

KSÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

85355

**NİTİNOL YAYDA OLUŞAN
MARTENSİTİK FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN
TERMODİNAMİK BAKIMDAN İNCELENMESİ**

HANİFİ ÇAM

TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON

FİZİK ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ
EYLÜL 1999

85355

**KSÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİTİNOL YAYDA OLUŞAN
MARTENSİTİK FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN
TERMODİNAMİK BAKIMDAN İNCELENMESİ**

**HANİFİ ÇAM
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**Bu Tez 04 / 10 / 1999 Tarihinde Aşağıdaki Juri Üyeleri Tarafından Oybirliği ile
Kabul Edilmiştir.**

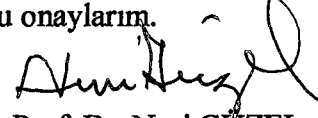
İmza.....
Prof. Dr. Ali Doğan
DANIŞMAN

İmza.....
Yrd. Doç. Dr. Musa Gögebakan
ÜYE

İmza.....
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Tümer
ÜYE

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Kod No:


Prof. Dr. Nuri GÜZEL
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür

**Bu Çalışma Tarafından desteklenmiştir.
Proje No:**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZET	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR	VIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Katıların Esneklik Özellikleri	1
1.1.1. Uzama Esnekliği ve Esneklik Katsayısı (Young Modülü)	2
1.1.2. Eğilme	2
1.1.3. Kesme Esnekliği (Makaslama) ve Makaslama Modülü	3
1.1.4. Hacim Esnekliği ve Sıkışma Modülü	4
1.1.5. Viskozluk	4
1.2. Faz Geçişleri	5
1.2.1. Martensitik Faz Dönüşümleri	5
1.2.2. Martensitik Faz Dönüşümlerinin Geometrik Özellikleri	11
1.2.3. Martensitik Dönüşümün Kristaloğrafisi	11
1.2.4. Yerleşme Düzlemi (Habit Düzlemi)	13
1.2.5. Martensitik Faz Dönüşüm Çeşitleri	13
1.3. Soy Metal Martensiteleri	15
1.3.1. Soy Metal martensiteleri ve Martensitik Dönüşüm	15
1.3.2. Termoelastik Martensitik Dönüşümü	16
1.3.3. Soy Metal Alaşımlarında Martensitelerin Yapısı	19
1.4. Şekil Hatırlamalı Alaşımlar	20
1.4.1. Şekil Hatırlamalı Alaşımlarda Şekil Hatırlama Olayı	22
1.4.2. Yarı Kararlı β - Faz Alaşımlarda Şekil Hatırlama Olayı	23
1.4.3. Şekil Hatırlama Alaşımlarında Görülen Şekil Hatırlama Mekanizması	24
1.4.4. Tek Yönlü (Tersinmez) Şekil Hatırlama Olayı	25
1.4.5. Çift Yönlü (Tersinir) Şekil Hatırlama Olayı	27
1.4.6. Isıtma ve Soğutma Karakteristiği	31
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	34
3. MATERYAL VE YÖNTEM	36
3.1. Şekil Hatırlamalı Alaşım Modeli	36
3.2. Şekil Hatırlamalı Alaşımlardan Yapılmış Yayların Yapısı	42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	47
4.1. Nitinol Alaşımlardan Yapılmış Yayların Uygulamalarda Dizaynı	47
4.2. Şekil Hatırlama Alaşımlarının Büyük Sönüm Özelliklerinin Titreşim Kontrolünde Kullanılması	49
4.3. Şekil Hatırlamalı Alaşımlardan Yapılmış Yayların Sertlik Özelliklerinin Kontrolünde Kullanılması	56
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	66

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİTİNOL YAYDA OLUŞAN MARTENSİTİK FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN TERMODİNAMİK BAKIMDAN İNCELENMESİ

HANİFİ ÇAM

KSÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. ALİ DOĞAN

Yıl: 1999, Sayfa: 77

Juri: Prof. Dr. Ali DOĞAN
Yrd. Doç. Dr. Musa GÖĞEBAKAN
Yrd. Doç. Dr. Mehmet TÜMER

Bu çalışmada Şekil hatırlamalı alaşım yayları için lineer teoriye dayanan bir dizayn yaklaşımı sunulmuştur. Nitinol alaşımı için austenite fazının Young modülünün değeri martensite fazına göre yaklaşık olarak 3 - 4 defa daha büyük olduğu hesaplanmıştır. Adı geçen alaşımın iç sürtünme karakteristiklerini incelemek amacıyla yüksek sönüm özelliğini kullanan titreşim kontrolü olarak bir lineer olmayan viskoze sönüm modeli sunulmuştur. Bu modelin genlik - frekans tepki eğrilerini kullanarak ileri ve ters yönde martensite dönüşümü sırasında gözlenen atlama frekanslarına göre histeresis olayı çok daha açık olarak izah edilebilir. Uygulamalardaki başka bir titreşim kontrolü değişebilir sertlik özelliğidir ve bu çalışmada bir ucundan tutturulmuş çubuk titreşim sisteminin bağıl doğal frekanslarını hesaplamak suretiyle bu özellik de incelenmiştir. Numunenin sertliğinin martensitik dönüşüm sıcaklık bölgesi üzerinden titreşim sistemindeki bazı modlar için frekanslara hassas olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Martensite, Austenite, Faz Dönüşümü, Şekil hatırlama olayı, Alaşımlar

ABSTRACT
MSc THESIS

**INVESTIGATION THERMODYNAMICALLY OF MARTENSITIC PHASE
TRANSFORMATION OCCURING IN NITINOL SPRING**

HANİFİ ÇAM

**DEPARTMENT OF PHYSIC INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED
SCIENCES UNIVERSITY OF KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM**

SUPERVISOR : Prof. Dr. Ali DOĞAN

Year : 1999, Pages : 77

**Jury : Prof. Dr. Ali DOĞAN
Yrd. Doç. Dr. Musa GÖĞEBAKAN
Yrd. Doç. Dr. Mehmet TÜMER**

In this study a design approach for the shape memory alloy springs upon linear theory has been presented. It is calculated for the alloy nitinol that the value of Young modulus of the austenite phase is about three to four times as large as martensite phase. In order to investigate the internal friction characteristics of the alloy mentioned above a nonlinear viscous damping model is presented as vibration control utilizing the high damping feature of the nitinol. Using the amplitude - frequency response curves of this model the hysteresis phenomenon can be explained more clearly with respect to the jumping frequencies observed during both forward and reverse martensite transformation. An another vibration control in the applications is the feature of its variable stiffness and this feature is also investigated in this study computing relative natural frequencies of a cantilever beam vibration system. It is seen that the stiffness of the sample over a range of the martensitic transformation temperatures is sensitive to the frequencies for some modes in vibration system.

Key Words: Martensite, Austenite, Phase transformation, Shape memory effect, Alloys

TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın yÖneticiliđini űstlenen ve her konuda bilgi ve yardımlarını esirgemeyen danıőman hocam Sayın Prof. Dr. Ali DOĐAN 'a sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Ayrıca Yűksek Lisansa baőladıđım gűnden beri tezin yazım, çizim, hatalarının tespiti ve dűzeltilmesinde yardımcı olan bÖlűműműz űđretim űyelerine, araőtırma gÖrevlisi arkadaőlarıma, aileme, eőime ve tűm emeđi geçenlere en içten saygılarımı ve teőekkűrlerimi sunarım.



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

NiTi : Nitinol

A : Austenite faz

M : Martensite faz

M_s : Austenite \rightarrow martensite dönüşümünde martensite başlama sıcaklığı

M_f : Austenite \rightarrow martensite dönüşümünde martensite yapının tamamlandığı sıcaklık

A_s : Martensite \rightarrow austenite dönüşümünde austenite başlama sıcaklığı

A_f : Martensite \rightarrow austenite dönüşümünde austenite yapının tamamlandığı sıcaklık

T : Sıcaklık

T_0 : İlk sıcaklık

a, b, f, g, h : Materyal sabitleri (Cory' nin modeli)

a_A, a_M : Faz dönüşümüne neden olan sıcaklıkla ilgili materyal sabitleri

b_A, b_M : Faz dönüşümüne neden olan zor'la ilgili materyal sabitleri

C_A, C_M : Faz dönüşümündeki zorun etkisi ile ilgili materyal sabitleri

F : Kuvvet

F_e : Normalize olmuş kuvvet

y_e : Normalize olmuş yer değiştirme

χ : Uzama miktarı

I : Eylemsizlik modülü

E : Young modülü

D : Elastik modülü

G : Shear (kesme) modülü

l_0 : Çubuğun ilk boyu

Δl : Çubuğun boyundaki uzama miktarı

B : Hacim modülü

V : Hacim

ΔV : Hacimde oluşan azalma miktarı

η : Viskozluk katsayısı

k : Yay sabiti

K : Wahl düzeltme çarpanı

K_c : Geleneksel yay sabiti

K_s : Şekil hatırlamalı alaşımın yay sabiti

R : Ortalama yay yarıçapı

r : Yayın yapıldığı telin yarıçapı

N : Toplam halka sayısı

T^* : Karakteristik zaman

U^* : Karakteristik uzunluk

A : Genlik

W : Frekans

δ : Sönüm katsayısı

μ : Poison oranı

ϕ : Kesme açısı

S : Entropi yoğunluğu

S : Şekil hatırlamalı alaşım telinin tesir kesit alanı

θ : Termoelastik tensör
 Λ : Genelleştirilmiş durum değişkeni
 ξ : Martensite kesri
 ξ_A, ξ_M : Şekil hatırlamalı alaşımların ilk martensite kesirleri
 Ω : Faz Dönüşüm tensörü
bcc: Cisim merkezli kübik yapı
fcc : Yüzey merkezli kübik yapı
fct : Yüzey merkezli tetragonal yapı
 α : Açısal sapma
A2 : Düzensiz ana faz yapısı (bcc)
 β_1 : DO₃ türü ana faz yapısı (bcc)
 β_2 : B2 türü ana faz yapısı (bcc)
 β_1' : 18R(1) {(21)₆} tipindeki martensite yapı
 β_1'' : 18R(2) {(1131)₃} tipindeki martensite yapı
 β_2' : 9R {(21)₃} tipindeki martensite yapı
M9R : Modife olmuş 9R martensite yapı
M18R : Modife olmuş 18R martensite yapı
 x_a, y_a, z_a : Austenite yapıyı tanımlayan örgü sisteminin eksenleri
 x_m, y_m, z_m : Martensite yapıyı tanımlayan örgü sisteminin eksenleri
 ρ : Elektriksel direnç
 ρ : Akı yoğunluğu
 ε : Zorlanma
 $\bar{\varepsilon}$: Green zorlanması
 ε_{res} : Zorlanma kalıntısı
 M_d : Zor yardımcı olmayan martensitik faz dönüşümünün ötesinde bir sıcaklık
 σ : Zor
 τ : Kesme zoru
 σ_e : Elastik zor
 σ_{eq} : Eşdeğer zor
 σ_y : Akma zoru
 $\bar{\sigma}$: Piola – Kirchoff zoru
 σ_T^{P-M} : Ana fazdan martensite faza dönüşümü başlatan zor eşiği
 σ_T^{M-P} : Martensite fazdan ana faza dönüşümü başlatan zor eşiği
 σ_Y^P : Katının akma noktasına karşı gelen zor eşiği (akma zoru)
 Q^{-1} : İç kayıp faktörü
 $\Psi(\Lambda)$: Helmholtz serbest enerjisi
U : İç enerji yoğunluğu
q : İç ısı kaynağı
 q_{sur} : Çevre ısı akısı
 $k_n L$: Titreşim frekansı
n : Mod
P.E. : Yapma elastiklik
S.E. : Süper elastiklik
SMA : Şekil hatırlamalı alaşımlar
SMO : Şekil hatırlama olayı

ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 1.1: Martensitik dönüşüm tiplerinin genel karakteristikleri.

Tablo 1.2: Şekil hatırlama ve yapma elastiklik gösteren alaşımlar (Miyazaki ve Otsuka, 1989).

Tablo 4.1: Nitinol Şekil hatırlama alaşımı için materyal parametreleri (Liang, 1990).

Tablo 4.2: Çubuk sisteminin ilk beş mod için bağıl frekansı.



T.C. YÜKSEKÖĞRETİM BAKANLIĞI
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ŞEKİLLER DİZİNİ

- Şekil 1.1:** Uzama esnekliği ve zor – zorlanma ilişkisini veren şematik resim.
- Şekil 1.2:** Kiriş ve eğilme esnekliğinin şematik resmi (Serway, 1996).
- Şekil 1.3:** Kesme işlemi.
- Şekil 1.4:** Sıkıştırma işlemi.
- Şekil 1.5:** İki katı yüzey arasındaki sıvı tabakası.
- Şekil 1.6:** Bir kübik örgünün deformasyon örnekleri.
- Şekil 1.7:** Martensite miktarının sıcaklığa göre değişimi.
- Şekil 1.8:** Şekil hatırlamalı alaşımların zor – zorlanma eğrilerinin şematik resmi.
- Şekil 1.9:** Nitinol alaşımına ilişkin zor – zorlanma eğrisi (Liang ve Rogers, 1993).
- Şekil 1.10:** Şekil hatırlama alaşımlarına ilişkin yapay esneklik olaylarının şematik diyagramı.
- Şekil 1.11:** Bain distorsiyonu (a) yüzey merkezli kübik örgü (fcc) ve içinde cisim merkezli tetragonal (bct) birim hücre, (b) bct hücrenin Bain zorlanmasından önceki boyutları ve (c) Bain zorlanması sonucunda bct hücrenin boyutlarındaki değişim.
- Şekil 1.12:** Martensite dönüşümünün difüzyonsuz tabiatına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişim.
- Şekil 1.13:** AuCd ve FeNi de görülen martensitik dönüşümlerin histeresis eğrileri (Wechsler, 1985).
- Şekil 1.14:** Cu – 38.8 %Zn alaşımında termoelastik martensite dönüşümünde elektriksel direncin sıcaklıkla değişimi (Wechsler, 1985).
- Şekil 1.15:** CuZnAl alaşımında ısıtma ve soğutma sonucunda martensite oluşumu ve kayboluşunu gösteren optik mikroskop filmleri, a → d soğutma esnasında martensite oluşumu, e → f ise ısıtma çevrimi esnasında martensite plakaların kayboluşunu göstermektedir (Zhang ve Hombogen, 1987).
- Şekil 1.16:** B2 türü β_2 ana fazdan ortaya çıkan periyodik yığılma yapıları martensite içindeki sıkı paket düzlemlerinin 3 tipi (Miyazaki ve Otsuka, 1989).
- Şekil 1.17:** DO₃ türü β_1 ana fazdan ortaya çıkan periyodik yığılma yapıları martensite içindeki sıkı paket düzlemlerinin 6 tipi (Miyazaki ve Otsuka, 1989).
- Şekil 1.18:** Şekil 1.16 ve 1.17 de gösterilen sıkı paket düzleminin farklı yığılmalarıyla oluşan martensite yapıları (Miyazaki ve Otsuka, 1989).
- Şekil 1.19:** Şekil hatırlama olayında zor – zorlanma ve sıcaklık ilişkisi.
- Şekil 1.20:** Şekil hatırlama olayı için akış diyagramı (Wayman, 1984).
- Şekil 1.21:** (a) Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak termoelastik martensite ters dönüşümü, (b) Şekil hatırlama olayı (Delaey ve ark., 1974).
- Şekil 1.22:** Şekil hatırlama olayının şematik gösterimi (Otsuka ve Shimizu, 1986).
- Şekil 1.23:** Tek yönlü şekil hatırlama olayı.
- Şekil 1.24:** Çift yönlü şekil hatırlama olayı
- Şekil 1.25:** $T_l > A_f$ sıcaklığında gerçekleşen yapma – esneklik ile ilgili şematik zor – zorlanma eğrisi (Krishnan ve ark., 1974).
- Şekil 1.26:** Şekil hatırlama olayı ile ilgili zor – zorlanma eğrisinin şematik gösterimi. (a) Deformasyon şeması, (b) numune ısıtılırken şeklin yeniden kazanılması (Krishnan ve ark., 1974).

- Şekil 1.27:** Şekil hatırlamalı alaşımlarda termomekanik olarak çift yönlü şekil hatırlama olayının sıcaklık – zor – zorlanma eğrisi (Hornbogen, 1988).
- Şekil 1.28:** Cu esaslı alaşımdan yapılmış bir kangalın çift yönlü şekil hatırlamalı dönüşüm mekanizması (Friend, 1986a).
- Şekil 1.29:** Isıtma ve soğutma işlemleri esnasında kangal boyunun sıcaklıkla değişimi (Friend, 1986).
- Şekil 3.1:** Nitinol'ün Young modülünün sıcaklığa bağlı grafiği (Cross ve ark., 1970).
- Şekil 3.2:** Çeşitli başlangıç zorlanmalarında sıcaklığa karşı yeniden kazanılan (recovery) zorlar (Cross ve ark., 1970).
- Şekil 3.3:** Çeşitli zorlanma genlikleri için Cu – Zn – Al şekil hatırlama alaşımının sıcaklığa karşı kayıp (loos) faktörü (Dejonghe ve ark., 1977).
- Şekil 3.4:** Uygulanan zorun geçiş sıcaklıklarına göre şematik resmi (Liang ve Rogers, 1990).
- Şekil 3.5:** (a) Bir yayın elamanı ve (b) bu elamanın kesiti.
- Şekil 4.1:** Şekil hatırlamalı alaşım yayının değişik sıcaklıklarda normalize edilmiş kuvvet – yer değiştirme eğrisi (Liang ve Rogers, 1993).
- Şekil 4.2:** Şekil hatırlamalı alaşım yayının sıcaklık – yay sabiti ilişkisinin şematik gösterimi (Liang ve Rogers, 1993).
- Şekil 4.3:** Sönüm katsayısının, δ , çeşitli değerleri için genlik – frekans tepki eğrileri.
- Şekil 4.4:** Şekil hatırlama alaşımlarına eşlik eden histeresis eğrisi.
- Şekil 4.5:** Lineer olmayan terim katsayısı, $\epsilon = 0$ ve sönüm katsayısı $\delta = 0.5$ için genlik – frekans tepki eğrileri.
- Şekil 4.6:** Lineer olmayan terim katsayısı, $\epsilon = 0.1$, sönüm katsayısı $\delta = 0.1$ ve sürücü kuvvetin çeşitli değerleri için genlik – frekans tepki eğrileri.
- Şekil 4.7:** Lineer olmayan terim katsayısının, ϵ , çeşitli değerleri için genlik – frekans tepki eğrileri.
- Şekil 4.8:** Bir ucu sabit, diğer ucu şekil hatırlama alaşımından yapılmış bir yayın bağlı bulunduğu bir titreşim sistemi.
- Şekil 4.9:** Destek olarak kullanılan şekil hatırlama alaşımından yapılmış bir yayın bağlı sertliğini çeşitli n değerleri için sistemin doğal frekanslarına göre değişimi.

1.GİRİŞ

Genel olarak, martensitik dönüşümler austenite faz veya ana faz olarak adlandırılan dönüşüm öncesi kristal yapının dışarıdan sıcaklık, zor veya her iki faktörün beraber uygulanmasıyla yeni bir faz olan martensite yapıya dönüşmesiyle gerçekleşir. Martensite kristal yapının hem iç ikizlenmeleri ve kusurları hem de farklı kristal yapıları kapsadığı anlaşıldıktan sonra, bir çok materyalde termoelastik davranışın genel bir tanımını yapmak mümkün olmuştur (Olson ve Cohen, 1975 Ling ve Owen, 1981; Ortin ve Planes, 1988). Bütün durumlarda ana faz tek kristali, martensite varyantlarının kendi içinde uyumlu bir şekilde düzenlemelerini oluşturur. Her biri tek kristal olan martensite varyantları, her gruptaki ortalama şekil zorlanması sıfır olan ve her biri dört varyanttan oluşan altı grup ile karakterize edilir (Saburi ve ark., 1979; Portek ve ark., 1993).

Şekil hatırlamalı alaşımların önemli temel özellikleri, kritik bir dönüşüm sıcaklığının altında ve üstünde iki ayrı şekil ve konfigürasyon göstermeye yatkın olmalarıdır. Kristaloğrafik yapılarıdaki değişimler boyutlardaki değişimle bağlantılıdır. Alaşım, düşük ve yüksek sıcaklık şekillenimlerine sahip olmalıdır (Funakubo, 1986).

Şekil hatırlamalı alaşımlar, şekil hatırlama olayı ve sönüm (damping) özellikleri gibi bir çok özelliklere sahiptir. Şekil hatırlamalı alaşımların yüksek sıcaklık austenite'nin Young modulünün değeri düşük sıcaklık martensite'ninkinden yaklaşık olarak 3-4 kat daha büyük olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı, şekil hatırlamalı alaşımlardan yapılmış bir yay, kendi yay sabitini değiştirebilir. Bu sebeple şekil hatırlama olayı yüksek damping kapasitesine sahiptir ve bu tip düzeneklerde kullanılması uygun olmaktadır.

1.1. Katuların Esneklik Özellikleri

Uygulanan kuvvetin büyüklüğü ile orantılı olarak şekil değiştiren malzeme, kuvvetin kalkması halinde eski şeklini alabiliyorsa, böyle cisimlere esnek cisimler, bu özelliğe de esneklik adı verilir.

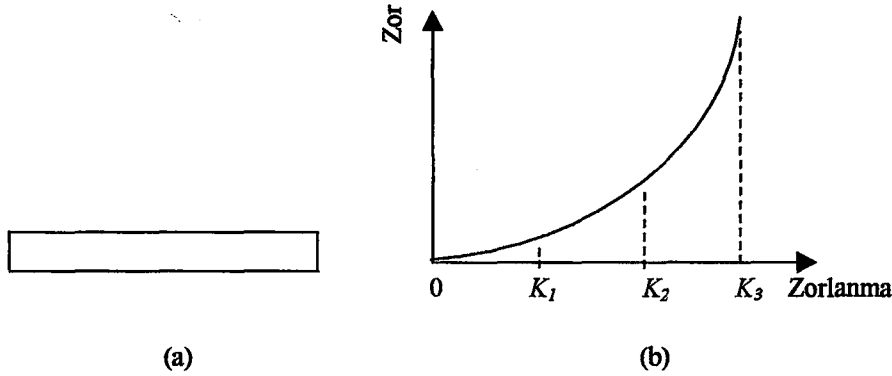
Bir ucu sabit bir telin ucuna farklı kütleler asıldığında, telin asılan kütlelerle orantılı olarak uzadığı görülür. Bu durum belli bir sınıra kadar devam eder. Cisimlerin esneklik özelliğini yitirmeye başladıkları bu sınıra esneklik sınırı denir. Bu sınır aşılmadığı sürece şekil değiştirme Hooke Kanunu'na uyar.

Hooke Kanunu;

$$F = -kx \quad (1.1)$$

olup şekil değişikliği bunu oluşturan kuvvetin şiddetiyle doğru orantılıdır. Burada k telin yay sabitini, F tele uygulanan kuvveti ve x ise telde meydana gelen şekil değişikliğini belirtir.

1.1.1. Uzama Esnekliği ve Esneklik Katsayısı (Young Modülü)



Şekil 1.1: Uzama esnekliği ve zor – zorlanma ilişkisini veren şematik resim.

Şekil 1.1(b) de K_1 , K_2 ve K_3 sırasıyla esneklik, akma ve kopma noktalarını temsil etmektedir.

Young modülüne katının, uzunluğundaki bir değişmeye karşı göstermiş olduğu direncin bir ölçüsü olarak tanımlanabilir ve

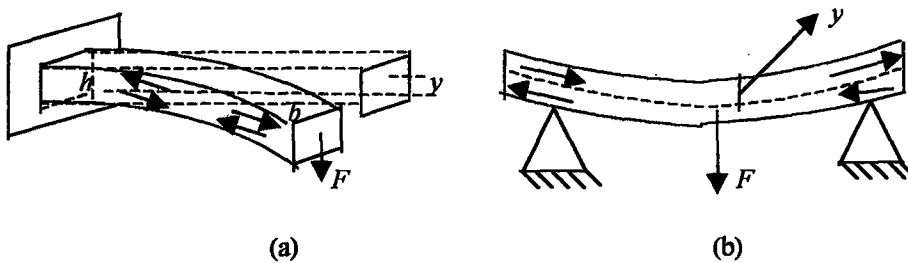
$$E = \text{Zor} / \text{Zorlanma}$$

$$E = \frac{F/S}{\Delta l/l_0}$$

$$E = \frac{F l_0}{S \Delta l} \quad (1.2)$$

olarak yazılır. Denklem (1.2) de zor ve zorlanma sırasıyla katı cismin birim kesitine düşen kuvvet ve cismin şekil değişikliğinin bir ölçüsüdür. Denk. (1.2) deki diğer niceliklerden E Young modülü, S çubuğun kesiti, l_0 çubuğun ilk boyu ve Δl ise kuvvetin etki etmesi halinde çubuğun boyunda meydana gelen değişimdir.

1.1.2. Eğilme



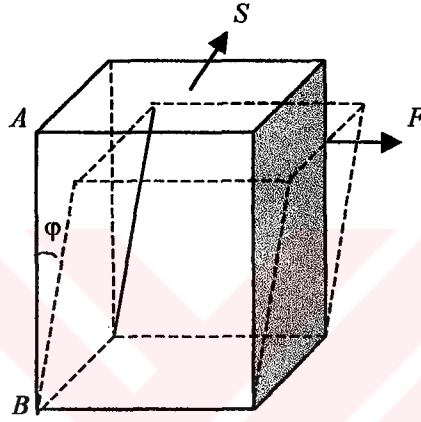
Şekil 1.2: Kiriş ve eğilme esnekliğinin şematik resmi (Serway, 1996).

Şekil 1.2 de görülen kesikli çizgi nötr lifi temsil etmektedir.

$$y = \frac{4 \ell^3}{E b h^3} F \quad (1.3)$$

Burada b , h ve y sırasıyla çubuğun eni, boyu ve eğilme miktarıdır. y , h^3 ile ters orantılı olduğundan kirişin üst kısmı uzarken alt kısmı daralır. Nötr lif denem orta kesimin uzunluğu ise değişmez.

1.1.3. Kesme Esnekliği (Makaslama) ve Makaslama Modülü



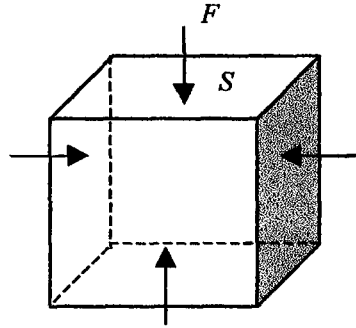
Şekil 1.3: Kesme işlemi. Şekilde görülen kuvvet S yüzeyine paralel uygulanmıştır (Serway, 1996).

Şekil 1.3 de görülen katı yatay S yüzeyine paralel olacak şekilde bir F kuvveti uygulanırsa

$$G = \frac{F/S}{\varphi} \quad (1.4)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada φ kesme açısı, F/S kesme zoru ve G kesme modülüdür.

1.1.4. Hacim Esnekliği ve Sıkışma Modülü



şekil 1.4: Sıkıştırma işlemi. Kúp biğimindeki katıya uygulanan kuvvetler bütün yüzeylere dik ve iğeri doğrudur (Serway, 1996).

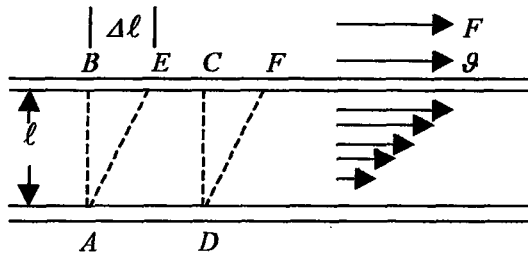
şekil 1.4 de görülen katı yüzeylerine dik olarak F kuvvetleri uygulanması halinde;

$$B = \frac{F V}{S \Delta V} \quad (1.5)$$

şeklinde bir bağıntı yazılabilir. Burada B hacim (bulk) modülü, V hacim, ΔV hacimde oluşan azalma miktarı, F/S zor ve $\Delta V/V$ ise sıkışmayı temsil etmektedir.

1.1.5. Viskozluk

Bir sıvıya kesme zoru uygulanamayacağından dolayı sıvının kesme hareketine karşı gösterdiği dirence viskozluk adı verilir. Viskozluk, komşu sıvı tabakalarının birbiri üzerinden kaymalarından ve sürtünmeden dolayı ortaya ıkar.



şekil 1.5: İki katı yüzey arasındaki sıvı tabakası. şekildeki alt yüzey sabit ve üst yüzey v hızı ile hareket etmektedir (Serway, 1996).

şekil 1.5 de iki paralel tabakaya bir F dış kuvveti uygulanırsa tabakalardan biri sağa doğru hareket eder. Fakat diğerisi sabit kalır. Bu hareket nedeniyle sıvının bir kısmının ilk şekli olan $ABCD$ bozulur ve kısa bir zaman aralığından sonra $AEFD$ şeklini alır. şekildeki üst levha v hızı ile hareket ederken bu levhaya komşu olan sıvı da aynı hıza sahip olur. Böylece Δt süresi içinde üst levhadaki sıvı, Δx kadar yol alır.

$$\Delta l = \mathcal{G} \Delta t \quad (1.6)$$

Birim zamandaki zorlanma

$$\text{Kesme Zoru} = F/S$$

$$\text{Kesme Zorlanması} = \Delta l/l$$

$$\frac{\Delta l/l}{\Delta t} = \frac{\mathcal{G}}{l}$$

$$\eta = \frac{F/S}{\mathcal{G}/l}$$

$$\eta = \frac{F l}{S \mathcal{G}} \quad (1.7)$$

Burada η , viskozluk katsayısını ve \mathcal{G}/l ise hız gradiyentini temsil eder.

1.2. Faz Geçişleri

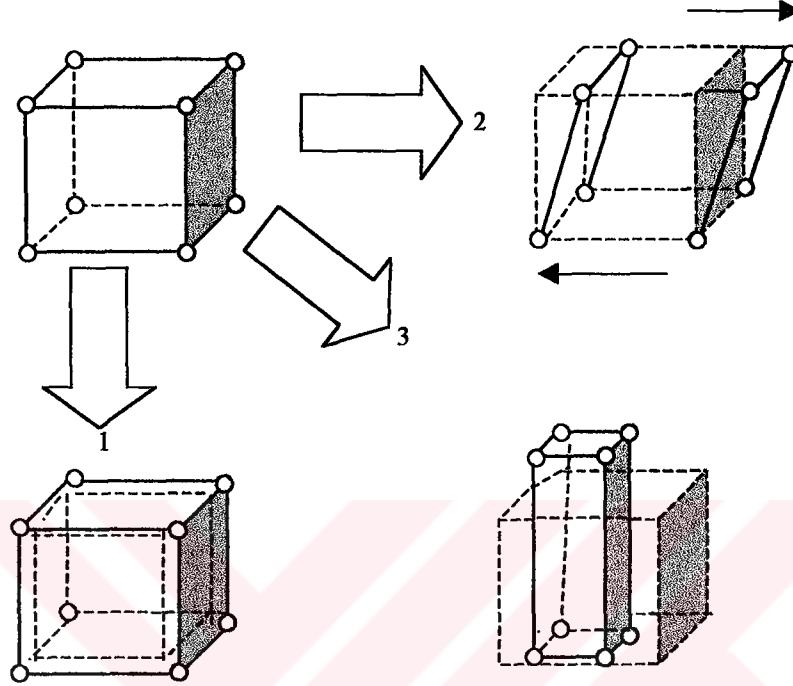
Faz geçişinin ne olduğunun tanımlamak istersek, dış bir etki ile maddenin özelliklerinde meydana gelen değişikliklere diyebiliriz. Örnek olarak sıvı fazdan gaz faza yada gaz fazdan sıvı faza geçiş sıvı – gaz geçişine örnektir. Homojen olarak dizilmiş atomlar belirli bir fazı oluştururlar. Fakat şartlar değişirse denge bozulur. Atomlar başka bir denge konumuna geçip değişik biçimde dizilerek yeni bir faz oluştururlar. Fazların oluşumunda ve dönüşümünde sıcaklık, basınç ve bileşim gibi üç ana etken söz konusudur. Saf cisimler tek bileşenli ve en basit yapıli sistemlerdir. Sıcaklık ve basınca bağıli olarak katı, sıvı ve gaz halinden birisinde bulunurlar. Birden fazla atom içeren çok bileşenli sistemlerin dengesi oldukça karmaşıktır. Sıcaklık ve basıncın yanında bileşim de iç yapı oluşumunu etkiler. Bunlar değiştiği zaman değişik tür fazlar meydana gelebilir (Verhoeven, 1975; Robert ve Reed., 1964).

1.2.1. Martensitik Faz Dönüşümleri

Martensite ismi söndürülmüş çelikteki küçük sert mikro bileşenleri ilk önce Alman Metalurjist Adolf Martens'in keşfetmesi şerefine 1895 yılında kendi adıyla ilgili olarak "Martensite" adı verildi (Nishiyama, 1978). Martensite çelikte olduğu gibi ürünün sert olması gereksinimi olmaksızın, Martensitik Faz Dönüşümü olarak bilinen katılarda bir çeşit faz dönüşümünün ürün fazını tanıtan bir isim olarak kullanılmaktadır. Çelik literatüründeki ismini koruyarak ana faza ise Austenite (Robert Austen'den sonra) adı verilir. Martensite Faz Dönüşümü, metal ve alaşımlardaki faz dönüşümlerinde ortak olan hacim değişimine ilaveten bir de şekil

değişiminin eşlik ettiği, yer değiştirmesiz (displacive), örgü – bozulmalı, (lattice – distorted) birinci mertebeden difüzyonsuz bir atermal dönüşümdür.

Ötelemeli (displacived) faz dönüşümü atomlar arası mesafenin bir kesri kadarlık bir mesafe içerisinde atomların topluca hareketi yoluyla meydana gelmesidir.



Şekil 1.6: Bir kübik örgünün deformasyon örnekleri. (1) Üç doğrultuda bir genişleme örgüyü büyük örgü parametrelili bir başka yapıya dönüştürür, (2) (001) düzlemi boyunca kesme monoklinik bir yapı oluşturur ve (3) [100] ile [010] doğrultularındaki daralma [001] doğrultusundaki bir genişlemeye birleştirilirse bir ortorombik yapıya yol açar.

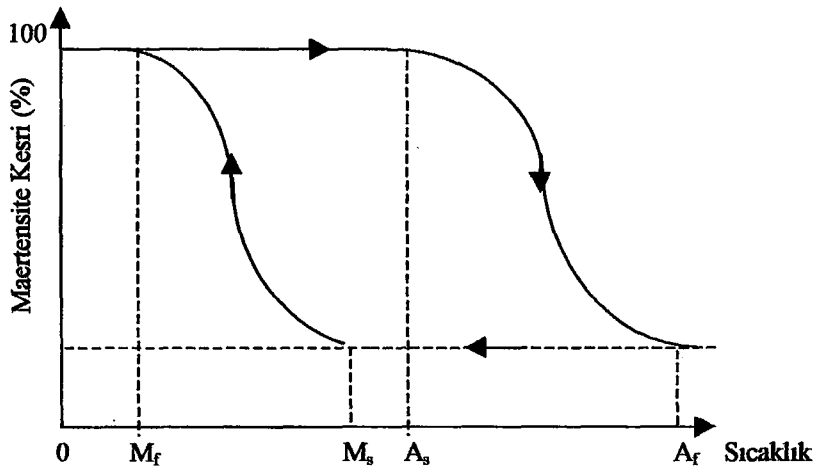
Şekil 1.6 da gösterildiği gibi, başlangıç yapının bir sıcaklık bölgesi üzerinden bozulması (distorsiyonu), bütün hacimi böyle bir sıcaklık bölgesi sonunda son yapıya taşır. Bu ikinci mertebeden dönüşümlerin bir karakteristiğidir. Austenite'nin çeşitli kısımları martensitik yapıya farklı zamanlarda böylece de farklı sıcaklıklarda dönüşmesi durumunda faz dönüşümü heterojen olur. Böylece verilen herhangi bir sıcaklıkta austenite ve martensite fazları faz dönüşümü bölgesi içinde birlikte bulunur ki bunlar birinci mertebeden faz dönüşümlerinin karakteristiklerinden bazılarıdır. Yer değiştirme şeklindeki dönüşümlerde örgüdeki bir atom diğeri ile yer değiştirir ve birçok veya birkaç atom mesafesi kadar uzak mesafeler boyunca atomların difüzyonu meydana gelir yada termal olarak atomik hareketlere neden olunur. Bu durumun tam tersine martensitik faz dönüşümleri difüzyonsuz olarak bilinir. Atomların birbirlerine göre bağıl konumları her fazda farklı olmakla beraber, austenite'de bulunan bir atomun çevresindeki atomlar martensite fazda da muhafaza edilmektedir. Bu nedenle iki yayda daha fazla atomlu bir alaşımda martensite'nin bileşimi yine aynı olmalıdır.

Difüzyonlu faz dönüşümleri zaman ve sıcaklığa bağlıdır. Tersine, çoğu alaşımlardaki martensitik dönüşüm atermal olup sadece sıcaklık değiştiğinde oluşur. Bu nedenle belli bir zamanda dönüşen hacim miktarı sadece sıcaklığa bağlıdır. Difüzyonsuz ve atermal yapısı nedeniyle, austenite'den martensite faz dönüşümü soğutma ile oluşturulur. Prensip olarak mutlak sıfır noktasındaki sıcaklıklarda bile martensite yapı gözlenebilir. Bu dönüşüm işlemi elektriksel direnç gibi faz dönüşümüne duyarlı bir özellik ile izlenebilir.

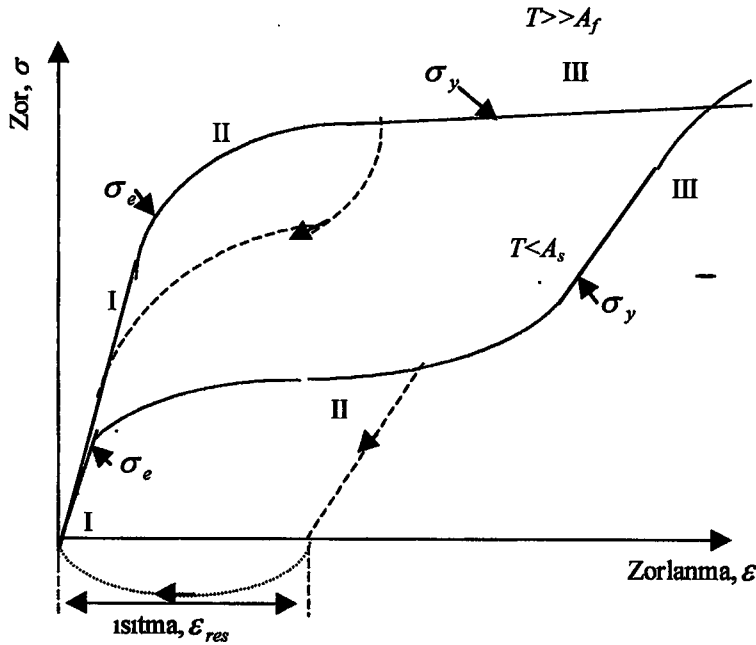
Bir yüksek sıcaklık austenite fazında bulunan çelik, soğumaya bırakılırsa birden bire sertleştiği görülür. Parlatılma ve biçimlendirilme işlemlerinden sonra, numune mikroskop altında incelenirse, çok ince bir yapı gözlenir. Bu yapıya martensite adı verilmektedir. Daha sonra kesme deformasyonunu içeren bu martensitik dönüşümün kristal yapı işbirlikçi atomik hareketi yüzünden yayılmadığı ortaya çıktı. Bu faz dönüşümüne bir şekil değişikliği eşlik eder (yüzey kabartması) (Friend, 1986a). Çeşitli maddelerin martensitik faz dönüşümü sırasında, ana fazının kristal yönelimlere bağlı olarak farklı miktarlarda yüzey kabartmaları vardır. Şekil hatırlama alaşımlarının da çeliğe benzer şekilde martensitik dönüşümleri vardır, ancak karakteristik geçiş sıcaklığı çeliğinkinden çok daha düşüktür. Şekil hatırlama alaşımlarının martensitik dönüşümü esnasında düşük faz dönüşüm sıcaklığı ve büyük miktarda yüzey kabartması, şekil hatırlama olayının deformasyon mekanizmasında önemli bir rol oynar.

Martensitik dönüşüm şekil hatırlama alaşımlarının temel karakteristikleridir ve şekil hatırlama alaşımlarının bütün özelliklerini içermektedir. Martensitik dönüşüm, martensite hacimindeki değişimin sıcaklık değişimine basit bir şekilde bağlı olması dikkate alınarak, Şekil 1.7 de basitçe gösterilebilir. Martensite bitiş (M_f), başlama (M_s), austenite başlama (A_s) ve bitiş (A_f) gibi dört önemli sıcaklığa sahiptir ve uygulanan zorun fonksiyonlarıdır. Eğer zor uygulanırsa Şekil 1.7 de gösterilen dönüşüm histeresisi sağa doğru kayacaktır.

Çelik gibi sıradan maddeler, materyalin davranışını önemli derecede etkileyebilen işlem yapılan sıcaklık aralığında faz dönüşümlerini içermezler. Şekil hatırlama alaşımlara faz dönüşümlerinin eşlik etmesinden dolayı, mekaniksel özellikleri mühendislik malzemelerinden önemli ölçüde farklıdır.



Şekil 1.7: Martensite miktarının sıcaklığa göre değişimi.

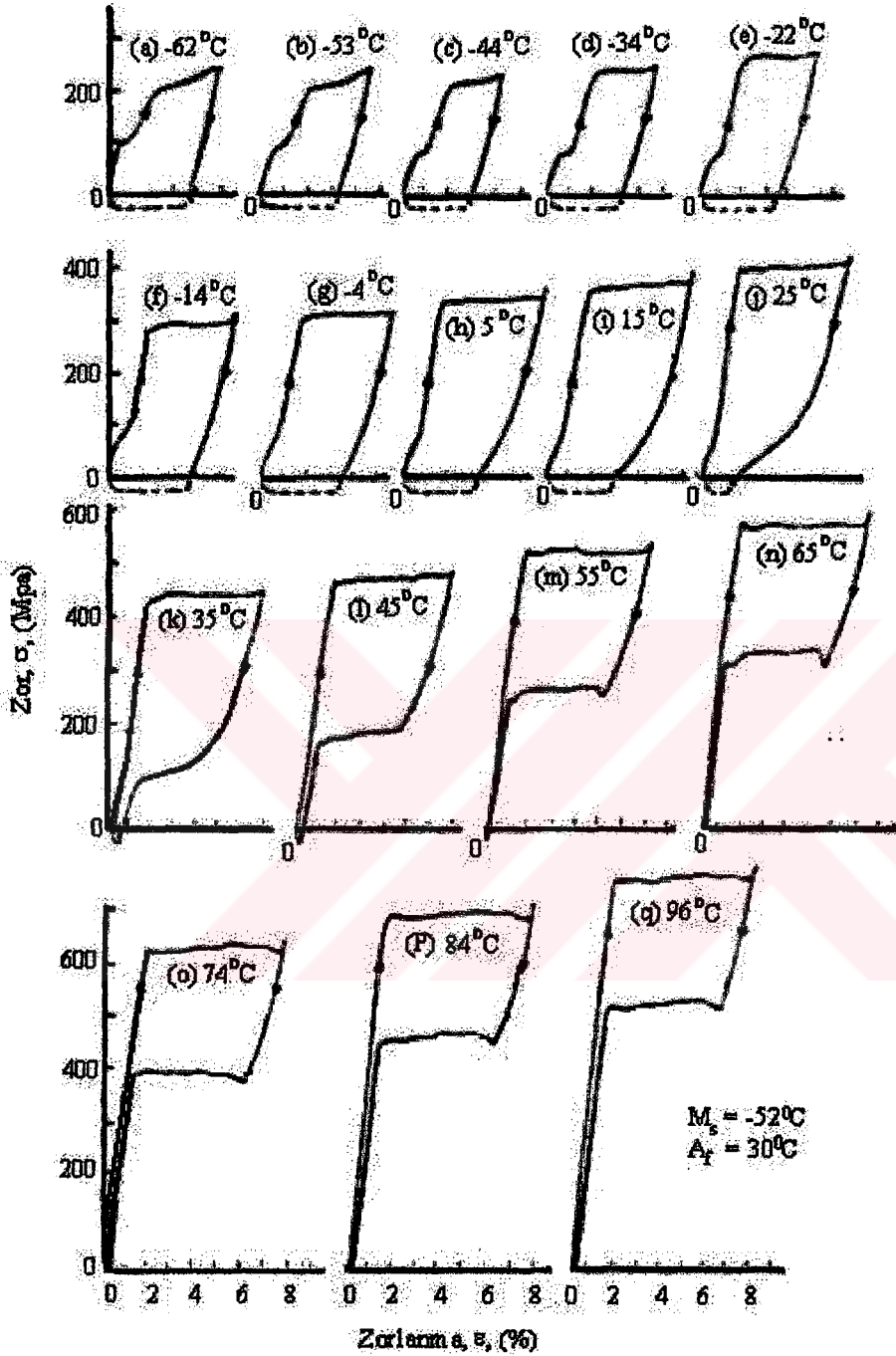


Şekil 1.8: Şekil hatırlamalı alaşımların zor-zorlanma eğrilerinin şematik resmi.

Şekil 1.8 de şekil hatırlamalı alaşımların zor – zorlanma – sıcaklık ilişkileri şematik olarak gösterilmiştir. Eğer sıcaklık A_s den daha düşük ise şekil hatırlamalı alaşımları elastik limitin, σ_e , üstünde yüklemek suretiyle, Şekil 1.8 de gösterilen II. bölgede iç martensitik faz dönüşümüne sebep olur yani austenite'den martensite bir dönüşüm gerçekleşmiş olur.

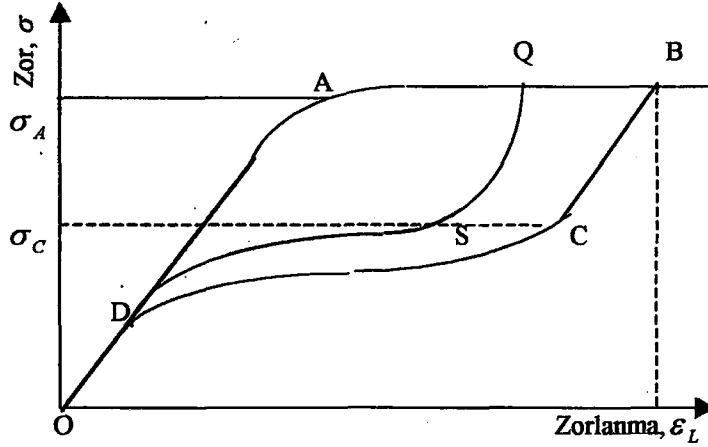
Şekil hatırlama alaşımlarının σ_y gibi değer (akma zoru) üzerinde sürekli olarak yüklenmesi şekil hatırlamalı alaşımlarda (III. bölge) bir plastik distorsiyona neden olur. Eğer şekil hatırlama alaşımı II. bölgede yükten uzaklaştırılırsa şekil hatırlamalı alaşım numunesi A_s nin üzerinde ısıtıldığı zaman zorlanma kalıntısı (residual strain), (ϵ_{res}), ortaya çıkmaya başlar. Sıcaklık A_f ye ulaştığı zaman ise zorlanma kalıntısının tamamı yeniden elde edilir. Eğer çevre ısı A_s nin çok üstünde, M_d nin altında ise zorlanma durumundaki şekil hatırlama alaşımı Şekil 1.8 de görüldü gibi I, II ve III. işlemlerine maruz kalacaktır ve yükten uzaklaştırma işlemi Şekil 1.8 de gösterildiği gibi, hem elastik yükten uzaklaştırma hem de lineer olmayan şekil hatırlama olayından ibaret olacaktır. Bu olaya suni elastiklik veya süper elastiklik denir.

Burada M_d zor – yardımcı olmayan martensitik faz dönüşümünün ötesinde bir sıcaklığı belirtmektedir. Bazı durumlarda dönüşüm histeresisi 10 – 50 K kadar küçük iken bazı durumlarda da 100 – 300 K kadar büyüktür. Dönüşüm histeresisi 10 – 50 K kadar küçük olana termoelastik, dönüşüm histeresisi 100 – 300 K kadar büyük olana ise termoelastik olmayan faz dönüşümü olarak isimlendirilir. 1.5 K kadar olan NiTi alaşımlarında ise tek bir durum vardır. Buna R – faz dönüşümü adı verilir. NiTi alaşımları da termoelastik dönüşüm söz konusu olup bu değer 30°C kadardır.



Şekil 1.9: Nitinol alaşımına ilişkin zor – zorlanma eğrisi (Liang ve Rogers, 1993).

Şekil 1.9 da zor – zorlanma eğrileri takımı, martensitik faz dönüşümüne uğrasa bile, esneklik zor sınırı ile akma zoru arasında açıkça düz bir bölgeye sahip olmadığına dikkat edelim. Şekil 1.9 çeşitli sıcaklıklarda bir şekil hatırlamalı alaşımın tamamen yüklenmesi ve yükün iptal edilmesi işlemlerini göstermektedir.



Şekil 1.10: Şekil hatırlama alaşımına ilişkin yapay esneklik olaylarının şematik diyagramı.

Yapay esneklik (pseudoelastic) olayının temel özellikleri Şekil 1.10 da özet olarak gösterilmiştir. Bu şekilde görülen $|OA|$, $|BC|$ ve $|DO|$ çizgileri elastik yüklenmeyi ve yüklenmenin iptal edilmesi işlemlerini göstermektedir. Yükleme işlemlerinin $|AB|$ kısmı martensitik faz dönüşümüne karşılık gelmekte (austenite'den martensite) yüklenmenin iptali işleminin $|CD|$ kısmı ise ters faz dönüşümüne karşılık gelmektedir (martensite'den austenite). A, B, C ve D zor değerleri bir yapay esneklik şekil hatırlama alaşımı için materyal sabitleri olarak dikkate alınabilir. B ve C nin zorlanma değerleri ise ancak % 7 büyüklükte olabilir. Histerisisi nedeniyle enerji kaybını alelade alaşımlardan elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında anlamlı olduğu görülebilir.

Elastik olmayan şekil hatırlama alaşımlarının sönüm karakteristikleri plastik bozulmaya (deformasyon) uğrayan materyallerinkinden farklıdır. Plastik zor – zorlanma histeresisini sınırlı bir yorgunluk ömür süresine neden olarak, bir iç zarar (damage) ortaya çıkaracağı kaçınılmaz olur.

Lineer olmayan histeresisin metalurjik olarak geriye dönebilmesi (reversible işlem) ve malzemeye deformasyondan çok daha az “tahribat“ vermesi dolayısıyla, yapma – esnek şekil hatırlama alaşımı nispeten büyük bir yorgunluk (fatigue) şiddetine sahip olur. Bununla birlikte, bir dönüşümde özellikle de büyük bir deformasyon (% 4 – 6 kadar) uygulandığı zaman daima atomların düzeninde yerleşme bozuklukları (dislokasyonlar) söz konusu olmasından dolayı yapma – esneklik şekil hatırlama alaşımının yorulma ömrü (fatigue life) bir hayli sınırlıdır. Genel olarak, bir Nitinol'e %2 kadar bir deformasyon uygulanırsa, şekil hatırlama özelliğini kaybetmeksizin yada yorgunluk nedeniyle tahribata uğramış olarak, Nitinol'den yapılmış bir şekil hatırlama alaşımı milyonlarca defa kullanılabilir.

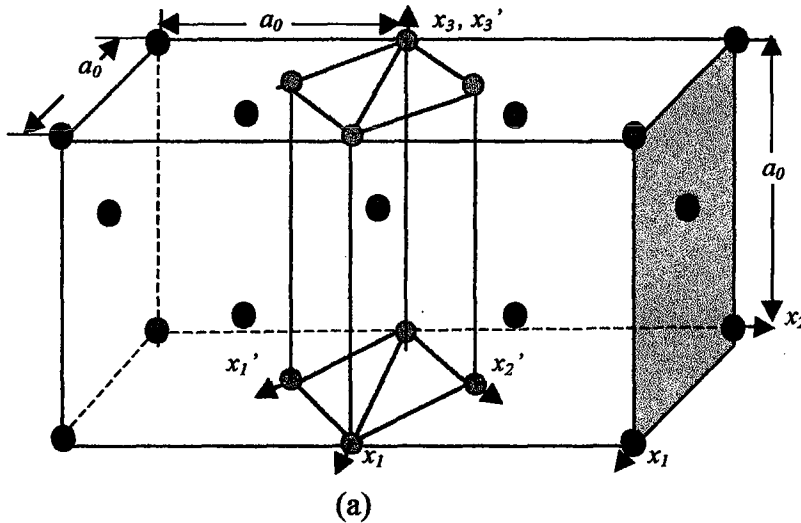
1.2.2. Martensitik Faz Dönüşümlerinin Geometrik Özellikleri

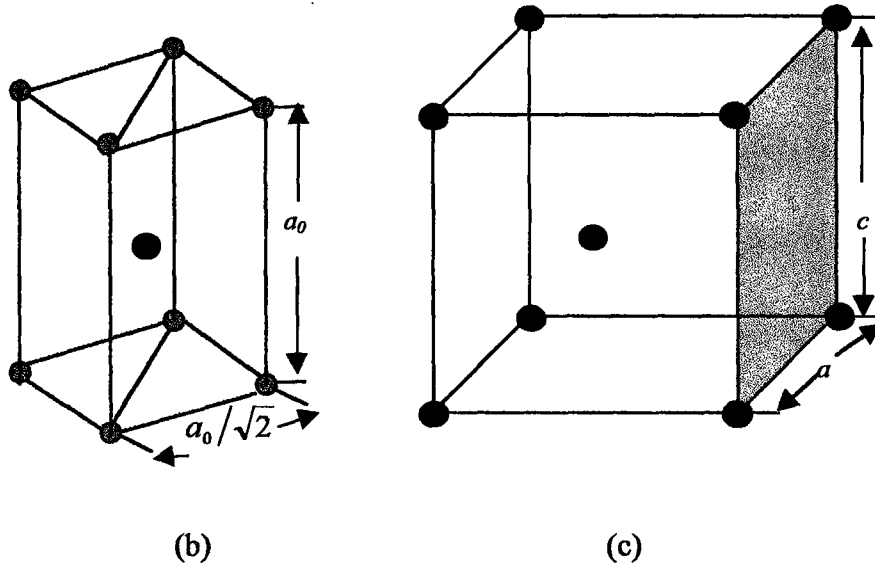
Martensitik dönüşüm, ana (austenite) ve ürün (martensite) fazları ayıran ara yüzeyin ses hızı ile ilerleyerek yeni bir ürün kristal yapının meydana gelmesiyle oluşur. Ana fazdan ürün fazın elde edilmesine eşlik eden şekil değişimi austenite yapı üzerinde bir kabartı şeklinde gözlenir. Bu kabartı martensite'nin varlığını gösteren önemli bir özelliktir. Austenite ve martensite kristallerin ortak yüzeyi olan ara yüzey, yerleşme (habit düzlemi) olarak bilinmektedir. Martensite yapı bu habit düzlemi üzerine oturur. Söz konusu bu düzlem her iki faza ait olduğundan, yüzey dönüşüm sırasında değişmez (invariant) olarak kalır ve bu düzlem üzerindeki doğrultular değişmezler.

Yapının yeni bir faza dönüştüğünü gösteren yüzey kabartıları, ana ve ürün fazın kristal yöntemlerinin aynı olmadığını göstermektedir. Bu sebeple ana ve ürün fazlar arasında bir yönelim bağımlılığı vardır. Başka bir deyişle martensite kristaldeki düzlem ve doğrultular, austenite'deki durumlarına göre bir miktar dönmüştür. Bu yönelme bağıntısı austenite fazdaki örgünün sıkı-paketlenme düzleminin martensite fazdaki örgünün sıkı-paketlenme düzlemlerine ve austenite örgünün sıkı-paketlenme doğrultusunun martensite fazdaki örgünün doğrultusuna paralel olması ile açıklanabilir. Bu düzlem ve doğrultunun dışındaki diğer düzlem ve doğrultular kesin olarak ilk konumlarına dönüşürler.

1.2.3. Martensitik Dönüşümün Kristaloğrafisi

Martensitik faz dönüşümünde, atomların komşuluklarını koruyarak bir kristal yapıdan diğerine nasıl geçileceğini açıklayan ilk model E.C. Bain tarafından ileri sürülmüştür. E.C. Bain'in bu modelinde, yüzey merkezli kübik örgünün hacim merkezli kübik yada hacim merkezli tetragonal örgüye dönüşümü Şekil 1.11 deki gibi açıklanabilir.





Şekil 1.11: Bain distorsiyonu. (a) Yüzey merkezli kübik örgü (fcc) ve içinde cisim merkezli tetragonal (bct) birim hücre, (b) bct hücrenin Bain zorlanmasından önceki boyutları ve (c) Bain zorlanması sonucunda bct hücrenin boyutlarındaki değişim.

Buna göre atom komşuluklarını değiştirmeden yanyana (fcc) birim hücreden bir (bct) birim hücre oluşturmak mümkündür (Şekil 1.11.a). Bundan sonra (bct) örgü, taban düzlemine dik doğrultuda sıkıştırılırsa x_1 ve x_2 doğrultularında açılma olur. Bu durumda birim hücrenin hacmi değişmiştir. İlk birim hücre olan austenite hücrenin örgü sabiti a_0 , son hücre olan martensite hücrenin örgü sabitleride a ve c (tetragonal yapı için) olmak üzere, son ve ilk hücrelerin hacim oranı,

$$\Delta = \left(\frac{a}{a_0}\right)^3 \left(\frac{c}{a}\right) \quad (1.8)$$

olur. Burada c/a oranına temel oran yada tetragonallik denir ve $fcc \rightarrow bct$ dönüşümü için bunun değeri $1/\sqrt{2}$ dir. Bain'den sonraki çalışmalarda da dönüşümlerin atomik hareketlerine örgü kesmelerinin sebep olduğu gösterilmiştir. Buradan hareketle ana ve ürün fazlar arasındaki yönelim bağıntılarının tayin edilmesi gerçekleştirilmiştir.

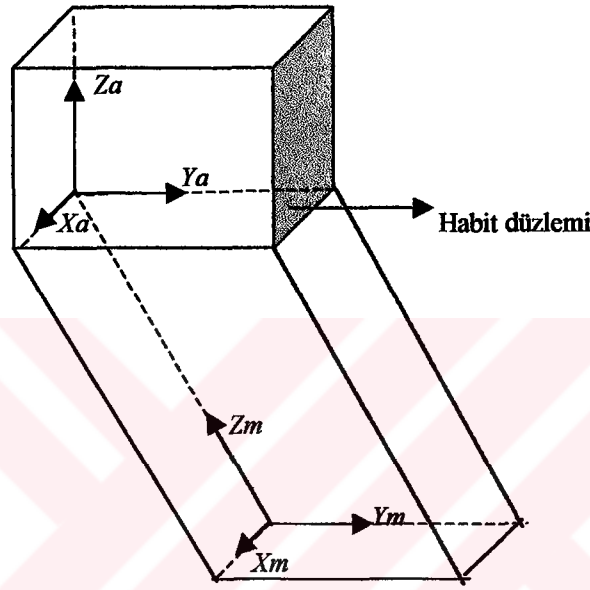
Austenite birim hücrenin, martensite kristal birim hücresine dönüşümü, kristalografik teorilerde olduğu gibi, aşağıdaki sırayla tanımlanır:

- 1) İlk kristal örgüyü başka bir kristal örgüye dönüştüren örgü deformasyonu.
- 2) Kristal örgüyü değiştirmeyen, ancak birim hücre boyutlarının değişimine neden olan saf zorlanma yada Bain zorlanması. Bu zorlanma sonucunda austenite'nin x_3 eksenini % 20 küçülür, x_1 ve x_2 eksenleri ise % 12 kadar genişler.
- 3) Kristal örgüyü değiştirmeyen, fakat bir şekil bozulması ortaya koyan zorlanma yada zorlanmalar (ikizlenmeler, kaymalar vs.).

4) Şekil bozulmasına yol açan zorlanmalar nedeniyle, bir miktar dönmüş olan martensite birim hücre eksenlerinin, austenite birim hücre eksenlerine göre paralellliğini sağlayan katı cisim dönmesi.

Bu özelliklerin her biri, martensite dönüşümü ortaya koyan mekanizmanın bileşenleridir. Bu bileşenlerin toplam etkisi karışık (saf olmayan) zorlanmadır. Austenite ve martensite yapılar arasında bozulmamış bir ara yüzey için toplam şekil zorlanması, saf olmayan bir zorlanma olmalıdır.

1.2.4. Yerleşme Düzlemi (Habit Düzlemi)



Şekil 1.12: Martensite dönüşümünün difüzyonsuz tabiatına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişim.

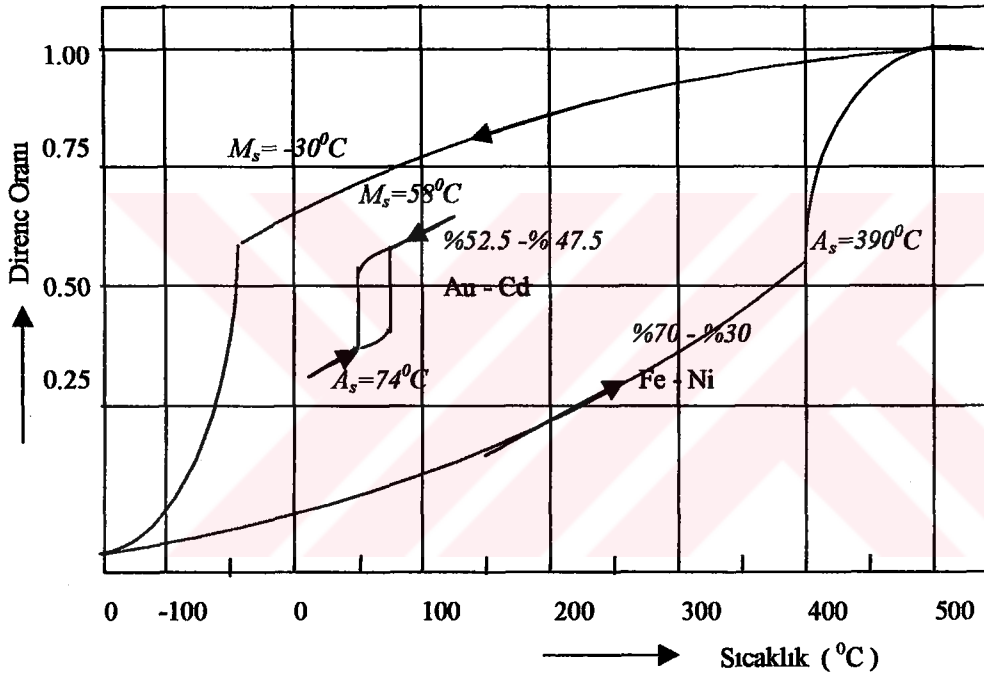
Martensite dönüşümünde bozulmamış olarak kalan yani ana ve ürün fazları ayıran düzlem yerleşme düzlemi olarak bilinir (Şekil 1.12). β fazı alaşımlarda bu düzlem varyantlardan oluşur. Bu varyantlardan her biri plaka yapılıdır ve tek kristal yapıda olan bu plakalar habit düzlem varyant plakası olarak adlandırılır. β tipi martensite plakaların önemli bir özelliği de birbiriyle uyumlu plaka grupları oluşturmasıdır. Plaka grupları, yüzeyler arası yapıyı dikkate alan bir düzene sahiptir. Böyle bir durumda toplam deformasyonun çok küçük olmasından dolayı bu tip martensite'lerin termoelastik davranış sergileyeceği görülmüştür (Warlimont ve Delaey, 1974).

1.2.5. Martensite Faz Dönüşüm Çeşitleri

Martensitik dönüşüm, metal ve alaşımlarda austenite faza dışarıdan sıcaklık ve zor etkisinin ayrı ayrı veya birlikte uygulanmasıyla martensite fazın elde edilmesi olayıdır (Tablo 1.1 ve Şekil 1.13).

Tablo 1.1: Martensitik dönüşüm tiplerinin genel karakteristikleri

Tip	Çekirdeklenme	Büyüme	Kristal kusurları
Termoelastik	Soğutma etkisi	Sıcaklık düşüştüyle orantılı	Dönüşüm etkili
Termoelastik olmayan	Soğutmanın ani etkisi	Ani ve hızlı, soğutmadan bağımsız	Dönüşüm etkili ve plastik deformasyonlu



Şekil 1.13: AuCd ve FeNi de görülen martensitik dönüşümlerin histeresis eğrileri (Wechsler, 1985). AuCd termoelastik, FeNi ise termoelastik olmayan martensitik yapı verir.

Martensitik dönüşümün en önemli özelliği difüzyonsuz olarak gerçekleşmesidir. Dönüşüm esnasında atomların komşuluğu korunur. Yani martensite fazda atomların komşulukları dönüşüm öncesinde mevcut olan komşuluklardan başka bir şey değildir. Bir başka deyişle, bu dönüşümlerde kristalin kompozisyonu değişmeyecektir (Ortin ve Planes, 1989).

Termoelastik olmayan martensite yapı sıcaklık düşüşüyle büyümeyebilir, fakat yeni yeni martensitik plakaları meydana gelir (Kurdjumov, 1959). Şekil hatırlamalı alaşımlar termoelastik martensite dönüşümü gösterirler. Çünkü, büyüme kinetikleri ve histeresis aralığının küçük olması şekil hatırlama olayı için gereklidir (Saburi ve Nenno, 1981). Şekil hatırlama olayı sergileyen termoelastik martensite

dönüşümlerinin genel özellikleri, düzenli bir yükseklik sıcaklık fazından, yani yüksek simetri fazından (genellikle bcc), kristaloğrafik olarak tersinir bir termoelastik dönüşüm ile düşük sıcaklık fazına bir dönüşüm şeklindedir (Friend, 1986).

Martensite dönüşümlerinin termoelastik olan ve olmayan iki türünden termoelastik olmayanlarda dönüşüm soğutma esnasında ses hızında ani bir patlama ile atermal olarak ana faz içinde yayılarak (Durlu, 1979), termoelastik dönüşümde ise sıcaklık düşüşüyle ürün faz büyümek suretiyle sürekli bir durum sergilenir.

Şekil hatırlama olayı termoelastik martensite dönüşümü gösteren alaşım sistemlerinde ortaya çıkan bir dönüşümdür. Tek ve çift yönlü şekil hatırlama olayı gösterebilen alaşımların temel özellikleri, kritik bir dönüşüm sıcaklığının altında ve üstünde iki ayrı şekil ve konfigürasyon göstermeye yatkındırlar. Kristaloğrafik yapıdaki değişimler, boyutlardaki değişimle bağlantılıdır ve alaşım düşük ve yüksek sıcaklık şekillerinin varlığını gösterir (Funakubo, 1986).

Tersinir şekil hatırlamalı alaşımlar bu özelliklerinden dolayı çeşitli teknolojik uygulamalarda ve cihazlarda kullanılmaktadırlar. Tersinirlik özellikleri nedeniyle bu alaşımlar diğer alaşım sistemlerinden farklı mekanik özellikler de gösterirler.

1.3. Soy Metal Martensiteleri

1.3.1. Soy Metal Martensiteleri ve Martensitik Dönüşüm

Martensitik Dönüşüm, metal ve alaşımlarda görülen birinci mertebeden yapısal bir faz dönüşümüdür. Austenite faza dışarıdan uygulanan sıcaklık ve zorun ayrı ayrı veya birlikte uygulanmasıyla martensite faz elde edilir.

Martensitik dönüşümün genel özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- (1) Kristaldeki atomların dönüşüm öncesindeki komşulukları dönüşüm sonrasında da korunduğundan dönüşümde difüzyon söz konusu değildir. Bu nedenle böyle bir dönüşüme askeri (military) dönüşüm denir.
- (2) Sıcaklığın düşmesiyle austenite içinde plaka şeklinde martensite bölgeleri görülür ve hacimde hızlı bir değişim söz konusudur.
- (3) Dönüşümü soğutma işlemi ile de desteklemek mümkündür.
- (4) Ürün faz ana faz içinde belirli düzlemlere yerleşir ve belirli yönelimlere sahiptir. Bu düzlemlere yerleşme (habit) düzlemi denir.

Martensitik dönüşümlerde ana ve ürün fazı ayırdığı düşünülen bir ara yüzeyin hareketi ile ürün faz oluşur. Ara yüzeyin hareketi esnasındaki atomik hareketler çok düzenli ve hızlıdır. Ayrıca hem çekirdek arayüzey yapısı hem de dönme bağlantıları arasında paralellik vardır. Martensite faz yapısı alaşım cinsine bağlı olarak ince plaka, iğne, kama ve benzeri şekillerde oluşabilir. Martensite plakaların bünyesinde kristaloğrafik ikizlerden veya dislokasyonlardan kaynaklanan kristal yapı kusurları da bulunabilir. Bu plakalar kristal yüzeyinde oluşurlarsa yüzey kabartılarına yol açarlar. Bu yüzey kabartıları martensite yapının varlığını ispatlayan ve makroskobik olarak da görülebilen en belirgin özelliklerden biridir. Termoelastik olmayan dönüşümlerde büyüme, ani ve hızlı ve dönüşüm histeresisi çok büyük olduğu halde, termoelastik olanlarda büyüme sıcaklık düşüşüyle orantılı olup dönüşüm histeresisi küçüktür.

1.3.2. Termoelastik Martensite Dönüşümü

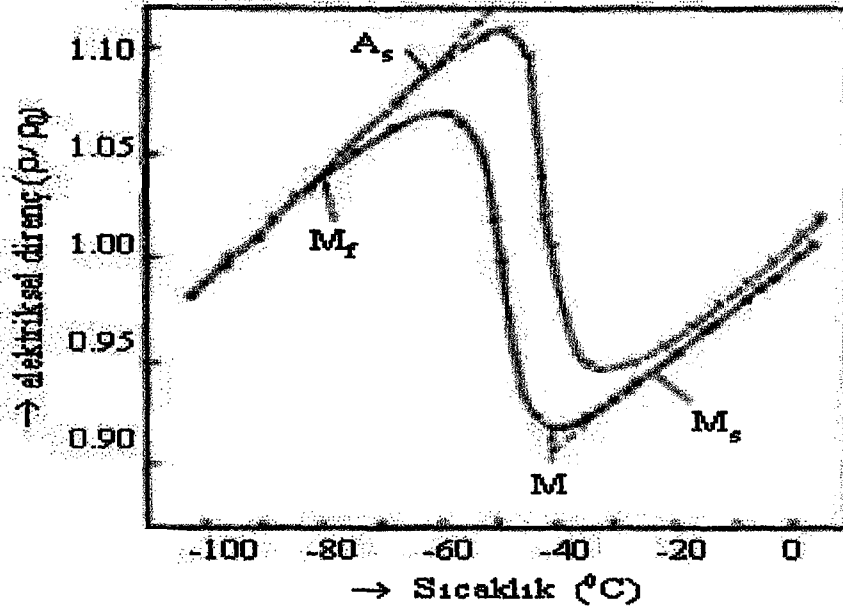
Termoelastik martensite dönüşümleri, NiTi alaşımında gözlemlenirken ve Delaey ve arkadaşları tarafından yapma elastiklik ve şekil hatırlama olayının, martensite fazın büyüme ve ilk haline dönme karakterine bağlı olduğunun gösterilmesinden sonra bu konudaki çalışmalar yoğunlaşmıştır (Buehler ve ark., 1963; Delaey, ve ark., 1974). Tablo 1.2 de gösterildiği gibi, özellikle soy metal bakır bazlı alaşımlarda ve bu çalışmanın konusunu teşkil eden CuZnAl alaşımlarının geniş bir spektrum aralığında bu dönüşümler gözlenmektedir. Tüm şekil hatırlamalı alaşımların termoelastik martensite dönüşümü sergilediği de bilinmektedir.

Termoelastik martensite dönüşümlerinin genel karakteristikleri Tablo 1.2 de belirtilmiştir. Bu dönüşümlerde büyüme sıcaklık düşüşüyle orantılı olup yapısal kusurlar dönüşüm yardımcı olarak ortaya çıktığı tablodan görülmektedir. Bunların dönüşümsel histeresis çevrimleri Şekil 1.13 de gösterilmiştir. Bu grafikten termoelastik dönüşümlerdeki dönüşüm histeresisinin termoelastik olmayanlara göre çok küçük olduğu açıkça görülmektedir.

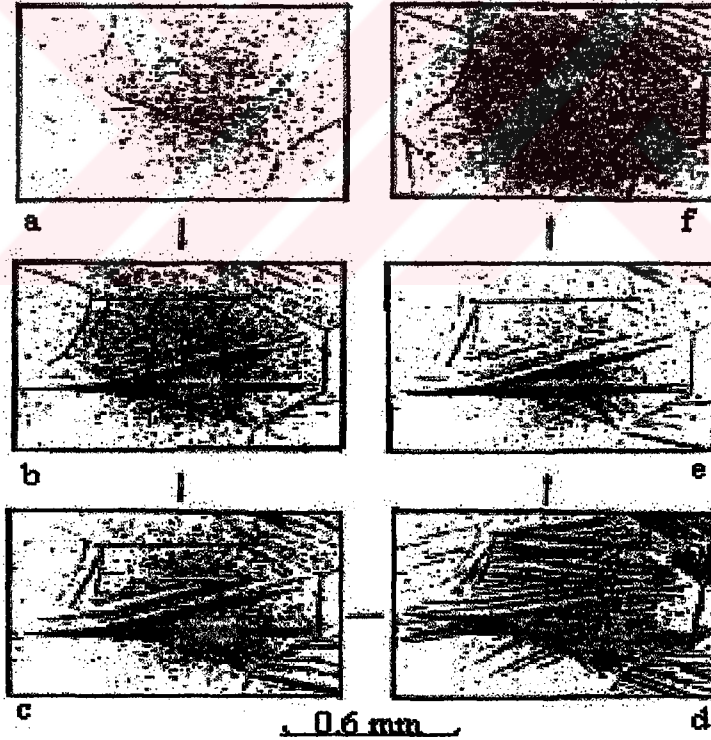
Dönüşüm zorlanması soy metal martensite'lerindeki termoelastik dönüşümlerde elastik olarak, diğer martensite'lerde ise plastik olarak ortaya çıkar. Bu elastiklik terslenme esnasında ilave bir sürücü kuvvet sağlayarak dönüşüm histeresisine küçültücü bir etki yapar. Dar bir histeresis ve büyüme kinetikleri şekil hatırlama mekanizması için gerekli bir özelliktir. Termoelastik dönüşüm esnasındaki davranış Şekil 1.14 de görülmektedir. Faz dönüşümü M_s sıcaklığında başlar. Bu sıcaklıkta alaşım içinde, kimyasal serbest enerjinin en düşük olduğu durumda martensitik plakalar teşekkül etmek suretiyle martensitik dönüşüm başlar. Sıcaklık düşüşüyle mevcut plakalar büyüdüğü gibi bunlara yenileri de eklenerek, bu işlem kristal tamamen ürün faza dönüşüncüye kadar devam eder. Bundan sonra numune $T > A_f$ sıcaklığına kadar ısıtılırsa ters dönüşüm oluşur. Sonuç olarak en son oluşan martensite plakalardan başlamak suretiyle austenite yapı elde edilir. İleri ve ters yöndeki dönüşümleri kapsayan bir tam çevrim sırasında oluşan dönüşüm histeresisi, alaşım cinsine ve kompozisyonuna bağlı olarak genellikle $10 - 15^{\circ}C$ arasında değişir. Bir tam dönüşüm esnasında martensite plakalarının oluşmaya başlaması, tamamlanması ve ters dönüşüme ait tipik aşamalar Şekil 1.15 de gösterilmektedir.

Tablo 1.2: Şekil hatırlama ve yapma elastiklik gösteren alaşımlar (Miyazaki ve Otsuka, 1989).

Alaşım	Kompozisyon (atomik %)	Yapı Değişimi	Sıcaklık Histeresisi (°C)	Düzen Durumu
Ag - Cd	(44 - 49) Cd	B2 → 2H	≈ 15	Düzenli
Au - Cd	(46.5 - 50) Cd	B2 → 2H	≈ 15	Düzenli
Cu - Zn	(38.5 - 41.5) Zn	B2 → 9R, Rombohedral M9R	≈ 10	Düzenli
Cu - Zn - X	Birkaç atom	B2 (DO ₃) → 9R, M9R (18R, M18R)	≈ 10	Düzenli
X= Si, Sn, Al, Ga				
Cu - Al - Ni	(28 - 29) Al (3 - 4.5) Ni	DO ₃ → 2H	≈ 35	Düzenli
Cu - Sn	≈ 15 Sn	DO ₃ → 2H, 18R	---	Düzenli
Cu - Au - Zn	(23 - 28) Au (45 - 47) Zn	Heusler → 18R	≈ 6	Düzenli
Ni - Al	(36 - 38) Al	B2 → 3R	≈ 10	Düzenli
Ti - Ni	(49 - 51) Ni	B2 → Monoklinik B2 → Rombohedral	20 - 100 1 ≈ 2	Düzenli
In - Tl	(18 - 23) Tl	FCC → FCT	≈ 4	Düzensiz
In - Cd	(4 - 5) Cd	FCC → FCT	≈ 3	Düzensiz
Mn - Cu	(5 - 35) Cu	FCC → FCT	---	Düzensiz



Şekil 1.14: Cu - 38.8 %Zn alaşımında termoelastik martensite dönüşümünde elektriksel direncin sıcaklıkla değişimi (Wechsler, 1985).

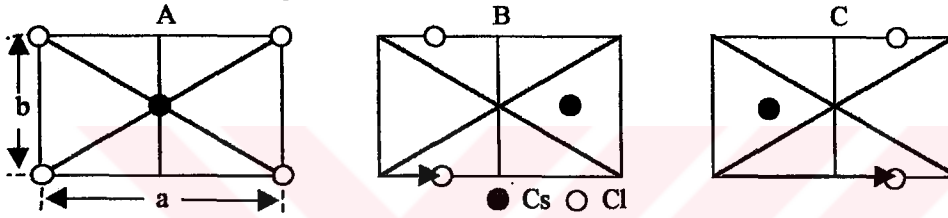


Şekil 1.15: CuZnAl alaşımında ısıtma ve soğutma sonucunda martensite oluşumu ve kayboluşunu gösteren optik mikroskop filmleri; a → d soğutma esnasında martensite oluşumu, e → f ise ısıtma çevrimi esnasında martensite plakalarının kayboluşunu göstermektedir (Zhang ve Hombogen, 1987).

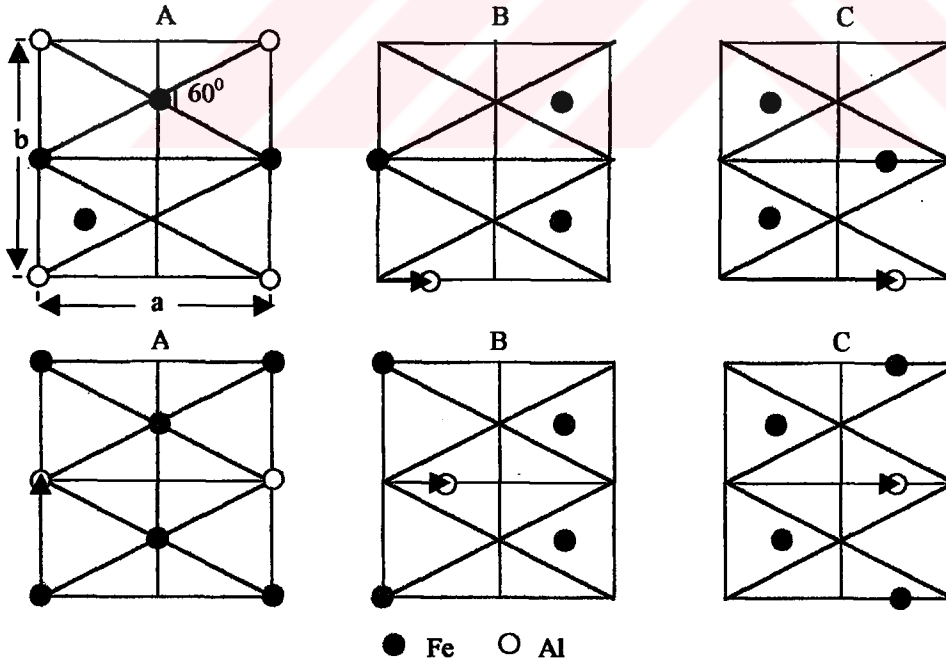
Bu grafiğin $a \rightarrow d$ kesimi soğutma aşamalarını, $e \rightarrow f$ kesimi ise ısıtma aşamalarını göstermektedir. $a \rightarrow d$ kesiminde sıcaklığın düşüşüyle plakaların oluşup büyüdüğü ve bunlara yenilerinin eklendiği, $e \rightarrow f$ kesiminde ise soğutma işlemi esnasında oluşan plakaların sıcaklık artışıyla yavaş yavaş kaybolduğu açıkça görülmektedir. Böyle bir soğutma ve ısıtma aşamalarını kapsayan bir süreç sonunda, karakteristik bir tam dönüşüm çevrimi tamamlanmış olmaktadır.

1.3.3. Soy Metal Alaşımlarında Martensitelerin Yapısı

Soy metal bazlı alaşımlarda martensitelerin yapısı alaşım sistemine, alaşımın kompozisyonuna ve martensite fazın ana fazdan kaynaklanan süper örgülü yapısına bağlıdır. Martensitik dönüşüm sonucunda ana fazın (110) bazal düzleminin, bir deformasyonla hemen hemen hegzagonal bir örgüye deforme olup bir kesme vasıtasıyla $[\bar{1}10]$ doğrultusunda kaymasıyla oluşan martensite fazın kristal yapıları Şekil 1.16 ve Şekil 1.17 de gösterilmektedir.

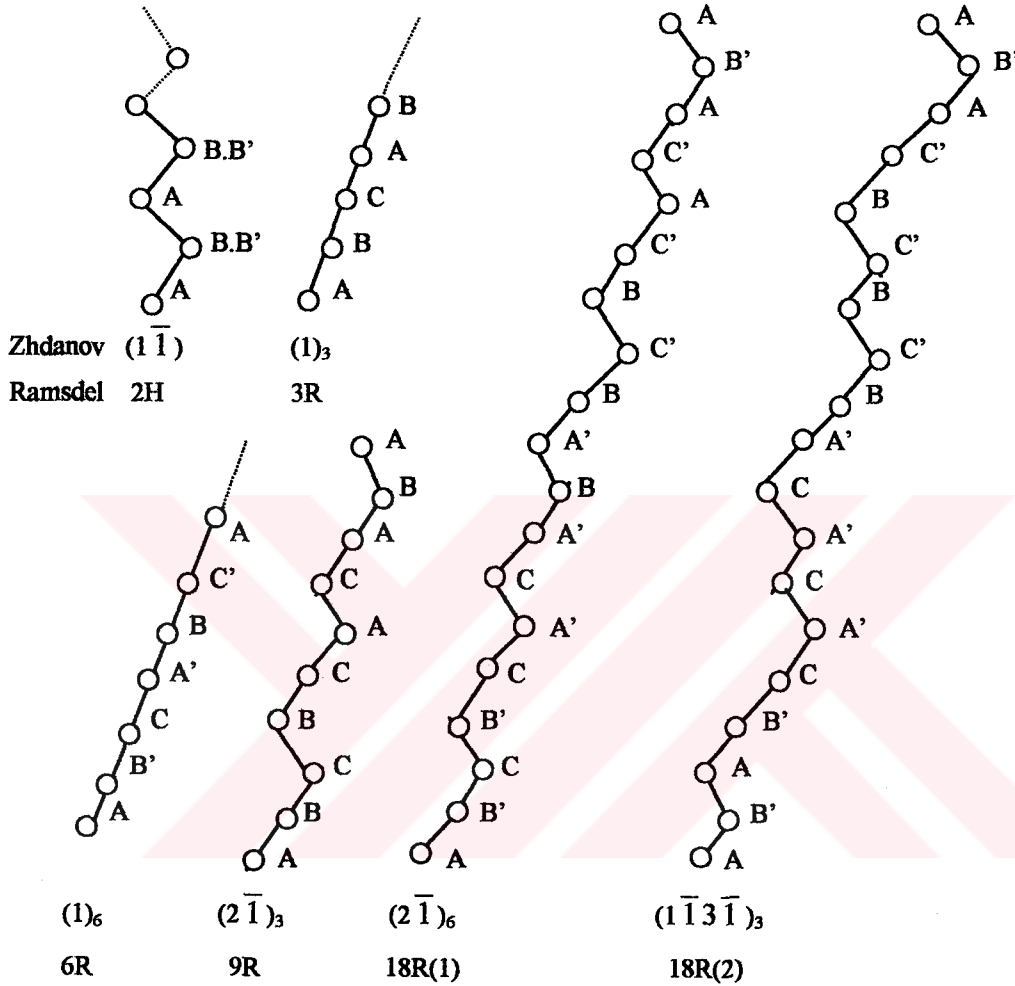


Şekil 1.16: B2 türü β_2 ana fazdan ortaya çıkan periyodik yığılma yapıları martensite içindeki sıkı paket düzlemlerinin 3 tipi (Miyazaki ve Otsuka, 1989).



Şekil 1.17: DO₃ türü β_1 ana fazdan ortaya çıkan periyodik yığılma yapıları martensite içindeki sıkı paket düzlemlerinin 6 tipi (Miyazaki ve Otsuka, 1989).

Böylece oluşan martensite fazların değişik tipleri Şekil 1.18 de gösterilmiştir. β_1 ana fazdan üretilen α_1' , β_1' , β_1'' ve γ_1' martensitik fazları sırasıyla 6R, 18R(1), 18R(2) ve 2H yapılar, β_2 ana fazdan üretilen α_2' , β_2' , ve γ_2' martensitik fazları ise sırasıyla 3R, 9R ve 2H yapılar sahiptirler.



Şekil 1.18: Şekil 1.16 ve 1.17 de gösterilen sıkı paket düzleminin farklı yığılmalarıyla oluşan martensite yapılar (Miyazaki ve Otsuka, 1989).

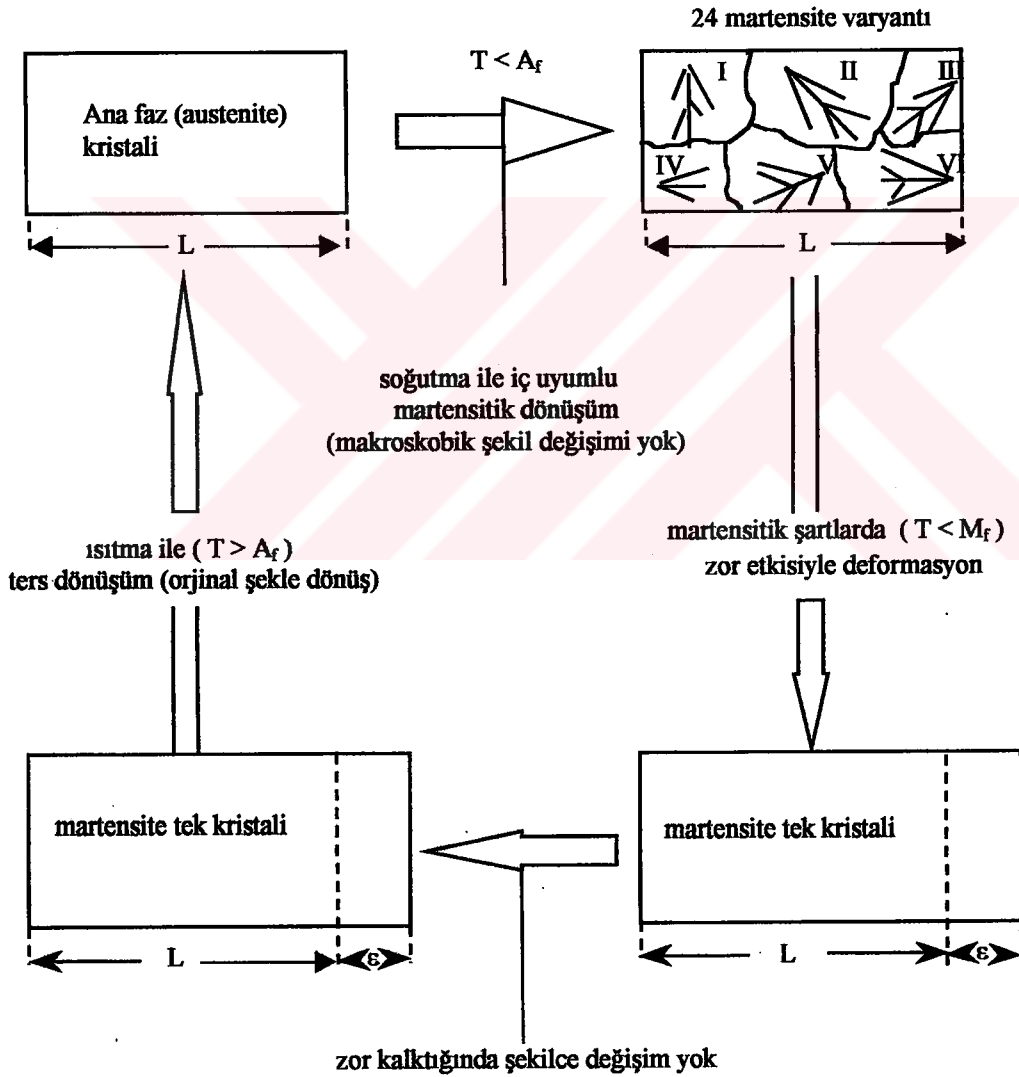
1.4. Şekil Hatırlamalı Alaşımlar

Şekil hatırlamanın etkisi ilk olarak 1932 lerde Au – Cd ile incelenmiş olup, 1938 lerde faz dönüşümlerine eşlik eden şekil hatırlama olayı pirinç’de gözlemlendi (Perkins ve ark., 1976). Buehler ve Wiley Noval Ordnance Laboratuarında bir seri Ni – Ti alaşımlarının 1962 yılına kadar şekil hatırlama olayını gösterdiğini gözleyemediler, ancak bu alaşımın şekil hatırlama olayını gösterdiği keşfedildikten sonra Buehler ve arkadaşları tarafından Nitinol olarak adlandırılmış ve o tarihten bu yana ticari olarak kullanılmıştır (Buehler ve Wiley, 1965).

olarak yada sıcak şekilde kalır ve soğuk şeklini elde etmek ve yeniden şekil hatırlama çevrimini başlatmak için yeniden deforme edilmelidir. Numune bu şekilde sıcak şeklini hatırlayabilir, fakat soğuk şekil için her defasında mekaniksel olarak yardım edilmelidir. Son durumda numune, herhangi bir dış mekaniksel yardım olmaksızın soğutulur soğutulmaz, soğuk şeklini aldığı gibi, ısıtılarak sıcak şeklini de hatırlayabilir. Fakat daha sonra görüleceği gibi tek yönlü ve çift yönlü şekil hatırlama olaylarını sergilemek için alaşım ilk önce birkaç histeresis çevrimi yaptırarak alıştırmalıdır.

1.4.1. Şekil Hatırlama Alaşımlarında Şekil Hatırlama Olayı

Şekil hatırlama olayının mekanizması Şekil 1.20 de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.20: Şekil hatırlama olayı için akış diyagramı (Wayman, 1984).

$T < M_f < M_s$ sıcaklığında tamamen martensite fazdaki bir numuneye dışardan bir zor uygulamakla şekli değişir. Yapılan bu plastik deformasyon sonucunda zor ortadan kaldırılınca numune deforme edilmiş şeklini korur. Plastik deformasyonu ortadan kaldırmak için deforme edilmiş numunenin sıcaklığı $T > A_f > A_s$ olacak şekilde arttırılır. Uygulanan bu işlemler sonucunda deformasyon öncesi orijinal faza, yani austenite yapıya ulaşılır. Numunenin bu şekilde bir dönüşüm mekanizması ile orijinal şeklini tekrar kazanması, şekil hatırlama olayı olarak bilinmektedir. Orijinal şeklini alan numunenin tekrar $T < M_f$ sıcaklığına kadar soğutulmasıyla deforme edilmiş şeklini yeniden kazanması da tersinir veya çift yönlü şekil hatırlama olayının bir sonucudur.

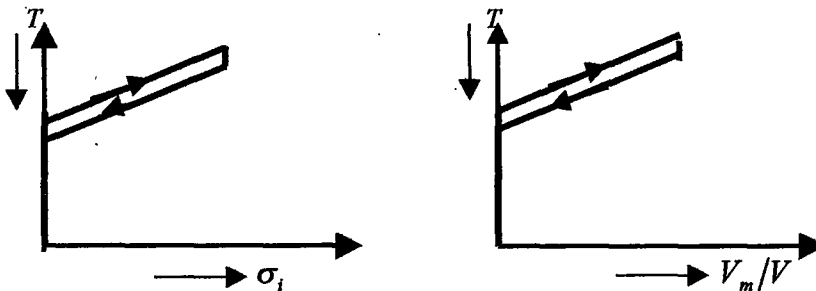
1.4.2. Yarı Kararlı β - Faz Alaşımlarda Şekil Hatırlama Olayı

Şekil hatırlama olayı termoelastik martensite dönüşümü gösteren alaşım sistemlerinde görülen bir dönüşüm olayıdır. Tek ve çift yönlü şekil hatırlama olayı gösterebilen alaşımların en önemli özelliği kritik bir dönüşüm sıcaklığının altında ve üstünde iki ayrı şekil konfigürasyon göstermeye yatkın olmalarıdır.

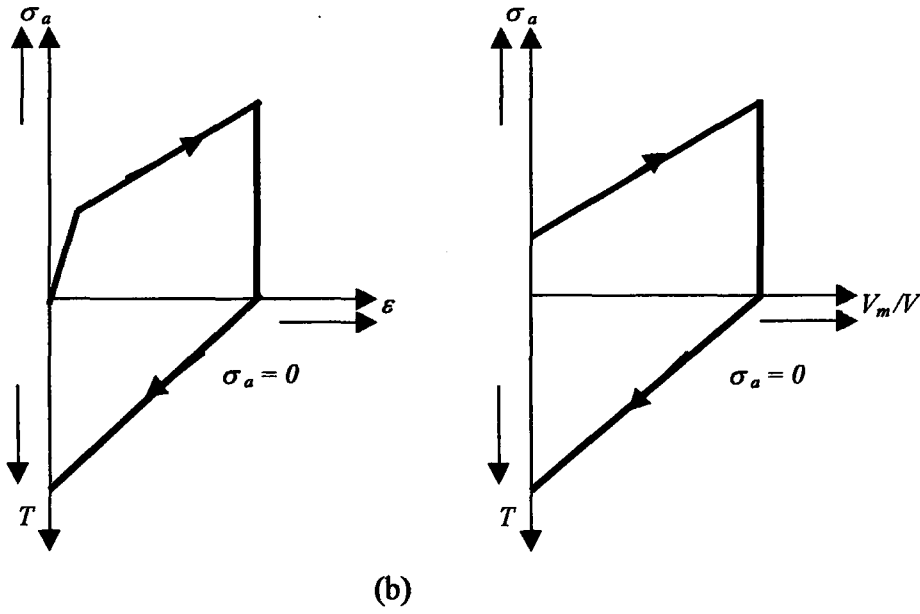
Tersinir şekil hatırlamalı alaşımlar bu özelliklerinden dolayı çeşitli uygulamalarda ve cihazlarda kullanılmaktadırlar. Tersinirlik özellikleri nedeniyle bu alaşımlar diğer alaşım sistemlerinden farklı mekanik özellikler de gösterirler.

Şekil hatırlama olayının gözlenmesi ilk olarak Amerika'da Naval Ordnance Laboratuvar'ında yaklaşık olarak eşit atomlu NiTi alaşımında gerçekleşti. Burada düşük sıcaklıktaki numuneyi deforme ettikten sonra sıcaklığını yükselttiler ve numunenin orijinal haline geri döndüğünü gördüler. Daha sonraki yıllarda, Illinois Üniversitesinde araştırmacılar Au - Cd alaşımlarında şekil hatırlama olayını gözlediler. Bunun dışında Fe - Pt, In - Cd, Ni - Al gibi farklı alaşımların farklı sıcaklıklarda şekil hatırlama olayı gösterdiklerini buldular. Bütün bu alaşımlardaki ortak özellik martensitik dönüşüm göstermeleridir. Başka bir deyişle martensitik dönüşüm şekil hatırlama olayının temelidir denilebilir.

Şekil hatırlama olayının termoelastik martensitik dönüşüm ile yakından ilgili olduğu bilinmektedir. Martensite fazın durumunda sıcaklık düşürülürken martensite sürekli olarak büyüdüğü ve Şekil 1.21 de görüldüğü gibi sıcaklık yükseltilirken martensite faz sürekli olarak büzülerek yok olduğunda termoelastik martensite dönüşüm söz konusu demektir.



(a)



Şekil 1.21.(a): Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak termoelastik martensite ters dönüşümü (b) Şekil hatırlama olayı (Delaey ve ark., 1974).

Dönüşüm, uygulanan zorun artması ile (ε dış zorlanması) sürekli olarak ilerler, zor azaldığı zaman ise sürekli olarak tersine döner. Martensite biçimlenimine eşlik eden şekil zorlanması etkisiyle plastik zorlanma meydana getirilir. Buna göre dönüşümün ilk haline gelmesi işlemin tersine dönmesi ile olacaktır. Olay sırasında bir histeresis meydana gelir. Bu davranış çeşitli termodinamik ve kinetik faktörlerden ortaya çıkmaktadır.

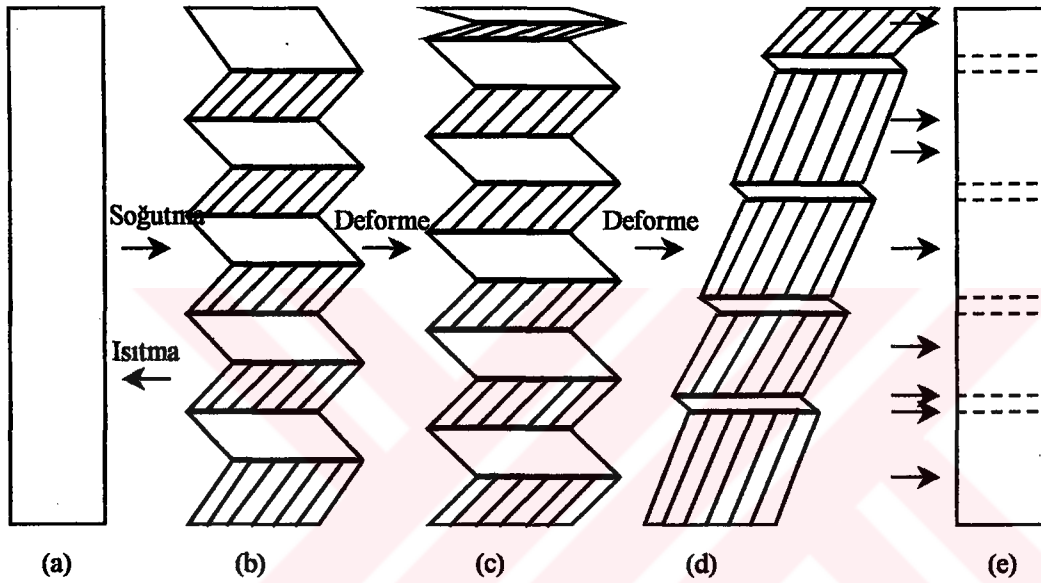
Uygulanan zorun ortadan kaldırılmasıyla tersine çevrilemeyen bir martensite dönüşüme eşlik eden (irreversible) makroskobik deformasyon, bir şekil hatırlama olayına sebep olur. Fakat ikinci aşamada ters dönüşüm ve makroskobik deformasyonun ilk haline gelmesi sıcaklık etkisiyle olmalıdır. Şekil 1.21.(b) de sol taraftaki diyagram, bir zorlanma testi sırasında şekil hatırlama olayını göstermektedir. Şeklin üst kısmı sabit sıcaklıkta uygulanan zordaki artışa karşın numunenin tepkisini alt kısmı ise zor kaldırıldıktan sonra sıcaklığın artmasına karşın numunenin tepkisini göstermektedir. Aynı şeklin sağındaki grafik ise belirtilen şartlarda numune içinde oluşan martensite miktarının kesirsel değişimini göstermektedir.

Şekil hatırlamalı alaşımların teknikteki uygulamaları çoğunlukla Ni tipi ve Cu-bazlı alaşımlarla gerçekleştirilmektedir. Fakat Cu-bazlı alaşımlar, üretim ve çeşitli şekillerin verilebilmesi yönünden daha ekonomik ve kullanışlı olmaktadır.

1.4.3. Şekil Hatırlama Alaşımlarında Görülen Şekil Hatırlama Mekanizması

Şekil hatırlama olayı gösteren bir alaşım belirli bir kristal yapıya sahiptir ve martensite haldeyken sıcaklık ve zora bağlı olarak değişebilir. Örneğin şekil hatırlama özelliğine sahip alaşımdan yapılmış bir çubuk martensite dönüşümü sağlandıktan sonra yonca yaprağı şeklinde eğilip, tekrar ısıtılarak austenite hale

getirildiği zaman, yine önceki haline (çubuk) dönüşür. Buradan şekil hatırlama olayı gösteren alaşımın mutlaka martensite faz dönüşümüne uğradığı anlaşılır. Şekil hatırlama olayı mekanikteki elastik yay davranışına benzetilebilir. L_0 boyundaki esnek bir yaya esneklik sınırları içinde bir kuvvet uygulanırsa yayın boyu L olur. Yayın üzerindeki kuvvet kaldırılırsa yay yine eski boyunu alır. Şekil hatırlama olayı da buna benzer olarak gerçekleşir. Martensite dönüşümü tamamladıktan sonra (M_f nin altında) numune deforme edilirse ve daha sonra sıcaklık yükseltilip austenite hale dönüldüğünde numune, austenite haldeki normal durumu alıyorsa bu olay şekil hatırlama olayından başka bir şey değildir. Şekil hatırlama olayı Şekil 1.22 de şematik olarak gösterilmiştir.



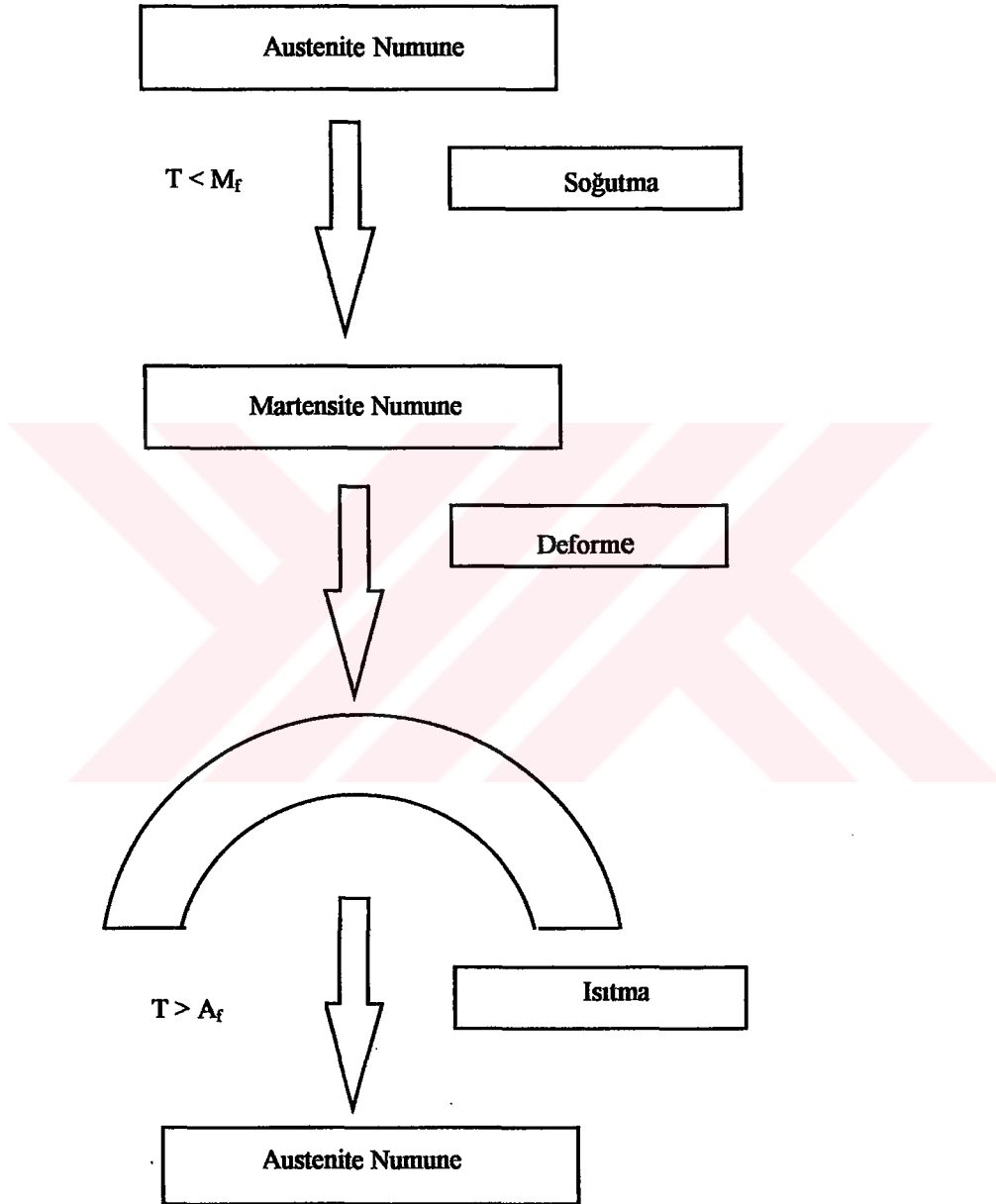
Şekil 1.22: Şekil hatırlama olayının şematik gösterimi (Otsuka ve Shimizu, 1986).

Şekil 1.22 de ana faz olarak tek kristal ele alınmıştır. Numune M_s den aşağı doğru soğutulursa martensite fazda iki farklı durum elde edilir (Gerçekte 24 farklı durum olabilir). İki farklı durum için kesme zorlanması veya şekil zorlanması hemen hemen eşit olup zıt yöndedir. Bu durum Şekil 1.22(c) ve (d) de gösterilmiştir. Numune A_f nin üzerindeki sıcaklıklara ısıtıldığında Şekil 1.22 deki gibi yeniden orijinal durumu olan austenite haline gelecektir.

1.4.4. Tek Yönlü (Tersinmez) Şekil Hatırlama Olayı

Bu olayın gerçekleşmesi alaşımın $T < M_f$ sıcaklığında deforme edilmesine bağlıdır. Deforme etmek amacıyla uygulanan zorun kaldırılması durumunda numune ilk orijinal şekline geri dönemez. Isıtma sonucunda numunedeki artık zor, sıcaklık kritik bir sıcaklığın üzerine çıkarken kademeli olarak geri döner. Sıcaklığın tekrar düşürülmesi üzerine, numune deforme edilmiş şeklini geri kazanamaz. Martensite dönüşümü ve yeniden yönelimle artık zorlanma oluşturma özelliği ve sonra da deformasyon öncesi orijinal β faz yöneliminin ısıtma sonucunda restore edilebilmesi, tek yönlü şekil hatırlama olayının temel mekanizmasıdır (Friend, 1986).

Tek yönlü şekil hatırlama olayı NiTi, TiNb, NiAl, CuZn, FePt, CuZnSi, CuZnSn ve FeMnC gibi birçok alaşım sisteminde gözlenmiştir. Bu şekil hatırlama türünün zorlanma limiti, kendiliğinden martensitik dönüşümün şekil zorlanmasına bağlıdır. Bu limit, deformasyon yardımıyla bir martensite tek kristalinin sadece terslenmesi üzerine tam olarak ortaya çıkar. Pratikte bu seviyeye sadece β faz tek kristallerinde ulaşılır. Tek yönlü şekil hatırlama olayı Şekil 1.23 de gösterilmiştir.



Şekil 1.23: Tek yönlü şekil hatırlama olayı.

Özetlenecek olursa; tek yönlü şekil hatırlama olayı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir. Austenite durumundaki bir doğrusal çubuğun sıcaklığının düşürülmesi

halinde şekli bozulmayacaktır. Bu çubuğa örneğin kavisli bir şekil verilirse, yani deforme edilirse ve bu numunenin sıcaklığı yükseltirse önceki doğrusal şekline yeniden dönecektir. Bu olayın yeniden tekrarlanması halinde numune martensite durumunda döndürülüyor fakat kavisli haline sahip olamıyorsa, tek yönlü şekil hatırlama olayı söz konusudur demektir.

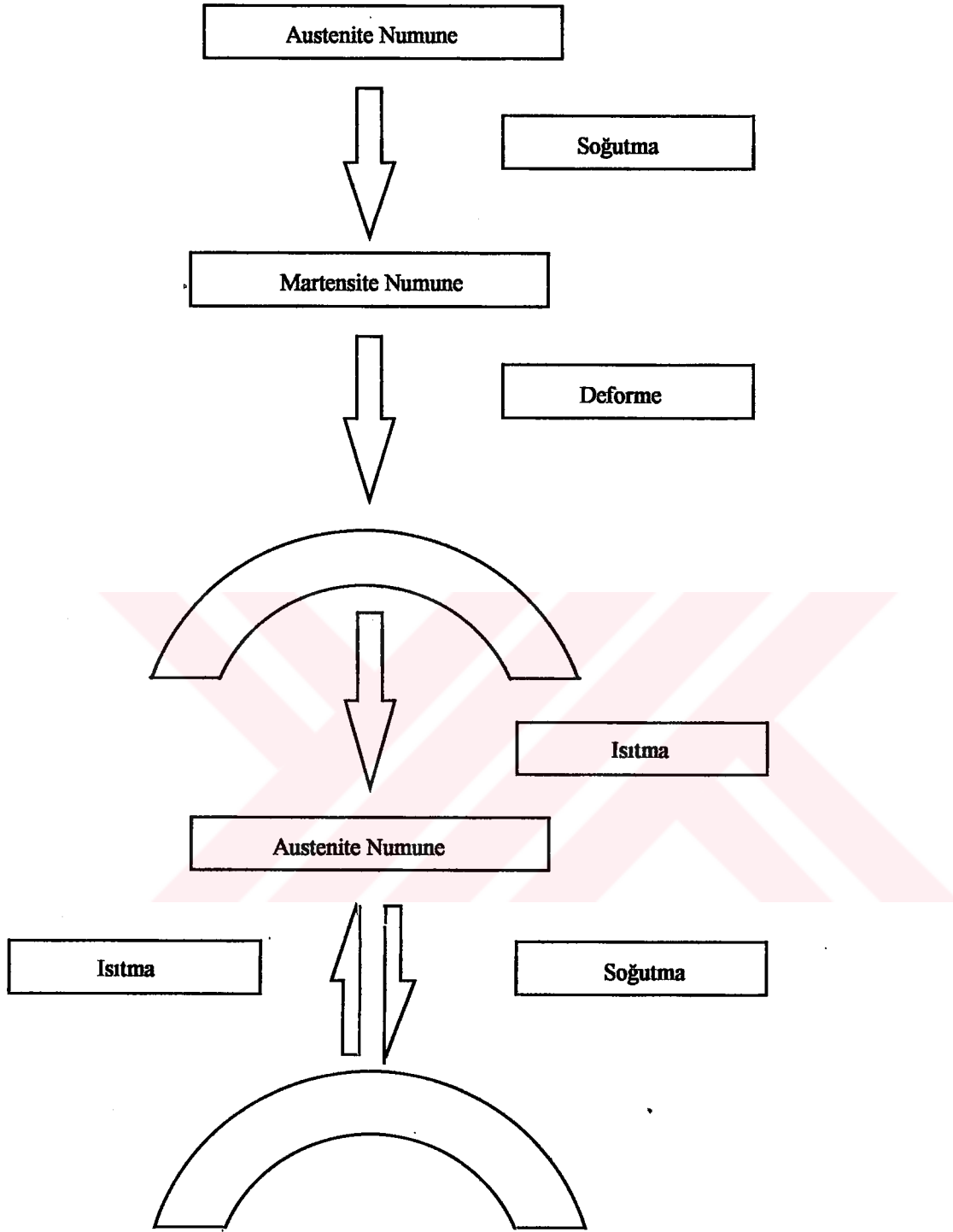
1.4.5. Çift Yönlü (Tersinir) Şekil Hatırlama Olayı

Alaşımelerde gözlenen martensitik dönüşümler kesme ve benzeri mekanizmalar ile oluşur. Buna bağlı olarak ürün faz içerisinde dislokasyonlar, ikizlenmeler ve yığılanma kusurları v.s. gibi örgü kusurları meydana gelir. Şekil hatırlamalı alaşımlarda gözlenen martensitik dönüşümler uygulanan zor ve sıcaklığın etkisine bağlı olarak tersinirlik gösterirler. Bu tersinirlik nedeniyle söz konusu alaşımlar diğer alaşım sistemlerinden farklı mekaniksel davranış sergilerler (Deleay ve ark., 1974).

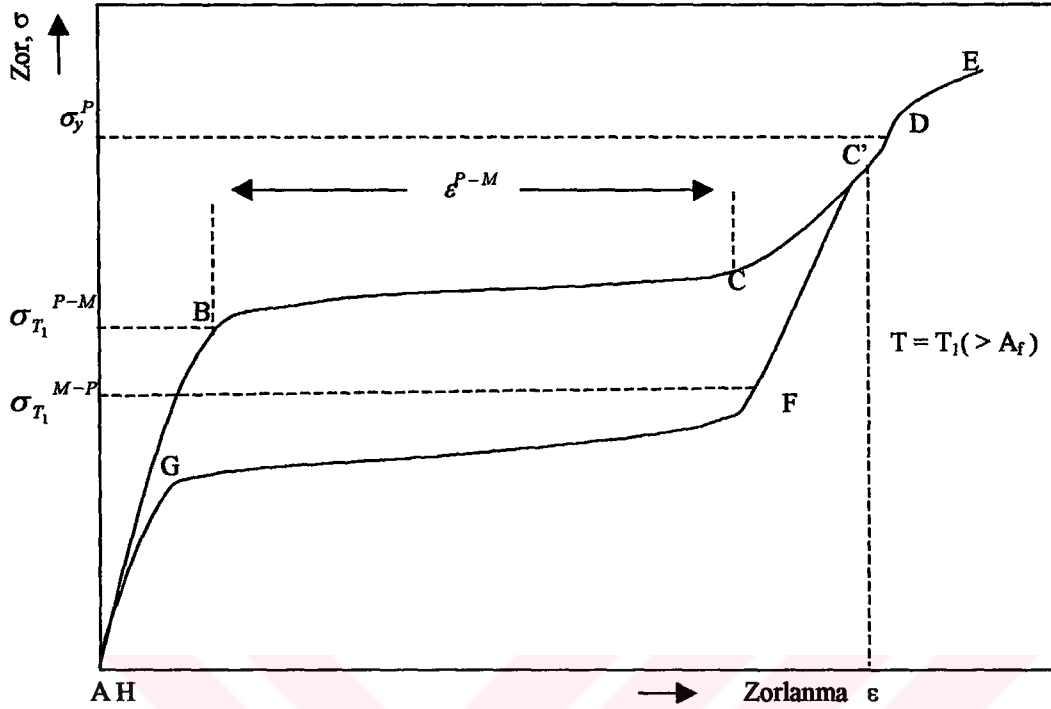
$T < M_f$ sıcaklığında tamamen martensite fazdaki bir numuneye dışarıdan zor uygulamakla istenilen uygun bir şekil verilebilir. Yapılan bu plastik deformasyon sonucunda, uygulanan zorun kaldırılmasıyla numune deforme edilmiş şeklini korur. Deforme edilmiş numunenin sıcaklığı $T > A_f$ ye yükseltince plastik deformasyon ortadan kaldırılmış olur. Yani bu işlem sonunda deformasyon öncesi orijinal şekline ulaşılır. Numunenin bu şekilde bir dönüşüm mekanizmasıyla orijinal şeklini tekrar kazanması şekil hatırlama olayı olarak bilinir. Orijinal şeklini alan numunenin tekrar $T < M_f$ sıcaklığına soğutularak, deforme edilmiş şeklini ve konfigürasyonunu tekrar kazanması da tersinir şekil hatırlama olayının bir sonucudur. Çift yönlü şekil hatırlama olayı da Şekil 1.24 de gösterilmiştir.

Özetlenecek olursa; çift yönlü şekil hatırlama olayı deforme olmuş kavisli martensite numune ısıtılınca austenite yapıdaki orijinal şekli olan düz çubuk durumuna dönüşür. Numune tekrar soğutulunca kavisli martensite duruma dönerse bu olaya çift yönlü şekil hatırlama olayı adı verilir.

Martensitik dönüşüme duyarlı bir alaşıma sabit bir T_f sıcaklığında iken zor uygulanırsa Şekil 1.25 deki gibi bir zor - zorlanma eğrisi elde edilir. Burada T_f sıcaklığının, ters dönüşümün zor uygulanmadan tamamlandığı bir A_f sıcaklığından daha büyük olması gerekir.



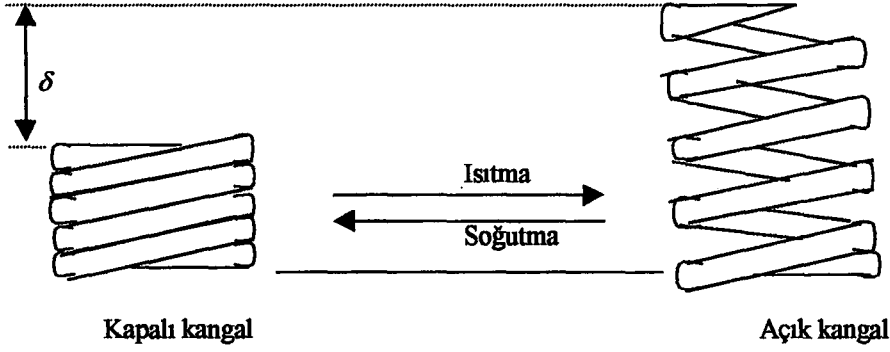
Şekil 1.24: Çift yönlü şekil hatırlama olayı.



Şekil 1.25: $T_1 > A_f$ sıcaklığında gerçekleşen yapma - esneklik ile ilgili şematik zor - zorlanma eğrisi (Krishnan ve ark., 1974).

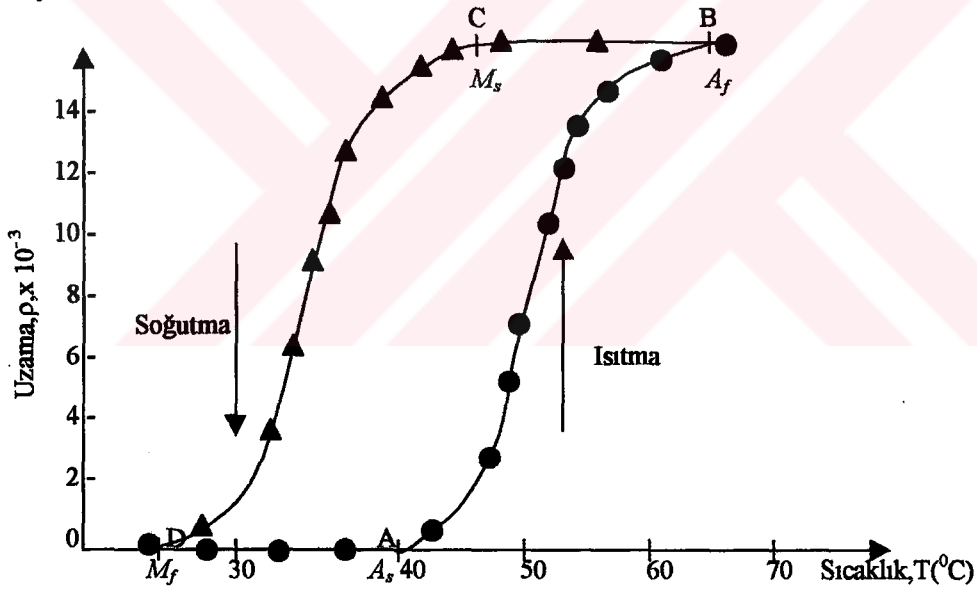
Burada σ_T^{P-M} ana fazdan martensite faz dönüşümü sağlayan zor, σ_T^{M-P} martensite fazdan ana faza dönüşümü sağlayan zor, σ_y^P martensitenin plastik akma zoru, ϵ toplam zorlanma ve AH ise toplam zorlanmanın tersinmez bileşenidir (Krishnan ve ark., 1974).

Şekildeki AB kesimi ana fazın saf elastik deformasyonunu gösterir. Bir σ_T^{P-M} zor seviyesine karşı gelen B noktasında ilk martensite plakalar oluşmaya başlar ve C noktasına erişinceye kadar devam eder. Zor etkisiyle tamamen martensite faza dönüşen alaşım numunesi elastik olarak deforme edilir (CD bölgesi). D noktası ulaşılan martensitenin σ_y^P plastik akma noktasına karşılık gelir. Kopma oluşuncaya kadar alaşım plastik olarak deforme olur. Eğer zor etkisi D noktasına varmadan önce, yani C' noktasında ortadan kalkarsa, deformasyonun bir kısmı martensitenin elastik bölgesine karşılık gelir (C'F bölgesi). F deki bir σ_T^{M-P} zorlanmasına ulaşıldığında ters dönüşüm başlar ve martensite kesri ana faz elde edilinceye kadar (G noktası) azalır. Sonuçta martensite faz tamamen ana faza dönüşür (GH bölgesi). C' noktasında zorun ortadan kalkması sonrasında oluşan ana fazın, zor ortadan kalktığı durumdaki esneklik bölgesini gösterir. Zor varken ve kaldırıldığında elde edilen eğrinin kapattığı bölge, kaybolan enerji miktarını belirler. Bu tür dönüşüm suni- elastiklik (yapma - esneklik) olarak bilinir. Suni - elastiklik genellikle A_f sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda meydana gelir. Dikkat edileceği üzere suni - elastiklik olayında meydana gelen deformasyon, martensitik dönüşümün bir sonucudur.



Şekil 1.28: Bakır esaslı alaşımdan yapılmış bir kangalın çift yönlü şekil hatırlamalı dönüşüm mekanizması (Friend, 1986a).

Martensitik yapıda deforme edilmiş çift yönlü şekil hatırlama özelliğine sahip helis şeklindeki bir numunenin M_f , A_f komşuluklarında ısıtma ve soğutma işlemlerine bağlı olarak kangal boyundaki değişimin karakteristiği Şekil 1.29 da gösterilmiştir.



Şekil 1.29: Isıtma ve soğutma işlemleri esnasında kangal boyunun sıcaklıkla değişimi (Friend, 1986).

Martensite yapıdaki numunenin sıcaklığı A_s noktasına gelinceye kadar ısıtıldığında numunede herhangi bir değişiklik olmaz. Bu sıcaklık noktasının üzerinde ısıtmaya devam edilirse numunenin boyunda uzama meydana gelir.

Bu uzama B noktasına kadar devam eder ve B noktasında durur. Bu nokta A_f sıcaklığıdır. B noktasından sonra numune ne kadar ısıtılırsa ısıtılsın uzama olmaz. Austenite haldeki numune B deki sıcaklıktan C deki sıcaklığa kadar soğutulunca uzama miktarında bir değişiklik olmaz. C noktası martensite başlama noktasıdır. Bu

noktadan sonra sıcaklık düşürüldüğü zaman numunede kısıalma görülür. Bu kısıalma D noktasına kadar devam eder. D noktası M_f sıcaklığıdır. D noktasındaki sıcaklıktan sonra, martensitik haldeki numunenin boyu deforme edilmiş ilk boyu ile aynıdır. Bundan sonra sıcaklık düşüşü ile numunenin boyunda bir değişiklik görülmez.

Numune soğutulduğu zaman sıcaklık – uzama miktarı eğrisinin, numune ısıtıldığı zamanki sıcaklık – uzama eğrisi üzerinden geri dönmediği Şekil 1.29 dan görülmektedir. Bu ise martensite dönüşümün bittiği noktadan ters dönüşümün başlayacağını gösterir. Olaydan M_f ve A_f sıcaklıklarının farklı değerlere sahip olacağı anlaşılmaktadır.

Sunulması planlanan bu tezde şekil hatırlamalı alaşımlardan yapılmış yayların martensitik faz dönüşümleri ile ilgili temel özellikleri termodinamik açıdan incelenerek, bu yayların titreşim kontrollerinde mümkün olabilecek bazı uygulamaları ortaya konacaktır. Elde edilen teorik bulgular literatürden elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Test materyali olarak şekil hatırlamalı alaşımlardan NiTi (nitinol) kullanılacaktır. Yaygın olarak kullanılan, şekil hatırlamalı alaşımlardan yapılmış yayların dizaynı genellikle lineer teorilere dayanmaktadır. Yapılacak olan bu çalışmada ise yayların lineer olmayan (nonlinear) özelliklerinin de elde edilen sonuçlara etkileri araştırılacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çok eski çağlardan beri, metal ve alaşımların iç yapılarında meydana gelen değişikliklerin neler olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bükülme, zor, zorlanma ve sıcaklık ile şekil değişimine yol açan bütün özelliklerinden yararlanılmıştır. Metal ve alaşımların iç yapılarında meydana gelen değişimlerin anlaşılmasına öncülük eden ve Katıhal Fiziği ile Fiziksel Metalurji'de büyük bir öneme sahip olan martensitik faz dönüşümü olayı, ilk olarak Alman Metalurjist Adolf Martens tarafından demir bazlı alaşımlarda gözlenmiştir (Nishiyama, 1978).

Daha sonraları yapılan çok sayıda araştırma ile büyük bir gelişmeye sahip olan martensitik dönüşümler, demir bazlı alaşımların yanı sıra geniş çapta soy metal bakır bazlı alaşımlarda ve metalik özellik taşımayan bazı maddelerde gözlenmiştir (Durlu, 1979; Clamp, 1988).

Termoelastik martensite dönüşümleri ve buna bağlı olarak da şekil hatırlama olayı ilk olarak 1938'lerde gözlemlendi. Bu olay 1951 yılında AuCd alaşımında (Chang, 1954) ve 1953'de InTl alaşımında (Burkart ve Read, 1953) gözlenmiştir. Fakat şekil hatırlama olayının uygulamalarda kullanılması, 1963 yılında Nitinol olarak tanınan eşit atomik yüzdeli NiTi alaşımında (Buehler ve ark., 1963) gerçekleşmiştir. Daha sonraki araştırmalarda ise büyük ölçüde soy metal bakır bazlı alaşımlarda ve diğer bazı alaşımlarda da hatırlama olayının gerçekleştiği gözlenmiştir.

Zora neden olan martensitik faz dönüşümü ile beraber şekil hatırlama olayının termodinamik ve istatistiksel fiziğe dayalı modeli üzerinde de çalışılmıştır (Müller ve ark., 1979).

Müller'in yapmış olduğu bu çalışmaya benzer bir şekilde, martensitik faz dönüşümüne eşlik eden serbest enerjinin minimize edilmesi ile ilgili bir çalışma Tanaka tarafından yapılmıştır (Tanaka, 1982).

Tanaka'nın yapmış olduğu çalışmaya benzer bir çalışma da Niezgodka ve ark. tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar öncekilerden farklı olarak, serbest enerji ifadesini sıcaklık ve zorun bir fonksiyonu olarak düşünmüşlerdir (Niezgodka ve ark., 1986).

Şekil hatırlama olayının bir sonucu olarak, martensite \rightarrow austenite (M \rightarrow A) ters dönüşümü esnasında kullanılabilir bir kuvvet açığa çıkabilir. Termal çevrimleme sonucunda şekillerini kendiliklerinden ve tersinir olarak geri kazanabilme özellikleri ve kullanılabilir bir kuvvet üretebilmeleri nedeniyle, bu alaşımlar teknolojik ilginin odağı haline gelmiş ve üzerinde çok sayıda araştırmalar yapılmıştır. Bu nedenle, şekil hatırlamalı alaşımların kullanılmasıyla bir grup cihazın dizaynı gerçekleştirilebilmiştir (Delaey ve ark., 1978; Wayman, 1980; Golestaneh, 1984; Otsuka ve Shimizu, 1986; Tautzenberger ve ark., 1989).

Şekil hatırlamalı alaşımların varlığı 1970'li yıllardan beri bilinmesine rağmen uygulamaları oldukça kısıtlıdır. Şekil hatırlamalı alaşımların bir çok uygulamaları kuvvet ve yer değiştirme hareketi ile ilgilidir. Son zamanlarda (Rogers, 1988) şekil hatırlamalı alaşımlardan yapılmış tellerin graphite/epoxy gibi konvensiyonel bileşiklerin içine, statik deformasyonu, titreşimi, iletimi, yapısal ses yayını veya taşınması gibi tepkileri kontrol etmek için yerleştirilebileceği teklif edilmiştir. Şekil hatırlamalı

alaşımın hibrid karışım materyallerinin dinamik ve yapısal durumunu tanımakla beraber aktif bir şekilde kontrol edilebilir.

Şekil hatırlamalı alaşımların, dönen shaftların kritik hızının kontrolünde kullanılabilmesi önerildi (Nagaya ve ark., 1987), Dönen bir shaftın dizaynında en önemli faktör shaftın kritik hızından uzak durmaktır. Kritik hız altında menzilde dönen bir shaft ve kütle – yay sistemi için basit bir dizayn uygundur. Fakat daha yüksek mod titreşimlerinde menzilde dönen bir shaft için kritik hızlardan geçmeye yönelik bir metod önemlidir ve shaftların dengeleyen problemi (Lund ve Orcutt, 1967; Mıwa, 1971) ve tepki problemine ilişkin pek çok araştırma kaydedilmiştir (Iwata ve Nonami, 1983; Saito ve Azuma, 1983).

Şekil hatırlamalı alaşımların çeşitli titreşim kontrolleri için kullanılabilmesi bilindiği gibi aynı zamanda şekil kontrolü için de kullanılabilmesi belirtilmiştir (Rogers ve ark., 1989).

Liang ve Rogers Tek – boyutlu termomekanik yapısal ilişkisine bağlı olarak, şekil hatırlamalı alaşımlar için çok – boyutlu bir termomekanik yapısal model geliştirmiştir (Liang ve Rogers, 1990). Bonderyev ve Wayman tarafından geliştirilmiş olan yapısal modelden farklı olarak, bu çok – boyutlu yapısal model, plastik akı teorisini kullanma yerine martensite teorisini kullanır. Bu yüzden termomekanik ile yapısal dönüşümler arasındaki ilişkiler, şekil hatırlamalı alaşımların en önemli özelliklerini vermektedir (Bonderyev ve Wayman, 1988).

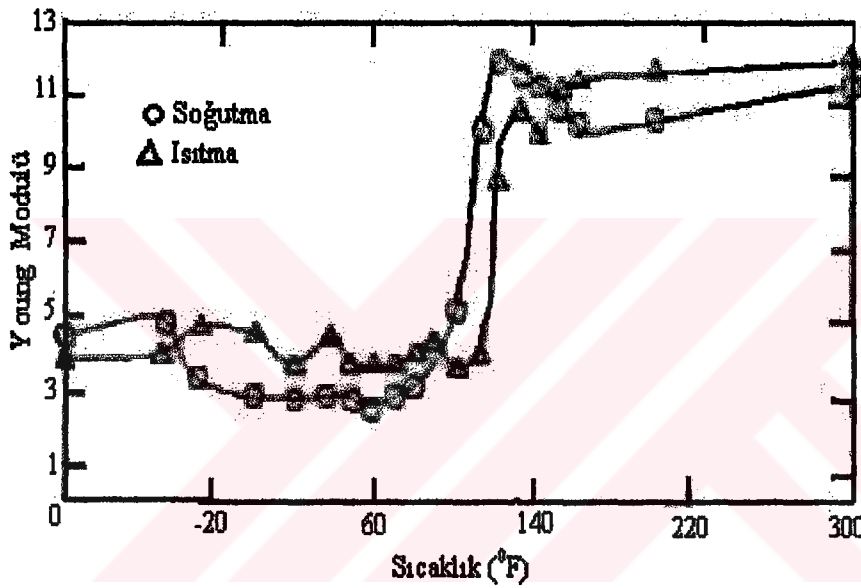
Nitinol şekil hatırlama alaşımının Young modülü için geçiş sıcaklığının $10^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ arasında değiştiği bulunmuştur.

Martensitik faz dönüşümlerini fononların başlatabileceği düşüncesinden hareket ederek, austenite – martensite ara yüzeyi'nin matriks ile olan atomik sürtünmesi göz önünde bulundurulmuş ve Au - %30 Cu - %47 Zn ve In - %21 Tl alaşımları için bu kuvvetin atomların nonlinear diferansiyel denklemine dahil edilmesi ile fononların titreşim genliğinin sürücü kuvveti frekansına bağlılığı incelenmiştir (Doğan, 1992).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Şekil Hatırlamalı Alaşım Modeli

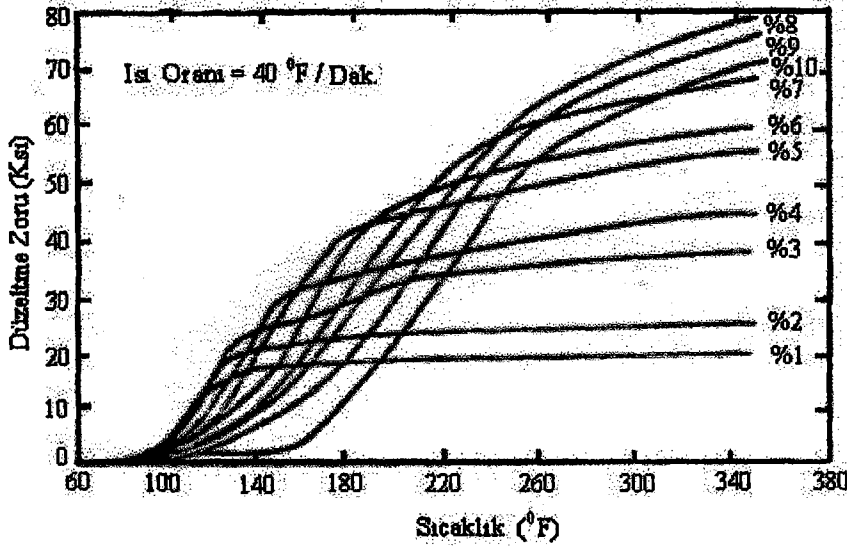
Şekil hatırlama alaşımlarının Young modülündeki değişiklik çok bilinen metalik materyallerde gözlenenlerden oldukça farklıdır. Young modülü bir çok metaller için sıcaklığın artmasıyla azalacaktır. Bununla birlikte, şekil hatırlama alaşımlarının Young modülü ısıtma işlemi sırasında faz dönüşümünün sıcaklık bölgesinde artar. Şekil hatırlama alaşımı olan Nitinol'ün Young modülü M_f nin altından A_f nin üstüne kadar 3, 4 defa artar. Bu durum Şekil 3.1 de görülmektedir. (Cross ve ark., 1970). Şekil hatırlama alaşımlarının kesme (makaslama) modülü de benzer bir termal davranış sergiler.



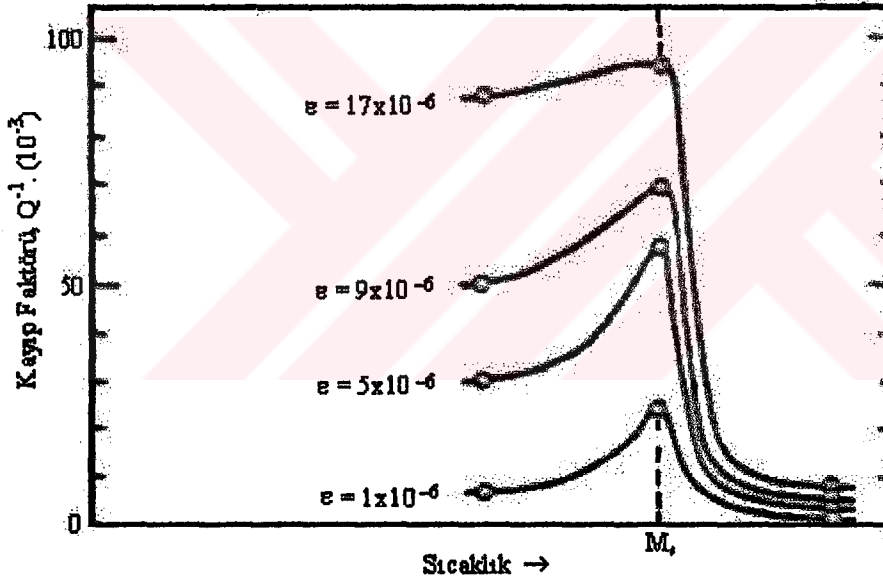
Şekil 3.1: Nitinol'ün Young modülünün sıcaklığa bağlı grafiği (Cross ve ark., 1970).

Şekil hatırlama etkisi şekil hatırlama alaşımının ısıtılmasıyla bir önceki şekline elbette kolaylıkla dönebileceğini kastedmemektedir. Teli geçiş sıcaklıkları üzerinde ısıtırken, deforme olmuş bir şekil hatırlama alaşım telinin yeniden zorlanması, Şekil 3.2 de gösterildiği gibi, büyük bir kazanç gerilimi meydana getirecektir. Bu benzeri görülmeyen davranış şekil hatırlama alaşımlarının harekete geçirme (actuator) amacıyla kullanıldığı çoğu uygulamalarda yararlanılan temel karakteristiklerden biridir.

Yapma elastik zor - zorlanma histeresinden olan sönümü bir tarafa bırakırsak, iç sürtünme nedeniyle şekil hatırlama alaşımının sönümü de önemli bir karakteristiklerdir.



Şekil 3.2: Çeşitli başlangıç zorlanmalarında sıcaklığa karşı yeniden kazanılan (recovery) zorlar (Cross ve ark., 1970).



Şekil 3.3: Çeşitli zorlanma genlikleri için Cu - Zn - Al şekil hatırlama alaşımının sıcaklığa karşı kayıp (loss) faktörü (Dejonghe ve ark., 1977).

Şekil 3.3 de Q^1 iç kayıp faktörü sıcaklığın bir fonksiyonu olarak görülmektedir. Yüksek sıcaklık austenite fazı düşük bir sönüm kapasitesine sahipken, (%1 civarında bir kayıp faktörüne sahip) düşük sıcaklık martensite fazı büyük bir sönüm kapasitesine sahiptir (kayıp faktörü %10 'a varabilir). Martensitik alaşımların büyük bir sönüm kapasitesine sahip olmasına martensite veya ikiz plaka sınırlarının tersine hareketinin neden olduğuna inanılır.

Diğer materyallerde olduğu gibi kristallerin ara yüzey hareketliliği dönüşüm histeresisi zor - zorlanma genliği ve uyarma frekansı şekil hatırlama alaşımının sönüm

karakteristiklerini etkiler. Zorlanma genliğinin şekil hatırlama alaşım martensite'sinin sönüm kapasitesi üzerindeki etkisi Şekil 3.3 de gösterilmiştir. Martensitik faz dönüşümünün süresi frekans ile uyuyorsa frekans $Q^{-1} - T$ profiline bağlı büyüklüğünü etkilemekle birlikte adı geçen profili değiştirmez.

Şekil hatırlama alaşımlarının lineer olmayan davranışı iç faz dönüşümlerinin bir sonucudur. Şekil hatırlama alaşımlarının zor - zorlanma - sıcaklık ilişkileri ve şekil hatırlama olayları gibi müstesna karakteristiklerini tasvir etmek amacıyla bir çok oluşum modelleri önerilmiştir (Liang, 1990). Tanaka ve Nagaki tarafından geliştirilen (Tanaka ve Nagaki, 1982) ve daha sonra Liang ve Rogers tarafından düzeltilen (Liang ve Rogers, 1990a) termomekanik oluşum modeli şekil hatırlama alaşımının mekanik halini açıklamak için kullanılabilir. Bir boyutlu modele dayanan termomekaniksel olarak çok boyutlu bir model de Liang ve Rogers tarafından geliştirilmiştir (Liang ve Rogers, 1991). Bu oluşum modeline dayalı olarak şekil hatırlama alaşım aktuatorleri için genel bir tasarım metodu geliştirilmiştir (Liang ve Rogers, 1990b).

Çok boyutlu oluşum ilişkisi (Liang ve Rogers, 1991) üzerine kurulmuş olan şekil hatırlama alaşımlarının bir boyutlu kesme - zoru ve zorlanma ilişkisi

$$\tau - \tau_0 = G(\gamma - \gamma_0) + \frac{\Omega}{\sqrt{3}}(\xi - \xi_0) + \frac{\theta}{\sqrt{3}}(T - T_0) \quad (3.1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada G elastik kesme modülü, Ω faz dönüşüm tensörü (D esneklik modülü olmak üzere $-D\varepsilon_L$ den hesaplanabilir), ε_L şekil hatırlama alaşımının kazanılabilir maksimum zorlanması, θ şekil hatırlama alaşımının termal genleşmesine bağlı olan termoelastik tensördür. Bundan başka T sıcaklığı, ξ ise martensitik dönüşümün derecesini tanımlayan iç değişkeni göstermektedir. Martensite kesrini gösteren bu parametre martensite' nin toplam hacminin şekil hatırlama alaşımının toplam hacmine oranı olarak tanımlanır. Martensite kesri zor ve sıcaklığın bir fonksiyonudur ve çok boyutlu problemlerde genellikle aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\xi = \Xi(\sigma_{eq}, \tau) \quad (3.2)$$

Burada $\sigma_{eq} = \sqrt{3}\tau$ eşdeğer zoru belirtmektedir. Martensitik dönüşüme eşlik eden Helmholtz serbest enerjisi ise

$$\Psi(\Lambda) = U - TS \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada S entropi ve U iç enerji yoğunluğunu göstermektedir.

Genel hal değişkeni

$$\Lambda = (\bar{\varepsilon}, T, \xi) \quad (3.4)$$

olarak tanımlanır. Clausius - Duhem eşitsizliği ise

$$\rho \dot{S} - \rho \frac{q}{T} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_{sur}}{T} \right) \geq 0 \quad (3.5)$$

olarak ifade edilebilir. Burada ρ deforme olmuş akı yoğunluğu, σ Cauchy zoru, T sıcaklığı, q iç ısı kaynağını, q_{sur} çevre ısı akısını belirtmektedir. Şekil hatırlama alaşımına bir zor uygulandığında Clausius - Duhem eşitsizliğinin yeni hali

$$(\bar{\sigma} - \rho_0) \frac{\partial \Psi}{\partial \bar{\epsilon}} \dot{\bar{\epsilon}} - (S + \frac{\partial \Psi}{\partial T}) \dot{T} - \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} \dot{\xi} - \frac{1}{\rho_0 T} \frac{\rho}{\rho_0} q f^{-1} \frac{\partial T}{\partial x} \geq 0 \quad (3.6)$$

olarak verilir. Burada $\bar{\sigma}$ Piola - Kirschhoff zoru, $\bar{\epsilon}$ Green zorlanması, f gradyant deformasyonu ve ρ_0 referans konfigürasyon yoğunluğudur. Denklem (3.1) deki materyal parametreleri

$$\begin{aligned} D &= \rho_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \bar{\epsilon}^2} \\ \theta &= \rho_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \bar{\epsilon} \partial T} \\ \Omega &= \rho_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \bar{\epsilon} \partial \xi} \end{aligned} \quad (3.7)$$

olarak verilir. Faz dönüşümü sırasındaki martensite kesri, Cosine modeline göre

$$\xi_{A \rightarrow M} = \frac{1}{2} \left\{ \cos \left[a_M (T - M_f) \right] + 1 \right\} \quad (3.8)$$

olarak, Martensite'den Austenite'ye olan ters dönüşüm için ise

$$\xi_{M \rightarrow A} = \frac{1}{2} \left\{ \cos \left[a_A (T - A_s) \right] + 1 \right\} \quad (3.9)$$

olarak verilebilir (Liang ve Rogers, 1993). Burada a_A ve a_M materyal sabitleridir ve geçiş sıcaklıklarından

$$a_A = \frac{\pi}{(A_f - A_s)} \quad (3.10)$$

$$a_M = \frac{\pi}{(M_s - M_f)} \quad (3.11)$$

olarak hesaplanabilir.

$M \rightarrow A$ dönüşümü (ξ_M, T_M) olarak tanımlanan austenite ve martensite fazlarının birlikte buldukları bir durumdan başlar. Sıcaklık A_s den yüksek oluncaya kadar, ısıtma işlemi esnasında yeni bir austenite faz olmayacaktır. Bu durumda A_s nin üstündeki sıcaklıklar için martensite kesri

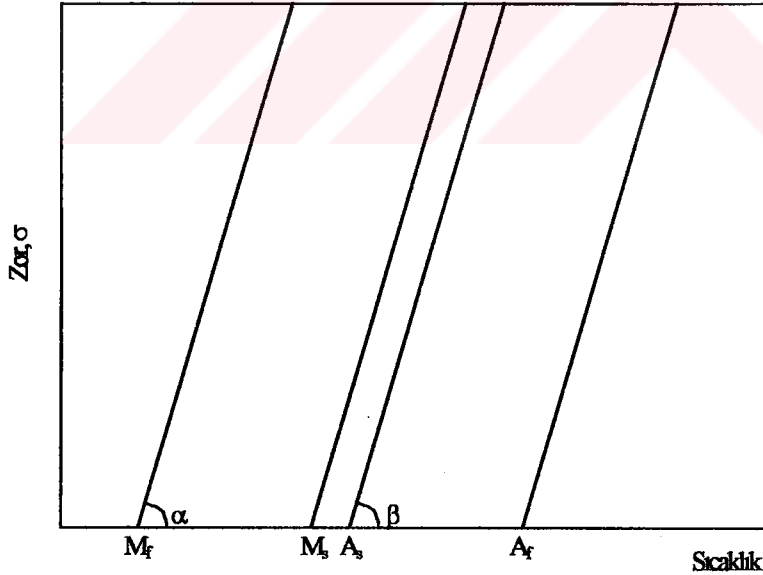
$$\xi_{M \rightarrow A} = \frac{\xi_M}{2} \left\{ \cos[a_A(T - A_s)] + 1 \right\} \quad (3.12)$$

olarak verilir. Bu denklemde $\xi_M = 1$ alınırsa denklem (3.9) bulunur.

Benzer şekilde $A \rightarrow M$ dönüşümü başlarsa (ξ_A, T_A) numune soğutulup M_s nin altındaki bir sıcaklığa getirilinceye kadar yeni bir faz olmayacaktır. M_s den M_f ye kadar olan dönüşüm sırasında martensite kesri

$$\xi = \frac{1 - \xi_A}{2} \cos[a_M(T - M_f)] + \frac{1 + \xi_A}{2} \quad (3.13)$$

ile verilebilir.



Şekil 3.4: Uygulanan zorun geçiş sıcaklıklarına göre şematik resmi (Liang ve Rogers, 1990).

M_f , M_s ve A_s geçiş sıcaklıkları Şekil 3.4 de gösterildiği gibi uygulanan zora lineer olarak bağlıdır. Bununla birlikte, A_f nin değişimi daha komplikedir. Bu modelde

basitlik olması için zorun sıcaklığa bağıllığı A_f eğrisi için lineer ve diğerlerine paralel olduğu Şekil 3.4 te verilmiştir (Liang ve Rogers, 1990). Şekil 3.4 deki α ve β açıları için ifadeler

$$C_M = tg\alpha \tag{3.14}$$

$$C_A = tg\beta$$

olarak tanımlanmıştır. Burada, α ve β nın değerleri yaklaşık olarak birbirine eşit olduğundan $C_A = C_M$ olduğu görülmektedir. Bu hareket Denk. (3.12) ve (3.13) e zor azaltıcı faz geçiş terimi eklenirse M→A dönüşümü için

$$\xi = \frac{\xi_M}{2} \{ \cos[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] + 1 \} \tag{3.15}$$

bağıntısı ve A→M dönüşümü için

$$\xi = \frac{1 - \xi_A}{2} \cos[a_M(T - M_f) + b_M\sigma] + \frac{1 + \xi_A}{2} \tag{3.16}$$

şeklinde bir bağıntı elde edilir. Buradaki iki materyal sabiti

$$b_A = -\frac{a_A}{c_A} \tag{3.17}$$

$$b_M = -\frac{a_M}{c_M}$$

olarak yazılabilir. Denk. (3.10), (3.11) ve (3.14) ün kullanılmasıyla

$$b_A = -\frac{\pi}{(A_f - A_s)tg\beta} \tag{3.18}$$

$$b_M = -\frac{\pi}{(M_s - M_f)tg\alpha}$$

elde edilir. M→A dönüşümünde zor

$$C_A(T - A_s) - \frac{\pi}{|b_A|} \leq \sigma \leq C_A(T - A_s) \tag{3.19}$$

ve A→M dönüşümünde zor

$$C_M (T - M_f) - \frac{\pi}{|b_M|} \leq \sigma \leq C_M (T - M_f) \quad (3.20)$$

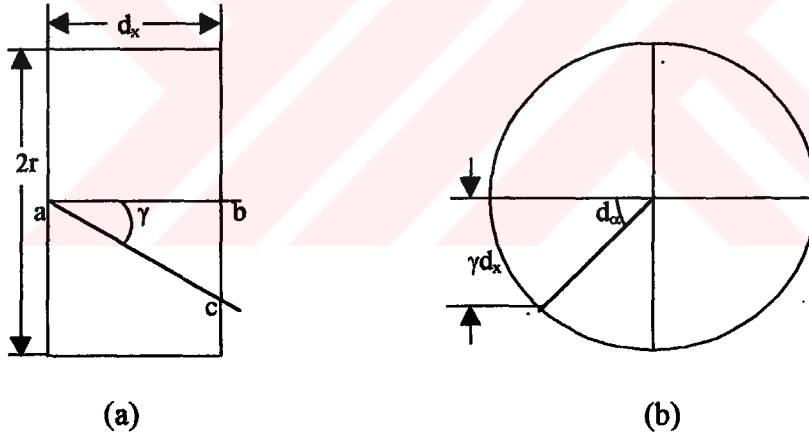
şeklinde ifade edilebilir (Liang ve Rogers, 1990).

3.2. Şekil Hatırlamalı Alaşımlardan Yapılmış Yayların Yapısı

Konvensiyonel yayların yapısı standarttır (Shigley, 1977) ve burada yeniden kısaca gözden geçirmek yararlı olacaktır. Lineer elastik bir yayın maximum kesme zoru

$$\tau_{\max} = K \frac{2FR}{\pi r^3} \quad (3.21)$$

şeklinde yazılabilir. Burada K Wahl düzeltme çarpanı, F dış kuvvet, R ortalama yay yarıçapı, r yayın yapıldığı telin yarıçapıdır. Yapılacak bu dizaynda $K=1$ kabul edilecektir.



Şekil 3.5: (a) Bir yay elamanı ve (b) bu elamanın kesiti.

Lineer elastik ve helisel bir yayın sapsması Şekil 3.5(b) de gösterilmiştir. Yarıçapı r olan telden kesilen d_x uzunluğunda bir parça dikkate alalım. Yay eksenine paralel olan bir tel elamanının yüzeyinde bir ab parçasını gözönüne alalım. Bu parça deformasyondan sonra γ açısı kadar dönerek, yeni bir ac konumuna dönüşür. γ açısı Torsiyonel Hook Kanunu'ndan

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{2FR}{G\pi r^3} \quad (3.22)$$

olarak yazılabilir. Burada $d\alpha$ açısı telin üst kısmının alt konumuna göre dönme miktarıdır ve Şekil 3.5.(b) den

$$d_\alpha = \frac{\gamma(d_x)}{r} \quad (3.23)$$

olur. Denk. (3.22), Denk. (3.23) de yerine konursa

$$d_\alpha = \frac{2FR}{G\pi r^4} d_x \quad (3.24)$$

bulunur. Denk. (3.23) ün her iki tarafının integrali alınırsa

$$\alpha = \int_0^{2\pi RN} \frac{\gamma}{r} d_x \quad (3.25)$$

$$\alpha = \frac{4FR^2 N}{r^4 G}$$

haline gelir. Burada α , yay telinin bir ucunun diğerine göre açısal sapması, N ise dönme sırasında hareket eden halkaların toplam sayısını göstermektedir. Toplam sapma

$$y = \alpha R = \frac{4FR^3 N}{r^4 G} \quad (3.26)$$

olacaktır. Denklem (3.26) dan, Hook Yasa'sı dikkate alınarak yay sabiti

$$k = \frac{r^4 G}{4R^3 N} \quad (3.27)$$

olarak ifade edilebilir. Şekil hatırlamalı alaşımların elastik modülü sıcaklıkla değişmektedir (Rogers, 1990). Elastik modülü ve sıcaklık arasında genel olarak

$$D = D_A (D_M - D_A) \xi \quad (3.28)$$

şeklinde bir bağıntı yazılabilir. Burada D , D_A ve D_M sırasıyla herhangi bir durumdaki, austenitik fazdaki ve martensitik fazdaki Young modülleridir. $D - \xi$ lineer bağıntısı $D - T$ bağıntısına çok iyi uyabilir. Eğer ξ nin T ye göre değişimi Denk. (3.28) de kullanılırsa, kesme modülü

$$G = \frac{D}{2(1+\mu)} \quad (3.29)$$

olarak bulunur. Burada μ poisson oranını göstermektedir. Elastik bölgede çoğu şekil hatırlamalı alaşımlar için yaklaşık olarak $\mu = 0.3$ olarak alınabilir. Sıcaklık M_s den küçük olduğu zaman, kesme modülü martensite kesme modülü G_M olur. Öte yandan sıcaklık A_f den büyük olduğu zaman kesme modülü austenite kesme modülü G_A olur. Nitinol şekil hatırlamalı alaşımlar için

$$\frac{G_A}{G_M} = \frac{3}{4}$$

şeklinde bir orantı yazılabilir. Şekil hatırlamalı alaşımların elastik zor sınırı faz dönüşümünün yani martensite miktarının bir fonksiyonudur. Genel olarak

$$\begin{aligned} \sigma_e &= C_A(T - M_s) & T &\geq M_s \\ \sigma_e &= C_M(M_s - T) & M_f &\leq T \leq M_s \\ \sigma_e &= \text{Sabit} & T &\leq M_f \end{aligned} \quad (3.30)$$

şeklinde yazılır. Bu denklemler (Dye, 1990) nın deneysel sonuçlarından yazılmıştır. İlk zor, zorlanma ve martensite kesiri sıfır ve sıcaklık sabit ise Denk. (3.1)

$$\tau = G\gamma + \frac{\Omega}{\sqrt{3}}\xi \quad (3.31)$$

olarak yazılabilir. Şekil hatırlamalı alaşım bobininin kesme zoru Denk. (3.22) den

$$\tau = \gamma G = \frac{2FR}{\pi r^3} \quad (3.32)$$

olarak ifade edilebilir. γ açısı Denk. (3.31) den

$$\gamma = \frac{\tau}{G} - \frac{\Omega}{\sqrt{3}G}\xi \quad (3.33)$$

olarak çözülebilir. Şekil hatırlamalı alaşım yayının sapması Denk. (3.25) ve (3.26) dan

$$y = R \int_0^{2\pi RN} \frac{\gamma}{r} dx$$

$$y = \frac{2\pi R^2 N \gamma}{r} \tag{3.34}$$

$$y = \frac{2\pi R^2 N}{r} \left(\frac{\tau}{G} - \frac{\Omega}{\sqrt{3}G} \xi \right)$$

olarak bulunur. Denklem (3.32), Denk. (3.34) de yerine konursa

$$y = \frac{2\pi R^2 N}{r} \left(\frac{2FR}{\pi r^3 G} - \frac{\Omega}{\sqrt{3}G} \xi \right) \tag{3.35}$$

$$y = \frac{4R^3 N}{Gr^4} F - \frac{2\Omega N \pi R^2}{\sqrt{3}Gr} \xi$$

ifadesi elde edilir. Elastik bölgede martensite miktarı sıfırdır. Zor – yardımcı faz dönüşümü eşdeğer zor, σ_{es} , elastik zor, σ_e , ye eşit olduğu zaman (yani τ kesme zoru $\sigma_e / \sqrt{3}$ değerine ulaştığı zaman) başlayacaktır. Bu elastik limite karşılık gelen F_e kuvveti, Denk. (3.32) kullanılarak,

$$F_e = \frac{\pi r^3 \sigma_e}{2\sqrt{3}R} \tag{3.36}$$

olar. Elastik zor limitine karşılık gelen yerdeğiştirme Denk. (3.27) ve Denk. (3.36)

nın $y_e = \frac{F_e}{k}$ ifadesinde kullanılmasıyla

$$y_e = \frac{2\pi NR^2 \sigma_e}{\sqrt{3}rG} \tag{3.37}$$

olarak bulunur. Şekil hatırlamalı alaşım yayının kuvvet – yerdeğiştirme ilişkisi normalize edildiğinde, yani Denk. (3.35) in (3.37) ye bölünmesiyle ve Denk. (3.36) nin dikkate alınmasıyla

$$\frac{y}{y_e} = \left(\frac{4R^3 NF}{r^4 G} - \frac{2\Omega R^2 N \pi}{\sqrt{3}Gr} \xi \right) \frac{\sqrt{3}Gr}{2R^2 N \pi \sigma_e}$$

Y.C. YÜKSEKÖĞRETİM ENSTİTÜSÜ
 ...

$$\frac{y}{y_e} = \frac{F}{F_e} - \frac{\Omega}{\sigma_e} \xi \quad (3.38)$$

elde edilir. Buna göre kesme zoru yeniden düzenlenirse

$$\tau = \frac{F\sigma_e}{F_e\sqrt{3}} \quad (3.39)$$

olarak ifade edilebilir. Bu bağıntıya dayanarak martensite kesiri, ξ

$$\xi = \Xi\left(T, \frac{F}{F_e}\sigma_e\right) \quad (3.40)$$

formunu alacak şekilde yeniden düzenlenebilir. Denklem (3.38) deki kuvvet – yerdeğiştirme bağıntısı kontrol elemanı ve harekete geçirici (aktuatör) elemanı olarak şekil hatırlamalı alaşım yaylarının uygulanması ve bunların planlanmasında çok önemlidir. Faz dönüşüm tensörü Ω sıcaklıktan bağımsızdır. y_e , F_e ve σ_e gibi diğer parametreler sıcaklığa bağlıdır. Şekil hatırlamalı alaşım yay telinin yarıçapı r , yay yarıçapı R ve hareketli bobinlerin sayısı N gibi şekil hatırlama alaşımlarının bütün dizayn değişkenleri yalnızca y_e ve F_e normalizasyon faktörlerinde ortaya çıkar.

Şekil hatırlamalı alaşım yaylarının kuvvet – yerdeğiştirme ve sıcaklık ilişkisinin genel ifadesi Denk. (3.38) ve Denk. (3.1) in kullanılmasıyla

$$\frac{F}{F_e} = \frac{y}{y_e} + \frac{\Omega}{\sigma_e} (\xi - \xi_0) + \frac{\theta}{\sigma_e} (T - T_0) \quad (3.41)$$

olarak yazılabilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Nitinol Alaşımlardan Yapılmış Yayların Uygulamalarda Dizaynı

Tablo 4.1: Nitinol şekil hatırlama alaşımı için materyal parametreleri (Liang, 1990).

GPa		°C				MPa / °C			%
D _M	D _A	M _s	M _f	A _s	A _f	C	C'	θ	ε _L
26.3	67	18.4	9	34.5	49	2	10.3	0.55	6.7

Tablo 4.1 de belirtilen Nitinol alaşımına ilişkin parametrelerin değerleri kullanılarak, a_M , b_M , a_A ve b_A materyal sabitleri hesaplanabilir. a_A ve a_M parametreleri Denk. (3.10), (3.11) ve Tablo 4.1 deki diğer değerlerin dikkate alınmasıyla $a_A=12.41$ °C⁻¹ ve $a_M=19.1$ °C⁻¹ değeri bulunur. Ayrıca C_A ve C_M zorun geçiş sıcaklıklarındaki etkisini gösteren materyal sabitleri olmak üzere Denk. (3.17) ve (3.14) ün kullanılmasıyla bulunmaktadır (Liang ve Rogers, 1990). Şekil 3.2 den $C_A = C_M$ olduğu görülmektedir. Bu eğrilerin eğimlerinden $C_A = C_M = 6.2$ Mpa °C⁻¹ değeri bulunur. Böylece b_A ve b_M nin değeri Denk. (3.17) den $b_A = -2$ Mpa⁻¹ ve $b_M = -3$ Mpa⁻¹ olarak hesaplanabilir.

Martensite' den austenite' ye (M→A) olan dönüşümde

$$\xi = \frac{1}{2} \{ \cos[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] + 1 \} \quad (4.1)$$

olarak belirtilmiştir. Burada Cosine fonksiyonu (0 - π) aralığında değişmektedir. Denge sıcaklığı olan $T = 30$ °C için, Denk. (3.19) dan

$$6.2(30 - 34.5) - \frac{180}{|-2|} \leq \sigma \leq 6.2(30 - 34.5)$$

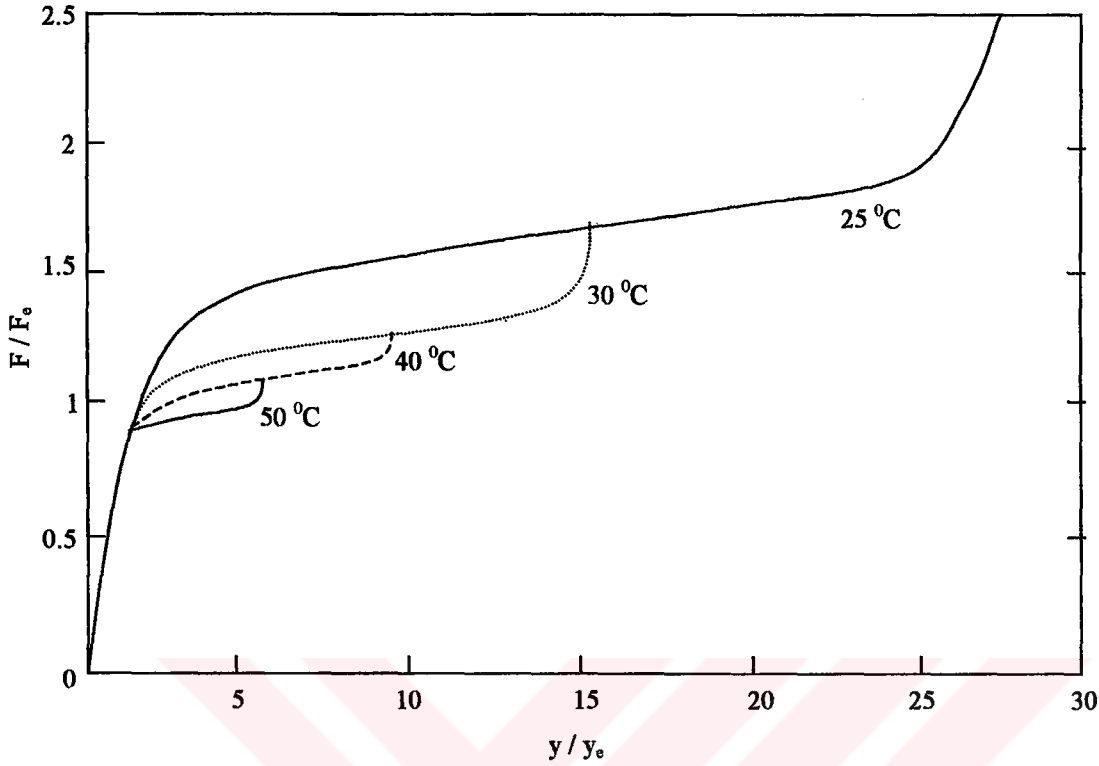
$$-117.9 \leq \sigma \leq -27.9$$

olduğu bulunur. Buna göre martensite miktarı kesirsel olarak

$$\xi = \frac{1}{2} \{ \cos[12.4(30 - 34.5) + (-2)(-27.9)] + 1 \}$$

$$\xi = 1$$

olur. Elastik modülü D ve kesme modülü G için Denk. (3.28) ve (3.29) un kullanılmasıyla $D = 26.3$ GPa. $G = 10.1$ GPa. değerleri bulunur. Değişik sıcaklıklarda normalize olmuş kuvvet (F_e) – yer değiştirme eğrisinin (y_e) eğrisi Şekil 4.1 de gösterilmektedir. Kuvvet – yer değiştirme sıcaklığın bir fonksiyonu oldukları Denk. (3.30), (3.36) ve (3.37) den anlaşılmaktadır.

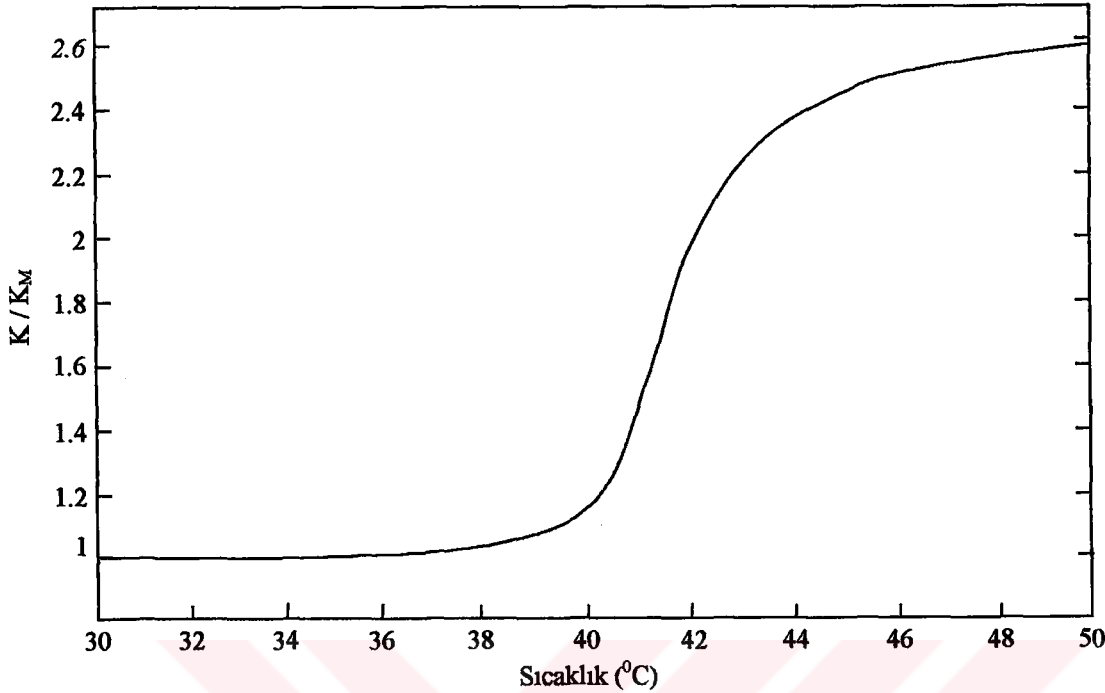


Şekil 4.1: Şekil hatırlamalı alaşım yayının değişik sıcaklıklarda normalize edilmiş kuvvet – yer değiştirme eğrisi (Liang ve Rogers, 1993).

Nitinol alaşım yayını 30 °C de 0.2 metrelik yer değiştirmenin etkisiyle 100 newtonluk maksimum bir kuvvet çıkışı elde etmek için dizayn edebiliriz. Yay çapı ise yapısal kısıtlamalar yüzünden 0.01 metredir. Şekil 4.1 de Nitinol için 30 °C de maksimum yer değiştirme $15y_e$ ve kuvvet ise $1.25F_e$ olarak görülmektedir. Tablo 4.1 de verilen değerlerin Denk. (3.30) da kullanılmasıyla Nitinol alaşımın elastik limiti $\sigma_e = 119.4$ MPa olarak hesaplanır. Nitinol alaşım telinin r yarıçapı Denk. (3.36) dan, $F_e = F / 1.25$ dikkate alınarak $r = 1.54 \times 10^{-3}$ metre olarak bulunur. Öte yandan bobin sayısı da Denk. (3.37) den , $y_e = y / 15$ dikkate alınmasıyla $N = 19.10$ olur. Şekil hatırlama alaşımından yapılmış yayın yay sabiti Şekil 4.2 den yararlanılarak, Denk. (3.27) nin kullanılmasıyla

$$K = \frac{r^4 G}{4R^3 N} = \frac{(1.54 \times 10^{-3})^4 10.1 \times 10^9}{4(5 \times 10^{-3})^3 19.10} \cong 5895 \text{ newton/metre}$$

olarak elde edilir. Şekil 4.2 de K_M düşük sıcaklık martensite fazdaki yay sabitini gösterirken, K şekil hatırlamalı alaşımlar için geleneksel yay sabitini belirtmektedir. Düşük sıcaklıklarda $K = K_M$ olduğunu burada kaydedelim.



Şekil 4.2: Şekil hatırlamalı alaşım yayının sıcaklık – yay sabiti ilişkisinin şematik gösterimi (Liang ve Rogers, 1993).

4.2. Şekil Hatırlama Alaşımalarının Büyük Sönüm Özelliklerinin Titreşim Kontrolünde Kullanılması

Bu bölümde şekil hatırlama alaşımalarının titreşim kontrolündeki uygulamalarını inceleyeceğiz. Aktif titreşim kontrolleri ya materyal özelliklerinin ayarlanmasıyla veya kontrol edilebilen uyarıları uygulamak suretiyle gerçekleştirilir. Şekil hatırlama alaşımaları ayarlanabilen bir esneklik katsayısı ve yeniden kazanılabilen recovery kuvvetine sahiptir. Şekil hatırlama alaşımalarının ayarlanabilme özellikleri ısıtma veya soğutmayı gerektirmesi nedeniyle yüksek frekans titreşim kontrolünde uygun olmayabilir, ancak düşük frekans titreşim kontrolünde ve yarı statik tepki kontrolünde bu alaşımlar kullanılabilir. Bu alaşımların martensitik fazının yüksek sönüm kapasitesi pasif titreşim kontrolünde kullanılabilir. Yapay elastik şekil hatırlama alaşımalarının histeretik sönümü ise pasif titreşim kontrollerinde kullanılabilir.

Bir şekil hatırlama alaşımının büyük bir iç sürtünmeye sahip olabilmesi için kendisine önceden belli bir zorun uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle sönümleyici (damper) bir alet olarak kullanılmaya durumunda bir şekil hatırlama alaşımı belli bir zor seviyesine kadar önceden yük uygulanmış olmalıdır.

Geleneksel bir viskoze sönüm modeli şekil hatırlama alaşımalarının iç sürtünme karakteristiklerini belirlemede kullanılabilir. Geleneksel yayın önceden yükleme olarak kullanıldığı ve paralel sönümleyici ile birlikte geleneksel yay olarak modellenilebilen tek serbestlik dereceli bir sistem dikkate alalım. Sönümün

zorlanma hızına lineer olarak bağılı olduğunu kabul edersek, sistemin karakteristik denklemini

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + (K_c + K_s)x + \frac{K_s \eta}{\omega} \frac{dx}{dt} = F_0 \cos \omega t \quad (4.2)$$

olarak yazabiliriz. Numune içindeki martensite tanelerinin kendi kendilerinin yerleşmeleri yüzünden Martensite – Martensite ara yüzeyinin Austenite – Martensite ara yüzeyine göre çok daha fazla zorlanmasından dolayı (Birchon ve ark., 1968) martensite taneciklerinin hareketi için büyük zorlanma genlikleri gerekmektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak lineer elastikliği dikkate alan bu denklem yerine, sistemi temsil eden denklem

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + (K_c + K_s)x + \frac{K_s \eta}{\omega} \frac{dx}{dt} + \beta x^3 = F_0 \cos \omega t \quad (4.3)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Bu denklemde üçüncü terim viskoze sönüme eşlik eden direnci temsil etmekte ve şekil hatırlama alaşım numunesinin iç sürtünmesini modellemektedir (Jones, 1987). Ayrıca η katsayısını Q^{-1} sönümüne özdeşleştir ve kayıp faktörü olarak bilinmekte, $F_0 \cos \omega t$ ise sürücü kuvvet olarak bilinmektedir. Öte yandan, K_c geleneksel yay sabiti ve K_s ise şekil hatırlama alaşımının yay sabitidir. Denk. (4.3) de x yerine u^* , t yerine t^* , ω yerine ω^* ve F_0 yerine F^* yazılırsa

$$\frac{d^2 u^*}{dt^{*2}} + \left(\frac{K_c + K_s}{m} \right) u^* + \frac{K_s \eta}{m \omega^*} \frac{du^*}{dt^*} + \frac{\beta}{m} u^{*3} = \frac{F^*}{m} \cos \omega^* t^* \quad (4.4)$$

olur. T^* karakteristik zaman ve U^* karakteristik uzunluk olmak üzere

$$t = \frac{t^*}{T^*} \quad (4.5)$$

$$u = \frac{u^*}{U^*}$$

değişken değiştirmesi yapılır ve

$$\frac{d}{dt^*} = \frac{d}{dt} \frac{dt}{dt^*} = \frac{1}{T^*} \frac{d}{dt} \quad (4.6)$$

$$\frac{d^2}{dt^{*2}} = \frac{1}{T^{*2}} \frac{d^2}{dt^2}$$

denklemleri dikkate alınır

$$\frac{1}{T^{*2}} \frac{d^2}{dt^2} u^* + k_1 u^* + k_2 \frac{1}{T^*} \frac{du^*}{dt} + k_3 u^{*3} = \frac{F^*}{m} \cos \omega^* t^* \quad (4.7)$$

bulunur. Burada

$$k_1 = \frac{K_c + K_s}{m}$$

$$k_2 = \frac{K_s \eta}{m \omega^*} \quad (4.8)$$

$$k_3 = \frac{\beta}{m}$$

olarak alınmıştır. Denk. (4.8)'in göz önünde bulundurulmasıyla Denk. (4.7)

$$\frac{U^*}{T^{*2}} \frac{d^2 u}{dt^2} + k_1 U^* u + \left(\frac{k_2}{T^*} U^* \right) \frac{du}{dt} + k_3 U^{*3} u^3 = \frac{F^*}{m} \cos \omega^* t T^* \quad (4.9)$$

olarak elde edilir. Bu denklemin her iki tarafının T^{*2} / U^* ile çarpılırsa

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + k_1 T^{*2} u + k_2 T^* \frac{du}{dt} + k_3 U^{*2} T^{*2} u^3 = \frac{F^*}{m} \frac{T^{*2}}{U^*} \cos \omega^* T^* t \quad (4.10)$$

ifadesi elde edilir. Denklemi boyutsuzlaştırmak için

$$k_1 T^{*2} = 1$$

$$k_2 T^* = \mu$$

$$k_3 U^{*2} T^{*2} = \varepsilon \quad (4.11)$$

$$\frac{F^*}{m} \frac{T^{*2}}{U^*} = F$$

$$\omega^* T^* = \omega$$

dikkate alınarak, Denk. (4.10)

$$\frac{d^2u}{dt^2} + u + \mu \frac{du}{dt} + \varepsilon u^3 = F \cos \omega t \quad (4.12)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemde $\varepsilon < 0$ yumuşak yay, $\varepsilon > 0$ ise sert yay yaklaşımını temsil etmektedir. Denk. (4.10) da

$$\mu = k_2 T^* = \frac{K_s \eta T^{*2}}{m \omega} \quad (4.13)$$

$$\delta = \frac{K_s \eta T^{*2}}{m}$$

ifadeleri kullanılır ve Denk. (4.10) un dikkate alınmasıyla

$$\ddot{u} + \frac{\delta}{\omega} \dot{u} + u + \varepsilon u^3 = F \cos \omega t \quad (4.14)$$

Denk. (4.14) Duffing denklemi olarak bilinir ve bu denklemi çözmek maksadıyla aynı denklemi

$$\ddot{u} + (\delta/\omega) \dot{u} + u + \varepsilon u^3 = H \cos \omega t - G \sin \omega t \quad (4.15)$$

şeklinde yazmak uygun olacaktır. Bu denklemin yaklaşık çözümünü bulmak için

$$u = A \cos \omega t \quad (4.16)$$

çözümünü teklif edelim. Ritz metodundan yararlanarak, Denk. (4.16) in Denk. (4.15) de kullanılmasıyla ve $\cos^3 \omega t = \frac{3}{4} \cos \omega t + \frac{1}{4} \cos 3\omega t$ gibi yüksek mertebeden yüksek harmoniklerin ihmal edilmesiyle

$$(1 - \omega^2)A + \frac{3}{4} \varepsilon A^3 = H \quad (4.17)$$

$$A\delta = G \quad (4.18)$$

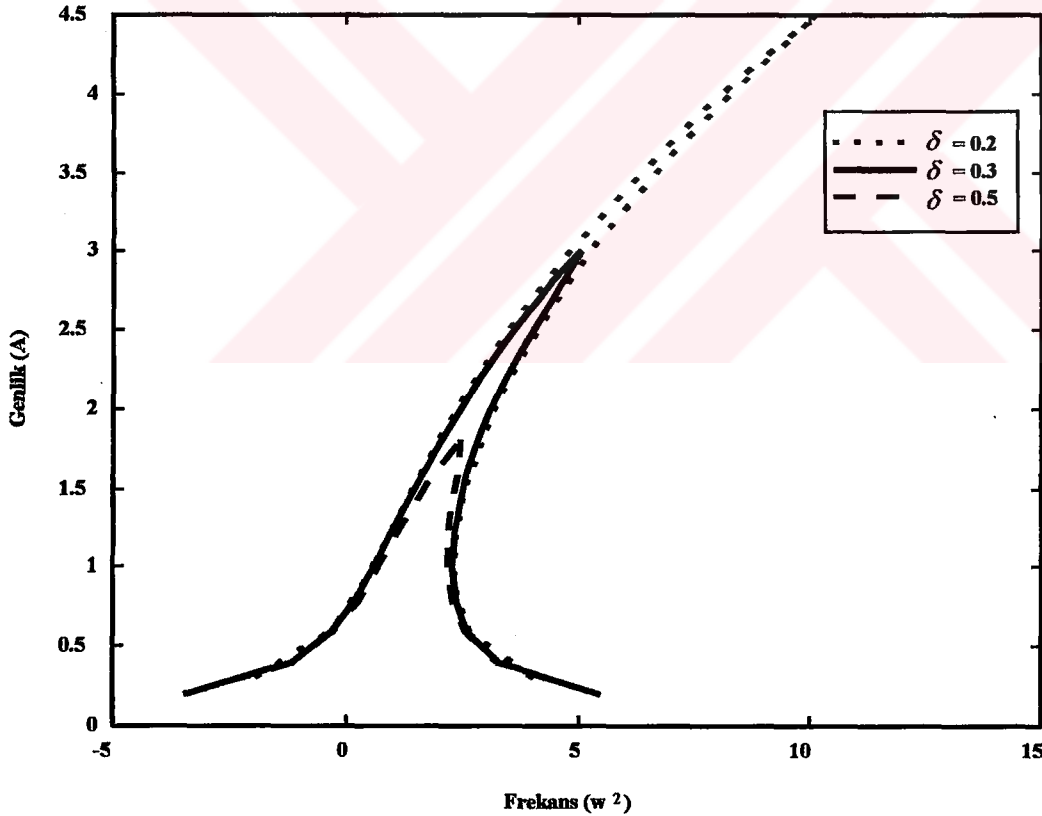
ifadeleri elde edilir. Burada $\cos^3 \omega t = \frac{3}{4} \cos \omega t + \frac{1}{4} \cos 3\omega t$ ifadesi kullanılmıştır.

Denk. (4.17) ve (4.18) in karelerinin toplanmasıyla

$$\left[(1 - \omega^2)A + \frac{3}{4} \varepsilon A^3 \right]^2 + A^2 \delta^2 = H^2 + G^2 = F^2 \quad (4.19)$$

bulunur (Stoker, 1958). Burada $F^2 = H^2 + G^2$ olduğu varsayılmıştır. Sert yay yaklaşımının yapıldığı Denk. (4.19) da ve δ nın 0.2, 0.3 ve 0.5 gibi çeşitli değerleri için genliğin (A) frekansın karesi (ω^2) ne göre grafiğini çizersek Şekil 4.3 elde edilir. Bu şekilde elde edilmesinde $\varepsilon = 0.6$ ve sürücü kuvvetin genliği olan, F , 0.9 değerinde sabit tutulmuştur. Bu grafik sönümün artırılması halinde elde edilen titreşim genliklerinin gittikçe azalacağını göstermektedir. Piklerin tepe genliklerinin sönüm katsayısının azalmasıyla azalacağını da aynı grafikten görmek zor olmayacaktır. Öte yandan söz konusu grafikten martensitik faz dönüşümüne eşlik eden histeresis olayını da oldukça açık olarak belirtmekte ve frekansın artırılması halinde de genliğin önce artacağı sonra belli bir frekansta (şekilde $\omega \cong 2, 3$ birim) tepe noktasından birden bire $A = 0.25$ değerine düşerek sonuçta sifıra gideceği görülmektedir.

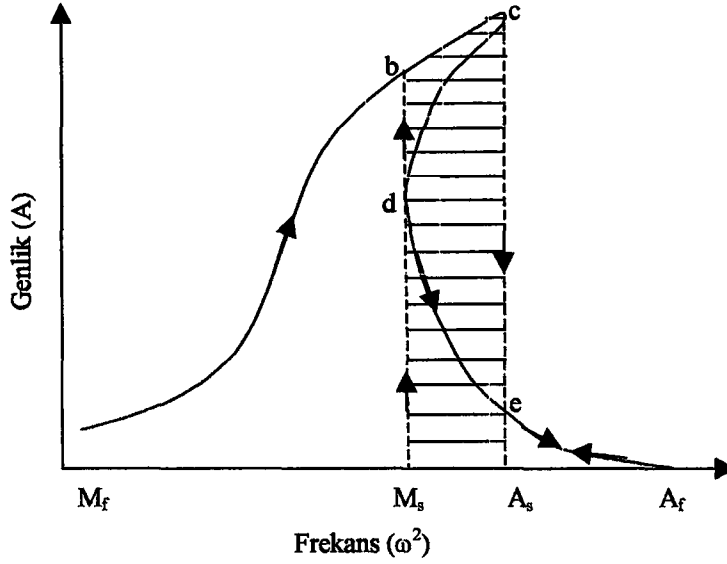
Benzer şekilde sürücü kuvvetin frekansının $\omega \approx \sqrt{2.5} = 1.58$ değerine kadar azaltılması halinde genlik bu noktada birden bire $A \approx 2$ değerine yükselmektedir. Genlikteki bu değişme Jumping olayı olarak adlandırılır. Daha sonra frekansın daha da azaltılmasıyla genlik yeniden 0 değerine kadar azalmaktadır.



Şekil 4.3: Sönüm katsayısının, δ , çeşitli değerleri için genlik – frekans tepki eğrileri.

Söz konusu histeresis olayında da genlik, Austenite \rightarrow Martensite dönüşümünde (ileri yönlü) ve Martensite \rightarrow Austenite dönüşümünde (geri yönlü)

farklı yolları takip etmektedir. Bu yollar Şekil 4.4 de $b \rightarrow c \rightarrow e$ ve $e \rightarrow d \rightarrow b$ olarak belirtilmiştir.



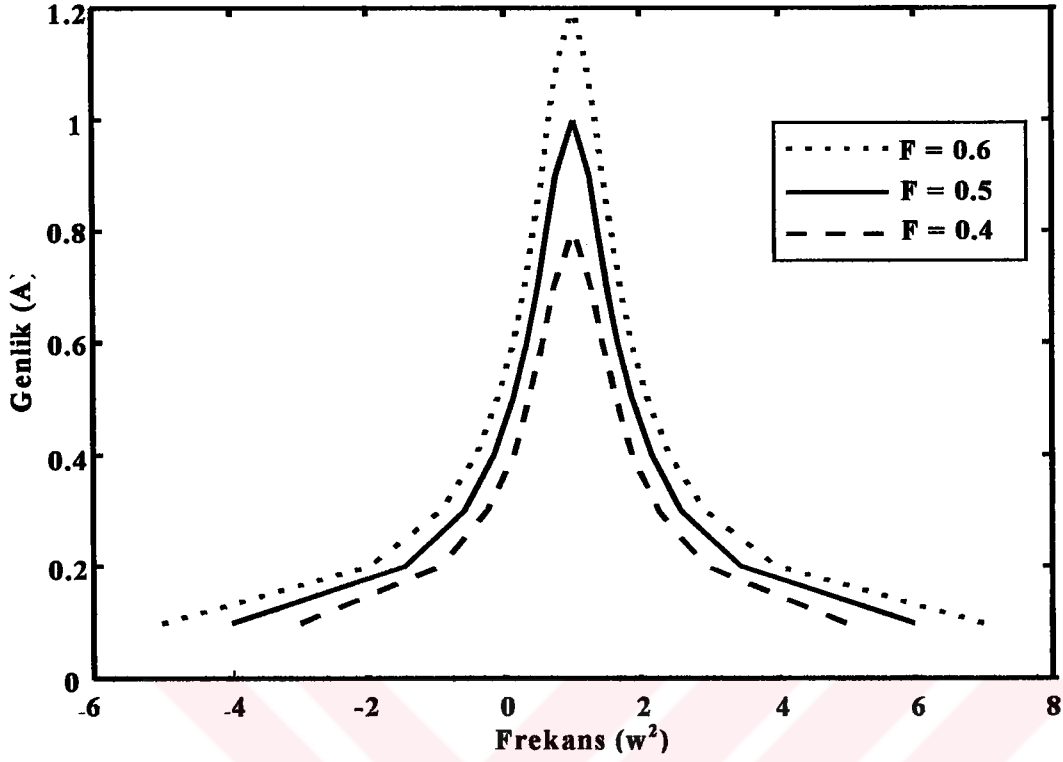
Şekil 4.4: Şekil hatırlama alaşımlarına eşlik eden histeresis eğrisi.

Şekil 4.4 de genlik – frekans tepki eğrisi üzerinde histeresis bölgesi taranmış olarak görülmektedir. Diğer taraftan Denk. (4.15) de $\varepsilon = 0$ ve $G = 0$ alınması halinde sistemin lineer dinamik denklemi olan Denk. (4.2) elde edilir. Bu durumda Denk. (4.19)

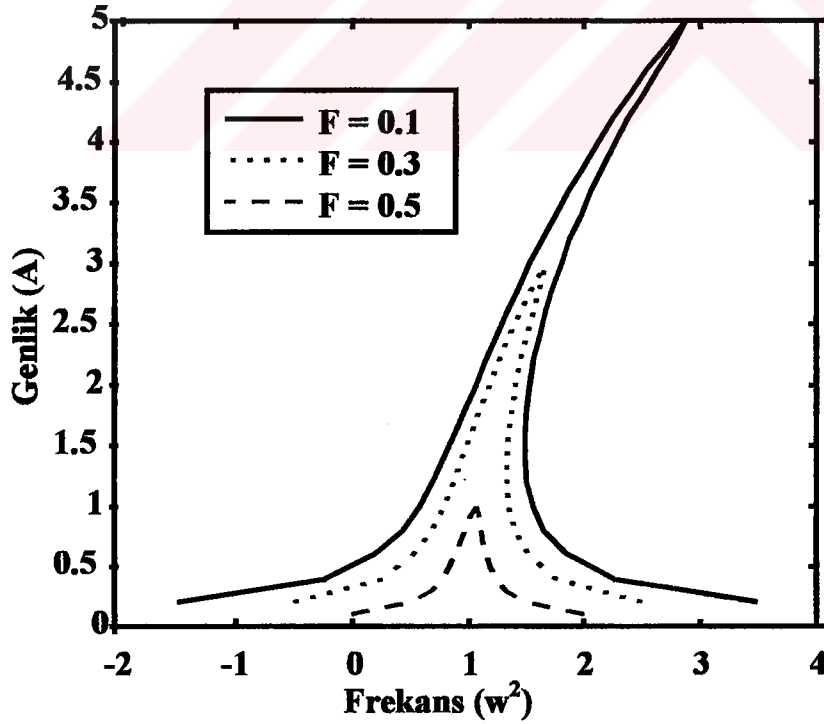
$$A^2 \left((1 - \omega^2)^2 + \delta^2 \right) = F^2 \quad (4.20)$$

şeklini alır. Bu denklem kullanılarak çizilen genlik – frekans tepki eğrisi Şekil 4.5 de görülmektedir. Şekilden sürücü kuvvetin genliğinin sıfır olması halinde rezonans tepki eğrisinin frekansa göre çan eğrisi şeklinde bir dağılım gösterdiği görülmektedir.

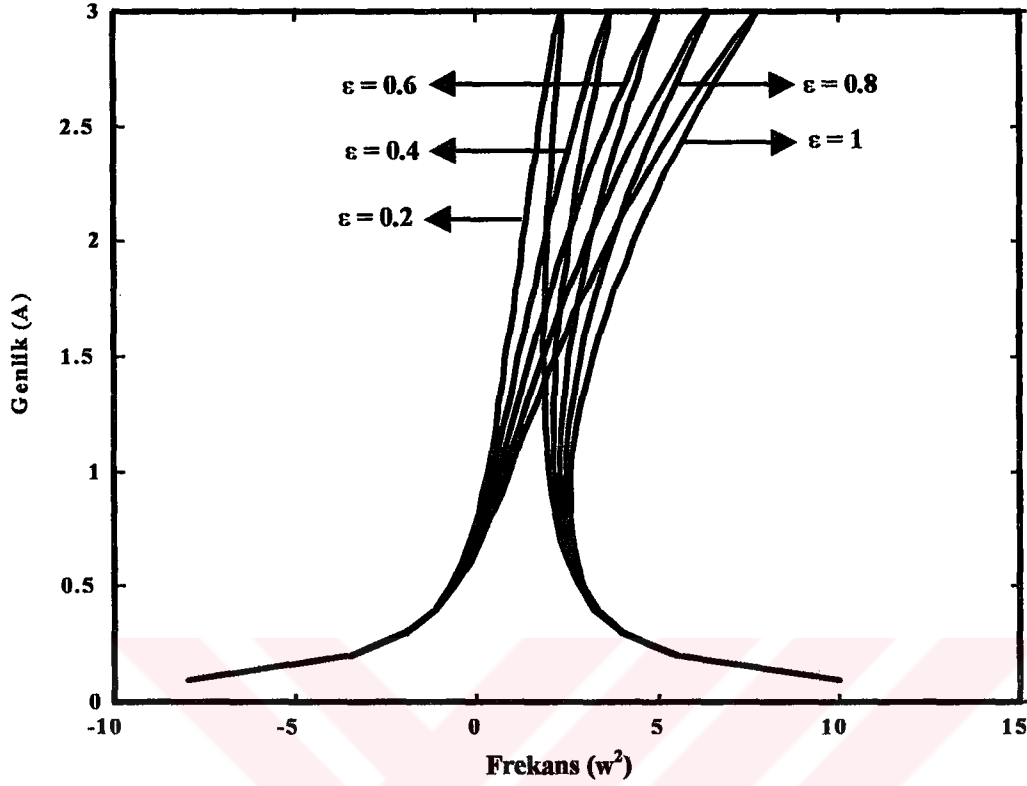
Sürücü kuvvetin genliği büyüdükçe simetrisinin bozulduğu ve sistemi temsil eden hareket denkleminin lineer olmayan karakterinin baskın duruma geçtiği görülmektedir.



Şekil 4.5: Lineer olmayan terim katsayısı, $\varepsilon = 0$ ve sönüm katsayısı $\delta = 0.5$ için genlik – frekans tepki eğrileri.



Şekil 4.6: Lineer olmayan terim katsayısı $\varepsilon = 0.1$, sönüm katsayısı $\delta = 0.1$ ve sürücü kuvvetin çeşitli değerleri için genlik - frekans tepki eğrileri.



Şekil 4.7: Lineer olmayan terim katsayısının, ε , çeşitli değerleri için genlik – frekans tepki eğrileri.

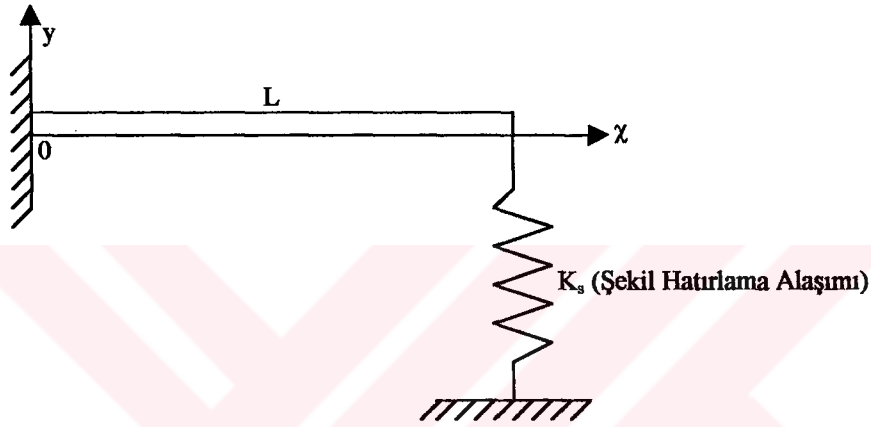
Şekil 4.7 lineer olmama özelliğini veren terim katsayısı olan ε nun değişmesiyle, ve önceki parametrelerin kullanılmasıyla genlik – tepki eğrilerini göstermektedir. ε nun çeşitli değerleri için elde edilen bu eğrilerde bulunduğu titreşim genliğinin sabit olduğu görülmektedir. ε katsayısının büyük değerlerinde lineerlikten sapma da artmakta ve bu durum eğrilerin tepe noktalarının büyük frekanslara doğru kayması şeklinde, eğrilerin bükülmeleri ile kendini göstermektedir. ε nun küçük değerleri de ise genlik – frekans tepki eğrileri lineer özellik göstermesi ve eğri $\omega = 0$ frekansının iki yanında simetrik bir davranış göstermektedir.

4.3. Şekil Hatırlamalı Alaşımlardan Yapılmış Yayların Sertlik Özelliklerinin Titreşim Kontrolünde Kullanılması

Öte yandan Şekil hatırlama alaşımlarından yapılmış yayların sertliğinin değişebilme özelliğini kullanarak titreşimlerin kontrolü de söz konusu olabilmektedir. Bu tür alaşımlarda oluşan martensitik dönüşümlerde sıcaklığın değişimine bağlı olarak austenite fazı için Young modülünün değeri martensite fazı için bulunan değerden 3 – 4 defa daha büyük olmaktadır. Kesme modülü için de aynı bağıntıyı vermek mümkün olmaktadır. Şekil hatırlamalı alaşımlarından yapılmış yayların yay sabiti kesme modülüne lineer bir şekilde bağlıdır ve küçük bir sıcaklık bölgesinde diğer bölgelere göre 3 defa farklı olduğu ortaya çıkmıştır. Nitinol' den

yapılmış Şekil hatırlama alaşımı için faz dönüşümünün kapsadığı sıcaklık bölgesi (283 K – 305 K) arasında bulunmaktadır. Şimdiye kadar uygulamalarda Şekil hatırlama alaşımlarının sertliklerinin değişimleri özelliğinin kullanılması sadece yüksek sıcaklık veya düşük sıcaklık modülleri için söz konusu olmaktadır. Basitçe sıcaklığı kontrol etmek suretiyle orta sıcaklıklarda Young modülü değişimi özelliğini kullanmak mümkün olmamaktadır.

Bunun nedeni, Şekil hatırlama alaşımının Young modülünün uygulanan sıcaklık ve zor ile değişebilen martensite miktarının bir fonksiyonunun olmasına bağlanabilir. Şekil hatırlama yaylarının sertlik değişimi özelliğini kontrol elamanı olarak kullanmak amacıyla bir ucu sabitleştirilmiş, diğer serbest ucuna şekil hatırlama alaşımından yapılmış bir yayın takıldığı bir düzeneği dikkate alalım (Şekil 4.9).



Şekil 4.8: Bir ucu sabit, diğer ucu Şekil hatırlama alaşımından yapılmış bir yayın bağlı bulunduğu bir titreşim sistemi.

Burada çubuğun boyu L ve yay sabiti K_s dir. Söz konusu titreşim sisteminin diferansiyel denklemi

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (4.21)$$

olarak yazılabilir. Burada ρ çubuğun yoğunluğu, E Young modülü ve I ise çubuğun bir ucuna göre eylemsizlik momentidir. Denklem (4.21) değişkenlere ayrılarak çözülebilir. $y = f_1(t)f_2(x)$ olarak alınır, Denk. (4.21) de kullanılır ve düzenlemeler yapılırsa

$$\frac{1}{f_1(t)} \frac{d^2 f_1(t)}{dt^2} = \left(\frac{EI}{\rho} \right) \frac{1}{f_2(x)} \frac{d^4 f_2(x)}{dx^4} = -\omega_n^2 \quad (4.22)$$

bulunur. Bu denklemin düzenlenmesiyle

$$\frac{d^2 f_1(t)}{dt^2} + \omega_n^2 f_1(t) = 0 \quad (4.23)$$

ve

$$\frac{d^4 f_2(x)}{dx^4} - \frac{\rho \omega_n^2}{EI} f_2(x) = 0 \quad (4.24)$$

bulunur. Denk. (4.23) tartışmamızı etkilemeyeceğinden dolayı Denk. (4.24) ün çözümünü ele alalım. Denk. (4.24) ü

$$\frac{d^4 f_2(x)}{dx^4} - k^4 f_2(x) = 0 \quad (4.25)$$

şeklinde yazalım. Burada $k^4 = \rho \omega_n^2 / EI$ olarak alınmıştır. Denk. (4.25) in çözümü

$$f_2(x) = A \cos kx + B \sin kx + C \cosh kx + D \sinh kx \quad (4.26)$$

dir. $f_2(x)$ ve ω_n titreşim frekansı sınır şartları ile belirlenebilir. Şekil 4.8 deki sınır şartları

$$f_2(x) \Big|_{x=0} = 0 \quad (4.27)$$

$$\text{Dönme momenti} = -EI \frac{d^2 f_2(x)}{dx^2} \Big|_{x=L} = 0 \quad (4.28)$$

$$\text{Kuvvet} = -EI \frac{d^3 f_2(x)}{dx^3} \Big|_{x=L} = K_s f_2(x) \quad (4.29)$$

şeklinde yazılabilir. Denk. (4.27), (4.28) ve (4.29)un Denk.(4.25) de kullanılmasıyla

$$A + C = 0 \quad (4.30)$$

$$k(B + D) = 0 \quad (4.31)$$

$$(\cos kL + \cosh kL)C + (\sinh kL + \sin kL)D = 0 \quad (4.32)$$

$$(k^3 \sin kL - K_s \cos kL)A - (k^3 \cos kL + K_s \sin kL)B \quad (4.33)$$

$$+ (k^3 \sinh kL - K_s \cosh kL)C + (k^3 \cosh kL - K_s \sinh kL)D = 0$$

ifadeleri elde edilir. Denk. (4.30) ve (4.31) den $A = -C$ ve $B = -D$ ifadeleri Denk. (4.32) ve (4.33) de yerine konulup elde edilen denklemlerin katsayı determinantının sıfıra eşitlenmesiyle

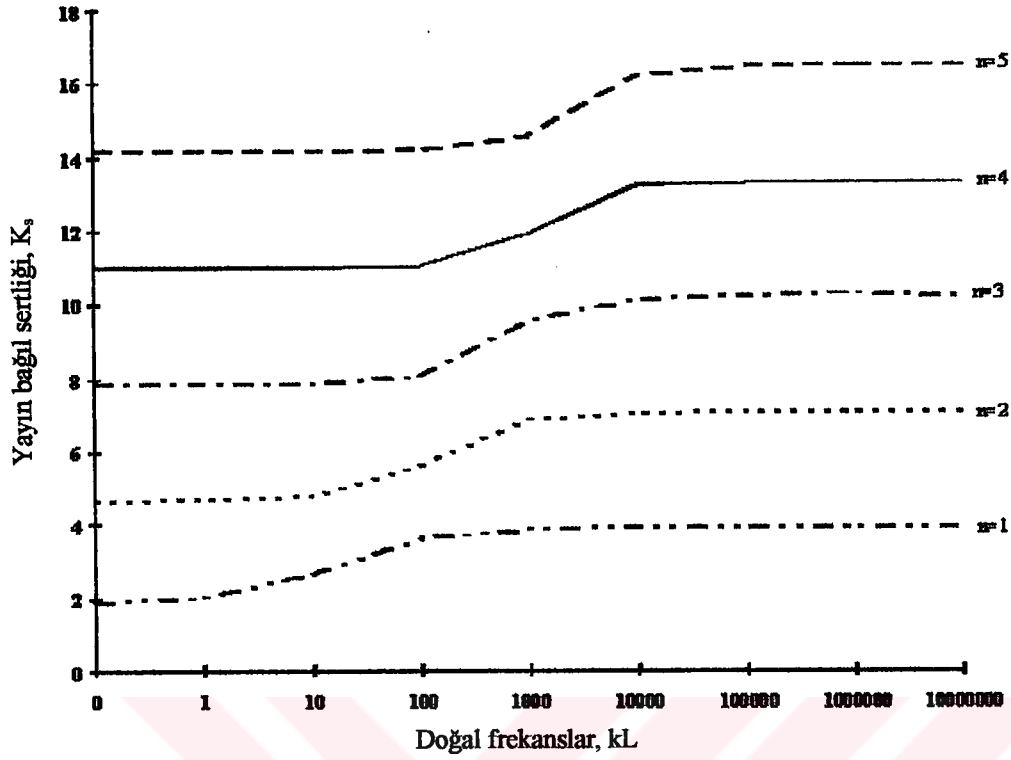
$$\bar{K}(\sin kL \cosh kL - \cos kL \sinh kL) + (kL)^3 (1 + \cosh kL \cos kL) = 0 \quad (4.34)$$

ifadesi bulunur. Burada $\bar{K} = K_s L^3 / EI$ dir. Bu ifade yayın sertliğinin çubuğun sertliğine oranını vermektedir. Öte yandan k nın sistemin doğal frekansı olan ω_n ye $k = (\rho \omega_n^2 / EI)^{1/4}$ şeklinde bağlı olduğunu burada yeniden belirtelim. Denk. (4.34) den $k_n L$ titreşim frekansları Bilgisayar kullanılarak hesaplanmış ve n nin birkaç değeri için elde edilen değerler Tablo 4.2 de verilmiştir.

Tablo 4.2: Çubuk sisteminin ilk beş mod için bağıl frekansı

\bar{K}	$k_n L$ (İndirgenmiş Birim)				
	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5
0	1.8751	4.6941	7.8547	10.9955	14.1371
1	2.0100	4.7037	7.8568	10.9962	14.1375
5	2.3667	4.7432	7.8651	10.9963	14.1376
1.0	2.6389	4.7937	7.8756	11.0031	14.1407
1.00	3.6405	5.6169	8.0840	11.0748	14.1735
1.000	3.8978	6.8762	9.5525	11.9509	14.5815
1.000.0	3.9237	7.0507	10.1549	13.2218	16.2280
1.000.00	3.9263	7.0668	10.2048	13.3042	16.4705
1.000.000	3.9265	7.0684	10.2960	13.3246	16.4911
1.000.000.0	3.9265	7.0685	10.2101	13.3516	16.4931
1.000.000.00	3.9265	7.0685	10.2101	13.3516	16.4931

$\bar{K} = 0$ için bulunan frekans değerlerinin bir ucu sabit diğer ucu serbest bir çubuğun titreşimlerini verdiği Tablo 4.2 den görülebilir. Şekil hatırlama alaşımından yapılmış bir yayın kullanılan çubuğun sertliğine oranının küçük değerleri için başka bir deyişle K_s nin martensitik değeri için sistemin frekanslarının yayın sertliğine çok duyarlı olduğu görülmektedir. Oysa Tablo 4.2 den bu oranın aynı değerinde yüksek mertebeden frekansların yayın sertliğine hiç duyarlılık göstermediği anlaşılmaktadır. \bar{K} nin büyük değerlerinde yani K_s nin austenitik değerlerinde elde edilen sonuçlar tamamen ters bir görüntü vermektedir. Şöyle ki $0 < \bar{K} < 5$ için ilk doğal frekanstaki artış (bu durumda $n = 1$), % 26 iken ikinci doğal frekanstaki artış (bu durumda $n = 2$) %1 kadardır. Oysa yüksek doğal frekansta hiçbir değişme görülmemektedir. $10^3 < \bar{K} < 10^{10}$ ise ilk doğal frekansta pek fazla bir değişme görülmezken özellikle 4. ve 5. Doğal frekanslarda değişmeler bariz bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.9 da K_s nin kL ye göre değişimleri n nin birkaç değeri için verilmiştir.



Şekil 4.9: Destek olarak kullanılan Şekil hatırlama alaşımından yapılmış bir yayın bağıl sertliğinin çeşitli n değerleri için sistemin doğal frekanslarına göre değişimi.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Martensitik dönüşüm austenite faz olarak adlandırılan, sıcaklık ve uygulanan zorun ayrı ayrı veya birlikte uygulanmasıyla, dönüşüm öncesi kristal yapının martensite yapıya dönüşmesi olayıdır. Bir çok metal ve alaşım sisteminde gözlenen ve birinci mertebeden yapısal bir faz dönüşümü olan bu dönüşümlerin en önemli özelliği, atomların ilk komşuluklarının dönüşüm sonrasında da korunarak difüzyonsuz olarak gerçekleşmesidir. Dönüşümler difüzyonsuz olarak gerçekleştiğinden martensite faz, ana fazın yapısından kaynaklanan düzenli bir yapıya sahip olur. Ayrıca dönüşümle elde edilen martensite yapı, $T < M_f$ sıcaklığında zor uygulayarak deforme edilir ve $T > A_f$ sıcaklığına kadar yeniden ısıtılırsa başlangıçtaki orijinal fazını, yani şeklini tekrar kazanmış olur. Bu olay şekil hatırlama olayı olarak adlandırılır. Numunenin $T < M_f$ ile $T > A_f$ sıcaklıkları arasında çevrim yaptırılmasıyla deforme edilmiş, orijinal şeklini tekrar kazanması da tersinir şekil hatırlama olayı olarak adlandırılır.

Şekil hatırlama olayı bir çok alanda uygulanabilmekte ve teknolojinin bir parçası haline gelmiş bulunmaktadır. Seracılık, enerji üretimi, dişçilik, ortopedi, plastik sanatlar, uzay ve uçak sanayii gibi bir çok uygulama sahası bulunmaktadır (Wayman, 1964).

Bu çalışmada, şekil hatırlamalı alaşımlardan yapılmış Nitinol (NiTi) ün lineer ve lineer olmayan davranışları incelenmiştir. Şekil hatırlama alaşımlarının lineer olmayan hali iç faz dönüşümlerinden kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan şekil hatırlama alaşım modelinin çok boyutlu oluşum ilişkisi (Liang ve Rogers, 1991) üzerine kurulmuş olan şekil hatırlama alaşımının tek boyutlu kesme zor ve zorlanma ilişkisinin Denk. (3.1) şeklinde ifade edilebileceği belirtilmiştir. Nitinol alaşımından yapılmış yayların Tablo 4.1 de verilen materyal sabitleri kullanılarak $a_A = 12.41 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $a_M = 19.1 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $b_A = -2 \text{ Mpa}^{-1}$, $b_M = -3 \text{ Mpa}^{-1}$ ve $C_A = C_M = 6.2 \text{ MPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ parametreleri hesaplanmıştır. Martensite'den austenite'ye (M→A) olan dönüşümde, şekil hatırlamalı alaşımlardan yapılmış Nitinol yayların $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ lik denge sıcaklığı, 0.2 metrelik yer değiştirme, 100 newtonluk bir kuvvetin etkisi ve 0.01 metrelik yay çapının dikkate alınmasıyla martensite kesri $\xi = 1$, zor $\sigma = -117.9 \leq \sigma \leq -27.9$, elastik modülü $D = 26.3 \text{ GPa}$, kesme modülü $G = 10.1 \text{ Gpa}$ olarak hesaplanmıştır. Öte yandan elastik limit $\sigma_e = 119.4 \text{ MPa}$, yayın tel yarıçapı $r = 1.54 \times 10^{-3} \text{ metre}$, sarım sayısı $N = 19.10$ ve yay sabiti $K \cong 5895 \text{ newton / metre}$ olduğu görülmüştür.

Geleneksel bir viskoze sönüm modeli geleneksel yay olarak modellenebilen tek serbestlik dereceli bir sistem dikkate alınarak, sönümün zorlanma hızına lineer olarak bağlı olduğu kabul edilmiş ve sistemin hareket denklemi incelenmiştir. Şekil hatırlama alaşım numunesinin iç sürtünmesini modellemek için bu denkleme $\beta\chi^3$ viskoze sönüm terimi eklenerek, Denk. (4.3) çözülmüştür. Şekil 4.3 de ise bu çözüme bağlı olarak sönüm katsayısı δ nın çeşitli değerleri için genlik – frekans tepki eğrisi çizilmiştir. Bu lineer olmayan grafik sönümün artırılması halinde elde edilen titreşim genliklerinin gittikçe azaldığını göstermektedir. Diğer taraftan martensitik faz dönüşümüne eşlik eden histeresis olayı da incelenmiş olup Şekil 4.4 de taranmış olarak gösterilmiştir.

Öte yandan Denk. (4.15) de lineer olmama özelliği veren terimin katsayısı olan ε ve G parametrelerinin sıfır alınması hainde sistemin hareket denklemi lineer

bir denklem olan Denk. (4.20) ye dönüşür. Bu durum Şekil 4.5 de gösterilmiştir. Söz konusu grafikten, sürücü kuvvetin genliğinin sıfır olması halinde rezonans tepki eğrilerinin frekansa göre simetrik bir dağılım gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.6 da ε nun değişmesi ve diğer parametrelerin sabit tutulması halinde eğri piklerinin sağa doğru eğilerek, lineer olmayan bir genlik – frekans tepki karakteri arzettiği görülmüştür.

Ayrıca şekil hatırlama alaşımlarından yapılmış yayların sertlik özelliklerinin titreşim kontrolünde kullanılması incelenmiştir. Şimdiye kadar olan uygulamalarda şekil hatırlama alaşımlarının sertliklerinin değişimleri özelliğinin kullanılması sadece yüksek sıcaklık veya düşük sıcaklık modülleri için dikkate alınmaktaydı. Şekil hatırlama alaşımlarının Young modülünün uygulanan sıcaklık ve zor ile değişebilen martensite miktarının bir fonksiyonu olması nedeniyle sıcaklığı kontrol ederek orta sıcaklıklarda Young modülünün değişim özelliğini kullanmak mümkün değildir. Bu durumla ilgili olarak bir ucu sabit, diğer ucu şekil hatırlama alaşımından yapılmış bir yayın bağlı bulunduğu bir titreşim sistemi dikkate alınmış ve söz konusu titreşim sisteminin diferansiyel denklemi çözülmüştür. $k_n L$ titreşim frekansları Bilgisayar kullanılarak hesaplanmış ve n nin birkaç değeri için bulunan değerler Tablo 4.2 de verilmiştir. Bu tablodaki $\bar{K} = 0$ iken bulunan frekans değerlerinin bir ucu sabit diğer ucu serbest bir çubuğun titreşimlerini verdiği görülmüştür. Tablo 4.2 den $0 < \bar{K} < 10$ için ilk doğal frekanstaki artış (bu durumda $n = 1$) %26, ikinci doğal frekanstaki artış (bu durumda $n = 2$) %1 iken yüksek doğal frekansta hiçbir değişme görülmemiştir. Oysa $10^3 < \bar{K} < 10^{10}$ iken ilk doğal frekansta pek fazla bir değişme görülmezken, özellikle 4. ve 5. doğal frekanslarda değişmeler açık bir şekilde görülmektedir. K_s nin kL ye göre değişimleri çizilmiş ve n nin birkaç değeri için Şekil 4.9 oluşturulmuştur. Doğal frekanslardaki söz konusu değişimler bu şekilden açıkça görülmektedir.

Yay sabitinin incelenmesi dolaylı olarak yukarıdaki basit titreşim sisteminin frekanslarının incelenmesine olanak vermekte ve yay sabitinin değişmesi özelliğinin titreşim kontrolünde uygulanmasına neden olmaktadır.

Şekil hatırlamalı alaşımlar ile ilgili daha pek çok çalışma yapılarak çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Örneğin deprem sırasında uygulanan kuvvetin bina kolonlarının elastik sınırları içinde tutulmasını sağlayacak şekilde bir dizayn yapılabilir. Şiddetli yer sarsıntılarının oluşturacağı titreşim enerjilerini yok etmek için binaların kolonlarının içine şekil hatırlama alaşımlarından yapılmış ince lifli teller kullanılabilir. Böylece binaların yıkılması önenebilir.

KAYNAKLAR

- BIRCHON, D., BROMLEY, D.E., and HEDLEY, D., 1968. *Metals Sci. J.*, 2, 41.
- BUEHLER, W.J., and WILEY, C.R., 1965. Nickel-Based Alloys, US Patent 3, 174, 851.
- BUEHLER, W.J., GILFRICH, J.W. and WILEY, R.C., 1963. Effect of Low Temperature Phase Changes, on the Mechanical Properties of Alloys near Composition NiTi, *J. Appl. Physics*, 34, 1475-1477.
- BURKART, M.W. and READ, T.A., 1953. Diffusionless Phase Change in the In-Ti System, *Trans. A.I.M.E.*, 197, 1516-1524.
- CHANG, L.C., 1954. Atomic Displacement and Crystallographic Single Crystals Containing 47.5 Atomic Percent Cadmium, *Acta Cryst.*, 4, 320-324.
- CLAPP, P.C., 1988. In *Phase Transformation*, 87 (Ed. G.W. Lorimer), Inst. of Metals, London, p. 391.
- CROSS, W.B., KARIORIS, A.H., and STIMLER, F.J., 1970. Nitinol Characterization Study, Goodyear Aerospace Corporation Report, No. Ger 14188 (NASA CR-1423), Akron, OH.
- DELAEY, L., DERUYTTERE, A., AERNOUDT, E. and ROSS, J.R., 1978. Shape Memory Effect, Superelasticity and Damping in Copper-Zinc-Aluminium Alloy, INCRA Report 78R1, Belgium.
- DELAEY, L., KRISHNAN, R.V., TAS, H., and WARLIMONT, H., 1974. Thermoelasticity, Pseudoelasticity and the Memory Effects Associated with Martensitic Transformations, *Journal of Materials Science*, 9, 1521-1535.
- DOĞAN, A., 1992. Martensitic Formation and Internal Friction, *Acta Physica Hungarica*, 72, 47.
- DURLU, T.N., 1979. Strain-Induced Martensite in Fe-Ni-C Alloys, *Proceedings of ICOMAT 79*, Boston, 40-45.
- DYE, T.E., 1990. An Experimental Investigation of the Behavior of Nitinol Master Thesis. Department of Mechanical Engineering, Virginia Tech. Blacksburg, VA.
- FRIEND, C.M., 1986. Factors Affecting Reversible Shape Memory, Ph. D. Thesis, Surrey University, Surrey, England.
- , 1986a. Factors Affecting Reversible Shape Memory, Doktora tezi, Surrey Üniv.
- FUNAKUBO, H., 1986, *Shape Memory Alloys*, Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- GOLESTANEH, A.A., 1984. Shape Memory Phenomena, *Physics Today*, April 1984, 62-70.
- HORNBOGEN, E., 1988. Fatigue of Copper-Base Shape Memory Alloys, Engineering Aspect of Shape Memory Alloys, Michigan State University, Kellogg Center, 5-17 August 1988, Unpublished Study.
- KRISHNAN, R.V., DELAEY, L., TAS, H., ve WARLIMONT, H., 1974. Thermoelasticity, Pseudoelasticity and the Memory Effects Associated with Martensitic Transformations, Part 2, *Journal of Materials Science*, 9, 1536-1544.

- KURDJUMOW, G.V., 1986. The Nature of Martensitic Transformations, *Journal of Metals*, 11, 449-453.
- LING, H.C.ve OWEN, W.S., 1981. A Model of the Thermoelastic Growth of Martensite, *Acta Metall.*, 29, 1721- 1736.
- LIANG, C., 1990. Constitutive Modeling of Shape Memory Alloys, PhD Dissctation, Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and state University, Blacksburg, VA.
- LIANG, C., and ROGERS, C.A., 1990a. A One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relation of Shape Memory Materials, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 1, No. 2, pp. 207-234.
- , 1990b. Design of of Shape Memory Alloy Actuators, *Intelligent Structures*, Proceedings of the International Workshop on Intelligent Structures Taipei, Taiwan, July 23-26, Chong, K.P., Liu, S.C., and Li, J.C., eds. Elsevier, London, pp. 416-418.
- , 1991. The Multi-Dimensional Constitutive Relations of Shape Memory Alloys, Proceedings of the 32nd Structures, Structural Dynamics, and Material Conference, Baltimore, MD, April 8-10, pp. No. AIAA 91-1165.
- LUND J.W. and ORCUTT F.K 1967. Transactions of the American Society of Mechanical Engineering for Industry, 89, 785-796. Calculation and experiments on the unbalance response of a flexible rotor.
- MIWA S., 1971. Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers, 37, 949-958. Balancing of a flexible rotor (in Japanese).
- MIYAZAKI, S. and OTSUKA, K., 1989. Development of Shape Memory Alloys, *Isij International*, Vol. 29, No. 5, 353-377.
- NAGAYA, K., TAKEDA, S., TSUKUI, Y., and KNMAIDO, Y., 1987. Active Control Method for Passing Through Critical Speeds of Rotating Shafts by Changing Stiffness of the Supports with use of Memory Metals, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 113, No. 2, pp. 307-315.
- NISHIYAMA, Z., 1978. Martensitic Transformation, Ed. WAYMAN, C.M., MESHIL, M. And MORRIS, E.F., Academic Press, inc., New York.
- OLSON G.B. and COHEN, M., 1975. Thermoelastic Behaviour in Martensitic Transformations, *Scripta Metall.*, 9, 1247-1254.
- ORTIN, J. and PLANES, A., 1988. Thermodynamic Analysis of Thermal Measurements in Thermoelastic Martensitic Transformations, *Acta Metall.*, Vol. 36, No.8, 1873-1889.
- ORTIN, J. and PLANES, A., 1989. Thermodynamics of Thermoelastic Martensitic Transformations, *Acta Metall.*, Vol. 37, No. 5, 1433-1441.
- OTSUKA, K. and SHIMIZU, K., 1986. Pseuelasticity and Shape Memory Effects in Alloys, *International Metals Reviews*, Vol. 31, No. 3, 93-114.
- OTTO, H.M., HOMAS, G., SCHATZ, D. and W. GERBARTCH., 1965. High Strength Metals, 257.
- PERKINS, J., 1975. Shape Memory Effects in Alloys, Plenum Press.
- PORTEK, D.A. and Easterling, K.E., 1993. Phase Transformation in Metals and Alloys, Second edition, Chapman & Hall, New York.
- Robert, E. and Reed, H., 1964. Physical Metallurgy Principles, D. Van Nostarand Company LTD., London.

- ROGERS, C.A., 1988. Novel Design Concepts Utilizing Shape Memory Alloy Reinforced Composite Plates – Part I: Proceedings of the 30th Structural Dynamics, and Materials Conference Mobile, A.L.3-5, April, Vol. 4. Pp. 2011-2017.
- , 1990. Active Vibration and Structural Acoustic Control of Shape Memory Alloy Hybrid Composites: Experimental Results, Journal of Acoustical Society of America, pp. 2803-2811, December.
- SABURI, T. and NENNO, S., 1981. The Shape Memory Effect and Related Phenomena, Proceed, Int. Conf. Solid State Phase Transformations, AIME, Pittsburgh, 1455-1479.
- SABURI, T., NENNO, S. and WAYMAN, C.M, 1979. Shape Memory Mechanism in Alloys, Proceedings of ICOMAT 79, Cambridge, Massachusetts, USA. 24-29 June, 619-632.
- SAITO S. and AZUMA, T. 1983. Transactions of the American Society of Mechanical Engineer, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design 105, 94-100. Balancing of flexible rotor by the complex modal method.
- SERWAY, R.A., 1996. Fen ve Mühendislik için Fizik, Çevirenler: DOĞAN, A., ve ark., Palme Yayıncılık, İstanbul. Vol. 15, 411-413.
- SHIGLEY, J.E., 1977. Mechanical Engineering Design, Mc.Graw-Hill, Inc.
- STOKER, J.J., 1958. Nonlinear Vibration, Vol. II., Interscience Puba Inc. N.Y.
- TANAKA, K., and NAGAKI, S., 1982. A Thermomechanical Description of Material with Internal Variables in the Process of phase Transformation, Ingenieur-Archiv, Vol. 51, pp. 287-299.
- TAUTZENBERGER, P., RAU, G. and COWORKERS, 1989. Properties and Applications of Shape Memory Actuators, The Martensitic Transformation in Science and Technology, (Eds. E. Hornbogen and N. Jost), DGM Informations Gesellschaft, Verlag, Germany, 213-222.
- VERHOEVEN, J.D., 1975. Fundamentals of Physical Metallurgy, Wiley & Sons, New York.
- WATA Y. I and NONAMI K. 1983. Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 49, 1897-1903. Vibration Control of rotating shaft with self – optimizing support (in Japanese).
- WAYMAN, C.M., 1980. Some Applications of Shape Memory Alloys, Journal of Metals, June 1980, 129-137.
- , 1984. Thermoelastic Martensitic Transformations and the Nature of Shape Memory Effect, Ed. Thomas Tsakalakos, Proceedings of the Int. Conf. On Phase Trans. In Solids, Nort Holland Publ. Company, Newyork, 657-667.
- WECHSLER, M.S., 1985. Martensitic Transformations in Solids, Iowa State University Ames, Iowa, USA.
- ZHANG, Y. and HORNBOGEN, E., 1987. Experimental Methods for the Analysis of Transformation Cycles in Shape Memory Alloys, 7. Metallkunde, 78, 777-783.

ÖZGEÇMİŞ

05.05.1970 yılında Kahramanmaraş' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kahramanmaraş' da tamamladı. Yüksek öğrenimini ise 1987 – 1991 yılları arasında Erzurum Atatürk Üniversitesi, Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi, Fizik bölümünden mezun oldu. 1991 – 1992 yıllarında Kahramanmaraş ve Adıyaman illerinde özel dershanelerde Fizik öğretmenliği yaptı. 1992 - 1994 yılları arasında Erzincan İmam – Hatip Lisesi 'nde Fizik öğretmenliği yaptı. 1994 – 1995 yılları arasında Kahramanmaraş' ın çeşitli okullarında yine Fizik öğretmeni olarak çalıştı. 1995 yılında askerlik görevini yaptı. Askerlik dönüşünde Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen – Edebiyat Fakültesi, Fizik bölümüne Yüksek Lisansını yapmak üzere Fen Bilimleri Enstitü kadrosundan Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen bu görevine devam etmekte olup evli ve 1 çocuk babasıdır.



T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ