

T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Fe' in BAZI NiMnIn ALAŞIMLARI ÜZERİNE ETKİSİ

Yüksek Lisans Tezi

Fazıl Fazlı KULUCAN

ÇORUM 2020

Fe'in BAZI NiMnIn ALAŞIMLARI ÜZERİNE ETKİSİ

Fazıl Fazlı KULUCAN

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı**

Yüksek Lisans Tezi

**TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Hakan GÜNGÜNEŞ**

Çorum 2020

Fazıl Fazlı KULUCAN tarafından hazırlanan “Fe’in Bazı NiMnIn Alaşımaları Üzerine Etkisi ” adlı tez çalışması/....../..... tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hakan GÜNGÜNEŞ

Doç. Dr. Kutalmış GÜVEN

Doç. Dr. Serhat Fevzi ÖZEREN

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun tarihli ve sayılı kararı ile Fazıl Fazlı KULUCAN’ın, Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Muhammed Asıf YOLDAŞ

Müdür V.

TEZ BEYANI

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

İmza
Fazıl Fazlı KULUCAN

Fe'İN BAZI NiMnIn ALAŞIMLARI ÜZERİNE ETKİSİ

Fazıl Fazlı KULUCAN

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Aralık 2020

ÖZET

Bu çalışmada Fe elementinin Ni-32.8Mn-4.6In-7.6 Fe,Ni34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımları üzerine morfolojik, termal, mekanik ve manyetik özellikler üzerine etkisi araştırıldı. Alaşımların fiziksel karakterizasyonu için; taramalı elektron mikroskobu (SEM), vickers mikro sertlik, basma testi, diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC), termal mekanik analiz (TMA) ve mössbauer spektrometrisi kullanıldı. DSC, mössbauer ve vickers mikro sertlik yöntemleri; alaşımlarda e/a oranı arttıkça faz dönüşüm sıcaklıklarının arttığını, Fe miktarının izomer kayma değerine etkisi olmadığını fakat alaşımın sertliğini artırdığını gösterdi. Basma testi sonuçlarına göre ise alaşımlarda Fe miktarının artması ile elastik modül ve akma dayanımının arttığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre en dayanıklı ve en sünek alaşım Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımı olarak tespit edilmiştir. DSC sonuçlarına göre ΔT histerisiz sıcaklık farkı en küçük alaşım Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımı olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Martensite, Şekil hatırlamalı alaşımlar, Mössbauer, Vickers Mikro Sertlik

THE EFFECT OF Fe ON SOME NiMnIn ALLOYS

Fazıl Fazlı KULUCAN

HİTİT UNIVERSITY

GRADUATE EDUCATION INSTITUTE

December 2020

ABSTRACT

In this study, the effect of Fe element on the morphological, thermal mechanical and magnetic properties of Ni-32.8Mn-4.6In-7.6Fe, Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe and Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alloys were investigated. For the physical characterization of alloys; Scanning electron microscopy (SEM), Vickers micro hardness, differential scanning calorimetry (DSC), thermal mechanical analysis (TMA) and Mössbauer spectrometry were used. DSC, Mössbauer and Vickers micro hardness methods showed that the phase transformation temperatures increased with increase of the e/a ratio in the alloys. The amount of Fe showed no effect on the isomer shift value but increased the hardness of the alloys. According to the compression test results, it was observed that the increase in the amount of Fe in the alloys increased the elastic modulus and yield strength. According to these results, Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alloy was determined as the most durable and ductile alloy. According to DSC results, the smallest temperature difference of ΔT hysteresis was determined in the Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alloy.

Keywords : Martensite, Shape Memory Alloys, Mössbauer, SEM, Vickers Micro Hardness

TEŐEKKÖR

Değerli tez danıőmanım sayın Prof. Dr. Hakan GÖNGÖNEŐ hocama, desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Mehmet KILIÇ hocama, dizgideki yardımlarından ötürü Yavuz Ahmet GÖRBÖZ ve Ali Gökhan UZ hocalarıma ve yetişmemde emeiği geçen anne ve babama, hiğbir desteğini esirgemeyen eőim Pınar KULUCAN ve ocuklarım Batuhan ve İrem KULUCAN'a sonsuz teőekkÖr ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Çalışmanın Amacı.....	4
2.2. Şekil Hatırlamalı Alaşımlar.....	5
2.3. Martensit Dönüşüm.....	7
2.4. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Makroskobik Davranışları.....	8
2.4.1. Süperelastiklik.....	8
2.4.2. Şekil Hatırlama Etkisi.....	9
2.5. Alaşımların Atom Başına Düşen Valans Elektron Sayısı.....	11
2.6. Şekil Hatırlama Etkisinin Belirlenmesi.....	12
2.6.1. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Ölçümü.....	12
2.6.2. Elektriksel Direnç Ölçümü.....	12
2.6.3. Sabit Yük Altında Isıtıp Soğutma.....	12

2.6.4. Termal Çevrim Sayısı.....	13
2.7. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kullanım Alanları.....	14
3. MANYETİK MALZEMELER.....	16
3.1. Manyetik Madde Çeşitleri.....	16
3.1.1. Ferromanyetik Malzeme.....	17
3.1.2. Diyamanyetik Malzeme.....	17
3.1.3. Paramanyetik Malzeme.....	17
3.1.4. Ferrimanyetik Malzeme.....	18
3.1.5. Antiferromanyetik Malzeme.....	18
3.2. Manyetik Histerisiz.....	18
3.2.1. Yumuşak Manyetik Malzemeler.....	20
3.2.2. Sert Manyetik Malzemeler.....	21
4. FERROMANYETİK ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR (FSMA).....	22
4.1. Ferromanyetik Şekil Hatırlama Etkisi.....	23
4.2. Ferromanyetik Şekil Hatırlama Etkisi Gösteren Alaşımlar.....	25
4.3. Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kristal Yapısı.....	26
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
5.1. Materyal.....	30
5.1.1. Alaşımların Hazırlanması.....	30
5.1.2. Tramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri İçin Alaşımların Hazırlanması.....	30
5.1.3. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçümleri İçin Alaşımların Hazırlanması.....	31
5.1.4. Mössbauer Spektrometresi Ölçümleri İçin Alaşımların Hazırlanması.....	31
5.1.5. Mikro Sertlik Ölçümleri İçin Alaşımların Hazırlanması.....	31

5.1.6. Basma Testi Ölçümleri İçin Alaşımın Hazırlanması.....	31
5.2. Yöntem	32
5.2.1. DSC (Diferansiyel Tarama Kalorimetre Sistemi).....	32
5.2.2. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu).....	34
5.2.3. Mössbauer Spektrometresi Sistemi.....	35
5.3. Mekanik Karakterizasyon	37
5.3.1. Sertlik Yöntemi.....	37
5.3.1.1. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi.....	38
5.3.1.2. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi	38
5.3.1.3. Knoop ve Vickers Sertlik Ölçme Deneyleri.....	39
5.3.2. Çekme Yöntemi.....	39
5.3.3. Katıların Esneklik Özellikleri.....	40
5.3.4. Plastik Deformasyon.....	41
5.3.5. Çekme Özellikleri.....	42
5.3.5.1. Akma ve Akma Dayanımı.....	42
5.3.5.2. Çekme Dayanımı.....	43
5.3.5.3. Süneklik.....	44
5.3.5.4. Rezilyans.....	45
5.3.5.5. Tokluk.....	46
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	47
6.1. Alaşımın Mikro Yapısının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile İncelenmesi.....	47
6.2. Alaşımın Manyetik Özelliklerinin Mössbauer Spektrometresinde İncelenmesi.....	49

6.3. Alaşımların Mekanik Özellikleri.....	52
6.3.1. Alaşımların Sertlik Ölçümü.....	52
6.3.2. Alaşımların Basma Test Ölçümleri.....	53
6.4. Alaşımların Termal Özellikleri.....	56
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.1. İki fazlı alaşımların martensit ve östenite'nin kimyasal kompozisyonu.....	49
Çizelge 6.2. Alaşımların mössbauer parametreleri (H_{eff} : İç manyetik alan, Q.S: Kuadropol kayma, I.S: İ İzomer kayma Γ : Çizgi genişliği, R_A : Oluşan fazların hacimsel yüzdesi) izomer kayma	52
Çizelge 6.3. Alaşımların vickers sertlik (H_V) değerleri.....	52
Çizelge 6.4. Alaşımların oda sıcaklığında mekanik özellik parametreleri.....	55
Çizelge 6.5. Çalışılan alaşımların alaşımların austenite başlangıç (A_s), pik (A_p), bitiş (A_f) sıcaklıkları, martensite başlangıç (M_s), pik (M_p), bitiş (M_f) $\Delta T= A_f-M_s$ sıcaklıkları.....	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Şekil Hatırlamalı alaşımların farklı fazları, a) Östenit, yüksek sıcaklık fazı kristal kübik yapı, b) Martensit, düşük sıcaklık fazı, monoklinik kristal yapı, ikizlenmeli martensit, c) Deforme olmuş martensit.....	6
Şekil 2.2. Süperelastiklik. As, Af, Ms ve Mf sıcaklıklarında zor-zorlanma eğrisi.....	9
Şekil 2.3. Şekil hatırlama etkisi.....	10
Şekil 2.4. İki yönlü şekil hatırlama etkisi.....	10
Şekil 2.5. Şekil hatırlamalı alaşımlarda elektriksel direncin sıcaklıkla değişimi.....	12
Şekil 3.1. Manyetik davranış çeşitleri.....	16
Şekil 3.2. Ferromanyetik histerisiz döngüsü.....	19
Şekil 3.3. Yumuşak ve sert manyetik malzemelerin manyetizasyon eğrisinin şematik gösterim.....	21
Şekil 4.1. Manyetik şekil hatırlama etkisinin şematik gösterimi.....	24
Şekil 4.2. Ferromanyetik şekil hatırlama etkisinin şematik gösterimi.....	25
Şekil 4.3. a) B2 Östenit yapının martensit L10 yapısı b) Kübik eksenle L10 hücre arasında örgü uygunluğu.....	26
Şekil 4.4. NiMnGa alaşımlarının soğutma sırasında dönüşümleri.....	27
Şekil 4.5. Bazı modulated martensit fazların şematik gösterimi.....	28
Şekil 4.6. (a) Martensit fazların kararlılığı (b) Dönüşüm sıcaklığı Ms ile ilk martensit yapı arasındaki ilişki.....	29
Şekil 5.1. Şekil hatırlamalı alaşımlarda tipik bir DSC eğrisi.....	33
Şekil 5.2. Mössbauer spektrometresinin şematik gösterimi.....	36

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. DSC cihazı.....	32
Resim 5.2. Hitit Üniversitesi Bilim ve Araştırma Merkezindeki FEI / Quanta 450 FEG marka modeline sahip SEM cihazı.....	34
Resim 5.3. Hitit Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Mössbauer Spektrometresi cihazı.....	35
Resim 5.4. Çekme deneyi cihazının şematik gösterimi.....	40
Resim 5.5. (a) Bir metal için elastik ve plastik defoemasyonu gösteren gerilme şekil değişimi eğrisi, orantı sınırı P ve 0,002 birim şekil değişimi kullanılarak belirlenen σ_{AK} akma dayanımı. (b) Belirgin akma sergileyen bazı çeliklerdeki gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.....	42
Resim 5.6. Kopma noktası F'e kadar, tipik bir mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi eğrisi. Çekme dayanımı M noktasında gösterilmiştir. Şekil içi dairesel gösterimlerde malzemenin şekil değiştirmesi sırasında eğri boyunca farklı noktalarda alacağı görünüm gösterilmiştir.....	44
Resim 5.7. Malzemenin mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi eğrisinden rezilyans modülünün nasıl belirlendiğini gösteren grafik şeması.....	45
Resim 6.1. Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe alaşımında oluşan martensite kristalleri.....	46
Resim 6.2. Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımında oluşan martensite kristalleri.....	47
Resim 6.3. Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımında oluşan martensite kristalleri.....	47
Resim 6.4. (a) Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe (b) Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe (c) Ni-34.7Mn- 4.3In-4.4Fe alaşımlarının oda sıcaklığında mössbauer spektrumları.....	49
Resim 6.5. Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe alaşımının oda sıcaklığında gerilim-gerinim grafığı.....	53
Resim 6.6. Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımının oda sıcaklığında gerilim-gerinim grafığı.....	53
Resim 6.7. Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımının oda sıcaklığında gerilim-gerinim grafığı.....	54
Resim 6.8. (a) Ni-32.8Mn-4.6In-7.6Fe, (b) Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe (c) Ni-34.7Mn- 4.3In-4.4Fe alaşımlarının sıcaklığa bağlı ısı akışı grafığı.....	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

e_γ	Valans elektron sayısı
e/a	Valans elektron konsantrasyonu
σ_{Ak}	Akma dayanımı
σ_ζ	Çekme dayanımı
U_f	Rezilyans modülü

Kısaltmalar

SMA	Şekil hatırlamalı alaşım
FSMA	Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşım
fcc	γ faz östenit
bcc	α faz martensit
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
R	Remanans
EDS	Elektron dispersiyon spektroskopisi
M_s	Martensit başlama sıcaklığı
M_f	Martensit bitiş sıcaklığı
A_s	Östenit başlama sıcaklığı
A_f	Östenit bitiş sıcaklığı
T_c	Curie sıcaklığı
H_s	Histerisiz
H	Manyetik alan
M	Mıknatıslanma
Y	Elastikiyet modülü
S	Kesme modülü
B	Dış manyetik alan
H_v	Vickers sertlik değeri

1. GİRİŞ

Şekil hatırlamalı alaşımlar (SMA) manyetik alana ve sıcaklığa bağlı iki faz arasında bir hafıza işlemi uygulandığında tekrar eski şekline dönebilen metalik alaşım gruplarıdır. Bu alaşımlar kritik dönüşüm sıcaklığının üstünde östenit ve altında ise martensit adı verilen farklı iki kristal yapıya sahiptir. Düşük sıcaklıklarda deforme edilen bu alaşımlar daha yüksek sıcaklıklarda deformasyon öncesi şekline dönebilmektedir. Bu alaşımların nasıl şekil değiştirdiğini anlamak için öncelikle faz dönüşümlerine değinmek gerekir. Yapısal faz dönüşümleri, yüksek sıcaklık fazında belirli bir kristal yapıda bulunan malzemenin sıcaklık, basınç veya bunların farklı kombinasyonlarının etkisi ile daha düşük enerjili düşük sıcaklık fazındaki farklı bir kristal yapıya dönüşmesidir. Bu yapısal dönüşümler; difüzyonlu ve difüzyonsuz faz dönüşümleri olarak ikiye ayrılır. Her hangi bir metal veya alaşım atomları fiziksel bir etki ile sistem içinde gelişi güzel yer değiştiriyorsa bu dönüşümlere “difüzyonlu yapısal faz dönüşümleri” denir. Eğer metal veya alaşım sisteminde atomların komşulukları değişmeden sadece kristal yapı değişimi söz konusuysa bu tür dönüşümlere de “difüzyonsuz faz dönüşümleri” denir. Östenit yapı yüksek sıcaklıklarda, martensit yapı ise düşük sıcaklıklarda daha karalıdır. Bir sistem kararlı olmadığı zaman kararlı duruma yönelmeye başlar. Sistemin kararlılığını büyük ölçüde sıcaklık, basınç ve kompozisyona ek olarak boşluk, arayer, dislokasyon ve arafaz yüzeyleri gibi kristal kusurları etkiler. Martensitik faz dönüşümleri difüzyonsuz dönüşümlerdir. Bu dönüşümler ana faz olarak adlandırılan yüksek sıcaklık fazı östenit faz ve ürün faz olarak adlandırılan düşük sıcaklık martensit faz olmak üzere iki faza sahiptirler. Bu fazların M_s , M_f olarak adlandırılan martensit başlama ve bitiş sıcaklıkları ve A_s , A_f olarak adlandırılan östenit başlama ve bitiş sıcaklıkları vardır. Bu dönüşümlerde, östenit faz olarak bilinen ana fazın dönüşüm öncesi kristal yapının dışarıdan uygulanan sıcaklık, zor veya her ikisinin birlikte uygulanmasıyla martensit faza dönüşmesidir. Isıtma ve soğutma esnasında meydana gelen faz dönüşümleri esnasında dönüşüm sıcaklıkları arasındaki fark H_s ile gösterilir ve histerisiz olarak adlandırılır. Bu farkın küçük olması dönüşüm için gerekli enerjinin az ve dönüşüm yüzdesinin de büyük olduğunu gösterir.

NiTi alaşımlarının Şekil hatırlama özelliğinin keşfedildiği yıldan beri yaklaşık 50 yıldır bu konu üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Son yıllarda boru bağlantı noktalarında, medikal implantlarda, elektrik bağlantı noktalarında kullanılmak üzere pek çok Şekil hatırlamalı malzemeler geliştirilmiştir. Uzay ve otomotiv endüstri gibi çoğu mühendislik uygulamasında yüksek sıcaklıkta (200 °C den yüksek) uygulanabilecek SMA ihtiyaç duyulmaktadır. (HTSMA). Bu alaşımlar özellikle yüksek martensit dönüşüm sıcaklığına ve alaşımın sünekliliğine de kararlılığa ihtiyaç duymaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıkta pratik uygulama gösterebilmesi için pek çok termal döngü sonucu karalı bir sünekliliğe ve martensit dönüşüm sıcaklığına ihtiyaç duymaktadır.

Son zamanlarda Ni-Mn-In heuslar alaşımlarında %7 civarında sıkıŐtırılarak yüksek manyetik alan sonucu %7 yüz Şekil hatırlama özelliği gösterdiği keşfedilmiştir. Fakat bu malzemelerin kırılgan olmaları geliŐmelerindeki en büyük engeldir. Bu engeli aÇmak için Ni-Mn-In alaŐımlarına çeşitli oranlarda farklı elementler eklenerek alaşımın Şekil hatırlama özelliklerinin nasıl deĐiŐtiĐi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

1996' da keşfedilen intermetalik Ni-Mn-Ga temelli ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlar gözlemlenen büyük manyetik alan kaynaklı zorlar (MFIS) nedeniyle yüksek performanslı aktüatörler ve sensör malzemeleri olarak son yıllarda büyük ilgi görmüştür (Ullako ve ark., 1996). Fakat Ni₂MnGa tek kristalinin önemli ölçüde kırılğan yapısı bu malzemenin uygulamada kullanılmasını engelleyen ciddi bir sorundur. Diğer taraftan Ni₂MnGa alaşımlarında hem martensit hemde östenit ferromanyetik özellik gösterdiğinden dolayı manyetik alan kaynaklı dönüşüm elde etmek için çok büyük manyetik alan gereklidir (Webster ve ark., 1984). Martensitin manyetik kristalografik anizotropisine dayanan Ni₂MnGa alaşımından farklı olarak, Ni-Mn-Z (Z=In, Sn, Sb) alaşımları bir ferromanyetik östenit ve bir paramanyetik martensit arasında martensitik bir dönüşüm sergiler (Wu ve ark., 2011). 2004 yılında Ni-Mn-Z (Z=In, Sn, Sb) alaşımlarının keşfedilmesinden bu yana yeni bir tür ferromanyetik şekil-hatırlamalı alaşım (FSMA) olarak son yıllarda büyük bir ilgi görmüştür (Sutou ve ark., 2004). Bu alaşımlardan Ni-Mn-In alaşımlar üzerine yapılan bazı çalışmaları özetlersek;

Mn₅₀Ni_{40-x}In₁₀Co_x alaşımında Co elementinin martensitik faz dönüşümleri ve manyetik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır (Wu ve ark., 2011). Co miktarının artması ile Martensitik dönüşüm sıcaklığı, dönüşüm entalpi ve entropi değişiminin Co miktarının artması ile azaldığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda Co miktarının artması ile östenitin magnetizasyonunun arttığı tespit edilmiştir.

NiCoMnIn alaşımlarında %7 civarında sıkıştırma sonucu %100 şekil hatırlama oranı keşfedilmiştir. Bununla birlikte tek kristal Ni₄₅Co₅Mn_{36.7}In_{13.3} alaşımında %3 sıkıştırma sonucu uygulanan manyetik alanın neden olduğu zor sebebiyle orijinal şeklini neredeyse tamamen geri kazanıldığı tespit edilmiştir. Burada manyetik alanın sebep olduğu zorların geleneksel ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlardan 50 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Kainuma ve ark., 2006).

İki fazlı $Ni_{50}Mn_{36+x}Fe_8In_{6-x}$ ($x=0,2$) ve $Ni_{52}Mn_{34+y}Fe_8In_{6-y}$ ($y=0,2$) alaşımlarında γ faz miktarının artması ile mekanik özelliklerin arttığı, e/a oranı artması ile dönüşüm sıcaklıklarının hemen hemen lineer olarak arttığı ve bu alaşımların diğer iki fazlı şekil hatırlamalı alaşımlardan daha iyi şekil hatırlama özelliği gösterdiği bulunmuştur (Yang ve ark., 2016).

$Mn_{50-x}Ni_{41}Fe_xIn_9$ ($x=0,1,2,3$) alaşımlarında $x=2$ değerinden sonra iki faz oluşturğu ve DSC ve termo manyetik ölçümler sonucu alaşımların faz dönüşüm ve manyetik dönüşüm sıcaklıkları tespit edilmiştir (Li ve ark., 2016).

$Mn_{50}Ni_{40}In_{10}$ alaşımlarında östenit yapının $L2_1$ kristal yapıda, martensit yapının monoklik 14M kristal yapıda olduğu rapor edilmiştir (Sanchez ve ark., 2009).

$Ni_{50.2}Mn_{33.4}In_{16.4}$ ve $Ni_{50.4}Mn_{33.5}In_{16.1}$ alaşımlarında atomik düzenin manyetik ve yapısal özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir (Recarte ve ark., 2012).

İnce film Ni-Mn-In alaşımlarında birinci dereceden martensitik faz dönüşümlerinin yapısal, manyetik, elektriksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir (Akkera ve ark., 2015).

$Mn_{50}Ni_{50-x}In_x$ ($x = 9.75, 10, 10.25, 10.5, 10.75, 11$) alaşımlarının manyetokalorik ve manyetodirenç özellikleri incelenmiştir (Xuan ve ark., 2011).

2.1. Çalışmanın Amacı

Manyetik şekil hatırlama, büyük manyetodirenç, manyetokalorik özellikler göstermesinden dolayı manyetik sensör, manyetik kontrollü aktüatör ve manyetik soğutucular olarak kullanılan geleneksel Ni-Mn-Ga ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlarda faz dönüşümleri yüksek sıcaklık östenit fazından düşük sıcaklık martensite faza geçiş şeklinde gerçekleşmektedir. Bu alaşımlarda hem östenit yapı hemde ferromanyetik yapı ferromanyetik özellik göstermektedir. 2004 yılında ferromanyetik östenit yapıdan paramanyetik martensit yapıya faz dönüşümü

sergileyen Ni-Mn-In alaşımlarının dönüşüm fazları arası manyetizasyon değerinin hayli yüksek olması, manyetik alanın sebep olduğu zorların çok daha yüksek olması ve neredeyse tamamen Şekil hatırlama özelliği göstermesi özelliklerinden dolayı son zamanlarda çok ilgi çekmiştir.

Bu alaşım tipleri arasında özellikle çift fazlı özellik gösteren Ni-Mn-In-Fe alaşımların daha iyi mekanik ve Şekil hatırlama özelliği göstermesinden dolayı bu tez çalışmasında Ni-32.8Mn-4.6In-7.6Fe, Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe, Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımlarında Fe miktarının alaşımların bazı fiziksel özelliklerini nasıl etkilediği araştırılacaktır.

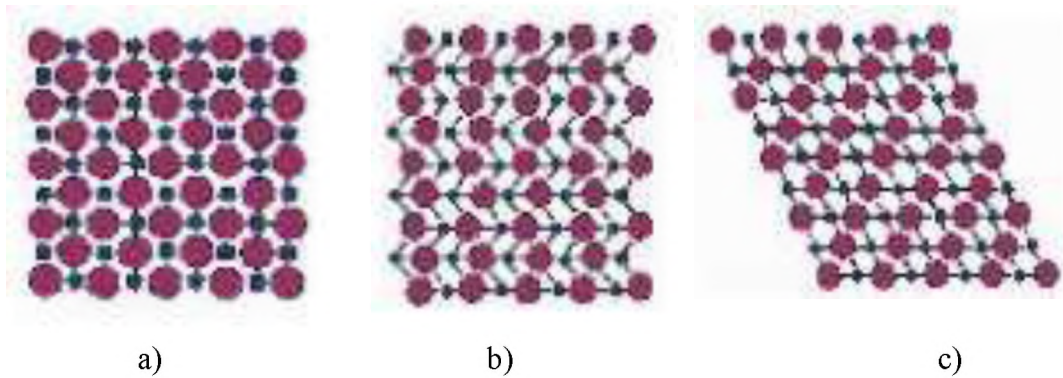
2.2. Şekil Hatırlamalı Alaşımlar

Şekil hatırlamalı alaşımların gösterdiği davranış, tarihsel süreçte ilk defa 1932’ de Ölander’ in “Rubber like effect” çalışmasında kullandığı Altın-Kadmiyum da ve Greninger ve Mooradian’ nın Pirinç (Bakır-Çinko) alaşımlarında gözlemlenmiştir (Schetky, 1980). Daha sonraları (1951 de) Şekil dönüşümü (Shape Recovery) terimini ilk kez Chang ve Read, Altın-Kadmiyum çalışmalarında kullanmışlardır. 1962’ de William J. Buehler ve arkadaşları Nikel-Titanyum alaşımlarının Şekil hatırlama etkisini keşfetmişlerdir. Yaptıkları bu alaşıma NİTİNOL (Nikel-Titanyum Naval Ordnance laboratuvarı) ismini vermişlerdir. Günümüze gelene kadar ise Şekil hatırlama üzerine birçok çalışmalar yapılmış ve Şekil hatırlamalı alaşımlar çok çeşitli alanlarda (askeri, mühendislik, tıp gibi) kullanılmaya başlanmıştır. Bu alaşımların gösterdikleri fiziksel davranışların kontrol edilmesi üzerine yapılan çalışmalar devam etmektedir (Darjan, 2007).

1970 lerde, Şekil hatırlamalı alaşımların çok yönlü kullanımının farkına varılarak, bu alaşımların üretimi artmıştır. 1971’de Sawyer, yapay kalbin çalışması için Ni-Ti alaşımı kullanmıştır. 1982’de Sharp, Şekil hatırlamalı alaşımı, aktüatör olarak elektrik fırınında, 1983’de ise Matsushita , aktüatör olarak klimalarda kullanmıştır (Söylemez, 2009).

Bu alaşımlar, belli bir sıcaklığın üstüne kadar ısıtıldığında şekil değişimi gösterirler. Şekil hatırlamalı alaşımlar özel bir sıcaklıkta şeklini ve boyutunu hatırlar. Gösterdiği bu özellikten dolayı, bu tür malzemeler akıllı malzeme olarak da isimlendirilebilirler. Genel olarak bu alaşımlar, oldukça düşük sıcaklıklarda plastik olarak deforme edilip, daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında ise deformasyondan önceki şekillerine geri dönerler (Darjan, 2007; Sharma Ve ark., 2008; Baksan, 2006). Şekil hatırlamalı alaşımlar Şekil 2.1’de görüldüğü üzere Östenit ve Martensit olmak üzere iki faza sahiptirler. Östenit faz; yüksek sıcaklık fazı olup (Austenit ismini İngiliz metalurjist William Chander Austen’ den almıştır). Martensit faz ise düşük sıcaklık fazı olup (Martensit ismini Alman metalograf Adolf Martens’ ten almıştır. (Darjan, 2007; Chatterjee ve ark., 2008).

Martensit’ten Östenit’e, Östenit’ten Martensit’e meydana gelen faz dönüşümlerinde kullanılan geçiş sıcaklıkları; Martensit bitiş (M_f), Martensit başlangıç (M_s), Östenit bitiş (A_f), Östenit başlangıç (A_s) dir. Bunlar arasındaki sıcaklık sıralaması ise $M_f < M_s < A_s < A_f$ dir. $M_f < T < A_f$ sıcaklığında martensit ve östenit fazın birlikte olduğu, $M_s < T < A_f$ sıcaklığı aralığında ise herhangi bir faz farkı görülmemektedir (Rahman, 2008).



Şekil 2.1. Şekil hatırlamalı alaşımların farklı fazları, a) Östenit, yüksek sıcaklık fazı, kristal kübik yapı, b) Martensit, düşük sıcaklık fazı, monoklinik kristal yapı, ikizlenmeli martensit, c) Deforme olmuş martensit (Darjan, 2007).

2.3. Martensit Dönüşüm

Martensitik dönüşüm, ilk olarak demir bazlı alaşımlarda 1895 yılında Adolf Martens tarafından keşfedilmiştir. Martensitin yapısal dönüşümü, yüksek sıcaklıktaki fcc fazın (γ faz-austenit), düşük sıcaklıktaki bcc faza (α faz-martensit) dönüşümü olarak ifade edilmiştir.

Martensit dönüşüm, difüzyonsuz yapısal faz dönüşümüdür. Difüzyonsuz faz dönüşümlerinin karakteristik özelliği, atomik ayrışmalardan daha küçük uzaklıklarda komşu atomların işbirliği ile yerdeğiştirmesi; başlangıç ve bitiş fazların örgüleri arasında oluşan kuvvetli kristalografik bağlantı ve dönüşüm bölgelerindeki şekil değişimidir (Vasil'ev ve ark., 2003).

Martensit faz dönüşümü, difüzyonsuz bir şekilde, bir kristal yapıdan yeni bir kristal yapıya dönüşüm olarak ifade edilebilir. Bu dönüşümler metaller, alaşımlar ve bileşiklerde gözlenmiştir. "Martensit faz dönüşümü" katılarda görülen bir faz dönüşümünü ifade eder ki, metaller ve alaşımlarda gözlenen birinci mertebeden bir yapısal faz dönüşümü olup, ana faz olan östenite dışardan uygulanan sıcaklık ve zorun birlikte veya ayrı ayrı etkisiyle ürün faz olan martensitin elde edilmesi olayıdır. Martensit dönüşümlerin genel karakteristikleri şöyle sıralanabilir.

- 1) Martensit faz, ara bir katı çözeltili fazıdır.
- 2) Dönüşüm difüzyonsuz olup, kristal yapıdaki atomların hem dönüşüm öncesi hemde dönüşüm sonrası komşulukları korunur.
- 3) Ana faz durumunda, malzemenin yüzeyi parlatıldıktan sonra sıcaklığı düşürülürse yüzey üzerinde oluşan martensit fazlı bazı bölgelerde kabartı şeklinde optik mikroskopta gözlenir.
- 4) Bir martensit faz dönüşümünde bozulmadan kalan ve ana faz ile ürün fazı birbirinden ayıran düzleme yerleşme düzlemi (habit plane) denir.
- 5) Östenit ile martensit faz arasında sınırlı bir dönme bağıntısı vardır.
- 6) Faz dönüşümünde kristal örgü kusurlarında oluşur.

Martensit faz, alaşımın cinsine bağlı olarak ince plaka, kama, iğne ve benzeri Őekillerde oluşabilir. Martensit plakalarda kristalografik ikizlenme ve dislokasyonlardan kaynaklı kristal kusurlarında iğerebilir.

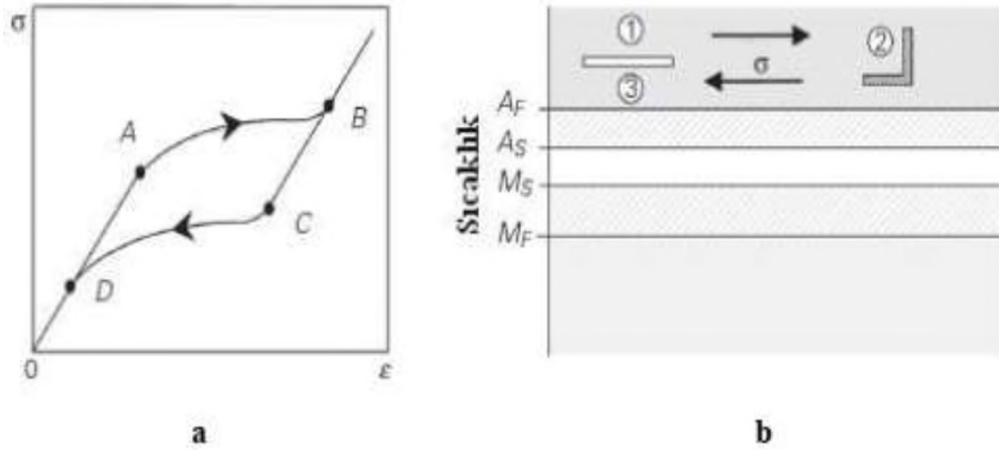
Martensit faz d6n6ř6mleri, termoelastik ve termoelastik olmayan d6n6ř6m olarak ikiye ayrılır. Şekil hatırlamalı alaşımlar termoelastik martensit d6n6ř6m g6sterirler (Aydoğdu, 1995).

2.4. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Makroskobik Davranışları

Şekil hatırlamalı alaşımlar, bilinen malzemelerden farklı olarak fonksiyonlu malzemeler olup s6perelastiklik ve Şekil hatırlama etkisi Şeklinde iki 6nemli 6zellik sergilerler (Rahman, 2008).

2.4.1. S6perelastiklik

Şekil hatırlamalı alaşımlarda lineer olmayan esnek davranışa pseudo-esneklik denir. (s6perelastiklik). Bu durumda az bir kuvvet uygulayarak oldukęa fazla bir deformasyon oluşabilir. Buna rağmen y6k malzeme 6zerinden kaldırılırsa, malzemeyi ısıtmaya gerek olmadan malzeme orjinal Şekline geri d6nebilir (Fred ve ark., 2009; Baksan, 2006). Şekil hatırlamalı alaşımlarda s6perelastiklik A_f sıcaklığının 6st6nde meydana gelir. Şekil 2.2.a, Şekil hatırlamalı alaşımlardaki s6perelastikliği g6stermektedir. Mekanik olarak yapılan y6kleme, A noktasında kritik değere ulaşıncaya kadar elastik cevaba neden olur. B noktasının sonuna kadar martensit d6n6ř6m (6stenit-Martensit) oluşur. B noktasında numunenin kristal yapısı deforme olmuş martensittir. Şekil hatırlamalı alaşım y6ksek zor değerleri için lineer bir cevap verir. Y6klenmeme durumunda ise malzeme elastik d6n6ř6m g6sterir ($B \rightarrow C$). C' den D' ye ters martensit d6n6ř6m (martensit-6stenit) oluşur. D noktasının 6st6nde ise malzeme elastik boşalma g6sterir. Y6kleme-y6klenmeme durumu sona erdiğinde Şekil hatırlamalı alaşım artan zorlanmaya sahip olmaz (Machado ve Savi, 2003).



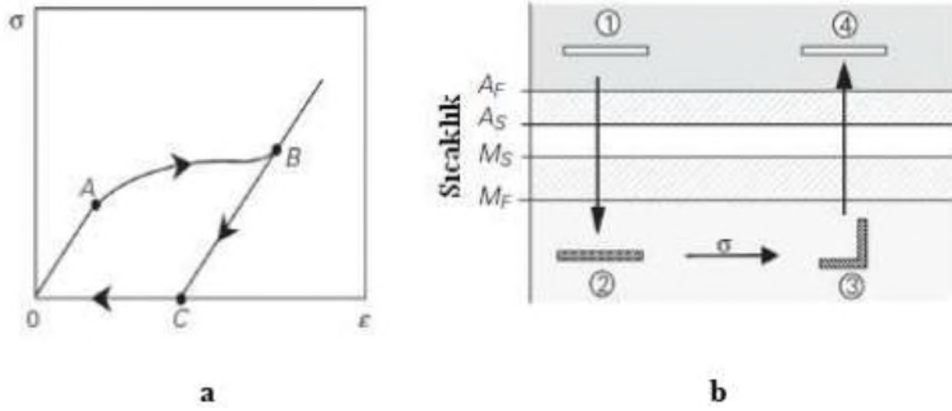
Şekil 2.2. Süperelastiklik. A_s , A_f , M_s ve M_f sıcaklıklarında zor-zorlanma eğrisi (Machado ve Savi, 2003).

Şekil 2.2.b de süperelastiklik etkisinin gözlemlendiği diğer bir yodur. (1) durumunda sadece östenit gibi bir faz vardır. Mekaniksel yükleme sabit sıcaklıkta, deforme olmuş martensit dönüşüm olana kadar uygulanır. (2)' de, yüklenmeme durumunda ters dönüşüm yer değiştirir (deforme olmuş martensit→östenit). (3)' de ise malzeme artan zorlanma göstermez (Machado ve Savi., 2003).

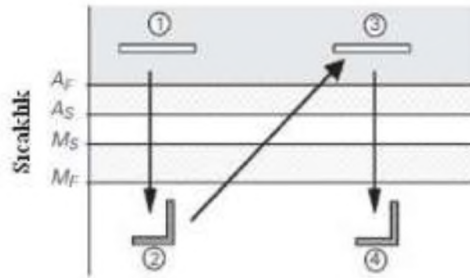
2.4.2 Şekil Hatırlama Etkisi

Şekil hatırlamalı alaşımlarda görülen ikinci termomekaniksel davranış şekil hatırlama etkisidir. Şekil 2.3.a da düşük sıcaklıklarda görülen şekil hatırlama etkisinin zor-zorlanma eğrisi görülmektedir. Malzemeye mekaniksel yükleme yapıldığında, zor A noktasındaki kritik değere ulaşır. İkizlenmeli martensitin deforme olmuş martensite dönüşme zamanı B noktasının sonuna kadardır. Yükleme-yüklemenin kaldırılması durumu sona erdiğinde şekil hatırlamalı alaşım C noktasında artan zorlama gösterir. Bu artan zorlama ve ısıtma ile malzemede ters faz dönüşümü meydana gelir. Bu olay şekil hatırlama etkisidir ve bu olay tek yönlü şekil hatırlama etkisi olarak tanımlanır. Bu olay ilk şekil 2.2.a daki histerisiz eğrisinin hareketinden anlaşılır ve sıcaklık düştüğü zaman histerisiz eğrisi de düşer.

Şekil 2.3.b şekil hatırlama etkisinin incelenebileceği alternatif bir yoldur. Şekil hatırlamalı alaşımın sıcaklığı A_f sıcaklığının üstündedir (1 durumu). Bu sıcaklıkta malzeme sadece östenit fazdadır. Malzemenin sıcaklığı düştüğü zaman faz dönüşümü yer değiştirir. Bu dönüşüm, sıcaklığın M_f nin altında olduğunda gerçekleşir ve ikizlenmiş martensit, östenit ile yer değiştirir (2 durumu). Sabit sıcaklık altında, mekanik yükleme uygulanırsa $\{(2) \rightarrow (3)\}$ deforme olmuş martensit artar. Yükleme ortadan kalktığında malzeme artan zorlanma gösterir (3 durumu). Malzemenin en son şekli, martensit dönüşüme neden olan ısıtma ile düzelmektedir (Machado ve Savi, 2003).



Şekil 2.3. Şekil hatırlama etkisi (Machado ve Savi, 2003).



Şekil 2.4. İki yönlü şekil hatırlama etkisi (Machado ve Savi, 2003).

Şekil 2.4. iki yönlü gerçekleşen şekil hatırlama etkisini şematik olarak göstermektedir. (1)' de, A_f sıcaklığının üstündeki şekil hatırlamalı alaşım

gösterilmiştir. Şekil değişimine neden olan faz değişimi (Östenit→Martensit) malzeme soğutulduğunda oluşur (2 durumu). Malzemenin sıcaklığı A_f sıcaklığının üstüne ısıtıldığında malzemede tekrar faz dönüşümü oluşur ve orijinal şekline geri döner {(2)→(3)}. Diğer soğutma ise malzemeyi kendi düşük sıcaklığındaki şekline geri çevirir. Tek yönlü gerçekleşen şekil hatırlama etkisinin tersine, düşük sıcaklıkta malzemenin şeklini değiştirmek için mekanik yükleme yapmaya gerek yoktur (Machado ve Savi, 2003).

2.5.Alaşımın Atom Başına Düşen Valans Elektron Sayısı (Elektron Konsantrasyonu)

Atomların temel kuantum düzeyinin en dışındaki elektronlarına valans elektronu denir. Geçiş elementleri için; valans elektronları, atomun d ve s orbitallerindeki elektron sayısıdır. Örnek olarak, NiTi alaşımında Ni ve Ti elektron dizilişi Ni: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^8$, Ti: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^2$ ve bu bunların valans elektron sayısı (e_v), $e_v^{Ni}=10$, $e_v^{Ti}=4$ dür. NiTi alaşımının atom başına düşen ortalama elektron sayısı $e_v/a=(10+4)/2=7$. Üçlü ve dördü alaşımların valans elektronları ise şu şekilde hesaplanır.

$$e_v/a = f_{Ni} e_v^{Ni} + f_{Ti} e_v^{Ti} + f_T e_v^T + f_Q e_v^Q \quad (3.1.)$$

f_{Ni} , f_{Ti} , f_T , f_Q alaşım içindeki Ni, Ti, 3. ve 4. elementin atomik oranıdır ve e_v^{Ni} , e_v^{Ti} , e_v^T ve e_v^Q Ni, Ti, 3. ve 4. elementin valans elektron sayısıdır (Zarinejad ve Liu, 2008).

Martensit dönüşüm sıcaklığı M_s , alaşımın elektronik yapısıyla ilişkilidir. Bu olay deneysel olarak valans elektron konsantrasyonu olarak isimlendirilir (e/a). Genel olarak da M_s nin e/a 'ya lineer olarak bağlı olduğu söylenebilir (Krenke ve ark., 2004).

2.6. Şekil Hatırlama Etkisinin Belirlenmesi

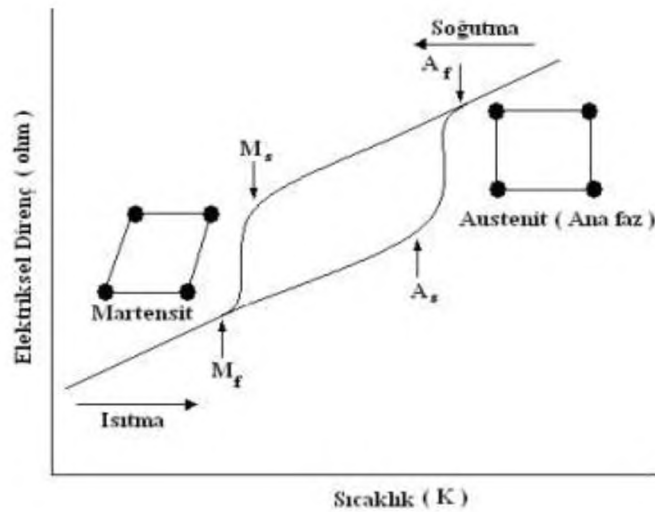
Şekil hatırlamalı alaşımların, şekil hatırlama etkisini tesbit etmek için kullanılan yöntemler vardır.

2.6.1. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Ölçümü

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), şekil hatırlamalı alaşımların faz dönüşüm sıcaklığını belirlemede en çok tercih edilen cihazdır (Wee Choon ve ark.,2007).

2.6.2. Elektriksel Direnç Ölçümü

Metalik malzemelerde iç yapı değişikçe (faz dönüşümü, soğuk işlem, alaşımlandırma vb.) malzemenin genelde ısıl ve elektriksel iletkenliği değişir. Bunun ölçümü ise malzemenin ısıtılıp soğutulması sırasında elektriksel direncin ölçümüne dayanır. Şekil hatırlamalı alaşımlarda oluşan, östenit → martensit veya martensit → östenit dönüşüm sıcaklıklarında faz dönüşümü sebebiyle malzemenin elektriksel direnci değişiklik gösterir (Şekil 2.5) ve bu dönüşüm sıcaklıklarında yapılan ölçümlerde elektriksel direnç pikler gösterir (Aygahoğlu ve ark., 2009).



Şekil 2.5. Şekil hatırlamalı alaşımlarda elektriksel direncin sıcaklıkla değişimi (Braunovic ve Labrecqu, 1995).

Elektriksel dirençteki değişimler ile ölçülen faz değişiklikleri her zaman tutarlı olmamaktadır. Kullanılan malzeme dönüşüm sıcaklıkları arasında tekrarlı bir şekilde ısıtılıp soğutulursa elektirksel direnç eğrilerinde büyük değişiklikler görülmektedir (Aygahoğlu ve ark., 2009).

2.6.3. Sabit Yük Altında Isıtıp Soğutma

Şekil hatırlamalı alaşımlarda en çok kullanılan mekanik ölçüm yöntemlerinden biriside kullanılan malzemeye sabit bir yük altında ve dönüşüm sıcaklıklarında kapsayacak bir alanda, ısıtma ve soğutma yaparak malzemede her iki yönde oluşan gerilmelerin kaydedilmesidir. Bu yöntemle elde edilen M_s ve A_f sıcaklıkları DSC taraması ile elde edilen değerlerden biraz daha yüksek değerdedir. Bunun sebebi ise DSC taramasının, gerilme uygulanmamış malzemelerle yapılması sonucu gerilme altında martensit oluşmamış olmasıdır. Bilindiği üzere gerilme uygulanması ile dönüşüm sıcaklığı artmaktadır. Ana fazdaki plastik deformasyon martensit oluşumuna etki eder. İç gerilme arttığından dolayı martensitin çekirdeklenmesi kolaylaşır. Bunun sonucu olarakda plastik deformasyona uğrayan şekil hatırlamalı alaşımlarda M_s yükselir (Aygahoğlu ve ark., 2009).

2.6.4. Termal Çevrim Sayısı

Kullanım alanına uygun şekil hatırlamalı alaşımın seçilmesinde çevrim sayısının bilinmesi önemli bir kriterdir. Termal çevrim sayısı malzemeye uygulanan yük ve yük kaldırıldıktan sonra ısıtma ile şekil hatırlamalı malzemenin tekrar eski haline gelme sayısıdır. Bu sayı, malzemeye uygulanan yük ve maksimum şekil değişimi miktarları ile doğrudan ilişkilidir.

Şekil hatırlamalı alaşımlar yorulma özelliğine sahiptirler. Klasik alaşımlarla karşılaştırıldığında 10 kat daha fazla şekil değişimine maruz kalırlar. Bununla beraber, eğer ölçü aleti gibi bir parça aşırı yüklenirse ve uzun süreler için alaşımın çalışma alanının dışındaki sıcaklıklara maruz kalırsa metal, termal veya mekanik yorulma ile hasara uğruyarak şekil hatırlama etkisi zayıflayabilir (Aygahoğlu ve ark., 2009).

2.7. Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kullanım Alanları

Son yıllarda şekil hatırlamalı alaşımlar bir çok teknolojik alanda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil hatırlamalı alaşımların, elektrik ve termal uyarımlara kolayca cevap vermesinin farkına varıldıktan sonra yakın bir zamanda aktüatör teknolojisinde kullanılabilceği umut vericidir (Kneissl ve ark., 2006). Mühendislik alanında özellikle robot üretimi, titreşim kontrol alanlarında ve havacılıkta kullanılmaktadır (Wee Choon ve ark., 2007).

NiTi alaşımının şekil hatırlama özelliğinin keşfedildiği yıldan beri yaklaşık 50 yıldır bu konu üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Son yıllarda boru bağlantı noktalarında, medikal implantlarda, elektrik bağlantı noktalarında kullanılmak üzere bir çok şekil hatırlamalı malzemeler geliştirilmiştir. Uzay ve otomotiv endüstrisi gibi çoğu mühendislik uygulamasında yüksek sıcaklıkta (200 °C den yüksek) uygulanabilecek SMA ihtiyaç duyulmaktadır (HTSMA). Bu alaşımlar özellikle yüksek martensite dönüşüm sıcaklığına ve alaşımın sünekliğinde kararlılığa ihtiyaç duymaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıkta pratik uygulama gösterebilmesi için pek çok termal döngü sonucu kararlı bir sünekliğe ve martensite dönüşüm sıcaklığına ihtiyaç duymaktadır.

Şekil hatırlamalı alaşımların göstermiş olduğu süper elastiklik özelliğinden dolayı bir çok ürün geliştirilmiştir. Çok fazla deformasyonları izole eden NiTi gözlük çerçeveleri, ayrıca dişlere geniş bir hareket imkanı sağlayan ortodontik düzeltme işlevli kavisli teller NiTi alaşımlarından yapılmıştır (Sakoğlu ve Özbecene, 2007).

Havacılık sektöründe de şekil hatırlamalı alaşımlar kullanılması planlanmıştır. Bu alaşımlar kullanılarak uçak kanadı yapmak hedeflenmiştir. Bu sayede uçağın uçuş durumlarına göre aerodinamik kayıpları minimize ederek en verimli kanat tasarımıyla uçması mümkün olacaktır (Anonim), <http://www.nitinol.com/media/refernce-library/059.pdf>-(19.06.2020).

Bazı durumlarda şekil hatırlamalı alaşımlar, güç üretmek amacıyla kullanılır. Elektrikle çalışan sistemlerde şekil hatırlamalı aktüatör, cihaz ısındığında bir yayı

açmak için kuvvet oluşturmak amacıyla kullanılırlar. Aynı ilkeyle çalışan CuAlZn şekil hatırlamalı alaşımların bu alanda kullanılan uygulamaları vardır. Örneğin, yangın durumunda yanıcı ve zehirli gazların çıkışını kapatacak şekilde dizayn edilmiştir (Sakoğlu ve Özbecene, 2007).

Şekil hatırlamalı alaşımlar martensit durumdayken deforme edildiğinde serbest enerjiye sahip olur ve ısıtıldığında yapısında bulundurduğu bu serbest enerjiyi kullanarak minimum iş yaptığı önceki şekline geri döner. Bu davranışından yararlanarak biyomedikal uygulamalarda kullanılan damar içindeki kan pıhtısını yakalayan filtre geliştirilmiştir (Makado ve Savi, 2003).

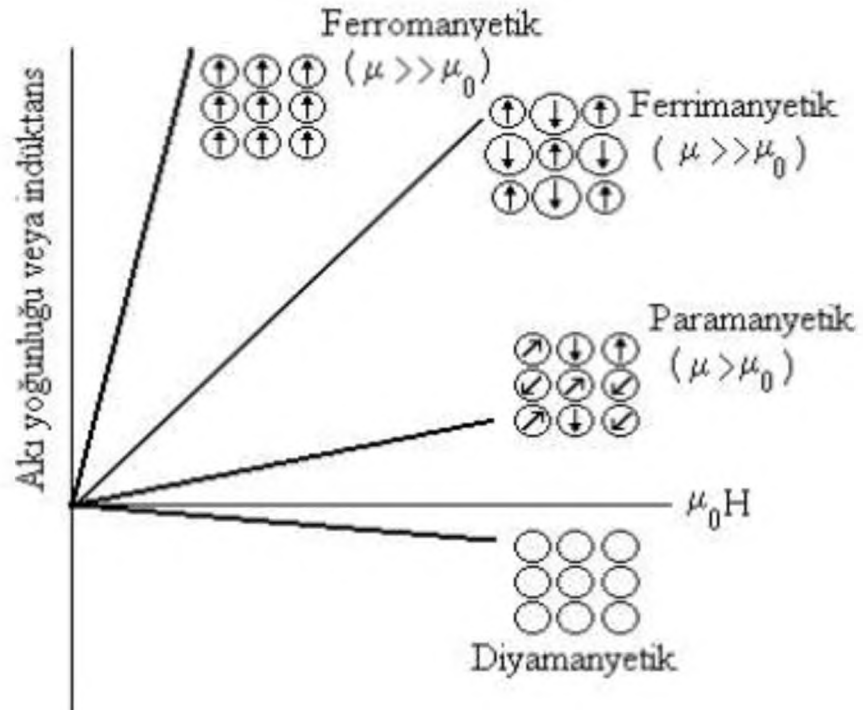
Şekil hatırlamalı alaşımlar birçok alanda kullanılmaktadır. Burda verilen kullanım alanları, şekil hatırlamalı alaşımların bir bölümünü içermektedir.

3. MANYETİK MALZEMELER

Atom çekirdeği etrafında yörünge hareketi yapan elektronlar aynı zamanda kendi eksenleri etrafında da dönebilirler. Dönme yönüne bağlı olarak her elektronda bir manyetik kutup çifti (dipol) oluşur, bu nedenle her elektron bir mıknatıs sayılabilir. Bir elektron, çekirdek çevresinde yörünge hareketi yaparken atomun etrafında da bir manyetik alan oluşturur. Ancak, aynı enerji seviyesinde yörünge hareketi yapan iki elektronun dönme yönleri ters olduğundan birbirlerinin oluşturdukları alanları yok ederek net bir manyetik alan oluşamaz (Onaran, 2006).

3.1. Manyetik Madde Çeşitleri

Malzemelere dış bir manyetik alan uygulandığında bir çok davranış tipi gözlenir. Şekil 3.1'de ferromanyetik, ferrimanyetik, paramanyetik ve diyamanyetik malzemelerin davranışları görülmektedir (Erdoğan, 2001).



Şekil 3.1. Manyetik davranış çeşitleri (Erdoğan, 2001).

3.1.1. Ferromanyetik Malzeme

Malzemelerin ferromanyetik özelliği, 3d düzeyindeki (demir, nikel ve kobalt) veya 4f düzeyindeki (gadolinium) doldurulmamış enerji düzeyinden kaynaklanmaktadır. Bu tip malzemelerde kalıcı olmayan kutup çiftleri manyetik alandan dolayı kolayca hizalanır ve yüksek bir nispi geçirgenliğe sahip olurlar (Erdoğan, 2001).

3.1.2. Diyamanyetik Malzeme

Malzeme üzerine manyetik alan uygulandığında, yörüngedeki elektronların manyetik momenti etkilenir ve malzemenin bütün atomları için manyetik moment çifti oluşur. Oluşan bu manyetik moment çiftleri manyetik alana karşı koyarak manyetikliğin sıfırdan daha az olmasına sebep olur. Bu olay diyamanyetizma olarak adlandırılır ve yaklaşık olarak da 0,01 geçirgenlik sağlar. Bu sebeple, diyamanyetik olay, manyetik malzemeler veya cihazlardaki uygulamalar için önemsizdir (Erdoğan, 2001).

Gümüş, bakır, kurşun, bizmut, antimon gibi metaller, bütün yarı metaller ve organik maddelerin çoğu diyamanyetik maddelerdir (Anonim), <http://www.Sciart.karaelmas.edu.tr/bolumler/fizik/ders%20Notları/E10.pdf> (19.12.2019).

3.1.3. Paramanyetik Malzeme

Paramanyetik malzemelerde ki manyetik moment, çift olmayan elektronlara sahip olduğundan dolayı, atomların elektron dönüşünden meydana gelir. Paramanyetik malzemelere manyetik alan uygulandığında, kutup çiftleri manyetik alanla aynı hizaya gelir ve pozitif bir manyetikleşmeye sebep olur. Kutup çiftlerini manyetik alanla aynı hizaya getirmek için oldukça büyük bir manyetik alan gereklidir. Paramanyetizma olarak isimlendirilen bu etki yalnızca yüksek sıcaklıklarda etkisini gösterir. Bu malzemelerin geçirgenliği 0,01 den daha azdır (Erdoğan, 2001).

Bazı şartlar altında paramanyetik maddelerin mıknatıslanmasının manyetik alanla doğru, mutlak sıcaklıkla ters orantılı olduğu Pierre Curie tarafından bulunmuştur. Bu bağıntı

$$M=C \frac{B}{T} \quad (3.7.)$$

şeklinde olup, bu formülde M mıknatıslanma, B dış manyetik alan, C Curie sabiti, T sıcaklıktır. Bu denklem bize paramanyetik maddelerin mıknatıslanmasının artan dış manyetik alan ve azalan sıcaklıkla arttığını göstermektedir. B=0 da mıknatıslanma sıfırdır ve bu durumda dipol momentler rastgele dizilmişlerdir. Çok büyük dış etkili manyetik alanlar ve düşük sıcaklıklarda mıknatıslanma maksimum olur ve doyum değerine ulaşır. Bu durumda paramanyetik maddedeki manyetik dipoller, dışardan uygulanan manyetik alan yönünde dizilmiş olurlar (Buschow ve Boer, 2003).

3.1.4. Ferrimanyetik Malzeme

Bazı seramik malzemelerin kalıcı olarak manyetikleşme göstermesi ferrimanyetizma olarak isimlendirilir. Makro ölçekte ferromanyetiklerin ve ferrimanyetiklerin manyetik özellikleri birbirine benzerdir. Aralarındaki fark, manyetik moment kaynağıdır. Ferrimanyetik malzemelerin doyma manyetikleşmesi ferromanyetik malzemelerinki kadar büyük değildir. Ferritler seramik malzeme olduğundan elektriksel olarak yalıtandırılar. Bazı uygulamalarda, örneğin yüksek frekanslı transformatörler için düşük elektrik iletkenliği istenir (Callister, 2013).

3.1.5. Antiferromanyetik Malzeme

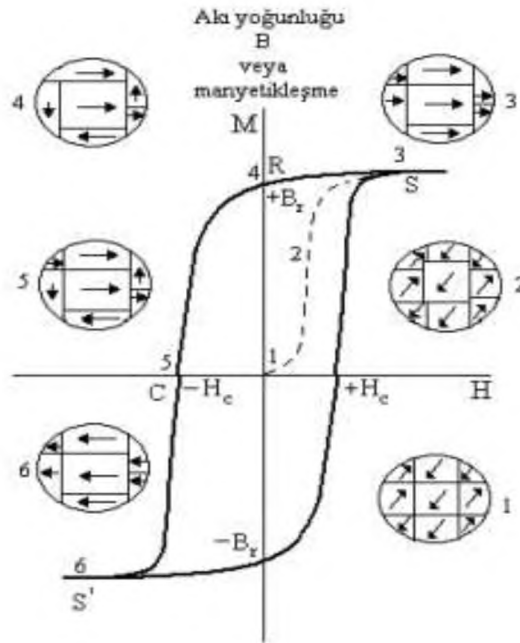
Komşu atom veya iyon çiftlerinin spin momentlerinin tamamen birbirine ters yönde dizilmesi olayı antiferromanyetizma olayı olarak isimlendirilir. Antiferromanyetizma olayı, ferromanyetik malzemelerin dışındaki malzemelerin komşu atomları ve iyonları arasında oluşur. (Callister, 2013).

3.2. Manyetik Histerisiz

Manyetik alana maruz kalmamış ferromanyetik bir malzemenin mıknatıslanması, sıfır değerinden itibaren artırılırsa $B=f(H)$ mıknatıslanma eğrisi elde edilir (Şekil 3.2)

(Anonim), <http://www.Sciart.karaelmas.edu.tr/bolumler/fizik/ders%20Notları/E10.pdf> (19.12.2020).

Malzemeye dış manyetik alan uygulandığında, dış manyetik alanla hizaya gelen domenler hizaya gelmemiş domenlerin uzantısında büyüyerek blok duvarlarının hareket etmesine sebep olur. Uygulanan dış manyetik alan duvarların göç etmesi için gerekli olan kuvveti sağlar. Dış manyetik alanın şiddeti arttırıldığında uygun şekilde yönlendirilmiş olan domenler büyümeye devam ederek büyük bir mıknatıslanmaya sebep olur (Şekil 3.2). Bütün domenlerde uygun bir şekilde yönlendirme görüldüğünde mıknatıslanma doyumuna ulaşır. Böylelikle malzemede büyük miktarda mıknatıslanma elde edilebilir (Erdoğan, 2001).



Şekil 3.2. Ferromanyetik histerisiz döngüsü (Erdoğan, 2001).

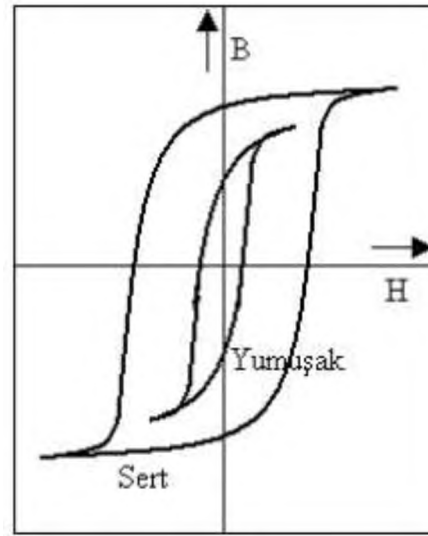
Uygulanan alan sıfırdan arttırıldıkça (M) 2 eğrisi boyunca yükselir ve S noktası, doyma noktasına ulaşır. Uygulanan alan sıfıra düşürüldüğünde ise dönüş eğrisi başlangıçtaki manyetizasyon eğrisini izlemez. Artık mıknatıslanma (remanans) R olarak tanımlanan bir mıknatıs akı yoğunluğu malzeme üzerinde kalır. Malzeme

üzerindeki akı yoğunluğunu sıfıra düşürmek için, H_c miktarında, baskı kuvveti denen ters (eksi) bir alan uygulamak gerekir (C noktası). Uygulanan eksi alan biraz daha artırılacak olursa, sonunda malzeme ters alanda, S' tekrar doyum mıknatıslanmasına ulaşır. Ters alanın kaldırılması durumunda mıknatıs akı yoğunluğu B_r noktasındaki artık mıknatıslanma, akı yoğunluğuna ulaşacak ve artı alanın uygulanması ile M-H eğrisi, B_rH_cS noktalarını takip ederek halkayı kapatacaktır (Smith, 1969).

3.2.1. Yumuşak Manyetik Malzemeler

Ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemeler için histerisiz eğrisinin şekli ve boyutu uygulamalarda büyük öneme sahiptir. Bu eğri içinde kalan alan manyetik ve manyetik olmayan çemberde malzemenin birim hacim başına düşen enerji kaybını gösterir. Bu enerji kaybı, manyetik malzeme içerisinde ısı olarak ortaya çıkar ve malzemenin sıcaklığını artırabilir. Histerisizlerinin özelliklerine göre, ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemeler yumuşak ve sert malzemeler olarak sınıflandırılır. Yumuşak manyetik malzemeler, enerji kayıpları düşük olması istenen ve değişken manyetik alanlara maruz kalan transformatörlerde kullanılır. Bu nedenle histerisiz eğrisi içindeki alanın küçük olması gerekir. Yumuşak manyetik malzemelerin histerisiz eğrisi ince ve dardır (Şekil 3.3). Sonuçta yumuşak manyetik malzeme, yüksek bir başlangıç geçirgenliğe ve düşük koerzivite kuvvete sahip olmalıdır. Bu özellikleri taşıyan bir malzeme, düşük olarak uygulanan bir manyetik alanla doyma manyetikleşme değerine ulaşır ve histerisiz enerji kaybıda düşük olur (Callister, 2013).

Yumuşak manyetik malzemeler, jeneratörlerde, dinomalarda, motorlarda ve anahtar devrelerinde kullanılırlar (Callister, 2013).



Şekil 3.3. Yumuşak ve sert manyetik malzemelerin manyetizasyon eğrisinin şematik gösterimi (Callıster, 2013).

3.2.2. Sert Manyetik Malzemeler

Sert manyetik malzemeler, demanyetizasyona karşı yüksek direnç göstererek kalıcı mıknatıslarda kullanılır. Histerisiz davranışı açısından sert manyetik malzemelerin, histerisiz enerji kayıpları yüksek, başlangıç geçirgenliği düşük, kalıcı mıknatıslanma özelliği, koerzivite ve doyma akı yoğunluğu ise yüksektir. Yumuşak ve sert manyetik malzemelerin karşılaştırılması şekil 3.3'deki histerisiz eğrisinde görülmektedir (Callıster, 2013).

4. FERROMANYETİK ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR (FSMA)

Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımların manyetik alan etkisinin incelendiği ilk çalışma 1996' da Ulakko ve arkadaşları tarafından yapılmış ve ortaya konmuştur. Zorsuz NiMnGa da tek kristal üzerindeki zorlanmanın % 0,2 civarında olduğu deneysel gözlemler yapılarak tespit edilmiştir. Ni₂MnGa kompozisyonunda intermetalik bileşiğin tam katlı olmayan oranları üzerinde yapılan çalışmada geniş alanda oluşan %6' lık zorlanma Murray & arkadaşları (2000) tarafından ve %10 nun üzerindeki zorlanma O'Handley & arkadaşları ve Sozinov & arkadaşları (2003) tarafından bulunmuştur. İkinci alaşım FePb, detaylı olarak, James ve Wutting (1998); Cui ve arkadaşları (2004); Shield (2003); Yamamoto ve arkadaşları (2004) tarafından bulunmuştur. Bunun dışında FePt, FeNiCoTi, NiMnAl gibi alaşımlar Fujita ve arkadaşları (200); Kakeshita ve arkadaşları (2000); Wutting ve arkadaşları (2000, 2001); Sozinov ve arkadaşları (2003) tarafından incelenmiştir. CoNiAl alaşımları, Karaca ve arkadaşları ve Morito ve arkadaşları tarafından incelenmiştir (Oikava ve ark., 2006; Kicfer ve Lagoudas, 2005).

Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlar günümüzde fiziksel özelliklerinin ilginç olmasından ve teknolojik öneminden dolayı dikkat çeker, uzay çalışmalarında ve diğer alanlarda da son zamanlarda çok sık olarak araştırılmıştır (Dhaka ve ark., 2009; Yu ve ark., 2009). Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlarda deformasyon, malzemeye kuvvet uygulayarak değil manyetik alan uygulayarak oluşur ve manyetik alana verilen yanıt oldukça hızlı olabilir (Murakami ve ark., 2002). Alaşımlarda T_c, Curie sıcaklığının altında, ferromanyetik fazdan (P), manyetik olmayan faza dönüş meydana gelir. Manyetik olmayan faz, manyetikliğin kendiliğinden meydana gelmemesidir. Bu olay martensit dönüşümünün oluşmasıyla birleştirilebilir. Bu alaşımların, M_s martensit başlangıç sıcaklığı ve A_f ters dönüşümün bitiş sıcaklığı manyetik alanın uygulanmasıyla hızlı bir şekilde düşer (Umetsu ve ark., 2009). Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlarda deformasyon, malzemeye dokunmadan manyetik alanın etkisiyle olmalıdır ve manyetik alana cevabı yeterince hızlıdır ve bu özellik bilinen şekil hatırlamalı alaşımlardan farklıdır (Heill, 2005). Ferromanyetik alaşımların en popülerleri NiMnGa Heusler alaşımlarıdır. Bunun dışındaki diğer

alaşımlar, Fe-Pt, Fe-Pb, Ni-Mn-(Al, Sn, Sb, In), Ni-Fe-(Al,Ga), Co-Ni-(Al,Ga), Cu-Mn-(Al, Ga) dir (Tanaka ve ark., 2006); Liu ve ark., 2006). Bu alaşımlar içinde en çok Ni-Mn-Ga alaşımları çalışılmıştır. Bu alaşımlar, yüksek ikiz sınır mobilitesi, geniş manyetokristal anizotropi ve ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlarda beklenen ayarlanabilir manyetik ve martensitik geçiş sıcaklığı gibi özellikler gösterirler (Jin ve ark., 2009).

Paramanyetik olan şekil hatırlamalı alaşımların şekil hatırlama etkisi, uygulanan zorla veya sıcaklıkla ya da her ikisi ile değişiklik gösterir. Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlarda aynı etki sıcaklık ve zorla değil uygulanan dış manyetik alanla da değişir. Bu sebepten dolayı bu alaşımlara oldukça büyük talep vardır. FSMA eş zamanlı olarak hem şekil hatırlama etkisi hem de manyetiklik gösteren ilginç malzemelerdir (Xuan ve ark., 2008).

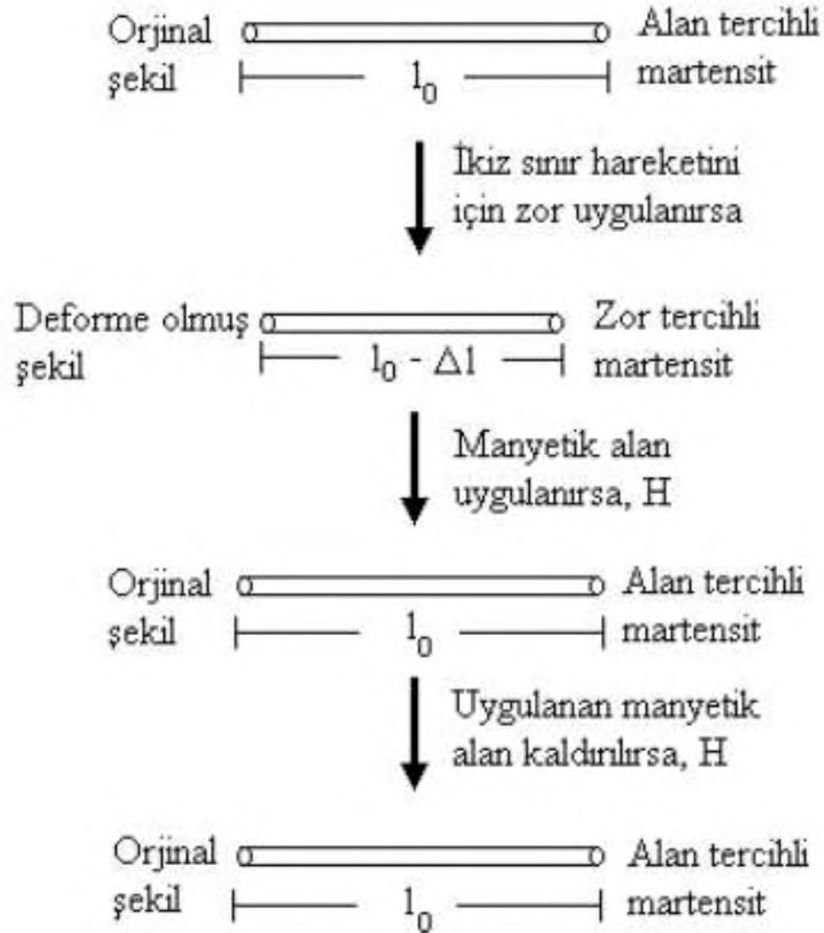
4.1. Ferromanyetik Şekil Hatırlama Etkisi

NiMnGa da görülen tek yönlü manyetik şekil hatırlama etkisi şöyle açıklanabilir. Alan etkili yönelim içindeki FSMA sıfır manyetik alan içinde, 3 MPa dan fazla bir basınç altında yüklendiği zaman ikiz sınır hareketi, aktüatöre neden olan ikizlenmiş martensit meydana gelir. Ni-Mn-Ga alaşımındaki plastik zorlanmanın yaklaşık olarak değeri %6 dır. Bağlantılı zorlanma etkisinin sınırı ile ikizlenme sınırı, örgü distorsiyon parametresi “ $1-c/a$ ” ya bağlıdır. Burdaki c ve a kolay ve zor manyetizasyon yönelimlerini gösteren örgü parametreleridir. İkizlenmiş martensit diziliminin sonucu ise zor etkili yönelim olarak bilinir. Etkiyen zorlanmayı geri getirmek için, sıfır zorda uygulanan dış manyetik alan 2-3 kOe olması gerekir. Bu uygulanan dış manyetik alan martensit ikiz değişimini düzenler ve aktüatörü alan etkili dizilime yani orijinal şekline geri getirir. Bu olay manyetik şekil hatırlama olarak ifade edilir. Tek yönlü olan manyetik şekil hatırlama etkisinin şematik tanımı Şekil 4.1’de gösterilmiştir (Couch, 2006).

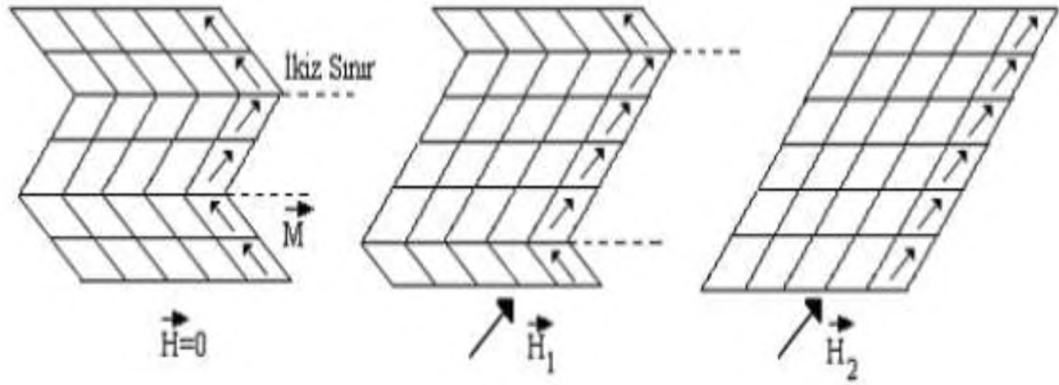
Ferromanyetik şekil hatırlama etkisinin daha detaylı şematik gösterimi ise Şekil 4.2’dedir. İkiz sınırlar arasındaki alan, şekil hatırlamalı alaşımlarda martensitin

değişimini göstermektedir. Küçük oklar bu martensit değişimindeki manyetizasyonun yönünü göstermektedir. Farklı büyüklükte dış manyetik alan uygulanırsa, alaşımdaki toplam zorlanma sonucu olan sıralanmış değişimlerin hacimsel parçalarını artırmak için ikiz sınırlar hareket eder (Heil, 2005).

Bu alaşımlardan bazıları, şekil hatırlama davranışının temeli olan termoelastik martensit dönüşüm gerçekleştirir. Bınlar arasında en dikkat çekici Ni-Mn bazlı alaşımlardır (Moya ve ark., 2006). Bu alaşımları, Heusler tipi FSMA olarak ifade edebiliriz. Bu tip alaşımlarda martensit dönüşüm sıcaklığı ve Curie sıcaklığı elektron konsantrasyonunun artmasıyla artar (Fu ve ark., 2009).



Şekil 4.1. Manyetik şekil hatırlama etkisinin şematik gösterimi (Couch, 2006).



Şekil 4.2. Ferromanyetik şekil hatırlama etkisinin şematik gösterimi (Heil, 2005).

4.2. Ferromanyetik Şekil Hatırlama Etkisi Gösteren Alaşımlar

Tablo 1’de şekil hatırlama etkisi gösteren alaşım tipleri gösterilmektedir.

Tablo 2’de şekil hatırlama etkisi gösteren bazı alaşımların faz dönüşümleri gösterilmektedir.

Alaşım Tipi

1.Ni-Mn-Ga
2. Co-Ni-Al
3.Ni-Mn-Al
4.Co-Ni-Ga
5.Ni-Fe-Ga
6.FePt
7.FePd

Tablo 1. Şekil hatırlama etkisi gösteren alaşım tipleri

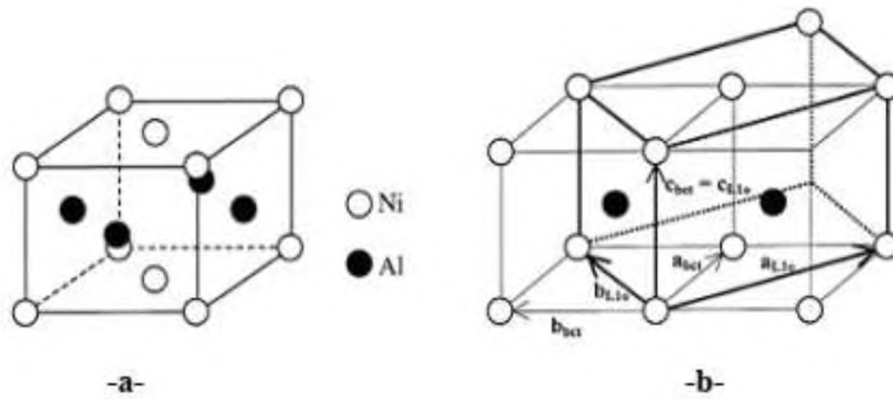
Alaşım tipi	Faz dönüşümü
Ni-Mn-Ga	Yüksek sıcaklıkta bcc L_{21} yapı sergiler ve soğutulduğu zaman martensit dönüşüm karakteri gösterirler (Söderberg ve ark., 2004; Roth ve ark., 2008; Sozinov ve ark., 2002).
Co-Ni-Al	B2 (kübik) yapıdan, L_{10} (tetragonal $c/a=0,816$) yapıya termoelastik martensit geçiş göstermektedir (Moya ve ark., 2006).
Ni-Mn-Al	B2 yapıdan 14M, 10M ve L_{10} yapıya geçiş göstermektedir (Liu ve ark., 2007).

Tablo 2. Şekil hatırlama etkisi gösteren alaşımların faz dönüşümleri

4.3. Ferromanyetik Şekil Hatırlamalı Alaşımların Kristal Yapısı

Co-Ni-Mn alaşım sistemi, β faz (B2 cisim merkezli kübik) stenit yapıdan, kompozisyona bağlı olarak, L_{10} (tetragonal) martensit yapıya 93 ile 393 K aralığında dönüşmektedir (Bartova ve ark., 2008). L_{10} yapı 2M yapı olarak da adlandırılabilir (Sutou ve ark., 1998).

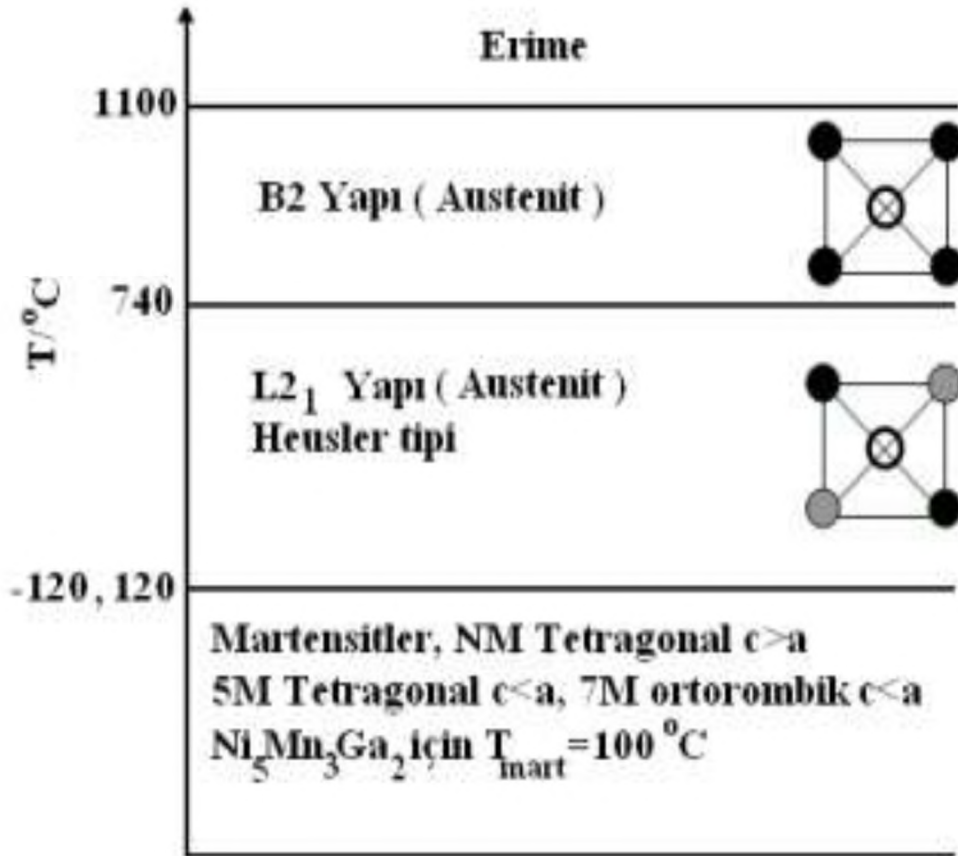
B2 stenit yapının, martensit L_{10} yapısı Şekil 4.3 de gösterilmiştir.



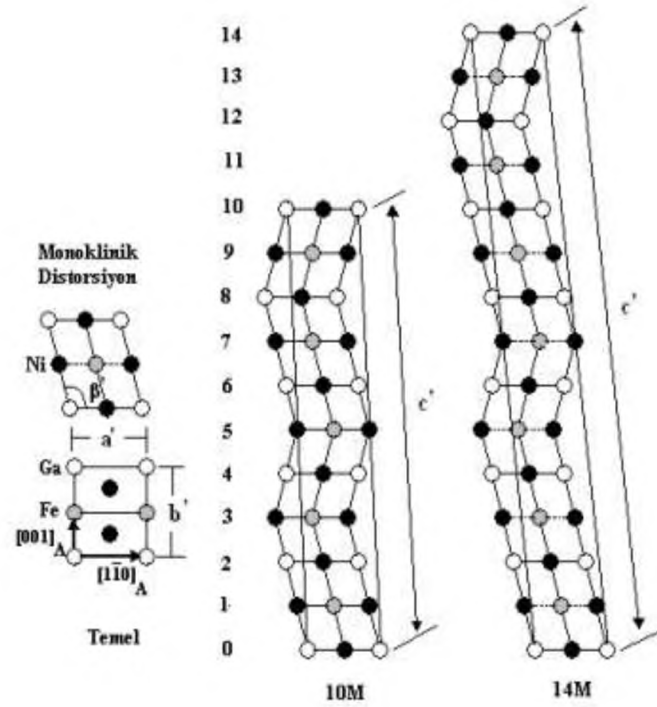
Şekil 4.3. a) B2 stenit yapının martensit L_{10} yapısı b) Kübik eksenle L_{10} hücre arasında örgü uygunluğu (Pons ve ark., 2000; Bartova ve ark., 2008).

Ni₂MnGa heuslar alaşımı, yüksek sıcaklıkta bcc L2₁ yapı sergiler ve soğutulduğu zaman martensit dđnüşüm karakteri gösterirler (Söderberg ve ark., 2004; Roth ve ark.,2008; Sozinov ve ark., 2002).

NiMnGa alaşımlarının dđnüşüm eğrisine göre soğutma sırasında; (Şekil 4.4) B2 yapı bölgesinde Ni atomları küpün merkezine, Mn ve Ga atomları ise küpün köşelerine rastgele dağılmışlardır. 740 °C civarı B2 yapı L2₁ (Heusler tipi) yapıya dđnüşmüştür ve burada Mn ve Ga atomları rastgele dağılmamıştır. Her atom türü diğer atom türü ile komşuluk kurma eğilimindedir (Roth ve ark., 2008).



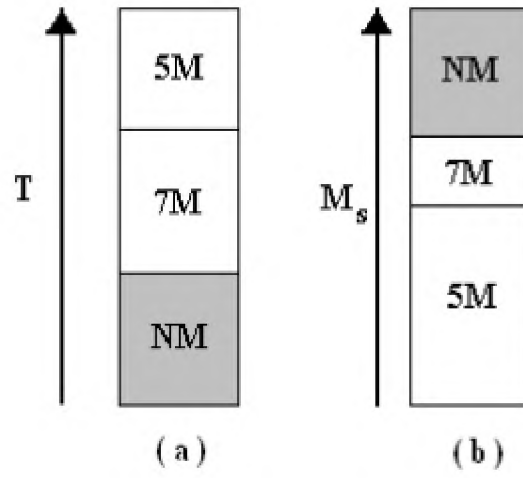
Şekil 4.4. NiMnGa alaşımlarının soğutma sırasında dđnüşümleri (Roth ve ark., 2008).



Şekil 4.5. Bazı modulated martensit fazların şematik gösterimi (Hamilton ve ark., (2007).

Şekil 4.5 birim hücresi monoklinik kristal yapılardan oluşmuş modulated martensit fazları göstermektedir. Bu şekilde gösterilen modulated martensit fazlar, 10M ve 14M fazlarıdır. Birim hücre monoklinik distorsiyon göstermektedir. (açı β , a^1 , b^1 , c^1 örgü parametrelerini göstermektedir) modulated faz da temel (bazal) düzlem $[110]_A$ ve $[001]_A$ ile yayılmaktadır ve $[110]_A$ doğrultusu boyunca yığılmaktadır. Modulated fazlarda, temel düzlem $[110]_A$ doğrultusu boyunca değişmektedir. Bu değişim 10M faz üretmek için 5 düzlemde bir, 14M faz üretmek için 7 düzlemde bir tekrarlamaktadır (Hamilton ve ark., 2007).

Soğutma sırasında görülen ilk martensit kompozisyona bağlıdır. Soğutma sırasında görülen kristal yapı düzeni ise her zaman aynıdır. Bu durum Şekil. 4.5 de gösterilmiştir. Burda görülen NM yapı, 7M yapı öncesindeki en kararlı yapıdır. Eğer 5M yapı gözlenirse, östenit yapıdan direk dönüşüm var demektir. Bununla birlikte, östenit-martensit dönüşüm sıcaklığı ile ilk martensit yapı arasındaki deneysel korelasyon Şekil 4.6.b'de gösterilmiştir. Dönüşüm sıcaklığı, Curie sıcaklığından yüksek olan tipik alaşım dönüşümlerinde NM yapı gözlenir ve 7M yapı sadece dar bir sıcaklık aralığında meydana gelir (Enkovaara ve ark., 2004).



Şekil 4.6. (a) Martensit fazların kararlılığı (b) Dönüşüm sıcaklığı M_s ile ilk martensit yapı arasındaki ilişki (Enkovaara ve ark., 2004).

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1.1. Alaşımların Hazırlanması

Bu tez çalışmasında kullanılacak olan Ni-32.8Mn-4.6In-7.6Fe, Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe, Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımlarını üretmek için elementler % 99.5 ve üzeri saflıktaki metal tozları ağırlıkça uygun oranlarda karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan tozlar 1 cm çapındaki paslanmaz çelikten yapılmış silindir yuvalara doldurularak pres'te 4 ton basınç altında tablet haline getirilmiştir. Daha sonra Fizik bölümü malzeme araştırma laboratuvarında bulunan ark fırınının içerisine yerleştirilen tabletler argon gazı atmosferinde yüksek akımda ergitilerek alaşım haline getirilmiştir. Alaşımların homojenliğinin sağlanması için ark fırınında 3 kere tekrar ergitilerek soğutulmuştur. Elde edilen alaşımların kompozisyonu HÜBTÜAM merkez laboratuvarında FEI / Quanta 450 FEG Elektron Mikroskop' unda kullanılan EDS (Electron Dispersion Spectroscopy) yöntemi ile yüzey üzerinde 10 farklı noktada alınan ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Daha sonra alaşımların ısıtma işlemi esnasında oksitlenmesini engellemek amacıyla yüksek sıcaklıklara dayanıklı silica cam tüplerin içerisine alınmıştır. Daha sonra alaşımlar ısıtma işlemi için 900 C° de 22 saat homojenize edilmiş ve direkt buzlu su içerisinde soğutulmuştur.

5.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri İçin Alaşımların Hazırlanması

Isıtma işlemi tamamlanan alaşımlar daha sonra hassas kesme cihazında elmas kesiciler kullanılarak 1 cm kalınlığında kesilmiştir. Kesilen örnekler önce 800, 1000, 1200, 2500 ve 4000 mikronluk zımparalardan geçirilmiş daha sonra 3 ve 1 mikronluk elmas pastalar kullanılarak keçelerde yüzeyi parlatılmıştır. Parlatılan örnekler 99 ml metanol + 2ml nitrik asit + 5g demir klorür içeren kimyasal solüsyonlar ile yüzeyleri SEM gözlemlenmesi için dağlanmıştır. Yüzeyleri dağlanarak hazırlanan alaşımların yüzey karakterizasyonu Hitit Üniversitesi HÜBTÜAM merkez laboratuvarında FEI / Quanta 450 FEG Elektron Mikroskop kullanılarak yapılmıştır.

5.1.3. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçümleri İçin Alaşımların Hazırlanması

Alaşımların faz dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek amacı ile ısı işlemini tamamlamış alaşımlar yaklaşık 20 mg'lık parçalar halinde 60-80 µm kalınlığına kadar inceltiştir. Hazırlanan alaşımların DSC ölçümleri için yapılmıştır. Bu ölçümlerde ısıtma ve soğutma hızı 10 °C/ dakika olarak alınmıştır. DSC ölçümleri ile ısı akışı (heat flow) – sıcaklık eğrileri çizilmiştir.

5.1.4. Mössbauer Spektrometresi Ölçümleri İçin Alaşımların Hazırlanması

Mössbauer Spektrometresi deneyleri için ısı işlemleri tamamlanmış oda sıcaklığındaki ve sıvı azot içerisine atılan alaşımlar ince ağızlı bir eye ile toz haline getirilmiştir. Mössbauer spektrumları Wissel marka Mössbauer spektrometresi ile Rh içine difuze edilmiş 50 mCi' lik ⁵⁷Co kaynağı kullanılarak oda sıcaklığında elde edilmiştir. Kaynağın hızı α- Fe kullanılarak laser interferometre kullanılarak kalibre edilmiş ve elde edilen spektrumlar Win Normos en küçük kareleri fit etme programı ile analiz edilmiştir.

5.1.5. Mikro Sertlik Ölçümleri İçin Alaşımların Hazırlanması

Bu çalışmada alaşımların yüzeyi önce sırası ile 800, 1000, 1200, 2500 ve 4000 lük zımparalarla daha sonra keçelerde 3 ve 1 mikronluk elmas pastalarla parlatılmıştır. Alaşımların sertlik değeri HÜBTÜAM merkez laboratuvarında Qness / Q250 MS marka Universal sertlik cihazında 20N' luk kuvvet uygulanarak yüzeyden 8 farklı noktadan sertlik ölçümü alınmış ve ortalamaları alınarak sertlik değerleri belirlenmiştir.

5.1.6. Basma Testi Ölçümleri İçin Alaşımların Hazırlanması

Sıkıştırma testleri için alaşımlar 5 mm çapında ve 30 mm yüksekliğinde silindir şeklinde hazırlanmıştır. Hazırlanan alaşımların sıkıştırma testleri oda sıcaklığında

Shimadzu EHF-EV101K1-040-0A yorulma test cihazı ile sıkıştırma hızı 5mm/dakika olacak şekilde yapılmıştır.

5.2. Yöntem

5.2.1. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Sistemi)

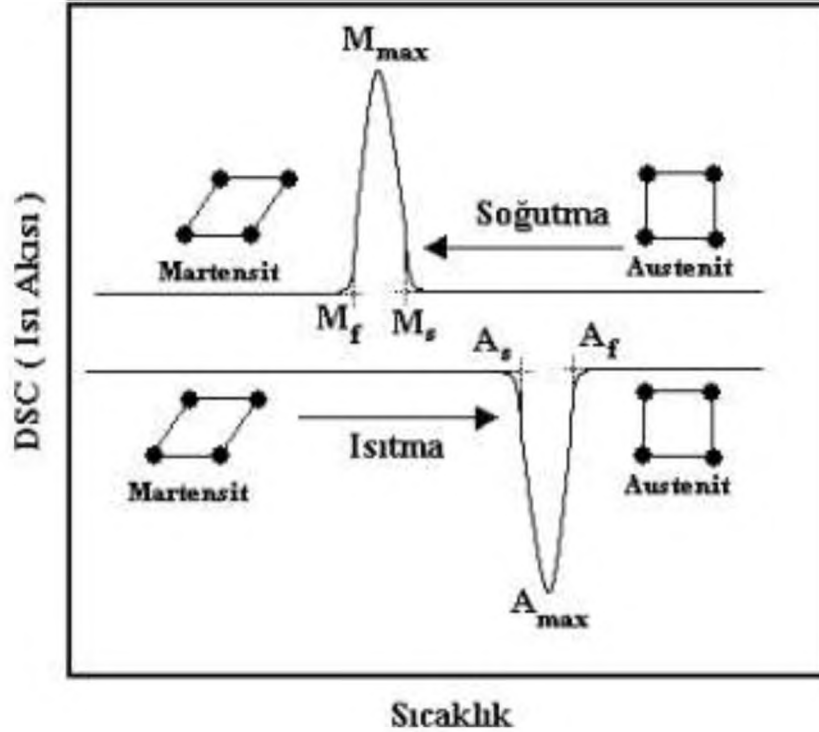
Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) E.S Watsson ve M.J.O'Neil tarafından 1960 yılında geliştirilmiştir. DSC sisteminde malzeme ısıtılırken, soğutulurken ya da sabit sıcaklıkta tutulurken soğurulan ya da salıverilen enerji miktarı ölçülmektedir. DSC sisteminde referans ile örnekten gelen ya da uzaklaşan ısı farkı, sıcaklığa veya zamana bağlı olarak gösterilir. Eğer örnek ile referans arasında sıcaklık farkı olursa, sıcaklığı aynı tutmak için örneğe verilen enerji miktarı değiştirilir. Bu yöntemle örnekteki faz değişimi sırasındaki ısı transferi miktarı saptanabilir (Uslu, 2016). Laboratuvarlarda kullanılan örnek bir diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı Resim 5.1'de gösterilmiştir.



Resim 5.1. DSC cihazı

DSC, şekil hatırlamalı alaşımların faz dönüşüm sıcaklığını belirlemede, sıklıkla kullanılan bir cihazdır (Choon ve ark., 2007).

En önemli ve en çok kullanılan şekil hatırlamalı alaşım karakterizasyon yöntemi diferansiyel taramalı kalorimetre ile malzemelerden alınan çok küçük numunelerin ısıtılması ve soğutulması yolu ile absorbe ettiği veya verdiği ısının ölçülmesi ile dönüşüm sıcaklık alanları bulunmasıdır. Kullanılan malzemeler miligram bazında (çok küçük miktarda) kullanılır ve numuneler herhangi bir gerilme altında olmadığından, yapılan ölçüm sonuçları malzemenin gerilmesiz durumdaki dönüşüm sıcaklıklarını verir. Hem soğutma hem de ısıtma sırasında, dönüşüm sebebiyle numunenin absorbe ettiği veya verdiği enerji, endotermik ve ekzotermik pikler olarak ölçülebilir. Burdaki piklerin başlangıç ve bitiş noktaları, malzemenin faz dönüşüm sıcaklıklarını verir: Şekil 5.1. de malzemelerin östenit ve martensit dönüşümünün DSC eğrileri gösterilmiştir (Aygahoğlu ve ark., 2009).



Şekil 5.1. Şekil hatırlamalı alaşımlarda tipik bir DSC eğrisi

Diferansiyel taramalı kalorimetre ile malzemenin erime ve kaynama noktası, kristalleşme sıcaklığı ve zamanı, reaksiyonların ve füzyonun ısısı, özgül ısı ve özgül kapasitesi, kürleşme derecesi ve oranı, reaksiyon kinetiği ve malzemenin saflığı ölçülmektedir.

5.2.2. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM); malzemelerin şekil, boyut, ve parçacıklarının dizilimini (Morfoloji), malzemelerin yüzey yapısını ve özelliğini tesbit etmede (Topoloji), kompozisyondaki farklılık, kristal yönelim ve kusurların görüntüsünü belirlemede bilgi sağlamamızı kolaylaştıran, çok yönlü bir cihazdır (Ghimbeu, 2007).

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) nun çalışması, yüksek voltaj altında hızlandırılmış elektronların malzeme yüzeyine çarptırılıp yansıması ilkesine dayanır. Bu yansıyan elektronlar kullanılarak kullanılan malzemenin yüzey topografisi elde edilir. İncelenecek malzemenin iletken ya da yalıtkan olmasına göre yüzey Au-Pb ya da karbon kaplamaları yapılarak, örnek ile elektron demeti arasında iletim sağlanarak görüntü elde edilebilir (Altın, 2009).



Resim 5.2. Hitit Üniversitesi Bilim ve Araştırma Merkezindeki FEI/Quanta 450 FEG marka modeline sahip SEM cihazı

5.2.3. Mössbauer Spektrometresi Sistemi

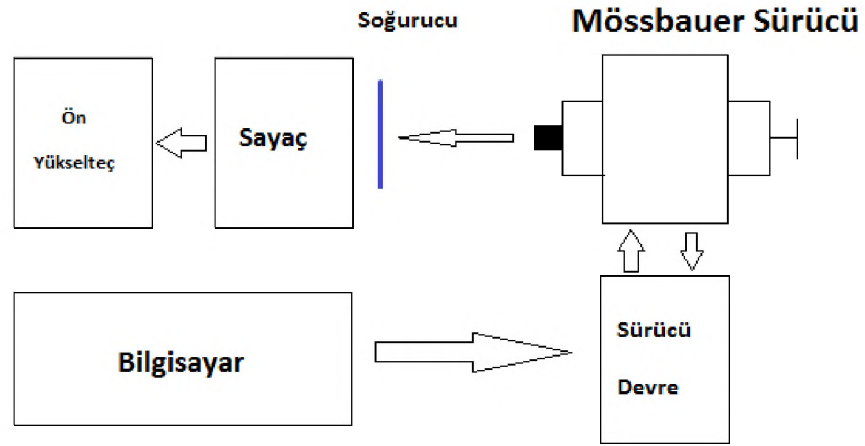
Rudolf Ludwig Mössbauer tarafından 1957 yılında keşfedilen “Mössbauer Olayı” daha sonra 1961 yılında Robert Hofstadter ile birlikte yaptıkları çalışmalarla Nobel Fizik ödülüne layık görülmüştür (Önal, 2018). Kısaca Mössbauer olayı kristal örgü içerisinde bulunan uyarılmış atom çekirdeğinden enerji kaybı olmadan γ fotonu salınması olarak ifade edilir (Hull, 1965). Mössbauer Spektrometresi Sistemi ile kristal içerisindeki östenit-martensit faz dönüşümleri açıklanır. Ayrıca katıhal fiziği, kimya, biyoloji ve metalurji gibi bir çok alanda geniş uygulama alanına sahiptir. Mössbauer olayı ile atomların parçalanma şemalarının incelenmesi, enerji seviyeleri arası geçişler, enerji seviyelerinin genişlikleri, çekirdek quadrupol momentleri ve çekirdekteki manyetik dipol momentlerinin ölçülmesi mümkündür (Yaşar, 2005).



Resim 5.3. Hitit Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Mössbauer Spektrometresi cihazı

Mössbauer olayı ile deney yapmak için; bir soğurucu numune, bir γ sayıcısı, bir tek kanal diskriminatörü ve birçok kanal analizatörü gereklidir. Kaynak ile soğurucu arasındaki bağıl hızı ayarlamak için bir düzenek kurulmalıdır. Bu yolla hazırlanan mössbauer düzeneğinin şematik düzeneği Resim 5.3’de gösterilmiştir. Mössbauer çalışmalarının bir çoğunda net görünen ^{57}Fe ve ^{119}Sn izotopları kullanılmaktadır.

Mössbauer olayı 50' den fazla izotoplarda gözlenmekle beraber, deneylerde yaşanan zorluklar nedeni ile yaklaşık 20 tanesi kullanılmaktadır. Kaynak seçimi yapılan deneye etki eden önemli bir faktördür. Geçiş enerjisi (10-150 eV) atomun kafes titreşiminden fazla olmalıdır. Şekil 5.2'deki gibi hazırlanan Mössbauer düzeneğinin çalışma şekli şöyle açıklanabilir.



Şekil 5.2. Mössbauer spektrometresinin şematik gösterimi

Radyoaktif kaynaktan yayınlanan γ ışınının önüne soğurucu konulur. Soğurucudan geçen bu γ ışınları sayaca gelir. Sayaca gelen atmlar çizgisel şekillendiriciden geçerek çift kutuplu hale gelir ve buradan çoklu kanal analizatörüne gider. Burdaki en fazla kanal sayısı 512 dir ve çift kutuplu atmlar, 1-256 ile 256-512 kanalları arasında simetrik spektrumlar olarak izlenir.

Mössbauer Spektroskopisinde, radyoaktif kaynaktan gelen γ ışınının enerjisi, kaynağa Doppler hızı verilerek değiştirilmesi sağlanır ve γ ışınları ise soğurucu tarafından rezonans durumunda soğurulur (Önal, 2018).

Mössbauer spektroskopisi oksidasyon ve spin hallerinin gözlenmesinde, moleküler simetri ve numunenin manyetik özelliklerinin incelenmesinde kullanılmaktadır (Varol, 2014).

Mössbauer etkisinin çok yüksek enerji çözünürlüğü sağlaması, çok ince yapı etkileşimlerini görmemizi sağlar. Bu etkileşimler çekirdek ve çevresi arasındaki etkileşimlerdir (Varol, 2004). Burada gözlenen etkileşimler çekirdeğin kendi enerji seviyeleri ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğundan diğer spektroskopik yöntemlerle görülmesi zordur. Aşırı ince yapı etkileşimleri olarak isimlendirilen bu etkileşimler; izomer kayma, elektrik quadrupol etkileşim ve manyetik ince yapı olarak gruplandırılabilir (Özaydın, 2008).

Mössbauer spektrometresi ile metal ve metal alaşımlarının faz dönüşümlerinin incelenmesi sıkça kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntemle östenit ve martensit yapıların manyetik yönelimleri, soğutma sonucu oluşan martensitlerin hacim oranlarını oluşturan martensit fazın iç manyetik alanını ve martensit fazların izomer kayma değerlerini tespit etmek mümkün olmuştur (Güngüneş, 2005).

5.3. Mekanik Karakterizasyon

5.3.1. Sertlik Yöntemi

Sertlik, malzemenin batma ve çizilmeye karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Küçük bir ucun kontrollü bir şekilde, malzeme yüzeyine belirli bir yük ve hız ile batırılması ile sertlik ölçme yöntemleri geliştirilmiştir. Ucu batırılması ile oluşan izin derinliği ya da genişliği ölçülmek suretiyle sertlik değerleri bulunur. Malzemede oluşan izin derinliği ya da genişliği ne kadar büyükse malzeme o kadar yumuşak ve sertlik değeride o kadar düşük olur. Ölçülen sertlikler, yapılan ölçümlere göre değişir ve farklı teknikler kullanılarak yapılan ölçümlerdeki değerler birbiri ile karşılaştırılır. Sertlik deneyleri; basit ve düşük maliyetli olmaları (özel bir numune hazırlanmasına gerek duyulmaz ve sertlik ölçme cihazı ucuzdur), malzemede hasar ya da aşırı deformasyonun meydana gelmemesi (tek deformasyon küçük bir izdir), çoğu zaman mekanik özelliklerden çekme dayanımının sertlik verileri kullanılarak açıklanması gibi nedenlerden dolayı diğer mekanik deneylere göre çok daha yaygın şekilde kullanılır (Callister, 2013).

Sertlik ölçme deneyleri 4 grupta incelenebilir;

1. Malzemeye kuvvet altındaki sert bir cismi batırmak suretiyle yapılan sertlik deneyleri,
2. Malzemenin yüzeyini sert bir cisimle çizerek yapılan sertlik deneyleri,
3. Malzeme üzerine sert bir bilyeyi düşürmek ve sıçratmak suretiyle yapılan sertlik deneyleri,
4. Malzemeye bir cismin darbeli bir yük ile batırılması sonucu yapılan sertlik deneyleri.

5.3.1.1. Rockwell Sertlik Ölçme Deneyi

Rockwell deneyleri çok basit bir şekilde uygulanabilir olduğu için, en çok kullanılan sertlik ölçme yöntemidir. Bu yöntemde, çeşitli uç ve yük miktarları ile oluşturulan bir çok skala kullanılarak bütün metal alaşımların sertlik ölçümleri yapılabilir. Batırılan uçlar, sertleştirilmiş çelik bilyalar ve sertliği fazla olan malzemelerde kullanılan konik elmas uçtan oluşur.

Rockwell sertlik deneylerinde kullanılan ucun battığı derinlik miktarına göre malzemenin sertlik değeri belirlenir. Bu deneylerde önce küçük bir ön yük sonrada ana yük uygulanır. Ön yük 10 kg ana yük ise 60, 100 ya da 150 kg'dır. Rockwell sertlik değeri belirtilirken, kullanılan skalanın sembolü ile yazılmalıdır. Ölçümün doğruluğu, sertliği ölçülecek yüzeyin düz ve düzgün olmasına, numunenin çok ince olmamasına, ölçümün numunenin kenarına ya da başka bir sertlik ölçümü yapılan noktaya çok yakın olmaması gerekir.

Rockwell sertliği ön ve ana yükleme arasında oluşan batma derinliği farkına göre belirlenir (Callister, 2013).

5.3.1.2. Brinell Sertlik Ölçme Deneyi

Rockwell ölçümlerinde olduğu gibi, Brinell ölçme deneylerinde de sert bir küresel uç, malzemenin yüzeyine batması için zorlanır. Burada kullanılan sertleştirilmiş çelik batıcı ucun çapı 10 mm'dir. İz çapının doğru ölçülebilmesi için izin yeteri kadar belirgin olması, ölçüm yapılacak yüzeyin düz ve düzgün olması gerekir. Standart yük aralığı 500 ile 3000 kg arasındadır. Brinell sertlik ölçme yönteminde skala tektir. Brinell sertliği izin büyüklüğüne göre belirlenir (Callister, 2013).

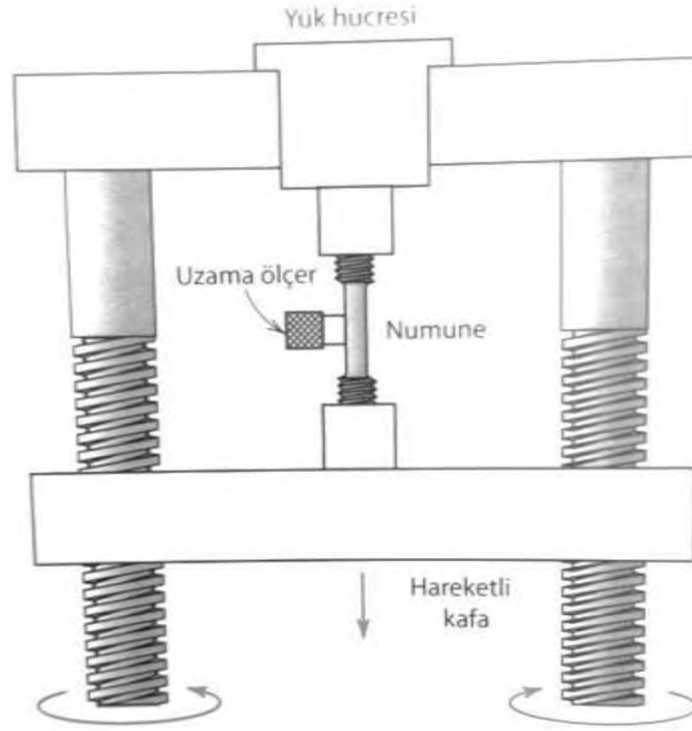
5.3.1.3. Knoop ve Vickers Sertlik Ölçme Deneyleri

Bu yöntemlerin her ikisinde de piramit şeklinde çok küçük bir elmas uç, sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyine batırılmaya zorlanır. Uygulanan yükler, Rockwell ve Brinell ölçme yöntemlerindeki gibi göre çok küçük olup 1 ile 1000 g arasında değişir. Ölçüm sonucunda yüzeyde oluşan izin boyutu mikroskop ile ölçülerek sertlik değerine çevrilir. Malzeme yüzeyinde belirgin bir iz oluşturulması ve bu oluşan izin doğru bir şekilde ölçülebilmesi için, malzeme yüzeyinin zımparalanması ve parlatılması gerekir. Knoop ve Vickers yöntemlerinin sertlik değerleri yaklaşık olarak birbirin aynısıdır. Malzemedeki iz büyüklüğünden dolayı Knoop ve Vickers mikro sertlik deney yöntemleri diye bilinir. Bu iki yöntemde de küçük batıcı uç ve hafif yükler kullanılır. Knoop ölçme yöntemi seramik gibi gevrek malzemelerin sertlik ölçümlerinde tercih edilir (Callister, 2013).

5.3.2. Çekme Yöntemi

Çekme deneyi ile bir çok mekanik özelliğin belirlenmesi mümkündür. Gerilme-birim şekil değişimi verilerinin elde edilmesi için uygulanan yöntemlerden biridir. Çekme deneyinde malzeme, eksenine doğrultusunda giderek artırılan şekilde uygulanan yükün etkisi altında kırılana kadar şekil değiştirir. Çekme deneyi, gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin elde edileceği bir deney olup genelde birkaç dakika sürer ve deney sonucunda çoğu zaman kırılan malzeme, kalıcı deformasyona uğrar (Callister, 2013).

Resim 5.4’de çekme deneyinin yapıldığı cihazın şematik gösterimi verilmiştir.



Resim 5.4. Çekme deneyi cihazının şematik gösterimi (Callister, 2013).

5.3.3. Katıların Esneklik Özellikleri

Katı maddeler üzerine dış kuvvet uygulandığında katının şeklinin ve büyüklüğünün değişmesi mümkündür. Katıdaki bu değişimler esnasında katının içindeki iç kuvvetler, katıda oluşan deformasyona karşı direnç gösterir.

Katıların dış kuvvet altında bozulmasını zor ve zorlanma kavramlarını kullanarak açıklamak gerekir. Zor; katının bozulmasına neden olan dış kuvvetle orantılı bir niceliktir. Cisim üzerine, birim kesit başına etki eden dış kuvvet olarak tanımlanır. Zorlanma ise katıdaki bozulmanın derecesinin bir ölçüsüdür. Yeteri kadar küçük zorlarda görülen zorlanma; zor ile doğru orantılıdır. Orantı sabitinin ise bozulan maddenin cinsine ve bozulmanın yapısına bağlı olduğu görülür. Bu orantı sabiti

esneklik sabiti (esneklik modülü) olarak isimlendirilir. Esneklik sabiti, zorun zorlanmaya oranı olarak;

Esneklik Modülü= $Zor/Zorlanma$ bağıntısı ile verilebilir. Katıların esneklik özellikleri için bozulmanın üç değişik şekli ele alınır ve bunların her biri içinde bir esneklik modülü tanımlanır:

Young Modülü: Katının uzunluğundaki değişime karşı gösterdiği dirençtir.

Makaslama Modülü: Katının atomik düzlemlerinin birbiri üzerinden kayması sonucu oluşan harekete karşı gösterdiği direncin ölçüsü olan kesme sabitidir.

Hacim (Bulk Modülü): Katıların ve sıvıların hacimlerinde oluşan değişimlere karşı gösterdikleri dirençtir (Kutlu, 2015).

5.3.4. Plastik Deformasyon

Birçok metal malzemede oluşan elastik davranış yaklaşık olarak 0,005 birim şekil değişimi miktarına kadar gerçekleşir. Malzeme bu durumdan daha fazla deforme edildiğinde gerilme ile birim şekil değişimi arasındaki orantılı değişim ortadan kaybolur. (Hooke Kanunundaki denklemin geçerliliği ortadan kalkar) ve geri dönmeyen kalıcı plastik deformasyon oluşur. Resim 5.5 a metalik malzemedeki plastik deformasyon bölgesindeki çekme gerilmesi birim şekil değişiminin nasıl oluştuğunu göstermektedir. Bir çok metalde elastikten-plastik deformasyona geçiş aşamalı olarak meydana gelir ve plastik deformasyonun başlaması ile doğrusallık bozulur. Malzemeye uygulanan artan gerilme miktarı ile beraber malzemedeki plastik davranış giderek belirginleşir.

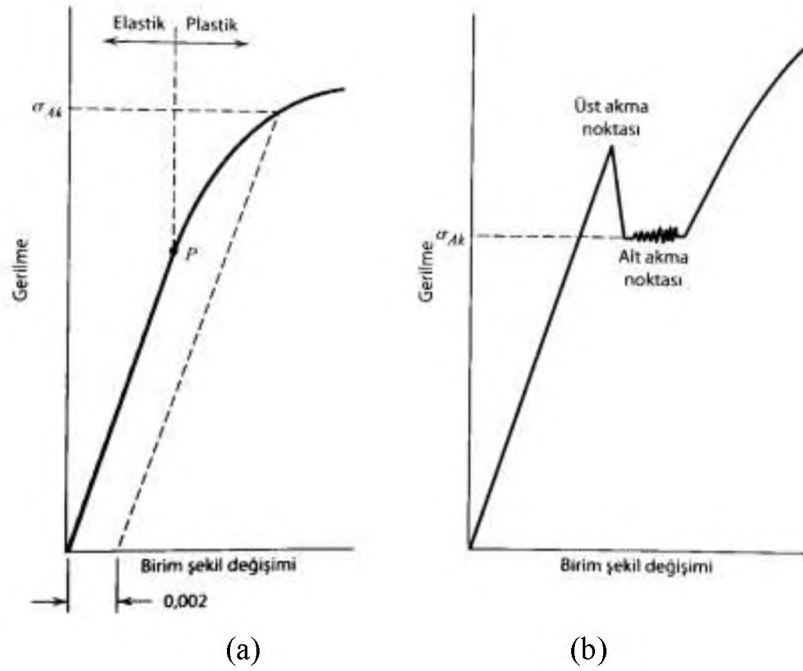
Atomik açıdan bakıldığında plastik deformasyon, birçok atomun veya molekülün, birbirine göre hareketleri esnasında, komşuları ile arasında oluşan bağları koparmaları ve yeni komşuları ile yeni bağlar kurmasından ibarettir. Burada en önemli olay, malzeme üzerindeki gerilme ortadan kaldırıldığında atomlar,

başlangıçta sahip oldukları konumlarına geri dönemezler. Plastik deformasyon, kristal ve amorf yapılar için farklıdır. Kristal yapıdaki katılarda plastik deformasyon, dislokasyon hareketleri sonucu oluşan kayma olayı ile meydana gelir. Kristal olmayan katılarda ise viskoz akış mekanizması ile oluşur (Callister, 2013).

5.3.5. Çekme Özellikleri

5.3.5.1. Akma ve Akma Dayanımı

Birçok yapı gerilme altında elastik şekil değiştirecek şekilde tasarlanır. Plastik deformasyona (kalıcı olarak şekil değiştiren) uğrayan bir yapı ise kendinden beklenen işlevi yerine getiremez.



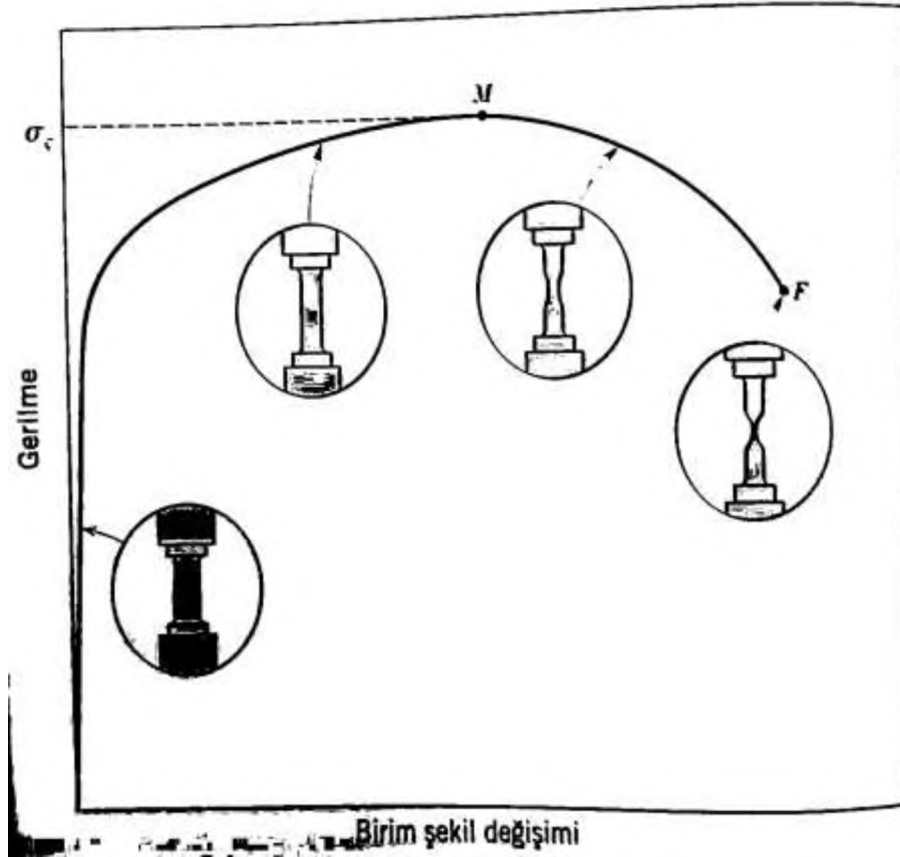
Resim 5.5. (a) Bir metal için elastik ve plastik defoemasyonu gösteren gerilme-birim şekil değişimi eğrisi, orantı sınırı P ve 0,002 birim şekil değişimi yöntemi kullanılarak belirlenen σ_{Ak} akma dayanımı. (b) Belirgin akma davranışı sergileyen bazı çeliklerdeki gerilme-birim şekil değişimi eğrisi (Callister, 2013).

Bu sebeple, plastik deformasyonun başladığı gerilmenin (akmanın) nerede gerçekleştiğinin bilinmesi önemlidir. Elastik ve plastik geçişin belirgin olmadığı, geçişin aşamalı gerçekleştiği metallerde, gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin doğrusallıktan ilk ayrıldığı yer akma noktası olarak alınabilir. Resim 5.5a'daki P noktası (orantı sınırı olarak adlandırılan bu gerilme değeri) plastik deformasyonun başladığı noktayı gösterir. Akma olayı plastik ve kalıcı deformasyonun başlaması ile oluşur. P noktasının yerinin kesin olarak belirlenmesi zor olduğundan, genelde 0,002 olarak alınan bilinen bir birim şekil değişimi değerinde, gerilme-birim şekil değişimi eğrisindeki elastik kısma paralel olarak çizilen bir doğrunun kullanıldığı yöntem dikkate alınmıştır. Çizilen bu doğrunun bu eğriyi kestiği noktaya karşılık gelen gerilme, σ_{AK} akma dayanımı olarak ifade edilir. Akma dayanımı MPa cinsinden alınır.

Bir metalin akma dayanımı, metalin plastik deformasyona karşı olan direncinin bir göstergesidir. Metallerde akma dayanımı değeri 35 MPa ile 1400 MPa aralığındadır (Callister, 2013).

5.3.5.2. Çekme Dayanımı

Akma olayından sonra, plastik deformasyonun devam edebilmesi için gereken gerilme miktarı Resim 5.6'da ki maksimum M noktasına kadar artar ve sonrada ani kopmanın meydana geldiği F noktası kadar azalır. Burdaki çekme dayanımı σ_c (MPa), mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi eğrisinde oluşan maksimum gerilmedir. Bu gerilme, çekme zorlanmasına maruz kalmış bir malzemenin taşıyabileceği maksimum gerilmeye karşılık gelir. Bu büyüklüğe sahip bir gerilmenin malzemeye bir süre daha etkimesi sonucunda malzemede kopma oluşacaktır. M noktasına kadar çekme numunesinin ince kısmı boyunca meydana gelen deformasyon düzgündür. Gerilme kuvveti bu maksimum değere ulaştığında, Resim 5.6'da gösterilen grafiğin içindeki malzemede görüldüğü gibi, malzemenin herhangi bir noktasında boyun verme olarak ifade edilen kesit daralması oluşur. Bu noktadan sonra deformasyon sadece bu bölgede yoğunlaşır ve sonunda kırılma yine bu bölgede oluşur.



Resim 5.6. Kopma noktası F 'e kadar, tipik bir mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi eğrisi. Çekme dayanımı M noktasında gösterilmiştir. Şekil içi dairesel gösterimlerde malzemenin şekil değiştirmesi sırasında eğri boyunca farklı noktalarda alacağı görünüm gösterilmiştir (Callister, 2013).

5.3.5.3. Süneklik

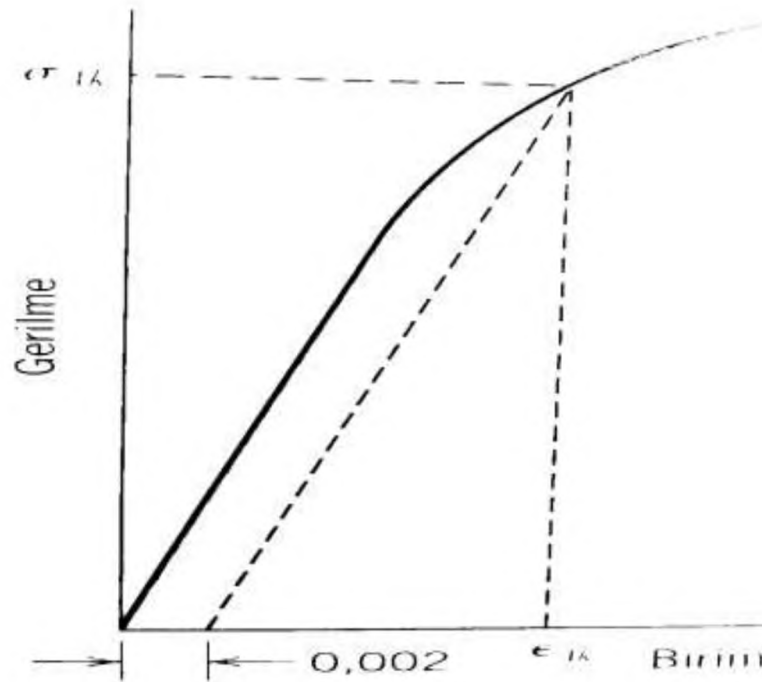
Süneklik, kırılmaya kadar malzemede oluşabilecek plastik deformasyonun miktarının bir ölçüsüdür. Kırılmaya kadar hiç plastik deformasyon göstermeyen malzemeler gevrek olarak isimlendirilir. Malzemenin sünekliğinin bilinmesi; tasarımcıya yapının hasara uğramadan önce ne miktarda deformasyona uğracağı hakkında bilgi verir ve metale verilebilecek deformasyon miktarını belirler.

Metallere ait bazı önemli mekanik özellikler çekme deneyleri ile belirlenebilir. Akma ve çekme dayanımının büyüklüğü artan sıcaklıkla azalırken, süneklik artan sıcaklıkla genelde artar.

5.3.5.4. Rezilyans

Bir malzemenin elastik şekil değiştirme esnasında enerji absorbe etme ve sonra da yük boşaltıldığında bu enerjiyi geri verebilme yeteneğidir. İlgili malzeme özelliği rezilyans modülü U_r olup yüklemeye öncesinden akma noktasına kadar birim hacim başına düşen birim şekil değiştirme enerjisini belirtir. Rezilyans modülü, şekil 5.7 de görüldüğü üzere mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiğinde elastik bölgedeki eğrinin altında kalan alana eşittir. Doğrusal elastik davranış gösteren malzemeler için rezilyans değeri aşağıdaki denklemlerle hesaplanır.

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_{AK} \epsilon_{AK} = \frac{1}{2} \epsilon_{AK} \left(\frac{\sigma_{AK}}{E} \right) = \frac{\sigma_{AK}^2}{2E}$$



Resim 5.7. Malzemenin mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi eğrisinden rezilyans modülünün nasıl belirlendiğini gösteren grafik şeması (Callister, 2013).

Sonuçta akma dayanımı yüksek, elastik modülü düşük olan malzemelerin rezilyansları yüksek olup bu tür alaşımlar yay üretiminde kullanılır.

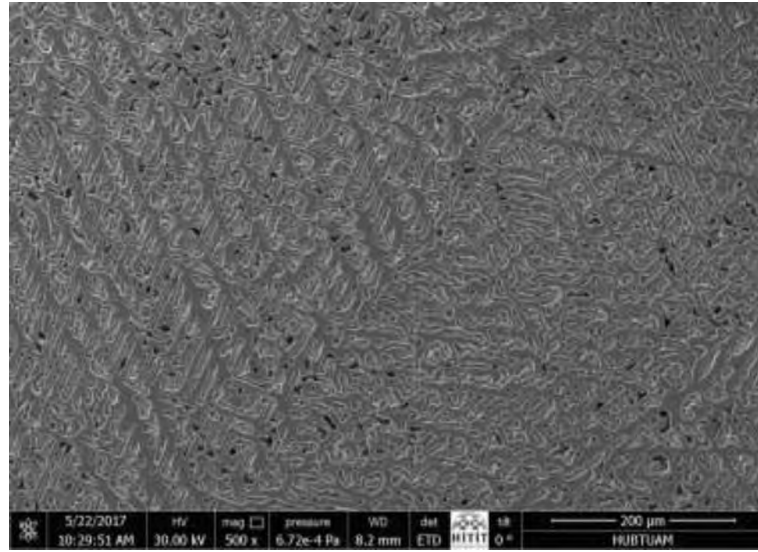
5.3.5.5. Tokluk

Tokluğun ölçüsü malzemenin kopuncaya kadar absorbe ettiği enerjidir. Tokluğun büyüklüğü ise mühendislik gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin tamamının altında kalan alana karşılık gelir. Genellikle sünek olan metaller, gevrek olanlara göre daha toktur.

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

6.1. Alaşımalarının Mikro Yapısının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İle İncelenmesi

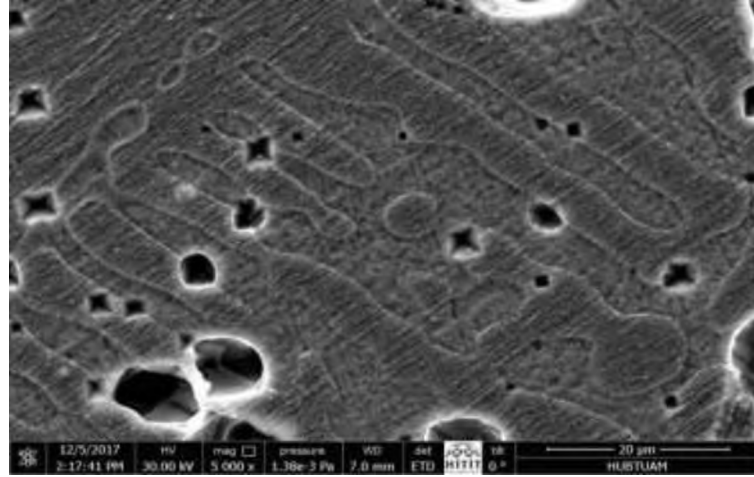
Ni-32.8Mn-4.6In-7.6, FeNi-37.3Mn-6In-6.1Fe ve Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımlarında Fe elementinin mikro yapısı üzerine etkisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Isıl işlem fırınında 900 C° de 22 saat homojenize edilerek direk buzlu su içerisinde soğutulan alaşımlar metalografik işlemlerle yüzeyi parlatılarak 99 ml metanol + 2ml nitrik asid + 5g demir klorür içeren kimyasal solüsyonlar ile yüzeyleri SEM gözlemlenmeleri için dağlanmıştır. Alaşımların oda sıcaklığındaki SEM görüntüleri Resim 6.1, Resim 6.2 ve Resim 6.3 de verilmiştir.



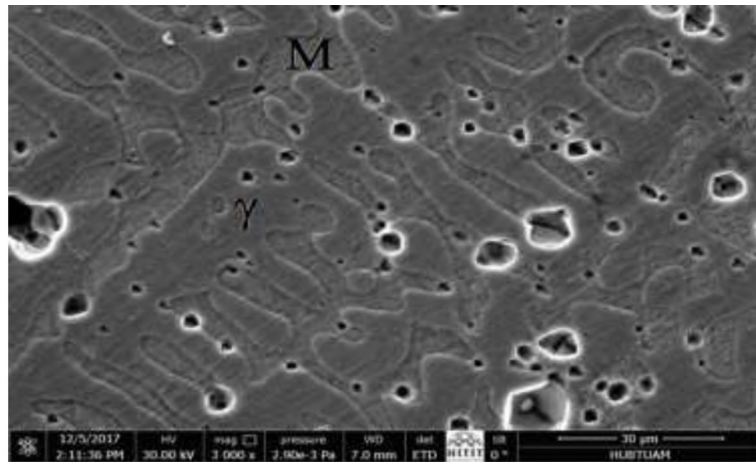
Resim 6.1. Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe alaşımında oluşan martensite kristalleri

Resimlerden görüldüğü gibi her üç alaşım da oda sıcaklığında çift fazlıdır yani hem östenit hemde martensite fazdan oluşmuştur. Resim 6.3'de östenit γ yapı ile, martensite yapı ise M ile işaretlenmiştir. Resimlerde görüldüğü gibi östenit yapının en yoğun olduğu alaşım Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe alaşımıdır. Araştırmalar oluşan fcc γ fazının hacimsel yüzdesinin ve şeklinin iki fazlı şekil hatırlama alaşımlarda önemli

bir rolü olduğunu göstermiştir (Yang ve ark., 2012; Ma ve ark., 2009). Ni-Mn-Fe-In alaşımlarında γ miktarının artması ile mekanik özelliklerin iyileştiği gözlenmiştir. Bununla birlikte Fe katkılı 2 fazlı Ni-Mn-In alaşımlarının diğer iki fazlı şekil hatırlamalı alaşımlardan daha iyi şekil hatırlama özelliği gösterdiği belirtilmiştir (Yang ve ark., 2015).



Resim 6.2. Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımında oluşan martensite kristalleri



Resim 6.3. Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımında oluşan martensite kristalleri

Ayrıca alaşım üzerinde östenit γ ve martensite α fazları üzerinde 6 farklı bölgelerden noktasal analiz yapılarak ortalamaları alınmış ve bu bölgelerdeki element oranları da belirlenmiştir.

Çizelge 6.1. İki fazlı alaşımların martensite ve austenite' nin kimyasal kompozisyonu

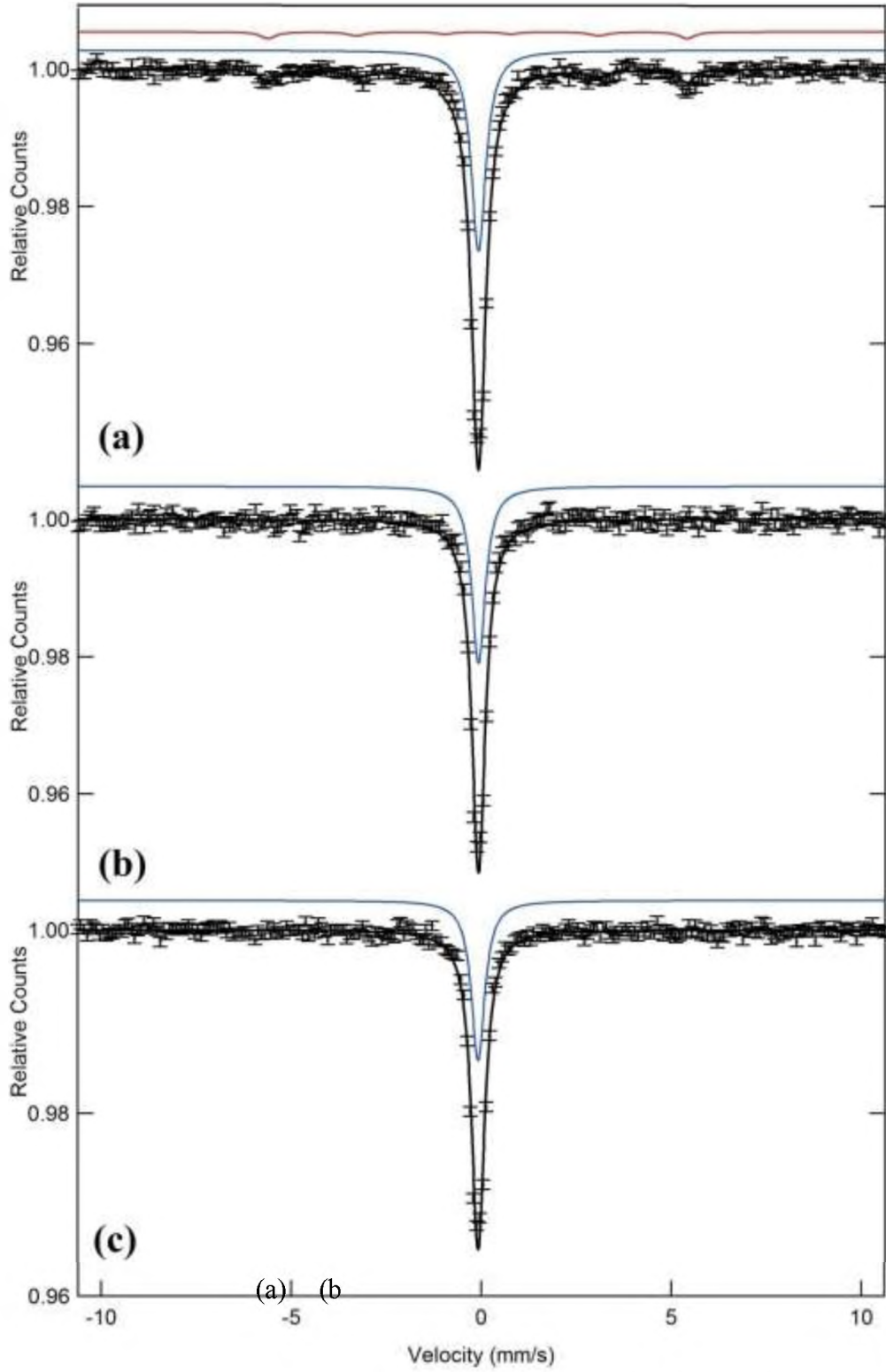
Alaşım	Martensite	Östenit
Ni-32.8Mn-4.6In-7.6Fe	Ni-33.82Mn-7.92In-3.51Fe	Ni-32.15Mn-0.81In-11.98Fe
Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe	Ni-38.48Mn-12.55In-2.89Fe	Ni-36.74Mn-0.91In-8.34Fe
Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe	Ni-36.07Mn-8.24In-2.08Fe	Ni-33.82Mn-0.82In-6.67Fe

Çizelge 6.1'de görüldüğü gibi Fe atomlarının östenit bölgeye, In atomlarının ise martensit bölgeye daha yoğun yerleştiğini göstermektedir. Bulunan sonuçlar literatürle uyum içerisindedir (Yang ve ark., 2015; Li ve ark., 2016).

6.2. Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin Mössbauer Spektrometresinde İncelenmesi

Ni-32.8Mn-4.6In-7.6Fe, Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe ve Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımlarının oda sıcaklığında fit edilmiş Mössbauer Spektrumları Resim 6.4'de verilmiştir. Fit sonucu elde edilen fazlar, izomer kayma, kuadrupol kayma, fazların hacimsel yüzdelerine ve iç manyetik alan gibi Mössbauer parametreleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Radyoaktif Kaynak olarak Co^{57} kullanılm drumunda Mössbauer spektrometresi demir içeren metal, metal alaşımları ve bileşiklerinin manyetik özelliklerini belirlemek için kullanılan oldukça hassas bir tekniktir. Bu yöntemle oluşan kristal yapıların manyetik düzenlenişleri, çekirdek ile s yörüngesindeki elektron yoğunluğunun değişimini gösteren izomer kayma değeri, kristal örgünün simetrisi hakkında bilgi veren kuadrupol kayma değeri, demir atomlarının valans durumları, çekirdeğin iç manyetik alanı, oluşan ferromanyetik ve paramanyetik fazların hacimsel yüzdeleri belirlenebilmektedir. Paramanyetik yapılar mössbauer spektrumunda tek veya dublet soğurma çizgisi ile kendisini gösterirken, ferromanyetik ve antiferromanyetik düzenlenimler altılı çizgi ile karakterize edilirler.



Resim 6.4. (a) Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe (b) Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe (c) Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımlarının oda sıcaklığında mössbauer spektrumları

Resim 6.4'de görüldüğü gibi Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe alaşımında Mössbauer spektrumu 1 sextet ve 1 singletin üst üste binmesi ile oluşmuştur. Diğer iki alaşımın Mössbauer spektrumu 1 singlet ten oluşmuştur. Mössbauer spektrumlarının fit edilmesi sonucu elde edilen Mössbauer parametreleri ise Çizelge 6.2'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe alaşımında % 11.883 lük oranda bir ferromanyetik faz oluşmuştur. Diğer iki alaşım tamamen paramagnetik fazdadır.

Kuadrupol kayma (Q.S) kristal yapıda 3d Fe atomları üzerine komşu atomların ortalama yükünün etkilediği elektrik alanının gradyanının değişiminden kaynaklanır. Bu da Mössbauer spektrumlarında dublet yapı oluşmasına sebep olur. Q.S değeri artması veya azalması simetrisinin bozulması anlamına gelmektedir. Alaşımlarda herhangi bir doublet gözlenmemesi alaşımlarda oluşan kristal yapılarda demir atomlarının konumlandığı noktaların kubik simetriye sahip olduğunu göstermektedir. İzomer kayma çekirdek çapının ve atomun kimyasal çevresinin değişiminden kaynaklanır. Çekirdek ile etrafındaki s elektron dağılımı arasında bir coulomb etkileşmesi nükleer enerji seviyelerini değiştirir. Kaynak ve alaşım arasındaki s elektron yoğunluğu arasındaki fark enerji geçişleri esnasında bir kaymaya sebep olur. Bu kayma izomer kayma olarak bilinir. İzomer kayma değerinde bir artış s elektron yoğunluğunun azalmasına, azalış ise s elektron yoğunluğunun artması anlamına gelmektedir. Çizelge 6.2'den görüldüğü gibi 3 alaşım da singlet yapısını izomer kayma değeri aynıdır. Buda Fe elementinin çekirdeğin etrafında ki s elektron yoğunluğuna bir etkisi olmadığını göstermiştir. Alaşımlarda sıfır manyetik alan gözlenmesi Fe atomlarının tercihen L_{21} yapıda ki Mn ve Ga atomları tarafından çevrelenen Ni atomları tarafına yer aldığını gösterir. Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe alaşımında oluşan sextet yapı α -Fe den kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 6.2. Alaşımların mössbauer parametreleri (H_{eff} : İç manyetik alan, Q.S:Kuadrupol kayma, I.S: İzomer kayma Γ : Çizgi genişliği, R_A : Oluşan fazların hacimsel yüzdesi)

Alaşım	Faz	$H_{\text{hf}}(T)$ (± 0.03)	I.S. (mm s ⁻¹) (± 0.001)	Γ (mm s ⁻¹) (± 0.004)	R_A (%)
Ni-32,8Mn-6.4In-7.6Fe	Singlet	-	0.019	0.457	88.117
	Sextet	34.124	-0.002	0.466	11.883
Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe	Singlet	-	0.02	0.4263	100
Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe	Singlet	-	0.019	0.423	100

6.3. Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

6.3.1 Alaşımların Sertlik Ölçümleri

Alaşımların sertlik değeri HÜBTÜAM merkez laboratuvarında Qness / Q250 MS marka Universal sertlik cihazında 20N⁷ luk kuvvet uygulanarak yüzeyden 6 farklı noktadan sertlik ölçümü alınmış ve ortalamaları alınarak bulunan sertlik değerleri Çizelge 6.2’ de verilmiştir. Çizelge 6.1 de görüldüğü gibi alaşımların sertlik değerleri birbirine çok yakındır. Bununla birlikte alaşımlarda Fe miktarı azaldıkça sertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 6.3. Alaşımların vickers sertlik (H_v) değerleri

Sample	H_v
Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe	206
Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe	210
Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe	218

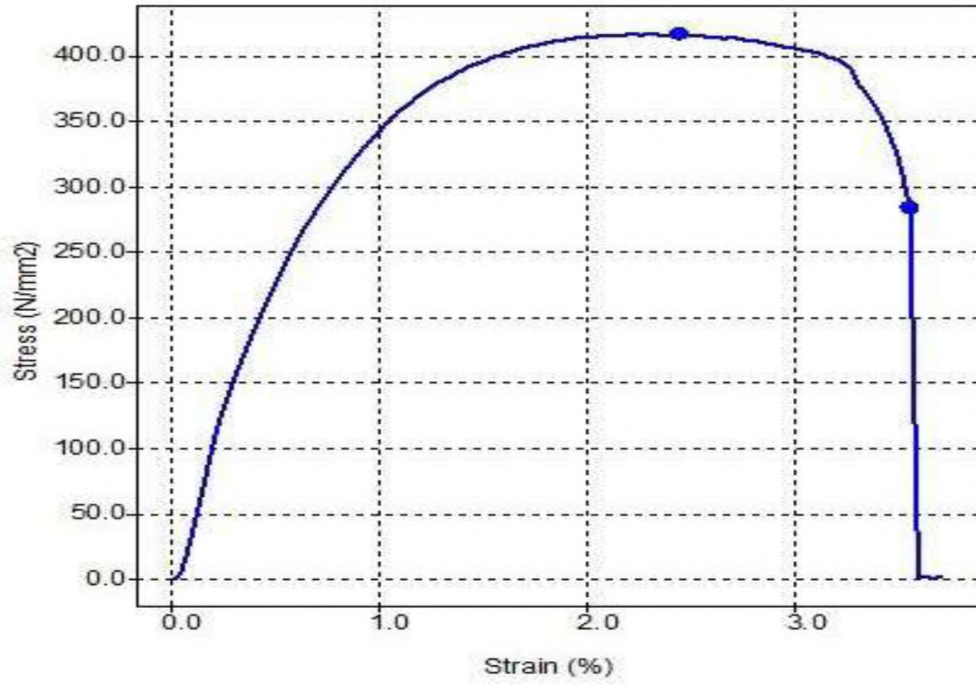
6.3.2 Alaşımların Basma Testi Ölçümleri

Alaşımların mekanik özelliklerini belirlemek için oda sıcaklığında basma testi yapılmıştır. Bu test için ısıtıl işlemi biten alaşımlar 5 mm çapında ve 30 mm yüksekliğinde silindir şeklinde hazırlanmıştır. Hazırlanan alaşımların basma testleri oda sıcaklığında Shimadzu EHF-EV101K1-040-0A yorulma test cihazı ile 100 kN altında sıkıştırma hızı 5mm/dakika olacak şekilde yapılmıştır. Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe, Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe ve Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımların gerilme gerinim grafikleri sırası ile Resim 6.5, Resim 6.6 ve Resim 6.7’ de verilmiştir. Test sonucu elde edilen parametreler ise Çizelge 6.4’ de verilmiştir.

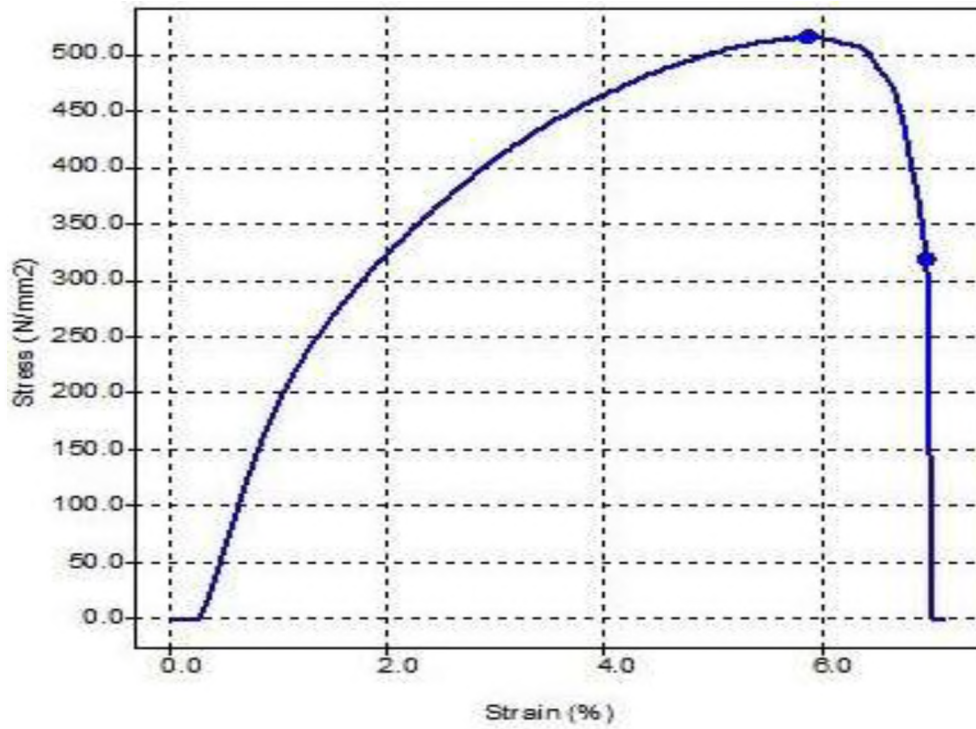
Çizelge 6.4’ den elde edilen sonuçlara göre alaşımlarda Fe miktarının artması ile elastik modül değerinin arttığı görülmektedir. Elastik modül bir malzemenin elastik şekil değişimine karşı gösterdiği dirençtir. Yüksek elastik modül malzemeye uygulanan bir gerilme sonucu oluşan elastik birim şekil değişiminin küçük olacağını gösterir. Bununla birlikte sert malzemelerin elastik modülü daha büyüktür. Bu sonuçlar alaşımların sertlik değerleri ile uyum içerisinde.

Akma dayanımı ise malzemenin plastik olarak deforme olarak başladığı değerdir. Sert malzemelerin akma dayanımı daha büyüktür. Çizelge 6.4’ den görüldüğü gibi akma dayanımı en yüksek olan alaşım Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe alaşımıdır. Enerji değeri ise bir malzemeyi kırmak için kullanılan enerji miktarıdır. Bu değer malzemelerde tokluk değeri olarak bilinir. Gerilme gerinim grafiğinin altında kalan alan hesaplanarak bulunur.

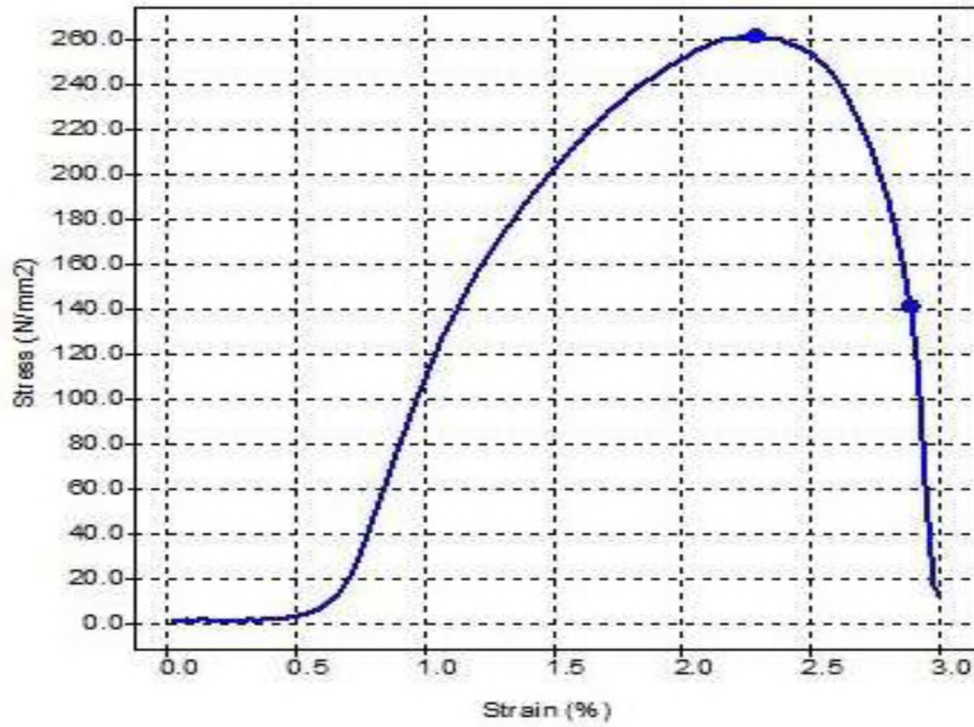
Sünek malzemelerin tokluk değeri gevrek malzemelerden daha yüksektir. Bir başka deyişle tokluk değeri ne kadar fazla ise o malzeme daha dayanıklıdır. O halde Çizelge 6.4 den elde edilen sonuçlara göre tokluk değeri en yüksek olan dolayısıyla en dayanıklı alaşım Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe olarak belirlenmiştir. Alaşımların kırılma noktaları kıyaslandığında; Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe alaşımı %3.55, Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımı % 6.96 ve Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe ise % 2.9 civarında sıkıştırma sonucu kırılmıştır. Sünek malzemelerin kırılma değeri daha yüksektir.



Resim 6.5. Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe alaşımının oda sıcaklığında gerilim-gerinim grafiği



Resim 6.6. Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımının oda sıcaklığında gerilim-gerinim grafiği



Resim 6.7. Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımının oda sıcaklığında gerilim-gerinim grafiği

Bu sonuçlara göre alaşımlar arasında en sünek malzeme Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımıdır. Gerilme mukavemeti bir malzemenin kırılmadan önce dayanabileceği maksimum gerilmedir. Gerilme gerinim grafiğinin en yüksek gerilme değeridir. Güçlü malzemelerin gerilme mukavemeti daha fazladır. Çizelge 6.4 den elde edilen sonuçlara göre gerilme mukavemeti en büyük olan alaşım 3.64716 kN değeri ile Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımıdır.

Çizelge 6.4. Alaşımların oda sıcaklığında mekanik özellik parametreleri

Alaşım	Elastik Modül (N/mm ²)	Akma Dayanımı (kN)	Enerji (J)	Kırılma Noktası (mm)	Gerilme Mukavemeti (kN)
Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe	33433.3	2.55388	2.34717	0.96613	2.9502
Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe	16481.1	2.34055	3.83078	1.44918	3.64716
Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe	11452.4	0.98763	1.86715	0.80765	1.85197

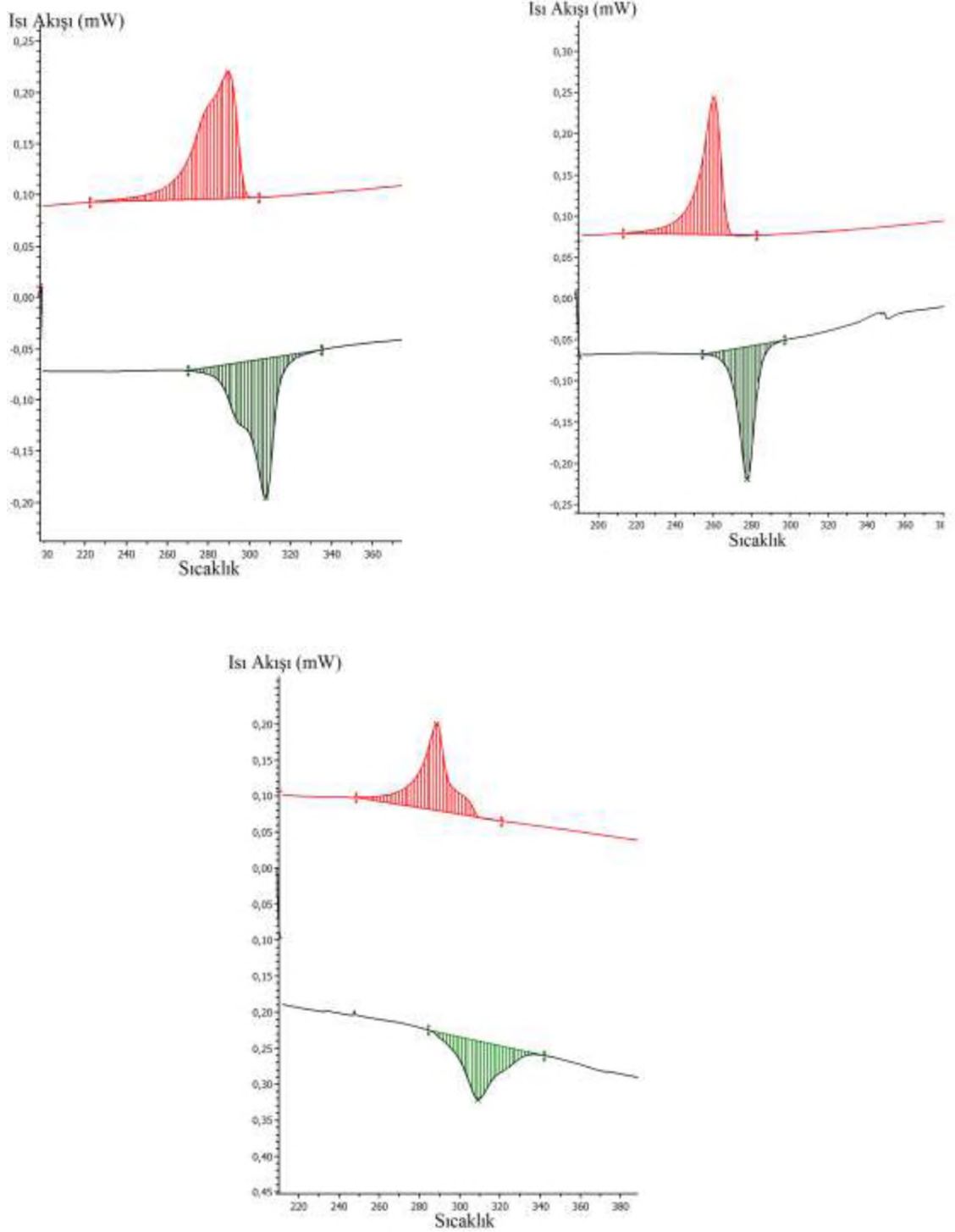
$Ni_{50}Mn_{36+x}Fe_8In_{6-x}$ ($x=0,2$) ve $Ni_{52}Mn_{34+y}Fe_8In_{6-y}$ ($y=0,2$) alaşımlarında yapılan çalışmada, her iki alaşım tipinde de alaşımlarda γ miktarının artması ile mekanik özelliklerin önemli derecede iyileştiği görülmüştür. Bununla birlikte γ miktarının ve deformasyon miktarının artması ile Şekil hatırlama özelliğinin $Ni_{50}Mn_{36+x}Fe_8In_{6-x}$ alaşımında arttığı, $Ni_{52}Mn_{34+y}Fe_8In_{6-y}$ alaşımında ise azaldığı tespit edilmiştir. (S.Y. Yang, Y. Liu, C.P. Wang, Z. Shi, X.J. Liu, J. Alloys Comp. 560 (2013) 84–91). Bu sonuç Mn miktarının Şekil hatırlama özelliğinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

6.4. Alaşımlarının Termal zellikleri

Element miktarının faz dönüşüm sıcaklığına etkisi DSC yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Resim 6.8’de (a) Ni-32.8Mn-4.6In-7.6Fe, (b) Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe (c) Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımlarının sıcaklığa bağlı ısı akışı grafiği verilmiştir. Hem soğutma hemde ısıtma hızı 10 C/dakika olarak ayarlanmıştır. Grafiklerden elde edilen alaşımların östenit başlangıç (A_s), pik (A_p), bitiş (A_f) sıcaklıkları, martensit (M_s), pik (M_p), bitiş (M_f) sıcaklıkları, $\Delta T = A_f - M_s$ olarak tanımlanan histerisiz genişliği izelge 6.5’de verilmiştir.

Ferromanyetik Şekil hatırlamalı alaşımlarda değerlik elektron sayısı önemli rol oynar. Bu değer alaşımda atom numarası başına düşen değerlik elektron sayısını gösterir. Atomların temel kuantum seviyesinin en dıştaki elektronlarına valans elektronu denir. Geis metaller icin; valans elektronları, atomun d ve s orbitallerindeki elektron sayısıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan alaşımlar icin $e^{Ni}=10$, $e^{Mn}=7$, $e^{In}=3$, $e^{Fe}=8$. Alaşımların e/a oranı hesaplanmış ve izelge 6.5’de verilmiştir. Çizelge 6.5 incelendiği zaman Faz dönüşüm sıcaklığının Fe miktarına doğrudan bağlı olmadığı bulunmuş, fakat elektron yoğunluğu e/a oranı ile doğrudan bağımlı olduğu görülmüştür. e/a oranı arttıca faz dönüşüm sıcaklığının arttığı belirlenmiştir. Genellikle küçük ΔT dönüşüm histerisizi alaşımlarda iyi termoelastik ve Şekil hatırlama özelliği göstermesinde önemlidir. Bu 3 alaşımda elde edilen ΔT yüksek

bulunmuş olmasına rağmen 3 alaşım arasında en iyi termoelastik ve şekil hatırlama özelliği gösteren alaşım Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımını olduğu düşünülmektedir.



Resim 6.8. (a) Ni-32.8Mn-4.6In-7.6Fe, (b) Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe (c) Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımlarının sıcaklığa bağlı ısı akışı grafiği

Çizelge 6.5. Çalışılan alaşımların alaşımların östenit başlangıç (A_s), pik (A_p), bitiş (A_f) sıcaklıkları, martensit başlangıç (M_s), pik (M_p), bitiş (M_f), $\Delta T = A_f - M_s$ sıcaklıkları

Alaşım	e/a	A_s (°C)	A_p (°C)	A_f (°C)	M_s (°C)	M_p (°C)	M_f (°C)	ΔT (°C)
Ni-32.8Mn-6.4In-7.6Fe	8.416	284.11	307.47	315.33	290.08	298.81	261.79	25.25
Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe	8.339	266.07	277.2	286.66	267.74	260.66	246.38	18.92
Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe	8.57	295.04	308.29	335.1	309.37	289.09	275.18	25.73

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Şekil hatırlamalı alaşımların 2018 yılında küresel piyasalardaki hacmi 3.4 milyar dolar iken 2025 yılında tahmini 7.5 milyar dolar olacağı düşünülmektedir Anonim, 2019. <https://gminsights.wordpress.com/2019/05/24/shape-memory-alloys-market/>. (10.09.2020). Şekil hatırlamalı alaşımların uygulama alanları genellikle biyomedikal sanayi, uzay ve savunma sanayi, otomotiv endüstrisi ve ev aletleridir. Bunlar arasında özellikle manyetik soğutucu ve manyetik sensör olarak kullanılan ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımların önemi her geçen gün artmaktadır. Geleneksel Ni-Mn-Ga ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlardan sonra Ni-Mn-In alaşımlarında dönüşüm fazları arası manyetizasyon değerinin hayli yüksek olması, manyetik alanın sebep olduğu zorların çok daha yüksek olması ve neredeyse tamamen şekil hatırlama özelliği göstermesi özelliklerinden dolayı son zamanlarda çok ilgi çekmiştir. Ni-Mn-In-Fe iki fazlı ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlar diğer 2 fazlı ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlardan daha iyi şekil hatırlama özelliği göstermesinden dolayı bu çalışmada Fe elementinin Ni-32.8Mn-4.6In-7.6Fe, FeNi-37.3Mn-6In-6.1Fe ve Ni-34.7Mn-4.3In-4.4Fe alaşımlarının bazı fiziksel özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

1. Alaşımların morfolojik özellikleri SEM ile incelenmiştir. Alaşımların tamamı oda sıcaklığında martensit ve östenit fazdan olmak üzere çift fazdan oluşmuştur. Alaşımlarda martensit ve östenit fazlar üzerinde yapılan elementel analiz sonucu Fe atomlarının östenit bölgeye, In atomlarının ise martensit bölgeye daha yoğun yerleştiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar literatürle uyum içerisindedir.
2. Alaşımların manyetik özellikleri Mössbauer spektrometresi ile belirlenmiştir. 3 Alaşımında oda sıcaklığında Paramanyetik 1 Singlet' ten oluşmuştur. Ni-32.8Mn-4.6In-7.6Fe alaşımında 1 singlete ek olarak iç manyetik alanı 34.124 T kısmı alanı ise %11.883 olan ferromanyetik bir sextet oluşmuştur. Bu yapının α -Fe' den kaynaklandığı düşünülmektedir. Herhangi bir doublet

görünmemesi kristal yapının kubik olduğunu göstermektedir. Her üç alaşımda' da izomer kayma değeri aynıdır. Buda Fe elementininin s elektron yoğunluğuna etkisi olmadığını göstermektedir. Alaşımlarda sıfır manyetik alan gözlenmesi Fe atomlarının tercihen L_{21} yapıda ki Mn ve Ga atomları tarafından çevrelenen Ni atomları tarafına yerleştiğini gösterir.

3. Alaşımların mekanik özellikleri vickers sertliği belirlenerek ve basma testleri yapılarak belirlenmiştir. Alaşımlarda Fe miktarının artması ile sertlik değerinin az miktarda azaldığı tespit edilmiştir. Basma test sonuçlarına göre ise alaşımlarda Fe miktarının artması ile elastik modül ve akma dayanımının arttığı görülmektedir. Alaşımlar arasında tokluk değeri, kırılma noktası ve gerilme mukavemeti en büyük olan alaşım Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımı olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre en dayanıklı ve en sünek alaşım Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımıdır. Aynı zamanda ΔT histerisiz sıcaklık farkı en küçük alaşım Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımıdır. Bu sonuçlara göre 3 alaşım arasında şekil hatırlama özelliğinin en yüksek olan alaşımın Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe alaşımı olduğu düşünülmektedir.
4. Alaşımların faz dönüşüm sıcaklıkları DSC yöntemi ile belirlenmiştir. Fe miktarının faz dönüşüm sıcaklığına etkisi olmadığı belirlenmiştir. e/a oranı arttıkça faz dönüşüm sıcaklığının arttığı belirlenmiştir. Bu sonuç literatürle uyum içindedir (Yang ve ark., 2015; Yu ve ark., 2009). Alaşımlarda $\Delta T = A_f - M_s$ histerisiz sıcaklığı belirlenmiştir. Alaşımlar arasında ΔT sıcaklık farkı en küçük olan alaşım Ni-37.3Mn-6In-6.1Fe için 18.92°C olarak belirlenmiştir. Uygulamada histerisiz genişliğinin düşük olması önemlidir.

KAYNAKLAR

- Akkera, H., S., Singh, I., D. Kaur, D., 2015. Journal of Alloys and Compounds 642 53–6.
- Altın S., 2009, Süperiletken BSCCO Whiskerlerin Büyüme Mekanizması ve Farklı Katkılamalara Bağlı Olarak Elektriksel ve Manyetik Özellikleri, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Anonim, [http:// www.nitinol.com/media/refernce-library/059.pdf](http://www.nitinol.com/media/refernce-library/059.pdf)-(19.06.2020).
- Anonim, [http:// www.Sciart.karaelmas.edu.tr/bolumler/fizik/ders%20Notları/E10.pdf](http://www.Sciart.karaelmas.edu.tr/bolumler/fizik/ders%20Notları/E10.pdf) (19.12.2019).
- Anonim, 2019. <https://gminsights.wordpress.com/2019/05/24/shape-memory-alloys-market> (10.09.2020).
- Aydoğdu, A., 1995, Şekil Hatırlamalı CuAlNi Alaşımlarındaki Martensitik Dönüşümler Üzerindeki Termal Yaşlandırma Etkileri, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Aygahoğlu A. Ve Gürler R., 2009. Şekil Bellekli Alaşımların Karakterizasyonu, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Baksan B., ve Gürler R., 2006, Bakır Esaslı Şekil Bellekli Alaşımların Üretimi ve Çekme Deneyi ile Karakterizasyonu, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10., Cilt.
- Bartova B., Wiese N., Schryvers D., Chapman J.N. ve Ignacova S., 2008. Microstructure of Precipitates and Magnetic Domain Structure in an Annealed. $\text{Co}_{38}\text{Ni}_{33}\text{Al}_{29}$ Shape Memory Alloy, Acta Materialia, 56, 4470-4476.
- Braunovic M. Ve Labrecqu C., 1995. Electrical Contant, Proceeding of the Forty-First IEEE Holm Conference, Canada.
- Buscow K.H.J. ve de Boer F.R., 2003. Physics of Magnetism and Magnetic Materials, Kluwer Academic, Newyork.
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G., 2013. Materials Science and Engineering, John Wiley&Sons (Asia) Pte Ltd. All Rights Reserved. Newyork, USA. 153-185 p.
- Chatterjee S., Thakur M., Giri S., Majumdar S., Debd A.K., Deb S.K., 2008. Transport, magnetic and structural investigations of Co-Ni-Al shape memory alloy Journal of Alloys and Compounds 456, 96-100.

- Choon T.W., Salleh A.S., Jamian S. Ve Ghazali I., 2007. World Academy of Science, Engineering and Technology, 25, 300-304.
- Couch R.N., 2006. Development of Magnetic Shape Memory Alloys Actuators for a Swashplateless Helicopter Rotor, Doktora Tezi, Maryland.
- Darjan C., 2007. Shape Memory Alloys, Seminer, Slovakya.
- Dahaka R.S., D' Souza S.W., Marinaj M., Chakrabarti A., Schlagel D.L., Lograsso T.A., ve Barman S.R., 2009. Photoemission study of the (100) Surface of NiMnGa and Mn₂NiGa ferromagnetic Shape memory Alloys, Surface Science, 1999-2004. Y., Miyazaki, S., 2009.
- Enkovaara J., Ayuela A., Zayak A.T., Entel P., Nordström L., Dube M., Jalkanen J., Impola J. ve Nieminen, 2004. Magnetically Driven Shape Memory Alloys, Materials Science and Engineering, 378, 52-60.
- Erdoğan M., 2001. (Çeviri), Malzeme Bilimi Ve Mühendislik Malzemeleri, Nobel Yayın Dağıtım.
- Fu H., Yu H.J., Teng B.H., Zhang X.Y., ve X.T. Zu X.T., 2009. Magnetic Properties and Magnetic Entropy Change of Co₅₂Ni₂₂Ga₂₈ Alloy, Journal of Alloys and Compounds, 595-597.
- Ghimbeu C. M., 2007. Preperation and Characterization of Metal Oxide Semiconductor Thin Films for The Detection of Atmosferic Pollutant Gases, Doktora Tezi, Metz, Fransa.,1993. Aliminum and Aliminum Alloys. USA.
- Güngüneş, H., 2005. Fe %24,5Ni-%4,5Si Alaşımında Austenite-Martensite Faz Dönüşümleri Üzerinde Çalışmalar. Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Hamilton R.F., Şehitoğlu H., Efstathiou C. ve Maier H.J., 2007. Inter-Martensitic Transitions in Ni-Fe-Ga Single Crystals, Acta Materialia, 55, 4867-4876.
- Heil T. M., 2005. A Phase-Field Computer Model of Microstructure Evolution In a Ferromagnetic Shape Memory Alloy, Blackburg, Virginia, USA.
- Hull, D., 1965. Introduction to Dislocation, Pergamon Pres, London, 43-55.
- Kainuma, R., Imano, Y., Ito, W., Sutou, Y., Morito, H., Okamoto, S., Kitakami, O., Oikawa, K., Fujita, A., Kanomata, T., Ishida, K., 2006. Nature 439 957-959.
- Krenke T., Moya X., Aksoy S., Acet M., Entel P., Manosa L., Planes A., Elerman Y., Yücel A. ve Wasserman E.F., 2007. Electrnic aspects of the martensitic transition in Ni-Mn based Heusler alloys, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 310, 2788-2789.

- Kicfer B. ve Lagousdas D.C., 2005. Magnetic Field-Induced Martensitic Variant Reorientation in Magnetic Shape Memory Alloys, *Philosophical Magazine*, 1-34.
- Kutlu, S., 2015. [http:// www.muhendisbeyinle.net/yazar/sevilkutlu](http://www.muhendisbeyinle.net/yazar/sevilkutlu) (5 Aralık 2015).
- Li, H., Fang, Y., Feng, S., Zhai, Q., Luo, Z., Zheng, H., 2016. *Journal of Magnetism and Magnetic Material* 417 267-271.
- Liu C., Zhang W., Qian Z., Hua Z., Zhao Q., Sui Y., Su W., Zhang M., Liu Z., Liu G. ve Wu G., 2007. Magnetic and Structural Transition in the Melt-Spun Heusler alloy Ni₅₃Mn₂₅Al₂₂, *Journal of alloys and Compounds*, 433, 37-40.
- Liu H., Wang H.Y., S.Y. Yu, Dai X.F., Chen J.L., Wu G.H., Liu Y., 2006. Phase Equilibrium of ferromagnetic Shape Memory Alloy Co₃₉Ni₃₃Al₂₈, *Scripta Materialia*, 1299-1304.
- Machado L.G. ve Savi M.A., 2003. Medical Application of Shape Memory Alloys, *Brazilian Journals of Medical and Biological Research*, 36, 683-691.
- Moya X., Ma nosa L., Planes A., Krenke T., Acet M. ve Wassweman E.F., 2006. Martensitic transition and Magnetic Properties in Ni-Mn-X Alloys, *Materials Science and Engineering*, 911-915.
- Murakami Y., Shinko D., Oikawa H., Kainuma R., Ishida K., 2002. Magnetic Domain Structure in Co-Ni-Al Shape Memory Alloys Studied by Lorentz Microscopy and Electron Holography, *Acta Materialia*, 2173-2184.
- Oikawa K., Ota T., Imano Y., Omori T., Kainuma R. ve Ishida K., 2006. *Journal of Phase Equilibria Diffusion*, 27,1, 75-82.
- Önal, O., 2018. Fe-280/oNi-xo/oTi Alaşımlarında Ti Elementinin Bazı Fiziksel Özellikler Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
- Onaran K., 2006. *Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi*.
- Özaydın, E., T., 2008. Kaolinit Klinin Mössbauer Spektrometrisiyle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Pons J., Chernenko V.A., Santamarta R. ve Cesari E., 2000. Crystal Structure of Martensitic Phases in Ni-Mn-Ga Shape Memory Alloys, *Acta Materialia*, 48, 3027-3038.
- Rahman M.A., 2008. Patents On Superelastic Shape Memory Alloys, *Recent patents on Mechanical Engineering*, 1, 65-67.

- Recarte, V., Perez-Landazabal, J., I., Sanchez-Alarcos, V., J.A. Rodriguez-Velamazan, J., A., 2012. *ActaMaterialia* 60 1937-1945.
- Roth S., Gaitzsch U., Pötschke M. ve Schutz L., 2008. Magneto-Mechanical Behaviour of Textured Polycrystals of NiMnGa Ferromagnetic Shape Memory Alloys, *Advanced Materials Research*, 52,29-34.
- Sakaoğlu P. ve Özbenece T., 2007. Şekil Bellekli Alaşımlar, *Hurdacı*, 2, 5-7.
- Schetky L.M, 1980. Shape Memory Alloys, *Scientific American*, 68-76.
- Sharma S.V., Nayak M. M. ve Dinesh N.S., 2008. *Sadhana*, 33-5, 699-712.
- Smith C.O., 1969. *The Science of Engineering Materials*, Prentice Hall, USA.
- Sozinov A., Likhachev A. A. ve Ullakko K., 2002. Crystal Structure and Magnetic Anisotropy Properties of Ni-Mn-Ga Martensitic Phases with Giant Magnetic-Field-Induced Strain, *IEEE Transactions on Magnetics*, 38, 5, 2814-2816.
- Söderberg O., Straka V., Heczko O., Hannula S.P. ve Lindross V.K., 2004. Tensile/Compressive Behaviour of Non-layered Tetragonal Ni_{52.8}Mn_{25.7}Ga_{21.5} Alloy, *Materials Science and Engineering*, 386, 27-33.
- Söylemez B., 2009. Design and Analysis of a Linear Shape Memory Alloy Actuator, Doktora tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sutou, Y., Imano, Y., Koeda, N., Omori, T., Kainuma, R., Ishida, K., Oikawa, K., 2004. *Appl. Phys. Lett.*, Vol.85, 4358-4360.
- Tanaka Y., Oikawa K., Sutou Y., Omori T., Kainuma R. ve Ishida K., 2006. Martensitic Transition and superelasticity of Co-Ni-Mn Ferromagnetic Shape Memory Alloys with $\beta+\gamma$ two-phase structure, *Materials Science and Engineering*, 1054-1060.
- Ullakko, K., Huang, J., Kantner, C., O'Handley, R., C., Kokorin, V., V., 1996. *Appl. Phys. Lett.* 69 1966-1968.
- Umetsu R.Y., Ito W., Ito K., Koyama K., Fujita A., Oikawa K., Kanomata T., Kainumaa R. ve Ishida K., 2009. Anomaly in Entropy Change Between Parents and martensite Phases in the Ni₅₀Mn₃₄In₁₆ Heusler Alloys, *Scripta Materialia*, 25-28.
- Uslu, İ., 2016. Termik Analiz Yöntemleri, <https://www.slideshare.net/iuslu/termik-analiz-yntemleri-62142161>, (11.11.2019).
- Varol, 2014. sunum <https://www.slideshare.net/Zzmmrrtt/mssbauer-spektroskops> (19.11.2019).

- Vasil'ev A.N., Buchel'nikov V.D., Takagi T., Khovail V.V. ve Estrin E.I., 2003. Shape Memory Ferromagnet, Physics Uspekhi, 46 (6), 559-588.
- Webster, P., J., Ziebeck, K., R., A., Town, S., L., Peak, M., S., 1984. Philos. Mag. Vol. B49 295-310.
- Wu, Z., Liu, Z., Yang, H., Liu, Y., Wu, G., 2011. Intermetallics 19 1839-1848.
- Yang, S., Y., Liu, Y., D., Wang, C., P., Lu, Y., Wang, J., M., Shi, Z., X.J. Liu, X., J., 2015. Journal of Alloys and Compounds, 619 498-504.
- Yaşar, E., 2005. Fe-%30Ni-%XMo Alaşımlarında Atermal ve İzotermal Martensitik Dönüşümlerinin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Yu, H., J., Fu, H., Wang, Z., G., Zu, X., T., 2009. Materials Science and Engineering A 507 37-41.
- Yu H.J., Fu H., Sun J.X., Wang Z.G. ve Zu X.T., 2009. Transformation Temperatur in Polycrystalline $Ni_{6.5-x}Fe_{17}Ga_{26.5}Ge_x$ Ferromagnetic Shape Memory Alloys, Journals of Alloys Compounds, 477, 1-2, 628-631.
- Yu H.J., Zu X.T., Fu h., Zhang X.Y. ve Wang Z.G., 2009. Effect of Annealing and Heating/Cooling Rate on the Transformation Temperatures of NiFeGa Alloy, Journal of Alloys and Compounds 470, 237-240.
- Xuan, H., C., Ma, S., C., Cao, Q., Q., Wang, D., H., Du Y., W., 2011. Journal of Alloys and Compounds 509 5761-5764.
- Xuan H.C., Wang D.H., Zhang C.L., Han Z.D., Gu X.B. ve Du Y.W., 2008. Boron's Effect on Martensitic Transformation and Magnetocaloric Effect in $Ni_{43}Mn_{46}Sn_{11}B_x$ alloys, Applied Physics Letter 92, 102503-102505.
- Zarinejad M. ve Liu Y., 2008. Dependence of Transformation Temperatures of NiTi-based Shape Memory Alloys on the Number and Concentration of Valence Electrons, Advanced Functional Materials, 18, 2789-2794.

ÖZGEÇMİŞ**Kişisel Bilgiler**

SOYADI, Adı : KULUCAN, Fazıl Fazlı

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Hitit Üniversitesi	
Lisans	Hacettepe Üniversitesi	17/07/1995
Lise	Çorum Atatürk Lisesi	1989

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1995-Halen	Milli Eğitim Bakanlığı	Öğretmen

Yabancı Dil

Almanca-İngilizce

