Atomlar ve atom gruplarının belli bir hacimde belli bir düzene sahip olmalarından kristal yapı oluşur. Kristalde X-ışınlarının kırınımına uğraması ile kristal yapının özelliklerinin incelenmesinde olanak sağlamıştır [49]. X-ışınlarıyla, kristal içerisindeki atomların dizilimleri ve atomların oluşturdukları düzlemlere karşı gelen bir takım noktaları veya daireleri incelenmektedir. Bu ışınlar, kısa dalga boylu elektromanyetik ışınımlardır ve tek renkli değildirler [11].

Günümüzde kullanılan modern X-ray diffraction ya da X-ışını kırınımı (XRD) cihazları bilgisayar kontrollüdür ve ölçümler çok hassas bir şekilde tespit edilebilmektedir [50]. Bruker Discover D8 X-ray diffraction (XRD) cihazı ile alaşımların hangi fazlarda oluştuğunu belirlemek için kristal yapı analizi yapılır. Şekil 5.3' de bu çalışmada kullanılan X-ışını kırınım (XRD) analizi yapılan sistem görülmektedir.



Şekil 5.3. X-ışını kırınım (XRD) analizi yapılan sistem

5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)-EDX Analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy ya da SEM), malzemelerin şekil, boyut ve parçacıkların dizilimi (Morfoloji), malzemenin yüzey özelliğini ve yapısını belirleme (topoloji), kompozisyonel farklılık, kristal yönelimi ve kusurların görüntüsünü belirleme hakkında bilgi edinmemizi yarayan çok yönlü kullanıma sahip önemli bir cihazdır. SEM, yüksek voltaj altında hızlandırılmış elektronların numune yüzeyine çarptırılıp yansıması prensibine dayanır. Bu yansıyan elektronlar kullanılarak yüzeyin topografisi (yapısı) elde edilir [39].

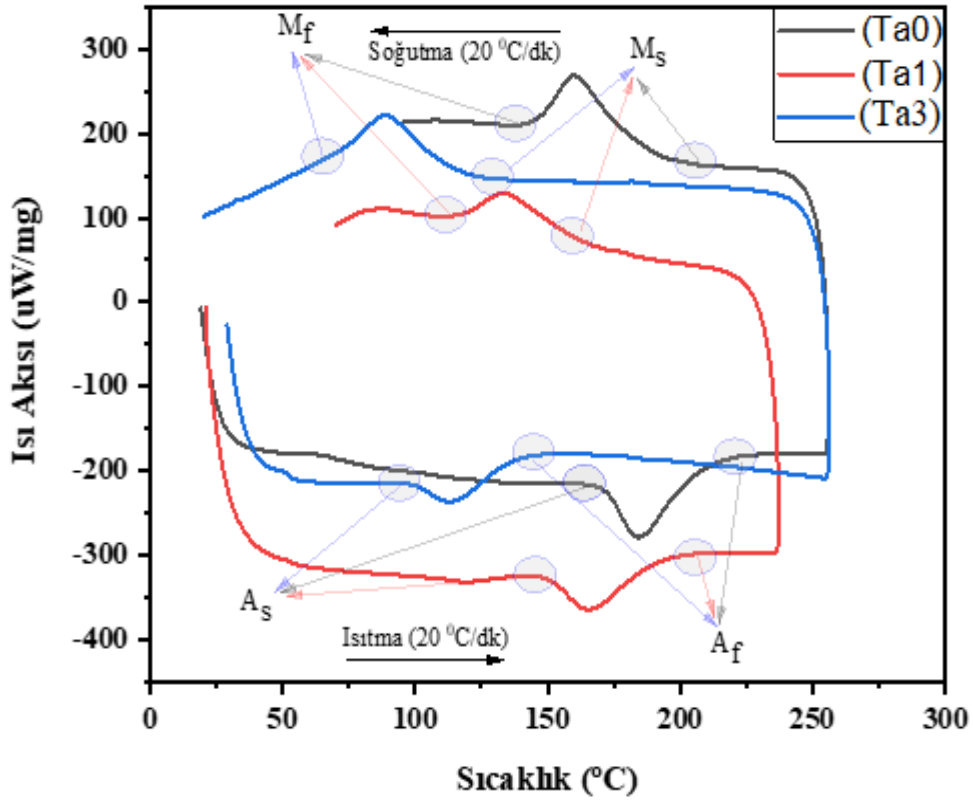
Jeol JSM 7001F SEM-EDX cihazı kullanılarak üretilen alaşımların istenilen oranda olup olmadığını tespit etmek için EDX ölçümleri yapıldı.



6. BULGULAR VE TARTIŞMA

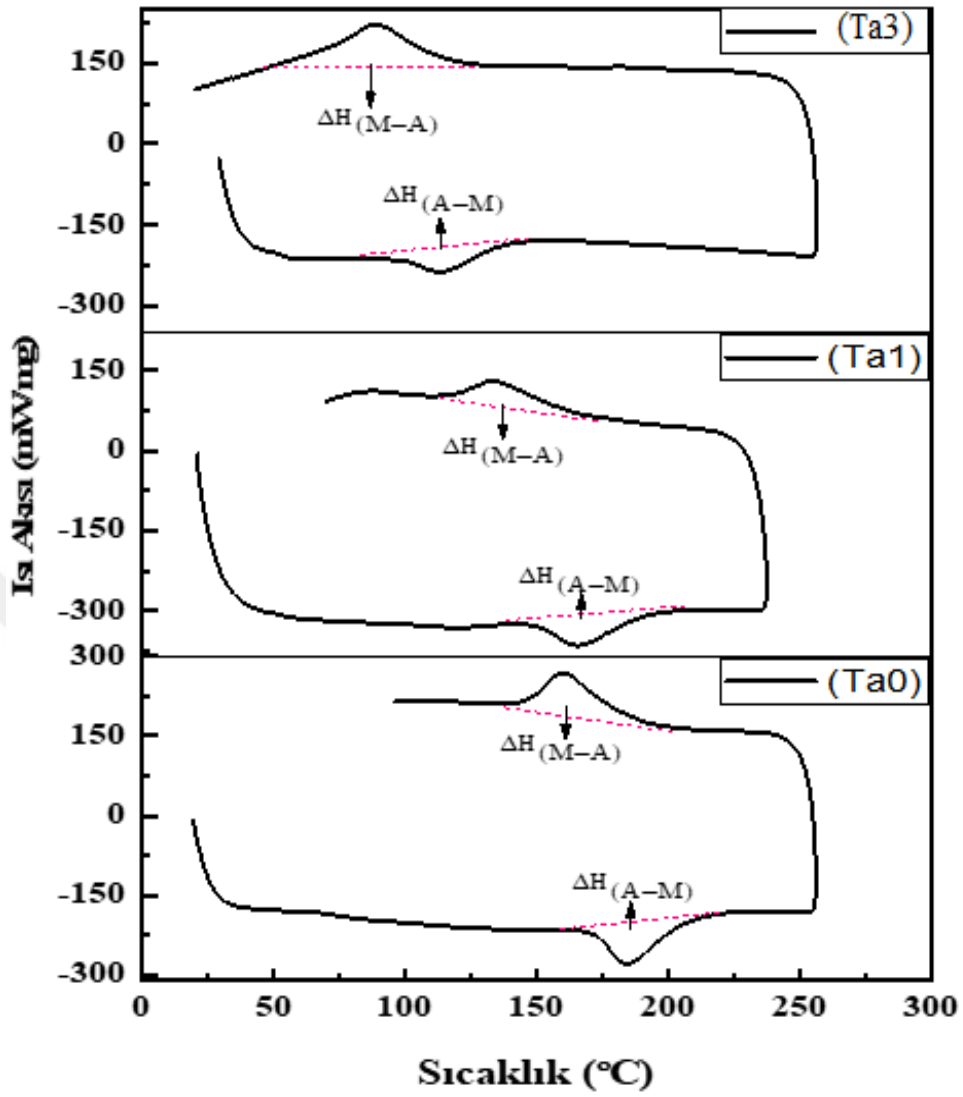
6.1. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Ölçüm Sonuçları

Ta0, Ta1 ve Ta3 olarak kodlanan alaşımların DSC analizi sonucunda elde edilen dönüşüm sıcaklıklarının pikleri Şekil 6.1. de verilmiştir. Elde edilen piklerdeki M_s , M_f , A_s ve A_f dönüşüm sıcaklıkları belirlendi ve değerleri Tablo 6.1. de verildi. Şekil 6.2 de ise alaşımların entalpi değerlerinin alındığı bölgeler belirlenerek değerleri alındı ve bu değerlerde Tablo 6.1. de verildi.



Şekil 6.1. Numunelerin 20°C/dk ısıtma soğutma hızı ile alınan DSC sonucu

Şekil 6.2. de ısıtma boyunca endotermik, soğutma boyunca ekzotermik piklerin olduğu ve martensit ve austenit dönüşümler olarak adlandırılan piklerin varlığı görülmektedir. Endotermik pik sayesinde martensitten austenite geçiş entalpileri (ΔH_{M-A}), ekzotermik pik sayesinde austenitten martensite geçiş entalpileri (ΔH_{A-M}) hesaplandı. Şekil 6.2. ve Tablo 6.1.'de de azaltılan Ni element miktarınca yerine eklenen Ta elementinin endotermik ve ekzotermik pikleri değiştirdiği belirlendi. Bu değişim özellikle soğutma boyunca elde edilen ΔH_{A-M} pikinin daralması şeklinde olduğu tespit edildi.



Şekil 6.2. Numunelerin 20°C/dk ısıtma soğutma hızı ile alınan DSC ölçümlerinin entalpi bölgelerinin belirlenmesi

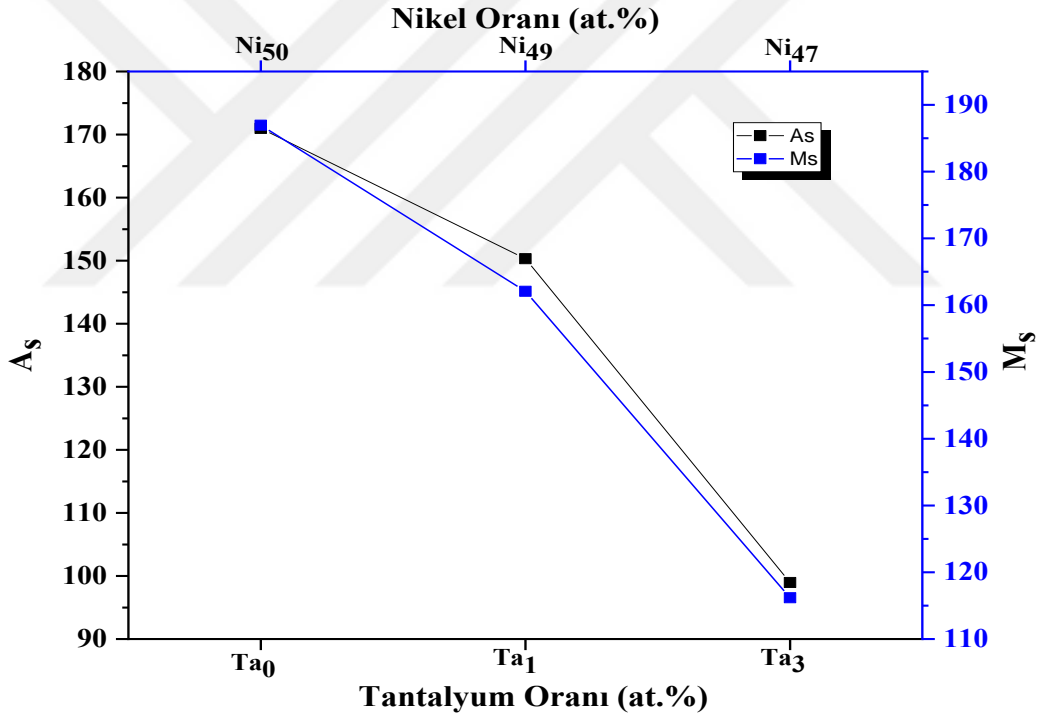
Tablo 6.1. Numunelerin dönüşüm sıcaklıkları ve entalpileri

Numune	A_s (°C)	A_f (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	Histerisiz (A_f-M_s) (°C)	ΔH_{M-A} (mJ/mg)	ΔH_{A-M} (mJ/mg)
Ta0	170.96	210.84	186.96	146.06	23,88	-5,44	5,14
Ta1	150.30	191.86	162.08	117.43	29,78	-3,19	3,70
Ta3	98.96	136.78	116.17	69.93	20,61	-6,64	2,74

$Ni_{(50-x)}Mn_{39}Sn_{11}Ta_x$ ($x=0,1,3$ % at.) alaşımlarında tek adımlı martensit faz dönüşümü gözlenmiştir. Alaşımlarda, azalan Ni elementinin miktarı kadar eklenen Tantalum (Ta) elementi sayesinde dönüşüm sıcaklıklarının (A_s , A_f , M_s ve M_f) azalarak daha düşük sıcaklıklar da oluştuğu

görülmüştür. Alaşımlarda dönüşüm sıcaklıklarının düşmesiyle yüksek sıcaklıklı şekil hatırlama bölgesinden ($YSSHB > 100 \text{ }^\circ\text{C}$) uzaklaştığı belirlenmiştir. Bu değişim Şekil 6.3’de verilen numunelerin artan Tantalyum miktarına göre değişen A_s ve M_s dönüşüm sıcaklıklarında açıkça görülmektedir. $170 \text{ }^\circ\text{C}$ civarında dönüşüm sergileyen $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$ alaşımı değişen Ni ve eklenen Ta element kompozisyonu sayesinde $100 \text{ }^\circ\text{C}$ civarına kadar düşmüştür. Bu düşüş $Ni_{49}Mn_{39}Sn_{11}Ta_1$ alaşımında $20 \text{ }^\circ\text{C}$ civarında, $Ni_{47}Mn_{39}Sn_{11}Ta_3$ alaşımında ise $50 \text{ }^\circ\text{C}$ civarında olmuştur.

Şekil 6.3’de azalan Ni element miktarı yerine eklenen Ta element miktarına karşın A_s ve M_s dönüşümlerinin değişimlerini veren diyagram görülmektedir. Yukarıda da bahsettiğimiz değişen element miktarlarının dönüşüm sıcaklıklarını da değiştirdiği daha net gözlenmektedir. Bu değişimin dönüşüm sıcaklıklarını azalttığı yönde olduğu belirlenmiştir. Bu durum ŞHA’larda element konsantrasyonunun dönüşüm sıcaklıklarını etkilediğini kayda değer bir oranda etkilediğini göstermektedir.



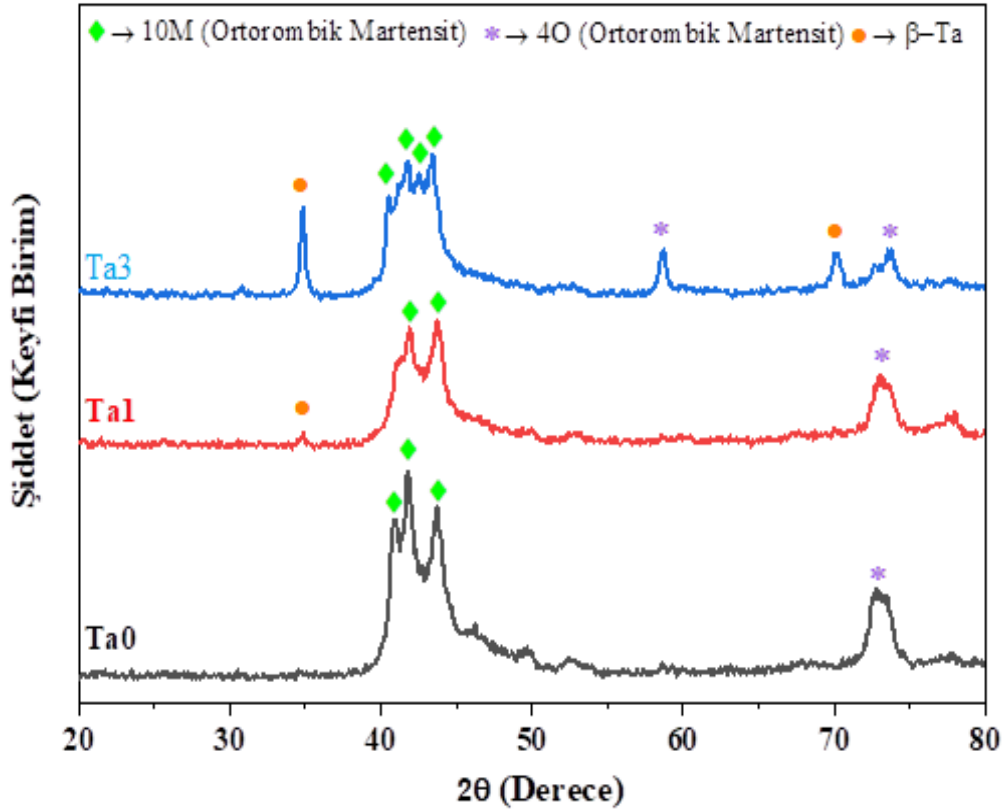
Şekil 6.3. Numunelerin artan Tantalyum (at.%) miktarına göre değişen A_s ve M_s dönüşüm sıcaklıkları

Geçiş metal esaslı şekil hatırlamalı NiMnSn alaşımına, başka bir geçiş metali olan Ta elementinin eklenmesiyle oluşturulan alaşımların dönüşüm sıcaklıkları değişmiştir. Bu değişim Mn elementinin antiferromanyetizma özelliği, elementlerin elektron orbital doluluğu ve alaşımdaki elastik özelliklerin etkisi altında gerçekleşmiştir [51]. M. Zarinejad ve Y. Liu tarafından yapılan araştırma da elementlerin alaşımları oluştururken sahip oldukları bağlanma enerjilerinin dönüşüm sıcaklıklarına etkisi incelenmiştir. Özellikle metalik bağda değerlik elektronlarının bağ yapmada

ve iyon çekirdeklerini birbirine bağlamada katkı sağladığını, diğer elektronların ise alaşımın toplam hacmine katkı sağladığını söylemişlerdir. Alaşımın hacminde meydana gelen değişimlerin de dönüşüm sıcaklıklarını etkilediği görülmüştür [52]. Tablo 6.1. de verilen elektron konsantrasyonları değerlerinden anlaşılacağı üzere; Ni yerine eklenen Ta element katkısı elektron konsantrasyonunu düşürmekte ve bu durumun kesme modülünün azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Dönüşüm sıcaklıklarının düşük sıcaklıklara kaymasına ve entalpi değerlerinin değişmesine neden olduğu da bilinmektedir.

6.2. X-Işını Analizi (XRD) Analizleri

Şekil 6.4’de Ta0, Ta1 ve Ta3 alaşımlarının oda sıcaklığında 20-80° aralığında 2°/dk. tarama hızı ile alınan X-ışınları difraktogramları verilmiştir. Oda sıcaklığında X-ışınları alınan Ta0, Ta1 ve Ta3 alaşımlarının neredeyse tamamen martensitik mikro yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ta0 alaşımında 10M ve 4O ortorombik (martensit) yapıları mevcuttur [53]. Özellikle 39-46° arasında iç içe geçmiş yarıklar şeklinde ortorombik 10M martensit yapıları belirgindir. Bununla birlikte 71-75° arasında küçük yarılmalara ile oluşan ortorombik 4O martensit yapıları da görülmektedir [54].



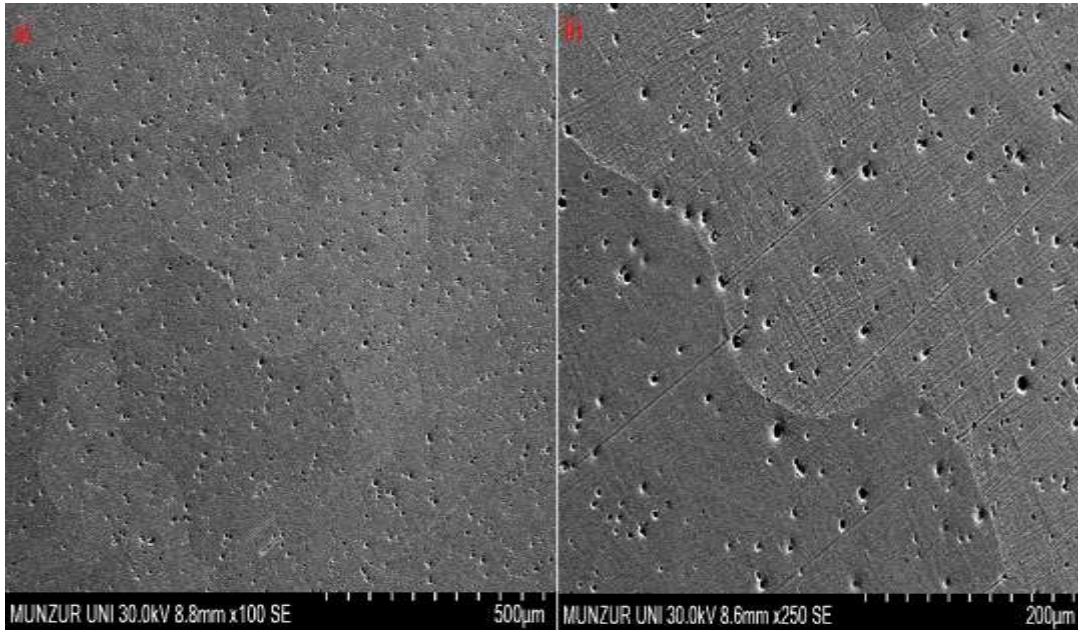
Şekil 6.4. Ta0, Ta1 ve Ta3 numunelerin X-ışını difraksiyon pikleri

Atomikçe (% at.) %1 oranında azaltılan Ni elementi yerine ilave edilen Ta elementi ile oluşturulan Ta1 alaşımında da ortorombik 10M ve 4O martensit yapıları mevcuttur. Mevcut bu yapıların değişen element oranları nedeniyle yarılmaları ve şiddetlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca Ta elementinin katkısı ile β -Ta faz yapısının $34,5^\circ$ civarında küçük miktarda bir pik verdiği belirlenmiştir [55].

Azalan Ni ikamesi yerine %3 (% at.) oranında eklenen Ta ile üretilen Ta3 alaşımında da ortorombik 10M ve 4O martensit yapıları görülmektedir. Ancak Ta3 alaşımında 10M martensit yapılarının Ta0 ve Ta1 alaşımına göre yarılmasının daha karmaşıklaşıp, şiddetinin ise azaldığı tespit edilmiştir. Bu değişimlerin var olan element miktarlarının değişmesinden kaynaklandığı bilinmektedir [53]. Bu piklerin yanı sıra β -Ta faz yapısının 35° civarında şiddetinin artıp daha belirgin hale geldiği ve 70° civarında başka bir β -Ta faz pikinin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca 59° civarında yeni ortorombik 4O martensit yapısı oluşmuştur.

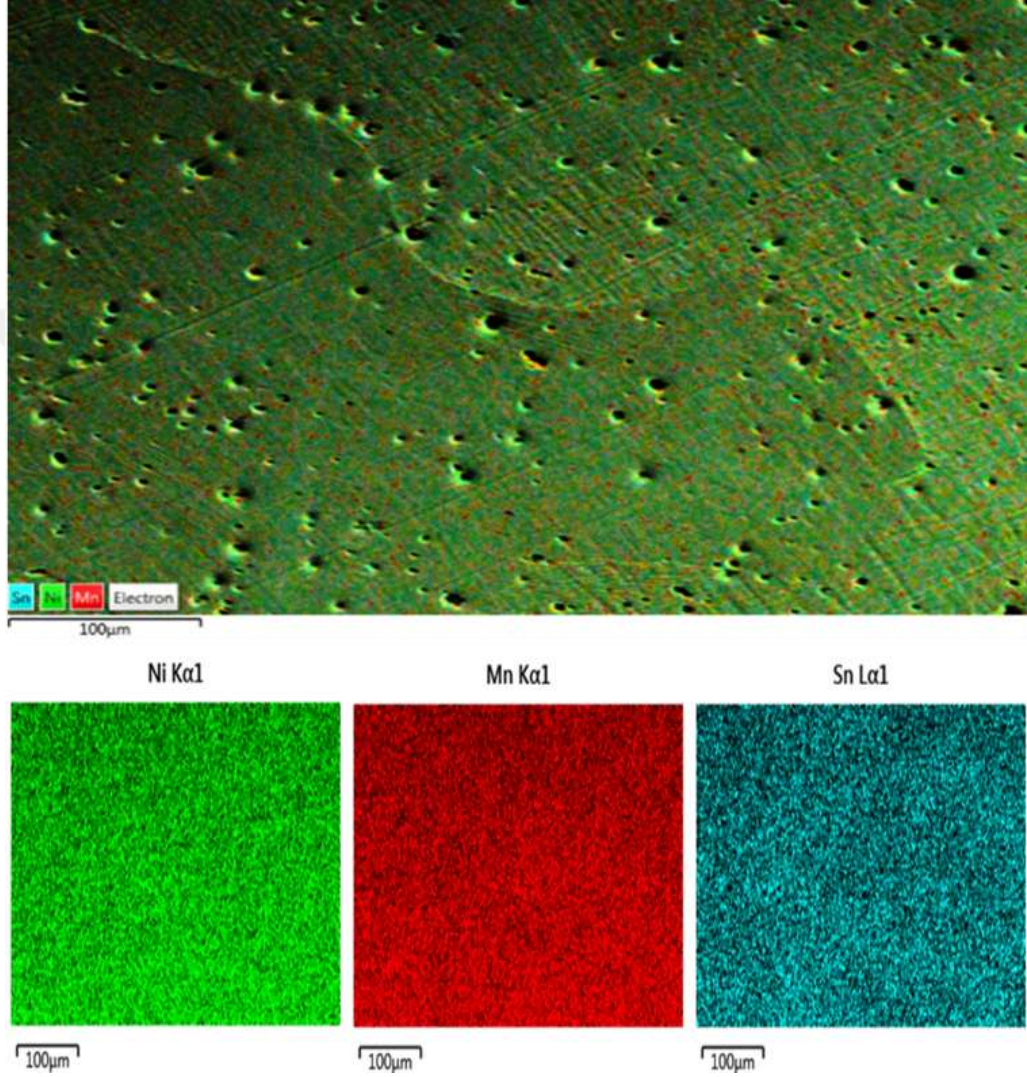
6.3. SEM Ölçümleri (SEM/EDX Sonuçları)

Şekil 6.5 a) ve b)'de Ta0 alaşımının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.5 a)'da alaşımın tane sınırları görülürken, Şekil 6.5 b)'de herhangi bir tane sınırının ortalandığı x250 büyütmede ki V-tipi martensit plakalar görülmektedir [56]. Bu martensit fazların X-ışını analizlerinde görüldüğü ortorombik 10M ve 4O martensit yapılarıdır. Ayrıca alaşımın homojen olarak dağılan siyah nokta şeklindeki çukur yapıları da mevcuttur. Bu yapıların ise alaşımın külçe şeklinde üretilmesi esnasında oluşan katılama ile büzülme gözeneklerinin olduğu bilinmektedir [57].



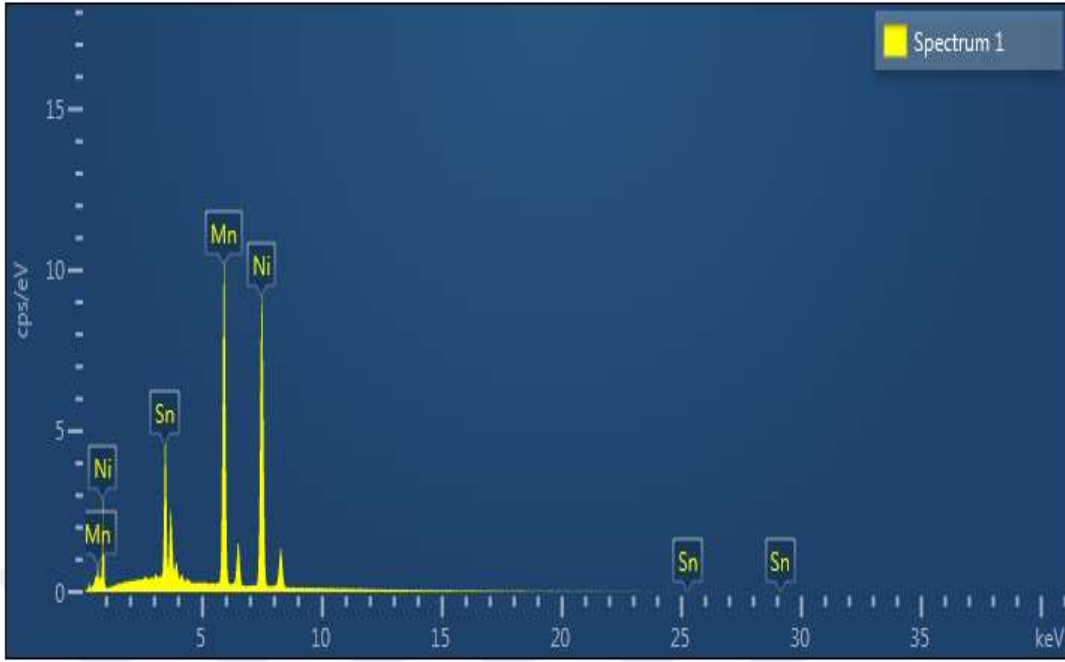
Şekil 6.5. Ta0 alaşımının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri a)x100 b)x250

Şekil 6.6’da verilen kimyasal haritalama yöntemiyle alaşımın homojen bir kimyasal dağılım gösterdiği açıkça görülmektedir. Ayrıca yeşil rengi temsil eden Ni ve kırmızı rengi temsil eden Mn elementlerinin alaşımdaki yüksek konsantrasyonu kimyasal haritalamada da belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6.6. Ta0 alaşımının x250 büyütmede alınan kimyasal haritası

Şekil 6.7’de Ta0 alaşımının EDX spektrumu verilmiştir. EDX spektrumu incelendiğinde alaşımda kullanılan Ni, Mn ve Sn elementlerinin dışında herhangi bir elementin olmadığı görülmüştür ve Tablo 6.2’de alaşımının tüm yüzeyden alınan EDX analizi (kimyasal analiz) sonucu verilmiştir. Atomikçe (% at) hazırlanan alaşımın EDX spektrumu ve spektrum değerleriyle uyumlu olduğu tabloda da görülmüştür.

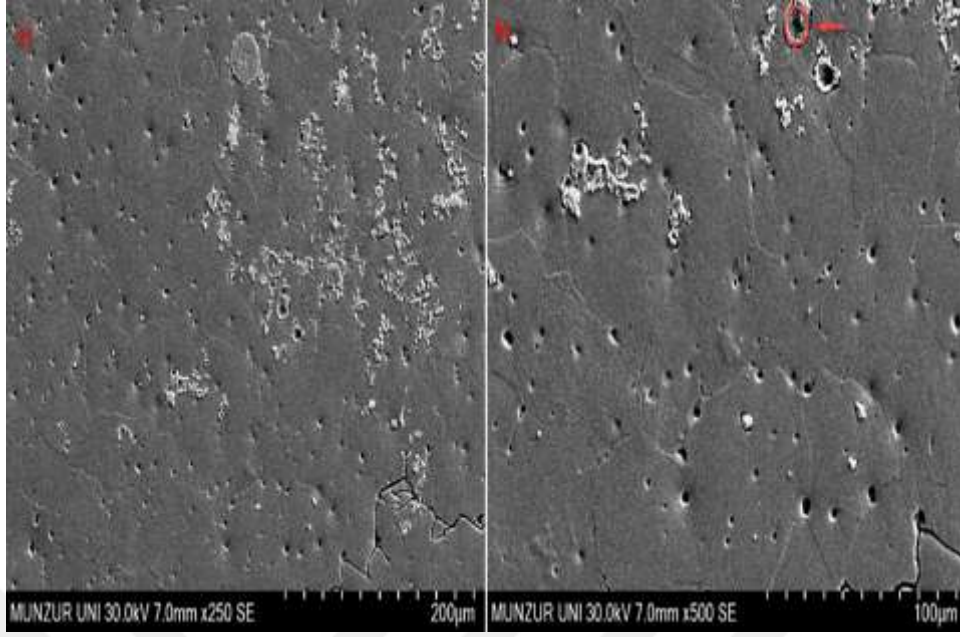


Şekil 6.7. Ta0 alaşımının tüm yüzeyden alınan EDX spektrumu

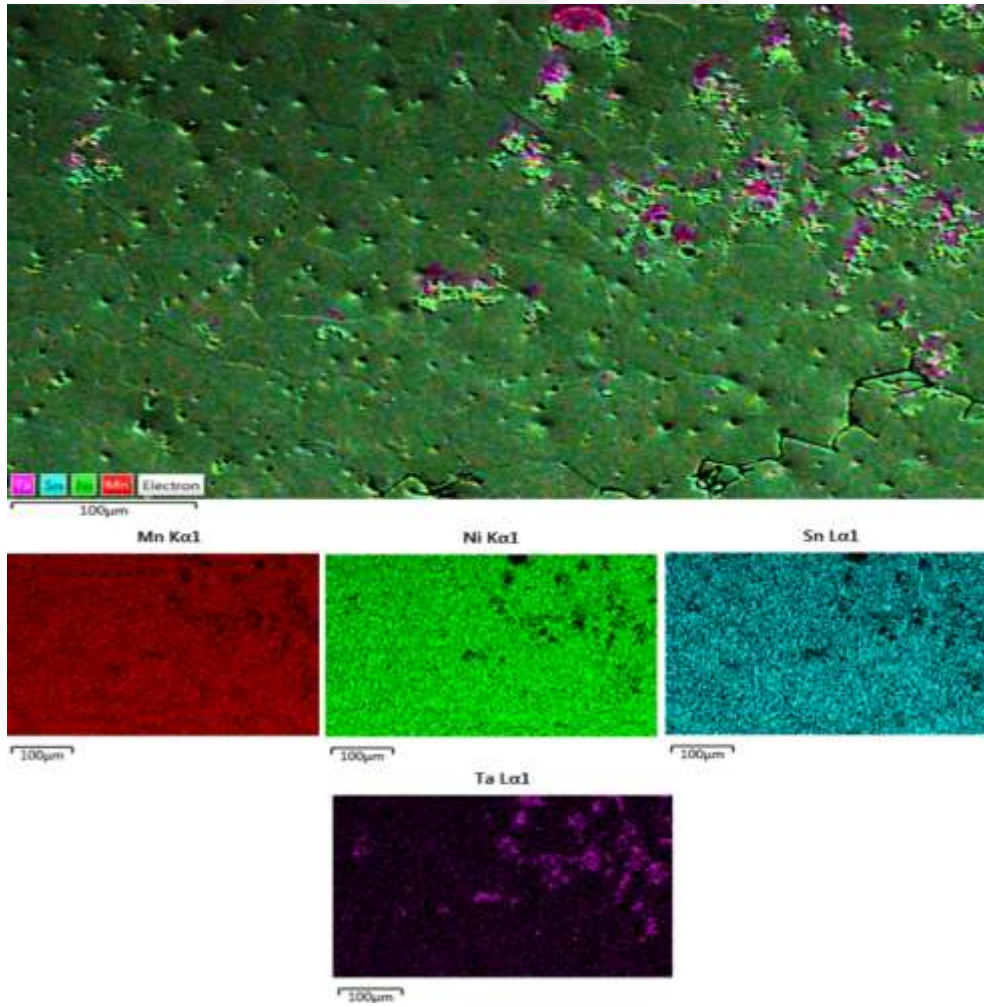
Tablo 6.2. Ta0 (Ni₅₀Mn₃₉Sn₁₁) alaşımının tüm yüzeyden alınan ağırlıkça (% ağı.) ve atomikçe (% at.) EDX sonuçları

Element	Ağırlıkça (%)	Atomikçe (%)	Standart Sapma (%)
Mn	32,72	38,07	0,16
Ni	46,70	50,85	0,18
Sn	20,58	11,09	0,17
Toplam	100,00	100,00	

Şekil 6.8 a) ve b)'de Ta1 alaşımının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri görülmektedir. Ta1 alaşımında da V-tipi martensit plakalar, tane sınırları ve siyah nokta şeklindeki çukur yapıları görülmektedir [56]. Eklenen Ta element ilavesiyle β -Ta fazının ortaya çıkması martensit fazına katkı sunduğu görülmüştür. Bu katkı martensit plakaların belirginleşip büyümesini sağlamıştır. Ta1 alaşımına eklenen Ta element ilavesiyle tane sınırları ve siyah nokta şeklindeki çukur yapılarının daha da belirginleştiği gözlenmektedir [57].

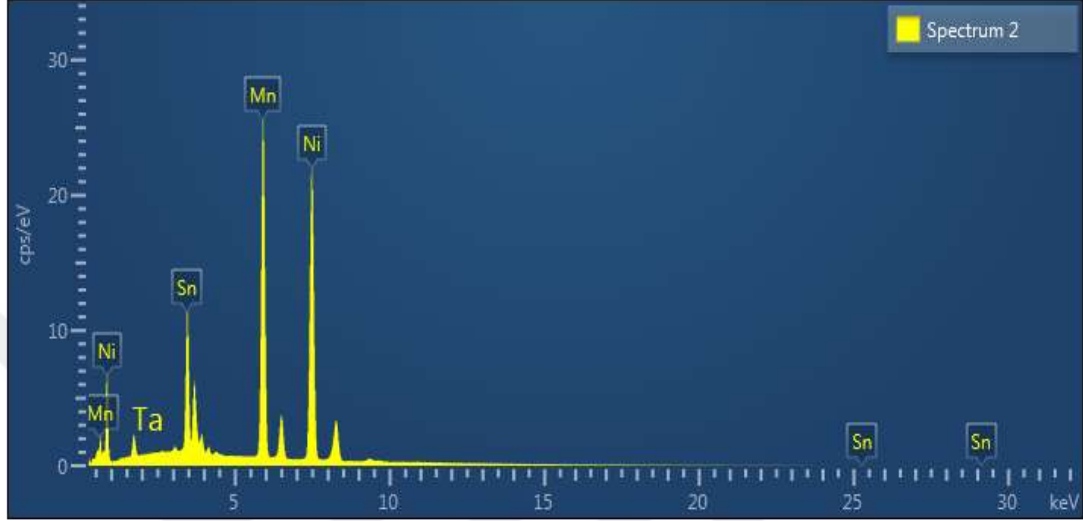


Şekil 6.8. Ta1 alaşımının farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri a) x250 b) x500



Şekil 6.9. Ta1 alaşımının x500 büyütmede alınan kimyasal haritası

Ta1 alaşımının kimyasal haritalama analizi ile Ta0 alaşımına göre homojen kimyasal dağılım göstermediği Şekil 6.9’da görülmektedir. Ancak yüzeyden alınan EDX analizi, üretilen alaşımın Ni, Mn, Sn ve Ta elementlerince atomikęe (% at) oranlarının yakın değerlerde çıktığı görülmüştür. EDX spektrumları Şekil 6.10’da oranlarının ise Tablo 6.3’de verilmiştir.

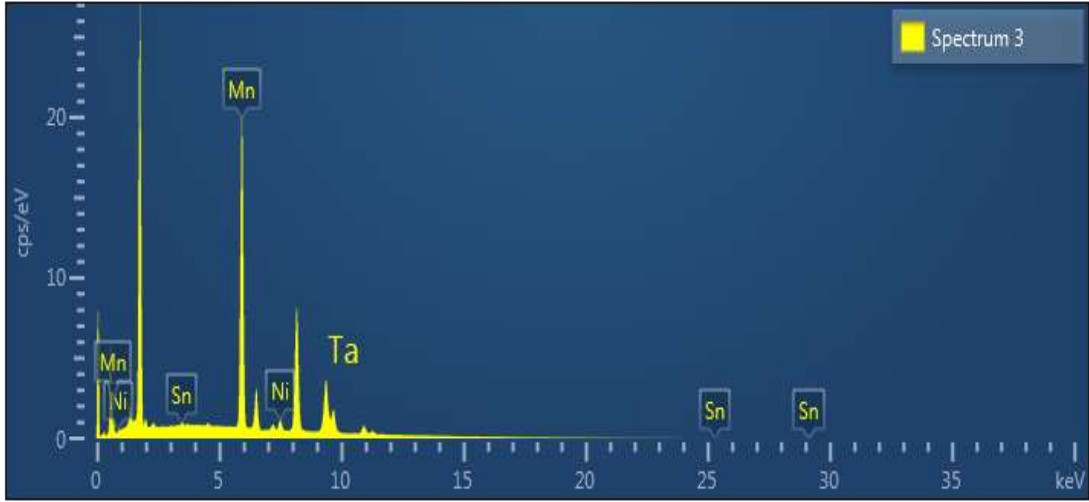


Şekil 6.10. Ta1 alaşımının tüm yüzeyden alınan EDX spektrumu

Tablo 6.3. Ta1 ($Ni_{49}Mn_{39}Sn_{11}Ta_1$) alaşımının tüm yüzeyden alınan aęırlıkęa (% ağ.) ve atomikęe (% at.) EDX sonuçları

Element	Aęırlıkęa (%)	Atomikęe (%)	Standart Sapma (%)
Mn	32,64	38,79	0,11
Ni	44,01	48,93	0,13
Sn	20,37	11,21	0,11
Ta	2,98	1,08	0,16
Toplam	100,00	100,00	

Şekil 6.8 b)’deki SEM görüntüsünde daire içerisinde belirtilen bölge ile Şekil 6.9’daki kimyasal haritalamada belirgin olarak görülen farklı renkteki bölgeden alınan EDX spektrumları Şekil 6.11’de, değerleri ise Tablo 6.4’de görülmüştür. EDX sonuçlarına göre bu bölgenin üretim esnasında Mn ve Ta elementlerinin birikmesiyle oluşan farklı bir yapı olduğu görülmüştür.

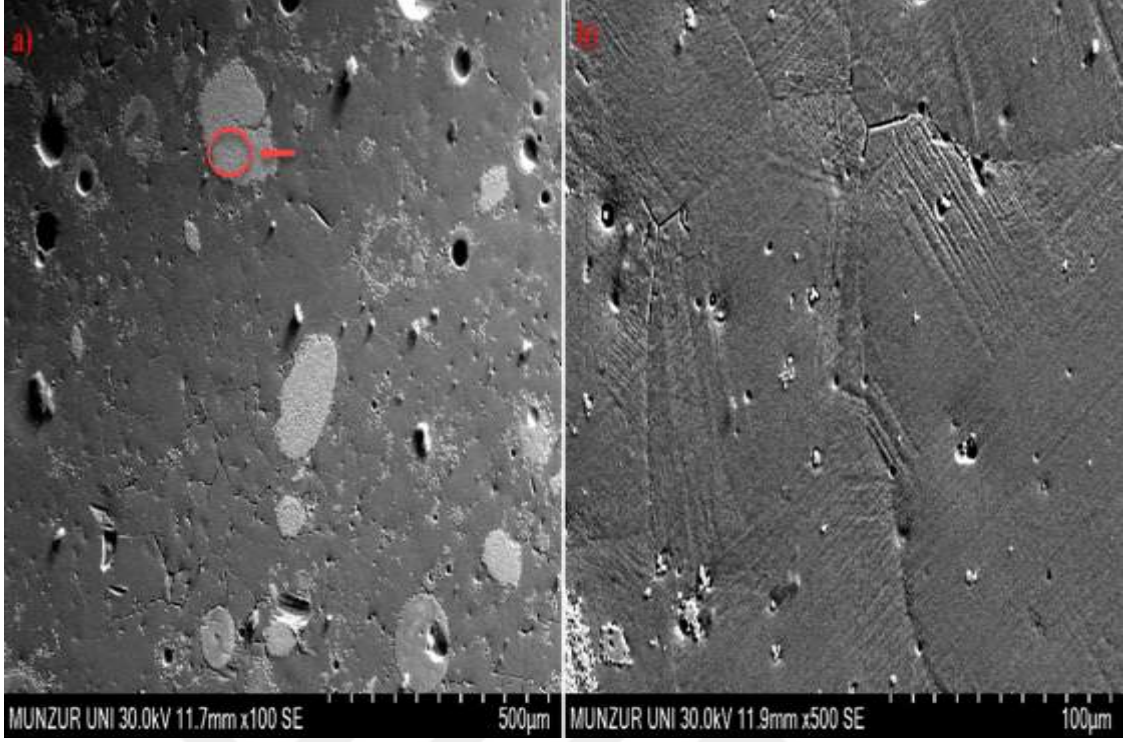


Şekil 6.11. Ta1 alaşımlının x500 büyütme fotoğrafında daire içerisinde belirtilen bölgeden alınan EDX spektrumu

Tablo 6.4. Ta1(Ni₄₉Mn₃₉Sn₁₁Ta₁) alaşımlının x500 büyütme fotoğrafında daire içerisinde belirtilen bölgeden alınan ağırlıkça (% ağı.) ve atomikçe (% at.) EDX sonuçları

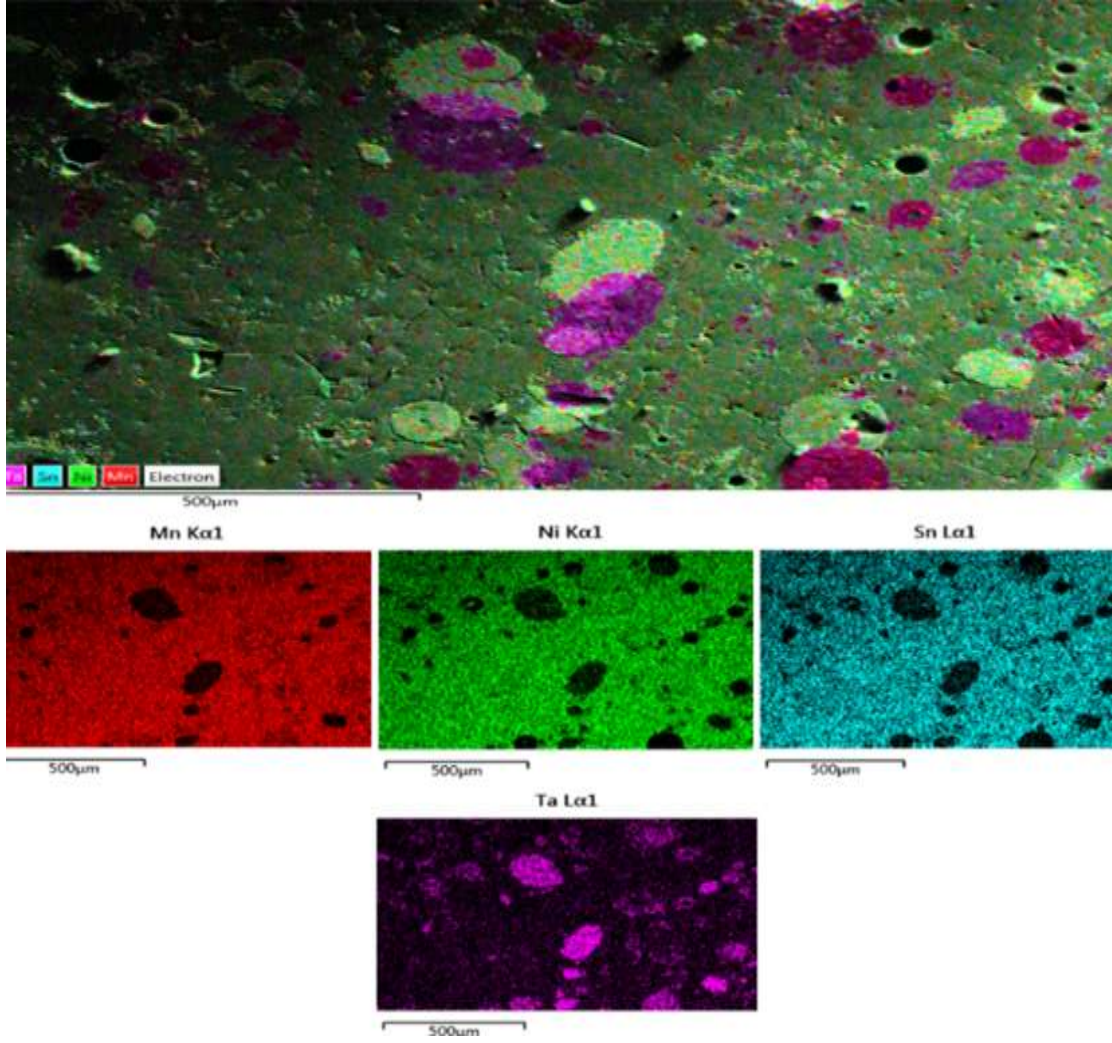
Element	Ağırlıkça (%)	Atomikçe (%)	Standart Sapma (%)
Mn	35,51	63,02	0,16
Ni	1,86	3,09	0,07
Sn	0,54	0,45	0,10
Ta	62,08	33,45	0,18
Toplam	100,00	100,00	

Şekil 6.12 a) ve b)'de verilen Ta3 alaşımlının farklı büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir. Azalan Ni elementine göre artan Ta element ilavesiyle, bazı bölgelerdeki tane sınırları daha da belirginleştiği görülmüştür. Alaşımdaki V-tipi martensitlerinin ise diğer alaşımlara göre daha da belirginleştiği gözlenmiştir. Ta ilavesiyle oluşan β -Ta yapılarının martensit plakalara katkısının giderek arttığı görülmüştür. Alaşımdaki siyah nokta şeklindeki çukurların azalıp, yükseltilerin oluştuğu görülmüştür.

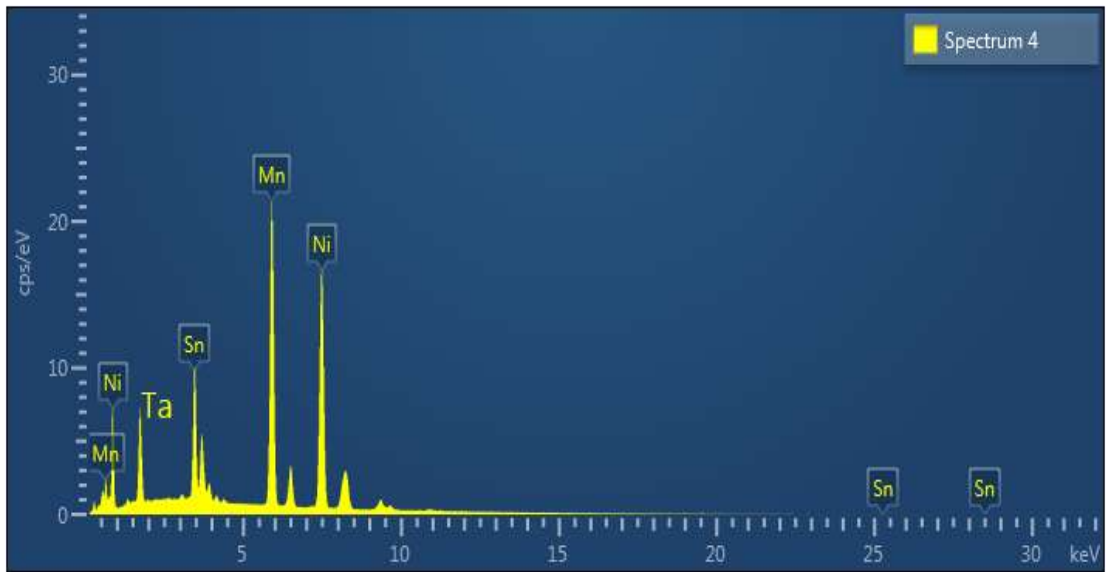


Şekil 6.12. Ta3 alaşımının farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri a)x100 b)x500

Şekil 6.13'deki kimyasal haritalama da ise homojenliğin Ta element ilavesinin artışıyla Ta0 ve Ta1'e göre azaldığı görülmüştür. Yüzeyden alınan EDX analizi ile malzemenin üretilen oranlarla paralel çıktığı Şekil 6.14'deki EDX spektrumu ve Tablo 6.5'deki EDX sonuçları ile gözlenmiştir.



Şekil 6.13. Ta3 alaşımının x100 büyütmede alınan kimyasal haritası

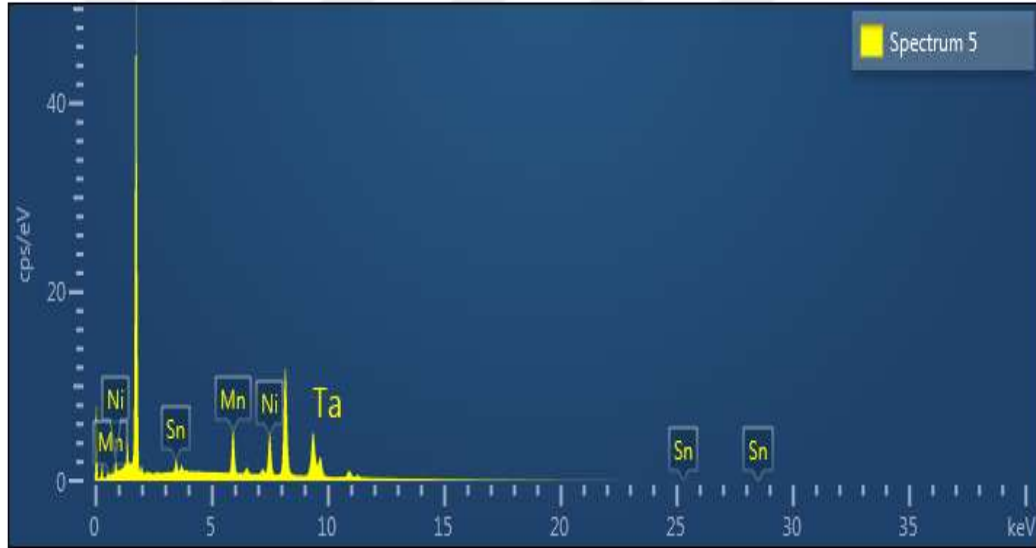


Şekil 6.1. Ta3 alaşımının tüm yüzeyden alınan EDX spektrumu

Tablo 6.5. Ta₃ (Ni₄₇Mn₃₉Sn₁₁Ta₃) alaşımasının tüm yüzeyden alınan ağırlıkça (% ağı.) ve atomikçe (% at.) EDX sonuçları

Element	Ağırlıkça (%)	Atomikçe (%)	Standart Sapma (%)
Mn	31,10	39,28	0,12
Ni	37,69	44,55	0,14
Sn	20,88	12,21	0,12
Ta	10,33	3,96	0,18
Toplam	100,00	100,00	

Ayrıca alaşımda Şekil 6.12'deki daire ile belirtilen parlak bölgeden alınan EDX spektrumunun ise Ta esaslı bölge olduğu Şekil 6.15'de EDX spektrumu ve Tablo 6.6'deki EDX sonuçlarından görülmektedir. Bu sonuçlara göre Şekil 6.8 a)'da belirtilen açık renkli bölgenin baskın Ta element yapısıdır.



Şekil 6.14. Ta₃ alaışının x100 büyütme fotoğrafında daire içerisinde belirtilen bölgeden alınan EDX spektrumu

Tablo 6.6. Ta₃ (Ni₄₇Mn₃₉Sn₁₁Ta₃) alaışının x100 büyütme fotoğrafında daire içerisinde belirtilen bölgeden alınan ağırlıkça (% ağı.) ve atomikçe (% at.) EDX sonuçları

Element	Ağırlıkça (%)	Atomikçe (%)	Standart Sapma (%)
Mn	7,84	18,21	0,09
Ni	10,14	22,05	0,11
Sn	5,07	5,46	0,14
Ta	76,95	54,28	0,19
Toplam	100,00	100,00	

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Tablo 5.1 de atomikçe ve ağırlıkça Ni, Mn, Sn ve Ta oranları verilen Ta0, Ta1 ve Ta3 kodlu ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlar hazırlandı. Hazırlanan Ta0, Ta1 ve Ta3 alaşımları Ni, Mn, Sn ve Ta elementlerinin preslenip pelet haline getirildikten sonra ark ergitme yöntemiyle üretilmiştir. Daha sonra DSC, x-ışını difraksiyonu ve yüzey morfolojisi (SEM-EDX) ölçümlerini yapmak için numuneler hazırlanıp analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Bölüm 6' daki bulgular çerçevesinde geniş bir şekilde literatüre dayalı olarak tartışılmıştır.

Alaşımların DSC eğrilerinin sonuçlarına bakılırsa; $Ni_{(50-x)}Mn_{39}Sn_{11}Ta_x$ ($x=0,1,3$ % at.) alaşımlarının tek adımlı martensit faz dönüşümü sergilediği, başka fazların oluşmadığı görülmüştür.

Ta0 ($Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$) alaışımının austenit başlama (A_s) sıcaklığı $170,96^{\circ}C$, austenit bitiş (A_f) sıcaklığı $210,84^{\circ}C$, martensit başlama (M_s) sıcaklığı $186,96^{\circ}C$ ve martensit bitiş (M_f) sıcaklığı $146,06^{\circ}C$, histerizis değeri $23,88^{\circ}C$, martensit- austenit entalpisi $-5,44^{\circ}C$ ve austenit- martensit entalpisi $5,14^{\circ}C$ olarak ölçüldü.

Ta1 ($Ni_{49}Mn_{39}Sn_{11}Ta_1$) alaışımının austenit başlama (A_s) sıcaklığı $150,30^{\circ}C$, austenit bitiş (A_f) sıcaklığı $191,86^{\circ}C$, martensit başlama (M_s) sıcaklığı $162,08^{\circ}C$ ve martensit bitiş (M_f) sıcaklığı $117,43^{\circ}C$, histerizis değeri $29,78^{\circ}C$, martensit- austenit entalpisi $-3,19^{\circ}C$ ve austenit- martensit entalpisi $3,70^{\circ}C$ olarak ölçüldü.

Ta3 ($Ni_{47}Mn_{39}Sn_{11}Ta_3$) alaışımının austenit başlama (A_s) sıcaklığı $98,96^{\circ}C$, austenit bitiş (A_f) sıcaklığı $136,78^{\circ}C$, martensit başlama (M_s) sıcaklığı $116,17^{\circ}C$ ve martensit bitiş (M_f) sıcaklığı $69,93^{\circ}C$, histerizis değeri $20,61^{\circ}C$, martensit- austenit entalpisi $-6,64^{\circ}C$ ve austenit- martensit entalpisi $2,74^{\circ}C$ olarak ölçüldü.

Elde edilen alaşıma eklenen Tantanyum (Ta) elementinin belirli oranlarda eklenmesi, dönüşüm sıcaklıklarını önemli ölçüde düşürmüştür. Histerisiz sıcaklıkları düzensiz bir değişim göstermiş olup en yüksek histerisiz %1 Ta katkısı olan Ta1 alaışımında görülmüştür. Dönüşüm sıcaklıklarının yanı sıra austenit fazdan martensit faza veya martensit fazdan asutenit faza geçiş entalpi enerjilerini de değiştirmiş olup en büyük değişim austenit fazdan martensit faza geçiş ile Ta3 alaışımında olmuştur.

Hazırlanan Ta0, Ta1 ve Ta3 alaşımlarının oda sıcaklığındaki XRD sonuçlarına göre, alaşımların neredeyse tamamen 10M ve 4O martensitik yapıları içerdiği görülmüştür. Mevcut bu yapıların değişen element oranları nedeniyle faz piklerinin yarılmalarının ve şiddetlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca Ta elementinin katkısı ile üretilen Ta1 ve Ta3 alaşımlarında β -Ta faz yapısının varlığı belirlenmiştir [51]. Ta oranı %1 (% at) eklenen alaşımda pik şiddeti küçük iken %3 (% at) oranın da Ta eklenince β -Ta piki daha belirgin olduğu görüldü.

Ta0 alaşımında $2\theta = 40^\circ$ ile 45° arasında yarılma şeklinde üç ayrı 10M (ortorombik martensit) pikleri oluşmuş iken Ta1 alaşımında yarılmalar azalıp iki ayrı pik şeklinde oluşmuştur [50]. Artan Ta ilavesi ile oluşturulan Ta3 alaşımında ise dört pik ile yarılmaların tekrardan arttığı gözlenmiştir. Ta1 alaşımında $2\theta = 35^\circ$ de küçük şiddetli bir β -Ta piki oluşurken, Ta3 alaşımında buradaki pikin şiddeti artmıştır ve $2\theta = 70^\circ$ de yeni bir β -Ta piki ortaya çıkmıştır. Ta0 alaşımında $2\theta = 75^\circ$ civarında 4O (Ortorombik martensit) pik şiddeti yüksek iken Ta1 alaşımında biraz azalmış ve Ta3 alaşımında ise en küçük değer almıştır [49]. Ayrıca $2\theta = 60^\circ$ de ise sadece Ta3 alaşımında β -Ta piki oluşmuştur.

Ta0, Ta1 ve Ta3 alaşımlarının yüzey morfolojisini incelemek için optik mikroskop ve SEM görüntülerine bakıldı. Ta element ilavesiyle β -Ta fazının ortaya çıkması ile martensit fazına katkı sağladığı görülmektedir. Bu katkı sayesinde martensit plakaların belirginleşip büyüdüğü görülmüştür. Ta0 ($\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{11}$) alaşımında belirli bir yüzeyinden alınan EDX sonuçlarına göre; Mn elementinin % atomikçe 38,07; Ni elementinin % atomikçe 50,85 ve Sn elementinin % atomikçe 11,09 olduğu tespit edilmiştir. Ta0 numunesinin yüzeyinden alınan EDX spektrumuna göre Ta elementinin olmadığı görülmüştür.

Ta1 ($\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{11}\text{Ta}_1$) alaşımının yüzeyinden alınan EDX sonuçlarına göre; Mn elementinin % atomikçe 38,79; Ni elementinin % atomikçe 48,93; Sn elementinin % atomikçe 11,21; ve Ta elementinin % atomikçe 1,08 olduğu görüldü.

Ta3 ($\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{11}\text{Ta}_3$) alaşımında tüm yüzeyinden alınan EDX sonuçlarına göre; Mn elementinin % atomikçe 39,28; Ni elementinin % atomikçe 44,55; Sn elementinin % atomikçe 12,21; ve Ta elementinin % atomikçe 3,96 olduğu görülmüştür.

Hazırlanan alaşımlarda tane (grain) sınırları belirgin şekilde görülmüştür ve yer yer martensit plakaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Yukarıda da görüldüğü gibi EDX sonuçları ile üretilen alaşım oranlarının değerleri uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara bakılarak hazırlanan alaşımların homojen olduğu da görülmüştür.

ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının konusunu içeren üç ferromanyetik şekil hatırlamalı $Ni_{(50-x)}Mn_{39}Sn_{11}Ta_x$ ($x=0,1,3$ % at.) alaşımları üzerinde yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar ışığında aşağıda önerilen çalışmalarda yapılabileceği sonucuna varılmıştır:

1. Bu alaşımların TG/DTA ölçümleri yapılabilir.
2. Uygulanan manyetik alan ile bu alaşımların dönüşüm sıcaklıklarının, kristal yapısının ve manyetik özelliklerinin değişimi incelenebilir.
3. Bu alaşımlar üzerine zor uygulamanın dönüşüme etkisi incelenebilir.
4. Elektriksel iletkenlikle bu alaşımların dönüşüm sıcaklıkları incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Eşkil, M., Seval, E., and Akis, A.Ç. (2014). Şekil hatırlamalı conial alaşımlarının kristalografik özellikleri, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, C Vol. 30 (1), pp: 19-28.
- [2] Aydoğdu, Y., Turabi, A.S., Kok, M., Aydoğdu, A., Yakinci, Z.D., Aksan, M.A., Yakinci, M.E., and Karaca, H.E. (2016). The effect of Sn content on mechanical, magnetization and shape memory behavior in NiMnSn alloys, *Journal of alloys and compounds*, C Vol. 683 339-345. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.108>.
- [3] Akdoğan, A. and Nurveren, K. Şekil Hafızalı Alaşımlar, Vol. 14.
- [4] Kainuma, R., Imano, Y., Ito, W., Sutou, Y., Morito, H., Okamoto, S., Kitakami, O., Oikawa, K., Fujita, A., and Kanomata, T. (2006). Magnetic-field-induced shape recovery by reverse phase transformation, *Nature*, C Vol. 439 (7079), pp: 957-960.
- [5] Dağdelen, F., Yıldız, K., and Kök, M. (2014). CoNiAlSn manyetik şekil hatırlamalı alaşımının üretilmesi ve bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Vol.
- [6] Sutou, Y., Imano, Y., Koeda, N., Omori, T., Kainuma, R., Ishida, K., and Oikawa, K. (2004). Magnetic and martensitic transformations of NiMnX (X= In, Sn, Sb) ferromagnetic shape memory alloys, *Applied Physics Letters*, C Vol. 85 (19), pp: 4358-4360.
- [7] Aksöz, S., (2015). *Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşımın Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi İle Üretimi Ve Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi*, Gazi Üniversitesi. Ph.D. thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [8] Kök, M. and Aydoğdu, Y. (2013). Electron concentration dependence of phase transition and magnetic properties in NiMnGa alloys, *Journal of superconductivity and novel magnetism*, C Vol. 26 (5), pp: 1691-1696.
- [9] Aydoğdu, Y., Turabi, A.S., Aydoğdu, A., Vance, E.D., Kok, M., Kirat, G., and Karaca, H.E. (2016). The effects of substituting B for Cu on the magnetic and shape memory properties of CuAlMnB alloys, *Applied Physics A*, C Vol. 122 (7), pp: 687. doi: 10.1007/s00339-016-0222-5.
- [10] Kök, M. and Aydoğdu, Y. (2012). Effect of heat treatment on the physical properties of Ni–Mn–Ga alloy, *Thermochimica Acta*, C Vol. 548 51-55. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.08.030>.
- [11] Malkoç, T., (2014). *CoAl Esaslı Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımların Üretimi Ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi/Production of CoAl Based Ferromagnetic Shape Memory Alloys And Investigation of Their Physical Properties*, Fırat Üniversitesi. Ph.D. thesis, Fizik Anabilim Dalı
- [12] Aydoğdu, Y., Aydoğdu, A., Turabi, A., Soheil, S., Kök, M., Aksan, M., and Karaca, H. Magnetic and Shape Memory Properties of NiMnSnB alloys, Vol.
- [13] Toptaş, E. and Akkuş, N. (2007). Şekil hafızalı alaşımlar ve endüstriyel uygulamaları, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, C Vol. 4 15-22.
- [14] Kök, M. (2011). Ni-Mn-Ga ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımının fiziksel özellikleri üzerine alaşım oranı ve ısı işlem etkisinin incelenmesi/Investigation of effect of heat treatment and alloying element on physical properties of Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloy, Vol.
- [15] Karaca, H.E., Karaman, I., Basaran, B., Lagoudas, D.C., Chumlyakov, Y.I., and Maier, H.J. (2006). One-way shape memory effect due to stress-assisted magnetic field-induced phase transformation in Ni₂MnGa magnetic shape memory alloys, *Scripta Materialia*, C Vol. 55 (9), pp: 803-806. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.07.025>.
- [16] Kaya, M. (2008). Toz metalurjisi ile üretilen NiTi şekil hatırlamalı alaşımların metalurjik ve mekanik karakteristiklerinin incelenmesi/The investigation of the metallurgical and mechanical characteristics of NiTi shape memory alloys produced with powder metallurgy, Vol.
- [17] Karaca, H., Karaman, I., Brewer, A., Basaran, B., Chumlyakov, Y., and Maier, H. (2008). Shape memory and pseudoelasticity response of NiMnCoIn magnetic shape memory alloy single crystals, *Scripta Materialia*, C Vol. 58 (10), pp: 815-818.
- [18] Çakmak, Ö. and Kaya, M. (2017). Akıllı Malzeme Şekil Hafızalı Alaşımların Termodinamiği, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, C Vol. 6 (2), pp: 541-555.
- [19] Kurt, B. and Orhan, N. (2003). Şekil Hafızalı Alaşımlarının Kaynak Edilebilirliği, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, C Vol. 4 5.
- [20] Karaca, H.E., Karaman, I., Brewer, A., Basaran, B., Chumlyakov, Y.I., and Maier, H.J. (2008). Shape memory and pseudoelasticity response of NiMnCoIn magnetic shape memory alloy single crystals, *Scripta Materialia*, C Vol. 58 (10), pp: 815-818. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.12.029>.

- [21] Mohammed, S.S., Mediha, K., Qader, I.N., and Dağdelen, F. (2019). The Developments of piezoelectric Materials and Shape Memory Alloys in Robotic Actuator Systems, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, C Vol. (17), pp: 1014-1030. doi: <https://doi.org/10.31590/ejosat.653751>.
- [22] Akis, A.Ç., Eskill, M., and Seval, E. (2011). Farklı Etkiler Altında Şekil Hatırlamalı Co Ni Al Alaşımlarının Martensitik Dönüşüm Sıcaklıklarındaki Değişimler, *e-Journal of New World Sciences Academy* C Vol. 6 18.
- [23] Kök, M., Durğun, S.B., and Özen, E. (2019). Thermal analysis, crystal structure and magnetic properties of Cr-doped Ni–Mn–Sn high-temperature magnetic shape memory alloys, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, C Vol. 136 (3), pp: 1147-1152. doi: 10.1007/s10973-018-7823-5.
- [24] Soğuksu, A., (2006). *Şekil Hatırlamalı Cu-Al-Ni ve Cu-Zn-Al Alaşımların Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Ph.D. thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı
- [25] Arın, T., (2008). *Şekil Bellekli NiTi Alaşımlarında Kimyasal Bileşim-Isıl İşlem Koşullarının Optimizasyonu*, Yıldız Teknik Üniversitesi. Ph.D. thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [26] Aydoğdu, Y., Kök, M., Turabi, A., Aydoğdu, A., Yakinci, Z., Aksan, M., Yakinci, M., and Karaca, H. The effects of composition on the magnetization and shape memory behavior of NiMnSn alloys, Vol.
- [27] Kök, M., Yakinci, Z.D., Aydogdu, A., and Aydogdu, Y. (2014). Thermal and magnetic properties of Ni₅₁Mn_{28.5}Ga_{19.5}B magnetic-shape-memory alloy, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, C Vol. 115 (1), pp: 555-559. doi: 10.1007/s10973-013-3365-z.
- [28] Akis, A.Ç. (2012). Şekil Hatırlamalı Co-Ni-Al-Si Alaşımında Yaşlandırma Olayının Martensitik Faz Dönüşümü Üzerine Etkileri, Vol.
- [29] Tanış, N.A., (2015). *Bakır Ve Titanyum İlaveli NiTi Şekil Bellekli Alaşımların Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilebilirliğinin İncelenmesi*, Gazi Üniversitesi. Ph.D. thesis, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
- [30] Karaca, H.E., Karaman, I., Basaran, B., Chumlyakov, Y.I., and Maier, H.J. (2006). Magnetic field and stress induced martensite reorientation in NiMnGa ferromagnetic shape memory alloy single crystals, *Acta materialia*, C Vol. 54 (1), pp: 233-245. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.09.004>.
- [31] Dagdelen, F. and Aydogdu, A. (2010). Optical and Electrical Properties of Cadmium and Cobalt Oxalate Complexes Investigation, *Turkish Journal of Science & Technology*, C Vol. 5 (1), pp.
- [32] Akis, A.Ç., Eskill, M., and Seval, E. (2011). Farklı Etkiler Altında Şekil Hatırlamalı Co Ni Al Alaşımlarının Martensitik Dönüşüm Sıcaklıklarındaki Değişimler, *e-Journal of New World Sciences Academy*, C Vol. 6 18.
- [33] Planes, A., Mañosa, L., and Acet, M. (2009). Magnetocaloric effect and its relation to shape-memory properties in ferromagnetic Heusler alloys, *Journal of Physics: Condensed Matter*, C Vol. 21 (23), pp: 233201.
- [34] Ercan, E., (2014). *Nikelce Zengin Ni Ti Şekil Hatırlamalı Alaşımın Oksidasyon Davranışının İncelenmesi*, Fırat Üniversitesi. Ph.D. thesis, Fizik Anabilim Dalı
- [35] Yakinci, Z.D. (2015). Şekil Hafızalı Alaşımların Sağlık Alanındaki Uygulamaları, *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi*, C Vol. 3 (2), pp: 1-6.
- [36] Erdoğan, M. (1998). Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri, *Nobel Yayınevi, Ankara*, C Vol.
- [37] Malkoç, T. (2014). CoAl esaslı ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımların üretimi ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi/Production of CoAl based ferromagnetic shape memory alloys and investigation of their physical properties, Vol.
- [38] Kök, M., Qader, I.N., Mohammed, S.S., Öner, E., Dağdelen, F., and Aydogdu, Y. (2019). Thermal stability and some thermodynamics analysis of heat treated quaternary CuAlNiTa shape memory alloy, *Materials Research Express*, C Vol. 7 (1), pp: 015702. doi: 10.1088/2053-1591/ab5bef.
- [39] Kök, M., (2011). *Ni-Mn-Ga Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımının Fiziksel Özellikleri Üzerine Alaşım Oranı Ve Isıl İşlem Etkisinin İncelenmesi/Investigation of effect of heat treatment and alloying element on physical properties of Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloy*, Fırat Üniversitesi. Ph.D. thesis, Fizik Anabilim Dalı
- [40] Yıldırım, S., (2014). *Nanoyapıdaki Ni₅₀ Mn_(34-x) Cux In₁₆ (X= 1.3, 1.5) Heusler Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi*, Hacettepe Üniversitesi. Ph.D. thesis, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı
- [41] Yıldırım, S. (2014). *Nanoyapıdaki Ni₅₀Mn_{34-X}CuxIn₁₆ (X= 1.3, 1.5) Heusler Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi*, Vol.
- [42] Şaşmaz, B., (2010). *Cu Al Mn Ferromanyetik Şekil Hafızalı Alaşım Üretimi, Termal Ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi /The production of CuAlMn ferromagnetic shape memory alloy and the*

- examination of its thermal and magnetic properties., Fırat Üniversitesi. Ph.D. thesis, Fizik Anabilim Dalı*
- [43] Krenke, T., Duman, E., Acet, M., Wassermann, E.F., Moya, X., Mañosa, L., and Planes, A. (2005). Inverse magnetocaloric effect in ferromagnetic Ni–Mn–Sn alloys, *Nature materials*, C Vol. 4 (6), pp: 450-454.
- [44] Zhang, B., Zhang, X., Yu, S., Chen, J., Cao, Z., and Wu, G. (2007). Giant magnetothermal conductivity in the Ni–Mn–In ferromagnetic shape memory alloys, *Applied Physics Letters*, C Vol. 91 (1), pp: 012510.
- [45] Elerman, Y., Dinçer, İ., Yüzüak, E., Emre, B., Yüce, S., Ener, S., and Akarca, B. Ferromanyetik Ni-ve Co-tabanlı Heusler alaşımlarının yapısal, manyetokalorik, ısısız, elektriksel ve spintronik özelliklerinin incelenmesi, Vol.
- [46] Elerman, Y., Dinçer, İ., Yüzüak, E., Emre, B., Yüce, S., Ener, S., and Akarca, B. (2011). Ferromanyetik Ni-ve Co-Tabanlı Heusler Alaşımlarının Yapısal, Manyetokalorik, Isısız, Elektriksel Ve Spintronik Özelliklerinin İncelenmesi, *Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri* CVol. 48.
- [47] Koyama, K., Okada, H., Watanabe, K., Kanomata, T., Kainuma, R., Ito, W., Oikawa, K., and Ishida, K. (2006). Observation of large magnetoresistance of magnetic Heusler alloy Ni 50 Mn 36 Sn 14 in high magnetic fields, *Applied Physics Letters*, C Vol. 89 (18), pp: 182510.
- [48] Söyleriz, S., (2018). *Ni-Mn-In Alaşımında Atomik Kompozisyonun Malzemenin Kristal Yapısı Ve Manyetik Özelliklerine Etkisi, Hacettepe Üniversitesi. Ph.D. thesis, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı*
- [49] Aygahoğlu, A. SEKİL BELLEKLİ ALASIMLAR, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, C Vol. (001), pp: 179-192.
- [50] Okumuş, M., (2006). *Al-Ni-Si Alaşımlarının Hızlı Katılaştırma İle Üretilmesi Ve İncelenmesi, Kahraman Maraş Sütçü İmam Üniversitesi. Ph.D. thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü*
- [51] Wu, Z., Liu, Z., Yang, H., Liu, Y., Wu, G., and Woodward, R.C. (2011). Metallurgical origin of the effect of Fe doping on the martensitic and magnetic transformation behaviours of Ni₅₀Mn_{40-x}Sn₁₀Fe_x magnetic shape memory alloys, *Intermetallics*, C Vol. 19 (4), pp: 445-452.
- [52] Zarinejad, M. and Liu, Y., *Dependence of transformation temperatures of shape memory alloys on the number and concentration of valence electrons*, 2010, Nova Science Publishers, Inc., New York. p. 339.
- [53] Zheng, H., Wang, W., Xue, S., Zhai, Q., Frenzel, J., and Luo, Z. (2013). Composition-dependent crystal structure and martensitic transformation in Heusler Ni–Mn–Sn alloys, *Acta Materialia*, C Vol. 61 (12), pp: 4648-4656.
- [54] Coll, R., Escoda, L., Saurina, J., Sánchez-Llamazares, J., Hernando, B., and Sunol, J. (2010). Martensitic transformation in Mn–Ni–Sn Heusler alloys, *Journal of thermal analysis and calorimetry*, C Vol. 99 (3), pp: 905-909.
- [55] Dagdelen, F. and Aydogdu, Y. (2019). Transformation behavior in NiTi–20Ta and NiTi–20Nb SMAs, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, C Vol. 136 (2), pp: 637-642.
- [56] Buytoz, S. and Harputlugil, F.N. (2018). Ni₅₀Mn₃₈Sn₁₂ Şekil Hatırlamalı Alaşımda Soğutma Hızının Faz Dönüşüm Sıcaklıklarına Etkisi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, C Vol. 30 (3), pp: 175-180.
- [57] Tan, C., Tai, Z., Zhang, K., Tian, X., and Cai, W. (2017). Simultaneous enhancement of magnetic and mechanical properties in Ni-Mn-Sn alloy by Fe doping, *Scientific Reports*, C Vol. 7 43387.

ÖZGEÇMİŞ

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]

[Redacted]

- [Redacted]
- [Redacted]

[Redacted]

[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]